

Strassenlärm-Berechnungsmodell sonROAD18

Aufbereitung der Eingabedaten und Ausbreitungsrechnung



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Umwelt BAFU

Strassenlärm-Berechnungsmodell sonROAD18

Aufbereitung der Eingabedaten und Ausbreitungsrechnung

Impressum

Herausgeber

Bundesamt für Umwelt (BAFU)

Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Autor

Michael Gerber, BAFU, Abteilung Lärm und NIS

Begleitung

Urs Walker, BAFU, Leiter Abteilung Lärm und NIS

Sophie Hoehn, BAFU, Sektionschefin Strassenlärm

Judith Schäli, BAFU, Rechtsdienst 2

Begleitgruppe

Urs Walker, BAFU, Abt. Lärm und NIS, Vorsitz

Dario Bozzolo, IFEC, IFEC ingegneria SA

Hans-Peter Gloor, Kt. AG, Departement Bau, Verkehr und Umwelt

Dominique Luy, Kt. VD, Direction générale de l'environnement
(bis Ende 2018)

Bernard Gigon, Kt. VD, Direction générale de l'environnement
(ab Anfang 2019)

Yves Pillonel, ASTRA, Standards und Sicherheit der Infrastruktur
(bis Ende 2017)

Kirk Ingold, ASTRA, Standards und Sicherheit der Infrastruktur
(ab Anfang 2018)

Stefanie Rüttener, Stadt Zürich, Umwelt- und Gesundheitsschutz
Zürich UGZ

Marco Steiger, Kt. TI, Dipartimento del territorio

Georg Thomann, Kt. GR, Amt für Natur und Umwelt

Kurt Heutschi, EMPA, Abt. Akustik / Lärminderung

Sophie Hoehn, BAFU, Abt. Lärm und NIS

Andreas Catillaz, BAFU, Abt. Lärm und NIS

Zitierung

BAFU (Hrsg.) 2021: Strassenlärm-Berechnungsmodell sonROAD18. Aufbereitung der Eingabedaten und Ausbreitungsrechnung. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 2127: 29 S.

Gestaltung

Cavelti AG, Marken. Digital und gedruckt, Gossau

Titelbild

Freiburg von oben nach unten.

© iStock, AsianDream

PDF-Download

www.bafu.admin.ch/uw-2127-d

Eine gedruckte Fassung kann nicht bestellt werden.

Diese Publikation ist auch in französischer und italienischer Sprache verfügbar. Die Originalsprache ist Deutsch.

© BAFU 2021

Inhaltsverzeichnis

Abstracts	5	Anhang 1 Schema Fahrzeugkategorien SWISS10	25
Vorwort	6	Anhang 2 Durchschnittliche Emissionspegel	26
1 Einleitung	7	Anhang 3 Spektrale Standard-Belagskorrekturen für 50 km/h	27
1.1 Zielsetzung	7		
1.2 Hauptmerkmale von sonROAD18	8		
1.3 Vergleich der früheren und aktuellen Modelle	8	Anhang 4 Spektrale Standard-Belagskorrekturen für 80 km/h	28
1.4 Ausgabegrößen	9		
1.5 Zuschläge und Modellkalibrierungen	9		
2 Eingabedaten	10	Anhang 5 Zuordnung Bodenfaktor G zu Bodenbedeckung	29
2.1 Übersicht der erforderlichen Eingabedaten	10		
2.2 Verkehrsmenge/-zusammensetzung	10		
2.2.1 SWISS10+ Fahrzeugkategorien	10		
2.2.2 SWISS10-Konverter	12		
2.3 Geschwindigkeiten	14		
2.4 Akustische Belagsgüte	15		
2.4.1 Referenzbelag	15		
2.4.2 Berücksichtigung der akustischen Belagsgüte	15		
2.4.3 Integration mittels Belagsmessungen	16		
2.4.4 Integration mittels KB-Werten	16		
2.4.5 Sensitivität der akustischen Belagsgüte	17		
2.4.6 Wichtige Punkte bezüglich der akustischen Belagsgüte	17		
2.5 Strassenneigung/Fahrspuren	18		
2.6 Luft-Temperatur	18		
3 Ausbreitungsrechnung	20		
3.1 Modell für die Ausbreitungsrechnung	20		
3.2 Berechnungsparameter	20		
3.3 Meteo-Effekte	21		
4 Implementationen	22		
5 Literatur	23		

Abstracts

The sonROAD18 model to determine road traffic noise is described in detail in the Empa report *sonROAD18 – Berechnungsmodell für Strassenlärm* [1] (sonROAD18 – model for determining road traffic noise; available in German). SonROAD18 is purely an emissions model. This publication supplements the description of the model. It explains how the emissions model can be used and gives advice on how to prepare input data. Finally, parameters are suggested for determining sound propagation.

Das Modell zur Berechnung von Strassenlärm-Emissionen sonROAD18 wird im Empa-Bericht *sonROAD18 – Berechnungsmodell für Strassenlärm* [1] detailliert beschrieben. SonROAD18 ist ein reines Emissionsmodell. Die vorliegende Publikation ergänzt den Modellbescrieb. Sie erläutert, wie das Emissionsmodell eingesetzt werden kann und gibt Hinweise für die Aufbereitung der Eingabedaten. Schliesslich werden Berechnungseinstellungen für die Ausbreitungsrechnung vorgeschlagen.

Le modèle de calcul des émissions du bruit routier sonROAD18 est présenté de manière détaillée dans le rapport de l'Empa *Modèle de calcul du bruit routier* [1]. sonROAD18 est un modèle d'émission pur. La présente publication a pour but de compléter son descriptif. Elle explique comment utiliser le modèle et fournit des indications sur le traitement des données d'entrée. Des paramètres pour le calcul de la propagation sont également proposés à la fin du document.

Il modello di calcolo per le emissioni del rumore stradale sonROAD18 è descritto in dettaglio nel rapporto Empa *sonROAD18 – Berechnungsmodell für Strassenlärm* [1]. sonROAD18 è un semplice modello di emissione, mentre la presente pubblicazione completa la descrizione di tale modello, spiegando come può essere impiegato e fornendo indicazioni su come elaborare i dati di input. Infine, vengono proposte impostazioni di calcolo per il calcolo della propagazione.

Keywords:

determination of road traffic noise, noise prediction, emissions model, SWISS10

Stichwörter:

Strassenlärmrechnung, Lärmprognose, Emissionsmodell, SWISS10

Mots-clés :

calcul du bruit routier, prévisions du bruit, modèle d'émission, SWISS10

Parole chiave:

calcolo del rumore stradale, legge sull'ambiente, modello di emissione, SWISS10

Vorwort

Strassenlärm ist mit Abstand die bedeutendste Lärmquelle in der Schweiz. Die Strassen-eigentümer sind gesetzlich verpflichtet, die Lärmbelastungen zu senken. Um die bestehende Lärmbelastung zu bestimmen und mit den massgebenden Grenzwerten zu vergleichen, kommen entweder Lärmmessungen oder Lärmberechnungen zum Einsatz. Lärmberechnungen haben gegenüber Messungen den Vorteil, dass sie einfacher und somit schneller und kostengünstiger durchführbar sind. Für die Berechnung des Lärms muss ein möglichst präzises und vollzugstaugliches Berechnungsmodell für Strassenlärm zur Verfügung stehen. Auch um die Wirkung von Lärmbegrenzungsmaßnahmen zu bestimmen oder zukünftige Situationen, etwa bei Neubauten, abzubilden, muss der Lärm berechnet respektive prognostiziert werden.

Das Umweltschutzgesetz verlangt, dass Strassenlärm durch Massnahmen möglichst direkt an der Quelle begrenzt werden soll. Die bisherigen Berechnungsmodelle vermögen diese Massnahmen wie beispielsweise Geschwindigkeitsreduktionen, lärmarme Strassenbeläge, leise Reifen oder elektrisch angetriebene Fahrzeuge nur ungenügend oder gar nicht zu berücksichtigen.

Das BAFU beauftragte deshalb die Empa mit der Entwicklung eines neuen Emissionsmodells, das dem Stand der Technik und des Wissens entspricht und das auch für zukünftige Entwicklungen des Fahrzeugparks gerüstet ist. Ziel des neuen Emissionsmodells ist es, eine realistische und aktuelle Berechnung der Strassenlärm-Emissionen sicherzustellen. Unter anderem soll die Wirkung von Lärmschutzmassnahmen, vor allem an der Quelle, mit hoher Genauigkeit prognostiziert werden. Dies dient der Festlegung der Massnahmen, die am besten geeignet sind, um die von Lärm betroffenen Personen zu schützen.

Die Prognosegenauigkeit eines Berechnungsmodells kann nur so hoch sein wie die Qualität der Eingabedaten. Die detaillierte Kategorisierung der Fahrzeuge mittels SWISS10 erhöht die Prognosegenauigkeit und erlaubt die präzisere Berechnung von Szenarien. SonROAD18 geht darüber hinaus und hält auch für weitere Fahrzeugkategorien – wie beispielsweise Fahrzeuge mit alternativen Antriebssystemen (hybrid, elektrisch) sowie Fahrzeuge des öffentlichen Verkehrs und landwirtschaftliche Fahrzeuge – Emissionswerte bereit (SWISS10+).

Auch der akustischen Charakterisierung der Strassenbeläge kommt eine hohe Bedeutung zu. Die akustische Belagsgüte bestimmt massgeblich die Lärmemissionen des Strassenverkehrs. Daher wurde bei der Entwicklung von sonROAD18 ein besonderes Augenmerk auf diese Einflussgrösse gerichtet.

Urs Walker, Abteilung Lärm und NIS
Bundesamt für Umwelt (BAFU)

1 Einleitung

1.1 Zielsetzung

Der Strassenlärm ist bezüglich der Anzahl von übermässigen Immissionen betroffenen Personen die bedeutendste Lärmquelle in der Schweiz. Für die Ermittlung der Strassenlärm-Immissionen ist ein möglichst präzises und für verschiedene Verwendungszwecke einsetzbares Berechnungsmodell erforderlich. Das Bundesamt für Umwelt (BAFU) empfiehlt den Vollzugsbehörden entsprechend dem Stand der Technik geeignete Berechnungsverfahren¹.

Die Empa entwickelte im Auftrag des BAFU ein neues Strassenlärm-Berechnungsmodell namens sonROAD18. Dieses basiert auf dem europäischen CNOSSOS-Modell. Die Anzahl der Fahrzeugkategorien wurde jedoch bedeutend erhöht (SWISS10+) und die Koeffizienten des Modells an den auf schweizerischen Strassen verkehrenden Fahrzeugpark und dessen Bereifung angepasst. Es handelt sich um ein reines Emissionsmodell ohne Ausbreitungsrechnung.

Das neue Emissionsmodell sonROAD18 [1] erlaubt die präzise Berechnung der Schallemissionen von auf schweizerischen Strassen zugelassenen Fahrzeugen im Hinblick auf die Beurteilung des Strassenverkehrslärms gemäss Anhang 3 der Lärmschutz-Verordnung (LSV) [2].

Das neue Modell soll sowohl für Standardsituationen wie auch für Spezialsituationen und Szenarienberechnungen verwendet werden können. Das Emissionsmodell soll sowohl für einfache Berechnungen mit wenigen Grundlagendaten als auch für detaillierte Berechnungen mit umfangreichen Grundlagendaten geeignet sein.

