



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Methodik zur Charakterisierung der akustischen Eigenschaften von Belägen unabhängig von Lärmemissionsmodellen

Méthodologie pour la caractérisation des propriétés acoustiques des revêtements indépendamment des modèles d'émission sonore

Methodology for characterizing the acoustic properties of road surfaces independent of noise emission models

Grolimund + Partner AG
Erik Bühlmann
Felix Schlatter
Johannes Schindler
Daniel Schweizer
Tina Saurer

Forschungsprojekt TRU_20_00A_01 auf Antrag der Arbeitsgruppe Trasse und Umwelt (TRU)

Oktober 2023

1762

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

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

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

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

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

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

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

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



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Methodik zur Charakterisierung der akustischen Eigenschaften von Belägen unabhängig von Lärmemissionsmodellen

Méthodologie pour la caractérisation des propriétés acoustiques des revêtements indépendamment des modèles d'émission sonore

Methodology for characterizing the acoustic properties of road surfaces independent of noise emission models

Grolimund + Partner AG
Erik Bühlmann
Felix Schlatter
Johannes Schindler
Daniel Schweizer
Tina Saurer

Forschungsprojekt TRU_20_00A_01 auf Antrag der Arbeitsgruppe Trasse und Umwelt (TRU)

Oktober 2023

1762

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Erik Bühlmann, Grolimund + Partner AG

Mitglieder

Felix Schlatter, Grolimund + Partner AG

Dr. Johannes Schindler, Grolimund + Partner AG

Daniel Schweizer, Grolimund + Partner AG

Tina Saurer, Grolimund + Partner AG

Begleitkommission

Präsident

Dr. Reto Pieren, EMPA

Mitglieder

Dr. Francine Laferrière, Lombardi SA, Präsidentin AG-TRU

Kirk Ingold, ASTRA

Lucien Pignat, Kanton Wallis

Dr. Michael Gerber, BAFU

Samuel Probst, Weibel AG

Stefano Bradanini, Kanton Aargau

Antragsteller

Arbeitsgruppe Trasse und Umwelt (TRU)

Bezugsquelle

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

Inhaltsverzeichnis

Impressum	4
Zusammenfassung	7
Résumé	9
Summary	11
1 Ausgangslage	13
1.1 Eingliederung des Projekts in die Schweizer Strassenlärmrechnungs-Landschaft	14
1.2 Ziele	15
2 Messverfahren zur akustischen Charakterisierung von Strassenbelägen	17
2.1 Referenzgeschwindigkeiten	17
2.2 Statistical Pass-By (SPB)	18
2.2.1 SPB-Index	19
2.2.2 SPB-Messung gemäss dem Leitfaden Strassenlärm	20
2.2.3 Vergleich SPB-Messungen: Leitfaden Strassen vs. ISO 11819-1	20
2.3 Close-Proximity-Methode (CPX)	21
2.3.1 CPX-Index	22
2.3.2 CPX-Messung gemäss Leitfaden Strassenlärm	22
2.4 Messmethodenvergleich für die Charakterisierung von Belägen	23
2.4.1 Messmethodik L_{Aeq}	23
3 Zusammenhang SPB und CPX	27
3.1 Umrechnung CPX-SPB (Leitfaden Strassenlärm, StL-86+)	27
3.2 Internationale Umrechnungen CPX-SPB (StL-86+)	27
3.3 Umrechnungen mit Schweizer Daten	28
3.3.1 Umrechnung Innerortsbereich (Schweizer Daten)	28
3.3.2 Umrechnung Nationalstrassen CPX vs. SPB @ 110 km/h	30
3.3.3 Zusammenhang Maximalpegel vs. Ereignispegel $L_{A,F,max}$ vs. $L_{A,eq,1h}$ (mit CH-Daten)	31
4 Referenzbelag	35
4.1 Referenzbeläge im internationalen Kontext	35
4.2 Anforderungen an einen Referenzbelag	36
4.2.1 Verfügbarkeit (Langzeit)	36
4.2.2 Verbreitung	37
4.2.3 Stabilität	37
4.2.4 Internationale Bekanntheit	37
4.3 Eignung Belagskandidaten im Schweizer Kontext	37
4.4 Referenzbelag in Lärmrechnungsmodellen	38
4.4.1 StL-86+	38
4.4.2 sonROAD18	38
5 Akustische Charakterisierung Referenzbelag für die Schweiz	41
5.1 Charakterisierung mit CPX: Identifikation Referenzwert	41
5.1.1 Referenzwerte CPX	42
5.1.2 Referenzbelagskandidaten Innerortsbereich	43
5.1.3 Referenzbelagskandidaten Nationalstrasse	44
5.2 Charakterisierung mit SPB: Referenzwerte SPB	45
5.2.1 Referenzwerte SPB-Messungen	46
5.3 Diskussion Referenzbelag	47
6 Methodik für Referenzwertermittlung	49
6.1 Methodik für die Ermittlung Referenzwerte für die Schweiz	49

6.2	Anwendung der Methodik in der Praxis.....	50
6.2.1	SPB-Messungen gemäss ISO11819-1 (SPB – Index).....	50
6.2.2	SPB-Messungen für Event-Energien $1h-L_{A,eq}$	50
7	Fazit	53
7.1	Umrechnungen zwischen verschiedenen Charakterisierungsmethoden	53
7.2	Festlegung Referenzwerte für die Schweiz	54
7.3	Empfehlungen für Umsetzung	55
7.4	Weiterer Forschungsbedarf	56
	Anhänge	57
	Glossar	89
	Literaturverzeichnis	91
	Projektabschluss.....	93

Zusammenfassung

Mit der Ablösung des bisherigen Schweizer Strassenlärmrechnungsmodells StL-86+ durch das neue Strassenlärmrechnungsmodell sonROAD18 im Jahr 2023 verliert die bisherige Charakterisierungsmethode der Beläge ihre Relevanz. Daher wurde mit dem Projekt «*Methodik zur Charakterisierung der akustischen Eigenschaften von Belägen unabhängig von Lärmemissionsmodellen*» ein Projekt initiiert, das die Bewertung und Beurteilung der akustischen Wirkung von Belägen unabhängig von Emissionsmodellen erlauben soll. Zum einen wird untersucht, wie die vorhandenen Messmethoden anzuwenden sind. Zum anderen wird analysiert, wie die Messgrössen in geeigneter Weise aufbereitet werden sollten, um die Beläge im Vergleich zu einer Referenz zu charakterisieren.

Hinsichtlich der Handhabung der Messmethodik für die Charakterisierung von Belägen wird vorgeschlagen, sich näher als bisher an den internationalen Standards zu orientieren. So können die Resultate der beiden Messverfahren von Strassenbelägen **Statistical-Pass-By (SPB, ISO 11819-1)** und **Close-Proximity (CPX ISO11819-2/3)** auch besser international verglichen werden.

Ein Ziel des Projekts war, eine einheitliche, normierte Belagstechnologie zu identifizieren, welche als Referenztechnologie oder als Referenzbelag verwendet werden kann. Dabei sollte die Prämisse umgesetzt werden, dass bei der Wahl des Referenzbelages (0er-Belag «Nullerbelag», oder bisheriger Referenzbelag) nichts ändern sollte. Ebenfalls muss der neue Referenzbelag eine Anbindung an die Strassenlärmrechnungsmodelle StL-86+ respektive sonROAD18 haben. Bei der Auswahl einer Standardbelagstechnologie zeigte sich aber, dass sich für die verschiedenen Referenzgeschwindigkeiten (50 und 80 km/h) keine einheitliche Belagstechnologie finden liess. Die Prämisse, dass sich die akustischen Werte des 0er-Belags für die beiden Referenzgeschwindigkeiten nicht verschieben sollte, kann mit der Definition einer einzigen normierten Belagstechnologie als Referenzbelag nicht erfüllt werden. Dies, weil durch die Prämisse an der «0» festhalten zu wollen, implizit die Referenz aus StL-86+ erhalten bleibt.

Folglich wurde entschieden, den Referenzbelag über die Akustik zu definieren, um so eine eindeutige Referenz zu erhalten. Diese Referenz lässt sich sehr gut mit dem Close-Proximity-Verfahren (CPX) ermitteln und durch die Anbindung an die internationalen Konventionen (ISO-Standards) auch besser vergleichen. So beträgt die akustische Wirkung des hier hergeleiteten Referenzbelages für die beiden Referenzgeschwindigkeiten 50 und 80 km/h 91.3 respektive 97.3 dB (ausgedrückt als CPX-Index). In der Folge wurde versucht, diese akustische Wirkung des Schweizer Referenzbelages auf die Messmethoden SPB umzurechnen und auf die verschiedenen Messgrössen «Maximalpegel» und «Eventenergie» abzugleichen.

Der grosse Vorteil dieser neuen Methodik liegt darin, dass in Bezug auf die Lärmrechnungspraxis keine Änderungen erfordert werden. Denn die bestehenden Schnittstellen werden mit der akustischen Definition des Referenzbelages respektive den ermittelten Umrechnungsmodellen nicht tangiert. Somit kann mit den in diesem Projekt definierten Umrechnungsmodellen zwischen den einzelnen Messgrössen umgerechnet werden bei gleichzeitiger Gewährleistung der Eingabe in die Schweizer Lärmrechnungsmodelle.

Als Resultat sind nun Referenzwerte (0-Werte) für die Schweiz definiert worden, mit welchen Belägen charakterisiert werden können. So kann zum Beispiel die Wirkung eines Belages neu als -3.2 dB(A) relativ zum Schweizer Referenzbelag charakterisiert werden.

Im Rahmen des Projekts hat sich gezeigt, dass die Schweizer Messpraxis für die Charakterisierung von Belägen näher an die internationalen Standards angelehnt werden sollte, um die internationale Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Im vorliegenden Bericht wird eine Methodik präsentiert, mit welcher Beläge zukünftig unabhängig von Lärmemissionsmodellen charakterisiert werden können. Es resultieren Empfehlungen, den aktuell gültigen Leitfaden Strassenlärm [1] dahingehend zu überarbeiten.

Résumé

Avec le remplacement de l'ancien modèle de calcul du bruit routier suisse StL-86+ par le nouveau modèle de calcul du bruit routier sonROAD18 en 2023, la méthode de caractérisation des revêtements utilisée jusqu'à présent perd sa pertinence. C'est pourquoi le projet "*Méthodologie de caractérisation des propriétés acoustiques des revêtements indépendamment des modèles d'émission de bruit*" a été lancé pour permettre l'évaluation et l'appréciation de l'effet acoustique des revêtements indépendamment des modèles d'émission. D'une part, on étudie comment appliquer les méthodes de mesure existantes. D'autre part, il s'agit d'analyser comment les grandeurs mesurées doivent être traitées de manière appropriée afin de caractériser les revêtements par rapport à une référence.

En ce qui concerne le maniement de la méthode de mesure pour la caractérisation des revêtements, il est proposé de s'orienter plus étroitement que jusqu'à présent vers les normes internationales. Ainsi, les résultats des deux méthodes de mesure des revêtements routiers, **Statistical-Pass-By (SPB, ISO 11819-1)** et **Close-Proximity (CPX ISO 11819-2/3)** pourront être mieux comparés au niveau international.

L'un des objectifs du projet était d'identifier une technologie de revêtement uniforme et normalisée pouvant être utilisée comme technologie de référence ou comme revêtement de référence. Il s'agissait de mettre en œuvre la prémisse selon laquelle rien ne devait changer dans le choix du revêtement de référence (revêtement 0, "revêtement zéro", ou revêtement de référence actuel). De même, le nouveau revêtement de référence doit être relié aux modèles de calcul du bruit routier StL-86+ et sonROAD18. Lors de la sélection d'une technologie de revêtement standard, il s'est toutefois avéré qu'aucune technologie de revêtement uniforme ne pouvait être trouvée pour les différentes vitesses de référence (50 et 80 km/h). La prémisse selon laquelle les valeurs acoustiques du revêtement 0 ne devraient pas se décaler pour les deux vitesses de référence ne peut pas être satisfaite par la définition d'une seule technologie de revêtement normalisée comme revêtement de référence. En effet, la prémisse de vouloir s'en tenir au "0" maintient implicitement le lien avec la StL-86+.

Il a donc été décidé de définir le revêtement de référence par l'acoustique afin d'obtenir une référence univoque. Cette référence peut être facilement déterminée par la méthode de proximité (CPX) et mieux comparée grâce au lien avec les conventions internationales (normes ISO). Ainsi, l'effet acoustique du revêtement de référence déduit ici pour les deux vitesses de référence 50 et 80 km/h est de 91,3 et 97,3 dB (exprimé en indice CPX). Par la suite, on a essayé de convertir cet effet acoustique du revêtement de référence suisse en méthodes de mesure SPB et de l'ajuster aux différentes grandeurs de mesure "niveau maximal" et "énergie de crête".

Le grand avantage de cette nouvelle méthode réside dans le fait qu'elle ne nécessite aucun changement dans la pratique de calcul du bruit. En effet, les interfaces existantes ne sont pas affectées par la définition acoustique du revêtement de référence ou par les modèles de conversion déterminés. Ainsi, les modèles de conversion définis dans le cadre de ce projet permettent de passer d'une mesure à l'autre tout en garantissant la saisie dans les modèles suisses de calcul du bruit.

Le résultat est la définition de valeurs de référence (valeurs 0) pour la Suisse, avec lesquelles les revêtements peuvent être caractérisés. Ainsi, par exemple, l'effet d'un revêtement peut désormais être caractérisé comme -3,2 dB(A) par rapport au revêtement de référence suisse.

Dans le cadre du projet, il s'est avéré que la pratique de mesure suisse pour la caractérisation des revêtements devrait se rapprocher des normes internationales afin de garantir la comparabilité internationale. Le présent rapport présente une méthode qui permettra à l'avenir de caractériser les revêtements indépendamment des modèles d'émission de bruit. Il en résulte des recommandations visant à réviser dans ce sens le guide sur le bruit routier actuellement en vigueur [1].

Summary

With the replacement of the old Swiss road noise calculation model StL-86+ by the new road noise calculation model sonROAD18 in 2023, the previous characterisation method for road surfaces will lose its relevance. Therefore, with the project "*Methodology for characterising the acoustic properties of road surfaces independent of noise emission models*", a project was initiated that is to enable the evaluation and assessment of the acoustic effect of road surfaces independent of emission models. On the one hand, it is investigated how the existing measurement methods are to be applied. On the other hand, it will be analysed how the measured noise levels should be processed in a suitable way in order to characterise the road surfaces in comparison to a reference.

With regard to the handling of the measurement methodology for the characterisation of road surfaces, it is proposed to follow international standards more closely than before. In this way, the results of the two measurement methods of road road surfaces **Statistical-Pass-By (SPB, ISO 11819-1)** and **Close-Proximity (CPX ISO11819-2/3)** can also be better compared internationally.

One aim of the project was to identify a uniform, standardised road surface technology that can be used as a reference technology or reference road surface. The premise was to implement that nothing should change in the choice of the reference surface (0-surface "zero-surface", or previous reference surface). Likewise, the new reference road surface must have a connection to the StL-86+ or sonROAD18 road noise calculation models. However, when selecting a standard road surface technology, it became apparent that no uniform road surface technology could be found for the different reference speeds (50 and 80 km/h). The premise that the acoustic values of the 0-road surface should not shift for the two reference speeds cannot be fulfilled with the definition of a single standardised road surface technology as the reference road surface. This is because the premise of wanting to stick to the "0" implicitly preserves the binding to StL-86+.

Consequently, it was decided to define the reference surface via the acoustics in order to obtain a clear reference. This reference can be determined very well with the Close Proximity Method (CPX) and can also be compared better due to the connection to the international conventions (ISO standards). Thus, the acoustic effect of the reference road surface derived here for the two reference speeds 50 and 80 km/h is 91.3 and 97.3 dB respectively (expressed as CPX index). Subsequently, an attempt was made to convert this acoustic effect of the Swiss reference road surface to the SPB measurement methods and to adjust it to the various measured variables "maximum level" and "even-tenergy".

The great advantage of this new methodology is that no changes are required with regard to noise calculation practice. This is because the existing interfaces are not affected by the acoustic definition of the reference road surface or the determined conversion models. Thus, the conversion models defined in this project can be used to convert between the individual measured quantities while at the same time guaranteeing the input into the Swiss noise calculation models.

As a result, reference values (0-values) have now been defined for Switzerland, with which road surfaces can be characterised. For example, the effect of a road surface can now be characterised as -3.2 dB(A) relative to the Swiss reference road surface.

The project has shown that Swiss measurement practice for the characterisation of road surfaces should be more closely aligned with international standards in order to ensure international comparability. In this report, a methodology is presented with which road surfaces can be characterised in the future independently of noise emission models. It results in recommendations to revise the currently valid guideline on road noise (Leitfaden Strassenlärm) [1] to this effect.

1 Ausgangslage

Strassenlärm ist ein weit verbreitetes Problem in vielen Städten und Gemeinden weltweit. Es handelt sich dabei um Lärm, der durch den Verkehr auf Strassen und Autobahnen verursacht wird. Strassenlärm kann sowohl für Anwohner als auch für Passanten und Verkehrsteilnehmer unangenehm sein und zu einer Vielzahl von Gesundheitsproblemen führen [2]. Zu den typischen Auswirkungen von Strassenlärm zählen Schlafstörungen, Stress, Konzentrationsschwierigkeiten und eine allgemeine Beeinträchtigung der Lebensqualität. Zu den Massnahmen zur Verringerung des Lärmproblems können beispielsweise die Lärmschutzwände, Temporeduktionen, Verkehrslenkungen oder lärmarme Beläge umgesetzt werden.

Strassenlärm setzt sich hierbei aus verschiedenen Quellen zusammen. Bei der Generierung von Strassenlärm gibt es hauptsächlich zwei Komponenten: Die Komponente des Antriebsgeräuschs und die Rollgeräuschkomponente. Mit zunehmender Geschwindigkeit gewinnt die Komponente des Rollgeräuschs deutlich an Wichtigkeit. In der folgenden Abb. 1 ist dieses Verhältnis zwischen den beiden Komponenten aufgezeigt. Dabei ist ersichtlich, dass bereits ab tiefen Geschwindigkeiten von >30 km/h der Anteil des Rollgeräuschs bereits über 62.5% ausmacht.

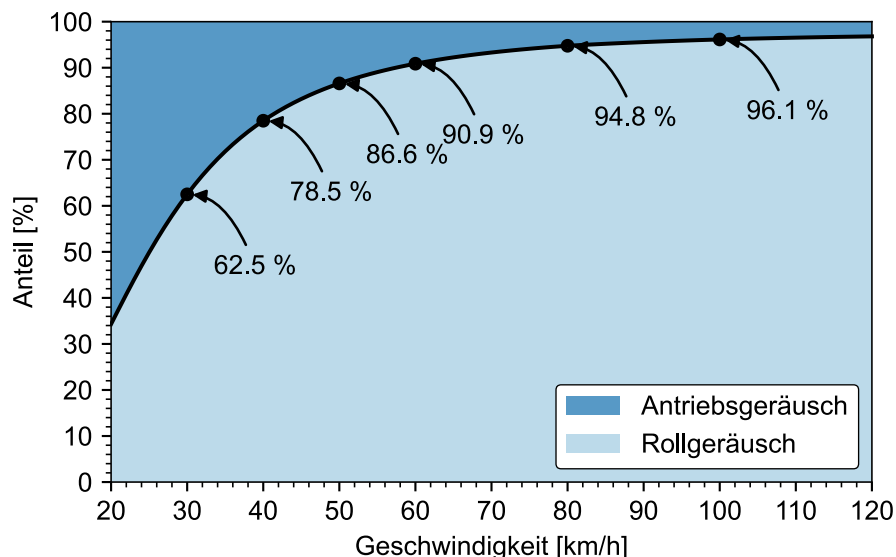


Abb. 1: Verhältnis Rollgeräusch zu Antriebsgeräusch, berechnet mit dem Lärmberechnungsmodell sonROAD18 für 8% Schwerverkehrsanteil und KB-0-Belag [3].

Einflussfaktoren, welche das Rollgeräusch beeinflussen, sind neben den eingesetzten Reifen, die Geschwindigkeit und die Beschaffenheit der Belagsoberfläche. Dass der Belag einen Haupteinfluss auf die Lärmbelastung hat, zeigt sich in der folgenden Abb. 2. Dabei zeigt sich, dass je nach Korngrösse verschiedenste Lärmreduktionen möglich sind. So gibt es von den lautesten, bis zu den leisesten Belägen durchaus Unterschiede von 10 Dezibel und mehr.

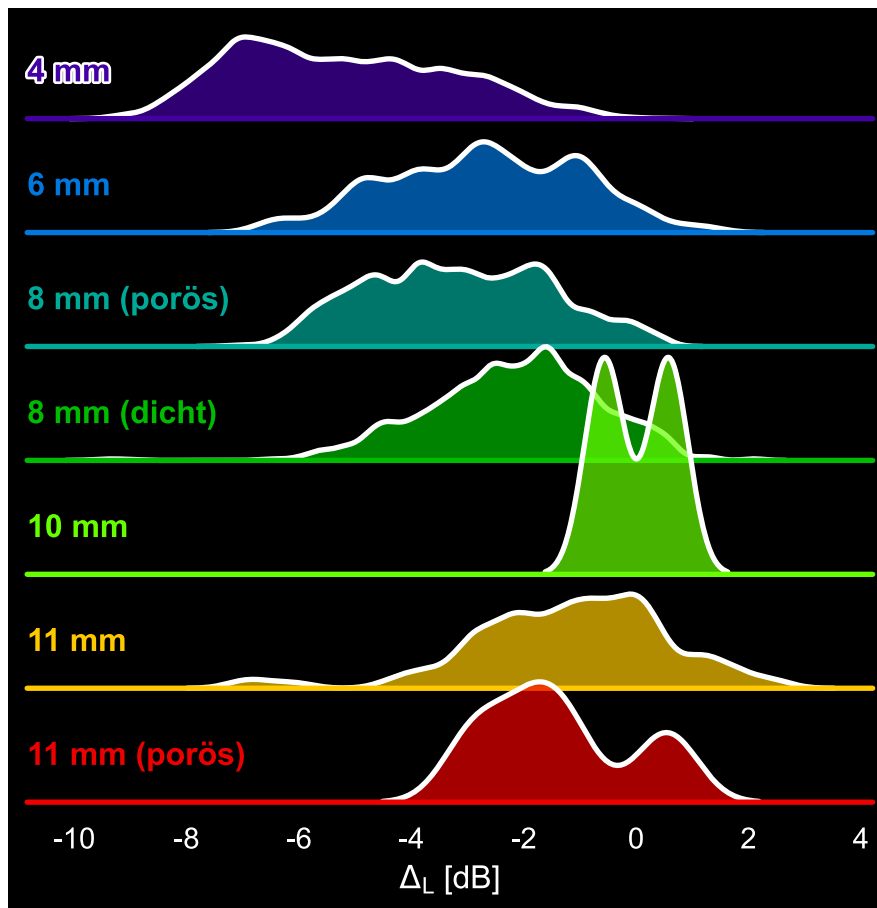


Abb. 2: Einflussfaktor Belag (gemessen mit dem Verfahren CPX). Dabei charakterisiert die Bezeichnung ΔL den KB-Wert (Differenz zur Emission StL-86).

Folglich ist es äusserst entscheidend, wie die Beläge untereinander verglichen werden können. Denn wie Eingangs bereits erwähnt wurde, hat der Belag einen grossen Einfluss auf die effektive Lärmbelastung, welche von den Strassen ausgeht. Um aber einen Vergleich herzustellen, müssen die Lärmemissionen auf eine gemeinsame Referenz bezogen werden, sodass die Beläge miteinander verglichen werden können.

1.1 Eingliederung des Projekts in die Schweizer Strassenlärm-berechnungs-Landschaft

Bis ins Jahr 2023 ist für die Lärmberechnung in der Schweiz das Modell StL-86+ von Gültigkeit. [4] Dieses Modell ist in den 80er Jahren entwickelt worden und basiert folglich auch auf dem Fahrzeugpark aus dieser Zeit. Dieser hat sich aber natürlich deutlich gewandelt in den letzten 40 Jahren. Folglich wird mit der Einführung von sonROAD18 neben der Anpassung an die heutige Fahrzeugflotte ebenfalls eine Anpassung an der Berechnungsmethode (Separation von Roll- und Antriebsgeräusch) vorgenommen. Seit Juli 2023 wird sonROAD18 zur Anwendung vorgeschrieben¹.

Neben der Strassenlärm-berechnung und -beurteilung hängen auch diverse Messmethoden direkt am Modell StL-86+. Allen voran ist die Charakterisierung von Belägen eng an das Modell StL-86+ gekoppelt. So werden Belagsgütemessungen nach dem aktuell noch

¹ https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/laerm/fachinfo-daten/faq_son-road18.pdf.download.pdf/sonROAD18.%20Frequently%20asked%20questions%20FAQs.%20Version%201.0.%20Stand%202022.02.22.pdf (Stand Mai 2023)

gültigen Leitfaden Strassenlärm jeweils als Abweichung zum Referenzmodell StL-86+ angegeben. [5] Mit dem Ablösen des StL-86+ Strassenlärberechnungsmodells müssen diese Charakterisierungen dementsprechend angepasst werden, da die Charakterisierung nach einem veralteten Modell nicht sinnvoll erscheint.

Das neue Strassenlärberechnungsmodell sonROAD18 hat zur Berücksichtigung von Belägen bereits ein spektrales Umrechnungsmodell definiert, das die Umrechnung von gemessenen PKW-CPX-Spektren in sonROAD18 Belagskorrekturen sicherstellt [6], [7]. Mit diesem Modell ist es möglich direkt aus CPX-Messungen die zugehörigen sonROAD18 Belagskorrekturen zu ermitteln und Strassenlärberechnungen durchzuführen. Diese Umrechnung erlaubt theoretisch auch eine Charakterisierung von Belägen: Diese würde vereinfacht als Abweichung zum sonROAD18 Referenzbelag beschrieben werden. Allerdings ist damit die internationale Vergleichbarkeit von der akustischen Belagsgüte wiederum limitiert. Ebenso ist diese Methode für die Charakterisierung von Belägen nicht direkt geeignet, da der Fokus bei der akustischen Charakterisierung einzig auf dem PKW-Reifen liegen würde. Zum Beispiel ist für die Optimierung von Belägen auf Nationalstrassen eine kombinierte Betrachtung des Belages in Bezug auf die PKW- und LKW-Reifen-Fahrbahngeräusche zwingend notwendig, da ein substantieller Anteil der Lärmemission von den Rollgeräuschen des Schwerverkehrs stammt.

