

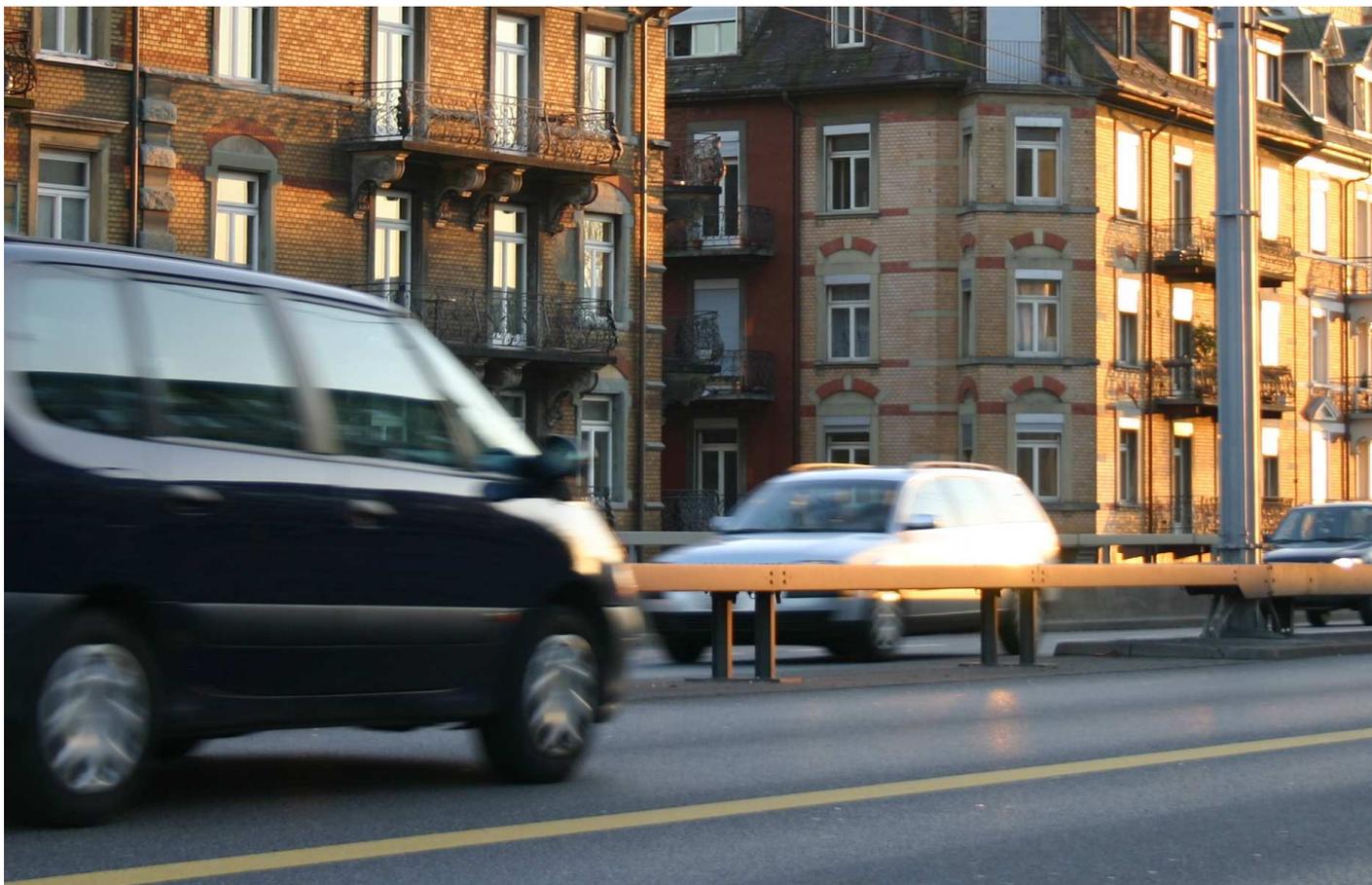
Empa
Überlandstrasse 129
CH-8600 Dübendorf
T +41 58 765 11 11
F +41 58 765 69 93
www.empa.ch



sonROAD18

Berechnungsmodell für Strassenlärm - Kurzfassung

Empa-Nr. 5214.010948
2018-07-09



Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

Impressum

Auftraggeber: Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abteilung Lärm und NIS, CH-3003 Bern

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

Auftragnehmer: Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, CH-8600 Dübendorf

Autor/Autorin: Kurt Heutschi, Barbara Locher

Begleitung BAFU: Michael Gerber

Hinweis: Dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Zitervorschlag

Heutschi K, Locher B, 2018: sonROAD18 - Berechnungsmodell für Strassenlärm - Kurzfassung.

PDF-Download

Diese auf die wichtigsten Kapitel fokussierende Kurzfassung des Schlussberichts zu sonROAD18 ist in deutscher, französischer und italienischer Sprache verfügbar und kann wie auch der vollständige, deutsche Schlussbericht auf der BAFU-Webseite (www.bafu.admin.ch) heruntergeladen werden.

Eine gedruckte Fassung kann nicht bestellt werden.

Inhaltsverzeichnis

1 Zusammenfassung	7
2 Auftrag und Projektteam	8
3 sonROAD18 Modellstruktur und -annahmen	9
3.1 Einleitung	9
3.2 Einbettung in den CNOSSOS Formalismus	9
3.3 Fahrzeugklassierung	10
3.4 Quellenhöhe - Bodeneffekt	10
4 Auswertungen der MFM-U Daten	12
5 Zusätzliche Einzelereignis- und Leq-Messungen	12
6 Vertikale Abstrahlcharakteristik	12
7 Emissionsdaten von Elektro- und Hybridfahrzeugen	12
8 Messungen zur Untersuchung der Kombinierbarkeit der Reifen- und Belagswirkung	13
9 Schätzung der Modell-Koeffizienten	13
10 Emissionsmodellformulierung sonROAD18	14
10.1 Referenzbedingungen	14
10.2 Quellenhöhe	14
10.3 Modell-Eingangsdaten	14
10.4 Fahrzeugkategorien	14
10.5 Abgestrahlte Schallleistung	16
10.6 A-Pegel Geschwindigkeitsabhängigkeit des Antriebs- und Rollgeräusches	22
10.7 Sommer- / Winterreifen	24
10.8 Stausituationen	24
10.9 Fahrzeugindividuelle Emissionsvariation	26
10.10 Schätzung des Leq _s in 1 m Abstand	26
11 SWISS10-Konverter	28
11.1 Einleitung	28
11.2 Klassierung der Strassen	28
11.3 Datenbasis	29
11.4 Auswertung	29
11.5 Verteilungs-Dichtefunktionen der zeitlichen Abstände	30
12 Validierung des Modells	32
12.1 Validierungsmessungen	32
12.2 Berechnung Mittelungspegel Leq	33
12.3 Resultate der Validierung	34

13 Modellunsicherheit	37
13.1 Modellfehler	37
13.2 Eingangsdatenfehler	37
14 Rechenbeispiele	39
15 Belagscharakterisierung mittels SPB-Messungen	40
15.1 Konzept	40
15.2 Dokumentation	40
15.3 Auswertung	41
16 Belagscharakterisierung mittels SEM-Messungen	42
16.1 Konzept	42
16.2 Dokumentation	42
16.3 Auswertung	42
17 Belagscharakterisierung mittels CPX-Messungen	44
18 Vermessen neuer Fahrzeugtypen	45
19 Anbindung an Ausbreitungsmodelle	45
20 Vergleich mit StL-86+	46
20.1 Geschwindigkeitsabhängigkeit von Personenwagenemissionen	46
20.2 Szenarienrechnungen	46
21 Schätzung des A-bewerteten maximalen Vorbeifahrtpegels	49
21.1 Ausgangslage	49
21.2 Datenanalyse	49
Literaturverzeichnis	51
A Übersicht der Anhänge des Schlussberichts	54

1 Zusammenfassung

Um den jüngsten Veränderungen des auf Strassen verkehrenden Fahrzeugparks Rechnung zu tragen sowie den Detaillierungsgrad der Quellenbeschreibung zu erhöhen, entwickelte die Empa im Auftrag des BAFU das neue Strassenlärmemissionsmodell sonROAD18. Es basiert in weiten Teilen auf dem Formalismus des Europäischen Modells CNOSSOS, verwendet aber die in der Schweiz gebräuchlichen SWISS10-Fahrzeugkategorien, ergänzt um elektrisch bzw. hybrid angetriebene Fahrzeuge. Für besondere Fahrzeugkategorien wird überdies eine Vorgehensweise zur messtechnischen Bestimmung der Modellparameter angegeben. In Abweichung zu CNOSSOS ist sonROAD18 in Terzen formuliert und berücksichtigt eine nicht-runde vertikale Abstrahlcharakteristik.

Das Modell beschreibt die akustisch abgestrahlte Leistung eines die entsprechende Kategorie repräsentierenden Fahrzeugs in Abhängigkeit der Geschwindigkeit. Als weitere die Emission beeinflussende Faktoren werden der Belag, die Strassenlängsneigung und die Lufttemperatur berücksichtigt.

Die Anpassung der Modellparameter erfolgte anhand einer grossen Stichprobe von Einzelereignismessungen an Autobahnen, ergänzt um Messungen im Geschwindigkeitsbereich von 30 bis 80 km/h. Als akustische Fahrzeugcharakterisierung wurde der Ereignispegel verwendet. Die Aufschlüsselung in Antriebs- und Rollgeräusch erfolgte automatisch im Parameteroptimierungsprozess durch Ansetzen der a priori Annahmen, dass a) die auf das Rollgeräusch anzuwendende Belagskorrektur geschwindigkeits- und fahrzeugkategorienunabhängig ist und b) das Antriebsgeräusch standortunabhängig nur durch die Geschwindigkeit und die Steigung beeinflusst ist. Die Auswertung zeigt, dass bei leichten Fahrzeugen das Reifengeräusch für Geschwindigkeiten oberhalb von 20 bis 30 km/h, bei schweren Fahrzeugen oberhalb von 40 bis 50 km/h und für Motorräder oberhalb von 60 km/h dominiert.

Die Validierung hat für die Abweichung zwischen Modell und Messung bei vollständiger Kenntnis der Eingangsgrössen eine Standardabweichung von 1.5 dB(A) ergeben. Als grösster Unsicherheitsfaktor erweist sich die Belagskorrektur, die messtechnisch untersucht innerhalb des gleichen Belagstyps Streuungen von 1 dB(A) aufweisen kann.

Die Formulierung einer Schnittstelle zu den Ausbreitungsmodellen ISO 9613-2 und sonX ermöglicht eine einfache Integration von sonROAD18 in Immissionsprognosemodelle. Für Anwendungsfälle mit fehlender Detailkenntnis der benötigten Eingangsgrössen steht ein SWISS10-Konverter zur Verfügung, der anhand des Strassentyps und des durchschnittlichen täglichen Verkehrs (DTV) tags und nachts die stündlichen Fahrzeugmengen in den SWISS10 Kategorien schätzt.

Hauptmerkmale von sonROAD18:

- Entspricht dem Stand der Technik / des Wissens
- Widerspiegelt die aktuelle Fahrzeugflotte und deren Bereifung in der Schweiz
- Wirkung von Massnahmen an der Quelle sind präziser berechenbar
- Modularer Aufbau erlaubt die Verwendung von unterschiedlichen Ausbreitungsmodellen
- Detaillierte Fahrzeugkategorisierung gemäss Standard SWISS10 und erweiterbar auf Hybrid- und Elektrofahrzeuge
- Belagskorrektur spektral und unabhängig von Geschwindigkeit und Fahrzeugkategorie
- Frequenzauflösung in Terzen zur präzisen Berücksichtigung von Ausbreitungsdämpfungen
- Erlaubt Berechnungen auf Basis von effektiv gefahrenen Geschwindigkeiten (pro Fahrzeugkategorie)
- Erlaubt die Simulation von Beschleunigungsvorgängen
- Weitgehend kompatibel zum europäischen Modell CNOSSOS

2 Auftrag und Projektteam

Mit Vertrag vom 5. Oktober 2015 beauftragte das BAFU, Abteilung Lärm und NIS die Empa, Abteilung Akustik/Lärminderung mit der Entwicklung eines neuen Strassenlärmemissionsmodells. Dieses soll die Ermittlung der akustischen Emissionen von auf schweizerischen Strassen zugelassenen Fahrzeugen im Hinblick auf eine Beurteilung gemäss der Schweizerischen Lärmschutzverordnung LSV erlauben.

Für die Modellausarbeitung und Beantwortung von Spezialfragen konnte auf einen grossen Pool von externen Daten zurückgegriffen werden. Die Kerndaten bildeten die zeitlich hochaufgelösten MFM-U Strassenlärm-Monitoringdaten aus dem Jahre 2015. Diese wurden durch Datensammlungen des ASTRA, des TCS, der Kantone Aargau, Graubünden und Zürich, der Stadt Zürich, der Ingenieurbüros Basler & Hofmann AG, Grolimund + Partner AG und IFEC ingegneria SA ergänzt und durch eigene, von der Empa durchgeführte Messungen komplettiert.

Die Projektleitung setzte sich wie folgt zusammen:

BAFU

Auftraggeber: BAFU, Urs Walker, Abt. Lärm und NIS

Projektleiter: Michael Gerber, Abt. Lärm und NIS

Empa

Projektleiter: Kurt Heutschi

Projektteam: Barbara Locher und Katja Henz

Weiterer projektintegrierter Auftragnehmer: Grolimund + Partner AG, CH-3006 Bern mit einer Datenbankauswertung jüngerer eigener SPB-Vorbeifahrtsmessungen für die Modellvalidierung.

Das BAFU hat zum Projekt eine Begleitgruppe eingesetzt, die sich aus folgenden Mitgliedern zusammensetzte:

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

Dario Bozzolo, IFEC, IFEC ingegneria SA

Andreas Catillaz, BAFU, Abt. Lärm und NIS

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

Sophie Hoehn, BAFU, Abt. Lärm und NIS

Dominique Luy, Kt. VD, Direction générale de l'environnement

Yves Pillonel, ASTRA, Standards und Sicherheit der Infrastruktur

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

Die Mitglieder der Begleitgruppe zum Projekt sonROAD18 übernahmen insbesondere die folgenden Aufgaben:

- Fachliche Begleitung im Sinne einer Qualitätssicherung
- Einbringen ihrer Erfahrungen mit bisherigen Strassenlärmmodellen
- Beratung des BAFU im Umgang mit fehlenden oder ungenügenden Grundlagendaten
- Beratung des BAFU bezüglich Anforderungen an die vorgesehenen Implementationen des sonROAD18 Modells

3 sonROAD18 Modellstruktur und -annahmen

3.1 Einleitung

Gemäss Lärmschutzverordnung LSV [1], Anhang 2, empfiehlt das Bundesamt für Umwelt (BAFU) den Vollzugsbehörden entsprechend dem Stand der Technik geeignete Berechnungsverfahren. Für die Berechnung des Strassenlärms in der Schweiz stehen im Moment die beiden Modelle StL86+ [2] sowie sonRoad [3] zur Verfügung. Das Modell StL86+ ist weit verbreitet und geniesst durch seine Einfachheit sowie durch seine relativ hohe Genauigkeit für Standardsituationen eine hohe Akzeptanz. Das von der Empa entwickelte Strassenlärmrechnungsmodell sonRoad wurde 2004 herausgegeben. Es fand in der Vollzugspraxis wenig Anwendung, da Grundlagendaten erforderlich sind, welche nicht in jedem Fall zur Verfügung standen.

Das Modell StL86+ ist bald dreissig Jahre alt und auch die Herausgabe von sonRoad liegt mittlerweile mehr als zehn Jahre zurück. Beide Modelle entsprechen nicht mehr dem Stand der Technik und des Wissens. Massnahmen an der Quelle wie Geschwindigkeitsreduktionen im niedrigen Geschwindigkeitsbereich, lärmarme Beläge und leise Reifen können nicht oder nur ungenügend in den bestehenden Strassenlärmmodellen abgebildet werden.

Das Modell sonROAD18 soll eine präzise Ermittlung der Schallemissionen von auf schweizerischen Strassen zugelassenen Fahrzeugen im Hinblick auf eine Beurteilung gemäss der Schweizerischen Lärmschutzverordnung LSV, Anhang 3, erlauben. sonROAD18 trägt der jüngsten Entwicklung der auf Schweizer Strassen verkehrenden Fahrzeugflotte sowie dem höheren Detaillierungsgrad der verfügbaren Verkehrsinformationen Rechnung.

Im direkten Vergleich zu StL-86+ weist sonROAD18 folgende Vorteile auf:

- Erweiterter Geschwindigkeits-Gültigkeitsbereich, insbesondere unterhalb von 50 km/h.
- Verfügbare Emissionswerte für sämtliche SWISS10-Fahrzeugkategorien basierend auf der aktuellen Fahrzeugflotte.
- Aufschlüsselung der Emission in eine Antriebs- und eine Rollgeräuschkomponente zur genaueren Modellierung von Steigungs- und Belagskorrekturen, insbesondere im unteren Geschwindigkeitsbereich.
- Wesentlich erweiterte Möglichkeiten für Szenarienberechnungen wie z.B. die Abschätzung der Auswirkungen von leisen Reifen oder Elektromobilität oder geänderte Geschwindigkeitslimiten für einzelne Fahrzeugkategorien.

3.2 Einbettung in den CNOSSOS Formalismus

Die Emissionsbeschreibung in sonROAD18 orientiert sich am europäischen Modell CNOSSOS [4] und verwendet als einheitliche Schnittstelle zum Ausbreitungsmodell die abgestrahlte Schallleistung eines Fahrzeuges als charakteristische Grösse. Vom CNOSSOS-Formalismus abgewichen wird:

- Bei der Fahrzeugkategorienbildung, indem sonROAD18 auf SWISS10-Kategorien abstützt. Damit wird der Anschluss an die von den automatischen Verkehrszählern erhobenen Daten ermöglicht.
- In der spektralen Darstellung, indem sonROAD18 Terzbandauflösung annimmt. Damit wird eine Schnittstelle zu Ausbreitungsmodellen, die auf einer Terzbandformulierung basieren, ermöglicht.
- Bei der Abstrahlcharakteristik, indem sonROAD18 in der Vertikalen eine nicht-runde Richtwirkung annimmt. Damit wird ein systematisches Phänomen berücksichtigt, das zu relevanten Immissionsveränderungen in Zusammenhang mit strassennahen Lärmschutzbauten oder hochliegenden Empfängern führt.

- In der Formulierung des Belageffekts, indem sonROAD18 die Belagskorrektur nur auf das Rollgeräusch anwendet und diese für alle Fahrzeugkategorien identisch und geschwindigkeitsunabhängig ansetzt. Damit wird eine Vereinfachung erreicht, die im Rahmen der grundsätzlich erzielbaren Prognosegenauigkeit keine nennenswerten Auswirkungen hat.
- Bei der Festlegung der Referenztemperatur, die in sonROAD18 zu 10°C angenommen wird. Dies entspricht im Mittelland ungefähr dem Jahresmittelwert¹, sodass für jahresdurchschnittliche Berechnungen keine Temperaturkorrektur vorgenommen werden muss.
- Bei der Beschleunigungskorrektur im Nahbereich von ampelgesteuerten Kreuzungen oder Kreiseln. Die in CNOSSOS verwendete Korrektur wird in sonROAD18 weggelassen, bzw. für spezielle Anwendungen durch eine Simulation des Beschleunigungsvorgangs durch Zurückführen auf eine äquivalente Steigung ersetzt.