Die für eine Berechnung minimal erforderlichen Grundlagendaten sind: DTV oder stündliche Verkehrsmengen (Nt1, Nt2, Nn1, Nn2), signalisierte Geschwindigkeit, Strassentyp, Steigung (ab $\pm 1\%$), Belagskorrektur (mindestens in Form des bisherigen KB-Wertes), jahresdurchschnittliche Luft-Temperatur. Diese Eingabedaten sind ver-

gleichbar mit den erforderlichen Eingabedaten bei den bisherigen Prognosemodellen für Strassenlärm.

Das Modell sonROAD18 rechnet mit der Basis-Fahrzeugkategorisierung SWISS10. Falls nicht für alle 10 Fahrzeugkategorien stündliche Verkehrsmengen tags und nachts vorliegen, können mit Hilfe des ebenfalls von der Empa neu entwickelten SWISS10-Konverters die stündlichen Verkehrsmengen für die 10 Fahrzeugkategorien für die Tag- und die Nachtphase geschätzt werden. Der SWISS10-Konverter ist Bestandteil des sonROAD18-Modells.

sonROAD18 erlaubt eine spurgenaue Modellierung, was insbesondere bei Autobahnen eine realitätsnahe Modellierung ermöglicht; mit einem gewissen Mehraufwand wird damit die Prognosequalität erhöht.

Mit sonROAD18 werden spektrale Belagskorrekturen neu eingeführt. Die Belagskorrektur wirkt im Modell nur auf das Rollgeräusch und ist weder von der Geschwindigkeit noch von der Fahrzeugkategorie abhängig. Die in der Schweiz gängigsten Messverfahren für die Bestimmung der akustischen Belagsgüte (CPX, SPB, SEM) können weiterhin verwendet werden. Für die Fälle, in denen keine Belagsmessungen durchgeführt werden können, wurden spektrale Standard-Belagskorrekturen festgelegt.

Um mit Hilfe des Emissionsmodells sonROAD18 Immissionswerte bei den von Lärm betroffenen Liegenschaften zu ermitteln, muss eine Ausbreitungsrechnung vorgenommen werden. Die Test-Berechnungen haben gezeigt, dass das Modell gemäss Norm ISO 9613-2² unter dem Aspekt Prognosegenauigkeit und Rechenzeit für die Kombination mit sonROAD18 geeignet ist.

Das vorliegende Dokument erklärt die Anwendung des Emissionsmodells sonROAD18. Es ersetzt keine Vollzugshilfen. Der Leitfaden Strassenlärm [4] und die

¹ Artikel 38 Absatz 3 der Lärmschutz-Verordnung vom 6. Dezember 1986 (LSV) [2] in Verbindung mit Anhang 2 Ziffer 1 Absatz 2 LSV.

² Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors – Part 2: General method of calculation [3] (vgl. Kap. 3)

Geobasisdatensätze des Umweltrechts für Strassenlärm-Belastungskataster³ gelten unverändert.

1.2 Hauptmerkmale von sonROAD18

SonROAD18 ist ausführlich im entsprechenden Bericht [1] beschrieben. Dort findet sich insbesondere auch eine Dokumentation der Messkampagnen, der Auswerteverfahren, der Modell-Kalibrierung sowie der Modell-Validierung. Der ausführliche Modellbeschreibung ist ausschliesslich in Deutsch erhältlich. Zusätzlich ist eine Kurzfassung in Deutsch [5], Französisch [6] und Italienisch [7] verfügbar. Diese enthält den eigentlichen Modellbeschreibung sowie die wichtigsten Kapitel des ausführlichen Schlussberichts.

SonROAD18 weist die folgenden Hauptmerkmale auf:

- Die Wirkungen von Massnahmen zur Lärmbegrenzung an der Quelle sind im Vergleich mit älteren Modellen präziser berechenbar.
- sonROAD18 basiert auf SWISS10-Verkehrsdaten und berechnet für jede SWISS10-Fahrzeugklasse separat die Lärmemissionen. sonROAD18 wurde zudem um weitere Fahrzeugkategorien erweitert («SWISS10+»). Diese zusätzlichen Fahrzeugkategorien umfassen beispielsweise Hybrid- und Elektrofahrzeuge oder Strassenbahnen (Trams). Moderne Verkehrszählssysteme erlauben die automatische Klassifizierung mit bis zu zehn verschiedenen Fahrzeugkategorien (beispielsweise nach SWISS10).
- sonROAD18 weist eine Frequenzauflösung in Terzbändern auf zur präzisen Berücksichtigung von Ausbreitungsdämpfungen (u. a. Luftdämpfung, Bodeneffekt). Die Rechen- und Speicherkapazitäten gewöhnlicher Desktop-PCs ermöglichen die Berechnung und die Speicherung in dieser Frequenzauflösung.
- Die akustische Belagsgüte wird ebenfalls mit Terzband-Auflösung in der Berechnung berücksichtigt. Damit kann das breite Spektrum an unterschiedlichen Strassenbelägen (dicht, semi-dicht und offenporig) adäquat berücksichtigt werden. Die Belagskorrektur erfolgt spektral und unabhängig von Geschwindigkeit und Fahrzeugkategorien. Die schlussendliche Wirkung

des Belags auf das Gesamtgeräusch ist gleichwohl geschwindigkeits- und fahrzeugkategorienabhängig, da diese beiden Faktoren die relativen Anteile des Antriebs- und Rollgeräusches bestimmen.

- sonROAD18 erlaubt Emissionsberechnungen bereits ab einer Geschwindigkeit von 20 km/h, die Berechnung von Stausituationen, die Berechnungen auf Basis verschiedener Geschwindigkeiten pro Fahrzeugklasse sowie die Simulation von Beschleunigungsvorgängen im Einzelfall.
- sonROAD18 widerspiegelt die Fahrzeugflotte und deren Bereifung in der Schweiz bis 2017⁴.
- Der Formelsatz von sonROAD18 basiert auf dem europäischen Berechnungsmodell CNOSSOS-EU [8], welches ab 2022 in der ganzen Europäischen Union für die Lärmkartierung eingesetzt werden soll. Somit ist sonROAD18 weitgehend kompatibel mit dem europäischen Modell CNOSSOS-EU.

1.3 Vergleich der früheren und aktuellen Modelle

Die Eigenschaften des Modells sonROAD18 werden in der Tabelle 1 mit früheren Strassenlärm-Berechnungsmodellen verglichen. Die Modelle StL86+ [9], [10] und sonRoad [11] umfassen neben der Berechnung der Emissionen auch eine Ausbreitungsrechnung. sonROAD18 ist ein reines Emissionsmodell ohne Ausbreitungsrechnung. Die Tabelle listet nur die Eigenschaften bezüglich Emissionen auf.

³ Identifikatoren 142.1 und 144.1

⁴ Die Messdaten zur Kalibrierung des Modells stammen aus den Jahren 2008 bis 2017.

Tabelle 1

Eigenschaften von sonROAD18 verglichen mit weiteren Strassenlärm-Berechnungsmodellen

Parameter	StL86+	sonRoad	CNOSSOS-EU	sonROAD18
Anzahl Fahrzeugkategorien	2	2	5	> 10 (SWISS10+)
Geschwindigkeitsbereich	ca. 50 – 120 km/h	ca. 30 – 120 km/h	20 – 130 km/h	20 – 130 km/h und Stausituationen
Geschwindigkeit pro Fahrzeugklasse	nein	ja	ja	ja
Belagskorrektur	nicht spektral	nicht spektral	spektral	spektral
Beschleunigungskorrektur	nein	nein	ja	Einzelfallsimulation ⁵
Temperaturkorrektur	nein	nein	ja	ja
Emissionscharakterisierung	Schalldruckpegel in 1 m Abstand	abgestrahlte Schallleistung	abgestrahlte Schallleistung in den Halbraum	abgestrahlte Schallleistung in den Halbraum
Quellenhöhe	0.80 m	0.45 m	0.05 m	0.05 m
Richtcharakteristik	horizontal	nein	nein	nein
	vertikal	nein	nein	ja
Frequenz-Auflösung	keine ⁶	24 Terzbänder	8 Oktavbänder	24 Terzbänder
Maximalpegel L_{max}	nein	nein	nein	ja ⁷

5 Die pauschale Beschleunigungskorrektur aus dem CNOSSOS-EU Modell für Kreuzungen und Kreisel wurde nicht übernommen [8]. Es ist hingegen möglich, für Spezialfälle eine Simulation eines Beschleunigungsvorgangs durchzuführen (vgl. Schlussbericht [1], Anhang J Hinweise zu Korrekturen für Beschleunigungsvorgänge (Knoten und Kreisel), S. 190).

6 A-bewerteter Mittelungspegel.

7 zusätzlich zum Mittelungspegel L_{Aeq} .

SonROAD18 weist im Vergleich zu den anderen Modellen im Wesentlichen die folgenden Vorteile auf:

- Eine deutlich detailliertere Kategorisierung der Fahrzeugtypen mit über zehn Fahrzeugkategorien (inkl. Busse des öffentlichen Verkehrs, Strassenbahnen/Trams, landwirtschaftliche Fahrzeuge).
- Die Emissionseigenschaften des aktuellen Fahrzeugparks mit der entsprechenden Bereifung sind berücksichtigt.
- Der zunehmenden Elektrifizierung der Antriebssysteme wird Rechnung getragen: Die Lärmemissionen von hybrid und rein elektrisch angetriebene Fahrzeugen können berechnet werden.
- Das Modell ist für den niedrigen Geschwindigkeitsbereich inkl. Stausituationen anwendbar.
- Die winkelabhängige Abstrahlcharakteristik in vertikaler Richtung ist berücksichtigt.
- Das Modell bietet die Möglichkeit, Maximalpegel für jede Fahrzeugkategorie zu schätzen.

1.4 Ausgabegrößen

Mit sonROAD18 lassen sich die gemäss Anhang 3 Ziffer 31 LSV geforderten Ausgabegrößen berechnen. Zusätzlich ermöglicht sonROAD18 die Bestimmung der folgenden Ausgabegrößen: Die Standardabweichung der Emissionsprognose (pro Fahrzeugkategorie), das Frequenzspektrum der Emission sowie der A-bewertete Maximalpegel $L_{A,max}$.

1.5 Zuschläge und Modellkalibrierungen

Modellkalibrierungen können im Bedarfsfall vorgenommen werden.