Die neu zu entwickelnde Charakterisierung von Belägen unterliegt somit verschiedenen Rahmenbedingungen, welche zwingend eingehalten werden müssen:

- Kompatibilität zu StL-86+ muss gewährleistet sein. (Umrechnung von alten Messdaten)
- Die Charakterisierung von Belägen soll übertragbar sein in sonROAD18.
- Die aktuelle Referenz (0-Wert) soll beibehalten werden

1.2 Ziele

Das folgende Projekt soll eine Methodik entwickeln, mit welcher die Wirkung von Belägen unabhängig des Lärmemissionsmodells charakterisiert werden kann. Folgende Ziele sollen dabei erreicht werden:

1. Entkoppelt die akustische Beschreibung von Belägen von StL-86+
2. Legt Methodik für die Bestimmung von Referenzwerten für aktuelle Fahrzeugflotten fest
3. Legt fest, wie Veränderungen der Emissionen in der Fahrzeugflotte überprüft und bestimmt werden können. (Trennung Flotteneinfluss von Belag)
4. Prüft Auswirkungen auf vorhandene Datenreihen
5. Testet die Methodik in der Praxis

Ebenso sollen in Bezug auf die Beurteilung von Belägen methodische Abklärungen zu den Messverfahren und deren Anwendung in der Schweiz vorgenommen werden. Dies umfasst insbesondere die folgenden Punkte:

- Methodische Abklärungen zu SPB-Messungen in der Schweiz:
 - Was ist die aktuelle Messpraxis? Welche (zukünftigen) Anforderungen ergeben sich in Bezug auf die Messpraxis?
- Anbindung an die neue Normenversion ISO 11819-1:2021 [8] und deren Umsetzung
- Abklärung zur zusätzlichen Verwendung von L_{eq} : Messungen und Datennormalisierungen
- Bestimmung des Referenzbelag und der entsprechenden Referenzwerte
 - Wie ist der Schweizer Referenzbelag charakterisiert?
- Modellanbindung und Anbindung an bestehende Datenreihen
 - Die Umrechnungsmethoden/Schnittstellen zu den bestehenden Modellen müssen eindeutig definiert sein.

- Gap-Analyse: Umrechnungsmodell CPX (dicht/porös), Datengrundlage allgemein, Normierungsbedarf

2 Messverfahren zur akustischen Charakterisierung von Strassenbelägen

In diesem Kapitel werden die möglichen Messverfahren zur Bestimmung der akustischen Charakterisierung von Belägen präsentiert. Weiter wird in diesem Kapitel auch auf die Referenzgeschwindigkeiten eingegangen, welche für die Charakterisierung von Belägen wichtig sind, da die Lärmentstehung von Strassen stark geschwindigkeitsabhängig ist.

Für die akustische Vermessung von Strassenbelägen gibt es gemäss der internationalen Standardisierungsorganisation ISO grundsätzlich zwei direkte Methoden, welche in den Standards ISO-EN SN 11819-1 respektive 11819-2 beschrieben werden [8], [9]. Diese beiden Methoden fassen sich als *Statistisches Vorbeifahrtverfahren* (SPB) und die *Close-Proximity-Methode* (CPX) zusammen und charakterisieren sich durch die folgenden Eigenschaften.

In der Schweiz regelt der Leitfaden Strassenlärm [1] den Einsatz von lärmindernden Strassenbelägen und vereinheitlicht den Planungshorizont. Der Leitfaden besteht aus einem Hauptteil, dem Sanierungskonzept sowie verschiedenen technischen Anhängen. Für die akustische Belagsgütemessung sind im Anhang 1c die Methoden zur Erfassung der akustischen Belagsgüte aufgeführt [5]. Grundsätzlich sind in der Schweiz gemäss dem Leitfaden Strassenlärm dieselben Messmethoden zur Charakterisierung der Beläge vorgesehen, wie im zugrundeliegenden ISO-Standard. Allerdings werden gemäss dem Leitfaden Strassenlärm gewisse Ergänzungen gefordert, welche nachfolgend aufgeführt und erläutert werden.

2.1 Referenzgeschwindigkeiten

Die Lärmentstehung ist stark geschwindigkeitsabhängig. Im ISO-Standard 11819-1:2021 [8] werden für SPB-Messungen drei Hauptgeschwindigkeiten aufgeführt. Diese werden unterteilt nach der Geschwindigkeitskategorie der Strasse (Tief, Mittel und Hoch). In der Schweiz werden gemäss dem Leitfaden Strassenlärm jedoch nur die beiden Referenzgeschwindigkeiten 50 und 80 km/h unterschieden [5]. So gibt es für StL-86+ nur Umrechnungsmodelle für die Nationalstrasse und den Innerortsbereich.

Tab. 1: Referenzgeschwindigkeiten für SPB-Messungen gemäss ISO 11819-1.

Fahrzeugkategorie	Tief (45-64 km/h)	Mittel (64-99 km/h)	Hoch (≥ 100 km/h) ²
PKW (P)	50 km/h	80 km/h	110 km/h
LKW (H)	50 km/h	80 km/h	80 km/h

Für CPX-Messungen gelten gemäss dem Standard EN ISO 11819-2 [9] dieselben Referenzgeschwindigkeiten. Da aber in der Schweiz das CPX-Verfahren mit einem Messanhänger zur Anwendung kommt und auf Nationalstrassen mit einem Anhänger höchstens

² LKWs verkehren bei tieferen Geschwindigkeiten aufgrund von Geschwindigkeitsbeschränkungen.

100 km/h (vor dem 1.1.2021 lediglich 80 km/h) gefahren werden darf, ist für die CPX-Methode höchstens die Referenzgeschwindigkeit von 80 km/h zulässig.

2.2 Statistical Pass-By (SPB)

Mit der ISO-Methode «ISO 11819-1: Akustik - Messung des Einflusses von Strassenoberflächen auf Verkehrsgläusche - Teil 1: Statistisches Vorbeifahrtverfahren» wird mittels statistischer Vorbeifahrtmessungen ein Gesamtpegel $L_{SPB:P,v_{ref}}$ für leichte Fahrzeuge und $L_{SPB:H,v_{ref}}$ für schwere Fahrzeuge ermittelt. Bei den schweren Fahrzeugen werden hierbei die Kategorien Ein- und Multiachsen kombiniert. Diese Pegel setzen sich in der Norm als geschwindigkeitsnormalisierte und aggregierte $L_{A,F,max}$ -Pegel zusammen.

Bei der Statistical-Pass-By Methode werden in einem definierten Abstand (7.5 m Entfernung von der Fahrspurmitte und auf einer Höhe von 1.2 m) einzelne Vorbeifahrten mit einem Mikrophon erfasst. Dabei sollen nur Vorbeifahrts-Ereignisse erfasst werden, bei welchen sich der Pegel im Vergleich zur vorherigen oder nachfolgenden Fahrzeugvorbeifahrt um mehr als 6 dB unterscheidet: (Vgl. Abb. 3). Bei den im Leitfaden Strassenlärm vorgeschriebenen L_{eq} -Messungen beträgt die Differenz 10 dB.

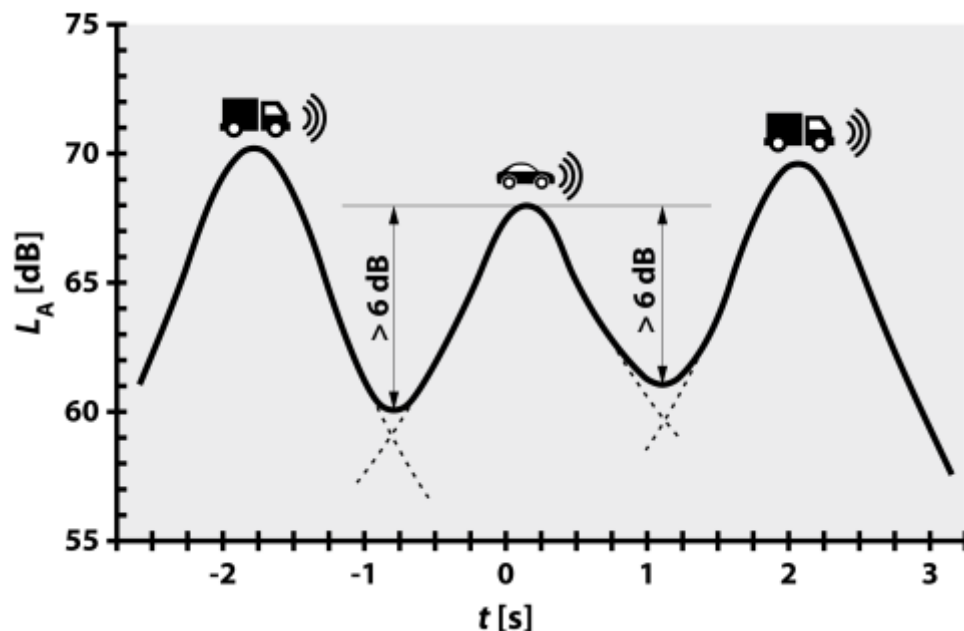


Abb. 3: Selektionskriterium von einer gültigen Einzelvorbeifahrt. Quelle: ISO-11819-1 [8]

Bezüglich der Standortwahl gibt es einige Einschränkungen. So sollte der Belag auf mindestens 40 m um den Messpunkt homogen ausfallen. Ebenso muss im Abstand von ≥ 3.75 m vom Mikrophon der Belag mit ähnlicher Schallabsorptionseigenschaft liegen. Eine genauere Beschreibung ist der Abb. 4 zu entnehmen.

- $W_P = 0.9$
- $W_H = 0.1$
- Mittlere Geschwindigkeit (80 km/h):
 - $W_P = 0.8$
 - $W_H = 0.2$
- Hohe Geschwindigkeit (110/80 km/h):
 - $W_P = 0.7$
 - $W_H = 0.3$

2.2.2 SPB-Messung gemäss dem Leitfaden Strassenlärm

Im Anhang 1c des Leitfadens Strassenlärm [5] wird zusätzlich zu den Vorschriften gemäss ISO 11819-1 auch eine L_{eq} -Messung vorgeschrieben. Diese ist in einem Abstand von 5 m zur Fahrspurmitte und in einer Höhe von 1.5 m durchzuführen. Mit dieser Methode lässt sich die Belagsgüte direkt als Abweichung zum Referenzmodell StL-86+ ermitteln. Dabei sollen die drei Fahrzeugkategorien Personenwagen, zweiachsige LKW und mehrachsige LKW unterschieden werden. In der Praxis genügt die Berücksichtigung der zwei Kategorien Personenwagen und Lastwagen.

Im Gegensatz zur $L_{A,max}$ -Messung (Maximalpegel) erfordert eine L_{eq} -Messung (Event-Energie) immer noch eine Berücksichtigung der zeitlichen Komponente (Dauer eines Ereignisses). Gemäss dem Leitfaden Strassenlärm soll ein Ereignis innerhalb der 10-dB-Down-Grenze erfasst werden. Das bedeutet, dass alle Schallpegel, die 10 dB unterhalb des maximal auftretenden L_{eq} liegen, zum Ereignis gehören und erfasst werden sollten (siehe Abb. 3). Diese Grenze ist strenger als im internationalen Standard vorgeschrieben.

2.2.3 Vergleich SPB-Messungen: Leitfaden Strassen vs. ISO 11819-1

Die folgende Tab. 2 listet die Unterschiede des Leitfadens Strassenlärms [5] im Vergleich zum zugrunde liegenden ISO Standard [5] auf. Hierbei gilt es zu bemerken, dass der Leitfaden Strassenlärm auf dem ISO-Standard aufbaut.

Tab. 2: Methodenvergleich SPB - Messungen zwischen dem Leitfaden Strassenlärm und dem zugrundeliegenden ISO-Standard ISO-11819-1.

	ISO 11819-1:2021 [8]	Leitfaden Strassenlärm [5]
Ziel	Ermittlung akustische Belagsgüte	Ermittlung akustische Belagsgüte
Fahrzeugkategorien	3 (PW, H2, H3+)	5 (1 Pkw, 2 Lkw, 2a zweiachsige Lkw, 2b mehrachsige Lkw)
Mikrofonposition	7.5m/1.2m	7.5m/1.2m 5m/1.5m
Alternative Mikrofonposition	3.0m ± 0.1m (Anpassungen notwendig)	Keine
Messgrössen	$L_{A,F,max,@7.5m}$ $L_{f,F,max,@7.5m}$	$L_{A,F,max,@7.5m}$ $L_{f,F,max,@7.5m}$ $L_{A,eq,@5m}$
Frequenzumfang	100 – 10'000 Hz	20 – 5000 Hz
Geschwindigkeitsmessung	Fz-Geschwindigkeit mit Standardunsicherheit weniger als ±2.5%	Fz-Geschwindigkeit mit Standardunsicherheit weniger als ±3%
Längsneigung am Messort	<2%	< 1%
Mindestanzahl Fz	Kat. P (PKW): 100 Kat H (LKW): 40	100 PW 30 LKW
Auswahl	Roll- über Antriebsgeräusch dominieren Geschwindigkeit in einem Band von ±15%	-Akustisch eindeutig separiert -Aussergewöhnliche verwerfen -konstante Geschwindigkeit
Bodenbelag zwischen Mikrofon und Strasse	Flach und weitgehend akustisch hart	Keine Anforderung
Umgebung	30 x 22m	20 x 27.5m
Lufttemperatur	5 - 35°C	5-30°C
Belagstemperatur	Keine Anforderungen	Zwischen 5°C und 50°C
Temperaturkorrektur	Methode T Luft (-0.1 dB/°C; variiert nach Belagstyp & Geschwindigkeit)	Belagstemperatur. 20°C Variiert nach Belagstyp
Wind	< 5m/s	< 5m/s
Schwellwert zu Hintergrundgeräusch (dB-Down Anforderung)	>6 dB	>10 dB

Wie der Tab. 2 zu entnehmen ist, gibt es einige Unterschiede zwischen dem Leitfaden Strassenlärm und der zugrundeliegenden ISO-Norm. Allen voran ist das Temperaturkorrekturschema unterschiedlich zwischen den beiden Regelungen. Daher ist eine Anpassung des Leitfadens Strassenlärms zwingend notwendig. Ebenfalls ist eine genauere Definition der $L_{A,eq}$ -Messungen anzustreben. Weiter ist der Frequenzumfang dem internationalen Standard anzugleichen.

2.3 Close-Proximity-Methode (CPX)

Mit der Close-Proximity Methode (CPX) gemäss der ISO 11819-2/3 [9], [10] kann die akustische Qualität von Belägen direkt und über eine grössere räumliche Distanz erfasst werden. Eine Beurteilung ist somit für ganze Strassenabschnitte möglich. Die Messung erfolgt dabei meist in einem schallabsorbierend ausgekleideten Anhänger im unmittelbaren Nahfeld der Räder an je zwei Mikrofonpositionen. Diese Mikrofone sind in einem Winkel von 45° vorne und hinten am Rad angeordnet. Die Messung erfolgt mit zwei verschiedenen Reifentypen (P1 (PKW) und H1 (LKW)). Die Anforderungen an die Reifen sind dabei in der der ISO TC 11819-3 genau spezifiziert.

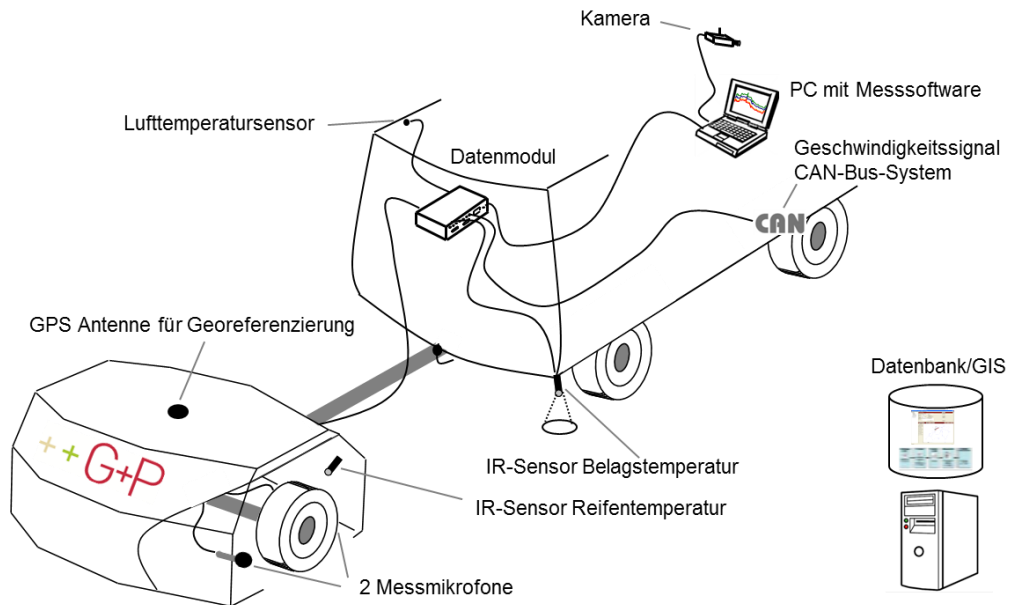


Abb 5: Schematische Illustration der Messprinzip CPX

2.3.1 CPX-Index

Der CPX-Index ist in der ISO-11819-2 als empfohlene Grösse angegeben, welche verwendet werden kann, um Beläge zu charakterisieren. Dabei werden die Beiträge aus den beiden Messreifen anhand einer definierten Gewichtung gemittelt addiert:

$$L_{CPX:I,v_{ref}} = \left(0.5 * L_{CPX:P,v_{ref}} + 0.5 * L_{CPX:H,v_{ref}} \right) \text{ dB} \quad (1)$$

$L_{CPX:P,v_{ref}}$ CPX-Pegel, der leichte Fahrzeuge im Verkehrsstrom mit der Referenzgeschwindigkeit v_{ref} repräsentiert, bestimmt unter Verwendung des Testreifens P

$L_{CPX:H,v_{ref}}$ CPX-Pegel, der Lastkraftwagen im Verkehrsstrom mit der Referenzgeschwindigkeit v_{ref} repräsentiert, bestimmt unter Verwendung des Testreifens H

Mit dieser Methode können die Messresultate beider Reifen in einfacher Art und Weise aggregiert werden, wodurch eine Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Messungen ermöglicht wird.

Die Gewichtung von 50/50 entspricht somit gemäss dem Standard ungefähr der gleichmässigen Verteilung der Schallemissionen von leichten Fahrzeugen und Lastwagen. Dies sei ungefähr einer Strasse von 80 % leichten Fahrzeugen und 20 % LKWs bei einer Geschwindigkeit von je 80 km/h. Dies sei auch der Fall bei einer Autobahn mit 75% leichten Fahrzeugen und 25% LKWs bei (115 km/h respektive 85 km/h).

2.3.2 CPX-Messung gemäss Leitfaden Strassenlärm

Bei der CPX-Messung gibt es zwischen dem Leitfaden Strassenlärm und dem internationalen Standard keine grösseren Abweichungen. Einzig in der Beurteilung der Beläge wird

die Umrechnung nach StL-86+ vorgeschrieben. Diese ist im nächsten Kapitel näher ausgeführt.

2.4 Messmethodenvergleich für die Charakterisierung von Belägen

Die beiden Charakterisierungsmethoden «SPB» und «CPX» unterscheiden sich hinsichtlich der Erfassung von Strassenlärm. Während die CPX-Methode die Belagsgüte in unmittelbarer Nähe zum Entstehungsort erfasst (Abstand Quelle-Mikrofon = 20 cm, Nahfeld) und dadurch einzig das Rollgeräusch erfasst, wird mit der SPB-Messung die Gesamtemission (Antriebs-, Roll- und (Umströmungsgeräusch)) von den Fahrzeugen erfasst (Abstand Quelle-Mikrofon = 7.5 m bzw. 5 m). Des Weiteren hat bei einer SPB-Messung die gesamte Umgebung mit diversen potenziellen Störgeräuschen einen deutlich grösseren Einfluss auf die gemessenen Pegel als bei einer CPX-Messung. Dies, da der Schall bei der SPB-Messung eine grössere Distanz zurücklegt und dementsprechend mit der Umgebung interagieren kann. Die Unterschiede bezüglich den Messarten sind hierbei in der folgenden Tabelle erläutert.

Tab. 3: Vergleich von SPB vs. CPX-Messungen. (ISO 11819-1- vs. ISO 11819-2)

	SPB (ISO-11819-1)	CPX (ISO-11819-2/3)
Flächendeckende Erfassung	Nein	Ja
Ausbreitungseffekte	Teilweise	Kaum
Erfasste Lärmquellen	Antrieb + Rollgeräusch	Rollgeräusch
Ermittelte Lärmpegel	$L_{AF,max@7.5m}$; $L_{A,eq}$...	$L_{AF,max}$ (Nahfeld)

2.4.1 Messmethodik L_{Aeq}

Bei den SPB-Messungen können, neben den $L_{A,F,max}$ -Pegel die Event-Energien erfasst werden. Diese Messungen erfordern allerdings noch eine weitere Grösse: Nämlich die Ereignisdefinition. Im Leitfaden Strassenlärm wird diese als 10-dB-Down Grösse angegeben. Allerdings wird damit ein Teil der Event-Energie des Ereignisses abgeschnitten, denn die Vorbeifahrt ist theoretisch unendlich lang. Bei zu frühem Abschneiden wird somit ein grosser Teil der Energie abgeschnitten (bei 10 dB Abschnittskriterium verpasst man bis zu 1 dB Gesamtenergie). (Vgl. Abb 6)

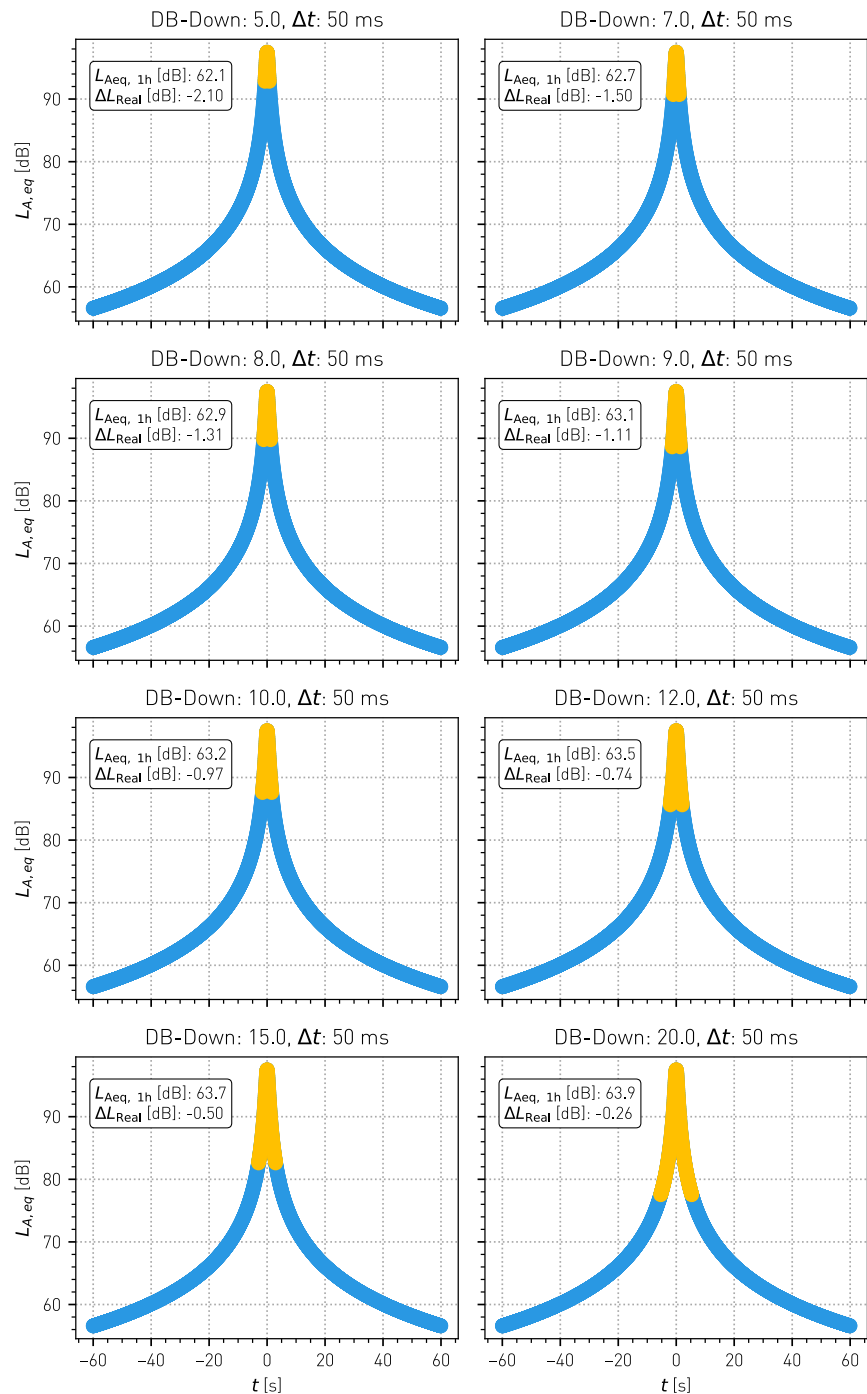


Abb 6: Theoretische Vorbeifahrtsimulation von Vorbeifahrenden und Berechnung von Pegeln in Abhängigkeit des Abschneidekriteriums (dB-Down) bei einer Zeitauflösung von 50 ms.

Der Einfluss, wie viel Energie man verpasst, ist von verschiedenen Faktoren abhängig:

- Umgebungslärm
- Richtcharakteristik des Fahrzeugs
- Geschwindigkeit des Fahrzeugs
- SNR (Signal to Noise Ratio → wie laut ist das Fahrzeug im Vergleich zum restlichen Lärm)
- Wie laut sind die nebenan vorbeifahrenden Fahrzeuge?

Folglich sind für eine standardisierte Messung folgende Punkte weiter zu klären:

- Ermittlung einer standardisierten Methode für die Erfassung einer Gesamtvorbeifahrt
- Kompensation von fehlenden Energien
- Handhabung bei Energiebeiträgen von vorangehenden/nachfolgenden Fahrzeugen sowie von Fahrzeugen auf nebenanliegenden Fahrspuren

3 Zusammenhang SPB und CPX

Da beide Messmethoden zur Charakterisierung von Belägen (SPB und CPX) darauf abzielen, den Belag akustisch zu beschreiben, ist es essenziell, den Zusammenhang zwischen diesen beiden Messverfahren zu kennen. In diesem Kapitel werden bekannte Umrechnungsmodelle und die Zusammenhänge zwischen diesen Messgrössen dargestellt. Es gilt hierbei zu bemerken, dass beide Messverfahren für die Charakterisierung von Belägen verwendet werden können. Allerdings werden je Methode unterschiedliche Messgrössen erfasst. Während die CPX-Messungen die Akustik im Nahfeld erfasst, wird bei den SPB-Messungen die Akustik über eine grössere Distanz gemessen. Ebenso wird bei der SPB-Messung bei der Vermessung von Event-Energien ($L_{A,eq}$) über die Vorbeifahrt integriert. Dies steht im Gegensatz zur $L_{A,F,max}$ -Messung, welche hauptsächlich die seitliche Abstrahlung erfasst.

3.1 Umrechnung CPX-SPB (Leitfaden Strassenlärm, StL-86+)

Für die Umrechnung zwischen den beiden Messverfahren CPX und SPB wird im Anhang 1c des Leitfaden Strassenlärms [5] die folgenden Beziehungen angegeben zur Berechnung gegenüber des Referenzbelags des Emissionsmodells StL86+:

$$KB_{50km/h,P} = 1.2468 * L_{CPX,P} - 112.3 \quad (2)$$

$$KB_{50km/h,LKW} = 1.3617 * L_{CPX,H} - 126.16 \quad (3)$$

Für die Referenzgeschwindigkeit 80 km/h sind folgende Zusammenhänge ermittelt worden [5]:

$$KB_{80km/h,P} = 1.5268 * L_{CPX,P} - 148.31 \quad (4)$$

$$KB_{80km/h,LKW} = 1.3954 * L_{CPX,H} - 135.86 \quad (5)$$

Eine Bestimmung der Umrechnungskoeffizienten ist äusserst aufwändig. So muss für eine genügende Datengrundlage eine Vielzahl von Belägen abgedeckt werden und auf jedem dieser Beläge ein Wertepaar an SPB und CPX-Messungen erhoben werden. Die oben aufgeführte Ermittlung wurde mit Messdaten aus dem Jahr 2010 erhoben und beschreibt typische Schweizer Beläge.