3.3 Fahrzeugklassierung

Die in der Schweiz verkehrenden und in einer Strassenlärmrechnung zu berücksichtigenden Strassenfahrzeuge werden nach Möglichkeit anhand des SWISS10-Klassierungsschemas [5], ergänzt um alternative Antriebssysteme, kategorisiert.

SWISS10-Kat.	Beschreibung	CNOSSOS Kl.	Beschreibung
1	Busse	3	schwere Fahrzeuge
1b	Busse mit Hybrid/Elektroantrieb		
2	Motorräder	4b	Motorräder
3	Personenwagen	1	leichte Fahrzeuge
3b	Personenwagen mit Hybridantrieb		
3c	Personenwagen mit Elektroantrieb		
4	Personenwagen mit Anhänger	1	leichte Fahrzeuge
5	Lieferwagen bis 3.5t	1	leichte Fahrzeuge
6	Lieferwagen bis 3.5t mit Anhänger	1	leichte Fahrzeuge
7	Lieferwagen bis 3.5t mit Auflieger	1	leichte Fahrzeuge
8	Lastwagen	3	schwere Fahrzeuge
9	Lastenzüge	3	schwere Fahrzeuge
10	Sattelzüge	3	schwere Fahrzeuge
11	Lastwagen mit Elektroantrieb		

Tabelle 3.1: SWISS10-Kategorien (erweitert) und entsprechende CNOSSOS Klassen.

Die Emission von Trams als schienengebundene Fahrzeuge wird nicht in sonROAD18 aber in sonTRAM spezifiziert.

3.4 Quellenhöhe - Bodeneffekt

CNOSSOS modelliert sämtliche Fahrzeuge unabhängig von der Fahrzeugkategorie als konzentrierte Punktquellen auf einer Höhe von 0.05m über der Strassenoberfläche. Bei einer entsprechenden Berechnung des Interferenzmusters zwischen Direkt- und bodenreflektiertem Schall resultiert in der Referenzgeometrie bei einem Abstand zur Fahrspurmitte von 7.5 m und einer Messpunkthöhe von 1.2 m ein Bodeneffekt, der bis zu hohen Frequenzen verstärkend ist. Durch Vergrössern der Empfängerhöhe verschiebt sich jedoch das erste Interferenzminimum gegen tiefere Frequenzen, sodass im Nahbereich der Bodeneffekt zu einer relativ starken Abhängigkeit der Immission von der Geometrie führt (Abbildung 3.1).

Die Tabelle 3.2 zeigt die pegelerhöhende Wirkung durch den Bodeneffekt einer ganzen Vorbeifahrt in verschiedenen Geometrien. Dazu wurde ein Quellspektrum für PW bei 80 km/h gemäss CNOSSOS unter Referenzbedingungen angenommen.

¹Jahresmittelwert für 2017 für die nördliche Schweiz (Alpennordseite) unter 1000 m ü. M.: 9.7 °C, Quelle: Meteoschweiz, Begert M, Frei C. Area-mean temperatures of Switzerland. DOI: 10.18751/Climate/Timeseries/CHTM/1.0, 10.02.2018.

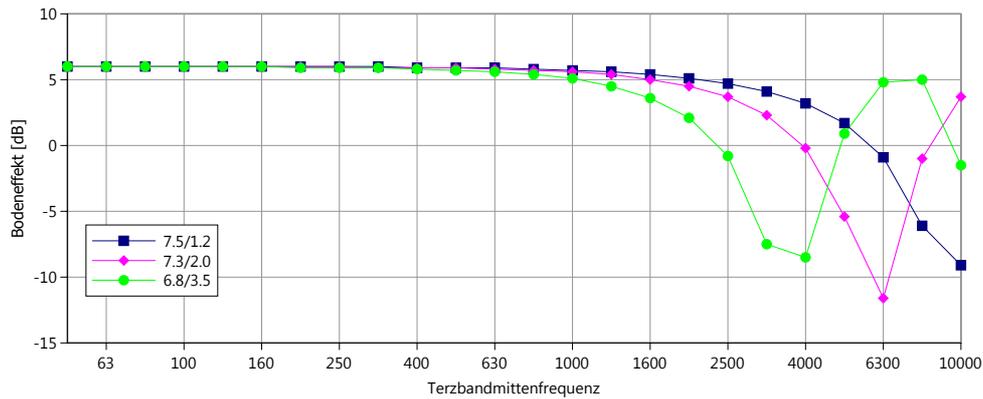


Abbildung 3.1: Resultierendes Bodeneffektspektrum für eine Punktquelle 0.05 m über hartem Boden auf verschiedenen Empfängerhöhen bei konstant gehaltenem Abstand.

h_q	h_m	d_h	d	D_{gr}
0.05	1.2 m	7.5 m	7.6 m	5.4 dB(A)
0.05	2.0 m	7.3 m	7.6 m	5.0 dB(A)
0.05	3.5 m	6.8 m	7.6 m	3.9 dB(A)
0.05	5.0 m	5.7 m	7.6 m	2.6 dB(A)
0.45	1.2 m	7.5 m	7.6 m	1.3 dB(A)

Tabelle 3.2: Bodeneffekt D_{gr} in dB(A) für eine ganze Vorbeifahrt einer omnidirektionalen Punktquelle auf einer Höhe h_q von 0.05 m bzw. 0.45 m (sonRoad [3]) und verschiedenen Mikrofonhöhen h_m und unterschiedlichen horizontalen Abständen d_h , entsprechend der effektiven Distanz $d = 7.6$ m.

Um die in Tabelle 3.2 gefundene starke Geometrieabhängigkeit auszuschalten, wurde festgelegt, die Wirkung der Reflexionen an der Strassenoberfläche pauschal und frequenzunabhängig zu berücksichtigen und damit der Quellendefinition von CNOSSOS, d.h. der Annahme einer *Punktquelle auf 0.05 m und Halbfreifeldbedingungen* zu folgen. Dies ist gleichwertig mit der Annahme eines Bodeneffekts von +3 dB und muss bei der Formulierung der Schnittstelle zu einem Ausbreitungsmodell entsprechend berücksichtigt werden.

4 Auswertungen der MFM-U Daten

Dokumentation der für die Modellentwicklung verwendeten Basisdaten, die an den MFM-U Standorten Camignolo, Moleno, Reiden und Rothenbrunnen erhoben wurden sowie Beschreibung der Auswertestrategie zur Ermittlung der Einzelfahrzeugeignisenergie und daraus abgeleitet der akustisch abgestrahlten Schallleistung. Für weitergehende Ausführungen siehe den vollständigen Schlussbericht zu sonROAD18.

5 Zusätzliche Einzelereignis- und Leq-Messungen

Beschreibung ergänzender, durch die Empa ausgeführte Strassenlärmemissionsmessungen im tieferen und mittleren Geschwindigkeitsbereich für die Anpassung der Modellparameter sowie die Validierung. Für weitergehende Ausführungen siehe den vollständigen Schlussbericht zu sonROAD18.

6 Vertikale Abstrahlcharakteristik

Dokumentation von durch die Empa ausgeführten Messungen zur Untersuchung der vertikalen Abstrahlcharakteristik von Strassenfahrzeugen sowie Herleitung eines funktionalen Zusammenhangs zur Beschreibung der frequenzabhängigen Pegelabnahme mit zunehmendem Elevationswinkel. Für weitergehende Ausführungen siehe den vollständigen Schlussbericht zu sonROAD18.

7 Emissionsdaten von Elektro- und Hybridfahrzeugen

Literaturstudie zur akustischen Emission von Elektrofahrzeugen sowie Zusammenfassung von Ergebnissen einer Umfrage bei Autoherstellern/Importeuren zur allfälligen Besonderheit der Erstbereifung von elektrisch angetriebenen Personewagen. Für weitergehende Ausführungen siehe den vollständigen Schlussbericht zu sonROAD18.

8 Messungen zur Untersuchung der Kombinierbarkeit der Reifen- und Belagswirkung

Beschreibung und Auswertung von durch die Empa ausgeführten Messungen auf vier verschiedenen Belägen mit identischem Fahrzeug aber vier verschiedenen Reifentypen zur Klärung der Frage der Kumulierbarkeit der pegelmindernden Wirkung von lärmarmen Belägen und leisen Reifen. Für weitergehende Ausführungen siehe den vollständigen Schlussbericht zu sonROAD18.

9 Schätzung der Modell-Koeffizienten

Darstellung der getroffenen Annahmen und der Anpassstrategie zur Bestimmung der Modellkoeffizienten sowie Auflistung der dazu verwendeten Messkampagnen. Für weitergehende Ausführungen siehe den vollständigen Schlussbericht zu sonROAD18.

10 Emissionsmodellformulierung sonROAD18

Dieses Kapitel nimmt die in Kapitel 3 getroffenen Annahmen auf und beschreibt das sonROAD18 Emissionsmodell inklusive Parametersetting vollständig.

10.1 Referenzbedingungen

sonROAD18 geht von folgenden Referenzbedingungen aus:

- trockene, horizontale Fahrbahn mit einem ACMR8 bzw. SDA8-12 Belag
- Lufttemperatur von 10°
- konstante Fahrzeuggeschwindigkeit von 70 km/h
- zur Zeit der Modellentwicklung typische Bereifung der Fahrzeuge

10.2 Quellenhöhe

Die Quellenhöhe wird für alle Fahrzeugkategorien und Geräuschanteile auf 0.05 m über der Strassenoberfläche festgelegt.

10.3 Modell-Eingangsdaten

Eine Strassenlärm-Emissionsberechnung erfordert pro Fahrspur bzw. pro Fahrtrichtung Kenntnis

- der durchschnittlichen stündlichen Verkehrsmengen $N[c]$ in sämtlichen SWISS10-Fahrzeugkategorien c
- der Geschwindigkeiten $v[c]$ in sämtlichen SWISS10-Fahrzeugkategorien, wobei der Gültigkeitsbereich des Modells auf $20 \text{ km/h} \leq v \leq 130 \text{ km/h}$ eingeschränkt ist
- des Belagstyps bzw. des spektralen Belagseinflusses $\Delta L_{W,R,road}[i]$
- der Strassenlängsneigung (vorzeichenabhängig)
- der Lufttemperatur

In Fällen, in welchen keine detaillierten Angaben zu den fahrzeugklassenspezifischen Verkehrsmengen zur Verfügung stehen, können diese Eingangsdaten mittels eines SWISS10-Konverters (Kapitel 11) geschätzt werden.

Das Modell bietet überdies die Möglichkeit, eine reifenspezifische und belagsabhängige Rollgeräuschkorrektur zu berücksichtigen. Zurzeit fehlen Angaben dazu, dies wird zu einem späteren Zeitpunkt ergänzt.

10.4 Fahrzeugkategorien

Zur Charakterisierung der auf einer Strasse verkehrenden Fahrzeuge wird das in Tabelle 10.1 gezeigte Kategorienraster c vorgegeben. Es basiert auf SWISS-10 gemäss [5] und ist um vier Kategorien mit besonderen Antriebssystemen erweitert worden.

Für sämtliche, zum Zeitpunkt der Modellentwicklung verbreitete und akustisch relevante Fahrzeugkategorien wurden die Modellkoeffizienten A und B bestimmt. Es gilt festzuhalten, dass die Kategorie 1 (Busse) primär

Reiseautos repräsentiert. Für die Festlegung der Modellkoeffizienten von Fahrzeugen von städtischen Verkehrsbetrieben sowie der Kategorien 1b, 3b, 3c und 11 und weiterer exklusiver Fahrzeugkategorien sei auf das Kapitel 18 verwiesen.

SWISS10-Kat. <i>c</i>	Beschreibung
1	Busse
1b	Busse mit Hybrid/Elektroantrieb
2	Motorräder
3	Personenwagen
3b	Personenwagen mit Hybridantrieb
3c	Personenwagen mit Elektroantrieb
4	Personenwagen mit Anhänger
5	Lieferwagen bis 3.5t
6	Lieferwagen bis 3.5t mit Anhänger
7	Lieferwagen bis 3.5t mit Auflieger
8	Lastwagen
9	Lastenzüge
10	Sattelzüge
11	Lastwagen mit Elektroantrieb

Tabelle 10.1: SWISS10-Kategorien (erweitert).

10.5 Abgestrahlte Schalleistung

10.5.1 Totalgeräusch

Die von einem Fahrzeug der Kategorie c in der Terz mit Index i akustisch abgestrahlte Leistung $L_W[c, i]$ unter Annahme einer Berücksichtigung der quellennahen Bodenreflexion von +3 dB in der Ausbreitungsrechnung bildet sich aus der energetischen Summe der Antriebs- ($L_{W,P}[c, i]$) und Rollgeräuschkomponente ($L_{W,R}[c, i]$) und einer Korrektur für die vertikale Abstrahlcharakteristik $\Delta L_{W,\theta}[c, i]$:

$$L_W[c, i] = 10 \lg (10^{0.1L_{W,P}[c, i]} + 10^{0.1L_{W,R}[c, i]}) + \Delta L_{W,\theta}[c, i] \quad (10.1)$$

Der Abstrahlcharakteristik-Term $\Delta L_{W,\theta}[c, i]$ entspricht

$$\Delta L_{W,\theta}[c, f] = D_1[c] \sin(\theta)^3 \cdot (\lg(f) + D_2[c])^3 \quad (10.2)$$

wobei f für die Mittenfrequenz des Terzbandes i steht und die Parameter $D_1[c]$ und $D_2[c]$ fahrzeugkategorienabhängig gemäss Tabelle 10.2 gegeben sind. Man beachte, dass θ den Elevationswinkel im lotrechten Abstand bezeichnet und bei der Integration über eine Vorbeifahrt als konstant anzunehmen ist.

SWISS10-Kat. c	$D_1[c]$	$D_2[c]$
1	-0.04	1.6
1b	-0.04	1.6
2	0.0	0.0
3	-0.11	0.0
3b	-0.11	0.0
3c	-0.11	0.0
4	-0.11	0.0
5	-0.11	0.0
6	-0.11	0.0
7	-0.11	0.0
8	-0.04	1.6
9	-0.04	1.6
10	-0.04	1.6
11	-0.04	1.6

Tabelle 10.2: D_1 und D_2 Parameter für die Berechnung der vertikalen Abstrahlcharakteristik.

10.5.2 Antriebsgeräusch

Der Schallleistungspegel des Antriebsgeräusches ist gegeben als:

$$L_{W,P}[c, i] = A_P[c, i] + B_P[c, i] \frac{v[c] - v_{\text{ref}}}{v_{\text{ref}}} + \Delta L_{W,P,\text{grad}}[c] \quad (10.3)$$

wobei $v[c]$ die Geschwindigkeit ist mit $v_{\text{ref}} = 70$ km/h und die Parameter A_P (konstanter Anteil) und B_P (Geschwindigkeitsabhängigkeit) gemäss Tabelle 10.3 und 10.4 gesetzt werden.

freq	cat1	cat2	cat3	cat4	cat5	cat6	cat7	cat8	cat9	cat10
50	99.5	99.1	91.0	91.0	95.5	92.0	92.0	100.6	101.2	99.7
63	98.0	100.6	87.5	87.5	96.5	92.0	92.0	102.2	106.6	106.2
80	96.0	102.2	86.5	86.5	89.5	92.0	92.0	99.7	102.7	101.2
100	94.5	102.2	84.5	84.5	86.0	91.7	91.7	97.6	97.5	96.2
125	99.0	103.8	83.0	83.0	85.0	91.7	91.7	97.0	99.2	98.0
160	90.0	100.6	83.5	83.5	86.0	91.7	91.7	95.9	95.7	95.7
200	86.5	95.9	82.5	82.5	85.0	91.0	91.0	93.9	93.7	91.4
250	95.5	89.7	83.0	83.0	85.0	91.0	91.0	96.0	96.0	93.8
315	95.0	85.0	82.5	82.5	85.0	91.0	91.0	97.6	97.6	96.5
400	96.5	86.6	81.0	81.0	85.0	91.0	91.0	96.0	96.0	97.4
500	92.0	86.6	81.0	81.0	83.5	91.0	91.0	98.0	98.0	99.1
630	91.0	88.1	83.5	83.5	82.5	91.0	91.0	97.4	97.4	96.2
800	92.0	88.1	82.5	82.5	89.0	93.8	93.8	95.6	95.6	95.9
1000	93.5	85.0	79.0	79.0	85.0	93.8	93.8	89.1	89.1	92.0
1250	87.5	85.0	74.0	74.0	80.5	93.8	93.8	86.0	86.0	90.0
1600	85.0	85.0	72.0	72.0	76.0	90.4	90.4	89.5	89.5	88.3
2000	82.0	83.4	73.5	73.5	79.5	90.4	90.4	90.1	90.1	86.3
2500	83.0	83.4	72.5	72.5	80.5	90.4	90.4	88.3	88.3	85.7
3150	81.5	83.4	73.0	73.0	80.0	84.0	84.0	86.0	86.0	85.2
4000	82.0	83.4	70.0	70.0	78.5	84.0	84.0	84.4	84.4	82.6
5000	79.5	83.4	66.5	66.5	77.0	84.0	84.0	83.4	83.4	77.9
6300	77.0	81.9	64.5	64.5	73.5	77.9	77.9	81.5	81.5	67.1
8000	76.5	80.3	60.5	60.5	70.0	77.9	77.9	79.4	79.4	60.0
10000	60.0	80.3	60.0	60.0	68.0	77.9	77.9	77.8	77.8	60.0

Tabelle 10.3: Spektrale A_P Parameter der Antriebsgeräuschkomponente für die SWISS10 Kategorien 1 bis 10.