2 Eingabedaten

2.1 Übersicht der erforderlichen Eingabedaten

Für eine Berechnung gemäss sonROAD18 sind die in Tabelle 2 aufgelisteten Eingabedaten erforderlich (siehe [1] Abs. 10.3, S. 82):

Tabelle 2

Erforderliche Eingabedaten für sonROAD18

Eingabegrösse	minimale Anforderungen	erweiterte Anforderungen	Geltungsbereich / Wert	Abs.
Verkehrsmenge/-zusammensetzung	Verkehrsmenge DTV oder Verkehrsmengen Nt1, Nt2, Nn1, Nn2 → Aufschlüsselung in SWISS10-Kategorien mit Hilfe des SWISS10-Konverters ⁸	durchschnittliche stündliche Verkehrsmengen $N[c]$ pro SWISS10-Kategorien c Tag und Nacht	Werte mit einer Nachkommastelle (ausser DTV: ganzzahlige Werte)	2.2
Geschwindigkeiten	signalisiert	Regelfall: signalisiert Ausnahmefall: akustisch relevante Geschwindigkeit	$20 \text{ km/h} \leq v \leq 130 \text{ km/h}$ und $v = 0 \text{ km/h}$ (Stausituationen) ganzzahlige Werte	2.3
akustische Belagsgüte, ohne Messung der akustischen Belagsgüte (vormalige Methode)	KB-Wert → festgelegte, spektrale Standard-Belagskorrektur	KB-Wert → festgelegte, spektrale Standard-Belagskorrektur	Standard-Belagskorrekturen für 50 km/h: $-9 \text{ dBA} \leq \text{KB-Wert} \leq +3 \text{ dBA}$ Standard-Belagskorrekturen für 80 km/h: $-6 \text{ dBA} \leq \text{KB-Wert} \leq +5 \text{ dBA}$ ganzzahlige Werte	2.4
akustische Belagsgüte, mit Messung der akustischen Belagsgüte	gemessene, spektrale Belagskorrektur	gemessene, spektrale Belagskorrektur	auf 0.1 dB mathematisch gerundete Terzbandwerte, ohne A-Bewertung	2.4
Strassenlängsneigung	z. B. mit Hilfe von swissTLM ^{3D} [12]	z. B. mit Hilfe von swissTLM ^{3D} [12]	ganzzahlige Werte ab $\pm 1 \%$ (vorzeichenabhängig)	2.5
Luft-Temperatur	Regelfall: Jahresmittelwert	Regelfall: Jahresmittelwert	ganzzahlige Werte	2.6

⁸ vgl. Abs. 2.2.2, S. 12

2.2 Verkehrsmenge/-zusammensetzung

2.2.1 SWISS10+ Fahrzeugkategorien

Die Kategorisierung der verschiedenen Fahrzeuge erfolgt nach SWISS10 gemäss ASTRA Richtlinie 13012 «Verkehrszähler» [13], erweitert um die Fahrzeugkategorien für hybrid oder rein elektrisch angetriebene Fahrzeuge («SWISS10+») und weitere Fahrzeugkategorien wie Strassenbahnen/Trams und landwirtschaftliche Fahrzeu-

ge. Daher erlaubt sonROAD18 Berechnungen sowohl mit dem aktuellen als auch einem zukünftigen Fahrzeugpark.

Die Tabelle 3 listet die verschiedenen SWISS10+ Fahrzeugkategorien auf⁹. Im Anhang 1 dieses Dokuments ist die Zuweisung der verschiedenen Fahrzeugtypen auf die SWISS10-Fahrzeugkategorien schematisch dargestellt.

⁹ Fahrzeuge mit Wasserstoffverbrennungsmotor sind akustisch wie Fahrzeuge mit konventionellem Verbrennungsmotor zu behandeln; Fahrzeuge mit Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzellen in Kombination mit einem Elektroantrieb sind akustisch wie Fahrzeuge mit Elektromotor zu behandeln.

Tabelle 3

Fahrzeugkategorien nach SWISS10+, strukturiert nach Oberkategorien, Unterkategorien und Typen

Nr.	Oberkategorien SWISS10+ Kategorien	Nr.	Unterkategorien SWISS10+ Kategorien (Antriebssystem)	Typen
1	Busse ¹⁰	1a	Busse mit konventionellem Antrieb	
		1b	Busse mit Hybrid-/Elektroantrieb ¹¹	
2	Motorräder	2a	mit konventionellem Antrieb	
		2b	mit Elektroantrieb ¹²	
3	Personenwagen	3a	Personenwagen mit konventionellem Antrieb	
		3b	Personenwagen mit Hybridantrieb	
		3c	Personenwagen mit Elektroantrieb	
4	Personenwagen mit Anhänger			
5	Lieferwagen bis 3.5 t			
6	Lieferwagen bis 3.5 t mit Anhänger			
7	Lieferwagen bis 3.5 t mit Auflieger			
8	Lastwagen	8a	Lastwagen mit konventionellem Antrieb	
		8b	Lastwagen mit Elektroantrieb ¹³	
9	Lastenzüge			
10	Sattelzüge			
11	Busse des öffentlichen Verkehrs / städtischer Verkehrsbetriebe	11a	Diesel-Standardbusse, 2 Achsen	
		11b	Diesel-Gelenkbusse, 3 Achsen	
		11c	Gas-Busse, 3 Achsen	
		11d	Hybrid-Busse, 2/3 Achsen	
		11e	Elektro-Gelenktrolleybusse, 3 Achsen	
		11f	Elektro-Doppelgelenktrolleybusse, 4 Achsen	
		11g	Batterie-Busse	SOR EBN 8 Elektromidibus, 2 Achsen Volvo 7900 EH Elektrohybrid-Standardbus, 2 Achsen Caetano Elektrostandardbus, 2 Achsen Swisstrolley+ Gelenkbus mit Batterie, 3 Achsen
12	Strassenbahnen/ Trams	12a		Bern Combino
		12b		Basel BVB Combino
		12c		Basel BLT Tango
		12d		Basel Flexity
		12e		Zürich Cobra
		12f		Zürich Tram 2000
13	landwirtschaftliche Fahrzeuge	13a	Traktoren	
		13b	Traktoren mit Anhänger, beladen	
		13c	Erntefahrzeuge	

10 Hier sind Reisebusse/-cars gemeint und nicht Busse der öffentlichen Verkehrsbetriebe.

11 Für die Fahrzeugkategorie 1b existierten zum Zeitpunkt der Publikation dieses Dokuments noch keine Modell-Koeffizienten.

12 Für die Fahrzeugkategorie 2b existierten zum Zeitpunkt der Publikation dieses Dokuments noch keine Modell-Koeffizienten.

13 Für die Fahrzeugkategorie 8b existierten zum Zeitpunkt der Publikation dieses Dokuments noch keine Modell-Koeffizienten.

Für die SWISS10-Kategorien Nr. 1 bis Nr. 10 wird im Anhang 2 mittels einer Grafik der durchschnittliche Emissionspegel in Abhängigkeit der Geschwindigkeit gezeigt.

2.2.1.1 Strassenbahnen/Trams

Strassenbahnen resp. Trams werden in sonROAD18 als weitere Fahrzeugkategorie behandelt (Kategorie Nr. 12). Für die Entscheidung, ob der Lärm von Strassenbahnen als Strassenlärm- oder als Eisenbahnlärmquelle zu beurteilen ist, wird auf die Checkliste Umwelt für nicht UVP-pflichtige Eisenbahnanlagen Ziffer 5.12, *Lärm, Betriebsphase Tram*, S. 36, verwiesen [14]. In den Fällen, in denen der Bahnverkehr als Strassenlärm gemäss Anhang 3 LSV zu beurteilen ist, erfolgt die Emissionsprognose mit sonROAD18 mit den Fahrzeugen aus der Kategorie Nr. 12. In den Fällen, in denen der Bahnverkehr als Eisenbahnlärm gemäss Anhang 4 LSV beurteilt wird, kann sonTRAM¹⁴ als Prognosemodell eingesetzt werden.

Für den Fall, dass der Tramtyp (Kategorie Nr. 12) zum Zeitpunkt der Emissionsprognose noch nicht feststeht oder keine spezifischen Informationen über die Akustik des zu modellierenden Tramtyps vorliegen, kann der Tramtyp Cobra der Verkehrsbetriebe Zürich VBZ als akustischer Repräsentant verwendet werden.

2.2.1.2 Busse

Für den Fall, dass der Bustyp (Kategorie Nr. 11) zum Zeitpunkt der Emissionsprognose noch nicht feststeht oder keine spezifischen Informationen über die Akustik des zu modellierenden Bustyps vorliegen, kann als akustischer Repräsentant der bauähnlichste Typ aus Tabelle 3 eingesetzt werden.

2.2.2 SWISS10-Konverter

Um sonROAD18 bestmöglich zu nutzen, sind als Eingabedaten durchschnittliche stündliche Verkehrsmengen $N[c]$ pro SWISS10-Kategorie c separat für die Tag- und Nachtphase erforderlich.

Falls diese detaillierten Grundlegendaten zur Anzahl Fahrzeuge pro Fahrzeugklasse nicht zur Verfügung stehen, bietet sonROAD18 als Alternative den SWISS10-Konverter, (vgl. [1], Kap. 11, S. 95 und [15] Kap. 4, S. 26). Dieser wurde von der Empa im Rahmen der sonROAD18-Modellentwicklung erstellt für den Fall, dass keine geeigneteren nach Fahrzeugkategorien aufgeschlüsselte Verkehrsdaten vorliegen.

Der SWISS10-Konverter besteht aus einer Konversionstabelle, welche für verschiedene Verkehrssituationen (Kombination aus Strassentyp und signalisierter Geschwindigkeit) die Aufschlüsselung in die SWISS10-Kategorien vornimmt. Der SWISS10-Konverter wurde von der Empa im Auftrag des BAFU entwickelt und validiert. Der SWISS10-Konverter basiert auf einer Vielzahl von manuellen und automatischen Verkehrszählungen sowohl in städtischen wie auch in ländlichen Gebieten und an verschiedenen Strassentypen.

2.2.2.1 Verkehrsmengen DTV, Nt1, Nt2, Nn1, Nn2 und Fahrspuren

Der SWISS10-Konverter benötigt als Haupteingangsgrössen entweder den durchschnittlichen täglichen Verkehr (DTV; Anzahl Fahrzeuge während 24 Std.) oder die stündlichen Verkehrsmengen Nt1, Nt2, Nn1, Nn2 gemäss Anhang 3, Ziff. 32 LSV. Daraus werden die stündlichen Verkehrsmengen $N[c]$ der SWISS10-Kategorien für den Tag und die Nacht pro Fahrspur geschätzt. Dies erfolgt in Abhängigkeit des Strassentyps, der signalisierten Höchstgeschwindigkeit und gegebenenfalls der Fahrspur (Normal- oder Überholspur bei Hochleistungsstrassen).

SonROAD18 kann mit dem SWISS10-Konverter die Emissionsleistung fahrspurgenaue prognostizieren und die gängigen Software-Implementationen (Programme zur Berechnung der Lärmausbreitung) geben die Ausgabegrössen jeweils für eine einzelne Fahrspur aus. Der SWISS10-Konverter berechnet die stündlichen Verkehrsmengen für den motorisierten Individualverkehr MIV in den

14 <https://sontram.empa.ch>

SWISS10-Kategorien, hingegen nicht für den öffentlichen Verkehr. Die Anzahl Fahrzeuge für die Fahrzeugkategorien Nr. 11 und Nr. 12 müssen somit separat berücksichtigt werden. Der SWISS10-Konverter berechnet die Verkehrsmengen für die alternativen Antriebsarten – wie beispielsweise Hybrid- und Elektroantriebe¹⁵ – sowie für die landwirtschaftlichen Fahrzeuge (Kategorie Nr. 13) ebenfalls nicht. Zum Zeitpunkt der Entwicklung des SWISS10-Konverters konnten Verkehrszähler nicht zwischen den verschiedenen Antriebsarten unterscheiden. Deshalb sind die zum Zeitpunkt der Entwicklung des SWISS10-Konverters verkehrenden Fahrzeuge mit alternativen Antriebssystemen in den Verkehrsmengen der konventionell betriebenen Fahrzeuge enthalten. Die Fahrzeugkategorien mit alternativen Antriebssystemen sind als Vorbereitung für zukünftige Entwicklungen des Fahrzeugparks zu verstehen. Zudem dienen sie für die Berechnung von Szenarien beispielsweise im Rahmen von Studien.