3.2 Internationale Umrechnungen CPX-SPB (StL-86+)

Wie bereits im vorhergehenden Kapitel 3.1 beschrieben, wird in der Schweiz ein Umrechnungsmodell (Lineare Regression) zwischen SPB- und CPX-Werten verwendet [5]. Mit diesem Umrechnungsmodell kann für einen gemessenen CPX-Pegel direkt die zu erwartenden Lärmreduktion durch den Belag bezüglich dem Modell StL-86+ berechnet werden. Auffallend dabei ist, dass die Steigung der linearen Regression nicht 1.0 beträgt. So wird für jedes Dezibel, das mit dem CPX-Verfahren gemessen wird, eine höhere Lärmwirkung am Strassenrand gemessen. Da die ISO-Norm 11819-1 primär für $L_{A,F,max}$ – Messungen ausgerichtet ist, gibt es wenige bisherige Studien, welche sich mit dem Zusammenhang L_{Aeq} vs. L_{CPX} auseinandersetzen. Eine dieser Studie ist im Forschungsprojekt ROSANNE prä-sentiert worden [11].

Dabei wurde für PKWs folgende Beziehung zwischen $L_{A,F,max}$ und dem 1s-Ereignispegel $L_{A,E}$ in Abhängigkeit der Geschwindigkeit v gefunden:

$$L_{A,F,max} - L_{A,E} = 2.79 * \ln(v) - 13.5 \text{ dB} \quad (6)$$

Für LKWs verändert sich die Beziehung nur geringfügig

$$L_{A,F,max} - L_{A,E} = 2.23 * \ln(v) - 13.0 \text{ dB} \quad (7)$$

Umgekehrt gibt es verschiedenste Studien, welche die $L_{A,F,max}$ -Messungen mit den CPX-Messungen vergleichen. In der folgenden Tab. 4 ist eine Auswahl an Studien aufgeführt, welche den Zusammenhang zwischen CPX-Messungen und SPB- $L_{A,F,max}$ -Messungen aufzeigt.

Tab. 4: Zusammenstellung ausgewählter Studien, welche den Zusammenhang zwischen CPX und L_{max} untersucht haben.

Studie	Steigung	v [km/h]	Bemerkung	Belagstypen
ROSANNE, D2.3[11]	$L_{AFmax} = 0.95 \cdot CPXP - 15.6$ $L_{AFmax} = 0.65 \cdot CPXH + 24.0$	50-110		SMA/AC Porous...
Cesbron, Klein (2017) [12]	$L_{AFmax} = 1.0 \cdot LAeq_Cpx - 20.6$	80	CPX, von 400 - 4000 Hz Kein CPX-Trailer, OBSI	AC LOA SMA8 ...
Kragh et al. (2013) [13]	$L_{AFmax} = 0.9128 \cdot CPXP - 12.853$	50-110	σ ca. 1 dB Nur PKW	SMA/AC Porous
	$L_{AFmax} = 0.9596 \cdot CPXP - 16.991$	50		
	$L_{AFmax} = 1.00 \cdot CPXP - 21.477$	80		
Beckenbauer et al. (2016)[14]	L_{AFmax} Spektrales Umrechnungsmodell mit ~1:1-Steigung	80-120	Nur für die Berechnung von L_{AFmax} und $v \geq 80$ km/h	

Die Erfahrung aus der internationalen Literatur zeigt somit deutlich, dass sich zwischen CPX-Pegeln und den aus SPB-Messungen ($L_{A,F,max}$ in 7.5 m) für PKW einen Zusammenhang ableiten lässt, der nahe der 1:1 Beziehung steht.

3.3 Umrechnungen mit Schweizer Daten

3.3.1 Umrechnung Innerortsbereich (Schweizer Daten)

Den im obigen Kapitel erwähnten Zusammenhang zwischen CPX (L_{CPX}) und SPB ($L_{A,F,max}$) lässt sich auch für die Schweiz herleiten, wie sich in Abb. 7 zeigen lässt. Hierbei wurde die Datenbank von G+P nach SPB-Messungen durchsucht und die Korrelation zu den $L_{A,F,max}$ Werten hergestellt. Dabei gilt zu beachten, dass die Messungen zeitlich bis zu 1 Jahr auseinander liegen können. Ebenso ist in Bezug auf die $L_{A,F,max}$ – Messung kein Filter bezüglich der Standortkriterien angewandt worden. So wurde in der Vergangenheit der $L_{A,F,max}$ -Messung in 7.5 m Distanz häufig keine grosse Beachtung geschenkt und so bei der Standortauswahl in der Vergangenheit Kompromisse eingegangen, was sich auf die Messdatenqualität der 7.5 m $L_{A,F,max}$ – Messung auswirkt. Dies äussert sich nun in dem in Abb. 7 gezeigten Zusammenhang.

Wie sich zeigt, sind mit denselben Messtandorten und der Betrachtung des $L_{A,eq}$ eine deutlich andere Steigung (1.16) zu verzeichnen.

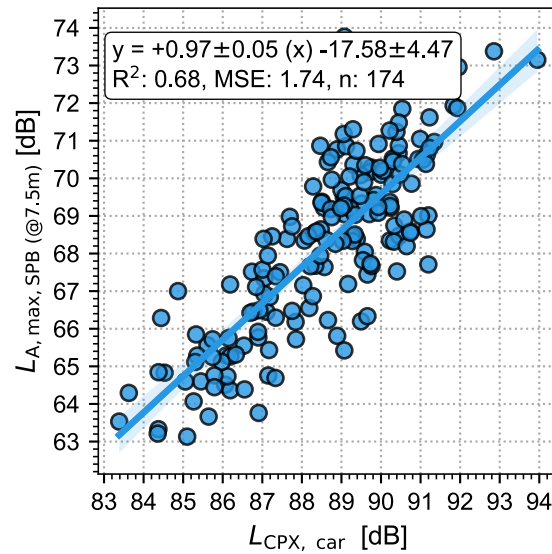


Abb. 7: Zusammenhang CPX P vs. SPB (PW) $L_{A,F,max}$ @7.5m für den Innerortsbereich. Dabei ist zu beachten, dass die Wertepaare nicht explizit zueinander gemessen wurden, sondern nur gesamthaft zusammengefügt wurden. So können die Messdaten zwischen CPX und SPB bis zu 1 Jahr auseinanderliegen. Dementsprechend hoch ist auch die Streuung zwischen den Messdaten.

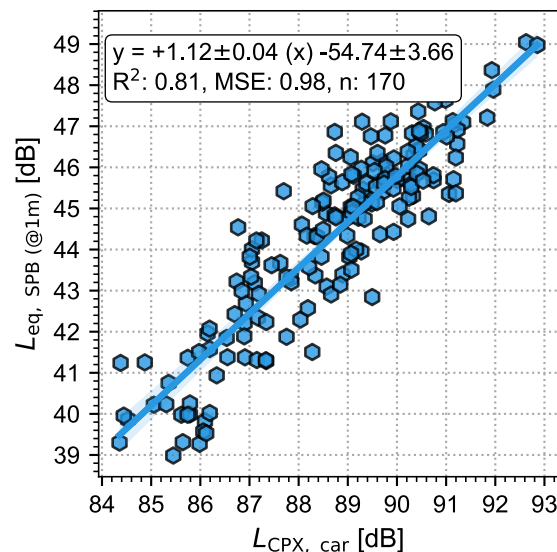


Abb. 8: Zusammenhang CPX P vs. SPB (PW) $L_{A,eq,1h}$ @1m für den Innerortsbereich. Dabei ist zu beachten, dass die Wertepaare nicht explizit zueinander gemessen wurden, sondern nur gesamthaft zusammengefügt wurden. So können die Messdaten zwischen CPX und SPB bis zu 1 Jahr auseinanderliegen. Dementsprechend hoch ist auch die Streuung zwischen den Messdaten.

In Abb. 8 zeigt sich ebenfalls ein leicht nicht-linearer Zusammenhang zwischen den CPX-Werten und den gemessenen SPB-Messungen. So liegen die gemessenen SPB-Messwerte im untersten Bereich (bei $L_{CPX,car} < 86$ dB) deutlich unter der Regressionsgeraden. Dies könnte auf einen zusätzlichen Absorptionseffekt vom Belag im Ausbreitungsweg der SPB-Messung hindeuten, was von der CPX-Messung nicht direkt erfasst wird (Vgl. Abb. 9).

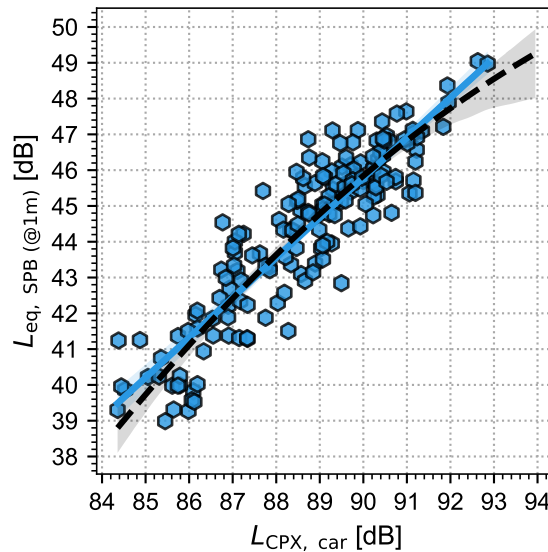


Abb. 9: Zusammenhang CPX P vs. SPB (PKW) $L_{A,eq,1h}$ @1m für den Innerortsbereich inklusive anderem Modellansatz (schwarze Linie). Dabei ist zu beachten, dass die Wertepaare nicht explizit zueinander gemessen wurden, sondern nur gesamthaft zusammengefügt wurden. So können die Messdaten zwischen CPX und SPB bis zu einem Jahr auseinanderliegen. Dementsprechend hoch ist auch die Streuung zwischen den Messdaten.

3.3.2 Umrechnung Nationalstrassen CPX vs. SPB @ 110 km/h

Da in der Schweiz eine CPX-Messungen der Referenzgeschwindigkeit 110 km/h nicht zugelassen ist, sind die Umrechnungsformeln gemäss der Tab. 4 nur bedingt gültig für die Berechnung des SPB-Werts bei 110 km/h. Somit muss dieser Zusammenhang aus den Schweizer Daten ermittelt werden. Dazu ist in der folgenden Abb. 10 der Zusammenhang zwischen CPX-Messung (PKW-Reifen @80 km/h) und den zugehörigen SPB-Messungen ($L_{A,F,max}$, 7.5m, $v_{ref}=110$ km/h,) angegeben. Wiederum zeigt sich, dass die Streuung der SPB- $L_{A,F,max}$ -Messungen erhöht ist. Zudem zeigt sich gerade eine deutliche Aufteilung der Datenwolke im Bereich von den CPX-Messungen zwischen 93 und 96 dB. Eine mögliche Erklärung für die Aufteilung könnten Ausbreitungseffekte (Absorptionseffekte) auf den grossflächigen Pannestreifen darstellen, die mit der SPB-Methode, nicht aber mit der CPX-Methode gemessen werden.

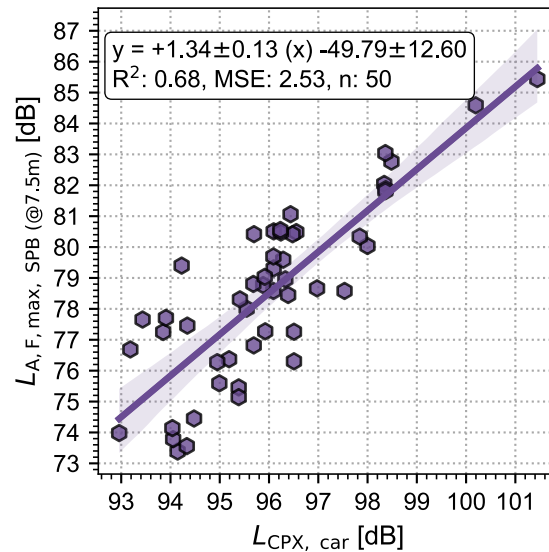


Abb. 10: Umrechnung zwischen CPX-Verfahren auf Nationalstrassen @80 km/h zum SPB-Messwert ($L_{A,F,max}$ @ 7.5m, $v_{ref}=110$ km/h) für PKW.

3.3.3 Zusammenhang Maximalpegel vs. Ereignispegel $L_{A,F,max}$ vs. $L_{A,eq,1h}$ (mit CH-Daten)

Wie sich im vorhergehenden Abschnitt gezeigt hat, gibt es einen gewissen Zusammenhang zwischen den $L_{A,eq,1h}$ @1m-Messungen und den $L_{A,F,max}$ Messungen. So zeigt sich jeweils in den Auswertungen, dass die Steigung zwischen CPX und $L_{A,eq,1h}$ anders ausfällt als die Steigungen zu den $L_{A,F,max}$ Messungen. Wenn nun die beiden Messgrößen direkt miteinander verglichen werden, sollte sich dieser Zusammenhang ebenfalls zeigen. Dies ist in der folgenden Abb. 11 für die Referenzgeschwindigkeit 50 km/h und PKWs dargestellt. Zusätzlich zeigt sich, dass die in ROSANNE D2.3 [11] ermittelte Beziehung (Vgl. Formel (6)) sehr gut auf die Schweizer Daten anwenden lässt:

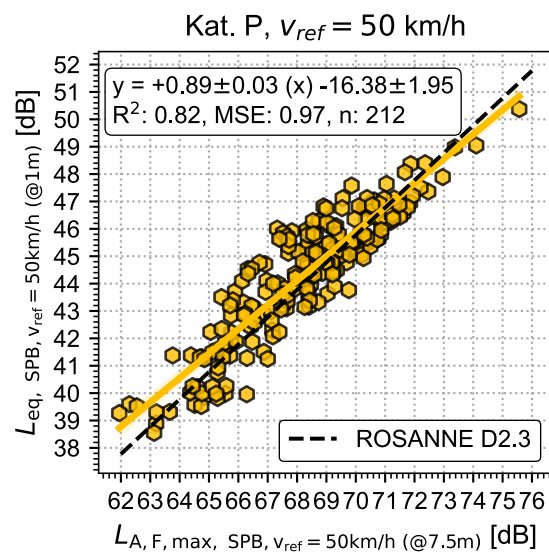


Abb. 11: Zusammenhang zwischen dem $L_{A,F,max}$, $v_{ref}=50$ km/h und $L_{A,eq,1h}$ @1m für die Referenzgeschwindigkeit 50 km/h und PKWs. Ebenfalls ist die in ROSANNE D2.3 [12] ermittelte Beziehung zwischen L_{Amax} und L_{AE} eingezeichnet.

Derselbe Sachverhalt für die Referenzgeschwindigkeit lässt sich ebenfalls für die Geschwindigkeit 110 km/h zeigen (Abb. 11)

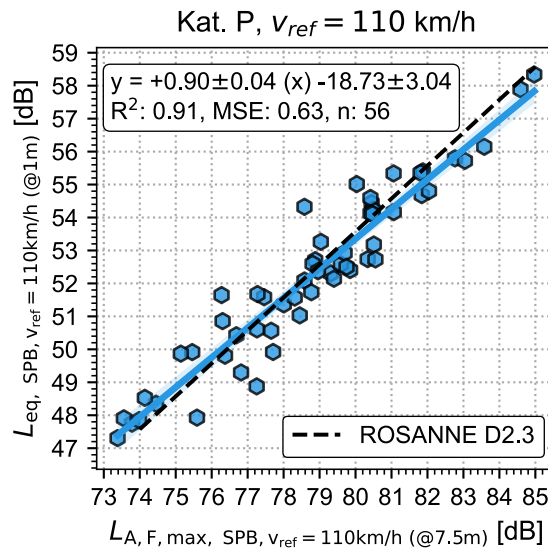


Abb. 12: Zusammenhang zwischen dem $L_{A,F,max, v_{ref}=110\text{km/h}}$ und $L_{A,eq,1h @1m}$ für die Referenzgeschwindigkeit 110 km/h und PKWs. Ebenfalls ist die in ROSANNE D2.3 [12] ermittelte Beziehung zwischen $L_{A,max}$ und L_{AE} eingezeichnet.

Für die Referenzgeschwindigkeit 80 km/h lässt sich mit den zur Verfügung stehenden Daten keinen Zusammenhang bilden, da kaum bei 80 km/h gemessen wurde.

Interessanterweise zeigt sich für beide ausgewerteten Geschwindigkeiten (50 & 110 km/h) exakt dieselbe Steigung zwischen dem $L_{A,eq}$ und $L_{A,F,max}$: 0.89. Das bedeutet, dass sich offenbar der L_{Aeq} und $L_{A,F,max}$ nicht gleich verhalten bei gleicher Geschwindigkeit und für jedes Dezibel an $L_{A,F,max}$ nur 0.9 dB an $L_{A,eq}$ gemessen werden.

Für LKWs wurde folgender Zusammenhang gefunden:

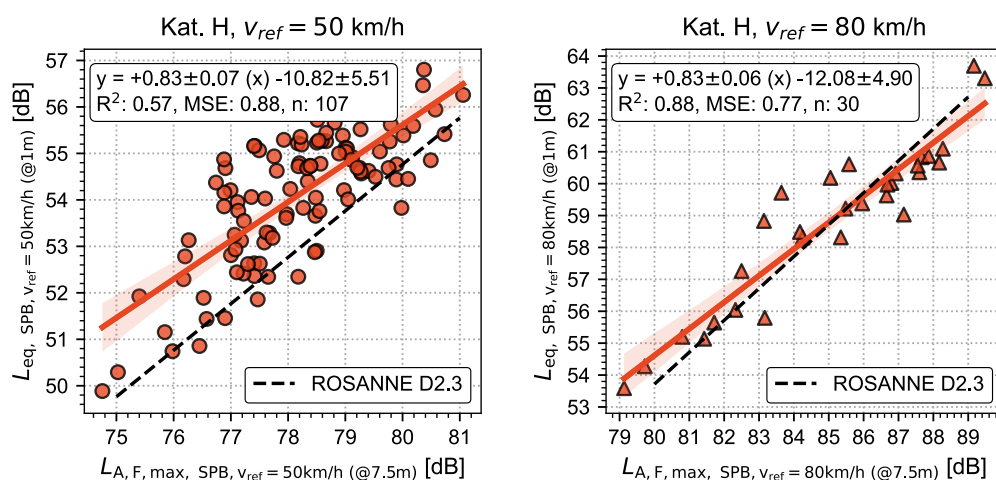


Abb. 13: Zusammenhang zwischen dem $L_{A,F,max,@7.5m}$ und dem $L_{A,eq,1h @1m}$ für die Kategorie H (LKWs) inklusive des Zusammenhangs aus ROSANNE D2.3 [12].

Somit lassen sich die $L_{A,F,max}$ – Messungen anhand der oben gezeigten Zusammenhänge folgendermassen umrechnen:

Tab. 5: Umrechnungen zwischen Maximalpegel und Eventenergie für verschiedene Referenzgeschwindigkeiten und die beiden Fahrzeugkategorien P und H.

Geschwindigkeit	Kategorie	Umrechnungsformel
50	P (PKW)	$L_{A,eq,1h@1m} = 0.89 * L_{A,F,max@7.5m} - 16.38$
	H (LKW)	$L_{A,eq,1h@1m} = 0.83 * L_{A,F,max@7.5m} - 10.82$
80	P (PKW)	-
	H (LKW)	$L_{A,eq,1h@1m} = 0.83 * L_{A,F,max@7.5m} - 12.08$
110	P (PKW)	$L_{A,eq,1h@1m} = 0.90 * L_{A,F,max@7.5m} - 18.73$
	-	-

Wie sich gezeigt hat, passen die im Forschungsprojekt ROSANNE [12] ermittelten Zusammenhänge relativ gut mit den in der Schweiz ermittelten Daten zusammen.

4 Referenzbelag

Was ist ein Referenzbelag? Ein Referenzstrassenbelag stellt einen standardisierten Strassenbelag dar, der als Vergleichsmassstab für die Bewertung der akustischen Eigenschaften von anderen Strassenbelägen verwendet wird. Das Ziel eines Referenzbelages ist es, eine konsistente Bewertungsgrundlage für die Charakterisierung von verschiedenen Belägen zu haben.

4.1 Referenzbeläge im internationalen Kontext

Bei allen Vergleichen von Belagseinbauten sowie für die Lärmberechnung mit Strassenlärmberechnungsmodellen muss ein Referenzbelag zugrunde gelegt werden. Dieser Belag stellt häufig die 0-Lärmbelastung dar. Sandberg hat bereits im Jahr 2006 einen virtuellen Referenzbelag [15] vorgeschlagen, der ein Mix aus verschiedenen Belagstypen ist (DAC 0/11 und SMA 0/11). Dabei wird aufgegriffen, dass verschiedene Länder auch ganz verschiedene Vorzüge für Belagseinbauten haben. Der Ansatz eines Referenzbelages wurde ebenfalls im europäischen Lärmberechnungsmodell CNOSSOS (Common Noise assessment) umgesetzt und ein virtueller Strassenbelag aus DAC 0/11 und SMA 0/11 mit einem Alter zwischen 2 und 7 Jahren in normalem Zustand als Referenzbelag festgelegt [16, S. 34]. Für alle abweichenden Beläge muss eine Korrektur vorgenommen werden. Diese Korrekturen sind für verschieden Standardbeläge in der Tabelle zu finden F-4 [17, S. 125]

Im Projekt ROSANNE ist eine grössere Datenauswertung zu CPX-Daten und dem *virtual Reference Pavement* durchgeführt worden. Dazu sind CPX-Daten aus mehreren Ländern zusammengetragen worden, um den Referenzbelag bezüglich CPX-Messungen zu charakterisieren [18]. Ein Auszug für den virtuellen Referenzbelag ist in Tab. 6 die Methode CPX dargestellt.

Tab. 6: Referenzspektrum 80 km/h des CNOSSOS/ROSANNE Referenz-virtual reference surface [18].

Frequenz	$L_{CPX,P}$ @ 80 km/h [18]	$L_{CPX,P}$ @ 80 km/h [18]
	CNOSSOS/ROSANNE	CNOSSOS/ROSANNE
200	70.8	70.8
250	72.8	72.6
315	73.8	72.2
400	78	76
500	80.7	80.5
630	86.3	88.6
800	93.2	94.5
1000	93.6	90.4
1250	91.3	90
1600	90.1	87.8
2000	87.5	84.6

Frequenz	$L_{CPX,P}$ @ 80 km/h [18]	$L_{CPX,P}$ @ 80 km/h [18]
	CNOSSOS/ROSANNE	CNOSSOS/ROSANNE
2500	84.3	82.6
3150	81.1	79.1
4000	77.9	74.4
5000	75.1	72.7
Σ	90.99 dB	96.82 dB

Aufbauend auf den Ergebnissen des ROSANNE Deliverable 2.5 haben Lédée und Goubert in ihrem Konferenzbeitrag [19] ebenfalls eine Schnittstelle zum Lärmberechnungsmodell CNOSSOS definiert, dass die Referenzwerte anhand CPX-Messungen in CNOSSOS Belagskorrekturen umrechnet.

4.2 Anforderungen an einen Referenzbelag

Ein Referenzbelag muss folgende verschiedenen Anforderungen erfüllen:

- **Verfügbarkeit (Langzeit):**
 - Damit auch in Zukunft Messungen durchgeführt werden können, muss der Belag auch in Zukunft weiterhin eingebaut werden.
- **Verbreitung:**
 - Da gerade für SPB-Messungen in Bezug auf den Standort grosse Anforderungen bestehen, ist die Suche nach geeigneten und der Norm entsprechenden Messstandorten nicht immer einfach. Folglich sollte der Referenzbelag weit verbreitet sein, damit die Suche nach Messstandorten vereinfacht wird.
 - Ebenso sollte der Belag innerorts sowie ausserorts eingebaut werden.
- **Stabilität:**
 - Der Belag muss akustisch und bautechnisch einigermaßen stabil sein. Dies ermöglicht den Referenzwert zu reproduzieren.
- **Internationale Bekanntheit:**
 - Der Referenzbelag sollte international anerkannt sein und bestenfalls ebenfalls im Ausland verbaut werden. Dadurch wird die grösstmögliche internationale Vergleichbarkeit erreicht.
- **Bautechnisch normiert:**
 - Mit der bautechnischen Normierung wird sichergestellt, dass der Belag innerhalb sich selbst vergleichbar ist.

Zusätzlich stellt sich im Fall der Schweiz die Anforderung, dass die bisherigen Messungen und zukünftige Messungen jeweils auf die Referenz projiziert werden können. Das heisst, dass alte Messdaten problemlos umgewandelt werden können.

4.2.1 Verfügbarkeit (Langzeit)

Um eine stabile Referenz zu haben, ist es von grosser Wichtigkeit, dass ein Belag über längere Zeit verfügbar ist. Es wäre ungünstig, wenn ein Referenzbelag definiert wird, der zwar heute verfügbar ist, aber in 20 Jahren nicht mehr eingebaut wird.

Im Anhang auf I.3 auf der Seite 59 ff. wird die zeitliche Entwicklung der eingebauten Beläge dokumentiert. Dabei zeigt sich, dass in den letzten Jahren auf den Nationalstrassen hauptsächlich SDA8-Beläge eingebaut wurden. Dennoch sind SMA-Beläge immer noch dominierend.

Im Innerortsbereich sieht die Situation etwas anders aus: Dort werden eine Vielzahl an unterschiedlichen Belägen eingebaut (Vgl. I.4, Seite, 60).

4.2.2 Verbreitung

Die Verbreitung des Referenzbelages ist wichtig, um genügend Messstandorte zur Verfügung zu haben. Wenn ein Referenzbelag definiert wird, welcher eher selten vorkommt, ist eine Messung schwierig durchzuführen. Gerade bei SPB-Messungen gibt es grosse Einschränkung hinsichtlich der Standorteignung. Daher ist es besser, wenn der Belag möglichst weit verbreitet ist.

4.2.3 Stabilität

Ein Referenzbelag sollte zeitlich möglichst stabil sein. Das heisst, dass er akustisch sowie bautechnisch keine allzu grosse Alterung durchlaufen sollte. Falls er dennoch eine grosse Alterung durchläuft, sollte er ein Plateau erreichen, damit er einigermaßen konsistent vermessen werden kann.

4.2.4 Internationale Bekanntheit

Ein Referenzbelag sollte international bekannt sein. Dieses Konzept wurde bisher schon in verschiedenen Studien [15], [16], [18], [19] betont und mit dem *virtuellen Referenzbelag* auch teilweise versucht umzusetzen. Eine einheitliche Lösung ermöglicht ebenfalls die internationale Vergleichbarkeit. Mit dem virtuellen Referenzbelag kann beispielsweise auf sehr einfache Weise die verschiedenen Belagseinbauten verschiedenen Ländern verglichen werden. So können die Schweizer Referenzwerte direkt mit denjenigen von CNOSSOS oder denjenigen von nationalen Referenzen verglichen werden.

4.3 Eignung Belagskandidaten im Schweizer Kontext

Ein Referenzbelag sollte den Anforderungen gemäss Kapitel 4.2 entsprechen. Ebenso sollte gemäss Zielsetzung des Projekts die Prämisse umgesetzt werden, dass die Null – also die Charakterisierung des Belages – nicht verschoben werden sollte. Um den Referenzbelag genauer zu beschreiben, wurden verschiedene in der Schweiz vorkommende und als Referenzbelag in Frage kommende Belagstypen auf die Kriterien gemäss Kapitel 4.2 geprüft. In der Tab. 7 sind die subjektiven Ergebnisse der Klassierung dargestellt.