$\Delta L_{W,P,\text{grad}}[c]$ ist eine frequenzunabhängige Steigungskorrektur für eine Strassenlängsneigung s mit

$$c = 3, 4, 5, 6, 7 \quad \rightarrow \quad \Delta L_{W,P,\text{grad}}[c] = \begin{cases} \frac{\min(12\%; -s) - 6\%}{1\%} & : s < -6\% \\ 0 & : -6\% \leq s \leq 2\% \\ \frac{\min(12\%; s) - 2\%}{1.5\%} \cdot \frac{v}{100} & : s > 2\% \end{cases} \quad (10.4)$$

$$c = 1, 8, 9, 10 \quad \rightarrow \quad \Delta L_{W,P,\text{grad}}[c] = \begin{cases} \frac{\min(12\%; -s) - 4\%}{0.5\%} \cdot \frac{v-10}{100} & : s < -4\% \\ 0 & : -4\% \leq s \leq 0\% \\ \frac{\min(12\%; s)}{0.8\%} \cdot \frac{v}{100} & : s > 0\% \end{cases} \quad (10.5)$$

$$c = 2 \quad \rightarrow \quad \Delta L_{W,P,\text{grad}}[c] = 0 \quad (10.6)$$

Da sich Steigungen bei der Aufwärts- (positive s) und bei der Abwärts- (negative s)-Fahrt unterschiedlich auswirken, ist in einer typischen Prognose der Verkehr hälftig auf die beiden Richtungen aufzuteilen und separat zu berechnen.

freq	cat1	cat2	cat3	cat4	cat5	cat6	cat7	cat8	cat9	cat10
50	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0
63	0.0	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0
80	0.0	3.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0
100	3.0	3.5	7.2	7.2	4.7	4.7	4.7	3.0	3.0	3.0
125	3.0	3.5	7.2	7.2	4.7	4.7	4.7	3.0	3.0	3.0
160	3.0	7.8	7.2	7.2	4.7	4.7	4.7	3.0	3.0	3.0
200	4.6	9.7	7.7	7.7	6.4	6.4	6.4	4.6	4.6	4.6
250	4.6	9.0	7.7	7.7	6.4	6.4	6.4	4.6	4.6	4.6
315	4.6	9.0	7.7	7.7	6.4	6.4	6.4	4.6	4.6	4.6
400	5.0	9.0	8.0	8.0	6.5	6.5	6.5	5.0	5.0	5.0
500	5.0	7.8	8.0	8.0	6.5	6.5	6.5	5.0	5.0	5.0
630	5.0	8.3	8.0	8.0	6.5	6.5	6.5	5.0	5.0	5.0
800	5.0	9.7	8.0	8.0	6.5	6.5	6.5	5.0	5.0	5.0
1000	5.0	9.7	8.0	8.0	6.5	6.5	6.5	5.0	5.0	5.0
1250	5.0	9.4	8.0	8.0	6.5	6.5	6.5	5.0	5.0	5.0
1600	5.0	7.8	8.0	8.0	6.5	6.5	6.5	5.0	5.0	5.0
2000	5.0	8.9	8.0	8.0	6.5	6.5	6.5	5.0	5.0	5.0
2500	5.0	9.7	8.0	8.0	6.5	6.5	6.5	5.0	5.0	5.0
3150	5.0	9.7	8.0	8.0	6.5	6.5	6.5	5.0	5.0	5.0
4000	5.0	9.2	8.0	8.0	6.5	6.5	6.5	5.0	5.0	5.0
5000	5.0	8.3	8.0	8.0	6.5	6.5	6.5	5.0	5.0	5.0
6300	5.0	9.7	8.0	8.0	6.5	6.5	6.5	5.0	5.0	5.0
8000	5.0	9.7	8.0	8.0	6.5	6.5	6.5	5.0	5.0	5.0
10000	5.0	9.7	8.0	8.0	6.5	6.5	6.5	5.0	5.0	5.0

Tabelle 10.4: Spektrale B_P Parameter der Antriebsgeräuschkomponente für die SWISS10 Kategorien 1 bis 10.

10.5.3 Rollgeräusch

Der Schallleistungspegel des Rollgeräusches ist gegeben als:

$$L_{W,R}[c, i] = A_R[c, i] + B_R[c, i] \lg\left(\frac{v[c]}{v_{\text{ref}}}\right) + \Delta L_{W,R,\text{road}}[i] + \Delta L_{W,R,\text{temp}}[c] + \Delta L_{W,R,\text{tire}}[c, \text{Belag}] \quad (10.7)$$

wobei $v[c]$ die Geschwindigkeit ist mit $v_{\text{ref}} = 70$ km/h und die Parameter A_R (konstanter Anteil) und B_R (Geschwindigkeitsabhängigkeit) gemäss Tabelle 10.5 und 10.6 gesetzt werden.

freq	cat1	cat2	cat3	cat4	cat5	cat6	cat7	cat8	cat9	cat10
50	83.9	84.0	85.5	90.0	87.0	92.6	93.8	87.8	92.6	92.6
63	97.2	93.4	90.5	95.8	89.0	96.4	101.9	90.0	91.8	91.8
80	96.9	93.4	90.5	93.5	91.5	94.9	99.6	90.0	90.7	90.7
100	94.3	90.2	88.4	91.1	88.4	91.3	93.8	89.9	91.8	91.8
125	82.3	88.7	86.5	90.4	90.0	89.4	94.8	90.4	92.5	92.5
160	93.8	85.5	84.9	88.5	89.4	85.7	93.4	91.6	92.2	92.2
200	98.8	93.2	85.3	88.6	88.8	86.0	93.6	92.9	94.2	94.2
250	91.9	93.4	86.0	89.9	89.0	86.1	95.1	91.8	90.9	90.9
315	86.4	91.8	86.0	89.7	88.0	89.5	101.5	97.6	91.3	91.3
400	90.2	90.4	86.6	90.2	87.6	92.2	100.8	99.1	97.2	97.2
500	96.1	88.9	87.2	90.9	89.7	94.0	101.7	98.3	97.8	97.8
630	97.1	87.3	88.2	94.2	91.7	96.2	104.0	101.9	101.4	101.4
800	98.6	87.6	92.5	98.0	94.5	98.9	104.9	103.3	104.4	104.4
1000	97.1	89.2	95.0	97.9	97.0	97.7	102.3	102.1	102.3	102.3
1250	96.1	90.8	94.0	96.9	95.0	97.0	100.0	100.6	100.3	100.3
1600	94.5	89.0	92.3	96.2	93.3	96.6	98.2	98.4	98.3	98.3
2000	92.6	88.9	90.7	93.9	90.7	93.6	95.4	95.7	95.7	95.7
2500	89.8	87.0	87.4	90.7	87.4	89.3	91.4	92.0	92.9	92.9
3150	86.6	85.2	84.1	87.5	84.1	87.8	89.5	89.4	89.9	89.9
4000	83.6	83.0	81.0	84.3	81.0	84.0	86.3	87.1	87.6	87.6
5000	81.5	80.9	77.5	81.1	77.5	79.7	82.3	82.7	84.9	84.9
6300	80.7	79.1	74.7	79.6	76.7	80.5	82.2	80.9	83.7	83.7
8000	79.7	78.8	72.4	78.6	75.4	79.2	81.1	79.1	82.5	82.5
10000	78.4	75.4	69.6	76.3	73.1	76.7	79.4	77.1	80.6	80.6

Tabelle 10.5: Spektrale A_R Parameter der Rollgeräuschkomponente für die SWISS10 Kategorien 1 bis 10.

$\Delta L_{W,R,\text{road}}[i]$ bezeichnet den spektralen Belagseinfluss¹. Für eine messtechnische Charakterisierung der Belageigenschaften stehen die drei Methoden SPB (Kapitel 15), SEM (Kapitel 16) und CPX (Kapitel 17) im Vordergrund. Bei fehlendem Belagskorrekturspektrum kann behelfsmässig ein Einzahlwert eingesetzt werden. Für den Referenzbelag ACMR8 bzw. SDA8-12 gilt $\Delta L_{W,R,\text{road}}[i] = 0$.

$\Delta L_{W,R,\text{temp}}[c]$ beschreibt für die Lufttemperatur τ in Grad Celsius mit dem Koeffizienten $K[c]$ gemäss Tabelle 10.7 die Temperaturabhängigkeit des Rollgeräusches entsprechend

$$\Delta L_{W,R,\text{temp}}[c] = K[c] \cdot (10 - \tau) \quad (10.8)$$

$\Delta L_{W,R,\text{tire}}[c, \text{Belag}]$ ist eine Korrektur zur Berücksichtigung eines vom Durchschnitt abweichenden Reifentyps und geeignet, um das Modell in Zukunft an eine sich gewandelte, durchschnittliche Bereifung des gesamtschweizerischen Fahrzeugparks anzupassen. Im Weiteren erlaubt dies, bezüglich Bereifung des Fahrzeugparks verschiedene Szenarien zu rechnen. Diese Korrektur ist abhängig von der Fahrzeugkategorie c und vom Belag, da sich der Reifeneinfluss nicht unabhängig vom Belag spezifizieren lässt (siehe Kapitel 8). Hierzu muss folglich eine verlässliche Grundlage zur Lärmklassifizierung von Reifen vorhanden sein oder es muss ein separates,

¹Die in der Modellentwicklung und Validierung verwendeten Werte sind im Kapitel 9 gezeigt.

freq	cat1	cat2	cat3	cat4	cat5	cat6	cat7	cat8	cat9	cat10
50	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0
63	38.1	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	40.0	40.0	40.0
80	40.0	25.0	27.3	27.3	27.0	27.0	27.0	40.0	40.0	40.0
100	40.0	25.0	29.5	29.5	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0
125	25.0	25.5	36.5	36.5	30.0	30.0	30.0	25.0	25.0	25.0
160	32.0	25.0	36.4	36.4	28.0	28.0	28.0	25.0	25.0	25.0
200	25.0	25.0	32.0	32.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0
250	25.0	37.2	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	34.0	25.0	25.0
315	40.0	37.7	25.0	25.0	28.9	28.9	28.9	40.0	40.0	40.0
400	40.0	38.1	25.3	25.3	25.1	25.1	25.1	40.0	40.0	40.0
500	40.0	35.3	26.6	26.6	25.0	25.0	25.0	40.0	40.0	40.0
630	40.0	35.3	32.0	32.0	25.0	25.0	25.0	40.0	40.0	40.0
800	40.0	37.7	31.0	31.0	28.9	28.9	28.9	40.0	40.0	40.0
1000	40.0	38.6	33.1	33.1	30.5	30.5	30.5	28.8	40.0	40.0
1250	39.6	35.3	38.7	38.7	34.0	34.0	34.0	27.5	40.0	40.0
1600	40.0	36.7	39.5	39.5	35.8	35.8	35.8	27.7	40.0	40.0
2000	38.9	33.0	39.8	39.8	39.3	39.3	39.3	32.0	40.0	40.0
2500	37.3	30.6	39.8	39.8	39.8	39.8	39.8	40.0	40.0	40.0
3150	39.3	26.9	39.8	39.8	39.8	39.8	39.8	36.0	40.0	40.0
4000	40.0	25.0	38.0	38.0	39.8	39.8	39.8	31.2	40.0	40.0
5000	39.4	25.0	36.8	36.8	39.8	39.8	39.8	40.0	40.0	40.0
6300	40.0	25.5	39.8	39.8	39.8	39.8	39.8	40.0	40.0	40.0
8000	40.0	25.0	39.8	39.8	39.8	39.8	39.8	40.0	40.0	40.0
10000	40.0	29.7	39.8	39.8	39.8	39.8	39.8	40.0	40.0	40.0

Tabelle 10.6: Spektrale B_R Parameter der Rollgeräuschkomponente für die SWISS10 Kategorien 1 bis 10.

SWISS10-Kat. c	$K[c]$
1	0.04
1b	0.04
2	0
3	0.08
3b	0.08
3c	0.08
4	0.08
5	0.08
6	0.08
7	0.08
8	0.04
9	0.04
10	0.04
11	0.04

Tabelle 10.7: Parameter K für die Temperaturkorrektur des Rollgeräusches.

neuartiges 'Reifen-Modell' entwickelt werden, welches aus den relevanten Eingangsgrößen wie beispielsweise *Reifenbreite und -radius, Profilierung, akustischer Belagsgüte* sowie *Gummi-Härte* die typische Lärmemission des Reifens bestimmt.

10.5.4 A-Pegel Berechnungen

Für A-Pegel Berechnungen sind die oben ermittelten Spektren mit der A-Bewertung zu gewichten und energetisch aufzusummieren. Dazu werden die in Tabelle 10.8 dargestellten Verstärkungswerte angenommen. Sie wurden für jede Terz aus der A-Filterkurve² als Mittelwert über 11 geometrisch verteilte Frequenzpunkte gewonnen. Man beachte, dass sich dadurch geringe Unterschiede gegenüber den A-Bewertungen bei den Terzfiltermittenfrequenzen ergeben können.

50 Hz	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz
-30.3	-26.3	-22.6	-19.2	-16.1	-13.4	-10.9	-8.6
315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz
-6.6	-4.8	-3.2	-1.9	-0.8	0.0	0.6	1.0
2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz	8000 Hz	10000 Hz
1.2	1.3	1.2	1.0	0.5	-0.2	-1.2	-2.5

Tabelle 10.8: A-Bewertung für Terzbänder in dB. Positive Werte entsprechen einer Verstärkung, negative Werte einer Abschwächung.

²IEC 61672-1 Electroacoustics - Sound level meters - Part 1: Specifications (2013).

10.6 A-Pegel Geschwindigkeitsabhängigkeit des Antriebs- und Rollgeräusches

Die Abbildungen 10.1 bis 10.5 zeigen unter Referenzbedingungen (konstante Fahrweise auf horizontaler Strasse mit einem ACMR8 bzw. SDA8-12 Referenzbelag bei 10°C Lufttemperatur) für ein Fahrzeug die geschwindigkeitsabhängige Aufteilung der Antriebs- und Rollgeräuschkomponente in den Fahrzeugkategorien mit verfügbaren Daten. Die Tabelle 10.9 stellt die Geschwindigkeiten zusammen für welche beide Komponenten gleich bedeutend sind.

cat 1	cat 2	cat 3	cat 4	cat 5	cat 6	cat 7	cat 8	cat 9	cat 10
48	58	22	< 20	27	47	27	39	43	43

Tabelle 10.9: Geschwindigkeiten in km/h für gleich grosse Antriebs- und Rollgeräuschanteile unter Referenzbedingungen.

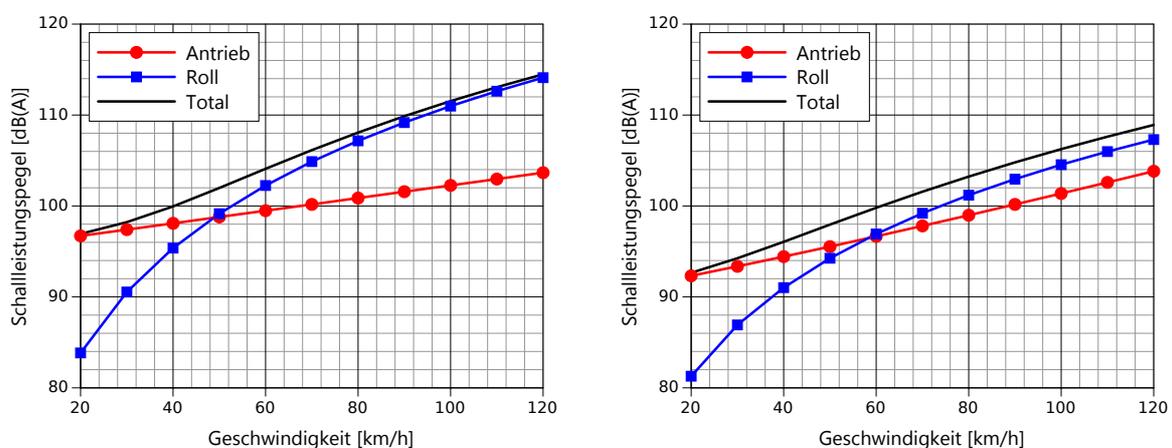


Abbildung 10.1: Geschwindigkeitsabhängigkeiten der Antriebs- und Rollgeräusch-Komponente sowie Total der A-bewerteten Schallleistung für die SWISS10 Kategorie 1 (links) und 2 (rechts).

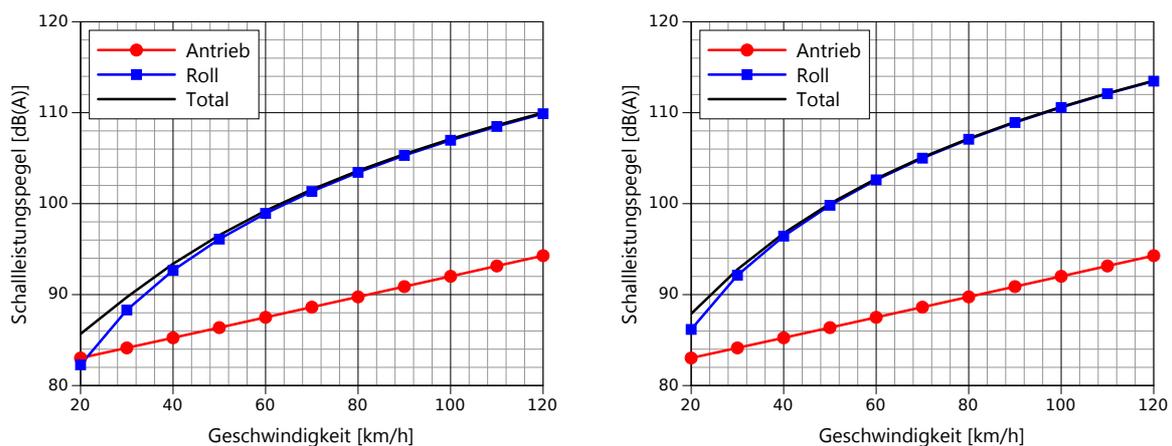


Abbildung 10.2: Geschwindigkeitsabhängigkeiten der Antriebs- und Rollgeräusch-Komponente sowie Total der A-bewerteten Schallleistung für die SWISS10-Kategorie 3 (links) und 4 (rechts).

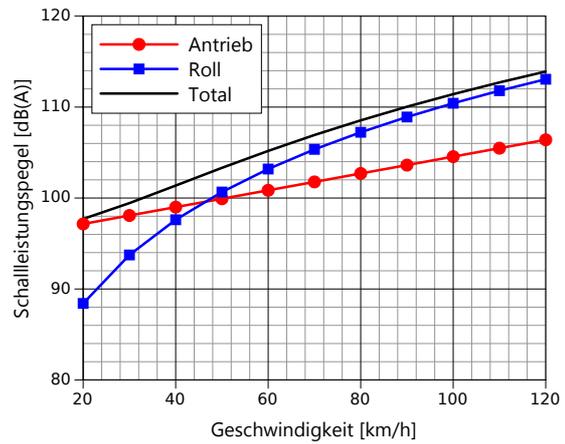
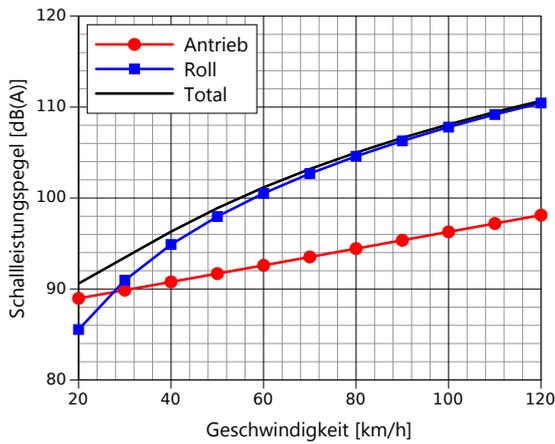


Abbildung 10.3: Geschwindigkeitsabhängigkeiten der Antriebs- und Rollgeräusch-Komponente sowie Total der A-bewerteten Schalleistung für die SWISS10-Kategorie 5 (links) und 6 (rechts).

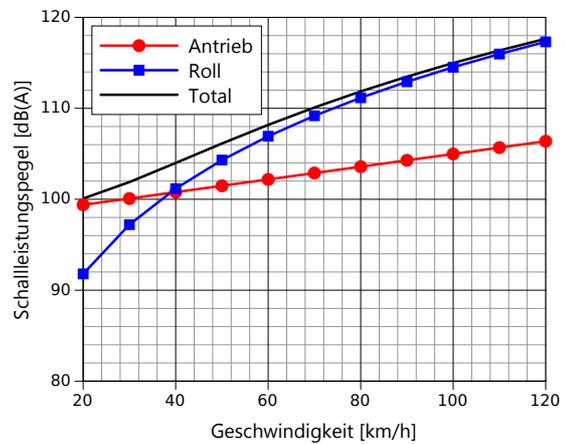
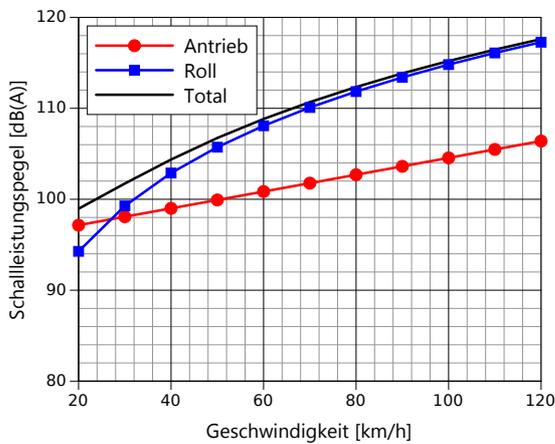


Abbildung 10.4: Geschwindigkeitsabhängigkeiten der Antriebs- und Rollgeräusch-Komponente sowie Total der A-bewerteten Schalleistung für die SWISS10-Kategorie 7 (links) und 8 (rechts).

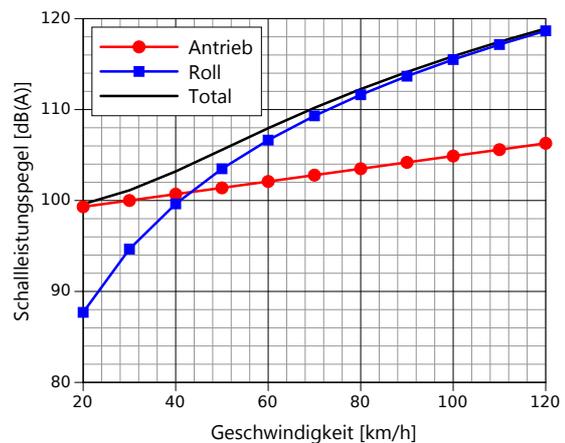
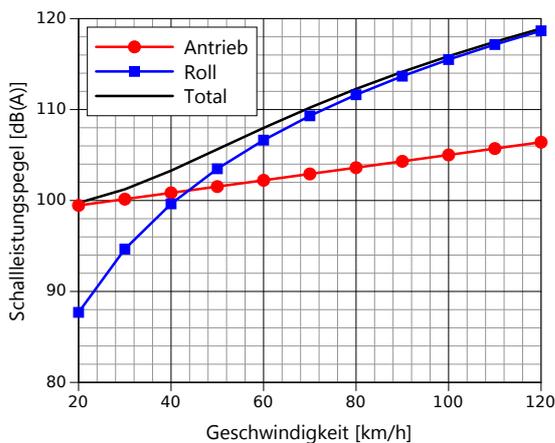


Abbildung 10.5: Geschwindigkeitsabhängigkeiten der Antriebs- und Rollgeräusch-Komponente sowie Total der A-bewerteten Schalleistung für die SWISS10-Kategorie 9 (links) und 10 (rechts).

10.7 Sommer- / Winterreifen

Da sich die Materialeigenschaften der Fahrzeugreifen mit der Temperatur verändern, ist das Reifengeräusch grundsätzlich temperaturabhängig. Dies wird mittels eines Korrekturterms $\Delta L_{W,R,temp}$ im Emissionsmodell berücksichtigt. Anhand von separat für die Sommer- und Winterperioden durchgeführten MFM-U Auswertungen der Jahre 2014 bis 2016 wurde von IFEC ingegneria SA [37] nachgewiesen, dass nach einer Temperaturnormierung eine systematische saisonale Differenz von maximal 0.4 dB(A) verbleibt. Daraus wird gefolgert, dass Winterreifen nicht wesentlich höhere Emissionen als Sommerreifen verursachen und auf eine Sommer- / Winterreifen Differenzierung verzichtet werden kann.

10.8 Stausituationen

Da die oben aufgeführten Formeln zur Schätzung des Antriebs- und Rollgeräusches nicht für Geschwindigkeiten < 20 km/h gelten, darf mit diesen Gleichungen für Stausituationen *nicht* auf $v = 0$ extrapoliert werden. Für eine Abschätzung der von einem Fahrzeug abgestrahlten Schalleistung im Stillstand wird hier auf die Leerlaufmessungen in Vauffelin (siehe Kapitel 5) abgestellt. Diese Messkampagne umfasste ausschliesslich Personenwagen, sodass die für SWISS10-Kategorie 3 Fahrzeuge gebildete, idealisierte spektrale Pegeldifferenz

$$\Delta L_{\text{Stau}}[3, i] = L_{W,0\text{km/h}}[3, i] - L_{W,\text{prop},20\text{km/h}}[3, i] \quad (10.9)$$

mit $L_{W,0\text{km/h}}[3, i]$ als im Stillstand bestimmte Schalleistung und $L_{W,\text{prop},20\text{km/h}}[3, i]$ als Antriebsgeräusch bei 20 km/h auf sämtliche Fahrzeugkategorien c verallgemeinert werden musste. Damit wird der Stau-Schalleistungspegel $L_{W,0\text{km/h}}[c, i]$ geschätzt als

$$L_{W,0\text{km/h}}[c, i] = L_{W,\text{prop},20\text{km/h}}[c, i] + \Delta L_{\text{Stau}}[3, i] \quad (10.10)$$

Die Abbildung 10.6 zeigt die gemessene und idealisierte spektrale Pegeldifferenz $\Delta L_{\text{Stau}}[3, i]$.

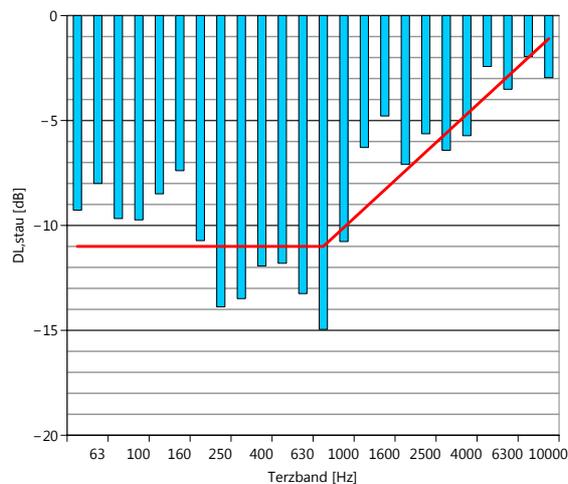


Abbildung 10.6: Gemessene (Balken) und idealisierte (Linie) spektrale Pegelunterschiede der Stillstandsmessungen in Vauffelin und der Antriebsgeräuschkomponente von SWISS10-Kategorie 3 Fahrzeugen bei 20 km/h.

Aus den Antriebsgeräuschkomponenten bei 20 km/h ergeben sich unter Anwendung obiger Pegeldifferenz die in Tabelle 10.10 geschätzten, kategorienabhängigen Stau-Schalleistungspegel $L_{W,0\text{km/h}}[c, i]$.

	cat1	cat2	cat3	cat4	cat5	cat6	cat7	cat8	cat9	cat10
50	88.5	87.4	80.0	80.0	84.5	81.0	81.0	88.9	89.5	88.0
63	87.0	88.5	76.5	76.5	85.5	81.0	81.0	90.5	94.9	94.5
80	85.0	88.7	75.5	75.5	78.5	81.0	81.0	88.0	91.0	89.5
100	81.4	88.7	68.4	68.4	71.6	77.3	77.3	84.5	84.4	83.1
125	85.9	90.3	66.9	66.9	70.6	77.3	77.3	83.9	86.1	84.9
160	80.0	84.0	67.4	67.4	71.6	77.3	77.3	82.8	82.6	82.6
200	80.2	78.0	66.0	66.0	69.4	75.4	75.4	79.6	79.4	77.1
250	81.5	72.3	66.5	66.5	69.4	75.4	75.4	81.7	81.7	79.5
315	80.7	67.6	66.0	66.0	69.4	75.4	75.4	83.3	83.3	82.2
400	82.0	69.2	64.3	64.3	69.4	75.4	75.4	81.4	81.4	82.8
500	77.7	70.0	64.3	64.3	67.9	75.4	75.4	83.4	83.4	84.5
630	76.8	71.2	66.8	66.8	66.9	75.4	75.4	82.8	82.8	81.6
800	77.9	70.2	65.8	65.8	73.4	78.2	78.2	81.0	81.0	81.3
1000	80.1	68.0	63.2	63.2	70.3	79.1	79.1	75.4	75.4	78.3
1250	75.4	69.1	59.1	59.1	66.7	80.0	80.0	73.2	73.2	77.2
1600	74.0	71.1	58.0	58.0	63.1	77.5	77.5	77.6	77.6	76.4
2000	72.3	69.6	60.4	60.4	67.5	78.4	78.4	79.1	79.1	75.3
2500	73.7	70.0	60.3	60.3	69.4	79.3	79.3	78.2	78.2	75.6
3150	72.8	70.9	61.7	61.7	69.8	73.8	73.8	76.8	76.8	76.0
4000	74.0	72.1	59.6	59.6	69.2	74.7	74.7	76.1	76.1	74.3
5000	72.5	73.7	57.0	57.0	68.6	75.6	75.6	76.0	76.0	70.5
6300	71.0	72.1	55.9	55.9	66.0	70.4	70.4	75.0	75.0	60.6
8000	71.5	71.4	52.8	52.8	63.4	71.3	71.3	73.8	73.8	54.4
10000	62.9	72.3	53.2	53.2	62.3	72.2	72.2	73.1	73.1	55.3

Tabelle 10.10: Spektraler Schallleistungspegel $L_{W,0\text{km/h}}[c, i]$ eines stehenden Fahrzeuges für die SWISS10-Kategorien 1 bis 10.

10.9 Fahrzeugindividuelle Emissionsvariation

Zur Nachbildung der zufälligen fahrzeugindividuellen Emissionsvariation kann die Fahrzeugschallleistung $L_W[c, i]'$ als Summe der repräsentativen Schallleistung $L_W[c, i]$ und eines im Mittel neutralen Streutermes gemäss Gl. 10.11 dargestellt werden:

$$L_W[c, i]' = L_W[c, i] + r[c] \quad [\text{dB}] \quad (10.11)$$

wobei $r[c]$ eine normalverteilte Zufallszahl ist. Hierbei ist der Geschwindigkeitseinfluss explizit ausgenommen, da dieser durch das Modell selbst abgebildet werden kann. Für $r[c] = 0$ repräsentiert $L_W[c, i]'$ die über alle Fahrzeuge einer Kategorie energetisch gemittelte Schallleistung. Für $r[c]$ lässt sich schreiben:

$$r[c] = r_0[c] + n(\sigma[c]) = -0.115(\sigma[c])^2 + n(\sigma[c]) \quad (10.12)$$

wobei $r_0[c]$ der Differenz zwischen arithmetischem und energetischem Mittelwert entspricht (siehe Anhang im vollständigen Schlussbericht) und $n(\sigma[c])$ eine normalverteilte Zufallszahl mit Mittelwert 0 und Standardabweichung $\sigma[c]$ ist. Für reifengeräuschdominierte Fahrzeugbetriebszustände lassen sich die aus den MFM-U Autobahnmessungen gewonnenen Standardabweichungen gemäss Tabelle 10.11 annehmen.

cat 1	cat 2	cat 3	cat 4	cat 5	cat 6	cat 7	cat 8	cat 9	cat 10
2.2	2.4	1.6	1.7	1.7	1.8	2.2	2.7	1.7	1.7

Tabelle 10.11: In Autobahnsituationen gewonnene Standardabweichungen der Schallleistungspegel in den SWISS10-Kategorien.

10.10 Schätzung des Leq's in 1 m Abstand

Für den Vergleich mit Emissionsmodellen, die die Quellstärke als Mittelungspegel ausweisen, kann die in sonROAD18 verwendete Charakterisierung als Schallleistung wie hier hergeleitet in einen L_{eq} in 1 m Abstand umgerechnet werden.

Ohne Berücksichtigung der in sehr kurzen Abständen vernachlässigbaren Luftdämpfung lässt sich für eine Vorbeifahrt der horizontal omnidirektional angenommenen Punktquelle das Schalldruckquadrat p^2 in Funktion der Zeit t ausdrücken als:

$$p^2(t) = \frac{W\rho c}{2\pi} \cdot \frac{1}{d^2 + (vt)^2} \quad (10.13)$$

mit:

W : in den Halbraum abgestrahlte Schallleistung der Punktquelle [W]

ρc : Freifeldimpedanz, Produkt aus Luftdichte und Schallgeschwindigkeit [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]

v : Geschwindigkeit der Quelle [m/s]

$d = 1$ m: kürzester Abstand zwischen Mikrophon und vorbeifahrender Quelle [m]

Der Mittelungspegel L_{eq} für eine Vorbeifahrt pro Stunde entspricht der zeitlichen Integration des Schalldruckquadrates über die Ereigniszeit ($-t_0 \dots +t_0$ mit $t_0 \rightarrow \infty$) und Mittelung über 3600 s:

$$L_{eq} = 10 \lg \left(\frac{1}{3600} \cdot \frac{W\rho c}{2\pi p_0^2} \int_{-t_0}^{+t_0} \frac{1}{1 + (vt)^2} dt \right) \quad (10.14)$$

Mit der Substitution $x = vt$ ergibt sich:

$$L_{eq} = 10 \lg \left(\frac{1}{3600} \cdot \frac{1}{v} \cdot \frac{W\rho c}{2\pi p_0^2} \int_{-x_0}^{+x_0} \frac{1}{1 + x^2} dx \right) \quad (10.15)$$

Unter Verwendung von:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{1+x^2} dx = \pi \quad (10.16)$$

und mit

$$L_W = 10 \lg \left(\frac{W \rho c}{p_0^2} \right) \quad (10.17)$$

als Schalleistungspegel der Quelle ergibt sich

$$L_{eq} = L_W - 10 \lg(3600) - 10 \lg(v) - 10 \lg(2) \quad (10.18)$$

bzw. mit v in km/h

$$L_{eq} = L_W - 10 \lg(3600) - 10 \lg(v) - 10 \lg(2) + 10 \lg(3.6) = L_W - 10 \lg(v) - 33.0 \quad (10.19)$$

Die Beziehung 10.19 gilt für ein Fahrzeug pro Stunde. Mit der Skalierung auf N Fahrzeuge pro Stunde wird

$$L_{eq} = L_W + 10 \lg \left(\frac{N}{v} \right) - 33.0 \quad (10.20)$$

11 SWISS10-Konverter

11.1 Einleitung

sonROAD18 prognostiziert die akustische Emission separat für jede SWISS10-Fahrzeugkategorie anhand der Geschwindigkeit. Die volle Modellgenauigkeit kann nur bei Vorliegen entsprechender Detailkenntnis erwartet werden. In Anwendungsfällen, in welchen diese Information nicht vollständig zur Verfügung steht, muss mit Schätzungen gearbeitet werden. Ein mögliches Instrument zur Verkehrsmengenaufschlüsselung ist der hier vorgestellte SWISS10-Konverter (Abbildung 11.1).

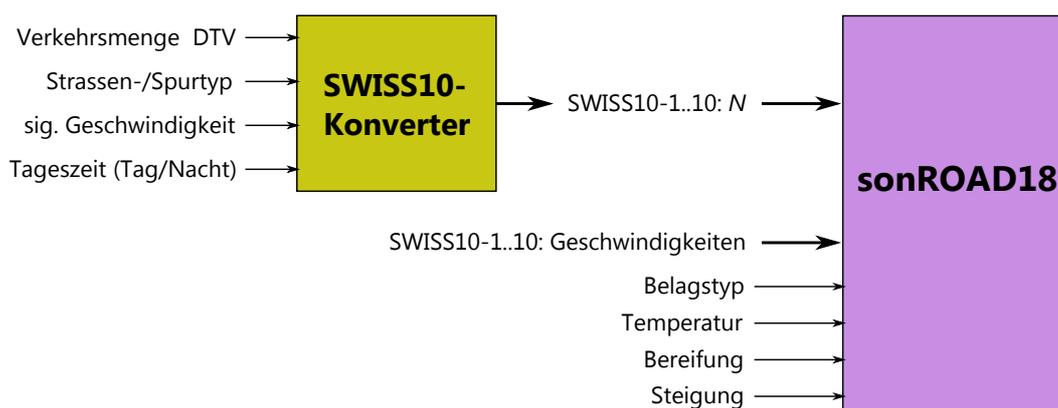


Abbildung 11.1: SWISS10-Konverter.

Der SWISS10-Konverter macht eine Aussage über *eine* Fahrspur einer Strasse eines gegebenen Typs. Basierend auf dem durchschnittlichen täglichen Verkehr DTV der ganzen Strasse (d.h. über alle Spuren aufaddiert) schätzt der SWISS10-Konverter für jede Fahrspur die durchschnittlichen stündlichen Verkehrsmengen tags $N_{\text{tag}}[c]$ bzw. nachts $N_{\text{nacht}}[c]$ pro Fahrzeugkategorie c . Im Anhang des vollständigen Schlussberichts sind informativ Auswertungen zur durchschnittlich gefahrenen Geschwindigkeit gezeigt.

11.2 Klassierung der Strassen

Die Klassierung der Strassen stützt sich auf die in der *SN 640 040 b* genannten Strassentypen. Gemäss der Funktion der Strasse wird unterschieden in:

HLS Hochleistungsstrassen von internationaler bis regionaler Bedeutung mit durchleitender Funktion

HVS Hauptverkehrsstrassen von nationaler bis zwischenörtlicher Bedeutung mit verbindender Funktion

VS Verbindungsstrassen von regionaler bis zwischenörtlicher Bedeutung mit verbindender Funktion

SS Sammelstrassen von örtlicher Bedeutung mit sammelnder Funktion

ES Erschliessungsstrassen von quartierinterner Bedeutung mit erschliessender Funktion

Die Charakterisierung einer Hochleistungsstrasse HLS beinhaltet zusätzlich die Angabe der Gesamtpurzahl, die meist zwischen 2 und 6 und typisch bei 4 liegt. Bei einer Gesamtpurzahl > 2 sind die Verkehrsmengen auf den verschiedenen Spuren unterschiedlich. Entsprechend wird unterschieden in *Normalspur* und *Ueberholspur*. Bei allen Strassentypen ist zusätzlich die signalisierte Geschwindigkeit für eine vollständige Charakterisierung erforderlich.

11.3 Datenbasis

Datenbasis für den SWISS10-Konverter bilden die Einzelereignisprotokolle der automatischen SWISS10-Strassenverkehrszählung des ASTRA (<http://vmch-ds2.cnlab.ch> : 2014-10 bis 2015-10), SWISS10-Zählerdaten des Kantons Zürich aus dem Jahre 2016 sowie verkehrstechnische Erhebungen der Stadt Chur aus dem Jahre 2016 [32]¹. Die Strassencharakterisierung erfolgte für die ASTRA Daten automatisch anhand der Gesamtspurzahl und der gefahrenen Geschwindigkeit, für die Churer und Zürcher Daten wurde die Zuordnung manuell von einem Verkehrsingenieur bzw. anhand der Information aus dem GIS-Browser vorgenommen.

11.4 Auswertung

11.4.1 Durchschnittliche Verkehrsmengen

Die Tabelle 11.1 stellt die durchschnittlichen stündlichen Verkehrsmengen, getrennt für die Nacht (22.00 - 06.00 Uhr) und den Tag (06.00 - 22.00 Uhr), in Prozent am DTV zusammen. Die Spalte *Anz* bezeichnet die für die Statistik zur Verfügung gestandenen Anzahl Standorte und *Code* beschreibt den Strassentyp, die Anzahl Fahrspuren (für HLS), die Fahrpurlage (sofern mehr als 2 Fahrspuren) sowie die signalisierte Geschwindigkeit.

Lesebeispiel: Für cat5 Lieferwagen ist auf einer vierspurigen HLS bei Tempo 100 tagsüber auf einer Normalspur (HLS-4-N-100, Tag) von einem stündlichen Anteil am DTV von rund 0.17 % auszugehen. Auf einer Überholspur beträgt der Anteil rund 0.09 %. Bei einem angenommenen DTV von 50'000 Fz/24h verkehren demnach am Tag auf einer Normalspur 84 und auf einer Überholspur 47 cat5 Lieferwagen. Den ganzen Querschnitt passieren tagsüber pro Stunde $2 \cdot 84 + 2 \cdot 47 = 262$ cat5 Fahrzeuge.

Anz	Code	Zeit	cat1	cat2	cat3	cat4	cat5	cat6	cat7	cat8	cat9	cat10
11	SS-30	tags	0.00000	0.14442	2.57137	0.00000	0.07656	0.00000	0.00000	0.08028	0.08478	0.00000
11	SS-30	nachts	0.00000	0.01637	0.29344	0.00000	0.00661	0.00000	0.00000	0.00766	0.01109	0.00000
60	SS-50	tags	0.00000	0.14363	2.50921	0.00000	0.10363	0.00000	0.00000	0.09302	0.09176	0.00000
60	SS-50	nachts	0.00000	0.01795	0.31354	0.00000	0.01029	0.00000	0.00000	0.01177	0.01395	0.00000
16	VS-50-60	tags	0.01267	0.07638	2.56133	0.01353	0.17548	0.01264	0.00530	0.04864	0.01859	0.00990
16	VS-50-60	nachts	0.00386	0.00777	0.34292	0.00068	0.01686	0.00069	0.00056	0.00361	0.00320	0.00099
12	VS-80	tags	0.01464	0.08314	2.54851	0.01430	0.16106	0.01125	0.00503	0.04360	0.02553	0.00918
12	VS-80	nachts	0.00326	0.00816	0.37083	0.00081	0.02031	0.00071	0.00072	0.00410	0.00777	0.00093
26	HVS-50-60	tags	0.02069	0.08433	2.51915	0.01351	0.17121	0.01180	0.00710	0.04911	0.01357	0.01773
26	HVS-50-60	nachts	0.00487	0.00764	0.38585	0.00099	0.02316	0.00110	0.00078	0.00465	0.00284	0.00229
15	HVS-80	tags	0.01168	0.05438	2.50903	0.01777	0.15817	0.01350	0.01129	0.05929	0.01995	0.03406
15	HVS-80	nachts	0.00278	0.00598	0.42098	0.00172	0.02472	0.00204	0.00075	0.00555	0.00425	0.00387
5	HLS-2-80	tags	0.02761	0.03726	2.28149	0.02659	0.33375	0.01518	0.00644	0.06218	0.03626	0.09110
5	HLS-2-80	nachts	0.00383	0.00236	0.35345	0.00430	0.05712	0.00379	0.00078	0.00921	0.00548	0.00921
10	HLS-2-100	tags	0.01105	0.02883	2.41976	0.01379	0.15818	0.01368	0.00890	0.04992	0.04598	0.09709
10	HLS-2-100	nachts	0.00232	0.00562	0.52573	0.00219	0.02849	0.00322	0.00129	0.00764	0.00859	0.01293
5	HLS-4-N-80	tags	0.00597	0.02930	1.56955	0.00814	0.12787	0.01059	0.00565	0.04816	0.01932	0.04146
5	HLS-4-U-80	tags	0.00074	0.02390	0.92049	0.00094	0.05167	0.00117	0.00072	0.00718	0.00111	0.00220
5	HLS-4-N-80	nachts	0.00158	0.00548	0.35830	0.00112	0.02172	0.00166	0.00065	0.00677	0.00407	0.00569
5	HLS-4-U-80	nachts	0.00009	0.00295	0.08396	0.00006	0.00366	0.00010	0.00004	0.00054	0.00015	0.00043
16	HLS-4-N-100	tags	0.00638	0.01899	1.49030	0.01245	0.16883	0.00893	0.00735	0.05194	0.02534	0.05492
16	HLS-4-U-100	tags	0.00125	0.01376	0.88923	0.00105	0.09353	0.00091	0.00050	0.00730	0.00263	0.01149
16	HLS-4-N-100	nachts	0.00153	0.00320	0.33369	0.00136	0.03169	0.00147	0.00105	0.00790	0.00673	0.00941
16	HLS-4-U-100	nachts	0.00029	0.00256	0.07936	0.00016	0.00853	0.00022	0.00009	0.00134	0.00064	0.00207
62	HLS-4-N-120	tags	0.00918	0.01996	1.43751	0.01334	0.18418	0.01177	0.00674	0.04195	0.02917	0.06122
62	HLS-4-U-120	tags	0.00063	0.01399	0.92151	0.00055	0.11418	0.00054	0.00025	0.00166	0.00088	0.00206
62	HLS-4-N-120	nachts	0.00201	0.00310	0.34964	0.00196	0.04041	0.00230	0.00108	0.00702	0.00825	0.01003
62	HLS-4-U-120	nachts	0.00006	0.00201	0.07537	0.00005	0.00930	0.00008	0.00003	0.00024	0.00022	0.00030

Tabelle 11.1: Durchschnittliche stündliche Verkehrsmengen pro Fahrspur in den SWISS10-Kategorien als Prozentanteil am DTV.

¹Auf Grund von Unsicherheiten der Fahrzeugkategorienzuordnung wurden die Zählstellen 2.10, 4.05, 4.06 und 5.16 nicht berücksichtigt. Die Motorradanteile wurden als Mittelwert aus manuellen Stichprobenzählungen geschätzt, da die automatische Klassifizierung nicht zwischen Motorrädern und Fahrrädern unterscheiden konnte.

11.4.2 Streuung der Verkehrsmengen

Standortspezifisch können in Bezug zu den in Tabelle 11.1 ausgewiesenen durchschnittlichen Verkehrsmengen bedeutende Streuungen auftreten. Die Tabelle 11.2 listet die über die ausgewerteten Standorte beobachteten Standardabweichungen auf.

Anz	Code	Periode	cat1	cat2	cat3	cat4	cat5	cat6	cat7	cat8	cat9	cat10
11	SS-30	tags	0	43	13	0	59	0	0	30	181	0
11	SS-30	nachts	0	43	15	0	34	0	0	64	205	0
60	SS-50	tags	0	43	7	0	60	0	0	51	92	0
60	SS-50	nachts	0	43	23	0	68	0	0	69	137	0
16	VS-50-60	tags	128	26	4	53	42	45	55	49	124	85
16	VS-50-60	nachts	104	37	22	69	41	97	105	67	168	117
12	VS-80	tags	120	34	2	48	20	33	39	39	87	37
12	VS-80	nachts	154	28	15	48	33	78	90	31	105	72
26	HVS-50-60	tags	150	66	6	49	33	38	65	38	79	84
26	HVS-50-60	nachts	173	47	21	51	39	66	91	51	79	98
15	HVS-80	tags	98	35	7	46	27	53	74	52	60	82
15	HVS-80	nachts	122	33	21	65	39	115	66	49	81	70
5	HLS-2-80	tags	35	38	16	24	90	59	32	21	86	83
5	HLS-2-80	nachts	62	41	33	64	84	111	50	30	89	90
10	HLS-2-100	tags	75	31	9	64	33	96	85	63	96	105
10	HLS-2-100	nachts	137	56	48	88	65	131	114	90	121	133
5	HLS-4-N-80	tags	31	62	22	55	42	43	32	17	53	75
5	HLS-4-U-80	tags	65	87	23	42	31	48	162	146	140	127
5	HLS-4-N-80	nachts	39	57	19	79	34	75	65	37	63	56
5	HLS-4-U-80	nachts	113	76	61	71	36	70	97	70	97	127
16	HLS-4-N-100	tags	52	41	22	50	43	70	58	37	66	74
16	HLS-4-U-100	tags	176	32	28	210	47	316	353	221	382	350
16	HLS-4-N-100	nachts	65	33	26	69	40	93	67	49	92	83
16	HLS-4-U-100	nachts	318	72	66	333	83	431	390	288	380	356
62	HLS-4-N-120	tags	59	35	25	46	42	43	40	23	52	64
62	HLS-4-U-120	tags	123	34	28	135	54	224	408	235	376	372
62	HLS-4-N-120	nachts	73	38	18	90	48	74	63	41	76	65
62	HLS-4-U-120	nachts	222	60	64	203	91	312	438	294	469	456

Tabelle 11.2: Standardabweichungen der standortspezifischen Streuungen der stündlichen Verkehrsmengen pro Fahrspur in den SWISS10-Kategorien in Prozent des Mittelwerts.

11.5 Verteilungs-Dichtefunktionen der zeitlichen Abstände

In reinen Energiebetrachtungen wie z.B. Leq-Berechnungen spielt die Anordnung der Fahrzeuge längs einer Spur keine Rolle. Für die Ermittlung von Maximalpegelstatistiken oder die Untersuchung von Pegelfluktuationen oder weiterer zeitlicher Merkmale [33] werden jedoch Statistiken zur Verteilung der Fahrzeuge entlang einer Fahrspur benötigt. Dieser Aspekt wurde hier - gestützt auf die bereits oben verwendeten ASTRA Verkehrszählerdaten - anhand des zeitlichen Abstandes Δt zwischen zwei Nachbahrfahrzeugen im frei fliessenden Verkehr untersucht.

Dazu wurden Statistiken aufgestellt, die pro Fahrspur und fahrspurbezogene stündliche Verkehrsmenge die Verteilungs-Dichtefunktion von Δt darstellen. Diese Funktionen wurden dann je durch eine Drei-Parameter-Weibull-Verteilung approximiert, um eine kompakte Beschreibung zu ermöglichen.

Die Weibull-Verteilung wird durch die drei Parameter α , β und μ beschrieben und weist für $x \geq \mu$ eine Dichtefunktion $f(x)$ gemäss Gl. 11.1 und eine Verteilungsfunktion $F(x)$ gemäss Gl. 11.2 auf (für $x < \mu$ sind die Funktionswerte = 0).

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{x - \mu}{\beta} \right)^{\alpha-1} \cdot e^{-\left(\frac{x-\mu}{\beta}\right)^\alpha} \quad (11.1)$$

$$F(x) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{x - \mu}{\beta}\right)^\alpha\right) \quad (11.2)$$

Abbildung 11.2 zeigt für eine zweispurige Hauptverkehrsstrasse (HVS) bei Tempo 80 exemplarisch die gemessenen Dichtefunktionen für Δt bei zwei verschiedenen Verkehrsmengen bzw. die Approximation durch eine Weibullverteilung.

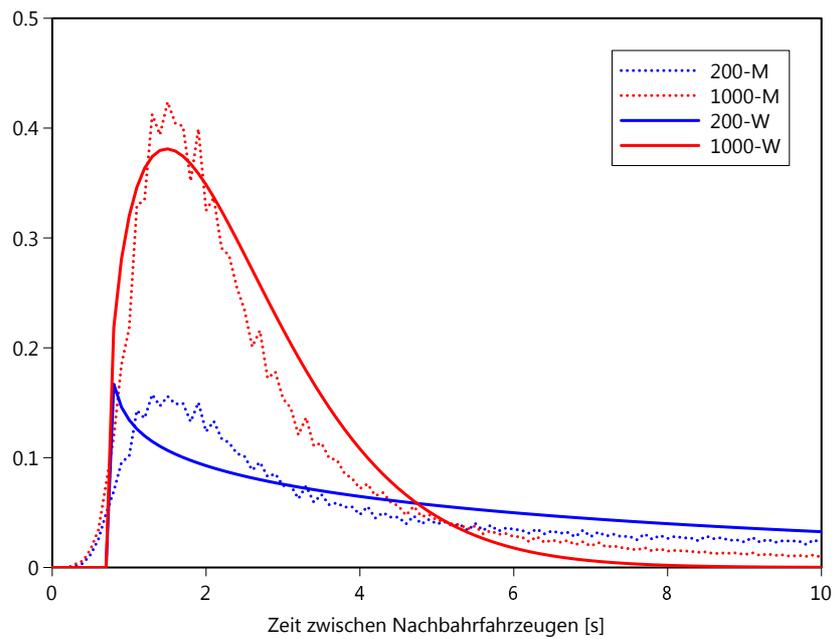


Abbildung 11.2: Auf einer Spur einer typischen Hauptverkehrsstrasse (HVS) bei Tempo 80 gemessene (M) und durch eine Weibullverteilung (W) approximierte Dichtefunktionen für Δt als zeitlicher Abstand zwischen zwei Nachbahrfahrzeugen für zwei exemplarische stündliche Verkehrsmengen von 200 bzw. 1000 Fz/h (auf eine Fahrspur bezogen).

Im Anhang des vollständigen Schlussberichts werden die entsprechenden Parameter der Weibull-Verteilung für verschiedene Strassentypen und Verkehrsmengen aufgelistet. Sie können für die Mikrosimulation von Verkehrsflüssen und die Berechnung daraus abgeleiteter akustischer Signalmerkmale herangezogen werden.

12 Validierung des Modells

12.1 Validierungsmessungen

Zur Validierung des Emissionsmodells sonROAD18 wurden Berechnungen mit Messungen verglichen. Es wurden nur Messungen herangezogen, die nicht direkt für die Modellparameteranpassung verwendet wurden. Der Vergleich erfolgte anhand des berechneten und gemessenen Mittelungspegels über ein kurzes Zeitintervall (30 Minuten bis 48 Stunden) im Nahbereich der Strasse. Folgende Strassentypen wurden berücksichtigt und an mindestens je drei Standorten untersucht:

- 30 km/h, flach
- Hauptstrasse innerorts, 50 km/h, flach
- Hauptstrasse innerorts, 50 km/h, Steigung > 7%
- Hauptstrasse ausserorts, 80 km/h, flach
- Autobahn, 120 km/h, flach

Dabei wurden verschiedene bereits vorhandene und zur Verfügung gestellte Messdaten verwendet und zusätzliche Messungen durch die Empa durchgeführt:

- Messungen der Stadt Zürich, durchgeführt von Basler + Hofmann im Jahr 2013 [38] sowie Grolimund + Partner AG im Jahr 2009 [39]
- Tempo-30-Messungen Stadt Zürich und Kanton Aargau, durchgeführt von Grolimund + Partner AG [40]
- Vorbeifahrtsmessungen auf verschiedenen Belägen von Grolimund + Partner AG (jünger 2010) [31]
- MFM-U Messungen, 2016 (siehe Kapitel 4)
- Messungen der Empa, 2016 (siehe Kapitel 8) und 2017 (siehe Kapitel 5)

In der Tabelle 12.1 sind alle für die Validierung verwendeten Messungen zusammengestellt. Die Messpunkte befinden sich meistens ca. 7.5 m von der Strassen- bzw. Fahrspurmitte entfernt. Die zur Verfügung stehenden Verkehrsdaten sind von ganz unterschiedlicher Genauigkeit. In der Tabelle 12.1 werden die Verkehrsdaten inkl. Geschwindigkeiten deshalb in entsprechende Kategorien eingeteilt:

- Q1** Verkehrsmenge für alle SWISS10-Kategorien spurgenaue bekannt
- Q2** Verkehrsmenge für 7 Kategorien (CH07) spurgenaue bekannt, Aufteilung Lieferwagen in Kat. 5, 6, 7 gemäss SWISS10-Konverter (93, 4, 3%)
- Q3** 4 Kategorien (2, 3, Lieferwagen, 8) bekannt, Kat. 1, 4, 9, 10 mit 0 angenommen und Aufteilung 5, 6, 7 gemäss SWISS10-Konverter (91, 6, 3%), Annahme 50% des Verkehrs pro Spur
- Q4** Aufteilung in Kat. 3 und 8 vorhanden, Annahme 50% des Verkehrs pro Spur
- Q5** nur DTV vorhanden, Aufteilung in Kat. 3 und 8 gemäss LSV, Annahme 50% des Verkehrs pro Spur
- v-q1** effektiv gefahrene Geschwindigkeit pro SWISS10-Kategorie bekannt
- v-q2** mittlere gefahrene Geschwindigkeit bekannt
- v-q3** Geschwindigkeiten aus Jahresmittelwerten der effektiv gefahrenen Geschwindigkeit bestimmt

Grundsätzlich wurden die Berechnungen – sofern vorhanden – mit den mittleren tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeiten durchgeführt. Da die Steigungskorrektur gemäss CNOSSOS bereits eine veränderte Geschwindigkeit berücksichtigt, wurden die Berechnungen der drei Standorte mit Steigungen > 7% mit den signalisierten Geschwindigkeiten durchgeführt.

Mit Ausnahme der Autobahnen stehen für die Messzeiten jeweils Temperaturmessungen zur Verfügung. Bei den drei Autobahn-Standorten wurde die Referenztemperatur von 10°C eingesetzt und ein Validierungszeitraum über zwei Tage mit typischerweise rund 10°C gewählt (Mitte März und Ende Oktober). Bei den Autobahn-Standorten gab es jeweils auf beiden Strassenseiten einen Messpunkt. Die Ergebnisse der beiden Messpunkte wurden arithmetisch gemittelt.

Keiner der Validierungsfälle befindet sich innerhalb 100 m Distanz zu einer Kreuzung oder einem Kreisell. Deshalb kann die Korrektur für beschleunigende oder abbremsende Fahrweise nicht validiert werden.

Neben den Messungen an verschiedenen einzelnen Standorten, standen SPB-Messungen von Grolimund + Partner AG auf verschiedenen Belägen seit 01.01.2010 zur Verfügung [31]. Diese Daten sind nach Fahrzeugtyp (PW, LKW, Sattelschlepper) und Belagstyp (AC 11, ACMR 8, SDA 4, SDA8) gruppiert und decken einen Geschwindigkeitsbereich von 40 – 130 km/h ab. Bei diesen Daten handelt es sich also um gemittelte Werte über verschiedene Standorte, weshalb keine Korrekturen für allfällige Steigungen, beschleunigende oder abbremsende Fahrweise sowie Temperatureinflüsse vorgenommen werden können. Eine etwas erhöhte Unsicherheit ergibt sich zusätzlich aus dem Umstand, dass der Messabstand nur 5 m betrug. Überdies umfassen diese Daten überdurchschnittliche viele Spezialfälle, d.h. Messungen zu extremen Belagzuständen wie ganz neue oder dann solche, die nicht funktioniert haben. Aus diesen Gründen wurde dieses Datenset separat ausgewertet.

12.2 Berechnung Mittelungspegel L_{eq}

Bei einigen Validierungsfällen ist nur die Aufteilung in PW (N1) und Schwerverkehr (N2) bekannt (Verkehrsdaten Q4 in Tabelle 12.1). Die nach Belag gruppierten Daten enthalten ebenfalls nur drei Fahrzeugtypen (PW, LKW, Sattelschlepper). Diese Fahrzeugtypen wurden folgendermassen den SWISS10-Kategorien zugeordnet:

- PW = SWISS10-Kat. 3
- Schwerverkehr/LWK = SWISS10-Kat. 8
- Sattelschlepper = SWISS10-Kat. 10

Bei den Situationen ohne spurgenaue Verkehrsdaten, wurde der Verkehr gleichmässig auf die einzelnen Spuren verteilt. Die Berechnungen wurden dann spurgenaue durchgeführt, d.h. es wurde pro Spur eine Linienquelle in der Fahrbahnmitte angenommen.

Die Berechnung der totalen Schalleistung pro m einer Linienquelle erfolgte mit v' : Geschwindigkeit in m/s bzw. v : Geschwindigkeit in km/h gemäss Formel 12.1, wobei als Belageeinfluss die in der Parameteroptimierung gefundenen Korrekturen gemäss Kapitel 9 eingesetzt wurden.

$$L_{W',eq,line[c,i]} = L_{W[c,i]} + 10 \lg \left(\frac{N[c]}{3600 \cdot v'[c]} \right) = L_{W[c,i]} + 10 \lg \left(\frac{N[c]}{1000 \cdot v[c]} \right) \quad (12.1)$$

Als Validierungsgrösse wurde dann der Mittelungspegel $L_{eq,A}$ über 1 h am jeweiligen Messpunkt berechnet. Dazu wurde eine numerische Integration durchgeführt, bei welcher eine 100 m lange Strasse mit je einer Punktquelle pro Meter mit einer Schalleistung $L_{W',eq,line[c,i]}$ angenommen wurde. Als Ausbreitungseffekte wurde die geometrische Verdünnung und die Luftdämpfung berücksichtigt. Die Luftdämpfung ist abhängig vom Zustand der Luft, der Frequenz f und der Distanz d und berechnet sich nach Gleichung 12.2. Zur Bestimmung der Luftdämpfung wurde vereinfacht eine Lufttemperatur von +8 °C und eine relative Luftfeuchte von 76% angenommen. Die entsprechenden atmosphärischen Absorptionskoeffizienten α_f sind in der Tabelle 12.2 dargestellt.

$$A_{atm,f} = \alpha_f \frac{d}{1000} \quad (12.2)$$

Standort	v-sig [km/h]	Steigung [%]	Belag	Messung	Verkehrsdaten	Messgrösse
Kalchbühlstrasse, Zürich	30	3	Dichte Deckschicht (Berechnung: AC 11)	G + P, 2009	Q4, v-q2	$L_{eq,A}$ Tag
Kappel a.A.	30	0	ACMR 8	G + P, 2015	Q1, v-q1	$L_{eq,A}$ (1Fz./h)
Ottenbach	30	5	ACMR 8	G + P, 2015	Q1, v-q1	$L_{eq,A}$ (1Fz./h)
Butzenstrasse, Zürich	50	7	AC 11S	B + H, 2013	Q3, v-q2	$L_{eq,A}$ 1h
Hegibachstrasse, Zürich	50	5	AC 8S	B + H, 2013	Q3, v-q2	$L_{eq,A}$ 1h
Kalchbühlstrasse, Zürich	50	3	Dichte Deckschicht (Berechnung: AC 11)	G + P, 2009	Q4, v:q2	$L_{eq,A}$ Tag
Leimbachstrasse, Zürich	50	6	SMA 11	B + H, 2013	Q3, v-q2	$L_{eq,A}$ 1h
Letzigraben, Zürich	50	0	AB 11	B + H, 2013	Q3, v-q2	$L_{eq,A}$ 1h
Fällanden	50	7.2	AC 11 (2012)	Empa, 2017	Q1, v-q2	$L_{eq,A}$ 0.5h
Gsteigstrasse, Zürich	50	13	SMA 11 (2004)	Empa, 2017	Q1, v-q2	$L_{eq,A}$ 0.5h
Tobelhofstrasse, Zürich	50	7.5	AB 11	Empa, 2017	Q1, v-q2	$L_{eq,A}$ 0.5h
Magden	80	0	AC 11 (2000)	Empa, 2016	Q5, v-q2	$L_{eq,A}$ 0.75h
Mellikon	80	0	PMA (2014)	Empa, 2016	Q5, v-q2	$L_{eq,A}$ 0.75h
Rümikon	80	2	ACMR 8 (2010)	Empa, 2016	Q4, v-q2	$L_{eq,A}$ 0.75h
Rothenbrunnen	100	0	SDA 8 (2013)	MFM-U, 2016	Q2, v-q3	$L_{eq,A}$ 48h
Camignolo	120	0	SDA 8 (2013)	MFM-U, 2016	Q2, v-q3	$L_{eq,A}$ 48h
Reiden	120	0	SMA 11 (< 2003)	MFM-U, 2016	Q2, v-q3	$L_{eq,A}$ 48h
SPB-Messungen gruppiert nach Belag [31]:						
Diverse	40-110	—	AC 11	G + P, >2010		$L_{eq,A}$ (1Fz./h)
Diverse	40-130	—	ACMR 8	G + P, >2010		$L_{eq,A}$ (1Fz./h)
Diverse	40-80	—	SDA 4	G + P, >2010		$L_{eq,A}$ (1Fz./h)
Diverse	40-90	—	SDA 8	G + P, >2010		$L_{eq,A}$ (1Fz./h)

Tabelle 12.1: Übersicht über die Validierungsmessungen. Für die Qualitätsstufen der Verkehrsdaten bzw. Geschwindigkeiten siehe Text.

Terz	α_f	Terz	α_f	Terz	α_f
50	0.1	315	1.2	2000	9.7
63	0.1	400	1.5	2500	14.3
80	0.2	500	1.8	3150	21.6
100	0.3	630	2.2	4000	33.6
125	0.4	800	2.7	5000	50.9
160	0.6	1000	3.5	6300	77.9
200	0.8	1250	4.7	8000	119.8
250	1	1600	6.8	10000	176.2

Tabelle 12.2: Atmosphärischer Absorptionskoeffizient α_f in dB/km für eine Temperatur von 8°C und eine relative Luftfeuchte von 76% in Abhängigkeit der Terzmittenfrequenz.

12.3 Resultate der Validierung

In der Tabelle 12.3 sind die gemessenen und berechneten $L_{eq,A}$ sowie die Differenzen für die Validierungsfälle an den verschiedenen Standorten aufgeführt. Bei den drei 80 km/h-Standorten standen keine Verkehrsangaben spezifisch für die Messperiode zur Verfügung. Die verfügbaren DTV-Angaben stammen aus den Jahren 2006 (Magden), 1997 (Mellikon) und 2014 (Rümikon). Diese nicht aktuellen Verkehrszahlen dürften einen Teil der

Unterschätzung der Messwerte erklären. Bei den drei Standorten mit Steigung scheinen die Berechnungen die Emissionen ebenfalls leicht zu unterschätzen, dies trotz Berechnung mit signalisierten Geschwindigkeiten. Im Mittel beträgt die Abweichung zwischen berechnetem und gemessenem $L_{eq,A}$ -0.8 dB(A) (Mittel über absolute Abweichungen: -1.1 dB(A)). Die Differenzen zwischen Berechnung und Messung betragen zwischen -1.9 und $+1.0$ dB(A). Der Quadratwurzelfehler Ψ gemäss Gleichung 12.3 über alle 17 Validierungsfälle beträgt 1.2 dB(A).

$$\Psi = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (L_{\text{Berechnung},i} - L_{\text{Messung},i})^2} \quad (12.3)$$

Bei den nach Belägen gruppierten Daten beträgt die mittlere Abweichung zwischen berechnetem und gemessenem $L_{eq,A}$ $+0.3$ dB(A) (Mittel über absolute Abweichungen: -1.3 dB(A)). In der Tabelle 12.4 sind für die verschiedenen Beläge und Fahrzeugkategorien die Werte separat ausgewiesen (gemittelt über die verschiedenen Geschwindigkeitskategorien). Die Differenzen zwischen Messung und Berechnung reichen für die einzelnen Geschwindigkeitskategorien von -3.9 bis $+2.5$ dB(A). Der Quadratwurzelfehler über alle nach Belag gruppierten Validierungsdaten beträgt 1.5 dB(A).

Die Abbildung 12.1 zeigt die Differenzen Berechnung – Messung als Boxplots. Darin ist ebenfalls zu erkennen, dass bei den nach Belägen gruppierten Daten teilweise deutlich grössere Abweichungen zwischen Messung und Berechnung resultieren. Dies kann einerseits durch Unterschiede innerhalb eines Belagstyps erklärt werden und andererseits durch mangelnde Kenntnisse resp. Korrekturmöglichkeiten von allfälligen Steigungen, beschleunigende oder abbremsende Fahrweise sowie Temperatureinflüssen.

In der Zusammenfassung beider Datensätze ergibt sich für den Vergleich Berechnung minus Messung eine mittlere Abweichung von -0.3 dB(A). Diese verbleibende Differenz liegt in der Grössenordnung der grundlegenden Unsicherheit der Datenerhebung und ist damit zufriedenstellend. Gleichzeitig demonstriert die Gegenüberstellung die im Einzelfall zu berücksichtigende Unsicherheit.

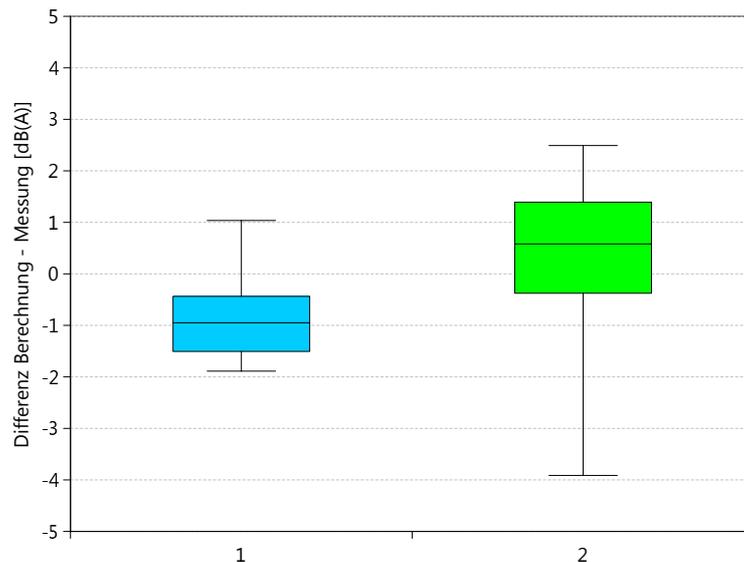


Abbildung 12.1: Differenzen zwischen Berechnungen und Messungen. Die Boxplots zeigen den Median (horizontale Linie in Box), das 25% und 75% Quantil (untere und obere Grenze der Box), sowie die Spanne zwischen kleinsten und grössten Werten. Die blaue Datengruppe (1) umfasst die einzelnen Validierungsstandorte, die grüne Gruppe (2) entspricht den nach Belag gruppierten Daten.

Situation	Standort	Belag	Berechnung dB(A)	Messung dB(A)	Berechnung – Messung dB(A)
30 km/h, flach	Kalchbühlstrasse	AC 11	56.4	55.4	1.0
	Kappel	ACMR 8	39.2	39.6	-0.4
	Ottenbach	ACMR 8	34.0	33.0	1.0
50 km/h, flach	Butzenstrasse, ZH	AC 11S	62.1	63.0	-0.9
	Hegibachstrasse, ZH	AC 8S	67.5	69.0	-1.5
	Kalchbühlstrasse, ZH	AC 11	57.8	58.8	-1.0
	Leimbachstrasse, ZH	SMA 11	62.1	63.0	-0.9
	Letzigraben, ZH	AB 11	58.4	59.0	-0.6
50 km/h, Steigung > 7%	Fällanden	AC 11	68.9	70.8	-1.9
	Gsteigstrasse, ZH	SMA 11	68.2	69.5	-1.3
	Tobelhofstrasse, ZH	AB 11	66.2	67.9	-1.7
80 km/h, flach	Magden	AC 11	66.2	66.8	-0.6
	Mellikon	PMA	71.8	73.1	-1.2
	Rümikon	ACMR 8	71.3	73.0	-1.7
120 km/h, flach	Rothenbrunnen	SDA 8	69.9	71.5	-1.6
	Camignolo	SDA 8	76.9	77.1	-0.1
	Reiden	SAM 11	81.2	80.6	0.5

Tabelle 12.3: Validierungsergebnisse der verschiedenen Standorte.

Belag	Fahrzeug	Berechnung – Messung dB(A)
AC11	PW	1.5
	LKW	0.8
	Sattelschlepper	—
ACMR8	PW	1.4
	LKW	0.8
	Sattelschlepper	0.5
SDA4	PW	-2.8
	LKW	-1.3
	Sattelschlepper	-2.1
SDA8	PW	0.4
	LKW	0.4
	Sattelschlepper	0.3

Tabelle 12.4: Mittlere Differenzen zwischen Berechnungen und den nach Belag gruppierten Messungen. Man beachte, dass die Repräsentativität der Stichprobe in den einzelnen Belagskategorien nicht garantiert ist. Die Werte sind über die verschiedenen Geschwindigkeitskategorien gemittelt.

13 Modellunsicherheit

Die folgende Abschätzung der sonROAD18 Modellunsicherheit macht eine Aussage zu dem an einem Standort prognostizierten A-bewerteten energieäquivalenten Mittelungspegel $L_{eq,A}$ über eine grosse Fahrzeug-Stichprobe. Die Prognoseunsicherheit wird durch zwei Aspekte bestimmt:

Modellfehler hervorgerufen durch Unsicherheiten der empirischen Modellbeschreibung und den Umstand, dass weitere Effekte und Einflussfaktoren unberücksichtigt bleiben

Eingangsdatenfehler hervorgerufen durch fehlende oder ungenaue Eingangsdaten

13.1 Modellfehler

Modellfehler beschreiben die modellinhärente Unsicherheit der Emissionspegelprognose bei kompletter Verfügbarkeit der benötigten Eingangsdaten¹. Die Betrachtungen beschränken sich auf stationäre Fahrzeug-Betriebszustände und schliessen dementsprechend beschleunigende Fahrzeuge aus. Eine vollständige Situationscharakterisierung umfasst damit:

- die mittleren Geschwindigkeiten pro Fahrzeugkategorie
- die Fahrzeugmengen pro Fahrzeugkategorie
- den Belagstyp
- die Steigung der Strasse
- die Lufttemperatur

Gestützt auf die Herleitung der Modellparameter und die Modellvalidierung (Kapitel 12) lässt sich unter Voraussetzung einer vollständigen Situationsbeschreibung in oben erwähntem Sinn der Modellfehler zu **1.5 dB(A)** im Sinne einer Standardabweichung abschätzen.

Da in vielen Fällen das Rollgeräusch einen bedeutenden Anteil am Gesamtgeräusch hat, steuert das nicht vollständige Wissen um die genaue Belagskorrektur den grössten Anteil an den Modellfehler bei. Wie Messungen zeigen, können die Emissionen innerhalb des gleichen Belagstyps bedeutende Variationen aufweisen. Das Ideal einer Belagscharakterisierung stellt eine genügend grosse Stichprobe von SPB-Messungen und daraus abgeleiteter Belagskorrektur dar. Alternativ lassen sich auch aus CPX-Messungen Belagskorrekturwerte gewinnen, allerdings beinhaltet die dazu benötigte Konvertierung der CPX-Werte in SPB-Angaben ihrerseits eine gewisse Unsicherheit.

13.2 Eingangsdatenfehler

Für die Lärmkartierung stehen die Modelleingangsdaten für die Emissionsbestimmung meist nicht in dem Umfang bzw. der Genauigkeit wie oben beschrieben zur Verfügung. Die Bedeutung der einzelnen Parameter lässt sich anhand einer Sensitivitätsanalyse auf das Ergebnis untersuchen.

Als Modellfunktion f wird hier die Prognose des A-bewerteten, energieäquivalenten Mittelungspegels $L_{eq,A}$ an einem Empfängerpunkt über hartem Boden in der Referenzdistanz von 7.5 m verstanden (siehe Gl. 10.20):

$$L_{eq,A} = 10 \lg \left(\sum_{c=1}^{10} \frac{N[c]}{v[c]} \cdot \sum_{i=1}^n 10^{0.1(L_W[c,i] + A'[i])} \right) + \Delta \quad (13.1)$$

mit i : Terzbandnummer, c : Fahrzeugkategorie, $N[c]$ bzw. $v[c]$ Anzahl Fahrzeuge pro Stunde und Geschwindigkeit für jeweilige Kategorie, $L_W[c, i]$ Schallleistungspegel eines Fahrzeuges der Kategorie c im Terzband i ,

¹Hinsichtlich der Belagscharakterisierung wird hier allerdings lediglich die Kenntnis des Belagstyps verstanden.

$A'[i]$: A-Bewertung inklusive Luftabsorption im Terzband i und schliesslich Δ als eine Konstante.

Die numerische Auswertung der Sensitivität der Modellfunktion hinsichtlich der verschiedenen Eingangsgrössen erfordert die Spezifikation eines Arbeitspunktes. Dazu werden hier drei Prototypsituationen mit den entsprechenden SWISS10-Konverter-Parametern aus Tabelle 11.1 definiert:

Sammelstrasse, 30 km/h eine Spur einer Sammelstrasse mit einer signalisierten Geschwindigkeit v_s von 30 km/h auf einem ACMR8/SDA8-12 Belag und Fahrzeugmengen entsprechend SS-30 nachts.

Verbindungsstrasse, 50 km/h eine Spur einer Verbindungsstrasse mit einer signalisierten Geschwindigkeit v_s von 50 km/h auf einem ACMR8/SDA8-12 Belag und Fahrzeugmengen entsprechend VS-50 nachts.

Hochleistungsstrasse, 120 km/h eine Spur einer Hochleistungsstrasse mit einer signalisierten Geschwindigkeit v_s von 120 km/h auf einem ACMR8/SDA8-12 Belag und Fahrzeugmengen entsprechend HLS-4-N-120 nachts.

Die Tabelle 13.1 zeigt die gefundenen Sensitivitäten.

Parameter	SS-30	VS-50	HLS-4-N-120	
Geschwindigkeit v_s	0.5	0.9	1.2	dB/10%
Steigung s	1.7	1.1	0.5	dB/10%
Belag $\Delta L_{W,R,road}$	0.5	0.8	1.0	dB/1dB
Temperatur T	-0.3	-0.6	-0.70	dB/10C
Verkehrsmenge N	0.41	0.41	0.41	dB/10%

Tabelle 13.1: Sensitivitätsanalyse einer $L_{eq,A}$ -Berechnung hinsichtlich der verschiedenen Eingangsparameter für drei Prototypsituationen. Man beachte, dass die Steigungssensitivität die Differenz einer +10% Steigung bezogen auf eine flache Strasse ausweist. Da die Steigungskorrektur stark nichtlinear ist, können daraus nicht ohne weiteres andere Deltas inter- bzw. extrapoliert werden

14 Rechenbeispiele

Die Rechenbeispiele umfassen die vier Geschwindigkeitsniveaus 30, 50, 80 und 120 km/h und beinhalten sämtliche Formeln, die in die Emission eingehen, insbesondere auch die vertikale Richtwirkung. Die Eingangsdaten wurden so gewählt, dass möglichst alle Berechnungssituationen (verschiedene Korrekturen) einmal vorkommen. Die Beispiele sind also theoretisch und entsprechen nicht realen Situationen sondern dienen dem Testen einer eigenen Implementierung. In der Tabelle 14.1 sind die Eingangsdaten der vier Rechenbeispiele zusammengestellt. Als Belagskorrekturen werden in der Rechnung die im Kapitel 9 aufgelisteten Werte eingesetzt.

Rechenbeispiel	A	B	C	D
Verkehrsmenge N[1]	1	1	1	3
Verkehrsmenge N[2]	2	5	5	5
Verkehrsmenge N[3]	70	100	200	450
Verkehrsmenge N[4]	1	1	1	1
Verkehrsmenge N[5]	5	10	10	50
Verkehrsmenge N[6]	1	2	5	30
Verkehrsmenge N[7]	1	1	1	10
Verkehrsmenge N[8]	5	10	20	35
Verkehrsmenge N[9]	1	1	5	60
Verkehrsmenge N[10]	1	1	1	40
Geschwindigkeit v[1]	30	50	80	93
Geschwindigkeit v[2]	30	50	80	110
Geschwindigkeit v[3]	30	50	80	120
Geschwindigkeit v[4]	30	50	80	90
Geschwindigkeit v[5]	30	50	80	120
Geschwindigkeit v[6]	30	50	80	90
Geschwindigkeit v[7]	30	50	80	90
Geschwindigkeit v[8]	30	50	80	90
Geschwindigkeit v[9]	30	50	80	90
Geschwindigkeit v[10]	30	50	80	90
Belag	ACMR8	SDA4	PMA	Beton
Steigung s [%]	0	-5	10	2
Lufttemperatur [°C]	10	10	15	25
Winkel θ (Q – Mp) [°]	10	20	45	60

Tabelle 14.1: Eingangsdaten für die vier Rechenbeispiele. Pro Beispiel wird eine theoretische Fahrspur berechnet, d.h. die Verkehrsmenge, Geschwindigkeit etc. beziehen sich auf eine Spur.

Die Berechnung der totalen Schalleistung pro m einer Linienquelle erfolgt gemäss Formel 12.1. Die Resultate sind in den Tabellen im Anhang des vollständigen Schlussberichts zusammengestellt.

15 Belagscharakterisierung mittels SPB-Messungen

15.1 Konzept

Der Belageseinfluss bzw. der Korrekturterm $\Delta L_{W,R,road}[i]$ kann situationsspezifisch anhand von Einzelereignisvorbeifahrtsmessungen am frei fließenden Verkehr in der Referenzgeometrie 7.5 m / 1.2 m über hartem Boden bestimmt werden. Durch Verwendung der Ereignisenergie als akustische Beschreibungsgröße weicht diese Methode vom normierten Verfahren ISO 11819-1 (Akustik - Messung des Einflusses von Strassenoberflächen auf Verkehrsgläusche - Teil 1: Statistisches Vorbeifahrungsverfahren) ab, welches auf dem Maximalpegel basiert.

Für die Auswertung werden Datenpaare von Geschwindigkeiten und spektralen Ereignisenergien von N gültigen Vorbeifahrten benötigt. Ausgehend von einer fahrzeugindividuellen Streuung entsprechend einer Standardabweichung σ von knapp 2 dB darf mit $N = 40$ eine Standardabweichung des Mittelwerts $\sigma_m = \sigma / \sqrt{N - 1} \approx 0.3$ dB erwartet werden.

Die SPB-Messung zur Bestimmung des Belageseinflusses an einem spezifischen Standort soll folgende Bedingungen erfüllen:

Geometrie Die Mikrophonaufstellung entspricht der Referenzanordnung mit einem Abstand von 7.5 m zur Fahrspurmitte und einer Höhe von 1.2 m über der Fahrbahn.

Bodenbelag Die an die interessierende Fahrspur angrenzende Bodenfläche in Richtung Mikrophon soll flach und weitgehend akustisch hart sein um einheitliche Ausbreitungsbedingungen zu gewährleisten (siehe auch Anhang des vollständigen Schlussberichts). Diese harte Bodenfläche kann z.B. durch eine angrenzende Fahrspur gebildet werden. Auf Autobahnen ist dies in der Regel der Pannestreifen, bei zweispurigen Strassen wird diese Bedingung durch die - vom Mikrophon aus gesehen - ferne Spur erfüllt.

Umgebung Die Umgebung soll frei von reflektierenden Objekten sein um keine zusätzlichen Reflexionen an das Mikrophonsignal beizusteuern.

Fahrzeugauswahl Das Set der auszuwertenden Ereignisse wird durch die dominierende Fahrzeugkategorie gebildet. Das wird meist die PW-Kategorie (SWISS10-Kategorie 3) sein. Im untersuchten Fahrzeugbetriebszustand soll das Roll- über das Antriebsgeräusch dominieren.

Geschwindigkeitsbereich In die Auswertung werden jene Fahrzeuge einbezogen, deren Geschwindigkeiten in einem Band von ± 15 % um die mittlere gefahrene Geschwindigkeit liegen.

Gültige Ereignisse Vorbeifahrten gelten als gültig (d.h. ungestört), wenn sie isoliert auftreten. Zum Zeitpunkt der interessierenden Mikrophonpassage muss die Distanz zu allen unerwünschten Nachbarfahrzeugen mindestens 100 m betragen. Fahrzeuge, die das Kriterium nicht erfüllen, werden von der Auswertung ausgeschlossen. Dichter aufeinander verkehrende Fahrzeuge können als Gruppe ausgewertet werden, wenn alle Fahrzeuge zur gleichen Kategorie gehören und vergleichbare Geschwindigkeiten aufweisen.

15.2 Dokumentation

Die Dokumentation einer SPB-Messung (siehe auch Abschnitt 13 aus ISO 11819-1) muss zum einen die spektralen Ereignisenergien $L_{E,M}[k, i]$ (mit k : Index der Messung und i : Terzbandindex) beinhalten und zum anderen (abgesehen von der Belageeigenschaft) alle Informationen zur Verfügung stellen, die für eine Ereignisenergieberechnung benötigt werden:

- SWISS10-Kategorie und Geschwindigkeit der erfassten Vorbeifahrten
- Lufttemperatur

- Steigung der Strasse

15.3 Auswertung

Ziel der Ermittlung des lokalen Belageinflusses ist die exakte Nachbildung der Summe der gemessenen Ereignisenergien mit dem Modell. Aus den N vermessenen Ereignissen wird dazu der totale spektrale Ereignisenergie-Messpegel $L_{E,M,tot}[i]$ berechnet:

$$L_{E,M,tot}[i] = 10 \lg \left(\sum_{k=1}^N 10^{0.1 L_{E,M}[k,i]} \right) \quad (15.1)$$

Das Korrekturtermspektrum $\Delta L_{W,R,road}[i]$ wird anschliessend so angepasst, dass die sonROAD18 Prognose des totalen Ereignisenergiepegels $L_{E,R,tot}[i]$ mit dem Messpegel $L_{E,M,tot}[i]$ übereinstimmt. Für das Set der erfassten Vorbeifahrtseignisse wird $L_{E,R,tot}[i]$ mit Gl. 15.2 berechnet,

$$L_{E,R,tot}[i] = 10 \lg \left(\sum_{k=1}^N 10^{0.1(L_W[k,c,i] - 10 \lg(v[k]) - 6.1 + A'_{atm}[i])} \right) \quad (15.2)$$

wobei $L_W[k,c,i]$ für die total vom Fahrzeug Nr. k der Kategorie c abgestrahlte Schallleistung in der Terz i gemäss Gl. 10.1 steht, $v[k]$ entspricht der Geschwindigkeit des Fahrzeugs k in km/h und $A'_{atm}[i]$ ist der spektrale Luftdämpfungsterm für 7.5 m gemäss Anhang des vollständigen Schlussberichts.

16 Belagscharakterisierung mittels SEM-Messungen

16.1 Konzept

SEM Messungen erfassen und beschreiben an einem strassennahen Mikrophonpunkt die Immissionen in Form eines energieäquivalenten Dauerschall-Terzbandpegelspektrums. Die Messsituation wird mit sonROAD18 und einer entsprechend angepassten Belagskorrektur so nachgebildet, dass die Differenzen zwischen Messung und Berechnung verschwinden. Diese Prozedur ist mit einer *Modellkalibration* vergleichbar. Besonders geeignete Messstandorte sind offene Strecken ohne Reflexionseinflüsse mit gleichförmigem Verkehrsfluss bei Geschwindigkeiten mit dominierendem Rollgeräusch.

Die notwendigen Mittelungszeiten für SEM-Messungen richten sich nach dem Verkehrsaufkommen. Es muss sichergestellt werden, dass sich fahrzeugindividuelle Besonderheiten ausmitteln, d.h. dass die Messung mindestens 200 Fahrzeuge einschliesst und diese bei typischen Geschwindigkeiten verkehren.

16.2 Dokumentation

Die Dokumentation einer SEM-Messung muss zum einen das am Mikrophon beobachtete, über die Messzeit gebildete energieäquivalente Dauerschall-Terzbandpegelspektrum $L_{eq,M,tot}[i]$ beinhalten und zum anderen (abgesehen von der Belagseigenschaft) alle Informationen zur Verfügung stellen, die für eine Immissionspegelberechnung benötigt werden:

- Messgeometrie, beinhaltend die Mikrophonhöhe und die Abstände zu allen Fahrspuren
- Bodenbeschaffenheit
- Lage, Ausrichtung und Grösse möglicher Reflexionsflächen
- fahrspuraufgelöste stündliche Verkehrsmengen in den SWISS10 Kategorien
- fahrspuraufgelöste durchschnittliche Geschwindigkeiten in den SWISS10 Kategorien
- Lufttemperatur
- Messdauer
- Steigung der Strasse
- Charakterisierung des Verkehrsflusses

16.3 Auswertung

Für die Auswertung wird die Messsituation mit sonROAD18 unter Annahme des Referenzbelags nachgebildet. Die in jeder Terz i auftretende Differenz zwischen Messung und Berechnung wird durch Anpassung des Belageinflusses $\Delta L_{W,R,road}[i]$ zum Verschwinden gebracht.

In einer offenen Situation mit hartem Boden ohne weitere reflektierende Elemente lässt sich in der Terz i der Modell-Immissionspegel $L_{eq,R,tot}[i]$ als Überlagerung der Beiträge aller Spuren gemäss Gl. 16.1 abschätzen. Dabei wird angenommen, dass im interessierenden Abstandsbereich der Bodeneffekt jenem in der Referenzdistanz von 7.5 m gleichgesetzt werden kann.

$$L_{eq,R,tot}[i] = 10 \lg \left(\sum_{s=1}^S \frac{1}{d[s]} \cdot 10^{0.1A'_{atm}[s,i]} \sum_{c=1}^{10} \frac{N[s,c]}{v[s,c]} \cdot 10^{0.1L_W[c,i]} \right) - 33.0 \quad (16.1)$$

In Gl. 16.1 bezeichnet S die Anzahl der Spuren, $d[s]$ steht für den kürzesten Abstand des Mikrophons zur Spur mit Index s und $A'_{atm}[s, i]$ entspricht der Luftdämpfung in der Terz i für die ganze Vorbeifahrt auf der Spur s . $N[s, c]$ und $v[s, c]$ sind die stündlichen Verkehrsmengen bzw. durchschnittlichen Geschwindigkeiten in der Fahrzeugkategorie c auf der Spur s . $L_W[c, i]$ ist die total von einem Fahrzeug der Kategorie c in der Terz i abgestrahlte Schalleistung gemäss Gl. 10.1. Der Luftdämpfungsterm $A'_{atm}[s, i]$ kann mit den Angaben im Anhang des vollständigen Schlussberichts abgeschätzt werden.

17 Belagscharakterisierung mittels CPX-Messungen

Die an einem Standort gültige Belagskorrektur $\Delta L_{W,R,road}[i]$ lässt sich alternativ zur SPB-, bzw. SEM-Methode mit einer CPX-Messung [29] schätzen. Das CPX-Verfahren ist sehr schnell und ermöglicht die effiziente Erfassung von Längsprofilen, erfordert aber einen Konvertierungsschritt, der die CPX-Messpegel in Ereignisenergien am Strassenrand übersetzt. Mit dieser Transformation geht eine gewisse Unsicherheit einher, da mit CPX von einem bzw. zwei Reifensätzen auf den ganzen aktuellen Fahrzeug-/Reifenpark extrapoliert wird und die Übertragungsfunktion von der CPX-Nahfeld-Mikrofonposition auf die Strassenrandposition nicht streng belagsunabhängig ist.

Für die Festlegung eines Modells zur Konvertierung von CPX-Messwerten in Belagskorrekturspektren werden geeignete Datenpaare benötigt, die für je den gleichen Standort spektrale CPX-Werte und spektrale Ereignisenergien in 7.5 m / 1.2 m darstellen. Aus den Ereignisenergie-Messungen werden anschliessend gemäss Kapitel 15 Belagskorrekturwerte $\Delta L_{W,R,road}[i]$ bestimmt und schliesslich ein funktionaler Zusammenhang $f_{CPX \rightarrow \text{Belagskorrektur}}[i]$ hergestellt.

18 Vermessen neuer Fahrzeugtypen

Empfehlungen zur Planung und Durchführung gezielter Emissionsmessungen für die Modellparameterbestimmung spezieller Fahrzeugtypen/-kategorien. Für weitergehende Ausführungen siehe den vollständigen Schlussbericht zu sonROAD18.

19 Anbindung an Ausbreitungsmodelle

Vorgaben zur Berücksichtigung der quellennahen Bodenreflexionen beim Zusammenführen des sonROAD18 Emissionsmodells und Ausbreitungsmodellen wie ISO 9613-2 oder sonX. Für weitergehende Ausführungen siehe den vollständigen Schlussbericht zu sonROAD18.

20 Vergleich mit StL-86+

Der Vergleich mit StL-86+ erfolgt hier anhand des prognostizierten Mittelungspegels $L_{eq,A}$ in 1 m Abstand. Diese Grösse entspricht direkt dem Emissionswert von StL-86+. In sonROAD18 wurde zuerst aus den Terzpegeln und unter Berücksichtigung der A-Bewertung ein A-bewerteter Schalleistungspegel $L_{W,A}[c]$ gebildet und anschliessend entsprechend der Herleitung in Gl. 10.20 gemäss

$$L_{eq,A} = 10 \lg \left(\sum_{c=1}^{10} \frac{N[c]}{v[c]} \cdot 10^{0.1 L_{W,A}[c]} \right) - 33.0 \quad (20.1)$$

ein $L_{eq,A}$ in 1 m Abstand bestimmt. Der Vergleich untersucht nur die Emissionen, mögliche Abweichungen in der Ausbreitungsrechnung werden hier nicht diskutiert.

20.1 Geschwindigkeitsabhängigkeit von Personenwagenemissionen

Die Abbildung 20.1 zeigt unter Referenzbedingungen die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Emissionswerte für Personenwagen (1 PW/h) auf dem Referenzbelag ACMR8. Sowohl bei sonROAD18 als auch bei StL-86+ wurde die Belagskorrektur = 0 gesetzt. Generell zeigt die Geschwindigkeitsabhängigkeit von sonROAD18 einen steileren Verlauf. Im unteren Geschwindigkeitsbereich prognostiziert sonROAD18 tiefere, im oberen Geschwindigkeitsbereich höhere Emissionen als StL-86+. Bei $v = 50$ km/h berechnet sonROAD18 mit 46.5 dB(A) einen um 0.5 dB(A) höheren Emissionspegel als StL-86+ mit 46.0 dB(A).

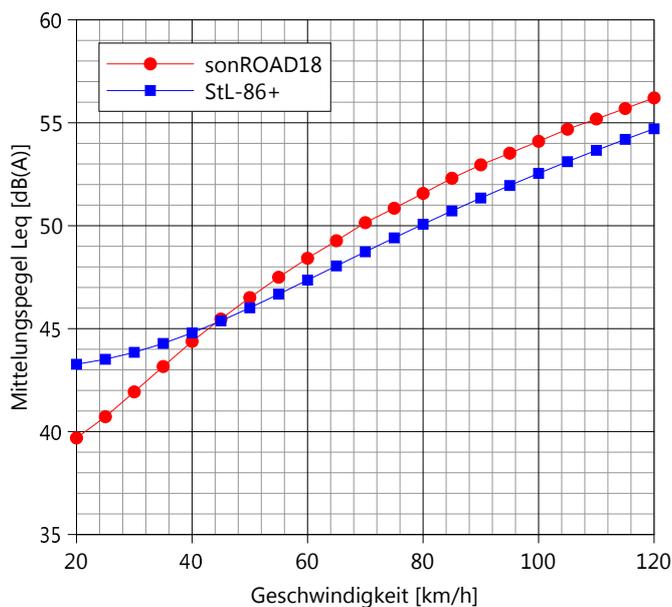


Abbildung 20.1: sonROAD18 und StL-86+ Emissionsprognose auf dem Referenzbelag in Abhängigkeit der Geschwindigkeit als $L_{eq,A}$ in 1 m Abstand für 1 PW/h.

20.2 Szenarienrechnungen

Für einen Vergleich mit realistischen Verkehrszusammensetzungen wird auf vier Szenarien basierend auf dem SWISS10-Konverter-Datensatz abgestützt. Als Modellergebnisse werden die Mittelungspegel $L_{eq,A}$ in 1 m Abstand diskutiert. Die Berechnungen nehmen jeweils Referenzbedingungen an, d.h.

- Strasse mit Referenzbelag
- Lufttemperatur: 10°C
- konstante Fahrweise

Sowohl in den sonROAD18 Berechnungen wie auch in den StL-86+ Berechnungen werden die signalisierten Geschwindigkeiten eingesetzt.

20.2.1 Ebene Sammelstrasse bei signalisierter Geschwindigkeit 30 km/h: SS-30

Die Berechnung mit sonROAD18 verwendet die in Tabelle 20.1 aufgeführten Verkehrszahlen (gemäss SWISS10-Konverter SS-30 nachts) und Geschwindigkeiten, die Berechnung mit StL-86+ basiert auf Tabelle 20.2. Die Tabelle 20.7 zeigt die Ergebnisse. Die Emission liegt gemäss sonROAD18 3.3 dB(A) tiefer als mit StL-86+ berechnet. Dies reflektiert die bekannte Beobachtung, dass StL-86+ im tiefen Geschwindigkeitsbereich die Emissionen überschätzt. Dies zeigt sich in diesem Szenario auch als Folge des relativ hohen LKW-Anteils besonders akzentuiert.

N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	v1	v2	v3	v4	v5	v6	v7	v8	v9	v10
0	49	875	0	20	0	0	23	33	0	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30

Tabelle 20.1: In der sonROAD18 Berechnung angenommene stündliche Verkehrsmengen und Geschwindigkeiten in den SWISS10-Kategorien.

Fz/h	LKW-Anteil	Geschwindigkeit
1000	0.10	30

Tabelle 20.2: In der StL-86+ Berechnung angenommene stündliche Verkehrsmenge, LKW-Anteil und Geschwindigkeit.

20.2.2 Ebene Verbindungsstrasse bei signalisierter Geschwindigkeit 50 km/h: VS-50

Die Berechnung mit sonROAD18 verwendet die in Tabelle 20.3 aufgeführten Verkehrszahlen (gemäss SWISS10-Konverter VS-50 nachts) und Geschwindigkeiten, die Berechnung mit StL-86+ basiert auf Tabelle 20.4. Die Tabelle 20.7 zeigt die Ergebnisse. Die Emission liegt gemäss sonROAD18 0.7 dB(A) tiefer als mit StL-86+ berechnet.

N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	v1	v2	v3	v4	v5	v6	v7	v8	v9	v10
10	20	900	2	44	2	1	9	8	3	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50

Tabelle 20.3: In der sonROAD18 Berechnung angenommene stündliche Verkehrsmengen und Geschwindigkeiten in den SWISS10-Kategorien.

Fz/h	LKW-Anteil	Geschwindigkeit
1000	0.05	50

Tabelle 20.4: In der StL-86+ Berechnung angenommene stündliche Verkehrsmenge, LKW-Anteil und Geschwindigkeit.

20.2.3 Verbindungsstrasse mit 5% Steigung bei signalisierter Geschwindigkeit 50 km/h: VS-50

Die Berechnung mit sonROAD18 verwendet die in Tabelle 20.3 aufgeführten Verkehrszahlen (gemäss SWISS10-Konverter VS-50 nachts) und Geschwindigkeiten. Für die Berücksichtigung der 5%-igen Steigung ist der Verkehr hälftig auf- und abwärts aufgeteilt. Die Berechnung mit StL-86+ basiert auf Tabelle 20.4, wobei auf den ganzen Verkehr die Steigungskorrektur $0.5 \cdot (5 - 3) = 1$ dB angewendet wurde. Die Tabelle 20.7 zeigt die Ergebnisse. Die Emission liegt gemäss sonROAD18 1.5 dB(A) tiefer als mit StL-86+ berechnet. Bezogen auf die Differenz für die flache Strecke nimmt der Unterschied an der Steigung zu, da StL-86+ eine grössere Steigungskorrektur in Rechnung stellt.

20.2.4 Ebene Hochleistungsstrasse bei signalisierter Geschwindigkeit 120 km/h: HLS-4-N-120

Die Berechnung mit sonROAD18 verwendet die in Tabelle 20.5 aufgeführten Verkehrszahlen (gemäss SWISS10-Konverter HLS-4-N-120 nachts) und Geschwindigkeiten, die Berechnung mit StL-86+ basiert auf Tabelle 20.6. Die Tabelle 20.7 zeigt die Ergebnisse. Die Emission liegt gemäss sonROAD18 0.9 dB(A) höher als mit StL-86+ berechnet.

N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	v1	v2	v3	v4	v5	v6	v7	v8	v9	v10
5	7	821	5	95	5	3	16	19	23	100	120	120	80	120	80	80	80	80	80

Tabelle 20.5: In der sonROAD18 Berechnung angenommene stündliche Verkehrsmengen und Geschwindigkeiten in den SWISS10-Kategorien.

Fz/h	LKW-Anteil	Geschwindigkeit
1000	0.05	120

Tabelle 20.6: In der StL-86+ Berechnung angenommene stündliche Verkehrsmenge, LKW-Anteil und Geschwindigkeit.

20.2.5 Resultatzusammenstellung

Die Tabelle 20.7 stellt die oben gefundenen Ergebnisse in einer Übersicht zusammen.

Szenario	sonROAD18	StL-86+	sonROAD18 - StL-86+
SS-30, eben	74.8	78.1	-3.3
VS-50, eben	77.5	78.2	-0.7
VS-50, 5% Steigung	77.8	79.2	-1.5
HLS-4-N-120, eben	86.7	85.8	+0.9

Tabelle 20.7: Ergebnisse des Vergleichs der sonROAD18 und StL-86+ Berechnungen in dB(A). Die Pegel sind als $L_{eq,A}$ in 1 m Abstand zu verstehen.

21 Schätzung des A-bewerteten maximalen Vorbeifahrtpegels

21.1 Ausgangslage

sonROAD18 verwendet als Emissionscharakterisierung die abgestrahlte Schallleistung L_W einer stellvertretenden omnidirektionalen Punktquelle, die als Zielgrösse die korrekte Ereignisenergie bei einer Vorbeifahrt erzeugt. Damit wird der Mittelungspegel als LSV-relevante Basisgrösse richtig reproduziert. Die durch diese Strategie ausgemittelte horizontale Richtcharakteristik kann allerdings geschwindigkeits- und fahrzeugkategorienabhängig zu einer systematischen Überschätzung des Maximalpegels einer Vorbeifahrt führen. Hier wird anhand von Messungen ein Korrekturterm ΔK_{\max} abgeleitet, der die Schätzung des Maximalpegels anhand des Schallleistungspegels ermöglicht. Dazu wird für den wahren A-bewerteten Maximalpegel $L_{\max,7.5m,A}$ in der Referenzdistanz $d = 7.5$ m angesetzt:

$$L_{\max,7.5m,A} = L_{W,A} - 20 \log(d) - 8 + \Delta K_{\max} = L_{W,A} - 25.5 + \Delta K_{\max} \quad (21.1)$$

wobei $L_{W,A}$ dem A-bewerteten Schallleistungspegel entspricht.

21.2 Datenanalyse

Wie die zusammengefasste Auswertung der MFM-U Daten (Kapitel 4) gezeigt hat, betragen bei Autobahngeschwindigkeiten in den SWISS10 Kategorien 3 bis 6 (PW und Lieferwagen) die Maximalpegelüberschätzungen ohne Korrektur rund 1 bis 2 dB(A). Für die weitere Analyse in der PW Kategorie werden zusätzliche eigene Messungen bzw. Daten aus der Literatur herangezogen. Tabelle 21.1 und Abbildung 21.1 listen die berücksichtigten Messkampagnen auf und zeigen die entsprechend gefundenen Korrekturen ΔK_{\max} .

Standort	Geschw.	Steigung [%]	Belag	ΔK_{\max}
Camignolo	120	0	SDA8	-1.6
Moleno	120	0	SDA8	-1.3
Reiden	120	0	SMA11	-2.1
Rothenbrunnen	100	0	SDA8	-1.5
Magden	80	0	AC11	-0.6
Rümikon	80	0	ACMR8	-1.2
Frenkendorf	60	0	Beton	-2.0
Amsteg	60	0	ACMR11	-1.0
Michelstrasse	30	9		0.5
Kuerbergstrasse	30	14		0.2
Langensteinenstrasse	30	7		0.9
Zofingen G+P [30]	50	0	SDA4b	-0.2
Zofingen G+P [30]	30	0	SDA4b	-0.2
Kappel G+P [30]	50	0	ACMR8	-0.1
Kappel G+P [30]	30	0	ACMR8	0.5

Tabelle 21.1: Messkampagnen für die Ermittlung der Korrektur ΔK_{\max} .

Die Korrektur ΔK_{\max} zeigt eine Geschwindigkeitsabhängigkeit, die für Personenwagen und Lieferwagen (SWISS10-Fahrzeugkategorien 3...6) entsprechend Gl. 21.2 geschätzt werden kann.

$$\Delta K_{\max} = 0.9 - 0.0227 \cdot v \quad [\text{dB(A)}], \quad v \geq 20 \text{ km/h} \quad (21.2)$$

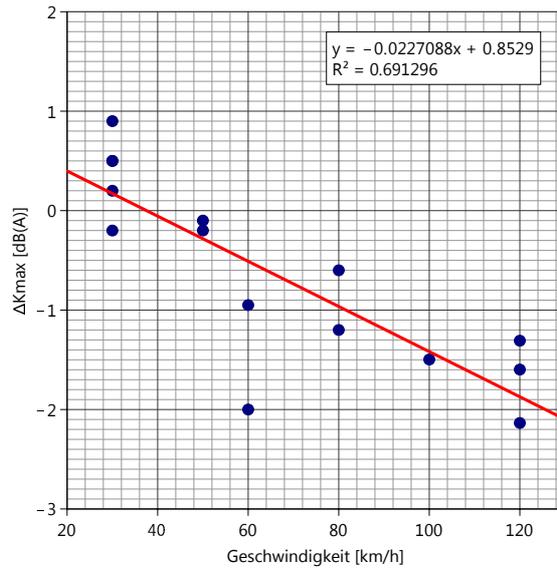


Abbildung 21.1: Aus den Messdaten abgeleitete Maximalpegelkorrekturen ΔK_{\max} in Abhängigkeit der Geschwindigkeit sowie lineare Trendlinie.

Bei tiefen Geschwindigkeiten bzw. für die SWISS10-Fahrzeugkategorien 1,2,7...10 deuten die Daten auf $\Delta K_{\max} = 0$. Dieses Verhalten weist eine Korrelation mit der Bedeutung des Reifengeräusches auf. In der Referenz [10] wird vor diesem Hintergrund eine unrunde horizontale Richtcharakteristik des Reifengeräusches zur Abbildung dieses Effekts vorgeschlagen. Ein quantitativer Vergleich der Geschwindigkeitsabhängigkeit von ΔK_{\max} und des relativen Anteils des Reifengeräusches am Gesamtgeräusch zeigt allerdings, dass eine geschwindigkeitsunabhängige und ausschliesslich auf das Reifengeräusch angewendete Richtcharakteristik die Werte aus Tabelle 21.1 bzw. Abbildung 21.1 nicht modellieren kann.

Literaturverzeichnis

- [1] Lärmschutzverordnung (LSV) vom 15. Dezember 1986 (Stand am 1. Januar 2016).
- [2] Computermodell zur Berechnung von Strassenlärm, Empa Dübendorf, Schriftenreihe Umweltschutz Nr. 60, Bundesamt für Umweltschutz, 1987; sowie Mitteilungen zur Lärmschutzverordnung (LSV) Nr. 6, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), 1995.
- [3] Heutschi K: SonRoad - Berechnungsmodell für Strassenlärm, Schriftenreihe Umwelt Nr. 366, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, BUWAL, Bern, 2004.
- [4] Richtlinie EU 2015/996 der Kommission, vom 19. Mai 2015, zur Festlegung gemeinsamer Lärmbewertungsmethoden gemäß der Richtlinie 2002/49/EG des Europäischen Parlaments und des Rates.
- [5] Richtlinie Nr. 13012 "Verkehrszähler", Bundesamt für Strassen ASTRA, 2009.
- [6] S. J. Shilton, F. Anfosso Ledee, H. van Leeuwen, Conversion of existing road source data to use CNOSSOS-EU, 469-474, EuroNoise 2015.
- [7] J. T. Broch, Principles of experimental frequency analysis, Elsevier Science Publishers, 1990.
- [8] K. Heutschi, SonRoad: New Swiss Road Traffic Noise Model, Acta Acustica united with Acustica, vol. 90, 548-554, 2004.
- [9] K. Heutschi, On single event measurements of heavy road vehicles in freely flowing traffic, Acta Acustica united with Acustica, vol. 94, 709-714, 2008.
- [10] H.G. Jonasson, Acoustical Source Modelling of Road Vehicles, Acta Acustica united with Acustica, vol. 93, 173-184, 2007.
- [11] T. Ziegler, E. Bühlmann, S. Egger, E. Hammer, Grolimund + Partner AG, Grundlagen zur Beurteilung der Lärmwirkung von Tempo 30, Forschungsprojekt VSS 2012/214, 2017.
- [12] A. Bernasconi, N. Notari, Bestimmung des Alterungsverhaltens der Beläge nach SPB an den MFM-U Standorten unter Berücksichtigung der vor Ort bestimmten Temperaturkoeffizienten, IFEC Dokument 160755 B 05, 2016.
- [13] www.COMPETT.org
- [14] L. M. Iversen, G. Marbjerg, H. Bendtsen, Noise from electric vehicles - 'state-of-the-art' literature survey, Internoise, 2013.
- [15] R. S. H. Skov, L. M. Iversen, Noise from electric vehicles - measurements, COMPETT WP3, 25.03.2015.
- [16] <http://forever.fehrl.org>
- [17] M. A. Pallas, M. Bérengier, J. Kennedy, P. Morgan, S. Gasparoni, R. Wehr, Noise emission levels for electric and hybrid vehicles - First results of the FOREVER project, Proc. Transport Research Arena 2014 (TRA2014).
- [18] M. A. Pallas, M. Bérengier, M. Muirhead, P. Morgan, How to consider Electric and Hybrid Electric vehicles in CNOSSOS-EU predicting method?, Proceedings of Forum Acusticum, 2014.

- [19] M. A. Pallas, M. Bérengier, R. Chatagnon, M. Czuka, M. Conter, M. Muirhead, Towards a model for electric vehicle noise emission in the European prediction method CNOSSOS-EU, *Applied Acoustics* 113, 89 - 101, 2016.
- [20] J. W. Biermann, S. Ruschmeyer, Sustainable noise reduction and enhanced passenger comfort using hybrid diesel-electric urban buses, *Internoise*, 2012.
- [21] M. A. Pallas, R. Chatagnon, J. Lelong, Noise emission and noise sources of a hybrid bus, *Internoise*, 2013.
- [22] M. A. Pallas, R. Chatagnon, J. Lelong, Noise emission assessment of a hybrid electric mid-size truck, *Applied Acoustics*, 2013.
- [23] S. Gasparoni, M. Czuka, R. Wehr, M. Conter, M. A. Pallas, M. Bérengier, FOREVER Impact of low-noise tyres on electric vehicle noise emission, WP3 Final Report, 2015.
- [24] M. Czuka, M. A. Pallas, P. Morgan, M. Conter, Impact of potential and dedicated tyres of electric vehicles on the tyre-road noise and connection to the EU noise label, *Proceedings of 6th Transport Research Arena*, 2016.
- [25] J. Kragh, J. Oddershede, NordTyre - Car tyre labelling and Nordic traffic noise, *Internoise*, 2013.
- [26] B. Swieczko-Zurek, J. Ejsmont, G. Ronowski, How efficient is noise labeling of tires?, *ICSV 21*, 2014.
- [27] UN (ECE) Regulation No. 117 Rev. 3, Uniform provisions concerning the approval of tyres with regard to rolling sound emissions and/or to adhesion on wet surfaces and/or to rolling resistance, 2014.
- [28] Ermittlung der durch Motorräder verursachten akustischen Immissionen im Nationalpark, *Empa Untersuchungsbericht Nr. 455'585*, 2010.
- [29] ISO/FDIS 11819-2:2016(E), *Acoustics - Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise - Part 2: The close-proximity method*.
- [30] C. Ammann, K. Heutschi, S. Rüttener, Potenzial von Temporeduktionen innerorts als Lärmschutzmassnahme, *Zeitschrift für Lärmbekämpfung*, vol. 11, 43-49, 2016.
- [31] S. Egger, SONROAD18 - BELAGSDATEN GROLIMUND + PARTNER AG DOKUMENTATION VERFÜGBARER DATEN, 30. Mai 2017.
- [32] Hartmann & Sauter, Verkehrsdaten Stadt Chur 2016, Gesamtbericht im Auftrag des Amtes für Natur und Umwelt Kanton Graubünden, 2017.
- [33] J.M. Wunderli, R. Pieren, M. Habermacher, D. Vienneau, C. Cajochen, N. Probst-Hensch, M. Rössli, M. Brink, Intermittency Ratio - A metric reflecting short-term temporal variations of transportation noise exposure, *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 1-11, 2015.
- [34] F. Lange, Anfahrbeschleunigungen, *VRR VerkehrsRechtsReport*, vol. 10, 377-382, 2006.
- [35] ifec: Vergleich der Lärmemissionen von Winter- und Sommerpneus an den MfM-U Messstandorten: Kurzbericht, im Auftrag des BAFU, 2017.
- [36] ISO/IEC. Uncertainty of measurement - Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995). Guide 98-3. Geneva, Switzerland: International Organisation for Standardization (ISO) and International Electrotechnical Commission (IEC); 2008.
- [37] A. Bernasconi, N. Notari, D. Bozzolo, Untersuchung der akustischen Alterung von Belägen nach SPB-Verfahren unter Berücksichtigung der vor Ort bestimmten Temperatur- und Geschwindigkeitskoeffizienten, *DAGA 2017*, 125-128.

- [38] Basler & Hofmann AG, Lärmmessungen T30 Stadt Zürich, Protokoll Langzeitmessung, 10.01.2014.
- [39] T. Boss, Grolimund & Partner AG, T30-Versuch Kalchbühlstrasse, Stadt Zürich, Akustische Begleitmessungen, im Auftrag des Umwelt- und Gesundheitsschutz Zürich UGZ, A3267, 16. Oktober 2009, ergänzt 16. November 2010.
- [40] Ch. Ammann, Grolimund & Partner AG, Potential von Temporeduktionen innerorts als Lärm-schutzmassnahme, Studie im Auftrag der Stadt Zürich und Kanton Aargau, A4398, 16.01.2015.

A Übersicht der Anhänge des Schlussberichts

Die folgenden Anhänge sind im vollständigen Schlussbericht zu finden:

- Kategorienabhängige Fahrzeuglängen
- Sämtliche MFM-U Auswertungen
- Auswertungen Kombinierbarkeit Reifen- und Belagswirkung
- Auswertungen zur gefahrenen Geschwindigkeit
- Weibullparameter zur Charakterisierung der Abstände zwischen zwei Fahrzeugen
- Rechenbeispiele: Ergebnisse
- Schallausbreitung in der Referenzgeometrie über hartem und weichem Boden
- Zusammenhang zwischen arithmetischem und energetischem Mittelwert
- Spektrale Luftdämpfungen
- Hinweise zu Korrekturen für Beschleunigungsvorgänge (Knoten und Kreisel)
- Konformitätserklärung