In Situationen mit wenig Verkehr kombiniert mit niedriger Geschwindigkeit (≤ 30 km/h) ist der Einsatz des SWISS10-Konverters nicht zu empfehlen und eigene Verkehrszählungen sind vorzuziehen.

Der SWISS10-Konverter ermöglicht bei Hochleistungsstrassen mit zwei Fahrspuren in dieselbe Fahrtrichtung eine differenzierte, separate Prognose der Verkehrszusammensetzung für die Normal- und die Überholspur. Bei der Verwendung des SWISS10-Konverters im Zusammenhang mit Hochleistungsstrassen mit zwei Fahrspuren in dieselbe Fahrtrichtung ist durch den Anwender die Wahl «Normalspur» oder «Überholspur» vorzunehmen. Der SWISS10-Konverter wurde nicht für Hochleistungsstrassen mit mehr als zwei Fahrspuren in dieselbe Fahrtrichtung entwickelt (z. Bsp. zweite Überholspur oder Bereich einer Autobahnverzweigung). In solchen Fällen wird empfohlen, nach Möglichkeit direkt die Verkehrsdaten der nächstliegenden SWISS10-Verkehrszählstelle zu verwenden¹⁶.

Der SWISS10-Konverter liefert eine Detailprognose, sodass die Umrechnungsfaktoren gemäss Anhang 3 Ziffer 33 LSV nicht angewendet werden müssen.

2.2.2.2 Strassentypen und Verkehrssituationen

Die Klassierung der Strassen stützt sich auf die in der Norm VSS 40 040 b [16] genannten Strassentypen. Die Zuordnung erfolgt beispielsweise nicht nach Verkehrsmenge oder nach Inner- oder Ausserortsstrecke, sondern nach Funktion der Strasse:

- ES: Erschliessungsstrassen von quartierinterner Bedeutung mit erschliessender Funktion
- SS: Sammelstrassen von örtlicher Bedeutung mit sammelnder Funktion
- VS: Verbindungsstrassen von regionaler bis zwischenörtlicher Bedeutung mit verbindender Funktion
- HVS: Hauptverkehrsstrassen von nationaler bis zwischenörtlicher Bedeutung mit verbindender Funktion
- HLS: Hochleistungsstrassen von internationaler bis regionaler Bedeutung mit durchleitender Funktion

Darauf basierend verwendet der SWISS10-Konverter die folgenden Verkehrssituationen:

¹⁵ Fahrzeugkategorien des motorisierten Individualverkehrs mit alternativen Antriebsarten gemäss Tabelle 3: 1b, 2b, 3b, 3c, 8b

¹⁶ siehe auch Schweizerische Strassenverkehrszählung (SASVZ), automatische Dauerzählungen des ASTRA

Tabelle 4

Verkehrssituationen des SWISS10-Konverters

ID	Kürzel	Strasstyp	signalisierte Geschw. [km/h]	Anzahl Fahrspuren beide Fahrtrichtun-	Fahrspur
01	SS-30	Sammelstrasse	30	2	Normalspur
02	SS-50	Sammelstrasse	50	2	Normalspur
03	VS-50 – 60	Verbindungsstrasse	50 oder 60	2	Normalspur
04	VS-80	Verbindungsstrasse	80	2	Normalspur
05	HVS-50 – 60	Hauptverkehrsstrasse	50 oder 60	2	Normalspur
06	HVS-80	Hauptverkehrsstrasse	80	2	Normalspur
07	HLS-2-80	Hochleistungsstrasse	80	2	Normalspur
08	HLS-2-100	Hochleistungsstrasse	100	2	Normalspur
09	HLS-4-N-80	Hochleistungsstrasse	80	4	Normalspur
10	HLS-4-U-80	Hochleistungsstrasse	80	4	Überholspur
11	HLS-4-N-100	Hochleistungsstrasse	100	4	Normalspur
12	HLS-4-U-100	Hochleistungsstrasse	100	4	Überholspur
13	HLS-4-N-120	Hochleistungsstrasse	120	4	Normalspur
14	HLS-4-U-120	Hochleistungsstrasse	120	4	Überholspur

Die Datenlage bei der Entwicklung des SWISS10-Konverters erlaubte nicht für jede Kombination von signalisierter Geschwindigkeit und Strasstyp die Angabe eines Verteilschlüssels auf die verschiedenen SWISS10-Fahrzeugkategorien. Im SWISS10-Konverter fehlende Verkehrssituationen können durch die in der nachfolgenden Tabelle 5 angegebenen Verkehrssituationen substituiert werden:

Tabelle 5

Auflistung von Verkehrssituation, welche als Substitution für fehlende Verkehrssituationen verwendet werden können

Strasstyp	signalisierte Geschwindigkeit [km/h]	Verkehrssituation als Substitution
Sammelstrasse SS / Begegnungszone	20	→ SS-30
Verbindungsstrasse VS	30	→ VS-50 – 60
Hauptverkehrsstrasse HVS	30	→ HVS-50 – 60
Hauptverkehrsstrasse HVS	70	→ HVS-80

2.3 Geschwindigkeiten

Nach [1], Abs. 10.3, S. 82, ist das Modell sonROAD18 in einem Geschwindigkeitsbereich von $20 \text{ km/h} \leq v \leq 130 \text{ km/h}$ sowie bei $v = 0 \text{ km/h}$ (in Stau-Situationen, vgl. [1], Abs. 10.8, S. 92) einsetzbar.

Für die Emissionsprognose mit sonROAD18 wird als Eingabegrösse keine Geschwindigkeitsverteilung zugrunde gelegt, sondern es wird angenommen, dass alle Fahrzeuge einer Fahrzeugkategorie c mit derselben, ins Modell eingegebenen Geschwindigkeit $v[c]$ fahren.

Falls gemessene Geschwindigkeitsverteilungen vorliegen, kommen als statistische Kenngrössen für die Geschwindigkeitseingabe am ehesten v_{50} oder v_{mittel} in Frage. **Analysen zeigten, dass die mittlere Geschwindigkeit v_{mittel} als akustisch relevante Geschwindigkeit für sonROAD18 geeignet ist.** In [15], Kap. 5, S. 38, wird anhand von realen Geschwindigkeitsverteilungen dargelegt, dass sich in den untersuchten Beispielen nur geringfügige Unterschiede zwischen den statistischen Kenngrössen v_{50} , v_{mittel} und v_{60} ergeben (geringe Sensitivität).

Die Geschwindigkeit v_{85} hat für eine Emissionsprognose mit sonROAD18 keine Bedeutung.

Für die Berechnung des Emissionspegels für den Ausgangszustand und den zukünftigen Zustand wird in der Regel auf die signalisierte Geschwindigkeit abgestellt. Das Modell erlaubt aber auch die Verwendung der mittleren Geschwindigkeit v_{mittel} .

In zu begründenden Ausnahmefällen kann in Abweichung von dieser allgemeinen Regel die akustisch relevante Geschwindigkeit in Form der mittleren Geschwindigkeit v_{mittel} [c], Tag/Nacht, in das Modell eingegeben werden. Eine Ausnahme kann vorliegen¹⁷:

- wenn **topographische Gegebenheiten** der Strassenführung den Fahrer/die Fahrerin daran hindern, mit der signalisierten Geschwindigkeit zu fahren (z. Bsp. kurve (Berg-)Strecke mit Tempo 80, ausserorts);
- wenn die **Sicht und/oder der Handlungsspielraum eingeschränkt** ist und aus Sicherheitsgründen die signalisierte Geschwindigkeit unabhängig von der Witterung nicht gefahren werden kann (z. Bsp. enge Strasse Tempo 50 innerorts oder in einem engen Dorfkern);
- falls unmittelbar **beim Wechsel der signalisierten Geschwindigkeit** (z. Bsp. Ortseinfahrt/-ausfahrt von Tempo 80 auf Tempo 50 resp. Tempo 50 auf Tempo 80) **erhöhte Lärmemissionen** auftreten¹⁸

Bei der signalisierten Geschwindigkeit ist zu beachten, dass in sonROAD18 die in *Tabelle 6* aufgeführten *fahrzeugkategorienabhängigen* Höchstgeschwindigkeiten gemäss Artikel 4a und 5 der Verkehrsregelnverordnung [18] zu berücksichtigen¹⁹ sind.

¹⁷ Bei einem Lärmwirkungsnachweis für eine Geschwindigkeitsreduktion (akustisch) ist gemäss Bundesgerichtsentscheid 1C_11/2017 vom 2. März 2018 für den Ausgangszustand die mittlere Geschwindigkeit v_{mittel} massgebend und für den zukünftigen Zustand die signalisierte Geschwindigkeit.

¹⁸ Im Sinne der Berücksichtigung des Fahrverhaltens (beschleunigen/abbremsen) als Zuschlag

¹⁹ Die Höchstgeschwindigkeiten sind unabhängig vom Antriebssystem. Deshalb gelten für Fahrzeuge mit Hybrid-, Wasserstoff- oder Elektroantrieb dieselben Höchstgeschwindigkeiten wie für die jeweiligen Fahrzeuge mit konventionellem Antrieb. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit für leichte Motorwagen mit Anhänger auf Autostrassen und Autobahnen gilt nur, falls das Gesamtgewicht des Anhängers 3.5t nicht übersteigt (vgl. Art. 5 Abs. 2 Bst. c) VRV [18])

Tabelle 6

Fahrzeugkategorienabhängige Höchstgeschwindigkeiten gemäss Art. 4a und 5 der Verkehrsregelnverordnung [18]

Rote Markierung: Die für die jeweilige Fahrzeugkategorie zulässige Höchstgeschwindigkeit ist niedriger als die signalisierte Höchstgeschwindigkeit.

SWISS10 Klasse	Beschreibung Klasse	Autostrassen 100 km/h	Autobahnen 120 km/h
1	Busse	100 km/h	100 km/h
2	Motorräder	100 km/h	120 km/h
3	Personenwagen	100 km/h	120 km/h
4	Personenwagen mit Anhänger	100 km/h	100 km/h
5	Lieferwagen bis 3.5 t	100 km/h	120 km/h
6	Lieferwagen bis 3.5 t mit Anhänger	100 km/h	100 km/h
7	Lieferwagen bis 3.5 t mit Auflieger	100 km/h	100 km/h
8	Lastwagen	80 km/h	80 km/h
9	Lastenzüge	80 km/h	80 km/h
10	Sattelzüge	80 km/h	80 km/h

2.4 Akustische Belagsgüte

2.4.1 Referenzbelag

Der Referenzbelag von sonROAD18 entspricht einem ACMR8 (mit einem Hohlraumgehalt von < 8 %), eingebaut nach der damals geltenden Schweizer Regel SNR 640 436 [19]. Dieser Belag weist laut Anhang 1b zum Leitfaden Strassenlärm [20] einen KB-Wert für den Geschwindigkeitsbereich > 90 km/h von 0 dBA auf. Für den Geschwindigkeitsbereich < 60 km/h wird ein Wert von +1 dBA angegeben. Gemäss einer Untersuchung [21] zeigen die aktuellen Auswertungen bezüglich ACMR8 einen KB-Wert für den niedrigen Geschwindigkeitsbereich von +0.3 dBA (Mischverkehr; 8 % Anteil N2). Daraus kann geschlossen werden, dass die akustische Belagsgüte der Referenzbeläge der beiden Modelle StL86+ und sonROAD18 nahezu identisch ist.