Tab. 7: Abwägungen Referenzbelagswahl. (++ = Sehr gut, + Gute Eigenschaften, - Mässige Eigenschaften, -- Tendenziell ungünstige Eigenschaften)

Belag	Verfügbarkeit (zukünftig)	Akustische Stabilität	Verbreitung	Internationale Bekanntheit
Virtual Reference Surface (Mix SMA11 / DAC11)	+	++	-	++
SMA11	+	++	++	++
AC11	-	++	-	++
ACMR8	+	+	+	+
SDA8	++	+	+	-

Für die Schweiz ist die *virtual reference surface* eher schwierig zu definieren, da auf der Autobahn kaum mehr AC11 Beläge eingebaut werden. Dafür ist die akustische Stabilität als sehr gut (++) zu bewerten. Für die beiden Geschwindigkeitsbereiche lässt sich keine geeignete und verfügbare Asphalttechnologie identifizieren, welche heute und zukünftig als Referenzbelag dienen könnte.

4.4 Referenzbelag in Lärmberechnungsmodellen

Der Referenzbelag stellt in verschiedenen Lärmberechnungsmodellen eine Grundlage für die Lärmermittlung dar. Eine übersichtliche Liste über verschiedene Referenzbeläge in europäischen Ländern ist dabei in [20] definiert. Der Referenzbelag stellt in diesem Fall eine Art Bezugswert dar, auf welche sich die Berechnungen jeweils abstützen. Ein Beispiel ist, dass ein neuerer Belag im Vergleich zu seinem Vorgänger leiser ist und somit in Bezug auf den Referenzwert leiser ist. Eine Problematik an der Referenz in diesem Sinne ist, dass sie sich jeweils auf einen gewissen Zustand beziehen. So referenziert sich der Belag immer auf eine gewisse Verkehrsflotte, bei welcher das Lärmberechnungsmodell erstellt wurde.

4.4.1 StL-86+

Das noch bis im Juni 2023 gültige Strassenlärmberechnungsmodell StL86+ hatte seine Anfänge in den frühen 80er Jahren [4]. Publiziert wurde das Modell im Jahr 1987 und ist seither in Gebrauch. Folglich unterliegt dieses Referenzmodell StL86+ einer Fahrzeugflotte von den 80er Jahren. Weiter wird in dem Modell keine Unterscheidung nach den Lärmquellen Rollgeräusch und Antriebsgeräusch vorgenommen. Der Referenzbelag des StL-86+-Modells entspricht einem statistischen Belag, welcher dichter Bauart ist (AC-SMA).

4.4.2 sonROAD18

In sonROAD18-Modell wurde ebenfalls ein Referenzbelag definiert. Ursprünglich war dies der ACMR8, eingebaut mit einem Hohlraumgehalt <8% nach der Regel SNR 640 436 [21]. In der Zwischenzeit hat man sich geeinigt, dass der Referenzbelag in sonROAD18 dem KB-0 Belag entspricht, welcher aus StL-86+ bekannt ist. Dieser ist wie folgt über das CPX-Spektrum definiert [7]. Im vorliegenden Fall wird allerdings nur das PKW-Spektrum berücksichtigt (Anforderung von sonROAD18) und mittels der sonROAD18 Belagsschnittstelle in sonROAD18 Belagskorrekturen umgewandelt:

Tab. 8: Referenzspektrum sonROAD18 für 50 & 80 km/h. In der zweitletzten Spalte ist das CNOSSOS/ROSANNE Referenz-virtual reference surface dargestellt und daneben die Differenz zwischen dem virtual reference surface und dem sonROAD18-Referenzbelag.

Frequenz	$L_{CPX,P}$ @50 km/h [7]	$L_{CPX,P}$ @80 km/h [7]	$L_{CPX,P}$ @80 km/h [18]	$A_{sonROAD18,P-ROSANNE}$ @80 km/h
315	67.3	69.8	73.8	-4
400	74.1	74.9	78	-3.1
500	78.9	78.4	80.7	-2.3
630	79.6	83.1	86.3	-3.2
800	84.1	90.8	93.2	-2.4
1000	85.3	90.4	93.6	-3.2
1250	83.0	89.2	91.3	-2.1

Frequenz	$L_{CPX,P}$ @50 km/h [7]	$L_{CPX,P}$ @80 km/h [7]	$L_{CPX,P}$ @80 km/h [18]	$\Delta_{sonROAD18,P-ROSANNE}$ @80 km/h
1600	80.8	87.7	90.1	-2.4
2000	79.2	86.2	87.5	-1.3
2500	75.9	82.6	84.3	-1.7
3150	71.8	79.7	81.1	-1.4
4000	67.9	77.2	77.9	-0.7
5000	65.7	74.6	75.1	-0.5
Σ	90.99 dB	96.82 dB	99.4 dB	-2.58

Graphisch dargestellt sehen die CPX-Spektren (PKW-Reifen) der verschiedenen Referenzen folgendermassen (Abb 14) aus. Um die *virtual reference surface* nachzubilden, wurden die CPX-Messungen auf Schweizer SMA11-Belägen analysiert.

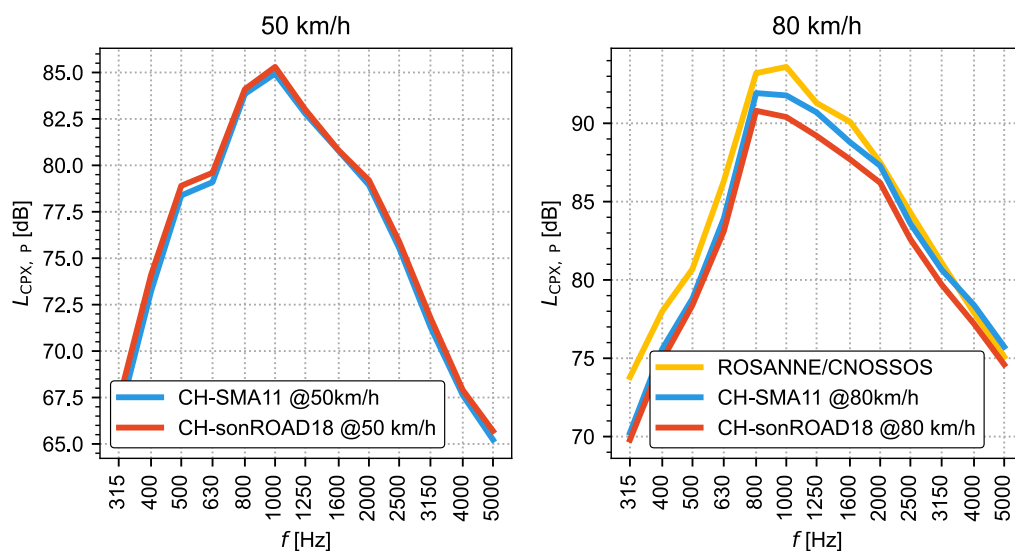


Abb 14: Vergleich der Referenzspektren (Virtual Reference Surface) und CH-Daten (SMA11) und sonROAD18 – Referenzspektrum.

Es zeigt sich, dass sich die CH-SMA11 – Kurve bei Referenzgeschwindigkeit von 50 km/h ganz nah beim sonROAD18 (KB0) – Spektrum befindet. Leider finden sich in der Literatur keine CPX-Werte für das ROSANNE/CNOSSOS Referenzspektrum mit CPX-Werten für die Referenzgeschwindigkeit 50 km/h.

Bei 80 km/h zeigt sich wie auch schon in Tab. 8, dass das CPX-Spektrum der *virtual Reference Surface* deutlich lauter ausfällt als der sonROAD18-Referenzbelag (Ebenfalls KB-0) und dem Schweizer Mix an SMA-11 Belägen.

5 Akustische Charakterisierung Referenzbelag für die Schweiz

In diesem Kapitel wird der Schweizer Referenzbelag akustisch definiert. Dazu werden in einem ersten Schritt die Referenzwerte für Belagsmessungen in der Schweiz definiert. Dabei muss ebenfalls die Prämisse umgesetzt werden, dass an der bisherigen Referenz (Referenzbelag StL-86+) keine Verschiebung vorgenommen werden. Das heisst auch, dass somit zwei Referenzwerte ausgegeben werden müssen: Einen für den Innerortsbereich (50 km/h) und einen für Nationalstrassen (80/120 km/h).

5.1 Charakterisierung mit CPX: Identifikation Referenzwert

Um den Referenzbelag der Schweiz zu charakterisieren, eignen sich die in Kapitel 2 definierten Messverfahren. Um die Prämisse einzuhalten, muss sodann der Bezug zur aktuellen Referenz (KB-0) etabliert werden. Mit der Charakterisierungsmethode CPX lässt sich somit zwischen dem CPX-Index und dem bisherigen Charakterisierungsmodell (Abweichung StL-86) folgenden Zusammenhang herleiten. Für die Berechnung des CPX-Index wurde jeweils die Gewichtung von 0.5 verwendet (Vgl. Kapitel 2.3.1).

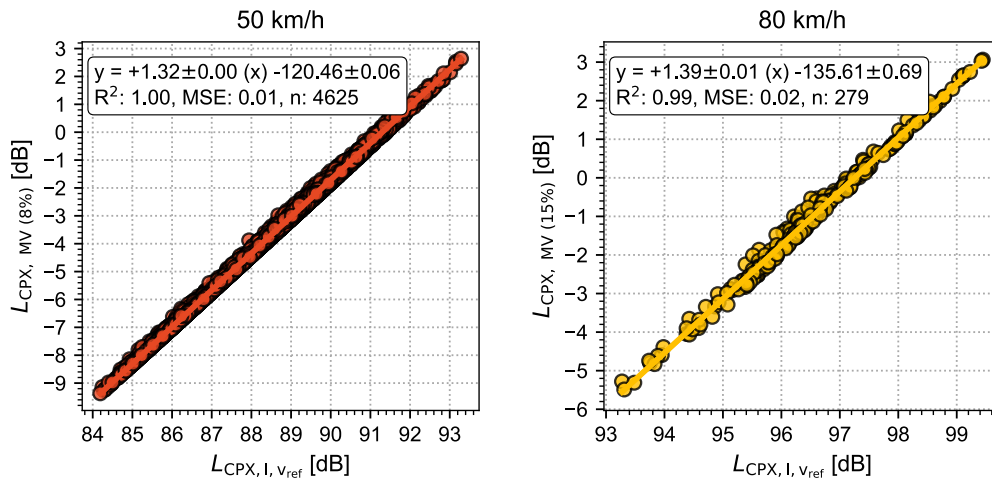


Abb. 15: Zusammenhang zwischen dem CPX-Index und dem Mischverkehrswert (KB.)

Folglich gelten für die beiden Referenzgeschwindigkeiten 50 und 80 folgende Zusammenhänge zwischen StL-86+ und dem CPX-Index:

$$L_{CPX, MV8\% (50 \text{ km/h})} = 1.32 * L_{CPX, I@50km/h} - 120.46 \quad (8)$$

$$L_{CPX, MV15\% (80 \text{ km/h})} = 1.39 * L_{CPX, I@50km/h} - 135.61 \quad (9)$$

Dabei lassen sich für die beiden Referenzgeschwindigkeiten bei 50 km/h und 80 km/h im Ansatz die Umrechnungsformeln (Formel (2) - (5)) wiederfinden.

Um die Referenzwerte für die beiden Messreifen P und H zu bestimmen, wird aus dem ermittelten CPX-Index auf die Messreifen P (PKW) und H (LKW) umgerechnet. Dazu sind die folgenden Zusammenhänge ermittelt worden:

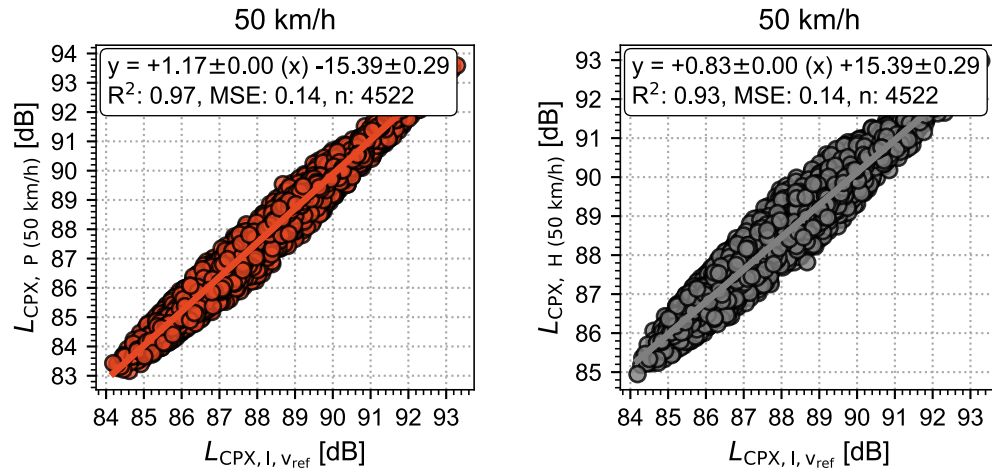


Abb. 16: Links: Zusammenhang CPX-P vs. CPX-Index, Rechts: Zusammenhang CPX-H vs. CPX-Index für $v_{ref} = 50 km/h$

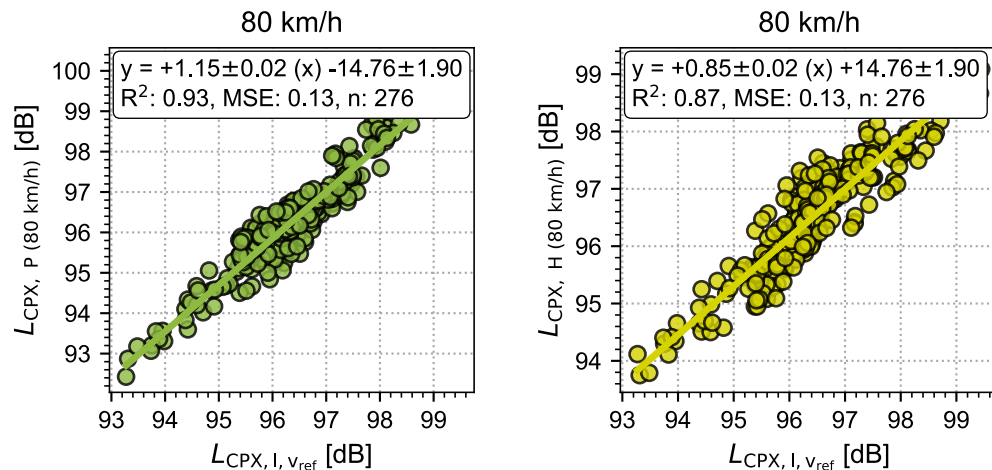


Abb. 17: Links: Zusammenhang CPX-P vs. CPX-Index, Rechts: Zusammenhang CPX-H vs. CPX-Index bei 80 km/h

Durch das Einsetzen der $L_{CPX, I, v_{ref}}$ (Formel (8) und Formel (9)) in die in Abb. 16 resp. Abb. 17 gezeigten Beziehungen zwischen dem CPX-Index und den jeweiligen CPX-Messgrößen, können die Referenzwerte des CPX-Verfahrens abgelesen werden. Zusammengefasst ergeben sich die im folgenden Kapitel präsentierten Referenzwerte für das CPX-Verfahren.

5.1.1 Referenzwerte CPX

Übersetzt man nun den Schweizer Referenzbelag (KB=0) mit dem Zusammenhang gemäss Abb. 15 resultieren die folgenden CPX-Referenzwerte ($L_{CPX, I, v_{ref}=50 km/h}$) für die Referenzgeschwindigkeiten von 50 und 80 km/h:

Tab. 9: Vergleich der Referenzpegel bei Referenzgeschwindigkeiten 80 km/h und Mischverkehrsanteilen von 8 respektive 15%. Die Umrechnung in den CPX-Index basiert auf Formel (1).

Geschwindigkeit	Anteil N2	Gewichtung CPX-Index	CPX-Index	$L_{CPX,I,v_{ref}X \text{ km/h}}$
50	8%	50/50	$L_{CPX,I,v_{ref}=50 \text{ km/h}}$	91.3
80	15%	50/50	$L_{CPX,I,v_{ref}=80 \text{ km/h}}$	97.6

Werden diese Werte der Tab. 9 in die einzelnen CPX-Messreifen übersetzt (mithilfe der Beziehung aus Abb. 16 respektive Abb. 17) ergeben sich für 50 km/h somit die Referenzpegel für die einzelnen CPX-Pneus

- CPX-P @ 50 km/h: 91.4 dB
- CPX-H @ 50 km/h: 91.2 dB

Für 80 km/h werden folgende Referenzpegel erreicht:

- CPX-P @ 80 km/h: 97.5dB
- CPX-H @ 80 km/h: 97.7 dB

Bei der Betrachtung oder der Interpretation von Tab. 9 ist zu beachten, dass der ausgegebene Wert von mehreren Annahmen abhängig ist. So wurde zur Definition des Referenzwertes die Annahme getroffen, dass der CPX-Index mit der 50/50 Gewichtung gleichermassen für die Mischverkehrswerte bei 8% respektive 15% gelten.

5.1.2 Referenzbelagskandidaten Innerortsbereich

Mit den in Tab. 9 ermittelten Werten lässt sich nun der Schweizer Referenzbelag aus akustischer Sicht und in Bezug auf die Lärmbelastung mit der Charakterisierungsmethode CPX (Vgl. Kapitel 2) definieren. Dazu wurden die in Tab. 7 definierten Beläge geprüft und nach dem CPX-Index für den Innerortsbereich und den Ausserortsbereich ausgewertet. In den Abbildungen ist jeweils der «Referenzwert» (0-Linie gemäss Abb. 15) angegeben.

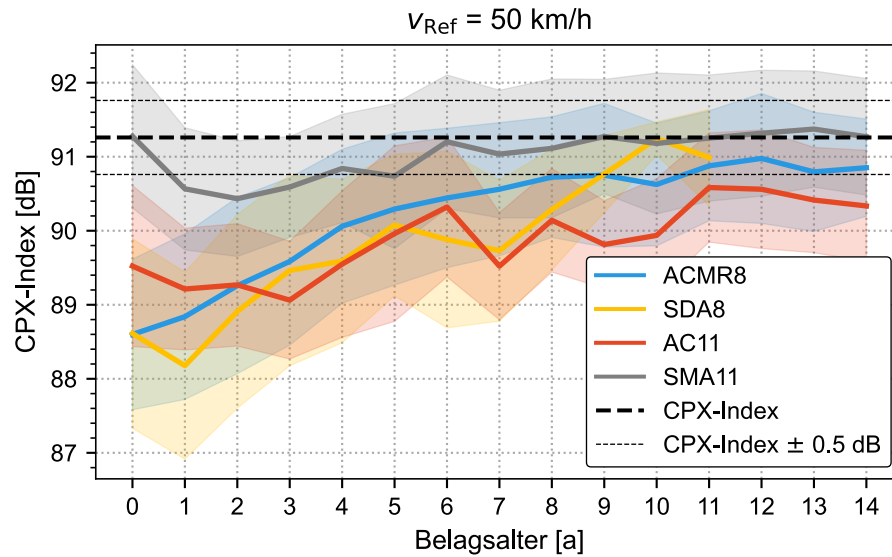


Abb. 18: Verlauf CPX-Index für Referenzgeschwindigkeit ($v=50 \text{ km/h}$) für Referenzbelagskandidaten in Abhängigkeit des Belagsalters. Schraffierte Fläche: $\pm 1 \sigma$

Somit zeigt sich sehr deutlich, dass der Schweizer-Referenzbelag im Innerortsbereich am ehesten einem SMA11-Belag im Alter zwischen 4 und 10 Jahren entspricht. (Vgl. Abb. 18). Dies trifft sich sehr gut, denn wie Abb. 18 zeigt, stellt der SMA11 einen akustisch sehr stabilen Belag dar. Ebenso ist die Verbreitung im Innerortsbereich gewährleistet. Alle anderen Beläge scheinen sich nicht zu eignen, da sonst die akustische Referenz sehr deutlich verschoben würde. Am ehesten würde sich ein ACMR8 in höherem Alter eignen, jedoch ist auch dieser Belag im Vergleich zur definierten 0-Linie ($L_{\text{CPX},I,v_{\text{ref}}=50 \text{ km/h}} = 91.3 \text{ dB}$) (Vgl. Tab. 9) deutlich zu leise.

5.1.3 Referenzbelagskandidaten Nationalstrasse

Für den Ausserortsbereich wird die Geschwindigkeit $v \geq 80 \text{ km/h}$ verwendet. Im Ausserortsbereich liegt die Definition des Referenzbelages in Bezug auf CPX-Messungen bei $L_{\text{CPX},I,v_{\text{ref}}=80 \text{ km/h}} = 97.6 \text{ dB}$ (Vgl. Tab. 9).

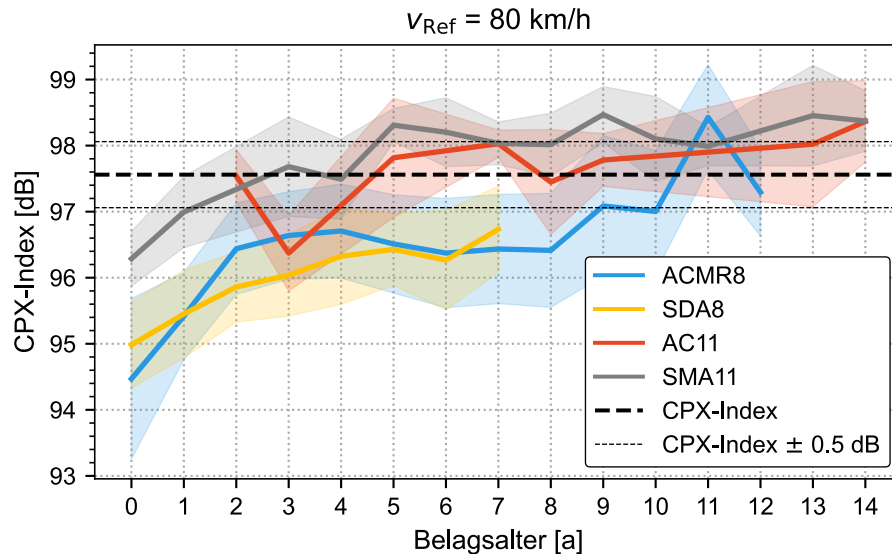


Abb. 19: Verlauf CPX-Index für Referenzgeschwindigkeit ($v=80$ km/h) für Referenzbelagskandidaten in Abhängigkeit des Belagsalters. Schraffierte Fläche: $\pm 1 \sigma$

Wie sich in hingegen in Abb. 19, liegt dieser Wert nun etwas unterhalb der SMA11 Kurve und entspricht somit wohl eher einem Mix aus SMA11 und AC11, was wiederum näher an der *virtual Reference Surface* läge.

5.2 Charakterisierung mit SPB: Referenzwerte SPB

Die Referenzwerte für das SPB-Verfahren werden von der Beziehung zwischen CPX und SPB umgerechnet. Details zu diesen Beziehungen sind hierbei in Kapitel 3.3 aufgeführt. Dabei wird die CPX-Messung als Grundlage für die Charakterisierung angenommen, da sie ein direktes Verfahren zur Vermessung des Rollgeräuschs darstellt. Dies ermöglicht die fahrzeugflottenunabhängige Charakterisierung und eignet sich deshalb gut zur Referenzierung eines akustischen Referenzpegels.

Mit der akustischen Definition mit dem CPX-Verfahren gemäss Tab. 9 und den Pegeln für die Kategorie P und H (gemäss der Abb. 16 und Abb. 17), können nun die Umrechnungsfaktoren gemäss Tab. 4 verwendet werden um von CPX-Werten in $L_{A,F,max}$ umzurechnen und daraus die SPB-Referenzwerte abzuleiten. Daraus kann der SPB-Index berechnet werden, um den Referenzbelag hinsichtlich SPB-Messungen zu definieren. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Umrechnungsmodelle noch einer erhöhten Unsicherheit unterworfen sind (Vgl. Diskussion im Kapitel 2.4). Dieses Schema ist nachfolgend in Abb. 20 illustriert.

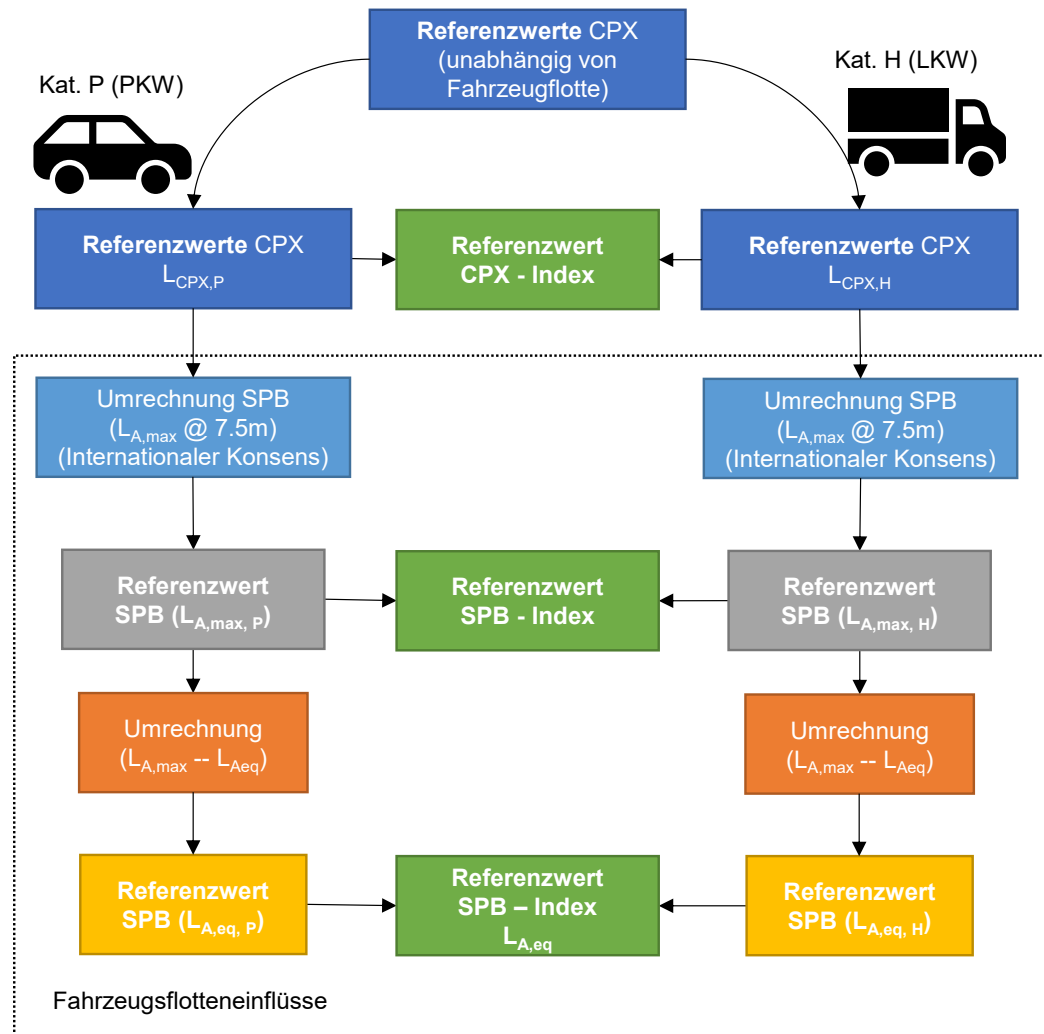


Abb. 20: Schema zur Bestimmung der Referenzwerte SPB aus CPX-Messungen

5.2.1 Referenzwerte SPB-Messungen

Wird das Schema aus Abb. 20 für die SPB-Messungen angewendet, resultieren die in Tab. 10 dargestellten Referenzwerte.

Tab. 10: Berechnung Referenzwerte in Bezug auf den $L_{A,F,max}$ für SPB-Messungen. Generell wurden für die Umrechnung die Faktoren aus [11] verwendet. Einzig für die Geschwindigkeit 110 km/h und den Typ PKW musste der Zusammenhang gemäss Abb. 10 eingesetzt werden.

Geschwindigkeit (PKW/LKW)	Kategorie	L_{CPX}	Umrechnung CPX $\rightarrow L_{AF,max}$	Referenzwert $L_{A,F,max@7.5m}$ [dB(A)]	Gewicht SPBI	SPB Index
50	P (PKW)	91.4	$0.95 * CPXP - 15.6$	71.2	0.9	75.2
50	H (LKW)	91.2	$0.65 * CPXH + 24.0$	83.3	0.1	
80	P (PKW)	97.5	$0.95 * CPXP - 15.6$	77.0	0.8	79.1
80	H (LKW)	97.7	$0.65 * CPXH + 24.0$	87.5	0.2	
110	P (PKW)	97.5	$1.34 * CPXP - 49.8$	80.85	0.7	82.8*
80	H (LKW)	97.7	$0.65 * CPXH + 24.0$	87.5	0.3	

¹ Für 110 km/h können keine CPX-Messungen durchgeführt werden. Daher basiert die Umrechnung auf der CPX-Referenzgeschwindigkeit 80 km/h.

² Unsicherheit des Umrechnungsmodells (Abb. 10) ist zu berücksichtigen!

Für die Ermittlung der Referenzwerte in Bezug auf die Ereignisenergien besteht die Möglichkeit, die Umrechnung basierend auf den Umrechnungsmöglichkeiten zwischen $L_{A,F,max@7.5m}$ und den $L_{A,eq,1h@1m}$ Pegeln zurückzugreifen.

Tab. 11: Berechnung Referenzwerte in Bezug auf den $L_{A,eq,1h@1m}$ für SPB-Messungen.

Typ	v [km/h]	Referenzwert SPB	Umrechnung ¹	Referenzwert SPB	Gewicht SPBI	SPB Index
		$L_{A,F,max@7.5m}$ [dB(A)]	$L_{A,F,max@7.5m} \rightarrow L_{A,eq,1h@1m}$	$L_{A,eq,1h@1m}$		$L_{A,eq,1h@1m}$
P	50	71.23	$0.89 * L_{A,F,max@7.5m} - 16.38$	47.1	0.9	50.5
H	50	83.28	$0.83 * L_{A,F,max@7.5m} - 10.82$	58.3	0.1	
P	80	77.0	-	-	0.8	52.9 ²
H	80	87.5	$0.83 * L_{A,F,max@7.5m} - 12.08$	59.6	0.2	
P	110	80.85	$0.9 * L_{A,F,max@7.5m} - 18.73$	54.0	0.7	57.1
H	80	87.5	$0.83 * L_{A,F,max@7.5m} - 12.08$	60.5	0.3	

¹ Unsicherheit des Umrechnungsmodells (Abb. 10) ist zu berücksichtigen!

² Keine Werte für SPB (P) vorhanden (Geschwindigkeit: 80 km/h)

5.3 Diskussion Referenzbelag

Im vorhergehenden Kapitel zeigte sich, dass sich aus akustischer Sicht nicht ein einziger Belag definieren lässt, welcher der Prämisse der Fortführung der 0 (alter Referenzbelag) entspricht. Für die Referenzgeschwindigkeiten 50 und 80 erscheint eine akustische Klassierung der Beläge sinnvoll. Dies hat den Vorteil, dass der Referenzbelag auch in Zukunft noch gefunden werden kann, da es sich um eine akustische Definition handelt. Um die Suche einzugrenzen, kann man sich dabei an den in Tab. 7 präsentierten Belagstypen orientieren. Um dabei die Referenz zum alten 0-Belag zu halten, muss der Schweizer 0-Belag hinreichend akustisch definiert werden, was mit den hier präsentierten Auswertungen versucht wurde.

Aus Abb. 16 und Abb. 17 zeigt sich, dass die in Tab. 9 ausgewiesenen Referenzwerte immer noch implizit an StL-86+ gebunden sind. Wäre die Modellierung belagsunabhängig formuliert, kann ein Belagstyp als Referenz für die Lärmberechnungsmodelle eingesetzt werden. So wäre zum Beispiel über den gesamten Geschwindigkeitsbereich der SMA11 die Referenz = 0. Nun zeigt sich aber im Vergleich der beiden Abbildungen (Abb. 18 und Abb. 19) dass die 0-Linie sich nicht am Belagstyp orientiert. Daher scheint eine akustische Definition des Referenzbelages aufgrund eines normierten Messverfahrens sinnvoll. Das Messverfahren ist so zu wählen, dass keinerlei Fahrzeugflotteneinflüsse in die Referenzwertermittlung einfließen. Denn damit wird sichergestellt, dass die Charakterisierung der Beläge rein auf die Belagsakustik zurückzuführen ist. Somit eignet sich das CPX-Verfahren ideal für die Ermittlung des Referenzwertes.

6 Methodik für Referenzwertermittlung

Die Referenzwertermittlung soll erfassen, wie sich die mittlere Schweizer Emission mit der Zeit verhält. Dies ist insbesondere von Interesse, wenn Veränderungen am Wagenpark/Reifenpark oder der Elektrifizierungsrate zu erwarten sind.

Eine Referenzwertermittlung kann mit den in Kapitel 2 präsentierten Methoden erfolgen. Grundlage stellt jedoch das CPX-Verfahren dar, denn es ermittelt, ob ein Belag dem Referenzbelag hinsichtlich seiner akustischen Wirkung entspricht. Im Vergleich zum anderen Charakterisierungsverfahren (SPB) vermisst das CPX-Verfahren einzig allein die akustische Belagsgüte ohne Verkehrseinfluss.

Das heisst konkret, dass mit der CPX-Messung Abschnitte identifiziert werden, welche aus akustischer Sicht dem Referenzbelag nahekommen. Mit diesen Abschnitten wird sichergestellt, dass sich der Belag in Bezug auf seine akustische Grösse nicht verändert hat und somit dem Referenzbelag entspricht.

Im folgenden Kapitel wird die Methodik etwas näher ausgeführt.

6.1 Methodik für die Ermittlung Referenzwerte für die Schweiz

Für die Referenzermittlung gibt es für die Schweiz die folgenden Möglichkeiten:

1. Identifikation eines geeigneten Abschnitts mittels CPX-Verfahren
 - a. Für $v = 50 \text{ km/h}$ sollte der CPX-Index $L_{CPX,I,v_{ref}=50 \text{ km/h}} = 91.3 \pm 1 \text{ dB}$ betragen (Vgl. Tab. 9)
 - b. Für $v = 80 \text{ km/h}$ sollte der CPX-Index $L_{CPX,I,v_{ref}=80 \text{ km/h}} = 97.6 \pm 1 \text{ dB}$ betragen (Vgl. Tab. 9)
2. Prüfen des Abschnittes bezüglich der örtlichen Standortqualität
 - a. Homogenität des Belags
 - b. Akustische Hindernisse (Gemäss den Anforderungen ISO 11819-1/Leitfaden Strassenlärm)
 - c. Gerade Strecke
 - d. Steigung
 - e. Möglichst homogene Geschwindigkeit
 - f. Wenn der Abschnitt für die oben benannten Kriterien als genügend gut befunden wurde, soll eine SPB-Messung durchgeführt werden.
3. Durchführung der SPB-Messung (allenfalls kombiniert mit CPB-Messung mit definiertem Fahrzeug)
4. Auswertung der SPB-Messung nach ISO-Norm 11819-1 & Leitfaden Strassenlärm
5. Wiederholung Schritte 1-3, um möglichst breite Datenabstützung zu erhalten. Vorschlag: 5 Standorte.

Die ermittelten Referenzwerte aus Schritt 4 können nun mit anderen Referenzwertermittlungen (zu anderen Zeiten) verglichen werden. Damit können nun allfällige Veränderungen in der Fahrzeugflotte detektiert werden. Ebenso können Beläge untereinander verglichen werden.

Beispiel:

Messung mit CPX: Belag wird mit $L_{CPX,I,v_{ref}=50 \text{ km/h}} 93.2 \text{ dB}$ gemessen. Somit kann der Belag als $93.2 - 91.3 = 1.9 \text{ dB}$ charakterisiert werden.

Mit den SPB-Messungen kann durch die Auswertung gemäss ISO 11819-1 respektive der Berechnung der Event-Energien die mittlere SPB-Emission bestimmt werden. Diese kann

dann mit den definierten Referenzwerten verglichen werden. Falls sich die Verkehrsflotte massgeblich geändert hat, können die Referenzwerte angepasst werden.

6.2 Anwendung der Methodik in der Praxis

Im Rahmen des Projekts wurden verschiedene SPB-Messungen durchgeführt, um die Methodik zu prüfen. Insgesamt entsprachen allerdings nicht alle durchgeführten Messungen (Vgl Anhang II) den Anforderungen gemäss ISO-11819 bezüglich der Anzahl zu erfassenden Fahrzeuge. Deshalb sind die angegebenen Referenzwerte nur beschränkt belastbar.

6.2.1 SPB-Messungen gemäss ISO11819-1 (SPB – Index)

In Tab. 12 sind die Referenzwerte nach SPB-Messung, ausgewertet nach ISO11819-1 dargestellt. Dabei zeigte sich gerade für die Messung in *Wolfwil* und *Chur ausserorts*, dass die Beläge an diesen Standorten tendenziell zu leise waren und somit nicht für eine Referenzwertermittlung infrage kommen. Deshalb sind sie mit einem Stern markiert. Ebenfalls ist zu beachten, dass die geforderte Anzahl an Fahrzeugen für H1 & H2 (Lastwagen) nicht erreicht werden konnte.

Tab. 12: Schweizer Referenzbelagswerte nach ISO 11819-1 inklusive SPB-Index für Referenzbelagskandidaten. In Fett werden die Beläge dargestellt, welche bezüglich des CPX-Index als Referenzkandidaten in Frage kommen. In Klammern sind jeweils die SPB-Referenzwerte gemäss Tab. 12 angegeben).

Standort	Kategorie*	Fahrzeug- klasse	V _{ref} [km/h]	L _{A,F,max} [dB(A)]	Gewicht W [-]	SPB-Index (Referenzwerte)
Wolfwil innerorts	low	P	50	71.1	0.9	73.1** (75.2)
		H	50	79.6	0.1	
Domat innerorts	low	P	50	75.3	0.9	75.7 (75.2)
		H	50	78.6	0.1	
Domat ausserorts	medium	P	80	80.3	0.8	81.7 (79.1)
		H	80	84.9	0.2	
Chur ausserorts	medium	P	80	78.9	0.8	82.3** (79.1)
		H	80	87.4	0.2	
N6 Rubigen-Kiesen	high	P	110	79.8	0.7	83.9 (82.8)
		H	80	86.4	0.3	
N14 Zug-Baar	high	P	110	80.8	0.7	83.7 (82.8)
		H	80	85.6	0.3	

** Strassengeschwindigkeitskategorie

** Belag entspricht nicht den Anforderungen des CPX-Index.

6.2.2 SPB-Messungen für Event-Energien 1h-L_{A,eq}

Die SPB-Messungen sind ebenfalls nach Event-Energien L_{A,eq,1h} ausgewertet worden. In Tab. 13 sind diese Ergebnisse dargestellt. In dieser Tabelle sind ebenfalls die Messwerte mit dem CPB-Verfahren (Controlled Pass-By) und Coast-By (Vorbeiroll-Messung) dargestellt.

Tab. 13: Referenzwerte für SPB-Messungen und Eventenergien für Referenzgeschwindigkeiten zwischen 50 und 110 km/h. In Fett werden die Beläge dargestellt, welche bezüglich des CPX-Index als Referenzkandidaten in Frage kommen. In Klammern sind jeweils die SPB-Referenzwerte angegeben).

Standort	v [km/h]	CPB	Coast-by	SPB P	SPB H**	SPBI
		L _{A,eq,1m,20°C}	L _{A,eq,1m,20°C}	L _{A,eq,1m,20°C}	L _{A,eq,1m,20°C}	(Referenzwerte)
		[dB(A)]	[dB(A)]	[dB(A)]	[dB(A)]	
Wolfwil innerorts*	50	48.1	47.3	47.5	56.1	49.6 (50.5)
Domat innerorts	50	48.5		51.3	54.7	51.8 (50.5)
Domat ausserorts	50	48	47.8	48.0	53.4	49.7 (50.5)
Domat ausserorts	80	53.4	53.2	54.0	58.5	55.3 (-)
Chur ausserorts*	80	53.3	52.8	53.3	60.9	56.2 (-)
N6 Rubigen-Kiesen	80				60.2	58.0 (57.1)
N6 Rubigen-Kiesen	110			55.1		
N14 Zug-Baar	80				60.6	58.5
N14 Zug-Baar	110		54.8	55.7		(57.1)

* Belag entspricht nicht den Anforderungen des CPX-Index.

** Nicht genügend Fahrzeuge für statistische Robustheit

Dabei zeigt sich, dass der Referenzwert der SPB-Messungen (SPB P) jeweils sehr nahe an die Messungen mit dem CPB-Verfahren kommen.

7 Fazit

Mit der Ablösung des Strassenlärmrechnungsmodells StL-86+ hinzu sonROAD18 verändert sich nicht nur das Berechnungsmodell, sondern auch die Charakterisierung von Strassenbelägen. Da das Modell StL-86+ früher oder später komplett abgelöst werden wird, ist ein Bezug darauf nicht mehr sinnvoll. Allerdings findet die StL-86+-spezifische Bezeichnung KB, also «*Korrektur Belag*» auch in sonROAD18 immer noch Verwendung und die Referenz aus StL-86+ wird somit implizit weitergeführt: Mit der Belagsschnittstelle in sonROAD18 besteht die Möglichkeit, durch die CPX-Standardspektren sonROAD18 Belagskorrekturen zu definieren [6]. Dies deutet bereits auf die Problematik hin, dass es praktisch nicht möglich ist, eine Charakterisierung von Belägen zu erreichen, welche komplett unabhängig von Lärmrechnungsmodellen ist. Denn ein Belag, respektive eine Messung, muss immer in ein Lärmrechnungsmodell überführt werden können. Denn für die Lärmrechnung ist schlussendlich relevant, welche Wirkung man mit Belag X erzielen kann und welchen Einfluss eine (Belags-) Massnahme hat. Folglich müssen auch die Messmethoden einen Belag dahingehend beschreiben, dass ein Belag bezüglich seiner Referenz charakterisiert werden kann. Die Messmethoden für die Charakterisierung sind zum einen das Verfahren SPB, welches, je nach Anwendung, Lärmbelastungen in einer gewissen Distanz zur Fahrbahn ausweist. Zum anderen kann mit dem CPX-Verfahren die Belagswirkung grossflächig und dabei auch kosteneffizient erfasst werden. Dabei ist aber zu berücksichtigen, dass die beiden Verfahren aus akustischer Sicht nicht dieselbe Grösse erfassen. Bei der CPX-Messung wird der emittierte Schalldruck in unmittelbarer Nähe zur Quelle erfasst (Abstand von 20 cm). Weiter umfasst das Verfahren SPB ebenfalls noch weitreichende Ausbreitungseffekte, wie zum Beispiel die Absorption auf dem Belag im Ausbreitungsbereich. Ebenfalls umfasst die Messung mit der Methode SPB immer auch Effekte an der Fahrzeugflotte. Dies erschwert die «reine» Charakterisierung des Belages über die Zeit, die ermittelten Referenzwerte sind immer von einem gewissen Flottenmittelwert abhängig. Aus diesem Grund ist in diesem Projekt eine Methodik entwickelt worden, die die Charakterisierung von Belägen aufbauend auf einer rein akustischen Messung des Rollgeräusches (CPX-Messung) abbilden soll. Dies ermöglicht, dass zumindest dieser Teil möglichst unabhängig von der Flottenzusammensetzung ist und daher auch in Zukunft wieder Beläge mit den hier beschriebenen Eigenschaften gefunden werden können. Für alle anderen Messpegel und Messarten sind immer Fahrzeugsflotteneinflüsse vorhanden, was einen direkten Vergleich der «reinen» Belagsgüte basierend auf dem Rollgeräusch erschwert.

Die Charakterisierung von Belägen bewegt sich immer innerhalb des Dreigespanns SPB-Messung – CPX-Messung – Lärmrechnungsmodell. Idealerweise beschreiben alle Messungen dieselben Grössen und lassen sich direkt ineinander umrechnen.

7.1 Umrechnungen zwischen verschiedenen Charakterisierungsmethoden

Wie die internationale Literatur zeigt, gibt es einen sehr breiten Konsens, dass sich die CPX-Werte mit einem 1:1 Bezug relativ zuverlässig in einen Maximalpegel in 7.5 m umrechnen lassen. Das heisst, dass mit jedem Dezibel, das in den SPB-Messungen gemessen wurde, ebenfalls eine Zunahme in den CPX-Messungen von 1 dB einhergeht.

Dies ist aber nicht der Fall für L_{Aeq} -Messungen (Event-Energien). Die bisherige Umrechnungsformel von CPX-Pegel in eine Abweichung zum Strassenlärmrechnungsmodell StL-86+ zeigte eine Steigung von 1.23 (@50 km/h für PKWs) (Vgl. Kapitel 3.1, Seite 27). Das heisst für jedes Dezibel an Belagsgüte, das mit dem CPX-Verfahren ermittelt wurde, wird $X \cdot 1.23$ Dezibel mehr am Strassenrand gemessen. Somit zeigt sich deutlich, dass die beiden Messverfahren nicht dieselbe Grösse abbilden. Ebenso basiert dieses Umrechnungsmodell auf den Wagenpark von 2010 und einer damals repräsentativen Belagsauswahl.

Abb. 21 zeigt den Zusammenhang zwischen den Charakterisierungsmethoden auf. Dabei zeigt sich ebenfalls, dass der Zusammenhang zwischen den Event-Energien ($L_{A,eq}$ -Messungen) und den CPX-Messungen noch weiter detailliert zu untersuchen ist.

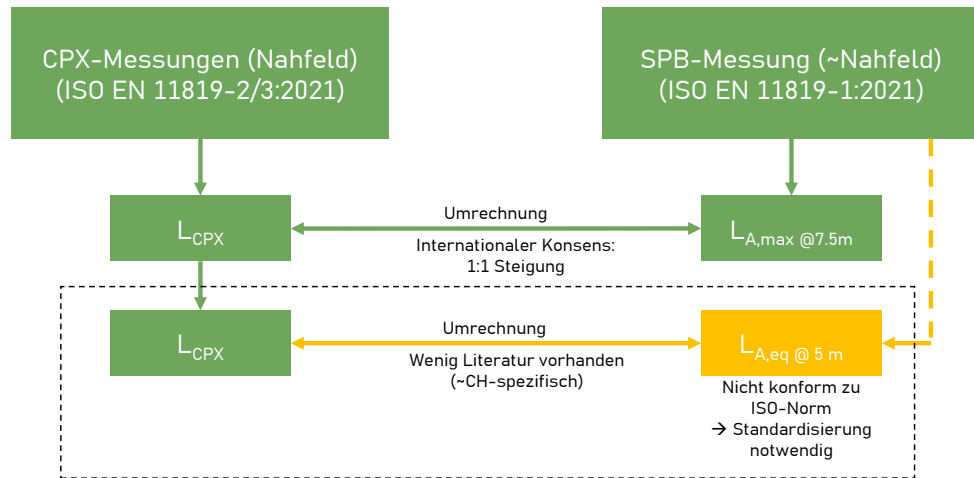


Abb. 21: Umrechnung zwischen Belagscharakterisierungsmethoden.

7.2 Festlegung Referenzwerte für die Schweiz

In diesem Projekt wurde der Schweizer Referenzbelag hinsichtlich der beiden Messverfahren SPB- und CPX-Messungen weiter präzisiert. Die Ergebnisse dazu sind in den Tabellen im Kapitel 6.2 aufgelistet. Mit diesen Werten kann nun eine Charakterisierung von Belägen vorgenommen werden. Durch die starke Anlehnung an internationale Konventionen können die Werte mit dieser Methodik auch gut im internationalen Kontext verglichen werden.

Mit der Referenzierung wird ebenso sichergestellt, dass die Messwerte in die Schweizer Lärmberechnungsmodelle übertragbar sind. So können mit den gemessenen CPX-Werten mit der sonROAD18-Belagsschnittstelle direkt sonROAD18 Belagskorrekturen eingegeben werden. [6]. Allerdings ist mit der Belagsschnittstelle als Formulierung über die KB-Schnittstelle (Referenzspektren) immer noch ein Bezug zum alten Strassenberechnungsmodell StL-86+ vorhanden.

Ein ähnliches Verfahren kann über die SPB-Messung erfolgen, wobei in diesem Fall der Umweg über die Modelleichung (Event-Energien aus SPB-Messungen) gemacht werden muss.

Bei der Charakterisierung der Beläge stellt sich immer noch die Frage, inwieweit verschiedene Schwerverkehrsanteile miteinbezogen werden sollen. In der präsentierten Methode orientiert sich die Gewichtung dieses Anteils der Einfachheit halber am ISO 11819-1 Standard.

7.3 Empfehlungen für Umsetzung

Mit den im vorliegenden Bericht definierten Referenzwerten ist der Referenzbelag für die Schweiz näher präzisiert worden. Die vorliegende Studie hat ergeben, dass die akustische Charakterisierung der Beläge anhand der folgenden Methoden erfolgen kann.

Dies umfasst die folgenden Empfehlungen:

Messverfahren CPX:

- Messung strikt gemäss internationaler Norm ISO 11819-2/3
- Ausweisen des CPX-Index (Vgl. 2.3.1 p. 22)
- Berechnung der Abweichung zum Referenzbelag mit dem CPX-Index (*Tab. 9*, p. 43)
- Umrechnung der Nahfeldpegel in Wirkungen die beim Anwohner eintreffen, durch Berücksichtigung des Skalierungsfaktors zwischen $L_{A,F,max@7.5m}$ und den $L_{A,eq,1h@1m}$ Pegeln aus SPB-Messungen (Vgl. 5.2.1 p. 46).

Beispiel:

Der Belag XY, CPX-Index @ 50km/h: 89.9 dB(A) ist im Vergleich zum Referenzbelag (91.3) um 1.2 dB leiser. (Referenzgeschwindigkeit 50 km/h)

UND / ODER:

Messverfahren SPB:

- Messung strikt gemäss internationaler Norm ISO 11819-1
- Ausgabe der Messpegel gemäss internationaler Norm ISO 11819-1
 - $L_{A,F,max@7.5m}$, $v_{ref} = 50/80/110km/h$
 - SPB-Index (Kapitel 2.2.1 p. 19)
 - Zusätzliche Event-Energien sind zu vermessen (Mikrofonposition 7.5 m)
 - Definition zur genauen Vermessung der Event-Energien muss noch erfolgen (Siehe weitergehenden Forschungsbedarf in Kapitel 7.4)

Beispiel:

Der Belag XY, SPB-Index $L_{A,max}$ @ 50 km/h: 74 dB ist im Vergleich zum Referenzbelag (75.2 dB) um 1.2 dB leiser.

7.4 Weiterer Forschungsbedarf

Wie sich während der Studie gezeigt hat, besteht folgender Handlungsbedarf bezüglich der Vermessung und Quantifizierung von Strassenlärm:

- Es ist zwingend eine Überarbeitung des Leitfadens Strassenlärms notwendig mit folgendem Fokus:
 - Angleich an internationale Norm ISO 11819-1
 - Vereinheitlichung der zu verwendenden Temperaturkorrektur
 - Entwicklung Messverfahren für Nationale Handhabung (Nationaler Anhang) für SPB-Methode (Für L_{Aeq} -Messung)
- Standardisierung der SPB-Messungen in Bezug auf die Erfassung von Event-Energien.
- Ermittlung gefestigte Referenzwerte mit genügender statistischer Stichprobengrösse bei allen Referenzgeschwindigkeiten (50, 80 und 110 km/h) mit SPB-Messungen
- Erfassung breit abgestütztes Umrechnungsmodell zwischen L_{Aeq} und CPX mit grossen Stichproben an Strassenbelägen und Fahrzeugvorbeifahrten.
- Umrechnung $L_{A,max}$ in L_{Aeq} für SPB für diverse Fahrzeugkategorien und einer modernen Fahrzeugflotte (bei Flottenveränderungen zu aktualisieren)
- Untersuchungen zur Wirkung von hochabsorbierenden Belägen und deren Korrelation zu CPX-Messungen. Konkret soll der Einfluss von grossen Absorptionsflächen auf dem Belag untersucht werden, wie sich dies auf die gemessenen CPX respektive SPB-Pegel auswirkt.

Anhänge

I.	Wahl Referenzbelag	58
I.1	Verteilung Belagstypen Nationalstrasse.....	58
I.2	Verteilung Belagstypen Kantonsstrassen.....	58
I.3	Daten neu eingebauter Nationalstrassen	59
I.4	Daten neu gebauter Kantonsstrassen im Kanton AG	60
II.	Umrechnungen zwischen CPX-Index und SPB-Index	61
II.1	CPX-Index vs. SPB-Index anhand CH-Daten	61
III.	Auswahlverfahren Messstandorte für Anwendung der Methodik.....	65
III.1	Auswahlkriterien.....	65
III.2	Innerorts (50 km/h).....	67
III.3	Ausserorts (80 km/h).....	69
III.4	Nationalstrasse (80-120 km/h).....	71
IV.	Resultate SPB-Messungen	73
IV.1	Überblick Messdaten.....	73
IV.2	Lineare Regression	76
IV.3	Messresultate.....	77
V.	Vergleich Messwerte.....	81
V.1	Maximalpegel $L_{A,F,max}$ @7.5m	81
V.2	Event-Energien $L_{A,eq,1h}$ @ 1m	82
VI.	Varianten Standort-Normalisierung	83
VI.1	Vorgehen	83
VI.1.1	Normalisierung mit CPX-Werten.....	84
VI.1.2	Normalisierung mit CPB-Werten.....	87
Glossar		89
Literaturverzeichnis.....		91
Projektabschluss		93

I. Wahl Referenzbelag

Bei der Wahl des Referenzbelags wurde berücksichtigt, welche Belagstypen in den vergangenen Jahren in der Schweiz verbaut wurden. Hierzu wurden zwei Datensätze verwendet, einer über die Nationalstrassen und einer über die Kantonsstrassen im Kanton Aargau.

I.1 Verteilung Belagstypen Nationalstrasse

Es zeigt sich, dass auf den Nationalstrassen der grösste Teil aus SMA-Belägen besteht (Vgl. Abb 22).