2.4.2 Berücksichtigung der akustischen Belagsgüte

Die höchste Prognosesicherheit wird erreicht, indem idealerweise die spektrale akustische Belagsgüte mit einem standardisierten Messverfahren (SPB, CPX, SEM, vgl.

[22]) ermittelt und in sonROAD18 als spektrale Belagskorrektur $\Delta L_{W,R,road}[i]$ eingegeben wird (i : Index des Terzbandes). Wenn jedoch keine Messwerte verfügbar sind, können standardmässig immer noch die mit dem StL86+-Berechnungsmodell verknüpften KB-Werte in Form der Standard-Belagskorrekturen verwendet werden (vgl. Abs. 2.4.4).

Mit Hilfe der Verfahren wie im Modellbescrib [1] erläutert (siehe Verweise auf die entsprechenden Kapitel in der Abbildung 1), kann die gemessene akustische Belagsgüte eines bestehenden Strassenbelags in eine sonROAD18-kompatible, spektrale Belagskorrektur $\Delta L_{W,R,road}[i]$ umgerechnet werden.

2.4.3 Integration mittels Belagsmessungen

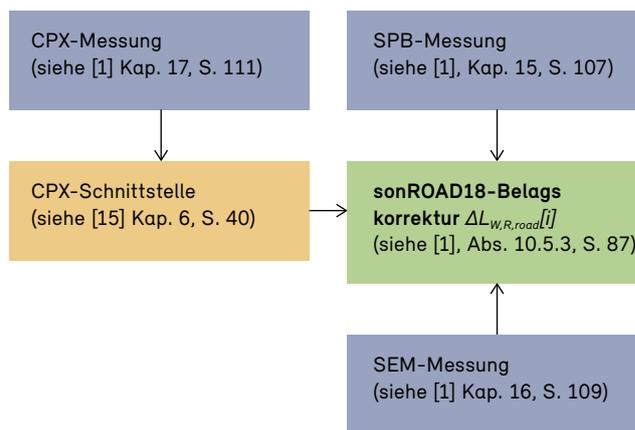
Die Tabelle 7 zeigt die drei in der Schweiz gängigsten Messverfahren für die Bestimmung der akustischen Belagsgüte (vgl. hierzu auch [22]).

Tabelle 7
Messverfahren zur Integration der akustischen Belagsgüte in sonROAD18

Messverfahren	Norm	Beschreibung
SPB: Statistische Vorbeifahrtsmessung (Statistical Pass-By)	ISO 11819-1	Messung einzelner, isolierter Fahrzeugvorbeifahrten bei gleichzeitiger Erfassung der Fahrgeschwindigkeit sowie der Fahrzeugkategorie zur Normalisierung der Messung.
SEM: Stichproben-Emissions-Messung	nicht normiert	Strassennahe Messung des Gesamtstrassenlärms
CPX: Close Proximity	ISO 11819-2	Mittels Messanhänger wird die Strecke abgefahren und das Rollgeräusch für einen PW- und einen LKW-Normreifen aufgezeichnet.

Alle diese bisherigen Messverfahren können mit sonROAD18 weiterverwendet werden. Die SPB- und die SEM-Messungen können – wie in **Abbildung 1** gezeigt – direkt in sonROAD18 integriert werden. Eine CPX-Schnittstelle (CPX-Umrechnungsmodell) ermöglicht die Verwendung von CPX-Messungen.

Abbildung 1
Integration der akustischen Belagsgüte in sonROAD18 mittels Messungen



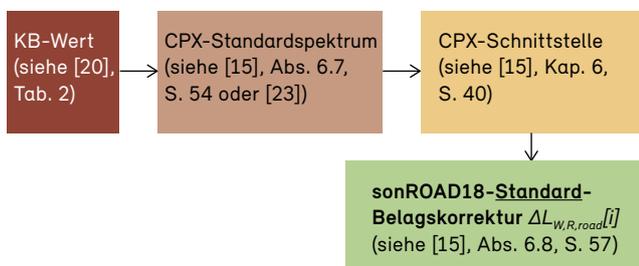
2.4.4 Integration mittels KB-Werten

Falls keine Belagsmessungen durchgeführt wurden resp. nicht durchführbar sind, kann über eine KB-Wert-Annahme auf sogenannte **Standard-Belagskorrekturen** zurückgegriffen werden. Diese wurden wie folgt erstellt (vgl. [23] sowie Abbildung 2): Aus einer CPX-Messdatenbank, welche u. a. verschiedene Belagstypen und Belagsalter sowie die dazugehörigen KB-Werte umfasst, wurden die CPX-Spektren nach KB-Werten gruppiert. Danach wurde für alle KB-Gruppen jeweils ein gemittelttes CPX-Spektrum berechnet. Diese werden als **CPX-Standardspektren** bezeichnet. Statistische Analysen zeigten, dass die Standardabweichung pro CPX-Standardspektrum geringer ausfallen, wenn sie nach KB-Werten anstatt nach Belagstyp gruppiert werden (vgl. [23]).

Jedes einzelne, gemittelte **CPX-Standardspektrum** wurde danach in einem weiteren Schritt mittels CPX-Schnittstelle (vgl. [15], Kap. 6, S. 40) in eine sonROAD18-kompatible, spektrale Belagskorrektur $\Delta L_{W,R,road}[i]$ umgerechnet. Diese festgelegten, spektralen Belagskorrekturen werden **Standard-Belagskorrekturen** benannt und können von ihrer Funktion her mit den KB-Werten verglichen werden. Die **Standard-Belagskorrekturen** für die verschiedenen KB-Werte sind für die Geschwindigkeiten 50 km/h und 80 km/h im Anhang 3 bzw. Anhang 4 tabellarisch zusammengestellt. Die beiden Sätze von Standard-Belagskorrekturen werden als KB50 beziehungsweise

KB80 bezeichnet. Sie sind ebenfalls im Empa-Bericht *sonROAD18 – Berechnungsmodell für Strassenlärm – Weiterentwicklungen und Ergänzungen* sowohl in tabellarischer als auch in grafischer Form dargestellt (siehe [15], Abs. 6.8, S. 57).

Abbildung 2
Integration der akustischen Belagsgüte in sonROAD18 mittels KB-Werten



Die Tabelle 8 ordnet in Abhängigkeit der signalisierten Geschwindigkeit die KB-Werte aus der Tabelle 2 des Anhangs 1b zum Leitfaden Strassenlärm [20] den zwei Sätzen KB50 und KB80 von sonROAD18-Standard-Belagskorrektur zu.

Tabelle 8
Zuordnung der geschwindigkeitsabhängigen KB-Werte zu den sonROAD18-Standard-Belagskorrekturen

signalisierte Geschwindigkeit	Anhang 1b Leitfaden Strassenlärm, Tab. 2, KB-Wert aus Spalte	sonROAD18-Standard-Belagskorrektur
≤ 60 km/h	< 60 km/h, N2 = 8 %	KB50
70 km/h	< 60 km/h, N2 = 8 %	KB80
≥ 80 km/h	> 90 km/h, N2 = 15 %	KB80

2.4.5 Sensitivität der akustischen Belagsgüte

SonROAD18 schlüsselt die Gesamtlärmemissionen von Fahrzeugen in eine energetische Summe aus einer Antriebs- und einer Rollgeräuschkomponente sowie in eine Korrektur für die vertikale Abstrahlcharakteristik auf.

Die Belagskorrektur wirkt ausschliesslich auf die Rollgeräuschkomponente.

In einem Strassenlärm-Berechnungsmodell kommt der akustischen Belagsgüte eine hohe Bedeutung zu (vgl. hierzu auch die Sensitivitätsanalyse²⁰ in [1] Abs. 13.2, Tab. 13.1, S. 105). Die Belagskorrektur ist bei mittleren und hohen Geschwindigkeiten eine der wichtigsten Einflussgrössen für die Gesamtemission. Lediglich bei niedrigen Geschwindigkeiten (≤ 40 km/h) beeinflusst das Antriebsgeräusch die Gesamtemissionen massgeblich.

Beim Modell StL86+ wirkt die Belagskorrektur stets auf das Gesamtgeräusch, da dieses Modell keine Auftrennung in Antriebs- und Rollgeräusch kennt. Die Erwartung aus der Erfahrung mit StL86+ ist, dass sich die Belagskorrektur situationsunabhängig zu 100 % auf den Emissionspegel auswirkt. Das heisst beispielsweise, dass ein hochwirksamer lärmarmere Belag mit einem KB-Wert von –6 dBA in jeder Situation unabhängig von der Geschwindigkeit, der Steigung und der Verkehrszusammensetzung den Emissionspegel um –6 dBA reduziert. In der Realität ist die Belagswirkung jedoch in einem zurzeit noch nicht abschliessend bekannten Masse von den genannten Einflussfaktoren abhängig. Aber je geringer die Geschwindigkeit, desto geringer ist der Anteil des Rollgeräusches am Gesamtgeräusch. Weist das Rollgeräusch einen geringen Anteil am Gesamtgeräusch auf, so folgt daraus auch ein geringer Einfluss der Belagskorrektur auf das Gesamtgeräusch.

2.4.6 Wichtige Punkte bezüglich der akustischen Belagsgüte

Die in Tabelle 9.1 des Empa-Berichts *sonROAD18 – Berechnungsmodell für Strassenlärm [1]* aufgelisteten Belagsspektren sind nicht zur Verwendung als Belagskorrekturen geeignet. Diese kamen lediglich bei der Modellkalibration zum Einsatz und sind im erwähnten Bericht der Vollständigkeit halber entsprechend dokumentiert (vgl. [1] Abs. 9.4 *Belageinfluss*, S. 81). Bei der Modellkalibrierung musste für die Bestimmung der Modell-Koeffizienten eine akustische Belagsgüte für einen bestimmten Messabschnitt angenommen werden. Diese akustische Belagsgüte gilt dann nur für diesen Messabschnitt. Die-

²⁰ Sensitivität der Emissionsprognose gegenüber Änderungen bei den Eingabegrössen

se Belagsspektren sind folglich nicht repräsentativ für die aufgeführten Belagstypen.

Als akustisch neutraler Belag gilt nicht der Referenzbelag²¹ des Modells, sondern es ist die Standard-Belagskorrektur für KB = 0 dB einzusetzen.

Für Situationen mit einem lärmarmen Belag und niedrigen Geschwindigkeiten ($v \leq 50$ km/h) ist das Modell sonROAD18 nicht abschliessend validiert²². Das heisst insbesondere, dass beim Kombinieren der Lärmschutzmassnahmen «Geschwindigkeitsreduktion» und «lärm- armer Belag» die Prognosegenauigkeit noch nicht abschliessend feststeht.

2.5 Strassenneigung/Fahrspuren

Die Steigungskorrektur ist im Modell sonROAD18 nicht von der Frequenz, jedoch von der Geschwindigkeit sowie von der Fahrzeugkategorie abhängig (vgl. [1], Abs. 10.5.2, Gl. Nr. 10.4 – 6). Im Falle einer Strassenlängsneigung $s \leq -1$ % oder $s \geq 1$ % ist eine Steigungskorrektur erforderlich, welche vorzeichenabhängig erfolgt und somit bei nicht ebenen Strassen eine richtungstrennte Modellierung erfordert.

Programme zur Berechnung der Lärmausbreitung können bei einer Modellierung durch die Benutzerin resp. den Benutzer mit einer Strassenachse die Strasse automatisch auf zwei Fahrspuren aufteilen und dabei die Verkehrsmenge auf die beiden Fahrspuren gleichmässig verteilen.

Die Strassenneigung in Längsrichtung ist als vorzeichenabhängiger Wert ab ± 1 % einzugeben. Der Wertebereich ist nicht eingeschränkt.

Die Strassenlängsneigung kann beispielweise aus dem grossmasstäblichen topografischen Landschaftsmodell der Schweiz namens swissTLM^{3D} vom Bundesamt für Landestopografie swisstopo gewonnen werden [12].

Auf einer Strasse, auf welcher in beide Fahrtrichtungen ungefähr die gleiche Verkehrsmenge verkehrt, dominiert normalerweise die positive Steigungskorrektur. Falls ein Strassenquerschnitt/-trasse ausschliesslich Fahrspuren aufweist, welche in Abwärtsrichtung befahren werden (negative Neigung)²³, so ist für eine Neigung s , welche im Bereich -4 % $\leq s \leq 0$ % liegt, unabhängig von der Fahrzeugklasse und der Geschwindigkeit keine Steigungskorrektur erforderlich ($\Delta L_{W,P,grad}[C] = 0$ dB, vgl. [1], Abs. 10.5.2, Gl. 10.4 – 6).

Obwohl sonROAD18 jede Fahrspur einzeln berechnen kann, handelt es sich in den meisten Fällen um einen einfachen, zweiseitigen Strassenabschnitt mit gegenläufigem Verkehr und nahezu identischen Verkehrsmengen in beide Fahrtrichtungen. Die Strasse kann als einzelne Achse modelliert werden, wenn die folgenden Kriterien kumulativ erfüllt sind:

- Der durchschnittliche tägliche Verkehr DTV zwischen beiden Fahrtrichtungen unterscheidet sich weniger als 10 %
- Die Strassenlängsneigung s ist ≤ 3 %.

Für die folgenden Fälle erzielt eine fahrspurgenaue Modellierung präzisere Emissionswerte:

- Situation mit einem oder mehreren Lärmhindernissen²⁴ und starker Steigung
- Falls effektiv mehrere Fahrspuren pro Fahrtrichtung vorhanden sind (z. B. bei Autobahnen)

2.6 Luft-Temperatur

Für die Berechnung von jahresdurchschnittlichen Emissionswerten ist die Temperatur ebenfalls als jahresdurchschnittliche Temperatur zu verstehen. Es handelt sich dabei um die Lufttemperatur und nicht um die Oberflächentemperatur des Strassenbelags. Sie wird nicht nach Tag- und Nachtperiode differenziert. Die Referenztemperatur von sonROAD18 von 10 °C entspricht im Mittelland

21 d. h. ACMR8 mittels $\Delta L_{W,R,road}[f] = 0$ dB für alle Frequenzbänder

22 Zum Zeitpunkt der Modellentwicklung existierten erst sehr wenige T30-Strecken mit einem lärmarmen Belag

23 z. B. Einbahnstrassen, richtungstrennt geführte Strassen, Ein- oder Ausfahrten von Autobahnen/-strassen.

24 z. Bsp. Lärmschutzwand, -damm, Stützmauer, Geländekante, Böschung

dem Jahresmittelwert²⁵, sodass für jahresdurchschnittliche Berechnungen in der Regel keine Temperaturkorrektur vorgenommen werden muss (siehe [1], Abs. 3.2, S. 10 oder Abs. 10.1, S. 82). Auch für die Lärmprognose von zukünftigen baulichen und/oder betrieblichen Zuständen (Prognosehorizont) ist in der Regel keine Temperaturkorrektur erforderlich.

Falls die jahresdurchschnittliche Temperatur mehr als 5 °C von der Referenztemperatur abweicht, so ist eine Temperaturkorrektur erforderlich. In solchen Fällen kann beispielsweise die Auswertung des Jahresverlaufs der Temperatur an Stationen des schweizerischen Klimamessnetzes (Swiss NBCN) von MeteoSchweiz²⁶ dienen.

²⁵ Jahresmittelwert für 2017 für die nördliche Schweiz (Alpennordseite) unter 1000 m. ü. M.: 9.8 °C, Quelle: MeteoSchweiz, Begert M, Frei C. Area-mean temperatures of Switzerland. DOI: 0.18751/Climate/Timeseries/CHTM/1.0, 10.02.2018.

²⁶ www.meteoschweiz.admin.ch

3 Ausbreitungsrechnung

3.1 Modell für die Ausbreitungsrechnung

Für die Berechnung der Schallausbreitung von der Lärmquelle Strasse zu den Immissionspunkten existiert mit der internationalen Norm ISO 9613-2 *Attenuation of sound during propagation outdoors – Part 2: General method of calculation* [3] eine vollständige Rechenvorschrift. Diese kann auf eine Vielzahl von Geräuschquellen angewendet werden und deckt die wichtigsten Dämpfungsmechanismen ab. Dieses Verfahren ist für bodengebundene Geräuschquellen wie Strassen- und Schienenverkehr oder Industrie- und Gewerbe anwendbar. Das Berechnungsverfahren ist in den meisten kommerziell erhältlichen Softwarepaketen zur Lärmberechnung implementiert. Mit einer Ausbreitungsberechnung nach Norm ISO 9613-2 werden unter anderem die folgenden akustischen Effekte abgedeckt:

- Geometrische Divergenz/Dämpfung
- Atmosphärische Absorption
- Bodentypabhängiger Bodeneffekt
- Reflexion an Oberflächen
- Abschirmung durch Hindernisse²⁷
- Meteo-Effekt

Die Berechnung erfolgt frequenzabhängig (Oktavband-Auflösung mit nominalen Mittelbandfrequenzen von 63 Hz bis 8 kHz; d. h. 8 Frequenzbänder).

Mit der Norm ISO 9613-2 wird der A-bewertete Dauerschalldruckpegel unter schallausbreitungsgünstigen Witterungsbedingungen (in Windrichtung und/oder gut ausgebildete, leichte Bodeninversion – wie sie üblicherweise nachts auftritt) berechnet.

Die Norm ISO 9613-2 lässt teilweise einen gewissen Interpretationsspielraum offen. Diese Lücken können mit Hilfe des Technical reports ISO/TR 17534-3, *Acoustics – Software for the calculation of sound outdoors – Part 3: Recommendations for quality assured implementation of ISO 9613-2 in software according to ISO 17534-1* [24]

²⁷ wie beispielsweise Gebäude, Gelände-Erhebungen/-Kanten, Lärmschutzwände und -dämme, Stützmauern, Kunstbauten im Allgemeinen

geschlossen werden. Im Weiteren enthält der Technical report einige Präzisierungen, welche die Prognoseunsicherheit mit einfach umzusetzenden Festlegungen reduzieren.

Die mit sonROAD18 berechneten Emissionsspektren sind mit Hilfe des Berechnungsverfahrens für die Lärmausbreitung nach Norm ISO 9613-2 [3], Ausgabe 1996, in Immissionspegel umzurechnen. Die Ausbreitungsrechnung soll dabei spektral; mindestens mit einer Frequenzauflösung in Oktavbändern erfolgen.

Die Software für die Berechnung der Lärmausbreitung resp. deren Berechnungseinstellungen soll alle Empfehlungen gemäss ISO/TR 17534-3, erste Ausgabe vom 15. Januar 2015, berücksichtigen [24].

Die Ausbreitungsrechnung gemäss Modell StL86+ ist nicht für die Kombination mit sonROAD18 geeignet. Dies unter anderem deshalb nicht, weil die beiden Modelle eine unterschiedliche Quellenhöhe aufweisen.

3.2 Berechnungsparameter

Im Rahmen der berechneten Test-Szenarien, zeigte sich, dass für eine möglichst präzise und situationsgerechte Ausbreitungsrechnung die folgenden Berechnungsparameter geeignet sind:

- Referenzbedingungen: T = 10 °C, rel. Luftfeuchtigkeit 70 %
- Bodeneffekt: Die vereinfachte Methode für die Bestimmung des Bodeneffekts ist nicht zugelassen, da sie gemäss Norm ISO 9613-2 nur für nichtspektrale Berechnungen angewendet werden darf und sich auf poröse oder zumindest grösstenteils poröse Böden beschränkt.
- Die Seitenbeugung um Objekte soll berücksichtigt werden, auch im Falle von mehreren Objekten (mehrfache seitliche Beugung).
- Der Bodenfaktor G gemäss Norm ISO 9613-2, Abs. 7.3.1 [3], wird hier nicht pauschal vorgegeben, da die Boden-

porosität in der Regel auf dem Ausbreitungsweg variiert und situationsabhängig ist. Ausnahmen stellen Strassen und Parkplätze dar, welche generell schallreflektierend sind ($G = 0$). Der Anhang 5 enthält eine Zuordnung des Bodenfaktors G zu den Bodenbedeckungen gemäss swissTLM^{3D}.

- Gebäudeabsorption: Gebäude sollen, soweit nichts Anderes bekannt ist, mit einem Reflexionsverlust von 1 dB modelliert werden. Sofern bekannt, können auch andere Absorptionsgrade eingesetzt werden.
- Es soll mindestens eine Reflexion berechnet werden ($n \geq 1$). In städtischen, dicht bebauten Gebieten («Strassenschluchten») wird empfohlen, auch Reflexionen höherer Ordnung zu berechnen, um die Mehrfachreflexionen an Gebäudefassaden und der daraus resultierenden Pegelerhöhung zu berücksichtigen.
- Dämpfungen für Bewuchs aufgrund von allenfalls vorhandener Vegetation nach Anhang A (informativ) der Norm ISO 9613-2 sind ebenfalls zu berücksichtigen, wenn es sich nach der Bodenbedeckung der amtlichen Vermessung um Waldflächen handelt.
- Dämpfungen aufgrund von allenfalls vorhandener Industriebauten und Bebauungen nach Anhang A (informativ) der Norm ISO 9613-2 sind nicht zu berücksichtigen. Diese Bauten sollen nicht generalisiert, sondern als einzelne 3D-Objekte mit individuellem Grundriss und dazugehöriger Höhe modelliert werden.

Falls für die Emissionsberechnung eine von der Referenztemperatur abweichende Temperatur eingegeben wird, so ist in der Regel auch die Temperatur in der Ausbreitungsberechnung anzupassen (vgl. Abs. 2.6).

3.3 Meteo-Effekte

Das Berechnungsverfahren für die Lärmausbreitung gemäss Norm ISO 9613-2 berücksichtigt Meteo-Effekte (Wind-Situation, Temperatur-Inversionen). Für eine Ausbreitungsrechnung, welche die lokalen, jahresdurchschnittlichen Wetterbedingungen einschliesst, sind Meteo-Modellrechnungen oder Meteo-Messungen (Wind- und Temperatur-Profile) notwendig. Eine Modellrechnung steht zwar prinzipiell schweizweit zur Verfügung [25], ist zurzeit jedoch für Strassenlärm-Berechnungen noch nicht validiert. **Es ist daher nicht erforderlich, eine Meteo-Kor-**

rektur vorzunehmen (d. h. $C_{met} = 0$; C_{met} gemäss Norm ISO 9613-2, Gleichungen Nr. 6). Bei der Berechnung der Hinderniswirkung hingegen soll der Faktor K_{met} (Gleichung 18) berücksichtigt werden²⁸. Bei Verzicht auf die Meteo-Korrektur C_{met} nach Norm ISO 9613-2 wird generell eine förderliche Ausbreitungssituation angenommen.

²⁸ In den gängigen Software-Implementationen kann der Benutzer diesen Faktor nicht beeinflussen.

4 Implementierungen

Ein Web-Tool sonROAD18²⁹ steht analog zu sonRAIL³⁰ und sonTRAM³¹ online zur Verfügung. Dieses Web-Tool beinhaltet auch den SWISS10-Konverter, das CPX-Umrechnungsmodell, die Ausgabe der Emissionsspektren in tabellarischer und grafischer Form sowie die Schätzung von Maximalpegeln.

Weitere Implementierungen in kommerziellen 3D-Lärmbe-rechnungsprogrammen sind erhältlich. Dabei sind jeweils die Konformitätserklärungen der Software-Hersteller zu beachten.

²⁹ <https://sonroad18.empa.ch>

³⁰ <https://sonrail.empa.ch>

³¹ <https://sontram.empa.ch>

5 Literatur

- [1] Heutschi K., Locher B., 2018: *sonROAD18 – Berechnungsmodell für Strassenlärm*, Empa, 09.07.2018: www.bafu.admin.ch/sonROAD18
- [2] Lärmschutz-Verordnung LSV, SR 814.41 vom 15.12.1986, Stand am 07.05.2019
- [3] International Standard ISO 9613-2, Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors – Part 2: General method of calculation, 15.12.1996 (First Edition)
- [4] Leitfaden Strassenlärm, *Vollzugshilfe für die Sanierung*, Schguanin G., Ziegler T., Umwelt-Vollzug Nr. 0637, ASTRA und BAFU, Dezember 2006
- [5] Heutschi K., Locher B., 2018: *sonROAD18 – Berechnungsmodell für Strassenlärm – Kurzfassung*, Empa, 09.07.2018: www.bafu.admin.ch/sonROAD18
- [6] Heutschi K., Locher B., 2018: *sonROAD18 – Modèle de calcul du bruit routier – Version abrégée*, Empa, 09.07.2018: www.bafu.admin.ch/sonROAD18
- [7] Heutschi K., Locher B., 2018: *sonROAD18 – Modello di calcolo per il rumore stradale – versione ridotta*, Empa, 09.07.2018: www.bafu.admin.ch/sonROAD18
- [8] JRC Reference Report, *Common Noise Assessment Methods in Europe (CNOSSOS-EU)*, 2012
- [9] *Computermodell zur Berechnung von Strassenlärm*, Teil 1, Bedienungsanleitung zum Computerprogramm StL-86, Schriftenreihe Umweltschutz Nr. 60, Bundesamt für Umweltschutz, 1987
- [10] *Strassenlärm: Korrekturen zum Strassenlärm-Berechnungsmodell*, Mitteilungen zur Lärmschutz-Verordnung (LSV) Nr. 6, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), 1995
- [11] Heutschi K., *SonRoad – Berechnungsmodell für Strassenlärm*, Schriftenreihe Umwelt Nr. 366, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), 2004
- [12] Objektkatalog swissTLM^{3D} 1.9, Bundesamt für Landestopografie swisstopo, April 2021, <https://www.swisstopo.admin.ch/de/geodata/landscape/tlm3d.html#dokumente>
- [13] ASTRA-Richtlinie 13012 *Verkehrszähler*, ASTRA, Ausgabe 2009, Version 1.05
- [14] Checkliste Umwelt für nicht UVP-pflichtige Eisenbahnanlagen, Oktober 2010 (in Revision), BAV und BAFU
- [15] Heutschi K., *sonROAD18 – Berechnungsmodell für Strassenlärm – Weiterentwicklungen und Ergänzungen*, Empa, 15.05.2020, www.bafu.admin.ch/sonROAD18
- [16] Norm VSS 40 040b *Projektierung, Grundlagen*, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute, 31.03.2019
- [17] Verordnung über die Tempo-30-Zonen und die Begegnungszonen, SR 741.213.3 vom 28.09.2001, Stand am 01.01.2021
- [18] Verkehrsregelnverordnung VRV, SR 741.11 vom 13.11.1962, Stand am 20.05.2021
- [19] Schweizer Regel SNR 640 436, *Semidichtes Mischgut und Deckschichten; Festlegungen, Anforderungen, Konzeption und Ausführungen*, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS, 2013
- [20] Anhang 1b zum Leitfaden Strassenlärm, *Belagskennwerte – Anwendungshilfe für die Belagsakustik*, ASTRA und BAFU, 31.07.2013

-
- [21] Bericht *Aktualisierung Belagskennwerte 2016 im Innerortsbereich*, Grolimund + Partner AG, 23.10.2017
- [22] Anhang 1c zum Leitfaden Strassenlärm, *Technisches Merkblatt für akustische Belagsgütemessungen an Strassen*, ASTRA und BAFU, 11.12.2013
- [23] E. Bühlmann, E. Hammer, Projektbericht *Ermittlung von CPX-Standardspektren für sonROAD18*, Grolimund + Partner AG, 15. Mai 2020
- [24] Technical Report ISO/TR 17534-3, *Acoustics – Software for the calculation of sound outdoors – Part 3: Recommendations for quality assured implementation of ISO 9613-2 in software according to ISO 17534-1*, 15.01.2015 (First edition)
- [25] J. M. Wunderli, *Aufbereitung von flächendeckenden Grundlagen für die Schallausbreitungsmodellierung in den Bereichen Meteorologie und Bodeneigenschaften*, Empa-Bericht Nr. 459 348, 2011
- [26] ASTRA IT-Dokumentation 65 021, Verkehrsmonitoring VMON, Anwendungshandbuch, Ausgabe 2016, Version 2.2.0

Anhang 1 Schema Fahrzeugkategorien SWISS10

Abbildung 3

Schematische Darstellung der Fahrzeug-Kategorisierung nach
SWISS10

Nach [26], Abs. 4.4.1.1, Tab. 4, S. 59.

1		Bus
2		Motorräder
3		Personenwagen
4		Personenwagen mit Anhänger
5		Lieferwagen
6		Lieferwagen mit Anhänger
7		Lieferwagen mit Auflieger
8		Lastwagen
9		Lastenzüge
10		Sattelzüge

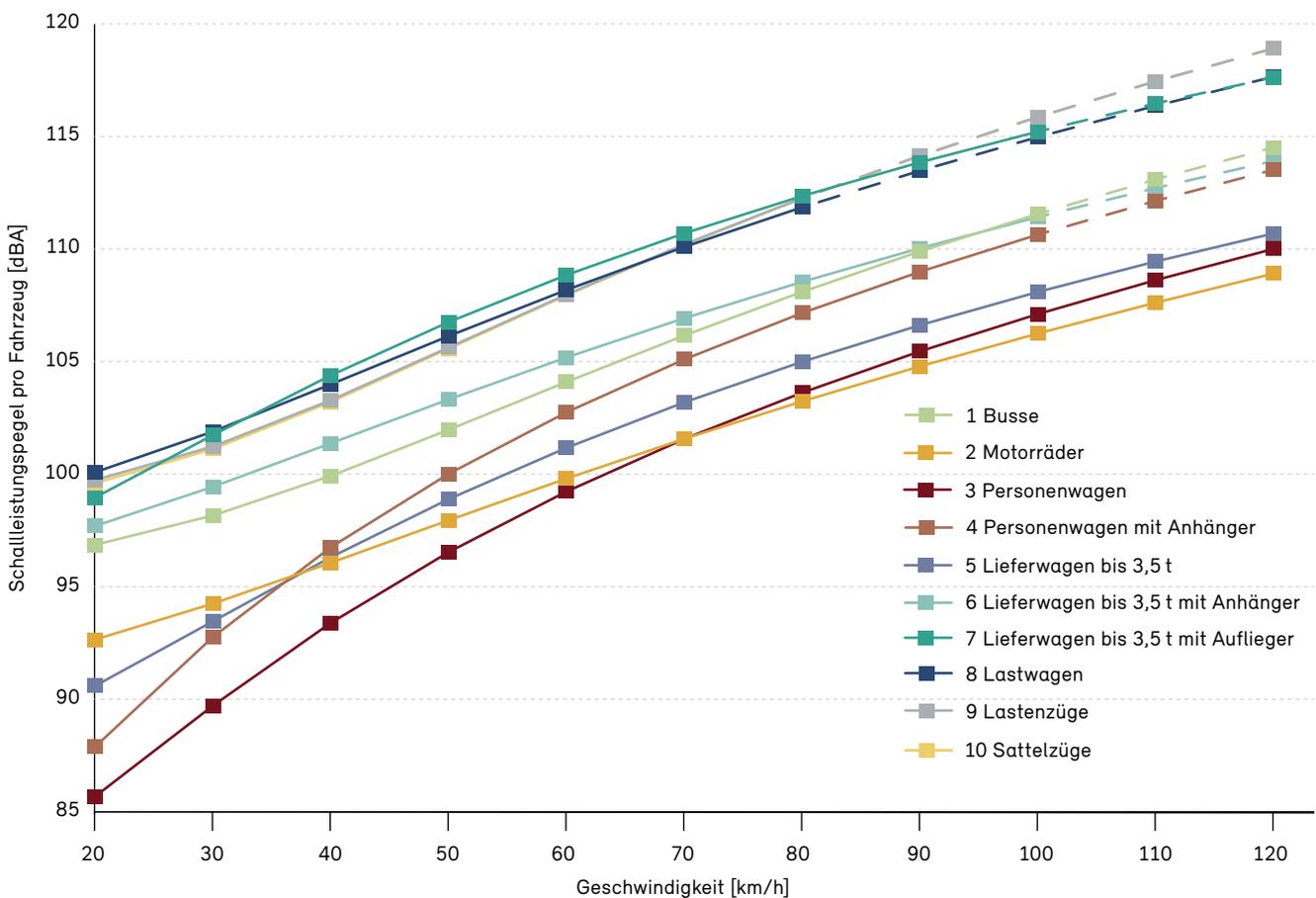
Anhang 2 Durchschnittliche Emissionspegel

Die untenstehende Grafik zeigt für die SWISS10-Kategorien Nr. 1 – Nr. 10³² die durchschnittlichen, A-bewerteten Schalleistungspegel in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit. Bei gewissen Fahrzeugkategorien handelt es sich ab 80 km/h respektive 100 km/h um Extrapolationen (vgl.

hierzu Abs. 2.3 und *Tabelle 6*). Die Emissionsschalleistungen wurden für Referenzbedingungen berechnet (d. h. auf dem Referenzbelag ACMR8 und bei einer Lufttemperatur von 10 °C).

Abbildung 4

Durchschnittliche, A-bewertete Schalleistungspegel pro Fahrzeug in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit für die verschiedenen SWISS10-Kategorien



32 Mit konventionellem Antriebssystem, d. h. Verbrennungsmotor.

Anhang 3 Spektrale Standard-Belagskorrekturen für 50 km/h

Die Tabelle 9 listet die spektralen Standard-Belagskorrekturen für 50 km/h in [dB] auf.

Die grafische Darstellung der Standard-Belagskorrekturen ist in [15], Abb. 6.19, S. 58, zu finden.

Tabelle 9

Spektrale Standard-Belagskorrekturen für 50 km/h in [dB]

Fehlende Terzbänder ergänzt (blau schattiert: Terzbänder der normierten CPX-Messung).

Frequenz [Hz]	KB-Wert [dB], 50 km/h												
	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3
50	-5.8	-5.4	-4.9	-4.1	-3.1	-2.5	-1.5	-0.6	0.2	1.0	1.8	3.3	4.9
63	-5.8	-5.4	-4.9	-4.1	-3.1	-2.5	-1.5	-0.6	0.2	1.0	1.8	3.3	4.9
80	-5.8	-5.4	-4.9	-4.1	-3.1	-2.5	-1.5	-0.6	0.2	1.0	1.8	3.3	4.9
100	-5.8	-5.4	-4.9	-4.1	-3.1	-2.5	-1.5	-0.6	0.2	1.0	1.8	3.3	4.9
125	-5.8	-5.4	-4.9	-4.1	-3.1	-2.5	-1.5	-0.6	0.2	1.0	1.8	3.3	4.9
160	-5.8	-5.4	-4.9	-4.1	-3.1	-2.5	-1.5	-0.6	0.2	1.0	1.8	3.3	4.9
200	-5.8	-5.4	-4.9	-4.1	-3.1	-2.5	-1.5	-0.6	0.2	1.0	1.8	3.3	4.9
250	-5.8	-5.4	-4.9	-4.1	-3.1	-2.5	-1.5	-0.6	0.2	1.0	1.8	3.3	4.9
315	-5.8	-5.4	-4.9	-4.1	-3.1	-2.5	-1.5	-0.6	0.2	1.0	1.8	3.3	4.9
400	-0.5	-0.4	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.1	0.0	0.0	0.5	1.2	2.3	3.4
500	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	3.3
630	-6.9	-4.4	-2.6	-1.6	-1.0	-0.7	-0.6	-0.2	0.7	1.9	3.0	4.3	5.5
800	-15.0	-12.1	-9.3	-6.5	-4.0	-2.5	-1.5	-0.7	0.1	1.1	1.9	3.0	3.9
1000	-15.4	-13.2	-10.7	-7.5	-4.7	-2.6	-0.7	0.6	1.6	2.4	3.3	4.0	4.8
1250	-11.4	-10.3	-9.0	-6.7	-4.3	-2.5	-0.7	0.7	1.7	2.7	3.6	4.4	5.2
1600	-12.0	-10.8	-9.4	-7.2	-4.3	-2.1	-0.1	0.6	1.0	1.5	2.1	2.4	2.7
2000	-14.0	-12.2	-10.2	-7.5	-4.6	-2.0	0.1	0.5	0.8	1.1	1.4	1.6	1.7
2500	-15.5	-12.8	-10.1	-7.2	-4.3	-2.3	-0.8	-0.2	0.0	0.7	1.4	1.7	2.3
3150	-16.3	-13.9	-11.3	-8.3	-5.6	-3.6	-1.8	-0.4	0.3	1.0	1.7	2.0	2.5
4000	-14.9	-12.9	-10.6	-7.7	-5.1	-3.0	-1.2	0.0	0.6	1.0	1.5	1.7	1.9
5000	-11.5	-9.8	-7.9	-5.7	-3.8	-2.3	-0.9	-0.2	0.1	0.9	1.6	2.0	2.4
6300	-11.5	-9.8	-7.9	-5.7	-3.8	-2.3	-0.9	-0.2	0.1	0.9	1.6	2.0	2.4
8000	-11.5	-9.8	-7.9	-5.7	-3.8	-2.3	-0.9	-0.2	0.1	0.9	1.6	2.0	2.4
10000	-11.5	-9.8	-7.9	-5.7	-3.8	-2.3	-0.9	-0.2	0.1	0.9	1.6	2.0	2.4

Anhang 4 Spektrale Standard-Belagskorrekturen für 80 km/h

Die Tabelle 10 zeigt tabellarisch die spektralen Standard-Belagskorrekturen für 80 km/h in [dB].

Die grafische Darstellung der Standard-Belagskorrekturen ist in [15], Abb. 6.20, S. 59, zu finden.

Tabelle 10

Spektrale Standard-Belagskorrekturen für 80 km/h in [dB]

Fehlende Terzbänder ergänzt (blau schattiert: Terzbänder der normierten CPX-Messung).

Frequenz [Hz]	KB-Wert [dB], 80 km/h												
	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	
50	1.5	1.6	1.6	1.5	1.4	1.5	1.7	1.9	2.1	2.7	3.5	3.8	
63	1.5	1.6	1.6	1.5	1.4	1.5	1.7	1.9	2.1	2.7	3.5	3.8	
80	1.5	1.6	1.6	1.5	1.4	1.5	1.7	1.9	2.1	2.7	3.5	3.8	
100	1.5	1.6	1.6	1.5	1.4	1.5	1.7	1.9	2.1	2.7	3.5	3.8	
125	1.5	1.6	1.6	1.5	1.4	1.5	1.7	1.9	2.1	2.7	3.5	3.8	
160	1.5	1.6	1.6	1.5	1.4	1.5	1.7	1.9	2.1	2.7	3.5	3.8	
200	1.5	1.6	1.6	1.5	1.4	1.5	1.7	1.9	2.1	2.7	3.5	3.8	
250	1.5	1.6	1.6	1.5	1.4	1.5	1.7	1.9	2.1	2.7	3.5	3.8	
315	1.5	1.6	1.6	1.5	1.4	1.5	1.7	1.9	2.1	2.7	3.5	3.8	
400	0.8	0.9	0.9	0.8	0.5	0.7	1.0	1.3	1.6	2.3	3.0	3.3	
500	0.7	0.9	0.8	0.5	-0.1	0.1	0.5	0.7	1.2	2.1	3.1	3.6	
630	0.1	0.5	0.6	0.4	-0.3	0.1	1.0	1.6	2.1	3.2	4.1	4.4	
800	-5.1	-4.2	-2.7	-1.2	-0.2	0.4	1.3	2.1	2.7	3.6	4.5	4.9	
1000	-5.1	-5.1	-4.5	-3.3	-2.2	-1.5	-0.6	0.4	1.4	2.7	4.3	5.5	
1250	-6.3	-6.2	-5.9	-4.5	-2.9	-1.8	-0.1	1.5	2.4	3.3	4.8	5.7	
1600	-6.3	-6.3	-6.1	-4.7	-2.8	-1.7	-0.6	0.3	1.1	1.5	2.2	3.0	
2000	-6.8	-6.5	-6.2	-5.0	-3.0	-1.8	0.1	1.4	2.0	2.2	2.7	3.2	
2500	-7.3	-7.0	-6.5	-5.4	-3.6	-2.7	-1.7	-0.9	-0.5	-0.4	0.6	2.0	
3150	-7.2	-6.8	-6.4	-5.4	-3.5	-2.4	-0.5	1.0	1.5	1.5	2.1	2.6	
4000	-5.9	-5.3	-4.9	-3.9	-2.2	-1.0	2.0	3.8	4.0	3.7	3.7	3.3	
5000	-5.7	-4.7	-4.2	-3.0	-1.4	-0.6	0.0	1.8	2.4	1.9	2.0	2.2	
6300	-5.7	-4.7	-4.2	-3.0	-1.4	-0.6	0.0	1.8	2.4	1.9	2.0	2.2	
8000	-5.7	-4.7	-4.2	-3.0	-1.4	-0.6	0.0	1.8	2.4	1.9	2.0	2.2	
10000	-5.7	-4.7	-4.2	-3.0	-1.4	-0.6	0.0	1.8	2.4	1.9	2.0	2.2	

Anhang 5 Zuordnung Bodenfaktor G zu Bodenbedeckung

Die Tabelle 11 ordnet jedem Bodenbedeckungstyp gemäss swissTLM^{3D}, Feature Class TLM_BODENBEDECKUNG, einen Bodenfaktor G zu. Da sich definierte Objektarten überlappen dürfen, gibt die Tabelle 11 auch für kombinierte Bodenbedeckungstypen einen Bodenfaktor G vor.

Der Bodenfaktor G («Ground factor G ») wird in der Norm ISO 9613-2, Abs. 7.3.1., S. 5 [3] definiert. Er beschreibt die Porosität des Bodens ($0.0 \leq G \leq 1.0$). Ein Wert von 0.0 bedeutet harter Boden (d. h. akustisch schallhart) und ein

Wert von 1.0 bedeutet poröser Boden. Der Bodenfaktor ist eine der Einflussgrössen zur Bestimmung des Bodeneffekts A_{gr} (vgl. Gleichung (9) in Kombination mit Tabelle 3 der Norm ISO 9613-2).

Die Zuordnung erfolgte in Anlehnung zur Tab. 3, S. 5, im Empa-Bericht *Aufbereitung von flächendeckenden Grundlagen für die Schallausbreitungsmodellierung in den Bereichen Meteorologie und Bodeneigenschaften* [25].

Tabelle 11

Zuordnung eines Bodenfaktors G zu jedem Bodenbedeckungstyp sowie zu sich überlappenden, kombinierten Bodenbedeckungstypen gemäss swissTLM^{3D} (rot markierte Bodenbedeckungstypen dürfen sich nicht überlappen)

	Fels	Fließgewässer	Gebüschwald	Lockergestein	Gletscher	stehende Gewässer	Feuchtgebiet	Wald	Wald offen
	1	5	6	7	9	10	11	12	13
1 Fels	0.0		0.0					0.7	0.7
5 Fließgewässer		0.0			0.0		0.7		
6 Gebüschwald	0.0		1.0	0.0			1.0		
7 Lockergestein			0.0	0.0	0.0		0.7		0.7
9 Gletscher		0.0		0.0	0.0	0.0			
10 stehende Gewässer					0.0	0.0	0.7		
11 Feuchtgebiet		0.7	1.0	0.7		0.7	1.0	1.0	1.0
12 Wald	0.7						1.0	1.0	
13 Wald offen	0.7			0.7			1.0		1.0

Quelle: Objektkatalog swissTLM^{3D}, Abs. 7.1, Feature Class TLM_BODENBEDECKUNG, Abb. 1, S. 46, [12]