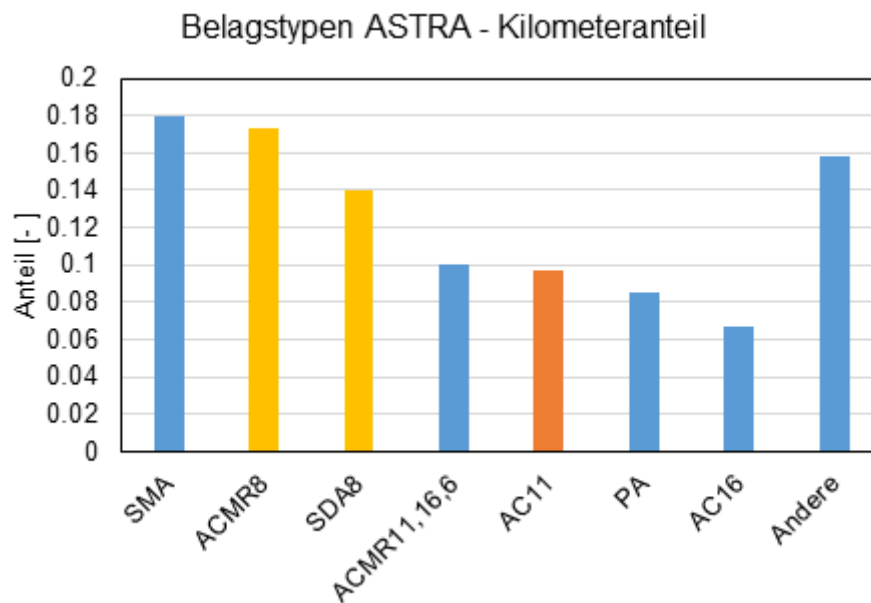


Abb 22: Verteilung von Belagstypen auf dem Nationalstrassennetz

I.2 Verteilung Belagstypen Kantonsstrassen

Ähnlich wie auf den Nationalstrassen dominieren auch auf dem Kantonsgebiet die Beläge der SMA-Sorte (Vgl. Abb 23).

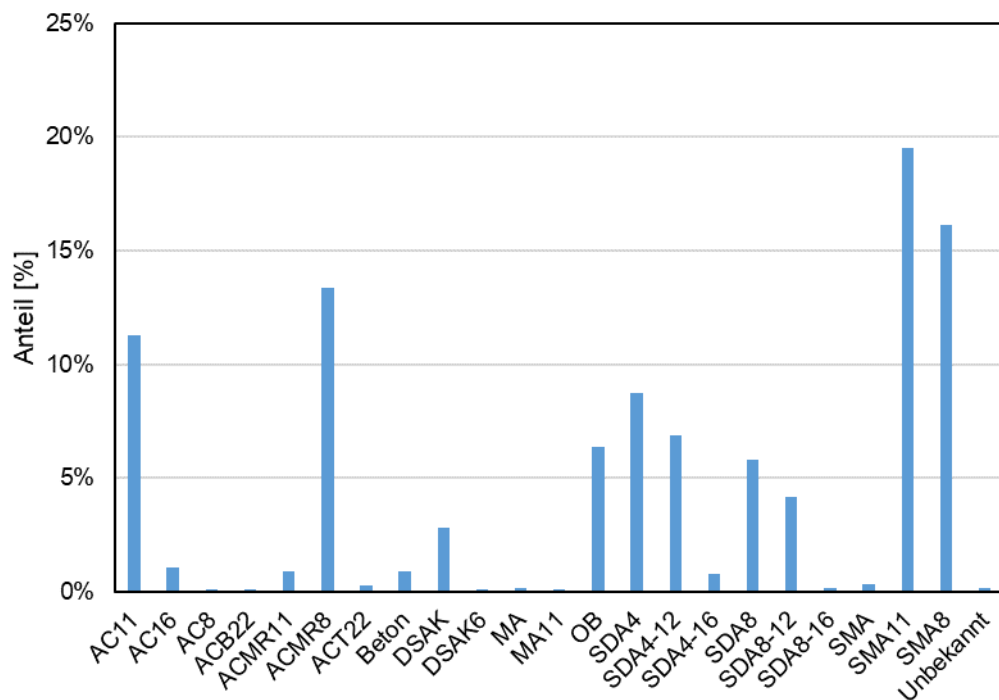


Abb 23: Verteilung von Belagstypen auf dem Kantonsstrassennetz des Kt. AG.

I.3 Daten neu eingebauter Nationalstrassen

Wie in der nachfolgenden Abbildung ersichtlich, wurden auf Autobahnen ab ca. 2006 vermehrt ACMR 8 Beläge und ab 2014 vor allem SDA 8 Beläge eingebaut. In die Kategorie «Andere» fallen hauptsächlich SMA, PA, AC und ACMR 11 und 16 Beläge

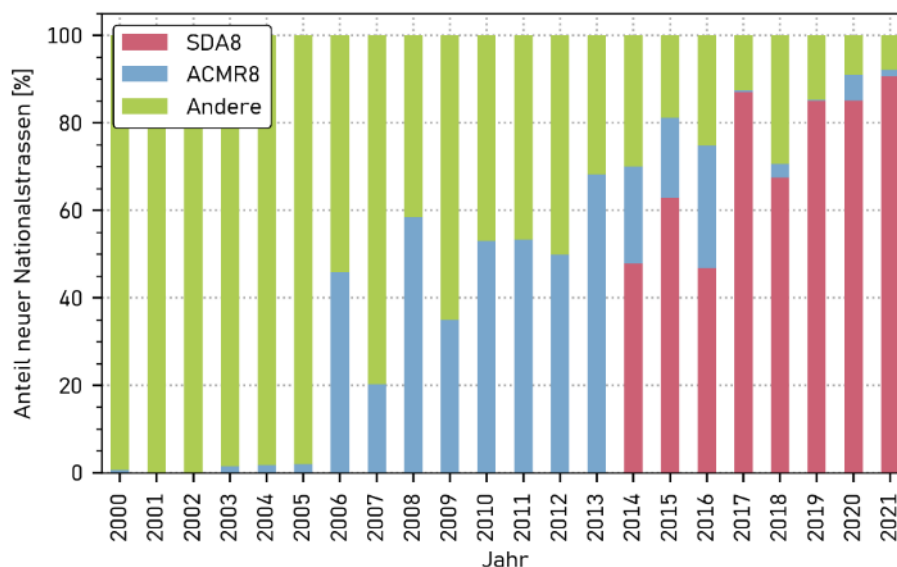


Abb. 24: Anteil an neu eingebauten Belägen auf Nationalstrassen. Quelle: ASTRA Belagslayer, Stand: 31.12.2021

I.4 Daten neu gebauter Kantonsstrassen im Kanton AG

Auf den Kantonsstrassen im Kanton Aargau wurde, ähnlich wie bei den Nationalstrassen, zuerst auf ACMR 8 Beläge gesetzt und anschliessend auf SDA 8. Hierbei handelt es sich jeweils um einen Anteil von 15-30 % aller neu eingebauten Kantonsstrassen. Neben den SDA 8 und ACMR 8 Belägen wurden auch SMA, AC, SDA 4, DSAK und weitere Beläge eingebaut.

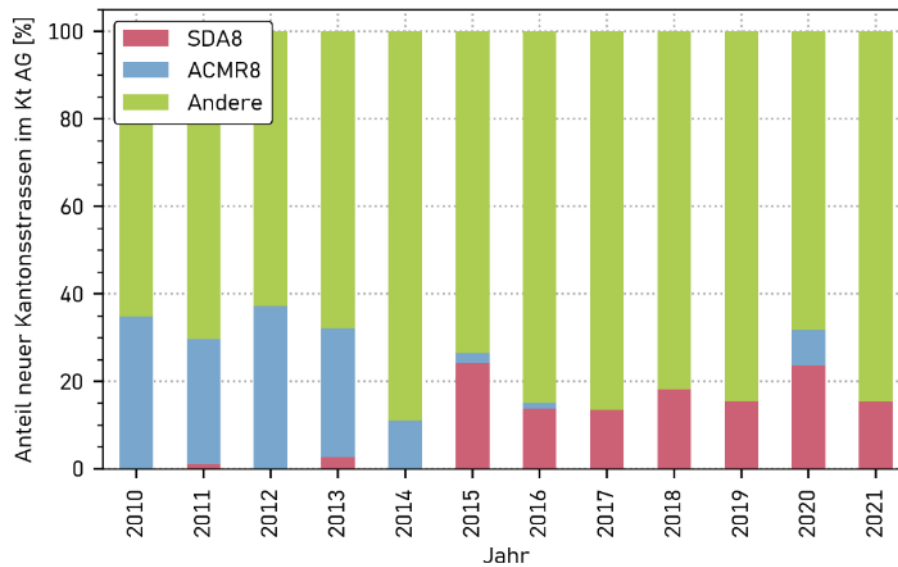


Abb. 25: Anteil an neu eingebauten Belägen auf Kantonsstrassennetz im Kanton Aargau seit 2010.

II. Umrechnungen zwischen CPX-Index und SPB-Index

II.1 CPX-Index vs. SPB-Index anhand CH-Daten

Diese Kapitel zeigt eine erste Annäherung, wie sich die Daten zwischen dem CPX-Index (Vgl. Kapitel 2.3.1) zu den Messgrössen gemäss ISO11819-1 verhalten. In den folgenden Abbildungen wird der SPB-Index als $L_{A,F,max}$ sowie $L_{A,eq}$ dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass in diesem Fall ein stärkerer Filter auf die Messdaten angewendet wurde, da sowohl genügende Messdaten für LKW wie auch PKW vorhanden sein müssen, da sie im SPB-Index miteinander verrechnet wurden.

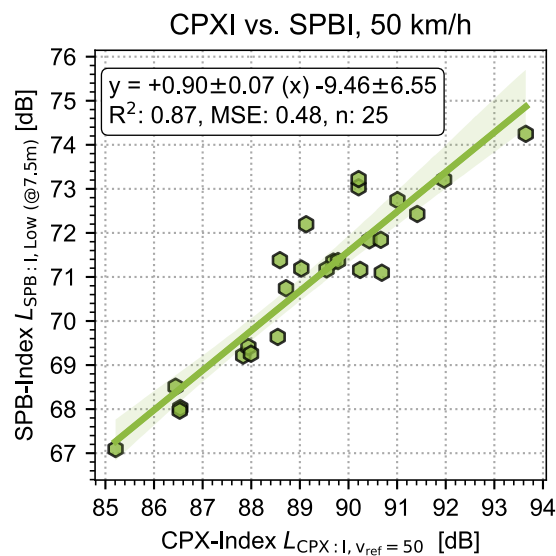


Abb. 26: Zusammenhang zwischen dem CPX-Index ($v_{ref} = 50$ km/h) und dem SPB-Index ($L_{A,F,max}$ @7.5m)

Für die Berechnung des SPB-Index, basierend auf $L_{A,eq 1h}$ – Werten wurde dieselbe Gewichtung gemäss Kapitel 2.3.1 angewendet

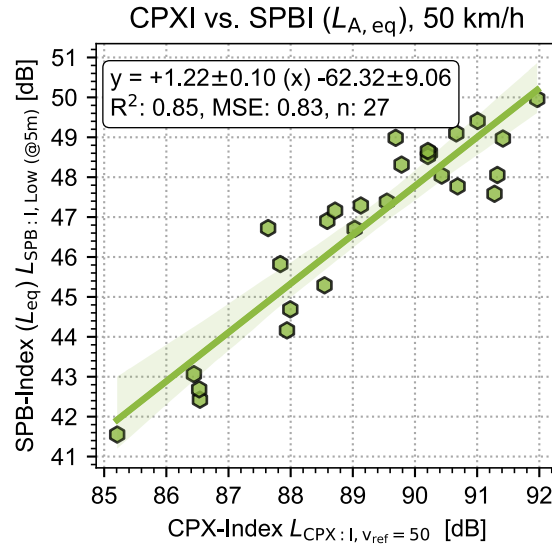


Abb. 27: Zusammenhang zwischen dem CPX-Index ($v_{ref} = 50 \text{ km/h}$) und dem SPB-Index ($L_{Aeq} (1h) @1m$)

Es zeigt sich wiederum, dass der Zusammenhang zwischen den $L_{A,eq}$ basierten Messungen tendenziell die höhere Steigung aufweist als die Messungen, welche auf dem $L_{A,F,max}$ basieren.

Für die Umrechnung im Hochgeschwindigkeitsbereich (110 / 80 km/h) stehen nur sehr wenige Messdaten zur Verfügung. Ebenso zeigt sich insbesondere bei $L_{A,F,max}$ -Messungen eine sehr hohe Streuung der Messdaten. Hier zeigt sich wiederum, dass in der Vergangenheit die Priorität der Messungen nicht auf der $L_{A,F,max}$ – Messung lag und Kompromisse bei den Messstandorten bei dieser Messposition angewendet wurden. Somit ist dem gezeigten Zusammenhang nur geringes Vertrauen beizumessen.

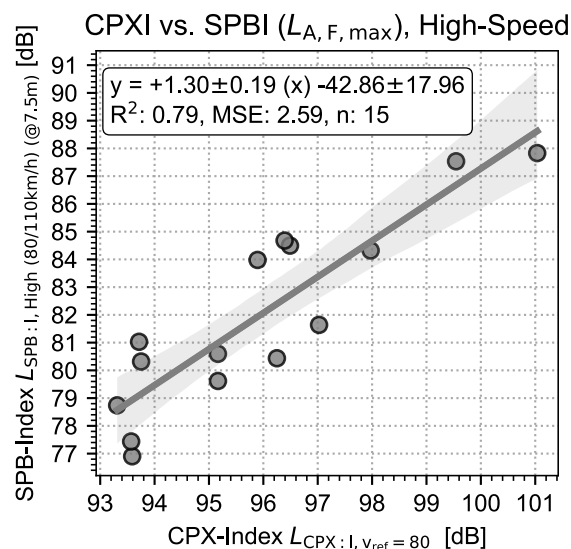


Abb. 28: Zusammenhang CPX-Index (bei 80 km/h) und SPB-Index (gemäss ISO 11819-1).

Bezüglich der $L_{A,eq}$ -Messung ist die Messdatenqualität deutlich erhöht und die Streuung reduziert sich deutlich im Vergleich zu den $L_{A,F,max}$ – Messungen, wie in Abb. 28 und Abb.

29 ersichtlich ist. Jedoch zeigt sich auch hier, dass der Zusammenhang zwischen den gemessenen CPX-Pegeln und den SPB-Pegeln (hier als $L_{A,eq}$) eine Steigung deutlich über 1 aufweist. Zu beachten ist allerdings, dass die Geschwindigkeiten bei CPX-Messung und SPB-Messung nicht dieselbe ist. So wird für die CPX-Messung mit 80 km/h gemessen, während sich der SPB-Index (High) auf die Geschwindigkeiten 110 respektive 80 km/h für LKW bezieht.

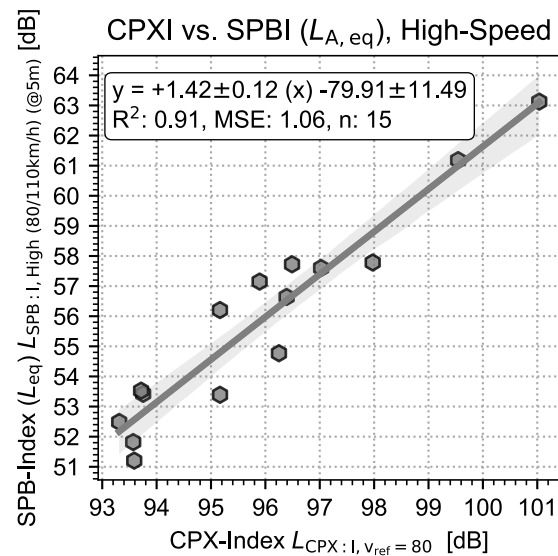


Abb. 29: Zusammenhang CPX-Index (bei 80 km/h) und SPB-Index (ausgedrückt als 1h- L_{Aeq} -Messung in 5m Distanz).

III. Auswahlverfahren Messstandorte für Anwendung der Methodik

III.1 Auswahlkriterien

Für die Auswahl von geeigneten SPB-Messstandorten mussten mehrere Kriterien erfüllt sein:

1. Wie oben beschrieben, beschränkte sich die Standortwahl auf ACMR8 oder SDA8 Beläge. Diese Beläge sollten zudem nicht jünger/älter als 4 bis 6 Jahre alt sein (→ Einbaujahr 2016 bis 2018).
2. Weiter sollte der Belag eine akustische Wirkung von -1 bis +1 dB für den Mischverkehrswert mit 8% Schwerverkehrsanteil aufweisen. Um diese Bedingung zu erfüllen, mussten bereits aktuelle CPX-Messdaten der zur Auswahl stehenden Beläge vorhanden sein.
3. Es wurden je zwei Standorte für die Geschwindigkeitsbereiche «innerorts – 50 km/h», «ausserorts- 80 km/h» und Autobahn – 80-120 km/h» gesucht.
4. Anhand der Vorselektion wurden sämtliche in der CPX-Datenbank vorhandenen Standorte auf die Eignung für eine SPB-Messung überprüft. Hierzu wurde jeder potenzielle Standort mittels Google-Street-View und Swisstopo-Luftbildern auf die Eignung genau geprüft. Die folgenden Kriterien wurden näher betrachtet:
5. Genügend Platz für den Messaufbau (Abstände von 5 m und 7.5 m zwischen Mikrophon und der Fahrbahnmitte; Platz für Messtisch & Seitenradargerät).
6. Damit der Schall der Fahrzeuge nicht durch akustische Reflexionen verstärkt wird, soll der Messstandort keine Strassenschluchten oder Mauern aufweisen.
7. Für eine schallharte Ausbreitung der Fahrgeräusche muss die Bodenoberfläche zwischen dem Mikrophon und den zu messenden Fahrzeugen möglichst verbaut sein (Asphalt, Beton). Das Mikrophon darf somit beispielsweise nicht in einer Wiese platziert werden.
8. Die Strasse muss eben (Steigung $\leq 1\%$) und gerade (keine Kurven) sein.
9. Der zu messende Strassenabschnitt muss auf beiden Seiten mindestens 30 m lang sein.
10. Die Fahrzeuge müssen möglichst mit konstanter Geschwindigkeit fahren. Beschleunigungs- oder Abbremsstrecken sind zu vermeiden.
11. Die Verkehrsstärke muss ausreichend gross sein, um eine vernünftige Gesamt-messdauer zu ermöglichen.
12. Standorte mit Mess-Störquellen wie Fussgängerstreifen oder Schachtdeckel sind zu vermeiden.
- 13.

An jedem Standort wurden Vorbeifahrtsmessungen durchgeführt. Hierbei wurden die folgenden vier Messarten unterschieden:

1. **SPB P** → Gewöhnliche SPB-Messung. Hierbei wurden alle gewöhnlichen, vorbeigefahrenen Personenwagen (PW) berücksichtigt. Kleine Transporter, Geländewagen, Sportwagen, Motorräder und Lastwagen wurden nicht berücksichtigt.
2. **SPB H** → Gewöhnliche SPB-Messung. Hierbei wurden Lastwagen aller Art (zwei- und mehrachsig) sowie Linienbusse berücksichtigt. Zweiaxlige Lastwagen wurden nach ISO 11819-1:2021 durch Addition von 2.7 dB in mehrachsige Lastwagen umgewandelt.
3. **CPB (controlled pass-by)** → Bei diesen «kontrollierten Vorbeifahrtsmessungen» wurden Vorbeifahrten mit standardisierten Reifen durchgeführt und akustisch aufgezeichnet. Als Vorbeifahrts-Auto wurde ein Audi A3 mit Jahrgang 2013 (= ein durchschnittliches Auto) gewählt, welches mit Standard-Referenzreifen (SRTT-Reifen, Reifendruck ca. 2.6 bar) bereift wurde. Diese Standardreifen werden ebenfalls bei den CPX-Messungen verwendet.

4. **Coast-by** → Diese Vorbeifahrtsmessungen fanden unter den gleichen Bedingungen wie die CPB-Messungen statt, jedoch wurde während dem Vorbeifahren der Motor des Autos ausgeschaltet. Dadurch wurde das Motorengeräusch des Autos unterbunden. Das aufgezeichnete akustische Signal entspricht somit dem reinen Reifen-Fahrbahn-Geräusch.

Die Suche nach passenden Messstandorten unter Einhaltung aller gewünschten Kriterien erwies sich als schwierig. Schlussendlich wurden die folgenden sechs Standorte ausgewählt:

III.2 Innerorts (50 km/h)

5. 1. Wolfwil – Vordere Gasse

Koordinaten: 2'626'670, 1'235'340
Fahrrichtung: Fülenbach -> Schwarzhäusern
Messdatum: 04.10.2022
Belagstyp: SDA 8
Einbaujahr: 2016
CPX-MV8-Wert: -0.7 dB (gemessen am 25.07.2022)



- ++ Genügend Platz für Messung
- ++ Schallharte Ausbreitung im Bereich der Messung
- - Die umgebenden Häuser bilden teilweise eine Häuserschlucht, die Abstände zur Fahrbahn sind jedoch gross.
- - Die gefahrene Geschwindigkeit beträgt im Durchschnitt eher 40 als 50 km/h.
- - Wenig Lastwagen

2. Domat innerorts – Reichenaustrasse

Koordinaten: 2'752'889, 1'188'672
Fahrrichtung: Chur -> Reichenau
Messdatum: 11.10.2022
Belagstyp: SDA 8
Einbaujahr: 2016
MV8-Wert: 0.8 dB (gemessen am 18.07.2022)



- ++ Messung der Gegenfahrbahn mit ausreichend Platz für Messaufbau
- ++ Schallharte Ausbreitung im Bereich der Messung
- - Die umgebenden Häuser bilden teilweise eine Häuserschlucht, die Abstände zur Fahrbahn sind jedoch gross.
- - Die gefahrene Geschwindigkeit beträgt im Durchschnitt eher 40 als 50 km/h.
- - Sehr wenig Verkehr → Messung wurde abgebrochen
- - Wenig Lastwagen

III.3 Ausserorts (80 km/h)

3. Chur ausserorts – Reichenaustrasse

Koordinaten: 2'756'491, 1'190'020
Fahrrichtung: Domat -> Chur
Messdatum: 11.10.2022
Belagstyp: AC 8
Einbaujahr: 2018
MV8-Wert: -1.7 dB (gemessen am 18.07.2022)



- ++ Genügend grosser Verkehrsfluss
- ++ Keine umgebenden Häuser
- - Hang auf der linken Seite (unteres Bild) könnte Schallausbreitung beeinflussen
- - Strassenneigung von ca. 1 %
- - Kein SDA 8 Belag

4. Domat ausserorts – Reichenaustrasse

Koordinaten: 2'752'456, 1'188'462
Fahrrichtung: Domat -> Chur
Messdatum: 12.10.2022
Belagstyp: unbekannt
Einbaujahr: unbekannt
MV8-Wert: 0.0 dB (gemessen am 18.07.2022)



- ++ Genügend grosser Verkehrsfluss
- ++ Messung der Gegenfahrbahn
- ++ Keine umgebenden Häuser
- - Ca. 150 m nach der Messstelle wechselte die limitierende Geschwindigkeit von 80 auf 50 km/h
- - Diverse Lärmquellen während der Messung → häufige Messunterbrüche (Eisenbahn, Helikopter, Bauarbeiten)
- - Unbekannter Strassenbelag

III.4 Nationalstrasse (80-120 km/h)

5. N06 Rubigen-Kiesen

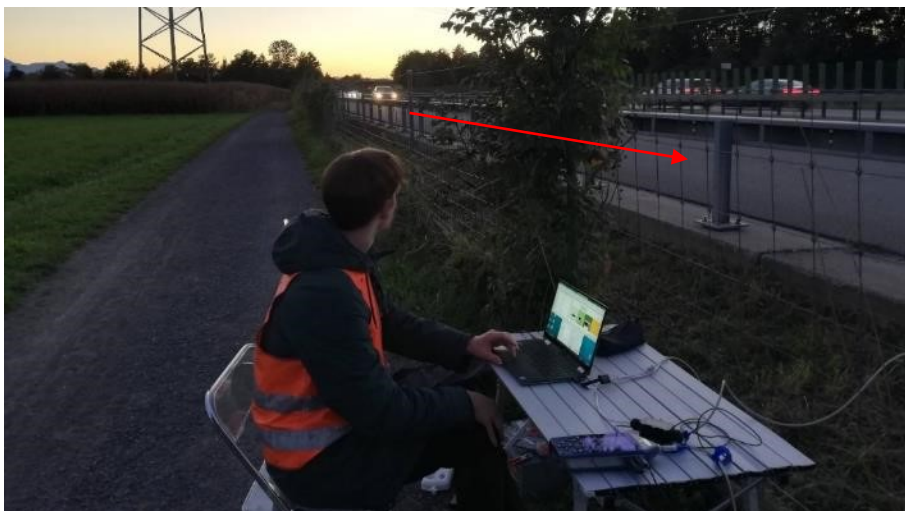
Koordinaten: 2'609'227, 1'188'330
Fahrrichtung: Kiesen -> Rubigen
Messdatum: 06.10.2022
Belagstyp: SDA 8
Einbaujahr: 2016
MV8-Wert: -1.0 dB (gemessen am 01.09.2021)



- ++ Genügend grosser Verkehrsfluss
- ++ Keine umgebenden Häuser
- ++ Schallharter Ausbreitungsweg
- - Verkehrslärm auf der dahinterliegenden Gegenfahrbahn

6. N14 Zug-Baar

Koordinaten: 2'680'724, 1'227'232
Fahrrichtung: Luzern -> Zürich
Messdatum: 05.10.2022
Belagstyp: SDA 8
Einbaujahr: 2014
MV8-Wert: -0.8 dB (gemessen am 13.09.2021)



- ++ Genügend grosser Verkehrsfluss
- ++ Keine umgebenden Häuser
- ++ Schallharter Ausbreitungsweg
- - Verkehrslärm auf der dahinterliegenden Gegenfahrbahn

IV. Resultate SPB-Messungen

Die statistischen Vorbeifahrtsmessungen wurde nach ISO 11819-1:2021 durchgeführt. Hierbei wurde mit dem vorderen Mikrophon (Distanz zur Fahrbahnmitte = 5.0 m) der L_{eq} und mit dem hinteren Mikrophon (Distanz zur Fahrbahnmitte = 7.5 m) der L_{max} aufgenommen.

Zweiachsige Lastwagen (H2) wurden nach ISO 11819-1:2021 durch Addition von 2.7 dB in mehrachsige Lastwagen (H3+) umgewandelt und werden nachfolgend mit «SPB H» bezeichnet.

IV.1 Überblick Messdaten

Es wurden die folgende Anzahl an Vorbeifahrten pro Messstandort aufgezeichnet:

Tab. 14: Anzahl gemessener Fahrzeuge pro Standort und Messart

Standort	# SPB P	# SPB H2	# SPB H3+	# CPB	# Coast-by
Wolfwil innerorts	105	1	9	10	9
Domat innerorts	10	0	3	4	3
Chur ausserorts	105	4	10	5	3
Domat ausserorts	96	7	4	13	12
N06 Rubigen-Kiesen	123	8	26	2	2
N14 Zug-Baar	125	1	6	1	2

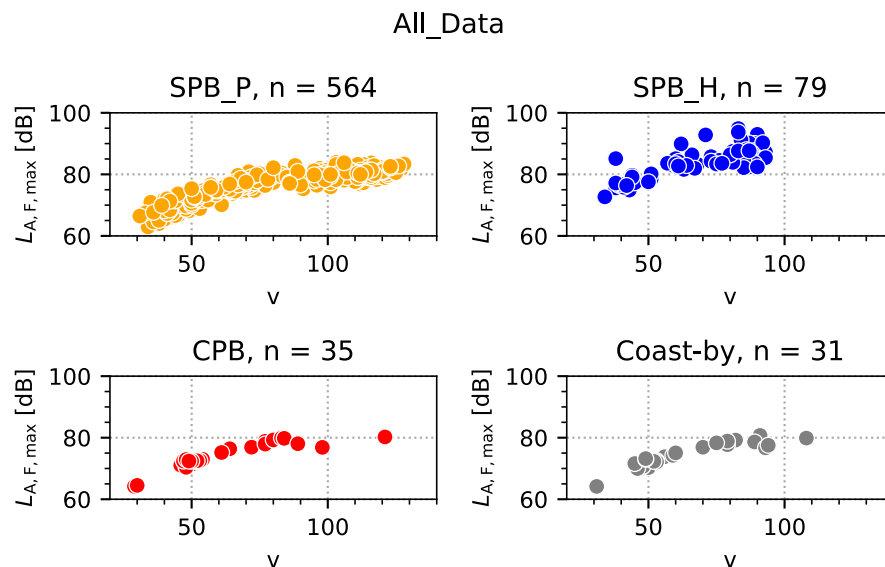
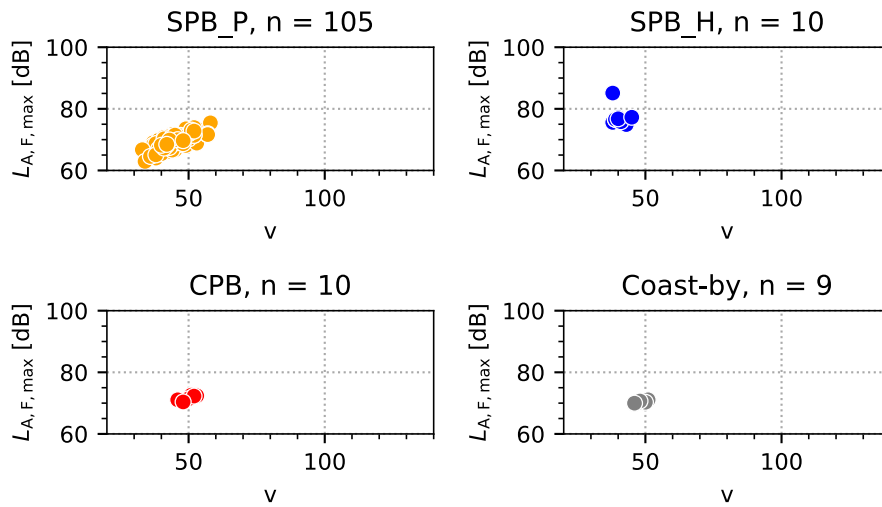


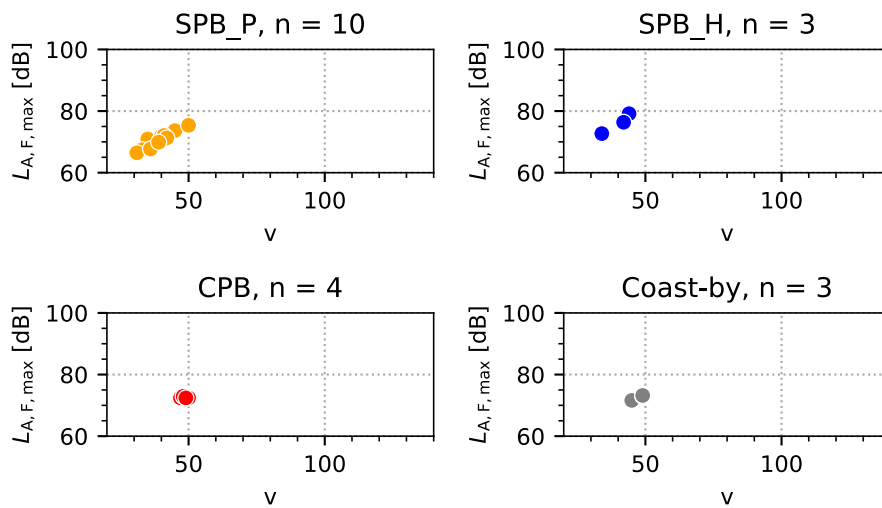
Abb. 30: Zusammenzug aller Messdaten von allen sechs Standorten. Auf der x-Achse ist die Geschwindigkeit v in km/h angegeben.

Aufgeschlüsselt nach Standort wurden die folgenden Messdaten erhoben:

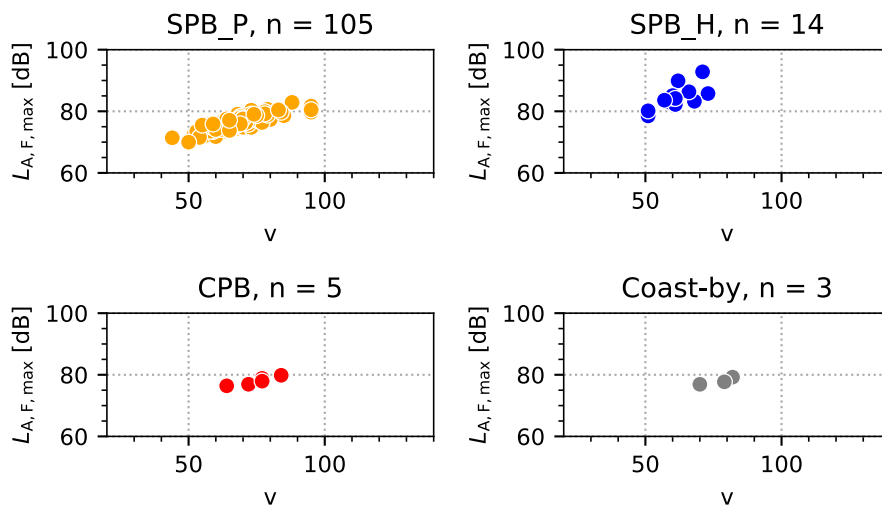
Wolfwil innerorts



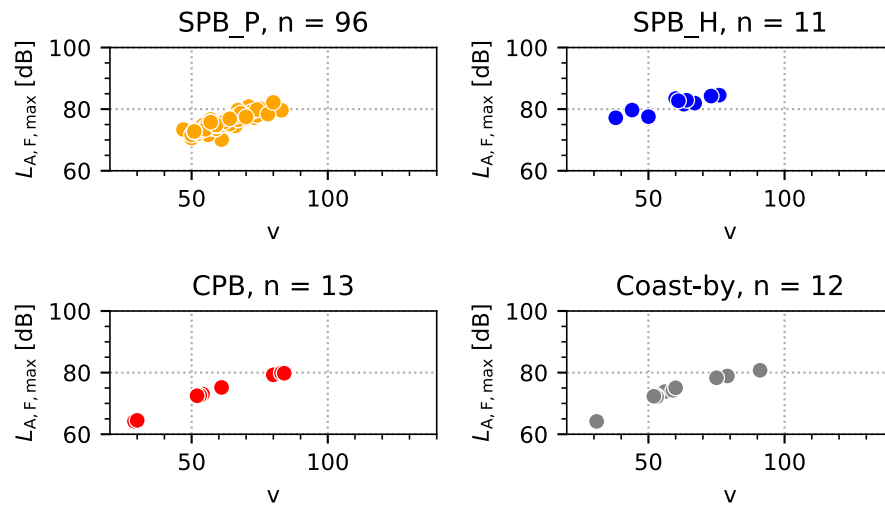
Domat innerorts



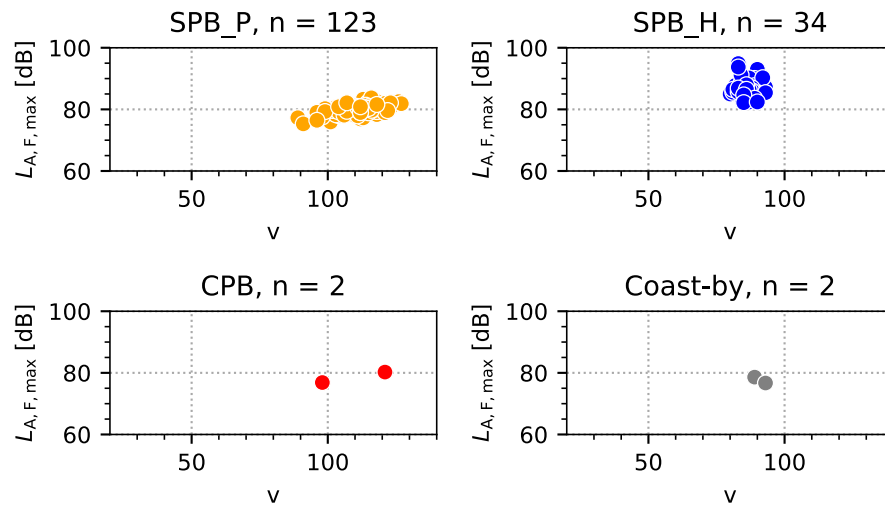
Chur ausserorts



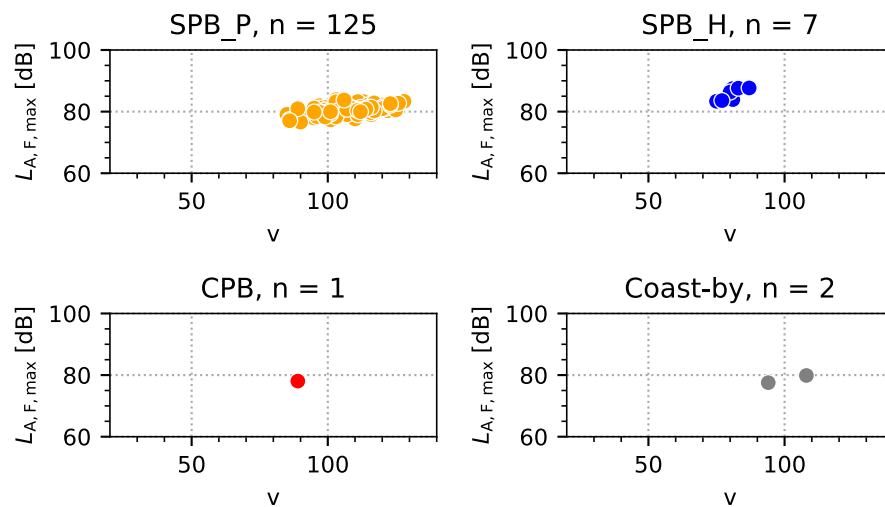
Domat ausserorts



N6 Rubigen-Kiesen

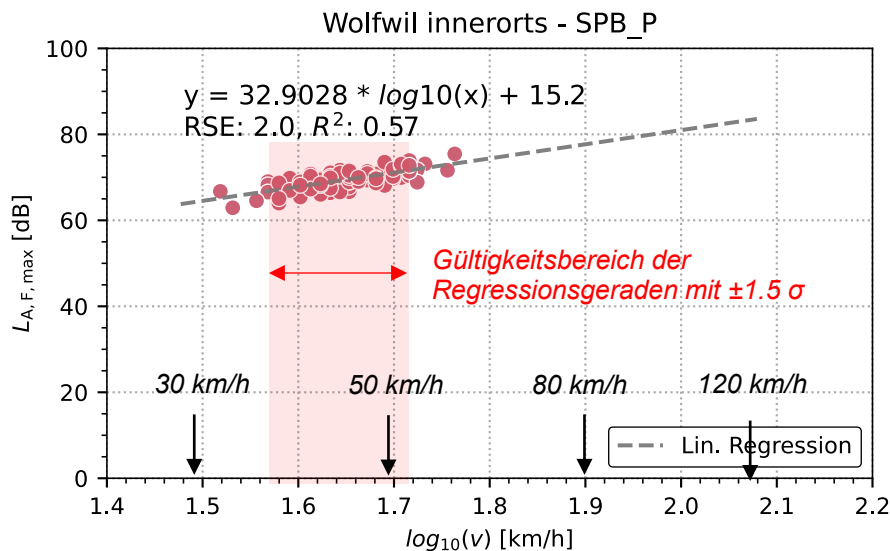


N14 Zug-Baar



IV.2 Lineare Regression

1. Anhand der erhobenen Messdaten wurde pro Standort und Messart jeweils eine Regressionsgerade durch die Datenpunkte gelegt. Mithilfe dieser Regressionsgeraden konnte anschliessend der akustische Wert für eine bestimmte Geschwindigkeit (z. B. 50 km/h) ermittelt werden.
2. Die Gültigkeit einer Regressionsgeraden wurde jeweils pro Standort und Messart je nach Datenverfügbarkeit definiert. So ist beispielsweise die Regressionsgerade in Wolfwil innerorts für die SPB P Messung lediglich für die Geschwindigkeit $v = 50$ km/h gültig; nicht aber für Geschwindigkeiten von 80, 100 oder 120 km/h.
3. In der folgenden Abbildung ist ein Beispiel einer berechneten Regressionsgeraden inkl. deren Gültigkeitsbereich ersichtlich:



4. Mittels der berechneten Regressionsgeraden kann nun der akustische Wert für eine gewünschte Geschwindigkeit ermittelt werden. Im gezeigten Beispiel für Wolfwil innerort und der SPB P Messung ergibt sich für 50 km/h:
5. $L_{A,F,max}: y = 32.9025 * \log_{10}(x) + 15.2$
6. mit $x = 50 \frac{km}{h}$
7. $\rightarrow y = 71.1 dB$
8. Da bei den SPB-H Messungen in der Regel nur wenige Datenpunkte vorliegen und diese Punkte noch dazu eher in einer Punktwolke liegen, wurde für die Berechnung der Regressionsgeraden eine konstante Steigung von 25 verwendet. Dieses Vorgehen ist in ISO-11819-1:2021 festgehalten.

IV.3 Messresultate

Tab. 15: Zusammenstellung Anzahl Fahrzeuge pro Standort und der gemessenen SPB – Messungen gemäss Leitfaden Strassenlärm (StL86+) Messwerte.

Standort	Fahrzeug- klasse	Geschwindigkeit [km/h]		StL86+ [dB(A)]		Anzahl	StL86+ Mischverkehr* [dB(A)]
		Mittel- wert	Std. Abw.	Mittel- wert	Std. Abw.		
Wolfwil innerorts	P (N1)	45.7	5.1	1.1	1.5	115	-0.3
	H (N2)	40.3	2.2	-3.1	2.5	10	
Domat innerorts	P (N1)	41.9	6.5	2.9	1.5	14	1.2
	H (N2)	40.0	5.3	-4.5	1.4	3	
Domat ausserorts	P (N1)	62.4	9.5	2.9	1.6	109	1.9
	H (N2)	59.9	11.6	-3.3	1.4	11	
Chur ausserorts	P (N1)	69.3	9.2	3.0	1.4	110	2.3
	H (N2)	61.4	6.4	-0.7	2.4	14	
N6 Rubigen-Kiesen	P (N1)	112.8	7.4	1.3	1.2	125	0.6
	H (N2)	86.2	3.5	0.3	2.0	34	
N14 Zug-Baar	P (N1)	106.4	9.2	2.3	1.5	126	2.0
	H (N2)	80.6	3.9	0.4	1.7	7	

* Innerorts & Ausserorts mit 8 %, Nationalstrassen mit 15 % N2-Anteil

Tab. 16: Zusammenstellung der SPB-Messungen nach ISO11819-1:2021 ($L_{A,F,max}$ -Pegel bei definierter Referenzgeschwindigkeit) Standort.

Standort	Kategorie*	Fahrzeug- klasse	v_{ref} [km/h]	$L_{A,F,max}$ [dB(A)]	Gewicht W [-]	SPB-Index
Wolfwil innerorts	low	P	50	71.1	0.9	73.1
		H	50	79.6	0.1	
Domat innerorts	low	P	50	75.3	0.9	75.7
		H	50	78.6	0.1	
Domat ausserorts	medium	P	80	80.3	0.8	81.7
		H	80	84.9	0.2	
Chur ausserorts	medium	P	80	78.9	0.8	82.3
		H	80	87.4	0.2	
N6 Rubigen-Kiesen	high	P	110	79.8	0.7	83.9
		H	80	86.4	0.3	
N14 Zug-Baar	high	P	110	80.8	0.7	83.7
		H	80	85.6	0.3	

* Strassengeschwindigkeitskategorie

**

Anhand der Messdaten wurde der SPB-Index berechnet. Dieser Index dient zur Beurteilung der Fahrbahnoberfläche hinsichtlich ihrer Geräuschemission und berechnet sich aus einer Gewichtung und energetische Mittelung der PW- und LW-Geräuschpegel.

Der SPB-Index berechnet sich gemäss der ISO-Norm mit folgender Formel:

$$SPBI = 10 \log \left[W_P \times 10^{\frac{L_{SPB,P,v_{ref,P}}}{10}} + W_H \left(\frac{v_{ref,P}}{v_{ref,H}} \right) \times 10^{\frac{L_{SPB,H,v_{ref,P}}}{10}} \right] dB$$

Tab. 17: Zusammenstellung der CPX-Messungen

Standort	Fahrzeug- klasse [km/h]	v_{ref}	L_{CPX} [dB(A)]	L_{cpX} (StL86+) [dB(A)]	Gewicht [-]	CPX-Index [dB(A)]	Mischverkehr* (StL86+) [dB(A)]
Wolfwil innerorts	P	50	90.1	0.0	0.5	90.2**	-1.5
	H	50	90.2	-3.3	0.5		
Domat innerorts	P	50	91.7	2.0	0.5	91.5	0.3
	H	50	91.3	-1.8	0.5		
Domat ausserorts	P	50	91.5	1.8	0.5	91.5	0.2
	H	50	91.4	-1.7	0.5		
Chur ausserorts	P	50	90.0	-0.1	0.5	90.0**	-2.4
	H	50	89.9	-3.7	0.5		
N6 Rubigen-Kiesen	P	80	97.1	0.0	0.5	96.8	-0.6
	H	80	96.4	-1.3	0.5		
N14 Zug-Baar	P	80	97.0	-0.2	0.5	97.1	-0.3
	H	80	97.1	-0.3	0.5		

* Strassengeschwindigkeitskategorie

** Werte ausserhalb Referenzwerte CPX (Tab. 7)

I.1.1 Spektrale Darstellung der Messresultate

Die mittels Regressionsgeraden und vordefinierter Referenzgeschwindigkeit berechneten Spektraldaten sind in den folgenden Abbildungen pro Standort und Messart dargestellt.

SPB P:

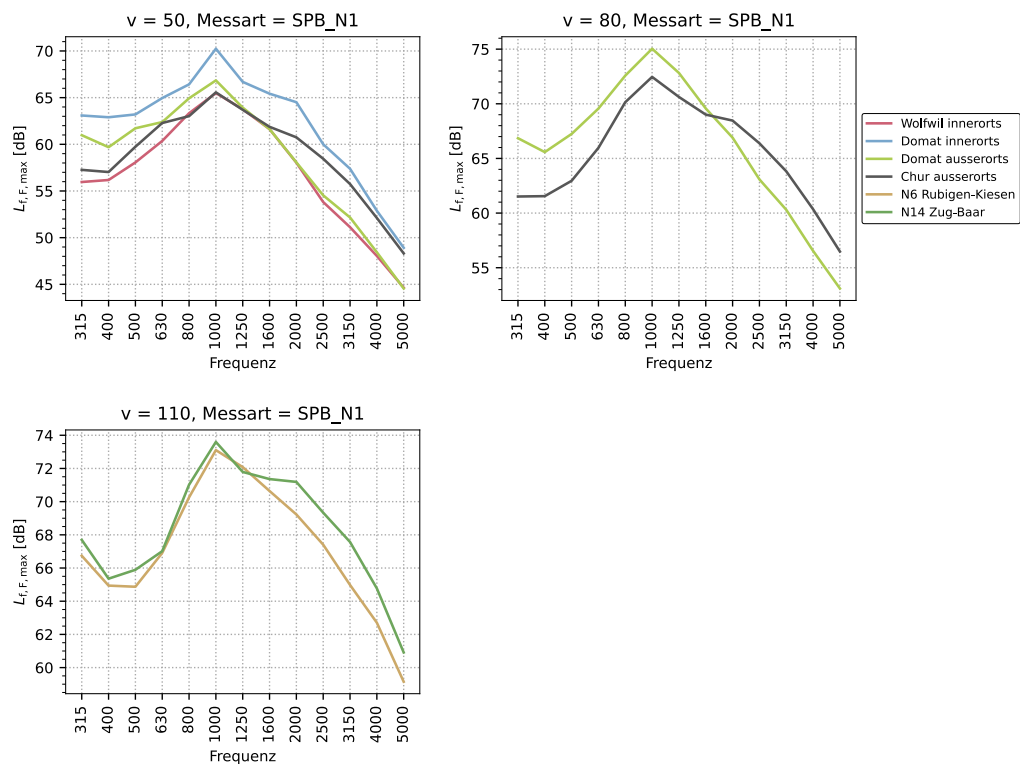


Abb. 31: Spektrale Auswertung der SPB-Messpegel ($L_{f,Fmax}$) für Kategorie P.

SPB H:

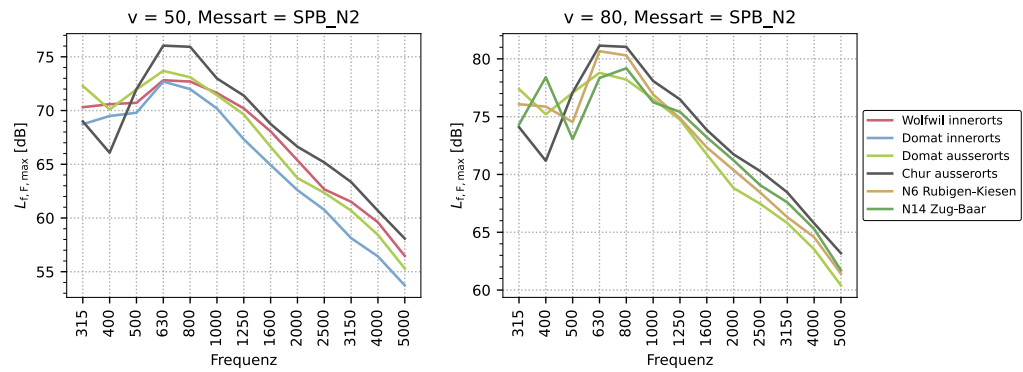


Abb. 32: Spektrale Auswertung der SPB-Messpegel ($L_{f,F,max}$) für die Kategorie P.

CPB:

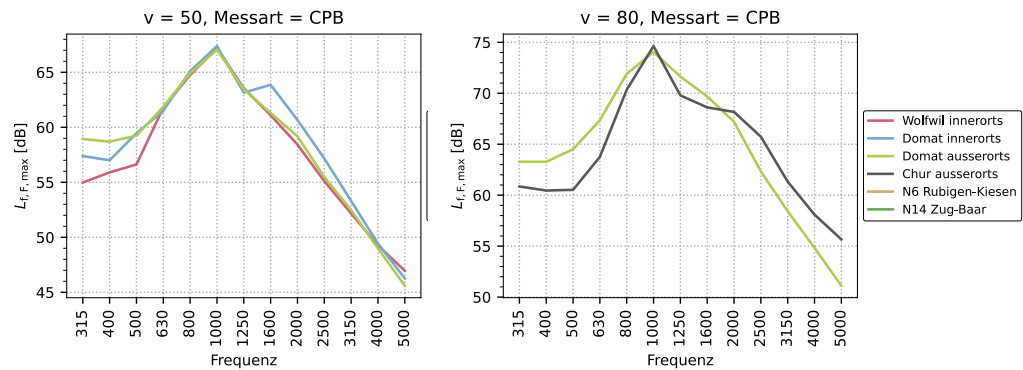


Abb. 33: Spektrale Auswertung der CPB-Messpegel ($L_{f,F,max}$) für die Kategorie P.

Coast-by:

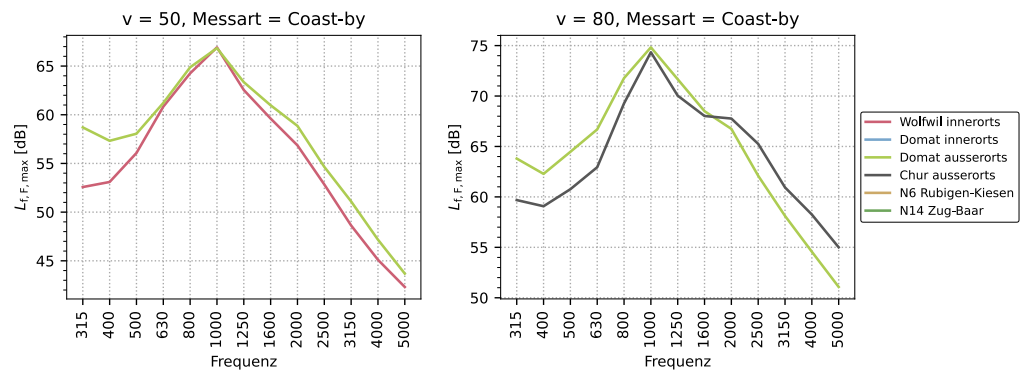


Abb. 34: Spektrale Auswertung der Coast-by-Messpegel ($L_{f,F,max}$) für die Kategorie P.

V. Vergleich Messwerte

V.1 Maximalpegel $L_{A,F,max}$ @7.5m

Tab. 18: Auswertung der gemessenen Maximalpegel für verschiedene Messverfahren

Standort	v [km/h]	CPB	Coast-by	SPB H	SPB P	CPX P	CPX H
		$L_{A,F,max}$ [dB(A)]	$L_{A,F,max}$ [dB(A)]	$L_{A,F,max}$ [dB(A)]	$L_{A,F,max}$ [dB(A)]	L_{CPX} [dB(A)]	L_{CPX} [dB(A)]
Wolfwil innerorts	50	71.7	70.7	79.6	71.1	90.1	90.2
Wolfwil innerorts	80						
Wolfwil innerorts	110						
Domat innerorts	50	72.5		78.6	75.3	91.7	91.3
Domat innerorts	80						
Domat innerorts	110						
Domat ausserorts	50	72.1	71.8	79.8	72.3	91.5	91.4
Domat ausserorts	80	79.1	79.1	84.9	80.3		
Domat ausserorts	110						
Chur ausserorts	50			82.3	72.0	90.0	89.9
Chur ausserorts	80	78.9	78.5	87.4	78.9		
Chur ausserorts	110						
N6 Rubigen-Kiesen	50						
N6 Rubigen-Kiesen	80			86.4		97.1	96.4
N6 Rubigen-Kiesen	110				79.8		
N6 Rubigen-Kiesen	120				81.0		
N14 Zug-Baar	50						
N14 Zug-Baar	80			85.6		97.0	97.1
N14 Zug-Baar	110		80.2		80.8		
N14 Zug-Baar	120				81.5		

V.2 Event-Energien $L_{A,eq,1h @ 1m}$

Tab. 19: Berechnung der Eventenergien von Messungen für verschiedene Verfahren

Standort	v [km/h]	CPB $L_{A,eq}$ [dB(A)]	Coast-by $L_{A,eq}$ [dB(A)]	SPB H $L_{A,eq}$ [dB(A)]	SPB P $L_{A,eq}$ [dB(A)]	CPX P L_{CPX} [dB(A)]	CPX H L_{CPX} [dB(A)]
Wolfwil innerorts	50	48.1	47.3	56.1	47.5	90.1	90.2
Wolfwil innerorts	80						
Wolfwil innerorts	110						
Domat innerorts	50	48.5		54.7	51.3	91.7	91.3
Domat innerorts	80						
Domat innerorts	110						
Domat ausserorts	50	48.0	47.8	53.4	48.0	91.5	91.4
Domat ausserorts	80	53.4	53.2	58.5	54.0		
Domat ausserorts	110						
Chur ausserorts	50			55.8	48.1	90.0	89.9
Chur ausserorts	80	53.3	52.8	60.9	53.3		
Chur ausserorts	110						
N6 Rubigen-Kiesen	50						
N6 Rubigen-Kiesen	80			60.2		97.1	96.4
N6 Rubigen-Kiesen	110				55.1		
N6 Rubigen-Kiesen	120				55.9		
N14 Zug-Baar	50						
N14 Zug-Baar	80			60.6		97.0	97.1
N14 Zug-Baar	110		54.8		55.7		
N14 Zug-Baar	120				56.1		

VI. Varianten Standort-Normalisierung

Im Verlauf des Projekts wurden verschiedene Möglichkeiten zur besseren Vergleichbarkeit innerhalb der Standorte getestet. Diese sind in diesem Kapitel kurz dargestellt.

VI.1 Vorgehen

Alle sechs Standorte wurden mit dem CPX-Messverfahren vermessen. In nachfolgender Abbildung sind die dabei gemessenen Schalldruckpegel in spektraler Form dargestellt. Zusätzlich sind in den entsprechenden Abbildungen die zwei KB0-Spektren (Spektrum eines fiktiven Referenzbelags mit einer akustischen Wirkung von 0 dB gegenüber dem StL86+-Modell) für Tempo 50 und 80 km/h als dicke Linie dargestellt [22].

Innerorts und ausserorts wird mit dem CPX-Messfahrzeug in der Regel mit 50 km/h gemessen – Autobahnabschnitte hingegen mit 80 km/h. Aus diesem Grund liegen nur für die zwei Standorte N6 Rubigen-Kiesen und N14 Zug-Baar Messungen mit 80 km/h vor.

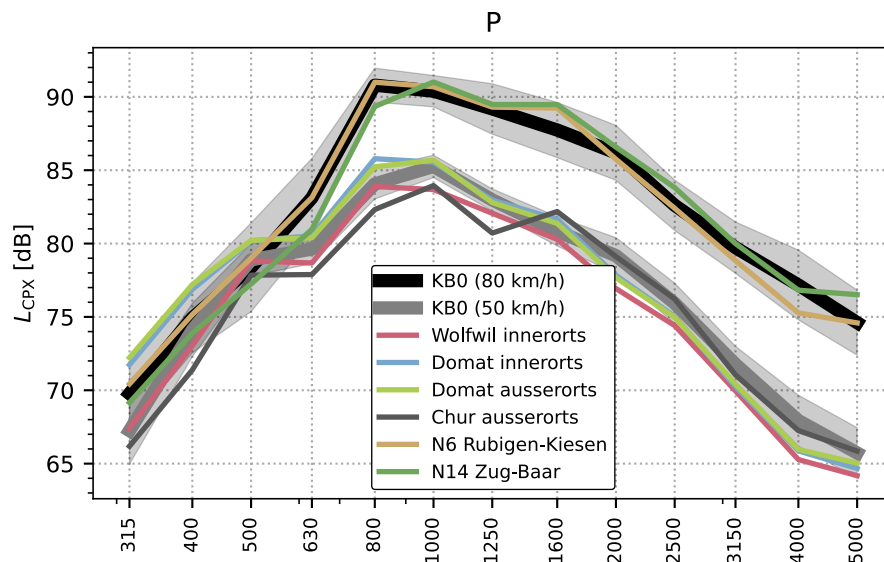


Abb. 35: Spektrale CPX-Pegel (Messreifen P) für die Messstandorte

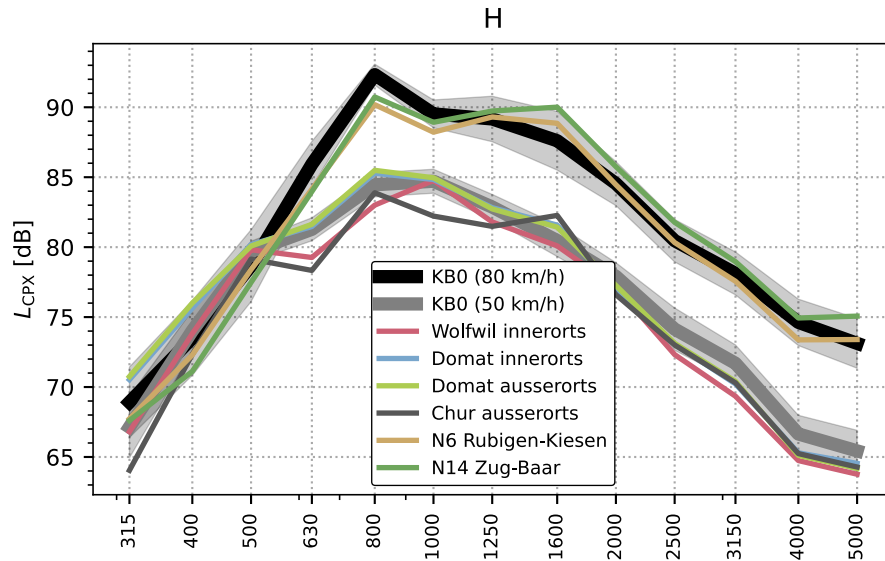


Abb. 36: Spektrale CPX-Pegel (Messreifen H) für die Messstandorte

VI.1.1 Normalisierung mit CPX-Werten

Berechnung von $\Delta(L_{f,CPX} - L_{f,KB0})$ für PKW- und LKW-Reifen:

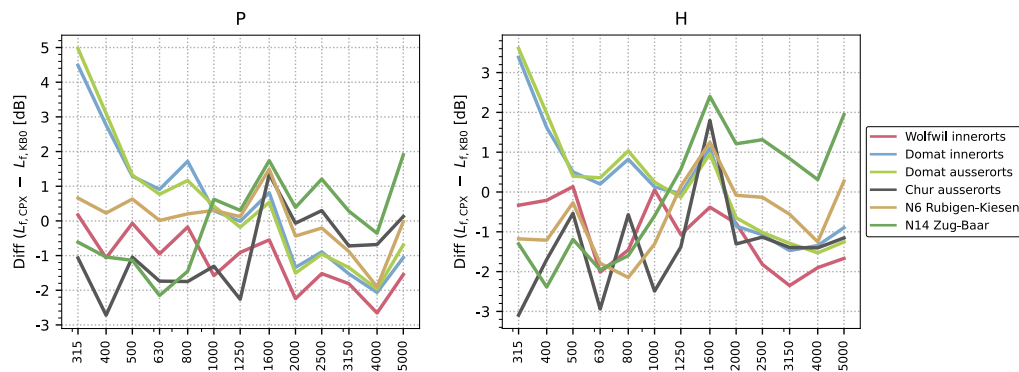


Abb. 37: Berechnung von $\Delta(L_{f,CPX} - L_{f,KB0})$ für PKW- und LKW-Reifen:

Berechnung von $L_{f,max} - \Delta((L_{f,CPX} - L_{f,KB0}))$:

SPB P:

Die Berechnung für SPB P ist nur für Tempo 50 km/h möglich, da bei Tempo 80 km/h und den Standorten mit SPB P Messdaten keine entsprechenden CPX-Daten vorhanden sind.

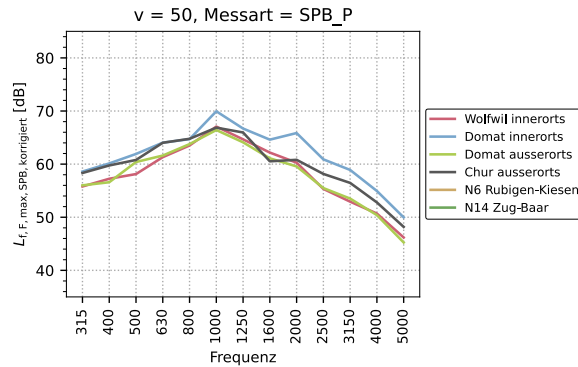


Abb. 38: Normalisierte (CPX) $L_{f,max}$ Pegel für SPB-Messungen, Kategorie P.

SPB H:

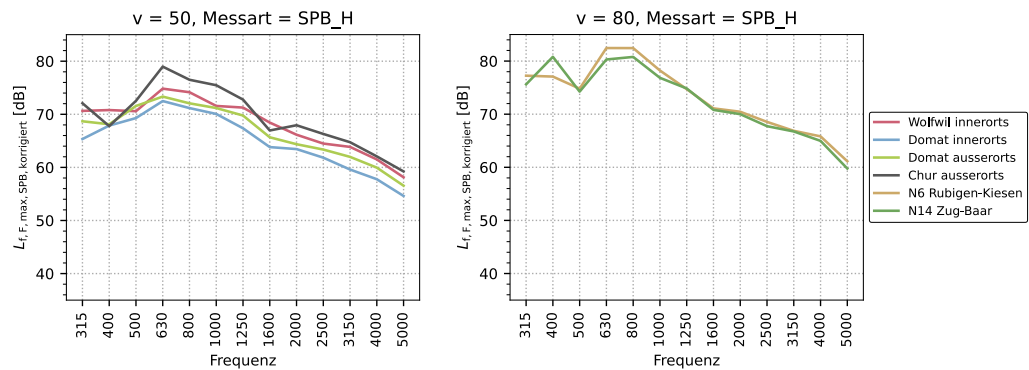


Abb. 39: Normalisierte (CPX) $L_{f,max}$ Pegel für SPB-Messungen, Kategorie H.

CPB:

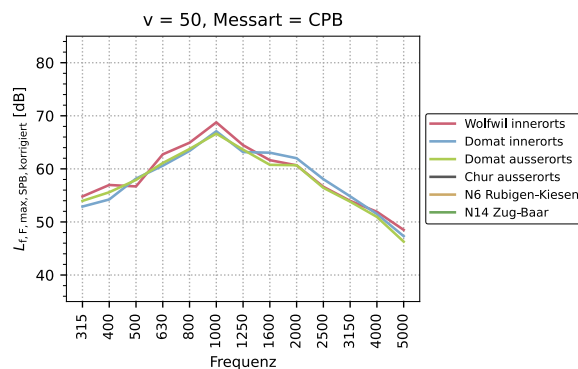


Abb. 40: Normalisierte (CPX) $L_{f,max}$ Pegel für CPB Messungen.

Coast-by:

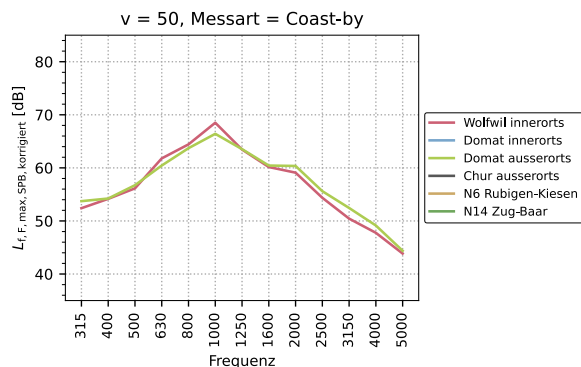


Abb. 41: Normalisierte (CPX) L_{Fmax} Pegel für Coast-By Messungen.

Die energetische Summierung der obigen Frequenzwerte ergibt folgende L_{max} und L_{eq} -Werte:

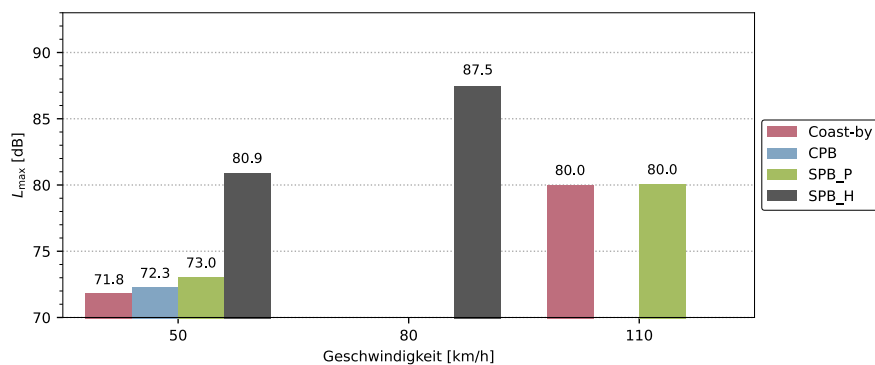


Abb. 42: Normalisierte (CPX) L_{Amax} Pegel für verschiedene Messarten.

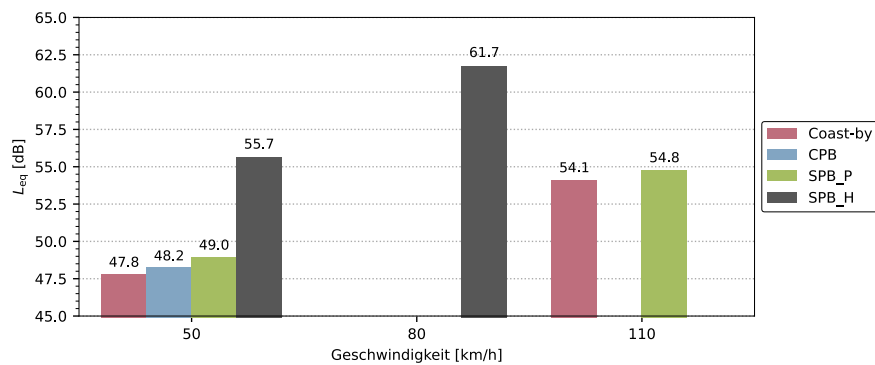


Abb. 43: Normalisierte (CPX) L_{Aeq} Pegel für verschiedene Messarten.

VI.1.2 Normalisierung mit CPB-Werten

An den Standorten «Wolfwil innerorts», «Domat ausserorts» und «Chur ausserorts» liegen jeweils bei gleicher Geschwindigkeit CPB wie auch Coast-by Messdaten vor, welche miteinander verglichen werden können. Die Differenz zwischen CPB- und Coast-by-Messung repräsentiert den Einfluss des Motorengeräusches.

Tab. 20: Mit den Coast-By Messungen normalisierte Messwerte.

Standort	Geschwindigkeit [km/h]	$L_{A,F,max}$ [dB(A)]			L_{eq} [dB(A)]		
		CPB	Coast-by	Δ (CPB – Coast-by)	CPB	Coast-by	Δ (CPB – Coast-by)
Wolfwil innerorts	50	71.7	70.7	1.0	48.1	47.3	0.8
Domat ausserorts	50	72.1	71.8	0.3	48.0	47.8	0.2
Domat ausserorts	80	79.1	79.1	0.0	53.4	53.2	0.2
Chur ausserorts	80	78.9	78.5	0.4	53.3	52.8	0.5

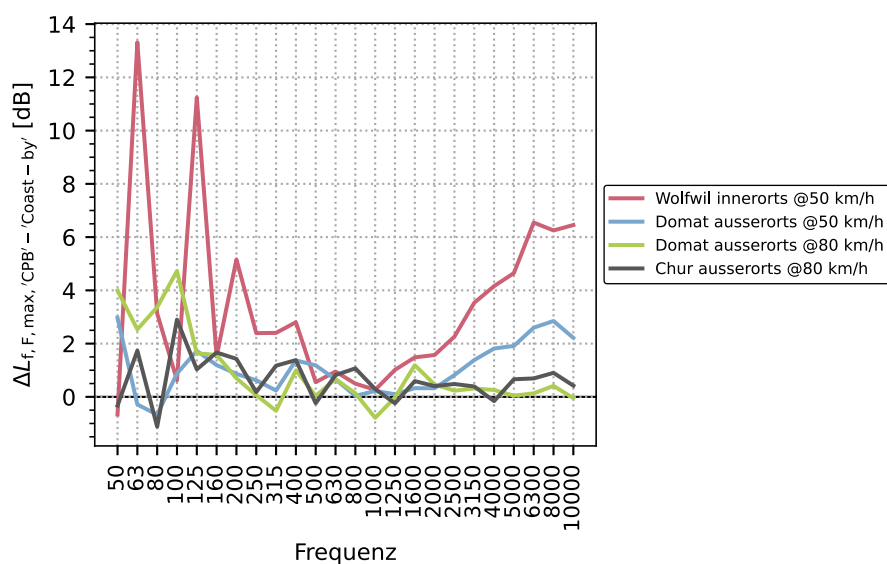


Abb 44: CPB-Normalisierungsspektren.

Glossar

Begriff	Bedeutung
sonROAD18	Strassenlärmerechnungsmodell sonROAD18 [3], [6], [7]
StL-86	Strassenlärmerechnungsmodell StL86+ [4]
KB	Korrektur Belag Kommt aus StL-86+. Dieser Beitrag wird vom Berechnungswert StL86+ abgezogen, um den Belag zu berücksichtigen.
SPB	Statistical-Pass-By Messmethode gemäss ISO 11819-1 [9], [10] Erfasst die statistische Lärmemission einzelner Vorbeifahrten auf der Strasse
CPX	Close-Proximity-Messmethode gem. ISO 11819-2/3 [8]
Coast-By	Coast-By Messmethode Messung Schallpegel bei vorbeifahrenen Fahrzeugen. Gleiches Vorgehen, wie bei SPB-Messung
CPB	Controlled-Pass-By Messmethode, Kontrollierte Vorbeifahrtmessung eines definierten Fahrzeugs. Orientiert sich an SPB-Messmethode
P	Bezeichnung für Fahrzeug (PKW) P → Passenger car
H	Bezeichnung für Fahrzeug (LKW) H → Heavy vehicle

Literaturverzeichnis

- [1] G. Schgüanin und T. Ziegler, «Leitfaden Strassenlärm. Vollzugshilfe für die Sanierung. Stand: Dezember 2006. Umwelt-Vollzug Nr. 0637», Bundesamt für Umwelt, Bern, 2006. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/laerm/publikationen-studien/publikationen/leitfaden-strassenlaerm.html>
- [2] W. H. O. WHO, *ENVIRONMENTAL NOISE GUIDELINES for the European Region*. 2018.
- [3] K. Heutschi und B. Locher, «sonROAD18, Berechnungsmodell für Strassenlärm», Empa, Material Science and Technology, Dübendorf, 2018. [Online]. Verfügbar unter: www.bafu.admin.ch/sonroad18
- [4] BUWAL, «COMPUTERMODELL ZUR BERECHNUNG VON STRASSENLÄRM, Teil 1 Bedienungsanleitung zum Computerprogramm StL-86», *Schriftenreihe Umw. SRU*, Nr. 60, 1987, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/laerm/publikationen-studien/publikationen/computermodell-berechnung-strassenlaerm.html>
- [5] Bundesamt für Strassen (ASTRA) und Bundesamt für Umwelt (BAFU), «Leitfaden Strassenlärm Anhang 1c: Technisches Merkblatt für akustische Belagsgütemessungen an Strassen», S. 14, 2013.
- [6] Bundesamt für Umwelt BAFU (Hrsg.), «Strassenlärm-Berechnungsmodell sonROAD18, Aufbereitung der Eingabedaten und Ausbreitungsrechnung», Bundesamt für Umwelt, Bern, 2021. [Online]. Verfügbar unter: www.bafu.admin.ch/uw-2127-d
- [7] K. Heutschi, «sonROAD18 - Berechnungsmodell für Strassenlärm - Weiterentwicklungen und Ergänzungen», 2022. [Online]. Verfügbar unter: www.bafu.admin.ch
- [8] ISO - International Organization for Standardization, «ISO 11819-1, Acoustics: measurement of the influence of road surfaces on traffic noise: part 1: statistical pass-by method (DRAFT)». 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.iso.org/standard/77371.html>
- [9] ISO - International Organization for Standardization, «ISO 11819-2, Acoustics - Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise - Part 2: The close-proximity method (ISO 11819-2:2017)». 2017.
- [10] ISO - International Organization for Standardization, «ISO 11819-3, Acoustics — Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise — Part 3: Reference tyres». 2017.
- [11] Jørgen Kragh, Rasmus Stahlfest Holck Skov, und Jens Oddershede, «ROSANNE Deliverable D2.3 Report on the analysis and comparison of existing noise measurement methods for noise properties of road surfaces», 2015.
- [12] J. Cesbron und P. Klein, «Correlation between tyre/road noise levels measured by the Coast-By and the Close-ProXimity methods», *Appl. Acoust.*, Bd. 126, S. 36–46, 2017, doi: 10.1016/j.apacoust.2017.05.005.
- [13] J. Kragh, U. Sandberg, und L. Møller Iversen, *Road surface texture for low noise and low rolling resistance: Nordtex final report*. Vejdirektoratet, 2013.
- [14] Thomas Beckenbauer, Daniel Belcher, und Guido Kneib, «Lärmschutzprojekte ASTRA Filialen - Projektbegleitende Forschung Akustik», Müller-BBM Schweiz AG, 1576, 2016.
- [15] U. Sandberg, «The concept of virtual reference pavement for noise prediction and comparison purposes», in *Proceedings of INTER-NOISE 2006*, Honolulu, Hawaii, USA, 2016.
- [16] European Commission. Joint Research Centre. ICHP., *Common noise assessment methods in Europe (CNOSSOS-EU): to be used by the EU member states for strategic noise mapping following adoption as specified in the environmental noise directive 2002/49/EC*. LU: Publications Office, 2012. Zugriffen: 3. Mai 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://data.europa.eu/doi/10.2788/31776>
- [17] COMMISSION DIRECTIVE (EU), «COMMISSION DIRECTIVE (EU) 2015/996 of 19 May 2015 establishing common noise assessment methods according to Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council», *Official Journal of the European Union*, 2015.
- [18] Fabienne Anfosso Lédée, «Deliverable D2.5 Report on the compatibility of the proposed noise characterization procedure with CNOSSOS-EU and national calculation methods».
- [19] F. A. Ledee und L. Goubert, «The determination of road surface corrections for CNOSSOS-EU model for the emission of road traffic noise», in *PROCEEDINGS of the 23rd International Congress on Acoustics*, Aachen, 2019, S. 3603–3610.
- [20] Tina Saurer, Erik Bühlmann, und Toni Ziegler, «Forschungspaket: Lärmarme Beläge innerorts EP 7: Innovative, lärmarme Beläge für den Potenziellen Einsatz in der Schweiz», Forschungsprojekt ASTRA 2013/002 auf Antrag des Bundesamtes für Strassen (ASTRA, 2016.
- [21] SNR 640 436:2015, «Semidichtes Mischgut und Deckschichten, Festlegungen, Anforderungen und Konzeption». S. 16, 2013.
- [22] Erik Bühlmann, Felix Schlatter, und Johannes Schindler, «Ermittlung von CPX-Standardspektren für sonROAD18, Dokumentation und Analyse zur Datenaufbereitung», Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern, 2020.

Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 08.08.2023

Grunddaten

Projekt-Nr.: TRU_20_00A_01
Projekttitel: Methodik zur Charakterisierung der akustischen Eigenschaften von Belägen unabhängig von Lärmemissionsmodellen
Enddatum: 31.08.2023

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Im Rahmen des Forschungsprojektes "Methodik zur Charakterisierung der akustischen Eigenschaften von Belägen unabhängig von Lärmemissionsmodellen" war es das Ziel eine Lärmmodellunabhängige Methodik zur ermitteln, wie Beläge akustisch charakterisiert werden sollen ohne Abhängigkeit eines Lärmberechnungsmodelles. Als Grundlage dazu wurde ein Referenzbelag identifiziert, welcher als Referenz zur Charakterisierung dienen soll. Diese Referenz wurde aufgrund akustischer Messungen festgelegt. Fortan können nun die akustischen Strassenbelagsmessungen als Abweichung zu diesem Referenzbelag verglichen und beurteilt werden.

Ebenfalls wurden diverse Umrechnungsmodelle zwischen den aktuell existierenden Strassenbelags-Lärmmessmethoden entwickelt, welche es erlauben die Messresultate in geeigneter Form umzurechnen, um die Vergleichbarkeit zum Referenzbelag herzustellen und die Wirkung des Belages in für Anwohner aussagekräftiger Weise abzubilden.

Im Verlaufe des Projekts wurden zudem weitere Abklärungen vorgenommen:

- Kritische Beurteilung der aktuellen (Schweizer-) Messpraxis in Bezug auf Strassenlärm und deren Konformität mit Internationalen Standards, sowie in Bezug auf internationale Vergleichbarkeit
- Identifikation möglicher Standard-Bautechnologie eines Belages als Referenzbelagkandidaten. Dabei zeigte sich, dass mit einer Auswahl einer einzigen Technologie die Prämisse zur Fortführung bestehender Datenreihen nur bedingt erfolgen kann.
- Weiter wurden die Messverfahren zur Charakterisierung von Belägen hinsichtlich ihrer Konformität untereinander geprüft und Umrechnungsmodelle zwischen den Verfahren Statistical Pass-By (SPB) und Close-Proximity (CPX) Messungen ermittelt.
- Abklärungen hinsichtlich des Einflusses von verschiedenen Leq-Messarten (Messdauer, Kompensation von fehlenden Event-Energien) bei einer SPB-Messung.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Zielerreichung:

Das übergeordnete Ziel des Projektes war es, eine eindeutige, aussagekräftige und langfristig vergleichbare Grösse für die Beschreibung der akustischen Eigenschaften von Fahrbahnbelägen zu schaffen und damit die Gültigkeit bereits vorhandener und zukünftiger Daten sicherzustellen.

Dieses Ziel konnte mit der akustischen Definition des Referenzbelages erreicht werden.

Ebenso wurde mit der Erstellung diverser aktueller Umrechnungsmodelle sichergestellt, dass die Gültigkeit bereits vorhandener Datenreihen beibehalten wird.

Die Methodik kann in der Praxis direkt umgesetzt werden, da sie einfach gehalten ist und bestehende Datenreihen direkt umgerechnet werden können.

Folgerungen und Empfehlungen:

Es hat sich gezeigt, dass die aktuelle Messmethodik, welche im Leitfaden Strassenlärm, Anhang 1c beschrieben wird, dringend überarbeitet und an die aktuellen ISO-Standards angeglichen werden muss.

- Die Charakterisierung von Belägen kann anhand der entwickelten Methode erfolgen
- CPX-Messungen können zukünftig anhand des CPX-Index ausgewertet und charakterisiert werden
- Durchführung und Auswertung der SPB-Messungen gemäss ISO-11819-1 und gemäss zu überarbeitendem Leitfaden Strassenlärm

Publikationen:

-

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Bühlmann

Vorname: Erik

Amt, Firma, Institut: Grolimund+Partner AG

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Das Hauptziel des Projekts war die Erarbeitung einer Methodik zur Charakterisierung der akustischen Eigenschaften von Strassenbelägen ohne Verwendung eines Strassenlärmemissionsmodells wie StL-86. Als Basis wurden die beiden standardisierten Messverfahren SPB und CPX vorgeschlagen. Der Norm ISO11819-2 folgend wurden Belagsreferenzwerte anhand des einzahligen CPX-Index empfohlen. Durch Regressionsanalysen wurden Umrechnungsmodelle für A-Pegel aus SPB-Messungen sowie den SPB-Index gemäss ISO11819-1 erstellt. Die im Projekt vorgeschlagene Methodik stützt sich auf ISO-Normen und lineare Regressionen zwischen akustischen Einzahlwerten.

Umsetzung:

Die vorgeschlagene Methodik kann künftig angewendet werden, sowohl auf neue als auch auf bestehende Messungen. Jedoch stehen eine unabhängige kritische Prüfung hinsichtlich Gültigkeit, Unsicherheit und Praxistauglichkeit sowie eine Validierung noch aus.

weitergehender Forschungsbedarf:

- Bessere Methoden zur Umrechnung von akustischen Grössen
- Evaluation der vorgeschlagenen Methodik

Einfluss auf Normenwerk:

Überarbeitung des Leitfadens Strassenlärm

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Pieren

Vorname: Reto

Amt, Firma, Institut: Empa

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission: