

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

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.

Zitiervorschlag

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

PDF-Download

Dieser Bericht kann auf der BAFU-Webseite (www.bafu.admin.ch) heruntergeladen werden.

Eine gedruckte Fassung kann nicht bestellt werden.

Diese Publikation ist ausschliesslich in deutscher Sprache verfügbar. Eine Kurzfassung dieses Berichts ist in deutscher, französischer und italienischer Sprache verfügbar.

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
4.1	Datenbasis	12
4.2	Auswertung von Ereignisenergien	13
4.3	Auswerteschritte	16
4.4	Anzahl gültige Ereignisse	20
4.5	Ergebnisse für die Gesamtschallleistung	21
4.6	Ergebnisse für die Schallleistungspektren	26
4.7	Auswirkungen nasser Fahrbahn auf die Schallleistung	29
5	Zusätzliche Einzelereignis- und Leq-Messungen	31
5.1	Messunsicherheit	31
5.2	Allgemeine Auswerteprozedur für Einzelereignismessungen	31
5.3	Einzelereignismessung Frenkendorf: Tempo 60	32
5.4	Einzelereignismessung Amsteg: Tempo 60	38
5.5	Diskussion der Pegel-Ortsverläufe der Einzelereignis Tempo 60 Messungen	43
5.6	Einzelereignismessung Michelstrasse Tempo 30, Steigung: 9 %	45
5.7	Einzelereignismessung Kürbergstrasse Tempo 30, Steigung: 14 %	48
5.8	Einzelereignismessung Langensteinstrasse Tempo 30, Steigung: 7 %	51
5.9	Diskussion der Pegel-Ortsverläufe der Einzelereignis Tempo 30 Messungen	53
5.10	Validierungsmessung Tobelhofstrasse: Tempo 50 und Steigung 7.5%	54
5.11	Validierungsmessung Gsteigstrasse: Tempo 50 und Steigung 13%	55
5.12	Validierungsmessung Fällanden: Tempo 50 und Steigung 7.2%	55
5.13	Einzelereignismessung Vauffelin im Stillstand	58
6	Vertikale Abstrahlcharakteristik	60
6.1	Methoden und Messgeräte	60
6.2	Messungen	61
6.3	Resultate	64
6.4	Modell zur Beschreibung der vertikalen Abstrahlcharakteristik	69
7	Emissionsdaten von Elektro- und Hybridfahrzeugen	71
7.1	Vorhandene Emissionsdaten in der Literatur	71
7.2	Bereifung von Elektrofahrzeugen	73

8	Messungen zur Untersuchung der Kombinierbarkeit der Reifen- und Belagswirkung	74
8.1	Untersuchte Reifen und Beläge	74
8.2	Messungen	75
8.3	Auswertungen und Ergebnisse	75
8.4	Diskussion	78
9	Schätzung der Modell-Koeffizienten	79
9.1	Annahmen und Anpassstrategie	79
9.2	Messwertumrechnung auf Schallleistungspegel	79
9.3	Messdatenliste für die Modellanpassung	79
9.4	Belagseinfluss	81
10	Emissionsmodellformulierung sonROAD18	82
10.1	Referenzbedingungen	82
10.2	Quellenhöhe	82
10.3	Modell-Eingangsdaten	82
10.4	Fahrzeugkategorien	82
10.5	Abgestrahlte Schallleistung	84
10.6	A-Pegel Geschwindigkeitsabhängigkeit des Antriebs- und Rollgeräusches	90
10.7	Sommer- / Winterreifen	92
10.8	Stausituationen	92
10.9	Fahrzeugindividuelle Emissionsvariation	92
10.10	Schätzung des Leq in 1 m Abstand	93
11	SWISS10-Konverter	95
11.1	Einleitung	95
11.2	Klassierung der Strassen	95
11.3	Datenbasis	96
11.4	Auswertung	96
11.5	Verteilungs-Dichtefunktionen der zeitlichen Abstände	97
12	Validierung des Modells	99
12.1	Validierungsmessungen	99
12.2	Berechnung Mittelungspegel Leq	100
12.3	Resultate der Validierung	101
13	Modellunsicherheit	104
13.1	Modellfehler	104
13.2	Eingangsdatenfehler	104
14	Rechenbeispiele	106
15	Belagscharakterisierung mittels SPB-Messungen	107
15.1	Konzept	107
15.2	Dokumentation	107
15.3	Auswertung	108
16	Belagscharakterisierung mittels SEM-Messungen	109
16.1	Konzept	109
16.2	Dokumentation	109
16.3	Auswertung	109
17	Belagscharakterisierung mittels CPX-Messungen	111
18	Vermessen neuer Fahrzeugtypen	112

19 Anbindung an Ausbreitungsmodelle	113
19.1 Schnittstelle zum Ausbreitungsmodell ISO 9613-2	113
19.2 Schnittstelle zu sonX	113
20 Vergleich mit StL-86+	116
20.1 Geschwindigkeitsabhängigkeit von Personenwagenemissionen	116
20.2 Szenarienrechnungen	116
21 Schätzung des A-bewerteten maximalen Vorbeifahrtpegels	119
21.1 Ausgangslage	119
21.2 Datenanalyse	119
Literaturverzeichnis	121
A Kategorienabhängige Fahrzeuglängen	124
B Sämtliche MFM-U Auswertungen	126
B.1 Ergebnisse für die Gesamtschallleistung	126
B.2 Ergebnisse für die Schallleistungsspektren	142
C Auswertungen Kombinierbarkeit Reifen- und Belagswirkung	159
C.1 Resultate lineare Regression	159
C.2 Spektrale Resultate pro Reifen und Belag	162
C.3 Spektrale Resultate der Beläge	170
D Auswertungen zur gefahrenen Geschwindigkeit	172
E Weibullparameter zur Charakterisierung der Abstände zwischen zwei Fahrzeugen	174
F Rechenbeispiele: Ergebnisse	178
G Schallausbreitung in der Referenzgeometrie über hartem und weichem Boden	187
H Zusammenhang zwischen arithmetischem und energetischem Mittelwert	188
I Spektrale Luftdämpfungen	189
J Hinweise zu Korrekturen für Beschleunigungsvorgänge (Knoten und Kreisel)	190
J.1 CNOSSOS	190
J.2 Beschleunigungsvorgangssimulation	190
K Konformitätserklärung	194

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-Vorbeifahrtmessungen 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 Pilonel, 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.

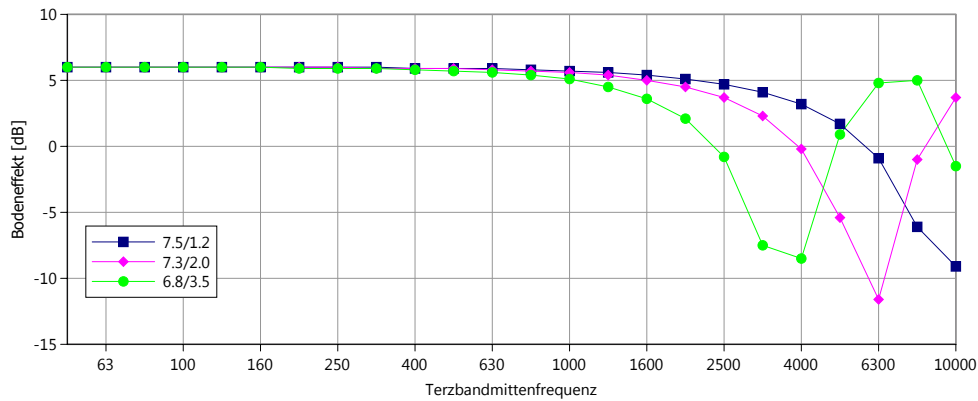


Abbildung 3.1: Resultierendes Bodeneffektspektrum für eine Punktquelle 0.05 m über hartem Boden auf verschiedenen Empfängerhöhen bei konstant gehaltenem Abstand.

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

Die Basisdaten für die Schätzung der sonROAD18 Modell-Koeffizienten stammen aus dem vom BAFU geleiteten Strassenlärmmonitoring MFM-U¹, das seit 2004 an fünf Autobahnstandorten auf der Nord-Südachse betrieben wird.

4.1 Datenbasis

An den vier MFM-U Standorten:

- Camignolo, A2, TI
- Moleno, A2, TI
- Reiden, A2, TI
- Rothenbrunnen, A13, GR

wurden folgende, im Jahre 2015 verfügbare Daten:

- Einzelereignisregistrierungen an der jeweiligen automatischen Strassenverkehrszählstation
- alle 9 Tage eine 24 stündige hochaufgelöste (alle 100ms) Messung der spektralen (Terzen) Schalldruckpegel auf beiden Seiten der Autobahn (Mikrofonkanal 1/2)

für die Auswertung herangezogen. Die Tabelle 4.1 zeigt die wesentlichen Eigenschaften der einzelnen Standorte, die Abbildung 4.1 zeigt die Geometriedefinition.

	v-sig [km/h]	Belag	Alter [Jahre]	d [m]	h_m [m]	$d_{\text{Fahrspur-Mik}}$ [m]
Camignolo	120	SDA8	2	6.7	3.2	7.4
Moleno	120	SDA8	4	6.7	3.2	7.4
Reiden	120	SMA11	> 12	6.5	3.5	7.4
Rothenbrunnen	100	SDA8	2	6.5	3.2	7.2

Tabelle 4.1: MFM-U Standortparameter mit dem Belagsalter aus Sicht 2015.

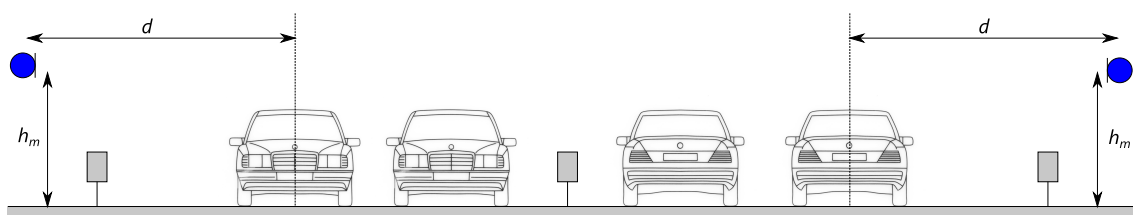


Abbildung 4.1: Geometrieparameter zur Charakterisierung der MFM-U Standorte.

Im Jahr 2014 wurden von der Grolimund + Partner AG CPX-Messungen an allen MFM-U Standorten durchgeführt. Die Tabelle 4.2 zeigt die gefundenen Belagsgütwerte für die Normalspuren in Richtung Nord bzw. Süd. Für die Beläge in Camignolo und Rothenbrunnen wurden überdies im Jahre 2013 die in Tabelle 4.3 aufgelisteten physischen Parameter² bestimmt.

¹<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/verkehr/monitoring-flankierende-massnahmen-umwelt-mfm-u/studien-mfm-u.html#23850120>

²Grolimund + Partner AG: Schlussbericht Bereinigung Belageinfluss an MFM-U Standorten, 2018.

	PW-Süd	PW-Nord	LKW-Süd	LKW-Nord
Camignolo	-3.0	-1.9	-1.0	-0.4
Moleno	2.7	0.9	0.9	1.3
Reiden	1.0	1.5	1.4	1.5
Rothenbrunnen	-2.9	-2.8	-0.6	-0.9

Tabelle 4.2: MFM-U Belagsgütewerte in dB(A) auf der Normalspur in beide Richtungen für PW und LKW anhand von CPX-Messungen aus dem Jahr 2014.

	Camignolo	Rothenbrunnen
Mischgutsorte	ACMR8	ACMR8
Sieb 00.063 [%]	7.2	6.4
Sieb 00.500 [%]	13.4	-
Sieb 01.000 [%]	17.2	13.9
Sieb 02.000 [%]	24.1	21.8
Sieb 04.000 [%]	34.8	40.3
Sieb 08.000 [%]	94.8	96.0
Sieb 11.200 [%]	100	100
löslicher Bindemittelanteil [%]	5.77	5.54
HR Marshall [%]	7.4	6.9
HR Bohrkern [%]	8.1	10.1
Schichtdicke [mm]	35	28
Verdichtungsgrad [%]	99.3	96.5

Tabelle 4.3: Physische Parameter der Beläge an den MFM-U Standorten Camignolo (am 10.6.2013) und Rothenbrunnen (am 17.7.2013).

4.2 Auswertung von Ereignisenergien

Die Charakterisierung der spektralen Eigenschaften eines vorbeifahrenden Fahrzeuges erfolgt sinnvollerweise mittels des Terzbandspektrums der Ereignisenergie. Das Abstützen auf individuelle Ereignispegelmessungen wird auch in [6] empfohlen. Maximalpegelspektren sind als Folge des kleinen Mittelungszeiten-Bandbreiten-Produkts mit einer relativ grossen prinzipiellen Unsicherheit behaftet [7]. Überdies fehlt bei einer Maximalpegelauswertung die Ausmittlung einer möglichen horizontalen Richtcharakteristik.

Eine Schwierigkeit der Ereignisenergiemessung liegt in der möglichen Beeinflussung des Messwerts durch Nachbarfahrzeuge. Abbildung 4.2 zeigt einen beispielhaften Pegel-Zeitverlauf für drei sich an einem Mikrophon vorbeibewegende Punktquellen.

Die Schätzung der Ereignisenergie L_E , sowohl für den A- als auch für die Terzbandpegel, erfolgt im Intervall $t_i - \Delta T_{\text{left}} \dots t_i + \Delta T_{\text{right}}$ gemäss Gl. 4.1.

$$L_E = 10 \lg \left(\sum_{n=n_1}^{n_2} 10^{0.1L[n]} \Delta t \right) \quad (4.1)$$

wobei n_1 und n_2 den Sampleindizes für die Zeitpunkte $t_i - \Delta T_{\text{left}}$ und $t_i + \Delta T_{\text{right}}$ entsprechen. $L[n]$ ist der über 0.1 s gebildete Mittelungspegel Leq, Δt ist 0.1 s (zeitliche Auflösung der Pegelinformation).

Die Intervallgrenzen werden in der Auswertung für jedes Ereignis basierend auf dem A-Pegelschrieb so gewählt, dass zu den Zeitpunkten $t_i - \Delta T_{\text{left}}$ bzw. $t_i + \Delta T_{\text{right}}$ lokale Minima im Pegel-Zeitverlauf erreicht werden (m1 bzw. m2 in Abbildung 4.2). Aus dem Pegelzeitverlauf lässt sich ein Qualitätsmass der Ereignisenergiebestimmung ableiten, indem die Pegelspannen $dB_{\text{down, left}}$ bzw. $dB_{\text{down, right}}$ vom Maximum des interessierenden Fahrzeuges zu den beiden lokalen Minima ausgewertet werden.

In die Berechnung der Ereignisenergie L_E gehen zwei Fehler ein. Zum einen wird vom interessierenden Ereignis mit der Summation von n_1 bis n_2 nicht die ganze Energie der Vorbeifahrt erfasst, zum anderen enthält die

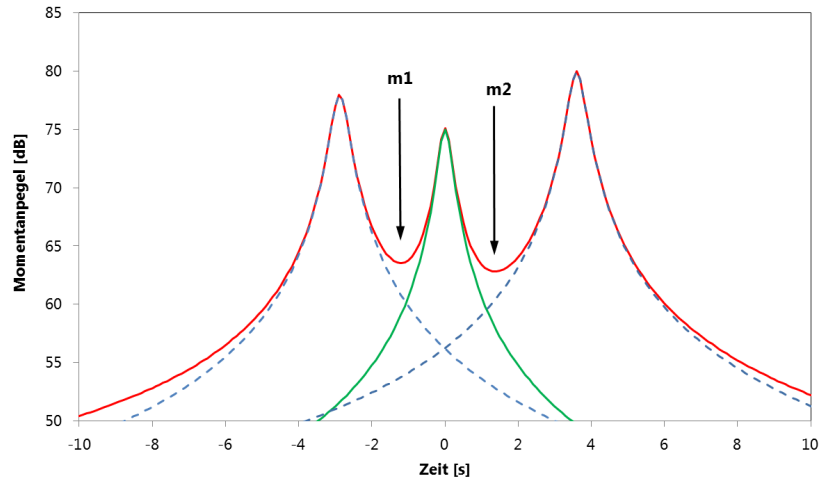


Abbildung 4.2: Exemplarischer Pegel-Zeitverlauf für drei sich an einem Mikrophon vorbeibewegende Punktquellen. Grün zeigt den Verlauf der interessierenden Quelle, blau gestrichelt sind die Verläufe der beiden Nachbarfahrzeuge. Rot zeigt den beobachtbaren Gesamtpegel.

Summe auch unerwünschte Anteile von den Nachbarfahrzeugen. Bis zu einem gewissen Grad kompensieren sich diese beiden Phänomene gegenseitig.

Die bei der Integration entstehende Unsicherheit ist umso bedeutender, je kleiner der zeitliche Abstand der Nachbarfahrzeuge zum interessierenden Fahrzeug ist. In der Auswertung wird daher eine minimale zeitliche Separation $\Delta T_{S,\min}$ gefordert, damit ein Ereignis als gültig gelabelt wird. Aus Sicht einer Fehlerminimierung der Ereignisenergie ist $\Delta T_{S,\min}$ möglichst gross zu wählen, zur Maximierung der Anzahl gültiger, verwertbarer Ereignisse sollte $\Delta T_{S,\min}$ umgekehrt natürlich möglichst klein sein.

Zur Optimierung der zu fordernden minimalen zeitlichen Separation wurden numerische Simulationen zum Ereignisenergiefehler für $\Delta T_{S,\min} = 1, 2, 3$ bzw. 4 s mit den unten aufgeführten Fahrzeugkonfigurationen angestellt. Für die Simulationen wurden die Quellen als omnidirektionale Punktquellen angenommen und lediglich die geometrische Verdünnung als Ausbreitungseffekt berücksichtigt.

1. Das interessierende und die störenden Nachbarfahrzeuge verkehren alle mit 120 km/h auf der Normalspur in 7.5 m Entfernung. Die zeitlichen Separationen variierten zwischen $\Delta T_{S,\min}$ und 10 s, die Pegel der störenden Nachbarfahrzeuge variierten zwischen -10 und $+10$ dB bzgl. des interessierenden Fahrzeugs.
2. Das interessierende und die störenden Nachbarfahrzeuge verkehren alle mit 80 km/h auf der Normalspur in 7.5 m Entfernung. Die zeitlichen Separationen variierten zwischen $\Delta T_{S,\min}$ und 10 s, die Pegel der störenden Nachbarfahrzeuge variierten zwischen -10 und $+10$ dB bzgl. des interessierenden Fahrzeugs.
3. Das interessierende und die störenden Nachbarfahrzeuge verkehren alle mit 120 km/h. Das interessierende Fahrzeug verkehrt auf der Normalspur in 7.5 m Entfernung, die störenden Nachbarfahrzeuge verkehren auf der 11.2 m entfernten Überholspur. Die zeitlichen Separationen variierten zwischen $\Delta T_{S,\min}$ und 10 s, die Pegel der störenden Nachbarfahrzeuge variierten zwischen -10 und $+10$ dB bzgl. des interessierenden Fahrzeugs.
4. Das interessierende und die störenden Nachbarfahrzeuge verkehren alle mit 80 km/h. Das interessierende Fahrzeug verkehrt auf der Normalspur in 7.5 m Entfernung, die störenden Nachbarfahrzeuge verkehren auf der 11.2 m entfernten Überholspur. Die zeitlichen Separationen variierten zwischen $\Delta T_{S,\min}$ und 10 s, die Pegel der störenden Nachbarfahrzeuge variierten zwischen -10 und $+10$ dB bzgl. des interessierenden Fahrzeugs.

Die Abbildung 4.3 zeigt die resultierenden Abweichungen der gemäss Gl. 4.1 bestimmten Ereignisenergiepegel L_E bezogen auf die wahren Werte. Dieser Fehler ist in Abhängigkeit von dB_{down} (Gl. 4.2), entsprechend dem Minimum der beiden Pegelspannen $dB_{\text{down, left}}$ bzw. $dB_{\text{down, right}}$ aufgetragen.

$$dB_{\text{down}} = \min(dB_{\text{down,left}}, dB_{\text{down,right}}) \quad (4.2)$$

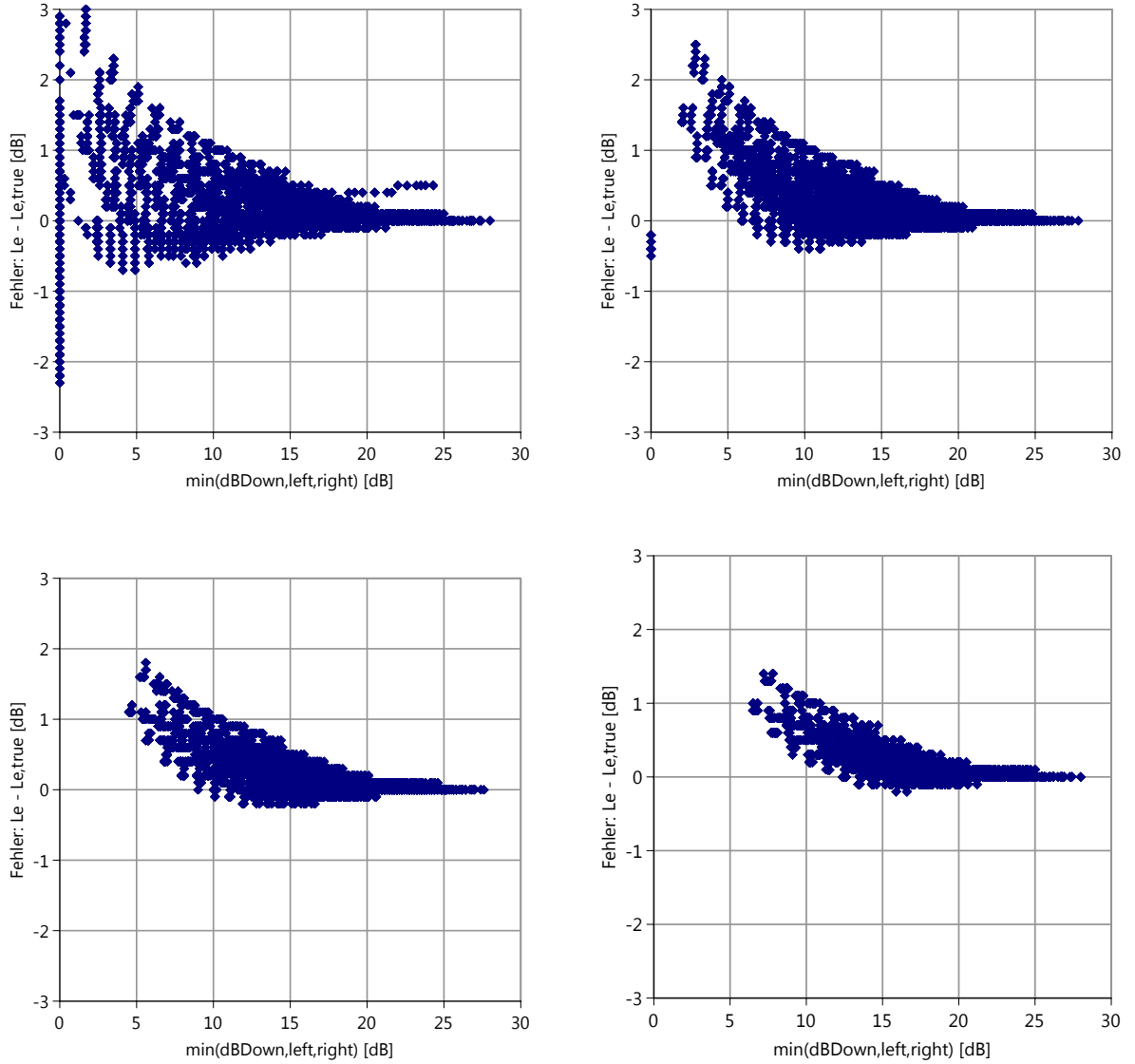


Abbildung 4.3: Fehler $e = L_E - L_{E,true}$ in der Ereignisenergiebestimmung für die untersuchten Fahrzeugkonfigurationen in Abhängigkeit des Minimums der beiden Pegelspannen $dB_{\text{down,left}}$ bzw. $dB_{\text{down,right}}$. $\Delta T_{S,\min} = 1, 2, 3$ bzw. 4 s von links oben nach rechts unten.

Wie die Abbildung 4.3 zeigt, sind für $\Delta T_{S,\min} = 3$ bzw. 4 s die Fehler e in allen untersuchten Konfigurationen kleiner als 2 dB und korrelieren relativ hoch mit dem Parameter dB_{down} . Um eine möglichst grosse Ausbeute zu erzielen wurde für die Auswertungen das Setting mit $\Delta T_{S,\min} = 3$ s festgelegt. Der Zusammenhang zwischen dB_{down} und dem Fehler e kann mit einer maximalen Abweichung von ± 0.7 dB, einer mittleren Abweichung von 0.1 dB und einer Standardabweichung von 0.2 dB durch Gl. 4.3 beschrieben werden.

$$e = 3.3 \cdot \exp(-0.2 \cdot dB_{\text{down}}) \quad (4.3)$$

Damit ergibt sich eine optimierte Schätzung L'_E der Ereignisenergie:

$$L'_E = L_E - 3.3 \cdot \exp(-0.2 \cdot dB_{\text{down}}) \quad (4.4)$$

wobei L_E der gemäss Gl. 4.1 bestimmte Ereignispegel und dB_{down} wie in Gl. 4.2 definiert ist.

4.3 Auswerteschritte

Ausgehend von der Ereignisliste mit den einzelnen Fahrzeugvorbeifahrten und dem spektralen 0.1 s Schalldruckpegelschrieb werden die unten aufgeführten Auswerteschritte durchgeführt.

4.3.1 Zeitsynchronisation von Verkehrszählerdaten und Akustikdaten

Für die Zuordnung der Vorbeifahrtereignisdaten zum Schalldruckpegelschrieb muss eine Genauigkeit von 1 s gefordert werden. Da von einem Versatz der beiden Uhren des Verkehrszählers und des akustischen Pegelschreibers ausgegangen werden muss, ist eine vorgängige Synchronisation erforderlich. Diese wird in Intervallen von einer Stunde vorgenommen. Dazu wird in jedem Stundenintervall der Zeitachsenversatz Δt der Akustikdaten bzgl. der Verkehrszähleruhr durch Maximieren der Funktion Z gefunden.

$$Z(\Delta t) = \sum_{i=1}^N L_A(t_i + \Delta t) \quad (4.5)$$

wobei die Summation über alle N Ereignisse auf der mikrofonnahen Fahrspur der entsprechenden Stunde zu verstehen ist. L_A bezeichnet den A-Pegel, t_i ist der Zeitpunkt des Vorbeifahrtereignisses mit Index i . Die Funktion Z wird für Δt in Schritten von 0.1 s in einem Suchintervall von $\Delta t_{\min}$ bis $\Delta t_{\max}$ bestimmt. Als Fangbereich wird das Intervall: $\Delta t_{\min} = -20$ s und $\Delta t_{\max} = +20$ s aufgespannt.

4.3.2 Identifikation gültiger Vorbeifahrtereignisse

In einem nächsten Auswerteschritt werden die potenziell verwertbaren, d.h. gültigen Vorbeifahrtereignisse identifiziert. Dazu wird die Ereignisliste abgearbeitet wobei folgende Bedingungen für ein gültiges Ereignis erfüllt sein müssen:

1. Das Ereignis tritt auf der äussersten, d.h. dem Mikrophon am nächsten gelegenen Fahrspur auf.
2. Innerhalb von $\pm \Delta T_{S,\min} = 3$ s um das Ereignis herum tritt kein anderes Ereignis auf der nächstgelegenen oder unmittelbar benachbarten Spur auf (zeitliche Separation).
3. Die Strasse ist trocken, d.h. in einen Zeitintervall von einer halben Stunde vor und bis und mit dem Ereignis wurde kein Niederschlag registriert (Ausnahme: Spezialauswertung *nassee Fahrbahn*, siehe Abschnitt 4.7).

In die Entscheidung, ob ein Ereignis gültig ist, geht kein *dB-down* Kriterium ein. Damit wird eine statistische Verzerrung vermieden, die Fahrzeuge mit hohem Pegel mit höherer Wahrscheinlichkeit als gültig einstufen würde [9].

4.3.3 Schätzung des A-bewerteten Maximalpegels

Für jedes Ereignis, das obige Bedingungen erfüllt und damit als verwertbar gilt, wird ausgehend von der Ereigniszeit des Verkehrszählers der A-Pegelschrieb untersucht. Innerhalb eines Suchbereichs von ± 1 s wird im A-Pegelschrieb der maximale Wert $L_{\max,A}$ gesucht und dem Ereignis zugeordnet. Man beachte, dass dieser Wert dem höchsten aufgetretenen 0.1 s Leq entspricht und nicht dem typischerweise verwendeten maximalen Fast-Pegel. Die Bestimmung des Maximalpegels wird nur für den A-bewerteten Summenpegel durchgeführt. Auf Grund der kurzen Mittelungszeit weisen die relativ schmalbandigen Terzbandpegel zu grosse Unsicherheiten auf.

4.3.4 Ermittlung der lokalen Pegelminima

Für die Schätzung der Ereignisenergie und die Bestimmung des Qualitätsmasses werden im A-Pegelschrieb die lokalen Minima zu beiden Seiten des Maximums des interessierenden Fahrzeugs benötigt. Dazu wird im A-Pegelschrieb vom Maximum ausgehend auf der Zeitachse zu beiden Seiten hin der Pegel so lange verfolgt, bis die Pegelabnahme umkehrt und der Pegel wieder anzusteigen beginnt. Der Entscheid, ob in einem A-Pegelschrieb-Testpunkt mit Index $[k]$ die globale Steigung positiv oder negativ ist, wird anhand der Mehrzahl der Gradienten $g[l]$ gefällt:

$$g[l] = L_A[k + l - 1] - L_A[k + l] \quad l = -5 \dots +5 \quad (4.6)$$

Durch diesen Test werden zufällige Pegelfluktuationen, die nicht dem globalen Trend entsprechen, ignoriert. Die so gefundenen Umkehrpunkte repräsentieren zwei Pegelminima, die in Bezug zum Maximalpegel zwei Differenzen $dB_{\text{down, left}}$ und $dB_{\text{down, right}}$ bilden. Die Sampleindices der Umkehrpunkte n_1 und n_2 werden später für die Ereignisenergiebestimmung gemäss Gl. 4.1 benötigt. Aus den beiden Grössen $dB_{\text{down, left}}$ und $dB_{\text{down, right}}$ wird das Minimum dB_{down} gebildet, welches in der Ereignispegelkorrektur entsprechend Gl. 4.4 benötigt wird und gleichzeitig das Ereignisqualitätsmass darstellt.

4.3.5 Schätzen der Ereignisenergie

Für jedes gültige Ereignis wird mit Gl. 4.1 und Gl. 4.4 die spektrale Ereignisenergie bestimmt. Die in Gl. 4.4 beschriebene Korrektur wird für den A-Pegel bestimmt und auf alle Terzbandwerte gleichermassen angewendet.

4.3.6 Vergleich der A-bewerteten Ereignisenergie und des A-bewerteten Maximalpegels

Die messtechnische Charakterisierung einer Fahrzeugvorbeifahrt kann grundsätzlich mittels des Maximalpegels oder der Ereignisenergie erfolgen. In sonRoad wurde der A-bewertete Maximalpegel verwendet, während hier für sonROAD18 wie oben ausgeführt die Ereignisenergie als Beschreibungsgrösse gewählt wird, um die durch die Zufälligkeit des rauschartigen Signals induzierte Unsicherheit in den unteren Terzbändern zu minimieren. Das Emissionsmodell nimmt grundsätzlich horizontal eine omnidirektionale Abstrahlcharakteristik an. Zur Prüfung dieser Annahme und zur Herstellung des Anschlusses der Messauswertungen in sonROAD18 an jene von sonRoad wurden die Vorbeifahrtspegelverläufe sämtlicher gültiger Ereignisse, die zusätzlich die Bedingung

$$dB_{\text{down}} = \min(dB_{\text{down, left}}, dB_{\text{down, right}}) \geq 15\text{dB} \quad (4.7)$$

erfüllten, analysiert. An jedem Standort und für jede SWISS10-Kategorie wurde aus allen Ereignissen der mittlere Pegelverlauf bestimmt. Da ein Pegel-Zeitverlauf fundamental von der Fahrzeuggeschwindigkeit abhängt, wurden die in einem fixen Zeitraster erfassten Messwerte mittels linearer Interpolation in einen Pegel-Ortsverlauf konvertiert. Hierbei blieb die endliche Schallgeschwindigkeit unberücksichtigt. Als Ortskoordinate wurde die Fahrzeugposition x längs der Strasse verwendet. Bei $x = 0$ befindet sich das Fahrzeug im Messquerschnitt, d.h. im kürzesten Abstand $d_{\text{Fahrspur-Mik}}$ (siehe Tabelle 4.1).

Die Abbildung 4.4 demonstriert exemplarische Pegelverläufe am Standort Reiden. Hierzu wurde jeweils eine Normierung auf den Maximalwert (im kürzesten Abstand erreicht) vorgenommen. Die Gegenüberstellung zeigt, dass für gewisse Fahrzeugkategorien das Abstrahlverhalten nur sehr ungenau durch eine omnidirektionale Punktquelle nachgebildet wird. Bei identischem Maximalpegel können damit die Ereignispegel wesentlich differieren (Abbildung 4.5). Diese Differenzen variieren deutlich zwischen den SWISS10-Kategorien und sind überdies standort-(belags-)abhängig. Besonders relevant erscheinen die positiven Differenzen für die SWISS10-Kategorien 3 bis 6. Im Umkehrschluss bedeutet eine positive Differenz ΔL , dass im Vergleich zu einer omnidirektionalen Punktquelle bei gleichem Ereignispegel der Maximalpegel um ΔL tiefer liegt, d.h. die Abstrahlung unter 90 Grad bzgl. der Fahrzeugachse schwächer ist. Als Grund dafür wird primär der Horneffekt vermutet. Während unter 90 Grad die Abstrahlung des Reifengeräusches in den Halbraum erfolgt, wird unter 0 und 180 Grad durch die Strassenoberfläche und den Reifen eine Trichterform gebildet, die durch eine bessere Impedanzanpassung zu einer höheren Abstrahleffizienz führt. Die beobachtete reduzierte Abstrahlung unter 90 Grad wird durch Angaben in [10] bestätigt.

Aus der Gegenüberstellung der Ereignisenergie und des Maximalpegels ist zu folgern, dass die horizontale Abstrahlcharakteristik teilweise deutlich unrund ist. In sonROAD18 bleibt dieser Aspekt unberücksichtigt, indem die abgestrahlte Leistung eines Fahrzeuges als Quellstärke einer horizontal omnidirektionalen Quelle, die die gemessene Vorbeifahrtenergie erzeugt, verstanden wird.

4.3.7 Umrechnung der Ereignisenergie in Fahrzeugschallleistung

Die Beschreibung der Emission eines Fahrzeuges erfolgt mittels der akustisch abgestrahlten Schallleistung in den Vollraum mit pauschaler Berücksichtigung der quellennahen Reflexion an der Strassenoberfläche als

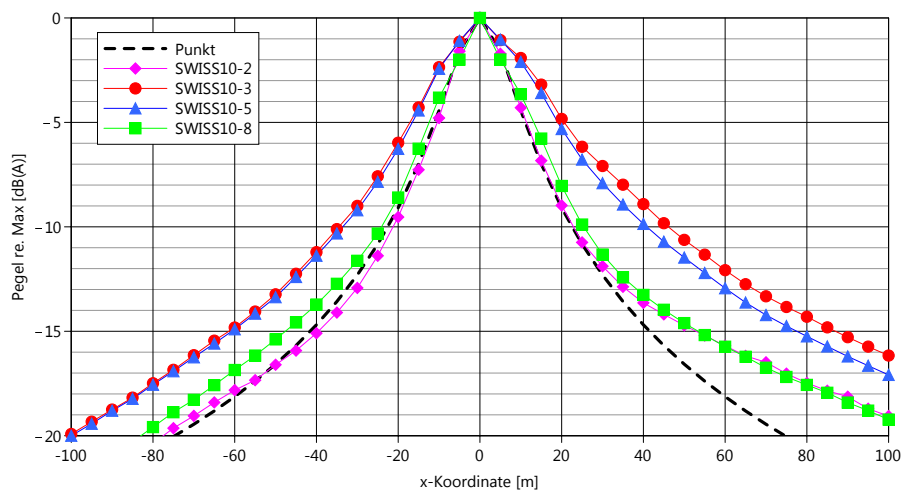


Abbildung 4.4: Mittlere Pegel-Ortsverläufe am Standort Reiden für ausgesuchte SWISS10-Kategorien im Vergleich zum Verhalten einer omnidirektionalen Punktquelle.

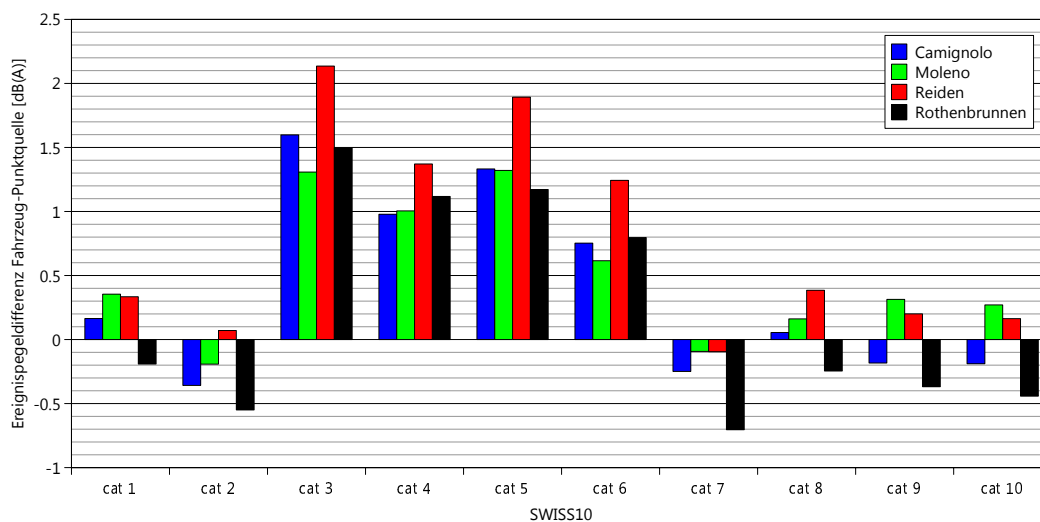


Abbildung 4.5: Ereignispegeldifferenzen der Fahrzeuge bezogen auf eine omnidirektionale Punktquelle bei gleichem Maximalpegel für alle SWISS10-Kategorien.

Verstärkung um 3 dB. Unter dem Strich kann dies als Abstrahlung in den Halbraum verstanden werden. Diese Definition des Emissionswerts entspricht jener von CNOSSOS.

Für strassennahe Empfänger folgt damit der momentane Schalldruckpegel L_p aus dem Schallleistungspegel L_W entsprechend Gl. 4.8.

$$L_p = L_W - 20 \lg(d) - 11 - A_{\text{atm}} + 3 = L_W - 20 \lg(d) - 8 - A_{\text{atm}} \quad (4.8)$$

Für die Rückrechnung von einer Schalldruckmessung auf die Quellenleistung müssen die Schallausbreitungsphänomene *geometrische Verdünnung* und *Luftdämpfung* invertiert werden. Dazu muss die Geometrie bekannt sein und es sind Annahmen zum Zustand der Atmosphäre (Luftdämpfung) zu treffen. Einem typischen Jahresmittel entsprechend wird für die Luft eine Temperatur von 8°C und eine Feuchte von 76% angesetzt.

Für die weitere Herleitung wird als Quelle eine horizontal omnidirektionale Punktquelle angenommen, die sich mit der Geschwindigkeit v [m/s] am Mikrophon vorbeibewegt. Für das Schalldruckquadrat $p^2(t)$ in Funktion

der Zeit t lässt sich schreiben:

$$p^2(t) = 2 \frac{W \rho c}{4\pi} \cdot \frac{1}{d^2 + (vt)^2} \cdot k(t) \quad (4.9)$$

mit:

W : Schallleistung der Punktquelle [W]

ρc : Freifeldimpedanz, Produkt aus Luftdichte und Schallgeschwindigkeit [kg/m²s]

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

k : quellenpositions- und damit zeitabhängige Luftdämpfung pro Terz [.]

Der Ereignispegel L_E entspricht der zeitlichen Integration des Schalldruckquadrates über die Ereigniszeit:

$$L_E = 10 \lg \left(\frac{1}{1 \text{ sec}} \int_{-t_0}^{+t_0} \frac{p^2(t)}{p_0^2} \cdot dt \right) \quad (4.10)$$

Einsetzen von Gl. 4.9 in 4.10 ergibt:

$$L_E = 10 \lg \left(\frac{1}{1 \text{ sec}} \cdot \frac{W \rho c}{2\pi p_0^2} \int_{-t_0}^{+t_0} \frac{1}{d^2 + (vt)^2} \cdot k(t) dt \right) \quad (4.11)$$

Mit der Substitution $x = vt$ ergibt sich:

$$L_E = 10 \lg \left(\frac{1}{1 \text{ sec}} \cdot \frac{1}{v} \cdot \frac{W \rho c}{2\pi p_0^2} \int_{-x_0}^{+x_0} \frac{1}{d^2 + x^2} \cdot k(x) dx \right) \quad (4.12)$$

und

$$L_E = L_W - 10 \lg(v) - 10 \lg(2\pi) + 10 \lg \left(\int_{-x_0}^{+x_0} \frac{1}{d^2 + x^2} \cdot k(x) dx \right) \quad (4.13)$$

mit:

L_W : Schallleistungspegel der Quelle

Wenn in einem hypothetischen Fall $k(x) = 1$ ist, d.h. es tritt keine Luftdämpfung auf, und für $x_0 \rightarrow \infty$, d.h. es wird über den ganzen Anteil der Vorbeifahrt integriert, lässt sich das Integral analytisch auswerten zu:

$$\int_{-x_0}^{+x_0} \frac{1}{d^2 + x^2} = \frac{\pi}{d} \quad (4.14)$$

Mit

$$A'_{\text{atm}} = 10 \lg \left(\frac{\int_{-x_0}^{+x_0} \frac{1}{d^2 + x^2} \cdot k(x) dx}{\int_{-x_0}^{+x_0} \frac{1}{d^2 + x^2} dx} \right) \quad [\text{dB}] \quad (4.15)$$

kann schliesslich geschrieben werden:

$$L_E = L_W - 10 \lg(v) - 10 \lg(2) - 10 \lg(d) + A'_{\text{atm}} \quad (4.16)$$

Wenn die Geschwindigkeit v in km/h verstanden wird, ergibt sich

$$L_W = L_E + 10 \lg(v) + 10 \lg(2) - 10 \lg(3.6) + 10 \lg(d) - A'_{\text{atm}} \quad (4.17)$$

A'_{atm} [dB] entspricht der frequenzabhängigen Luftdämpfung für die ganze Vorbeifahrt und wird numerisch bestimmt (Abbildung 4.6), siehe auch Anhang I.

Entgegen obiger Annahme zur Bestimmung der Luftdämpfung A'_{atm} erfolgt in der Auswertung der Messung die Integration nur über einen endlichen Abschnitt der Fahrzeugvorbeifahrt und erstreckt sich nicht von $-\infty$ bis $+\infty$. Eine Berechnung für unterschiedlich lange Abschnitte hat aber ergeben, dass dadurch im Spektrum Abweichungen deutlich kleiner als 0.5 dB resultieren und dieser Effekt damit vernachlässigbar ist.

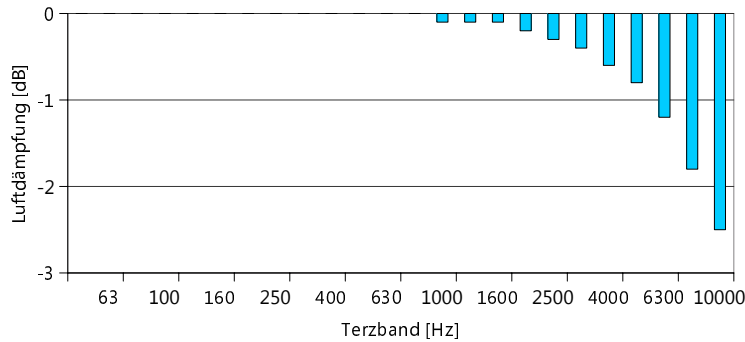


Abbildung 4.6: Aufintegrierte Luftdämpfung A'_{atm} der ganzen Vorbeifahrt einer Punktquelle in der MFM-U Geometrie.

Mit der Fahrzeuggeschwindigkeit v in km/h bestimmen sich damit die Schallleistungspegel L_W aus den an den MFM-U Standorten gewonnenen Ereignispegeln L_E zu:

$$L_W = L_E + 10 \lg(v) + 6.1 - A'_{\text{atm}} \quad (4.18)$$

mit A'_{atm} gemäss Tabelle 4.4.

≤ 800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000
0	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.4	-0.6	-0.8	-1.2	-1.8	-2.5

Tabelle 4.4: Spektraler A'_{atm} -Term in dB zur Berücksichtigung der Luftdämpfung in der MFM-U Geometrie.

4.3.8 Kompensation des Temperatureinflusses

Die Temperatur des Reifens beeinflusst dessen Steifigkeit und damit das Abstrahlverhalten. Um diesen systematischen Einfluss auf die Emission rechnerisch zu kompensieren, wurden an jedem Standort und für jede SWISS10-Kategorie die Ereignispegel der in der Tabelle 4.5 gezeigten Geschwindigkeitsklassen aufgetretenen Vorbeifahrten in 5°C breite Temperaturklassen gruppiert, anschliessend der energetische Mittelwert gebildet und schliesslich mittels linearer Regression ein Temperaturkoeffizient für das Gesamtgeräusch bestimmt. Als Temperaturmerkmal diente die an den MFM-U Standorten gemessene Lufttemperatur auf 2.6 bis 4 m Höhe. Die eigentliche Invertierung des Temperatureffekts wurde in einem zweiten Schritt vorgenommen, indem mittels der gefundenen Koeffizienten das Gesamtgeräusch jedes Ereignisses auf eine Temperatur von 10°C normiert wurde. Die sonROAD18-Modellkorrektur für den Temperatureinfluss auf das Rollgeräusch wird in Tabelle 10.7 gezeigt.

Standort	cat 1	cat 2	cat 3	cat 4	cat 5	cat 6	cat 7	cat 8	cat 9	cat 10
Cam/Mol/Rei	100	120	120	88	120	88	88	88	88	88
Rothenbrunnen	100	100	100	88	100	88	88	88	88	88

Tabelle 4.5: Verwendete Geschwindigkeitsklassen [km/h] in den einzelnen SWISS10-Kategorien für die Untersuchung des Temperatureinflusses.

4.4 Anzahl gültige Ereignisse

Die Tabellen 4.6 und 4.7 zeigen die Anzahl bzw. prozentualen Anteile der gültigen Ereignisse an den vier MFM-U Standorten. Die Werte beziehen sich nur auf die Fahrzeuge, die auf der äussersten, d.h. dem Mikrofon am

nächsten gelegenen Spur verkehrten.

	cat 1	cat 2	cat 3	cat 4	cat 5	cat 6	cat 7	cat8	cat9	cat10
Camignolo	1598	1510	143756	855	18428	872	349	3336	1840	6380
Moleno	2093	879	151711	1462	32118	1493	625	5068	4233	12820
Reiden	823	837	124257	984	20696	1485	720	5284	6484	8909
Rothenbr.	1133	1072	125250	1602	19006	1085	477	4270	1842	4900

Tabelle 4.6: Anzahl der gültigen und damit verwertbaren Ereignisse an den vier MFM-U Standorten in den SWISS10-Kategorien.

	cat 1	cat 2	cat 3	cat 4	cat 5	cat 6	cat 7	cat 8	cat 9	cat 10
Camignolo	26	14	31	17	31	20	9	26	19	25
Moleno	35	11	48	27	47	31	16	38	31	39
Reiden	22	12	32	19	32	24	11	28	26	29
Rothenbr.	32	14	52	32	51	30	17	42	30	36

Tabelle 4.7: Prozentsätze der gültigen und damit verwertbaren Ereignisse an den vier MFM-U Standorten für die SWISS10-Kategorien. *Lesebeispiel: Von allen Kategorie 3 Fahrzeugen, die auf der äussersten Spur in Camignolo verkehrten, konnten 31% ausgewertet werden.*

4.5 Ergebnisse für die Gesamtschallleistung

4.5.1 Reiden - Mikrofonkanal 1 (Richtung Süden)

In den folgenden Abbildungen werden exemplarisch für den Mikrofonkanal 1 (Richtung Süden) am Standort Reiden die Auswertungen des A-bewerteten Schallleistungspegels in Abhängigkeit der Geschwindigkeit gezeigt (die Ergebnisse sämtlicher Standorte finden sich im Anhang B). Dazu wurden die Schallleistungen sämtlicher gültiger Vorbeifahrten an einem Mikrofon getrennt für alle SWISS10-Kategorien in Geschwindigkeitsklassen à 4 km/h Breite zusammengefasst. Für jede Geschwindigkeitsklasse wurde dann der energetische und der arithmetische Mittelwert sowie die Standardabweichung bestimmt.

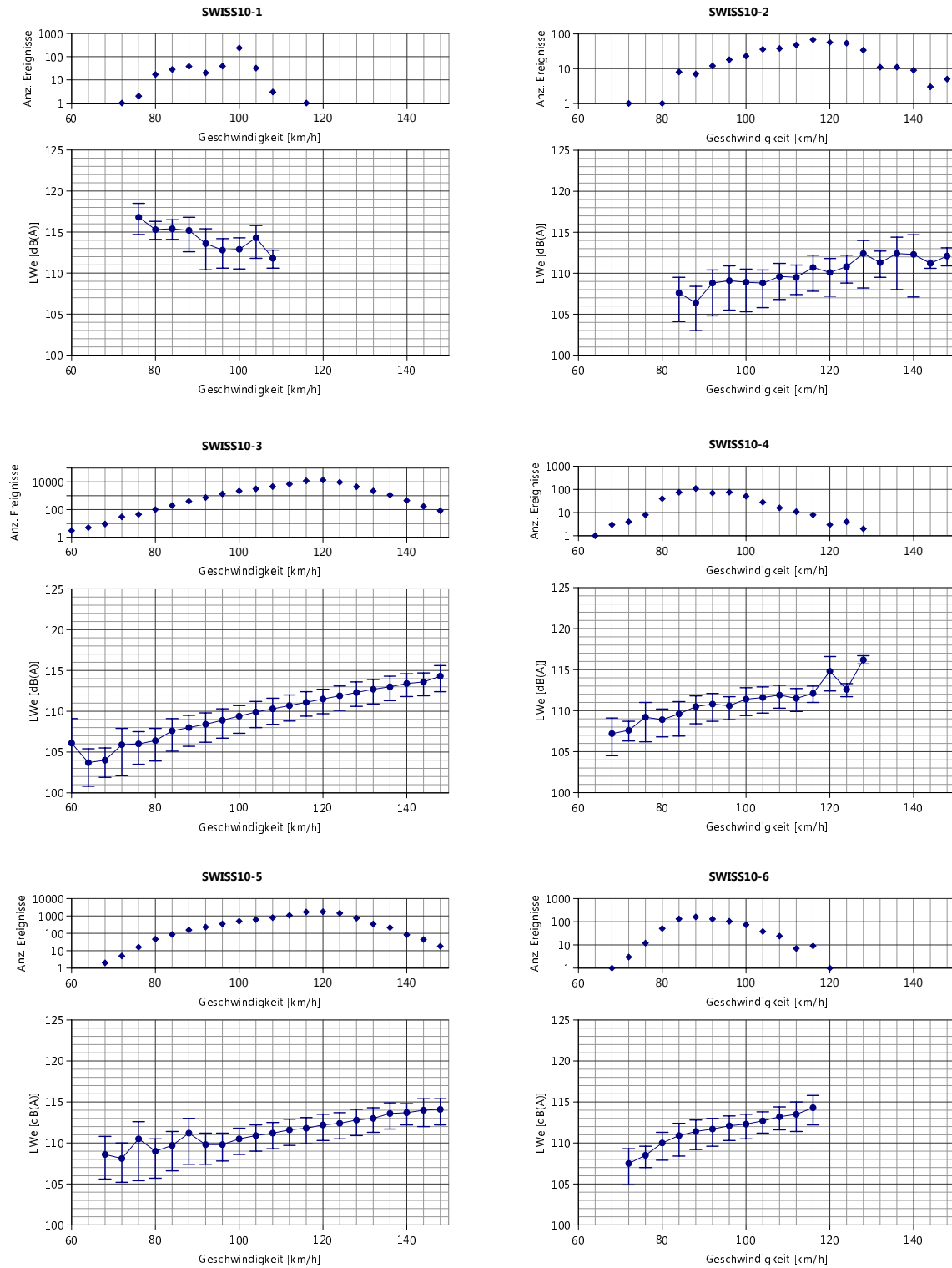


Abbildung 4.7: In Geschwindigkeitsklassen à 4 km/h energetisch gemittelte Schallleistungspegel für die SWISS10-Kategorien 1...6 am Standort Reiden und den Mikrophonkanal 1 (Richtung Süden). Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den arithmetischen Pegelmittelwert auf. Zusätzlich sind die Anzahl Fahrzeuge pro Geschwindigkeitsklasse gezeigt.

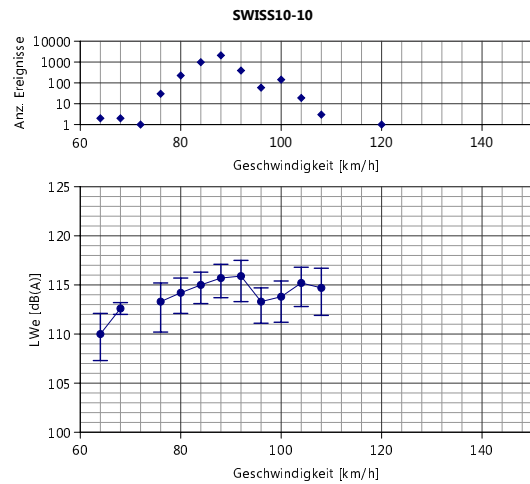
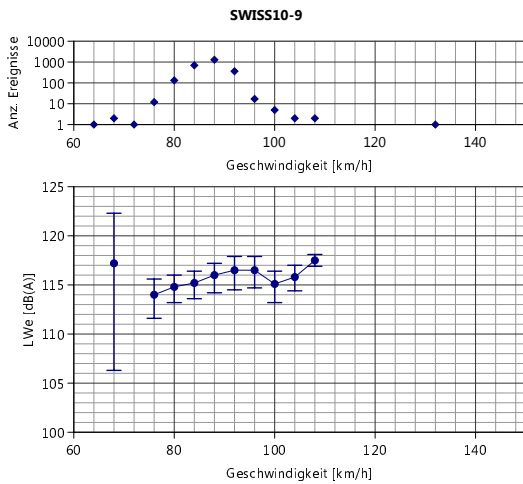
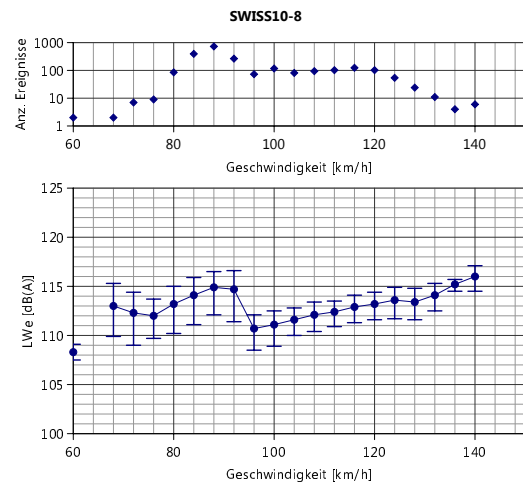
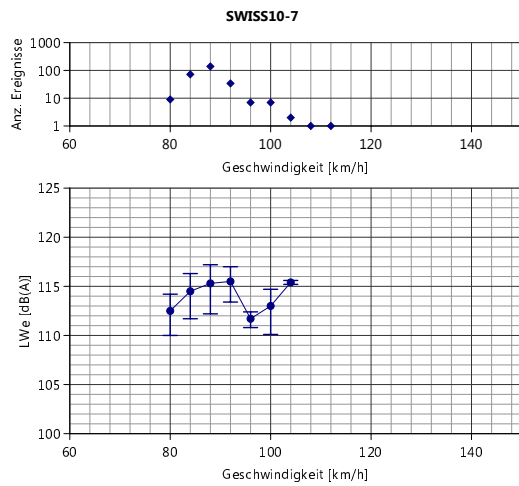


Abbildung 4.8: In Geschwindigkeitsklassen à 4 km/h energetisch gemittelte Schallleistungspegel für die SWISS10-Kategorien 7...10 am Standort Reiden und den Mikrophonkanal 1 (Richtung Süden). Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den arithmetischen Pegelmittelwert auf. Zusätzlich sind die Anzahl Fahrzeuge pro Geschwindigkeitsklasse gezeigt.

4.5.2 Vergleich zwischen den einzelnen Standorten

Auf Grund der hohen Ereigniszahlen und zuverlässigen Klassierungen resultieren für die SWISS10-Kategorie 3 (PW's) die glattesten Zusammenhänge zwischen abgestrahlter Leistung und Geschwindigkeit. Während sich bei den Kategorien 2,4,5 und 6 im Wesentlichen ebenfalls monotone Zunahmen der Leistung mit der Geschwindigkeit ergeben, zeigen sich in den Kategorien 1 und 7 sowie bei den Schwerverkehrs-Kategorien 8, 9 und 10 oft diskontinuierliche Pegel-Geschwindigkeitskurven. Bei den Kategorien 7 bis 10 muss vermutet werden, dass die Ereignisse ab Geschwindigkeitsklasse 96 km/h und höher falsch klassiert sind, z.B. Lieferwagen die irrtümlich als Lastwagen gelabelt wurden. Durch die Beschränkung auf Ereignisse in den repräsentativen Geschwindigkeitsklassen (Tabelle 4.8) bleiben diese Falschklassierungen für die spätere Modellkoeffizientenbestimmung ohne Bedeutung.

Für die folgende Zusammenstellung der Resultate werden die A-bewerteten Schallleistungspegel kategorienabhängig jeweils für eine repräsentative Geschwindigkeitsklasse gemäss Tabelle 4.8 ausgewiesen. Dazu wurden pro Standort die Ergebnisse der beiden Mikrofonkanäle (Fahrtrichtungen) arithmetisch gemittelt. An den Standorten Camignolo, Reiden und Rothenbrunnen traten keine systematischen Unterschiede zwischen den beiden Kanälen auf, lediglich in Moleno zeigten sich für den Kanal 2 (Richtung Norden) rund 1 dB höhere Pegel. Tabelle 4.9 bzw. Abbildung 4.9 zeigen die über die Einzelereignisse energetisch gebildeten Mittelwerte. In Tabelle 4.10 sind die arithmetischen Pegelmittelwerte und in Tabelle 4.11 die Standardabweichungen der Einzelereignisse gezeigt.

Am Standort Reiden sind die Schallleistungspegel für alle Kategorien am höchsten. Moleno liegt im Mittelfeld, Camignolo und Rothenbrunnen weisen die tiefsten Pegel auf. Dies widerspiegelt die Einflüsse der Belagstypen und des Belagsalters gemäss Tabelle 4.1. Erwartungsgemäss ist der Belageinfluss mit rund 3.5 dB(A) für die SWISS10-Kategorie 3 (PW's) am ausgeprägtesten. Bemerkenswert ist jedoch, dass der Belag auch bei den Schwerverkehrskategorien immer noch mit rund 2 bis 2.5 dB(A) zu Buche schlägt. Aus einem Vergleich der Belagwirkung für Personenwagen und Lastwagen lassen sich Rückschlüsse auf die anteilmässige Verteilung der Antriebs- und Rollgeräuschkomponente in der Lastwagenkategorie ziehen.

cat 1	cat 2	cat 3	cat 4	cat 5	cat 6	cat 7	cat 8	cat 9	cat 10
100	120	120	88	120	88	88	88	88	88

Tabelle 4.8: Repräsentative Geschwindigkeitsklassen [km/h] für die einzelnen SWISS10-Kategorien.

	100 km/h cat 1	120 km/h cat 2	120 km/h cat 3	88 km/h cat 4	120 km/h cat 5	88 km/h cat 6	88 km/h cat 7	88 km/h cat 8	88 km/h cat 9	88 km/h cat 10
Camignolo	111.4	108.6	108.5	107.6	109.5	109.1	112.9	112.4	113.5	113.4
Moleno	111.0	111.1	110.4	109.1	111.0	110.7	113.0	112.9	113.2	113.0
Reiden	113.1	110.7	111.9	110.9	112.6	111.8	115.0	114.7	115.9	115.6
Rothenbr.	109.9	107.5	108.1	106.6	109.0	107.9	112.2	111.9	112.8	112.4

Tabelle 4.9: Zusammenstellung der energetisch gemittelten A-bewerteten Schallleistungspegel für die SWISS10-Kategorien, ausgewertet in den angegebenen repräsentativen Geschwindigkeitsklassen.

4.5.3 Streuung der fahrzeugindividuellen A-bewerteten Schallleistungspegel

Für die Ermittlung der Verteilung der fahrzeugindividuellen A-bewerteten Schallleistungspegel wurden pro SWISS10-Kategorie je die Ereignisse in den repräsentativen Geschwindigkeitsklassen inklusive einer darüber und zwei darunter ausgewertet. Um diese Daten zusammenführen zu können, wurden sie jeweils auf einen Erwartungswert $E = 0$ normiert. Die Tabelle 4.12 zeigt die so über alle MFM-U Standorte gemittelten Standardabweichungen. Man beachte, dass diese Streuung nur die Fahrzeugeigenschaften *ohne* individuelle Geschwindigkeitsvariation beinhaltet. Die grösste Streuung zeigen die Kategorien 8 (Lastwagen) und 2 (Motorräder).

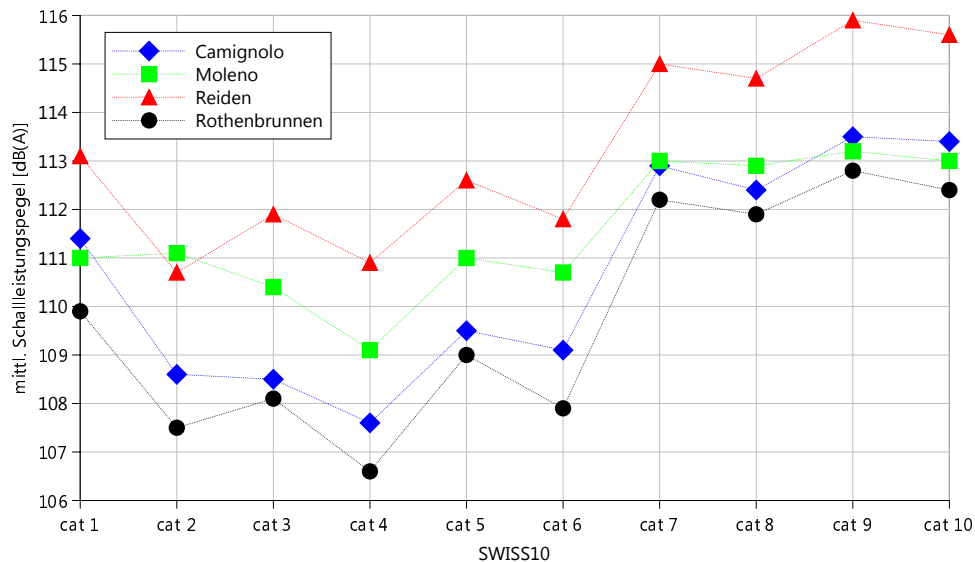


Abbildung 4.9: Zusammenstellung der energetisch gemittelten A-bewerteten Schallleistungspegel für die SWISS10-Kategorien, ausgewertet in den repräsentativen Geschwindigkeitsklassen.

	100 km/h cat 1	120 km/h cat 2	120 km/h cat 3	88 km/h cat 4	120 km/h cat 5	88 km/h cat 6	88 km/h cat 7	88 km/h cat 8	88 km/h cat 9	88 km/h cat 10
Camignolo	110.7	107.5	108.2	107.2	109.2	108.5	112.4	111.6	113.1	112.9
Moleno	110.7	109.9	110.1	108.8	110.7	110.1	112.5	112.2	113.0	112.8
Reiden	112.6	110.1	111.6	110.4	112.3	111.4	114.5	114.2	115.6	115.4
Rothenbr.	109.0	107.1	107.7	106.0	108.4	107.0	111.5	111.0	112.3	111.8

Tabelle 4.10: Zusammenstellung der arithmetisch gemittelten A-bewerteten Schallleistungspegel für die SWISS10-Kategorien, ausgewertet in den angegebenen repräsentativen Geschwindigkeitsklassen.

	100 km/h cat 1	120 km/h cat 2	120 km/h cat 3	88 km/h cat 4	120 km/h cat 5	88 km/h cat 6	88 km/h cat 7	88 km/h cat 8	88 km/h cat 9	88 km/h cat 10
Camignolo	2.5	2.5	1.6	1.9	1.8	2.2	2.2	2.8	2.0	2.0
Moleno	1.7	2.8	1.6	1.4	1.6	2.3	2.1	2.5	1.4	1.5
Reiden	2.0	2.3	1.6	1.9	1.6	1.9	2.2	2.1	1.5	1.6
Rothenbr.	2.8	2.0	1.9	2.1	2.0	2.4	2.7	3.0	2.3	2.4

Tabelle 4.11: Zusammenstellung der Standardabweichung der A-bewerteten Schallleistungspegel für die SWISS10-Kategorien, ausgewertet in den angegebenen repräsentativen Geschwindigkeitsklassen.

Abbildungen 4.10 und 4.11 zeigen exemplarisch für die SWISS10-Kategorien 3 und 8 die aus den Messungen abgeleiteten Verteilungsdichtefunktionen und je die Approximation durch eine Normal-Verteilung. Während Personenwagen in guter Näherung durch eine Normalverteilung approximiert werden können, weist die Lastwagenkategorie eine Massierung rund um den Erwartungswert auf.

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 4.12: Zusammenstellung der über alle MFM-U Standorte gemittelten Standardabweichungen der A-bewerteten Schallleistungspegel in den SWISS10-Kategorien bei konstanter Geschwindigkeit.

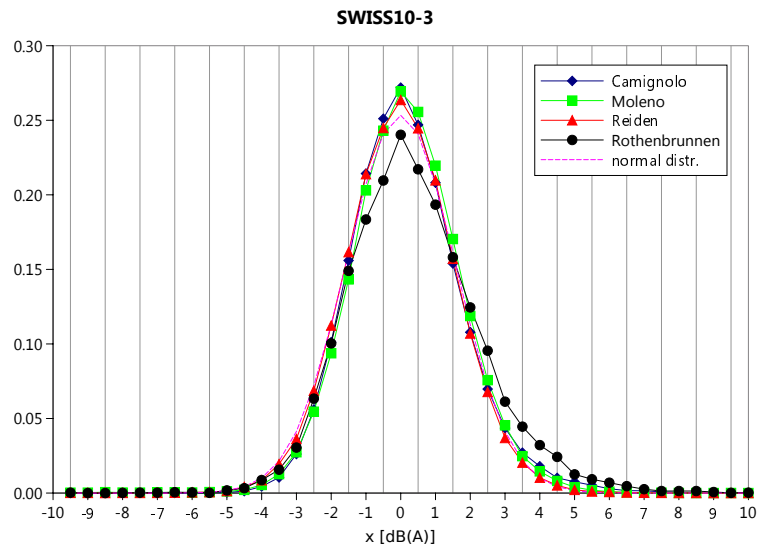


Abbildung 4.10: Aus den Messungen abgeleitete Verteilungs-Dichtefunktionen an allen MFM-U Standorten sowie Approximation durch eine Normalverteilung für die SWISS10-Kategorie 3.

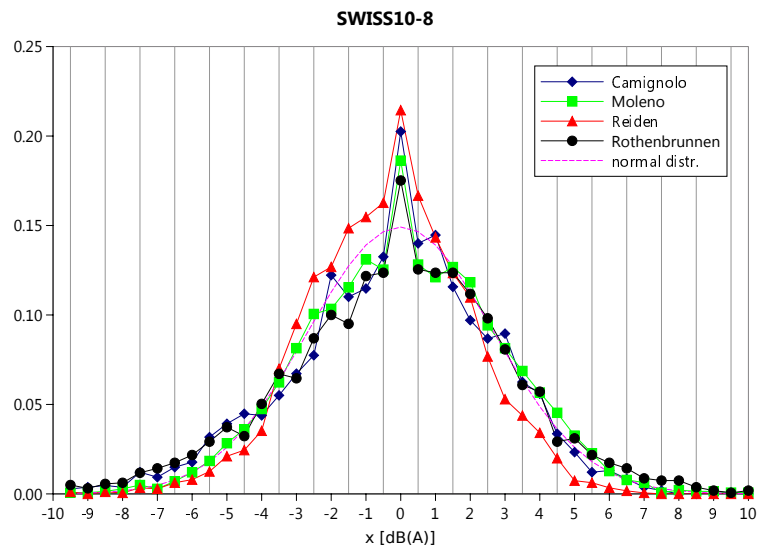


Abbildung 4.11: Aus den Messungen abgeleitete Verteilungs-Dichtefunktionen an allen MFM-U Standorten sowie Approximation durch eine Normalverteilung für die SWISS10-Kategorie 8.

4.6 Ergebnisse für die Schalleistungsspektren

4.6.1 Spektren am Standort Reiden

Für den Mikrofonkanal 1 (Richtung Süden) am Standort Reiden wird hier für jede Fahrzeugkategorie das energetisch gemittelte Terzbandspektrum und die Standardabweichung bei der kategorispezifischen repräsentativen Geschwindigkeit gemäss Tabelle 4.8 gezeigt (die Spektren sämtlicher Standorte finden sich im Anhang). Dazu wurden alle Fahrzeuge berücksichtigt, deren Geschwindigkeit in die entsprechende, 4 km/h breite Geschwindigkeitsklasse fiel.

4.6.2 Reiden - Mikrofonkanal 1 (Richtung Süden)

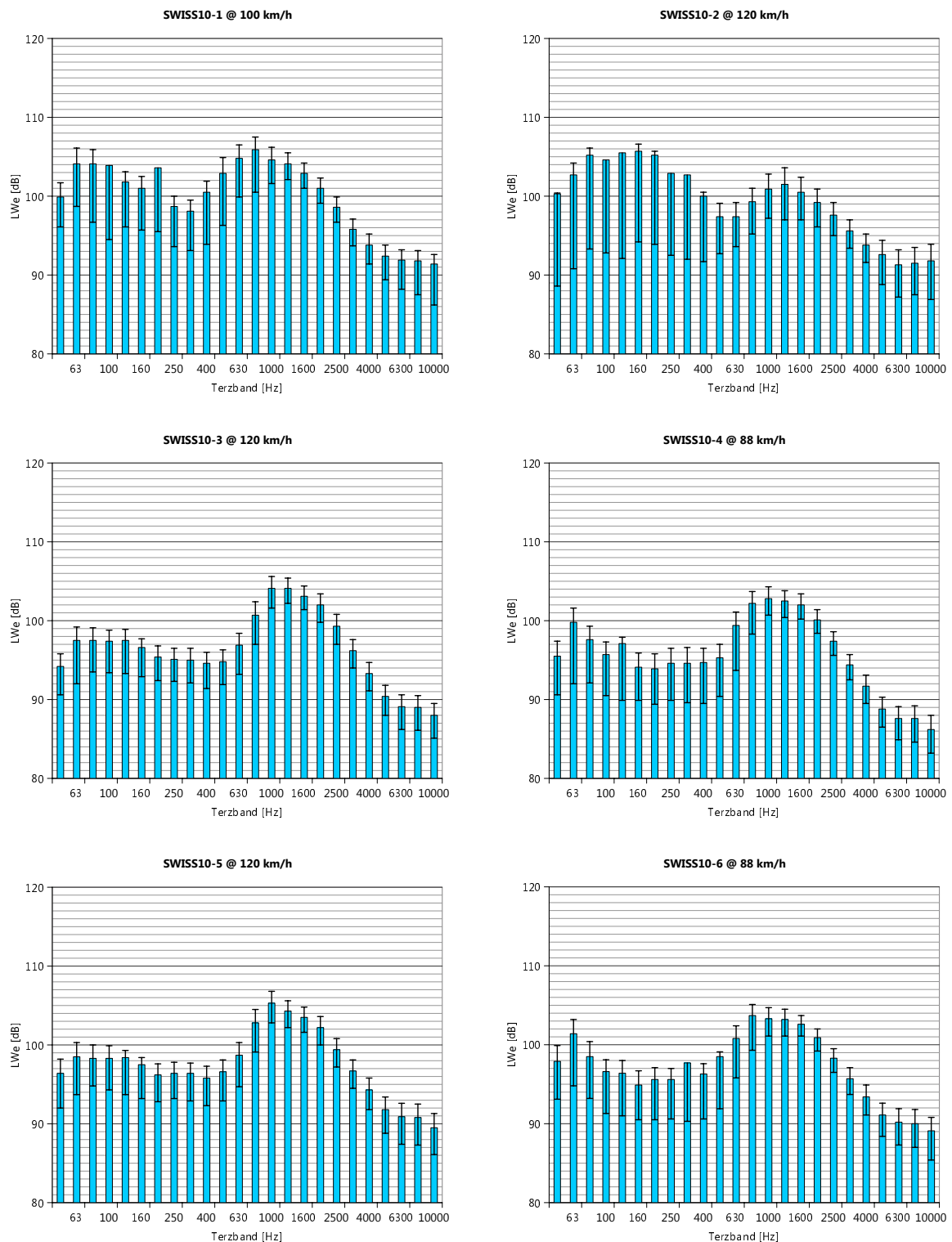


Abbildung 4.12: In den jeweiligen repräsentativen Geschwindigkeitsklassen energetisch gemittelte Schallleistungs-Terzbandspektren für die SWISS10-Kategorien 1...6 am Standort Reiden und den Mikrofonkanal 1 (Richtung Süden). Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den arithmetischen Pegelmittelwert auf.

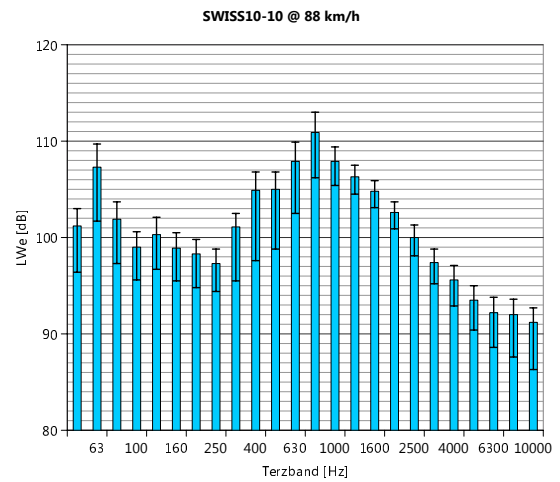
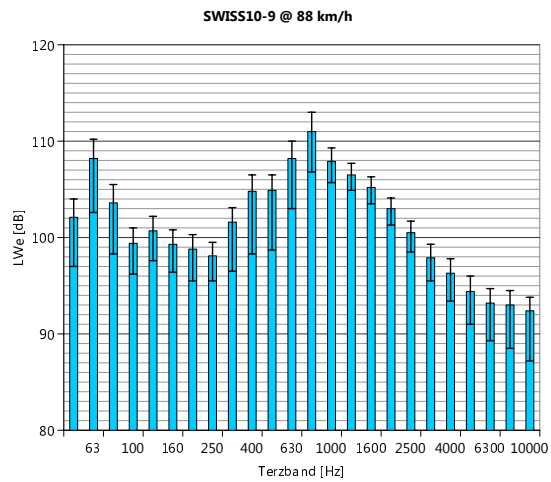
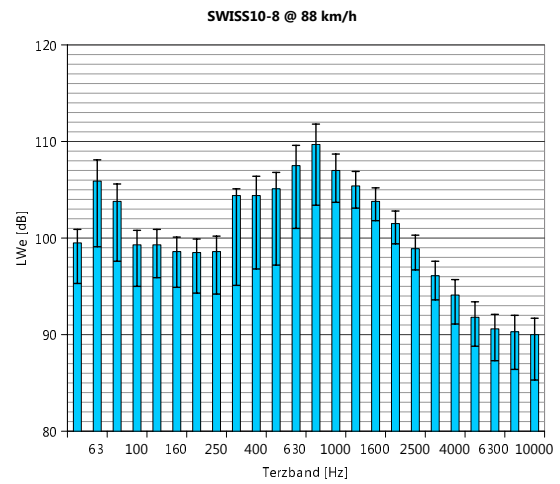
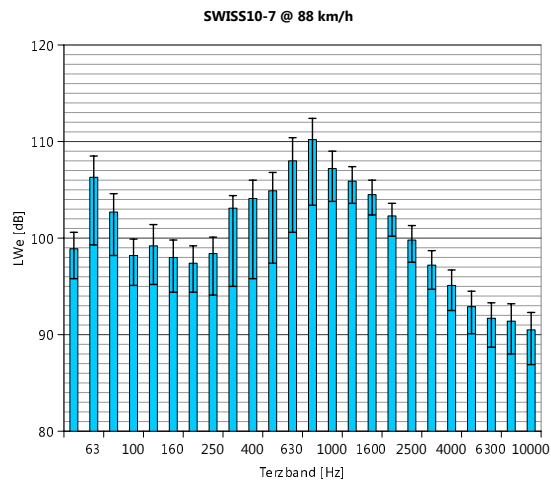


Abbildung 4.13: In den jeweiligen repräsentativen Geschwindigkeitsklassen energetisch gemittelte Schallleistungs-Terzbandspektren für die SWISS10-Kategorien 7...10 am Standort Reiden und den Mikrofonkanal 1 (Richtung Süden). Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den arithmetischen Pegelmittelwert auf.

4.6.3 Ergebnisdiskussion und Vergleich zwischen den einzelnen Standorten

Die Abbildung 4.14 zeigt die Gegenüberstellung der energetisch gemittelten Schallleistungsspektren an den vier Standorten für die SWISS10-Kategorien 3 und 8. Im rollgeräuschi dominierten Frequenzbereich oberhalb von rund 400 Hz liegen die Terzwerte in Camignolo und Rothenbrunnen eng beieinander und systematisch tiefer als die Werte in Reiden. Die spektrale Signatur in Moleno zeigt insbesondere in der Kategorie 3 ein abweichendes Verhalten, indem die Werte zwischen 300 Hz und 1 kHz am höchsten und dann ab 2.5 kHz am tiefsten liegen.

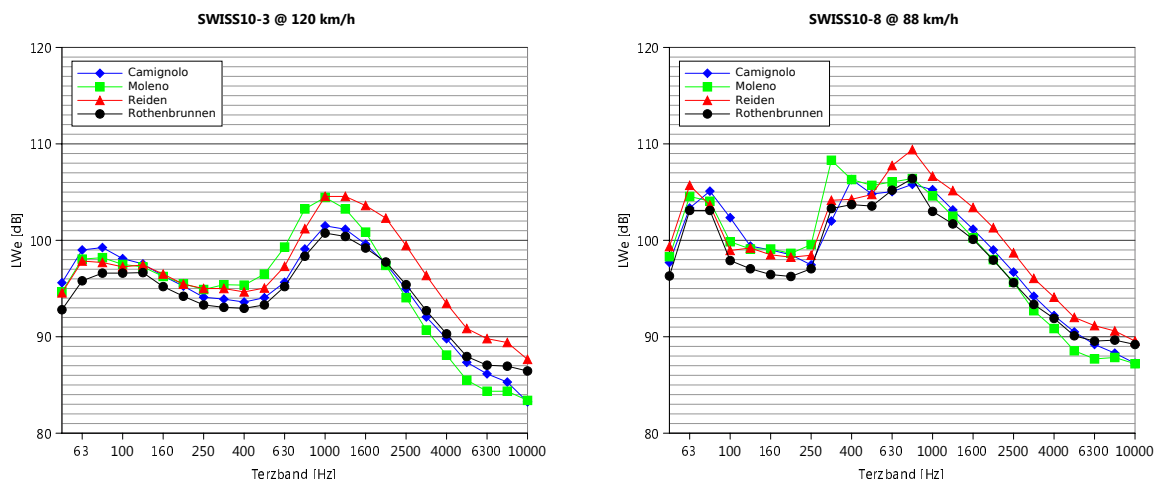


Abbildung 4.14: In den jeweiligen repräsentativen Geschwindigkeitsklassen energetisch gemittelte Schallleistungs-Terzbandspektren für die SWISS10-Kategorien 3 (links) und 8 (rechts) im Vergleich aller Standorte.

4.7 Auswirkungen nasser Fahrbahn auf die Schallleistung

Für die obigen Auswertungen wurden nur Vorbeifahrten auf trockener Fahrbahn berücksichtigt. In einer zusätzlichen separaten Auswertung wurden die Ereignisse bei nasser Fahrbahn, d.h. bei Regen untersucht. In jeder SWISS10-Fahrzeugkategorie wurden jene Vorbeifahrten selektiert, deren Geschwindigkeiten in die Geschwindigkeitsklasse gemäss Tabelle 4.8 fielen. Aus den so gewählten Ereignissen wurden schliesslich die energetisch gebildeten Klassenmittelwerte gebildet und als Differenz *nass - trocken* ausgewertet. Für die Darstellung wurden die Standorte Camignolo, Moleno und Rothenbrunnen (gleicher Belag) zusammengefasst. Die SWISS10-Kategorien wurden ebenfalls in drei Gruppen (cat 2); (cat 1,8,9,10); (cat 3,4,5,6,7) aggregiert. Wie Tabelle 4.13 zeigt, ist die Erhöhung des A-Pegels bei nasser Fahrbahn mit rund 3 dB(A) an den Standorten Camignolo, Moleno und Rothenbrunnen ausgeprägter als in Reiden mit lediglich rund 1 dB(A). Motorräder (Kategorie 2) zeigen die geringsten Unterschiede, in den beiden anderen Kategoriengruppen sind die Unterschiede ähnlich. Es ist hier festzuhalten, dass für die Motorradkategorie die Stichprobe sehr klein ist und in Camignolo, Moleno und Rothenbrunnen keine Delta-Aussage zugelassen hat. Gegenüber einer ausschliesslichen Betrachtung des trockenen Strassenzustandes führt unter Annahme einer typischen Niederschlagshäufigkeit von rund 8% eine Erhöhung der Emission um 3 dB(A) im nassen Zustand zu einer Zunahme des Jahres-Leq von 0.3 dB(A). Dies gilt unter der Annahme, dass die Geschwindigkeit nicht vom Strassenzustand abhängt. Tatsächlich dürfte sich die effektiv gefahrene Geschwindigkeit bei nasser Fahrbahn etwas reduzieren, sodass die Pegelerhöhung noch geringer ausfallen dürfte. Es gilt zu betonen, dass die hier gefundenen Auswirkungen von nassen Fahrbahnen nur für Autobahngeschwindigkeiten und nur für die untersuchten Beläge Gültigkeit haben.

Bedeutend stärker ins Gewicht fallen bei nasser Fahrbahn die hochfrequenten spektralen Veränderungen. Dies entspricht der Alltagserfahrung des Zischens der Reifen bei Regen. Abbildung 4.15 zeigt die spektralen Pegeldifferenzen *nasse - trockene* Fahrbahn. Nennenswerten Unterschiede *nass - trocken* treten erst oberhalb von rund 1 kHz auf, wobei auf den SDA8 Belägen in Camignolo, Moleno und Rothenbrunnen der Anstieg rund 2 bis 3 Terzen tiefer einsetzt als auf dem SMA11 Belag in Reiden. Dies erklärt die in Tabelle 4.13 gefundene grössere Bedeutung der nassen Fahrbahn im A-Pegel in Camignolo, Moleno und Rothenbrunnen.

SWISS10	Camignolo/Moleno/Rothenbrunnen	Reiden
2	-	0.8 dB(A)
3,4,5,6,7	2.4 dB(A)	1.4 dB(A)
1,8,9,10	3.2 dB(A)	0.9 dB(A)

Tabelle 4.13: Unterschiede der A-bewerteten Schallleistungspegel zwischen nasser und trockener Fahrbahn für die SWISS10-Kategorien an den vier MFM-U Standorten, ausgewertet in den repräsentativen Geschwindigkeitsklassen gemäss Tabelle 4.8.

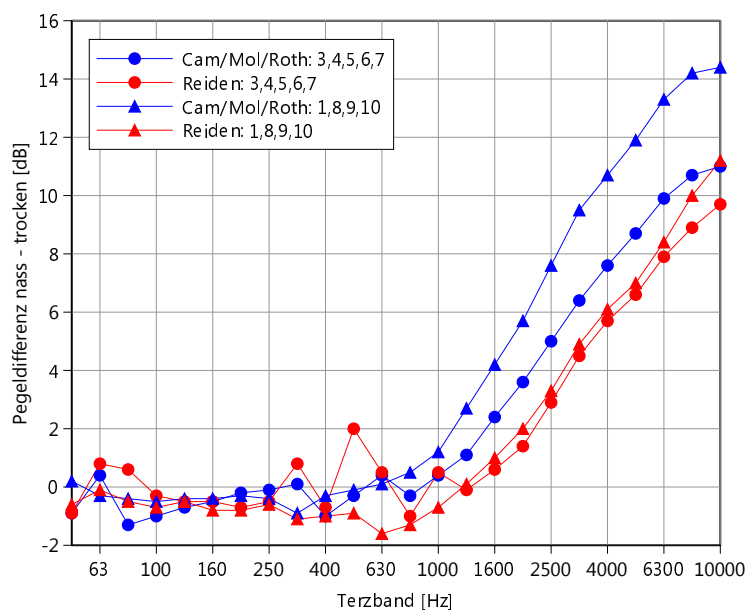


Abbildung 4.15: Spektrale Pegeldifferenzen *nasse - trockene* Fahrbahn an den verschiedenen Standorten und in den verschiedenen Fahrzeugklassen.

5 Zusätzliche Einzelereignis- und Leq-Messungen

Die im Kapitel 4 dargestellten Auswertungen der MFM-U Monitoringdaten bilden die Basis für die Modellparameteranpassung. Um insbesondere die Geschwindigkeitsabhängigkeit durch weitere Messungen breiter abzustützen wurden zusätzlich Einzelereignismessungen im Niedriggeschwindigkeitsbereich an verschiedenen Standorten durchgeführt. Für Validierungszwecke wurden überdies mehrere Leq-Messdatenpunkte an unterschiedlichen Standorten erfasst. Dieses Kapitel dokumentiert diese Messungen und Auswertungen.

5.1 Messunsicherheit

Die aus den Messdaten abgeleiteten Grössen sind grundsätzlich mit einer Unsicherheit verbunden. Die möglichen Fehler haben ihren Ursprung in

- Toleranzen der Messgeräte und der Kalibration
- der nicht-Repräsentativität des erfassten Fahrzeugkollektivs
- der nicht-Repräsentativität der erfassten Fahrzeug-Betriebszustände
- Unsicherheiten hinsichtlich der Ausbreitungsbedingungen zwischen Quelle und Mikrophon
- der Unsicherheit hinsichtlich der Ausblendung von Umgebungsgeräuschen

Die Toleranzen der Messgeräte und des Kalibrationsvorganges können erfahrungsgemäss mit ± 0.5 dB angesetzt werden.

Der mögliche Fehler als Folge der nicht-Repräsentativität des erfassten Fahrzeugkollektivs kann aus der fahrzeugindividuellen Streuung der Emission abgeschätzt werden. Aus den MFM-U-Daten wurde eine Standardabweichung für ein Einzelereignis von 2 dB abgeleitet. Bei typischen minimalen Ereigniszahlen von 50 Fahrzeugen resultiert eine Unsicherheit für den Mittelwert von 0.3 dB.

Die Unsicherheit aufgrund der nicht-Repräsentativität der erfassten Fahrzeug-Betriebszustände kann hier vernachlässigt werden, da nur stationäre Betriebszustände aufgenommen wurden und zu jeder Vorbeifahrt eine individuelle Geschwindigkeit erfasst wurde.

Die Unsicherheiten hinsichtlich der Ausbreitungsbedingungen zwischen Quelle und Mikrophon können hier ebenfalls vernachlässigt werden, da nur nahezu ideale Situationen ohne besondere Ausbreitungseffekte untersucht wurden und die Abstände kurz und somit Meteo-unempfindlich waren.

Bei der Auswertung wurde auf ausreichenden Signal-Rauschabstand geachtet, sodass diesbezüglich keine nennenswerten Fehler zu erwarten sind.

Damit kann die Unsicherheit der akustischen Messungen auf insgesamt 0.6 dB abgeschätzt werden.

5.2 Allgemeine Auswerteprozedur für Einzelereignismessungen

In einem ersten Verarbeitungsschritt wurde der gleiche Formalismus wie bei der Auswertung der MFM-U Daten angewendet. Als Ergebnis liegen damit jeweils energetisch gemittelte Schallleistungspegel-Spektren in 4 km/h breiten Geschwindigkeitsklassen vor. Anschliessend wurde die Geschwindigkeitsabhängigkeit für jede Terz durch eine lineare Regression dargestellt. Unter Annahme dieser linearen Geschwindigkeitsabhängigkeit wurden sämtliche Messwerte auf eine Referenzgeschwindigkeit normiert. Mit Gewichtung anhand der Anzahl Messungen wurde schliesslich für diese Referenzgeschwindigkeit ein energetisch durchschnittliches, für den Standort und die Fahrtrichtung repräsentatives, Terzbandspektrum hergeleitet.

5.3 Einzelereignismessung Frenkendorf: Tempo 60

5.3.1 Situation

Der Messstandort Frenkendorf, Kt. BL befindet sich bei der ASTRA-Zählstelle 28 Frenkendorf-Füllinsdorf (Koordinaten: 2621215, 1262582) an der Rheinstrasse. Die signalisierte Geschwindigkeit ist 60 km/h. Die Strasse war dort ursprünglich 4-spurig. Die Normalspuren sind jetzt aber mit einer Sicherheitslinie abgetrennt und werden nicht mehr befahren. Der Belag der heute befahrenen Spuren ist 18 cm Beton (Einbaujahr ca. 1958). Die Strasse ist dort flach.

In der Abbildung 5.1 ist der Messstandort Frenkendorf auf dem Satellitenfoto dargestellt und Abbildung 5.2 zeigt zwei Fotos des Standortes.

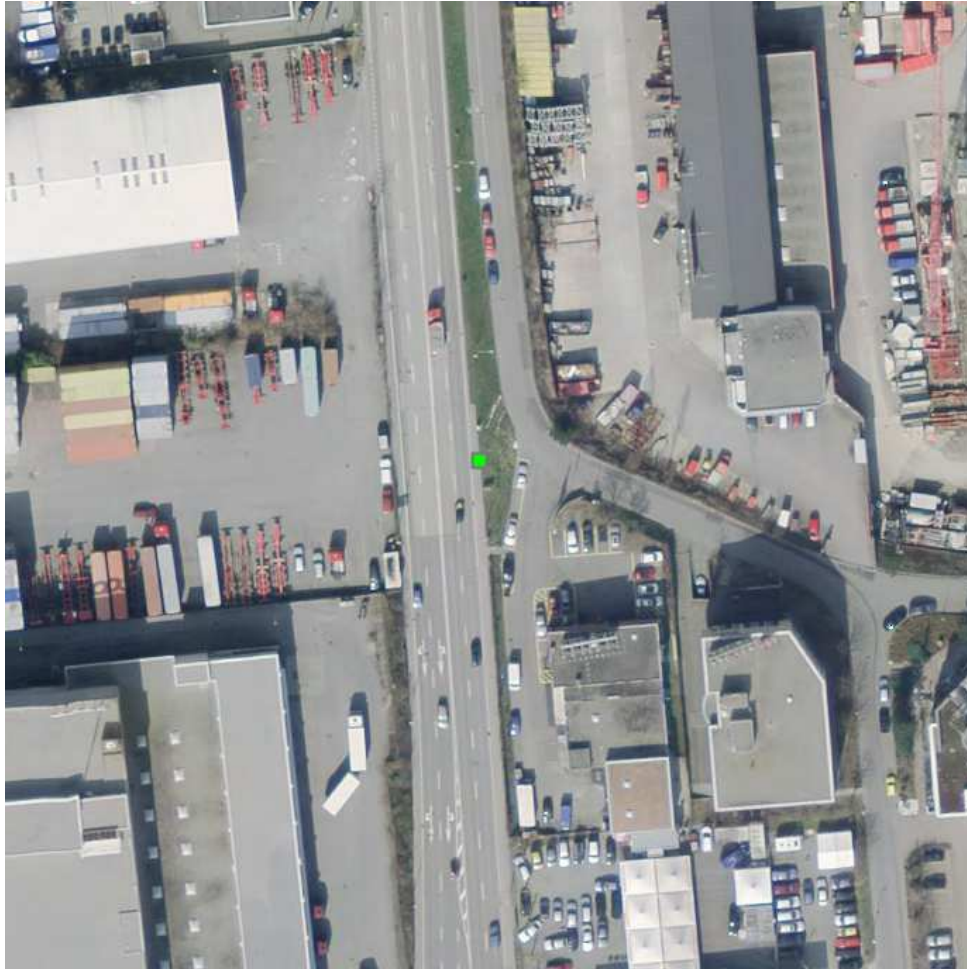


Abbildung 5.1: Standort der Messung Frenkendorf

5.3.2 Messung

Die Messungen wurden am 8.7.2016 von ca. 8.30 bis 17 Uhr durchgeführt. Es war den ganzen Tag sonnig mit wenigen Schleierwolken und windstill. Die Temperatur kletterte von morgens 21°C auf heisse 34°C am Nachmittag.

Pro Fahrtrichtung wurde ein Messpunkt installiert. Die Messung der jeweiligen Fahrspur wurde dabei über das Kreuz gemacht, d.h. das Mikrophon zur Messung der Fahrtrichtung Liestal wurde auf der Seite Fahrtrichtung Basel aufgestellt und umgekehrt. Die Mikrophone befanden sich in einer Höhe von 1.2 m über Boden und in einem Abstand von 9.0 m von der jeweiligen Fahrbahnmitte. Aufgrund der Strassenbreite musste der Abstand etwas grösser als die üblichen 7.5 m gewählt werden. Beim Messpunkt auf der Seite Fahrtrichtung Liestal,



Abbildung 5.2: Fotos des Messtandortes Frenkendorf. Links: Blick in Fahrtrichtung Liestal; rechts: Blick in Fahrtrichtung Basel.

d.h. Messung der Fahrtrichtung Basel, befinden sich in ca. 15 m Distanz gestapelte Container. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass diese zu einer leichten Erhöhung der Pegel aufgrund Reflexionen führten.

Bei den zwei Messpunkten wurde jeweils die Audiospur mit einem Impedanzwandler Microtech Gefell, Typ MV 220 P48, sowie einem polarisierten Halb-Zoll Kondensatormikrophon (B & K 4188) auf einen Sounddevice, Modell 702T, aufgezeichnet.

Die Daten zu den Geschwindigkeiten der Fahrzeuge und Klassierung gemäss SWISS10 werden von der im Messquerschnitt liegenden ASTRA-Zählstelle übernommen.

5.3.3 Auswertung

Abbildung 5.3 und 5.4 zeigen für die SWISS10-Kategorien mit einer genügenden Zahl Ereignissen die A-bewerteten Schallleistungspegel in jeweils 4 km/h breiten Geschwindigkeitsklassen. In Abbildung 5.5 und 5.6 sind die Spektren für die Nenngeschwindigkeit von 60 km/h pro Fahrzeugkategorie gezeigt. Die Tabelle 5.1 zeigt die A-Pegel, in Tabelle 5.2 sind die über alle Geschwindigkeitsklassen gemittelten Standardabweichungen gezeigt.

	cat 1	cat 2	cat 3	cat 4	cat 5	cat 6	cat 7	cat 8	cat 9	cat 10
Richtung Basel		103.1	105.4		106.5	110.0	112.5	109.9	111.8	110.9
Richtung Liestal			102.7		104.1	108.8		107.2	108.2	108.9

Tabelle 5.1: Zusammenstellung der A-bewerteten Schallleistungspegel für die auswertbaren SWISS10-Kategorien bei 60 km/h am Standort Frenkendorf.

	cat 1	cat 2	cat 3	cat 4	cat 5	cat 6	cat 7	cat 8	cat 9	cat 10
Richtung Basel		3.2	2.5		2.3	1.6	1.5	2.4	1.1	1.9
Richtung Liestal			2.0		2.9	2.5		1.9	1.7	1.9

Tabelle 5.2: Zusammenstellung der durchschnittlichen Standardabweichungen der A-bewerteten Schallleistungspegel für die auswertbaren SWISS10-Kategorien am Standort Frenkendorf.

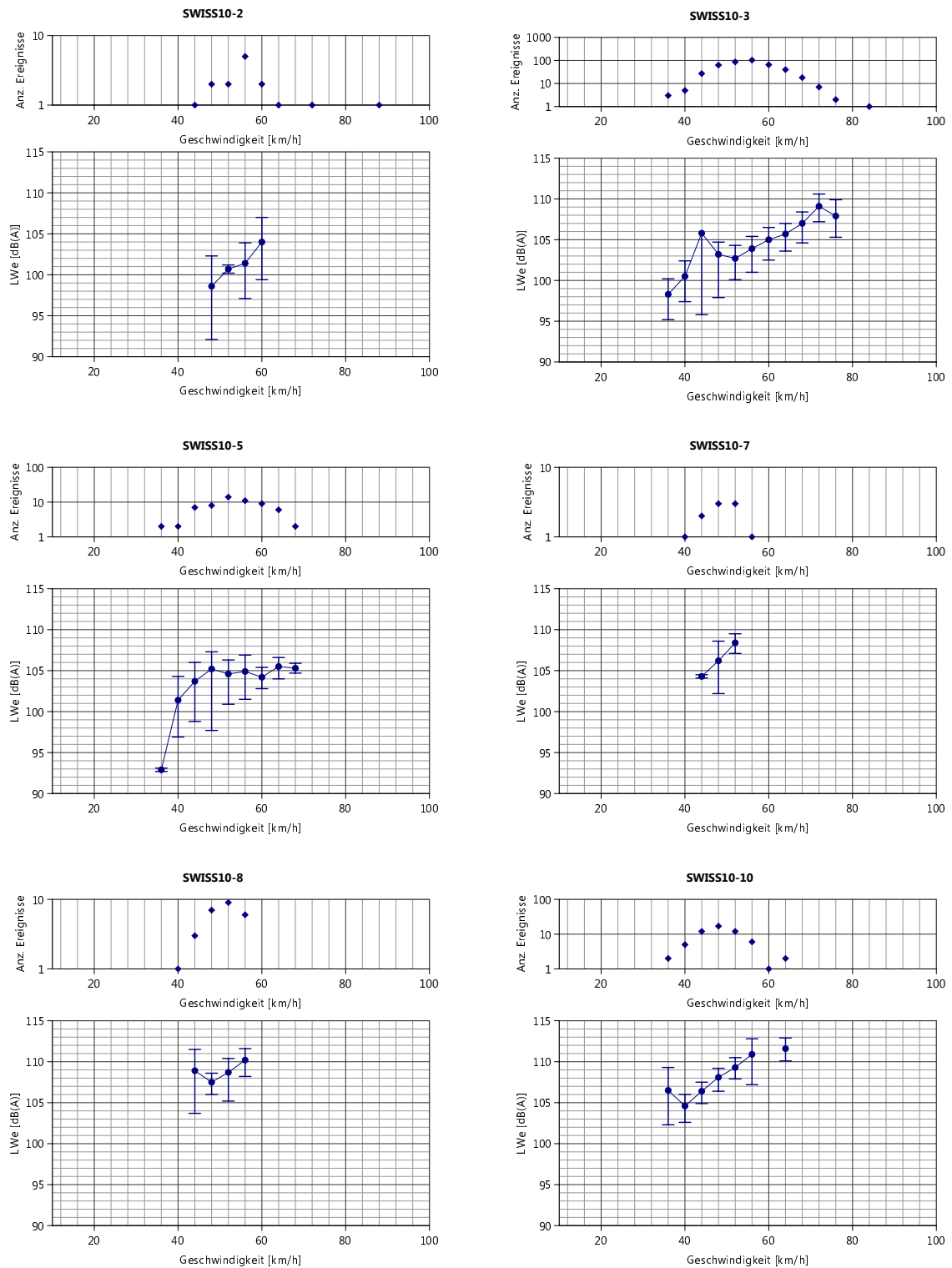


Abbildung 5.3: In Geschwindigkeitsklassen à 4 km/h energetisch gemittelte Schallleistungspegel für die auswertbaren SWISS10-Kategorien am Standort Frenkendorf und die Fahrtrichtung Basel. Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den arithmetischen Pegelmittelwert auf. Zusätzlich sind die Anzahl Fahrzeuge pro Geschwindigkeitsklasse gezeigt.

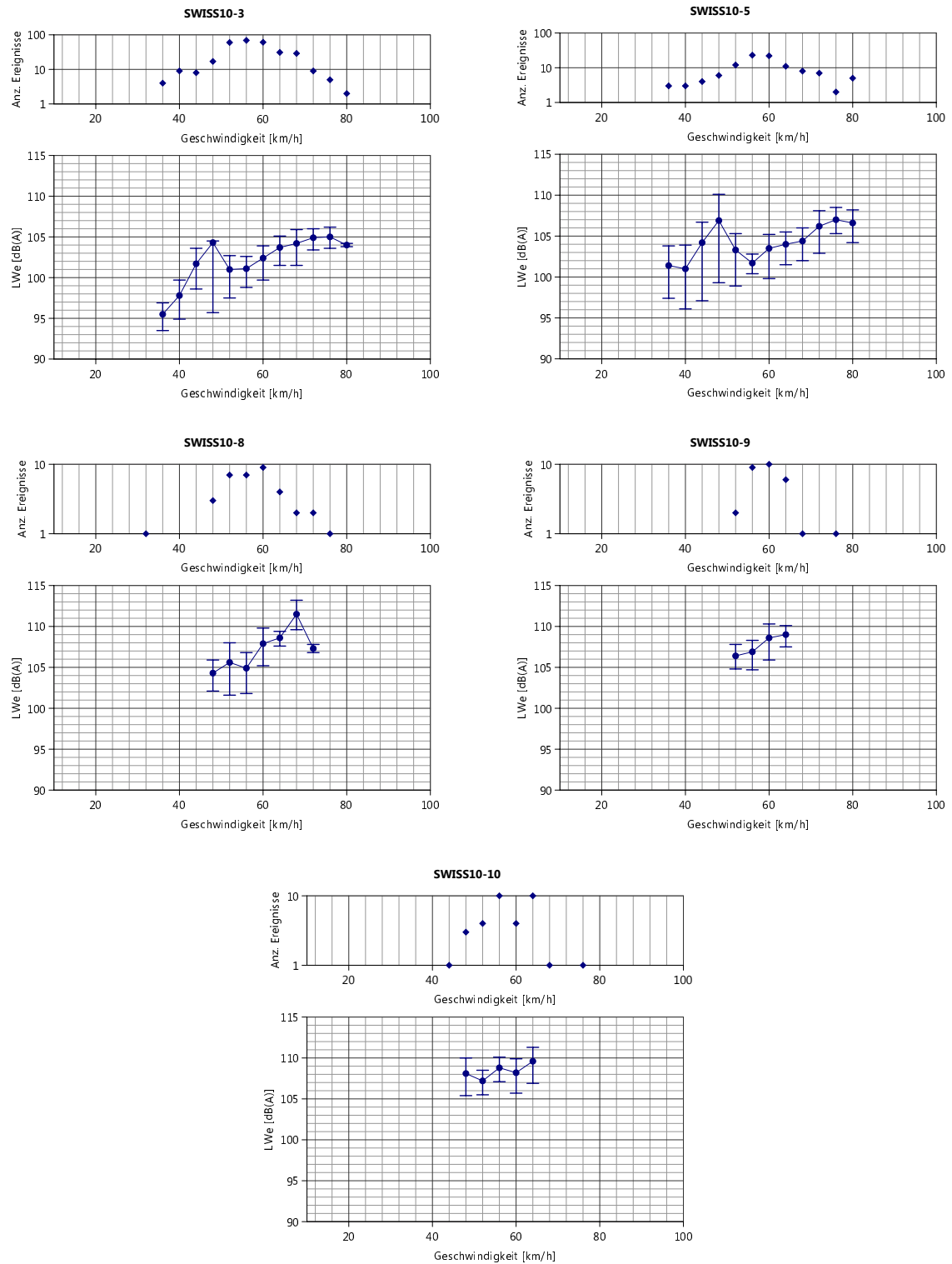


Abbildung 5.4: In Geschwindigkeitsklassen à 4 km/h energetisch gemittelte Schallleistungspegel für die auswertbaren SWISS10-Kategorien am Standort Frenkendorf und die Fahrtrichtung Liestal. Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den arithmetischen Pegelmittelwert auf. Zusätzlich sind die Anzahl Fahrzeuge pro Geschwindigkeitsklasse gezeigt.

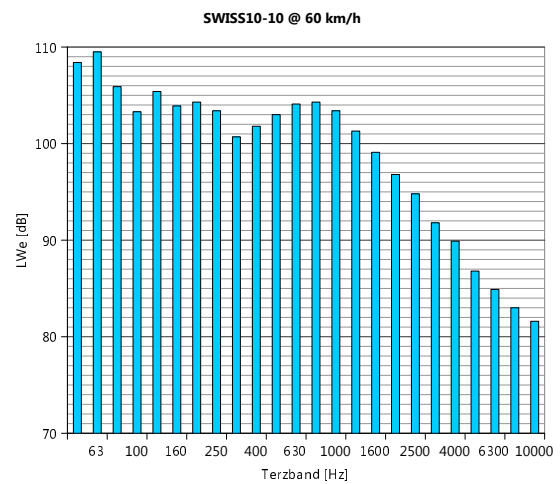
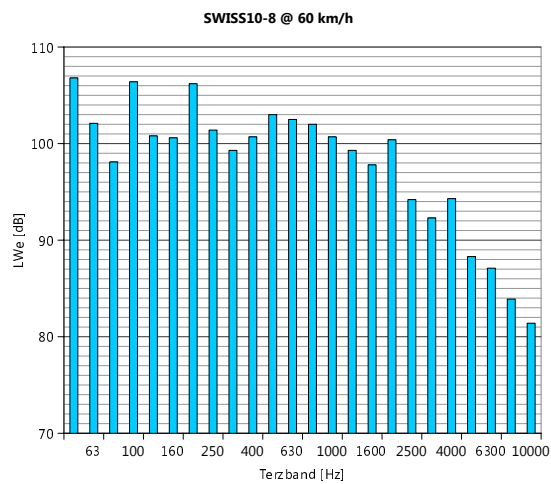
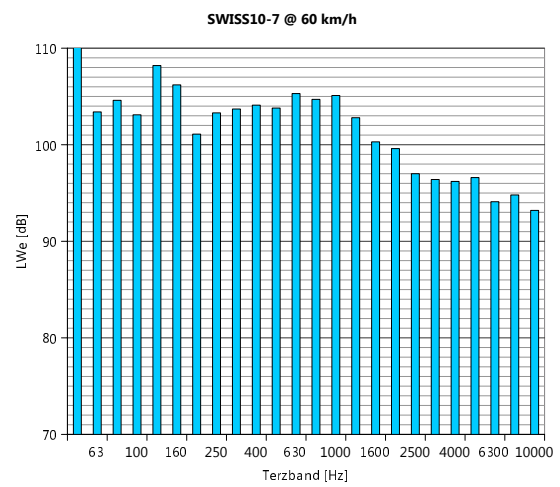
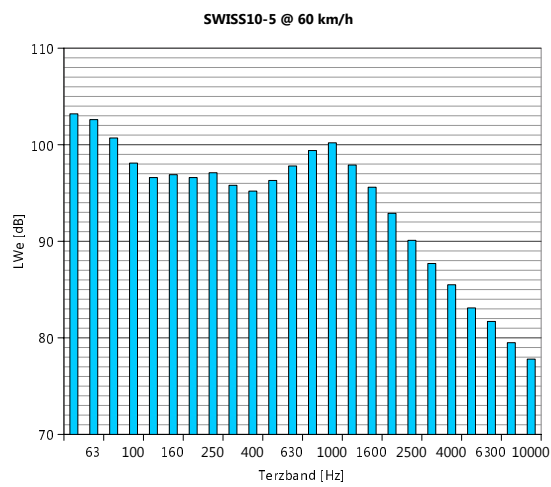
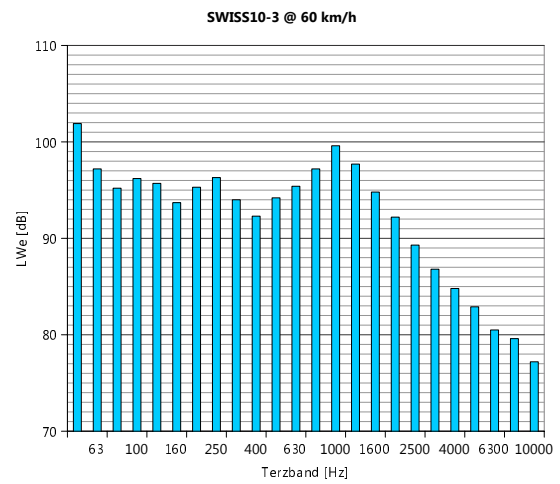
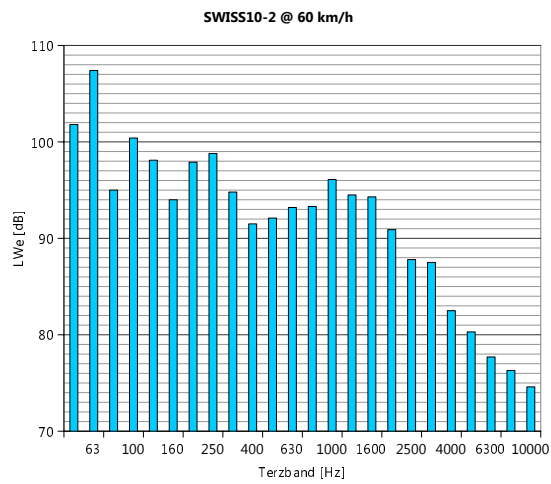


Abbildung 5.5: Energetisch gebildete mittlere Schalleistungsspektren bei 60 km/h für die auswertbaren SWISS10-Kategorien am Standort Frenkendorf und die Fahrtrichtung Basel.

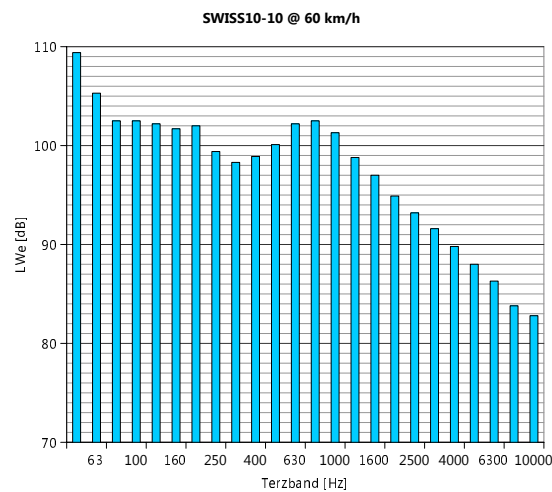
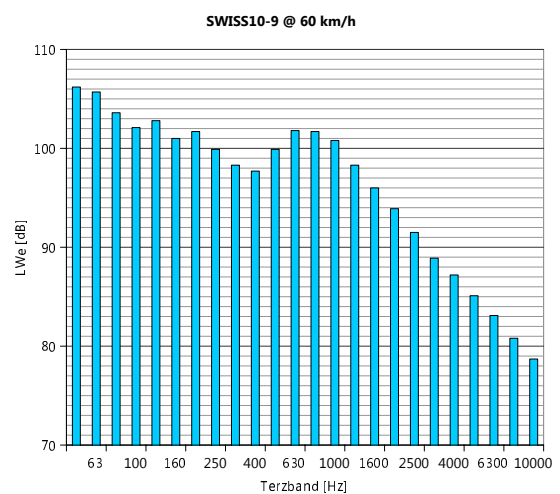
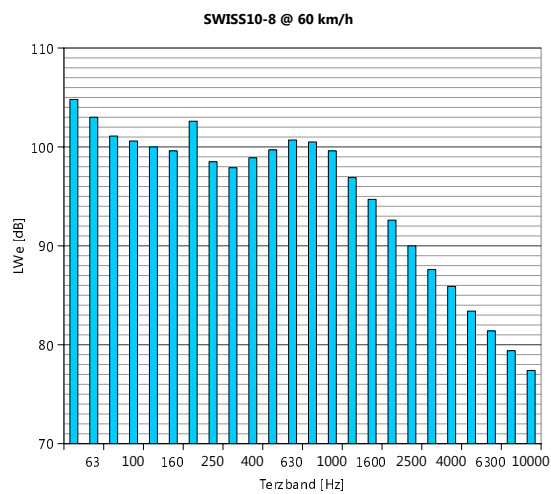
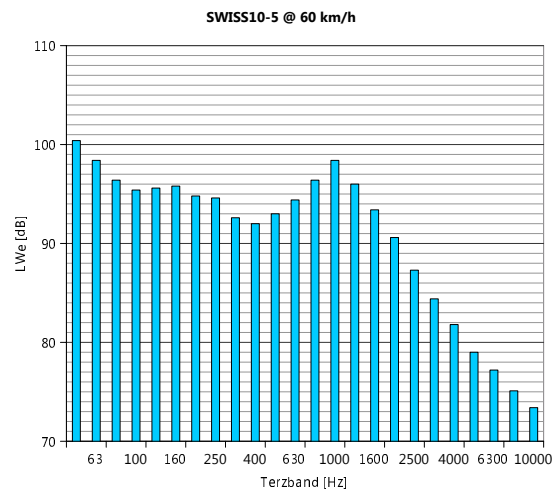
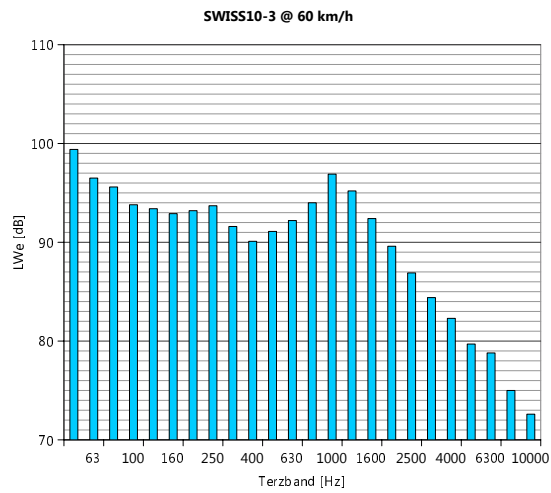


Abbildung 5.6: Energetisch gebildete mittlere Schallleistungsspektren bei 60 km/h für die auswertbaren SWISS10-Kategorien am Standort Frenkendorf und die Fahrtrichtung Liestal.

5.4 Einzelereignismessung Amsteg: Tempo 60

5.4.1 Situation

Der Messstandort Amsteg, Kt. Uri befindet sich bei der ASTRA-Zählstelle 387 Amsteg N - UR7408 (Koordinaten: 2694212, 1181299) an der Gotthardstrasse. Die signalisierte Geschwindigkeit beträgt 60 km/h. Die Strasse ist dort flach. Der Deckbelag bei der Zählstelle 387 Amsteg ist ein AC MR 11 mit Styrelf 13/80 und hat eine Stärke von 35 mm. Dieser wurde im Jahr 2000 eingebaut.

In der Abbildung 5.7 ist der Messstandort Amsteg auf dem Satellitenfoto dargestellt und Abbildung 5.8 zeigt zwei Fotos des Standortes.



Abbildung 5.7: Standort der Messung Amsteg

5.4.2 Messung

Die Messungen wurden am 7.7.2016 von ca. 8.30 bis 18 Uhr durchgeführt. Es war den ganzen Tag sonnig und windstill. Die Temperatur kletterte von morgens 14°C auf 28°C am Nachmittag.

Pro Fahrtrichtung wurde ein Messpunkt installiert. Die Messung der jeweiligen Fahrspur wurde dabei über das



Abbildung 5.8: Fotos des Messtandortes Amsteg. Links: Blick in Fahrtrichtung Amsteg mit Messpunkt für diese Richtung. Rechts: Blick in Fahrtrichtung Silenen.

Kreuz gemacht, d.h. das Mikrophon zur Messung der Fahrtrichtung Amsteg wurde auf der Seite Fahrtrichtung Silenen aufgestellt und umgekehrt. Die Mikrophone befanden sich in einer Höhe von 1.2 m über Boden. Für die Fahrtrichtung Silenen betrug der Abstand von der Fahrbahnmitte 7.2 m (alles harter Belag) und für die Fahrtrichtung Amsteg 7.5 m (davon 2.45 m Gras).

Bei den zwei Messpunkten wurde jeweils die Audiospur mit einem Impedanzwandler Microtech Gefell, Typ MV 220 P48, sowie einem polarisierten Halb-Zoll Kondensatormikrophon (B & K 4188) auf einen Sounddevice, Modell 702T, aufgezeichnet.

Die Daten zu den Geschwindigkeiten der Fahrzeuge und Klassierung gemäss SWISS10 werden von der ASTRA-Zählstelle übernommen.

5.4.3 Auswertung

Abbildung 5.9 und 5.10 zeigen für die SWISS10-Kategorien mit einer genügenden Zahl Ereignissen die A-bewerteten Schallleistungspegel in jeweils 4 km/h breiten Geschwindigkeitsklassen. In Abbildung 5.11 und 5.12 sind die Spektren für die Nenngeschwindigkeit von 60 km/h pro Fahrzeugkategorie gezeigt. Die Tabelle 5.3 zeigt die A-Pegel, in Tabelle 5.4 sind die über alle Geschwindigkeitsklassen gemittelten Standardabweichungen gezeigt.

	cat 1	cat 2	cat 3	cat 4	cat 5	cat 6	cat 7	cat 8	cat 9	cat 10
Richtung Amsteg	104.8	100.2	101.4		101.8					
Richtung Silenen	105.7	100.9	101.7	113.1	102.6					

Tabelle 5.3: Zusammenstellung der A-bewerteten Schallleistungspegel für die auswertbaren SWISS10-Kategorien bei 60 km/h am Standort Amsteg.

	cat 1	cat 2	cat 3	cat 4	cat 5	cat 6	cat 7	cat 8	cat 9	cat 10
Richtung Amsteg	1.5	2.5	1.4		1.2					
Richtung Silenen	1.6	2.1	1.4	1.3	1.7					

Tabelle 5.4: Zusammenstellung der durchschnittlichen Standardabweichungen der A-bewerteten Schallleistungspegel für die auswertbaren SWISS10-Kategorien am Standort Amsteg.

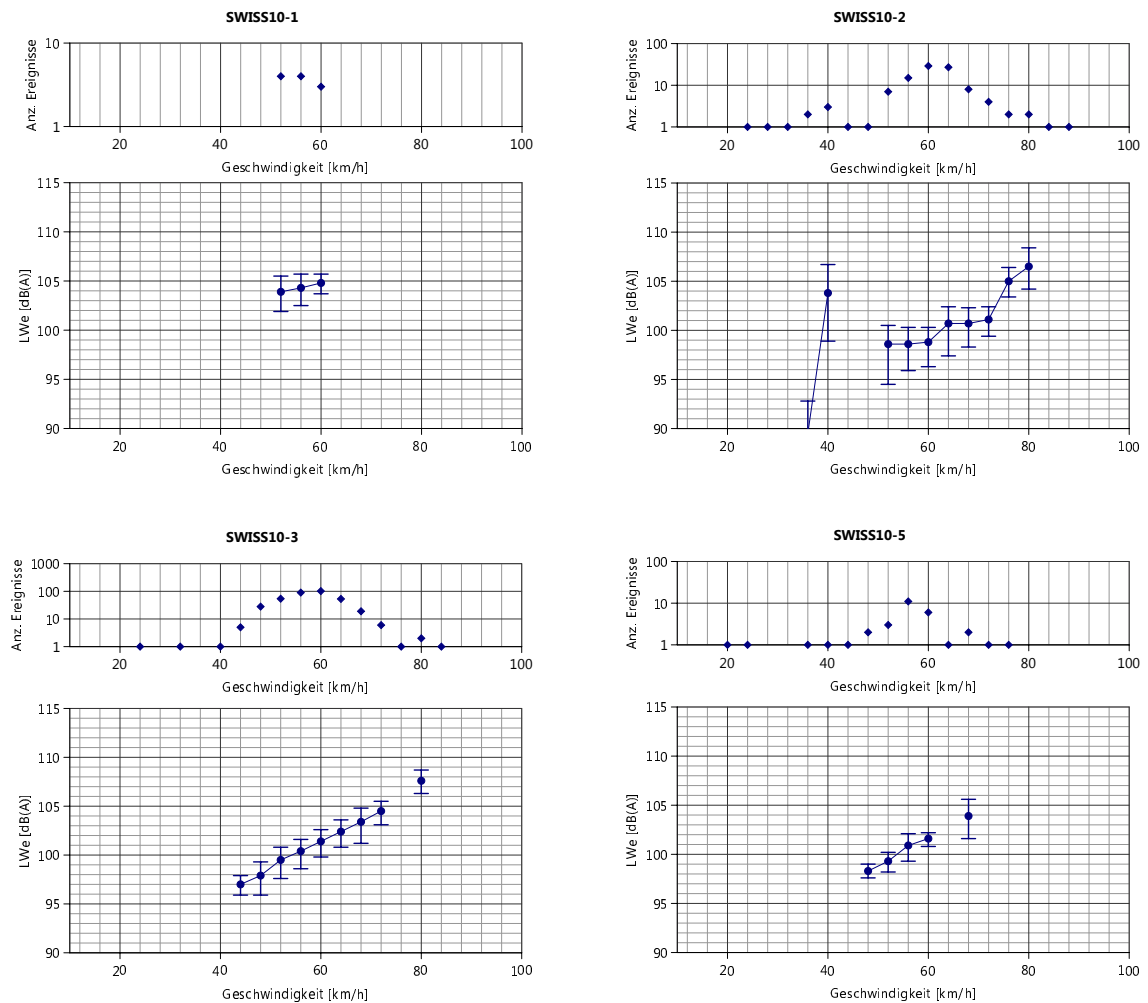


Abbildung 5.9: In Geschwindigkeitsklassen à 4 km/h energetisch gemittelte Schalleistungspegel für die auswertbaren SWISS10-Kategorien am Standort Amsteg und die Fahrtrichtung Amsteg. Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den arithmetischen Pegelmittelwert auf. Zusätzlich sind die Anzahl Fahrzeuge pro Geschwindigkeitsklasse gezeigt.

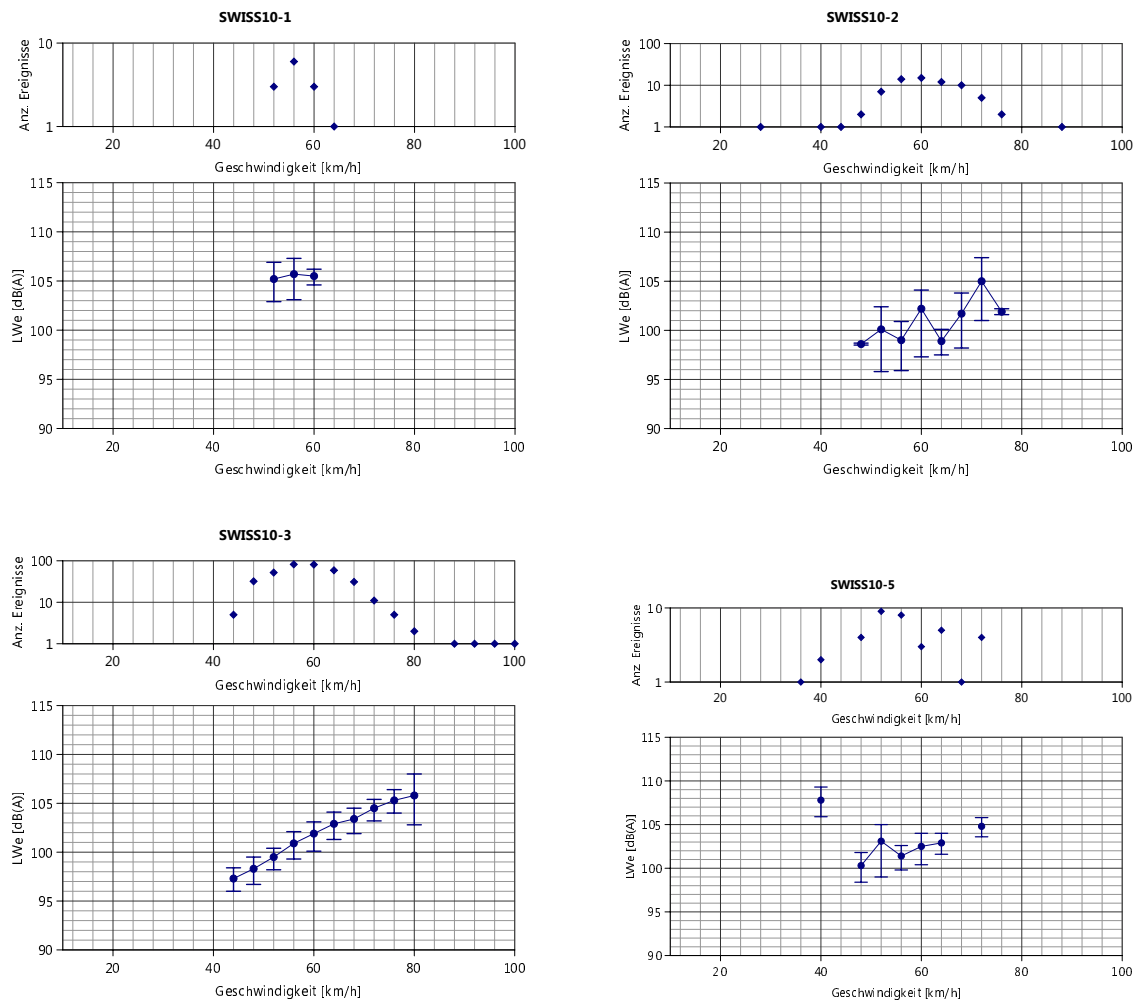


Abbildung 5.10: In Geschwindigkeitsklassen à 4 km/h energetisch gemittelte Schallleistungspegel für die auswertbaren SWISS10-Kategorien am Standort Amsteg und die Fahrtrichtung Silenen. Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den arithmetischen Pegelmittelwert auf. Zusätzlich sind die Anzahl Fahrzeuge pro Geschwindigkeitsklasse gezeigt.

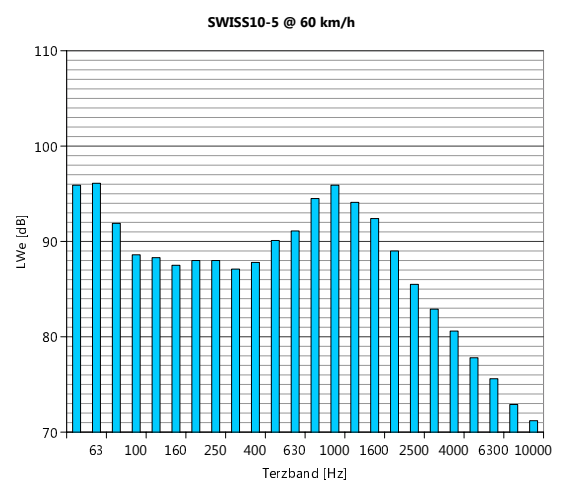
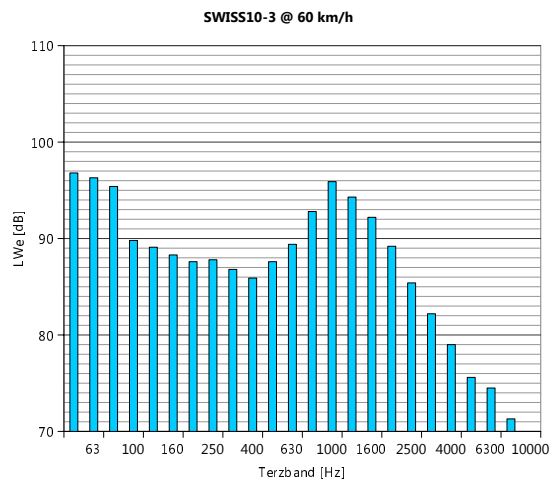
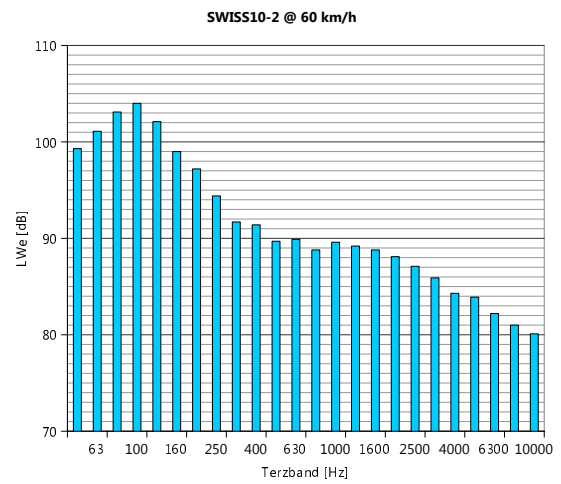
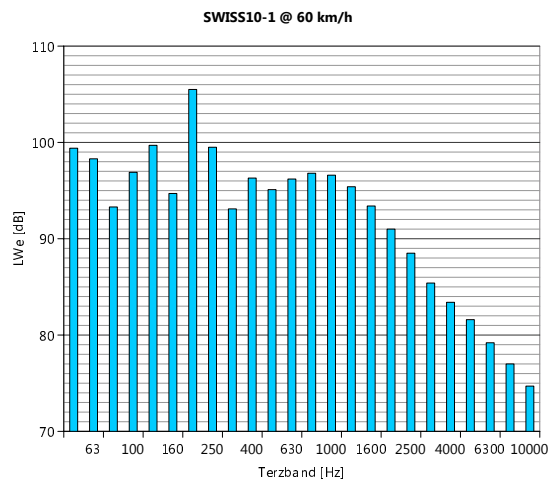


Abbildung 5.11: Energetisch gebildete mittlere Schallleistungsspektren bei 60 km/h für die auswertbaren SWISS10-Kategorien am Standort Amsteg und die Fahrtrichtung Amsteg.

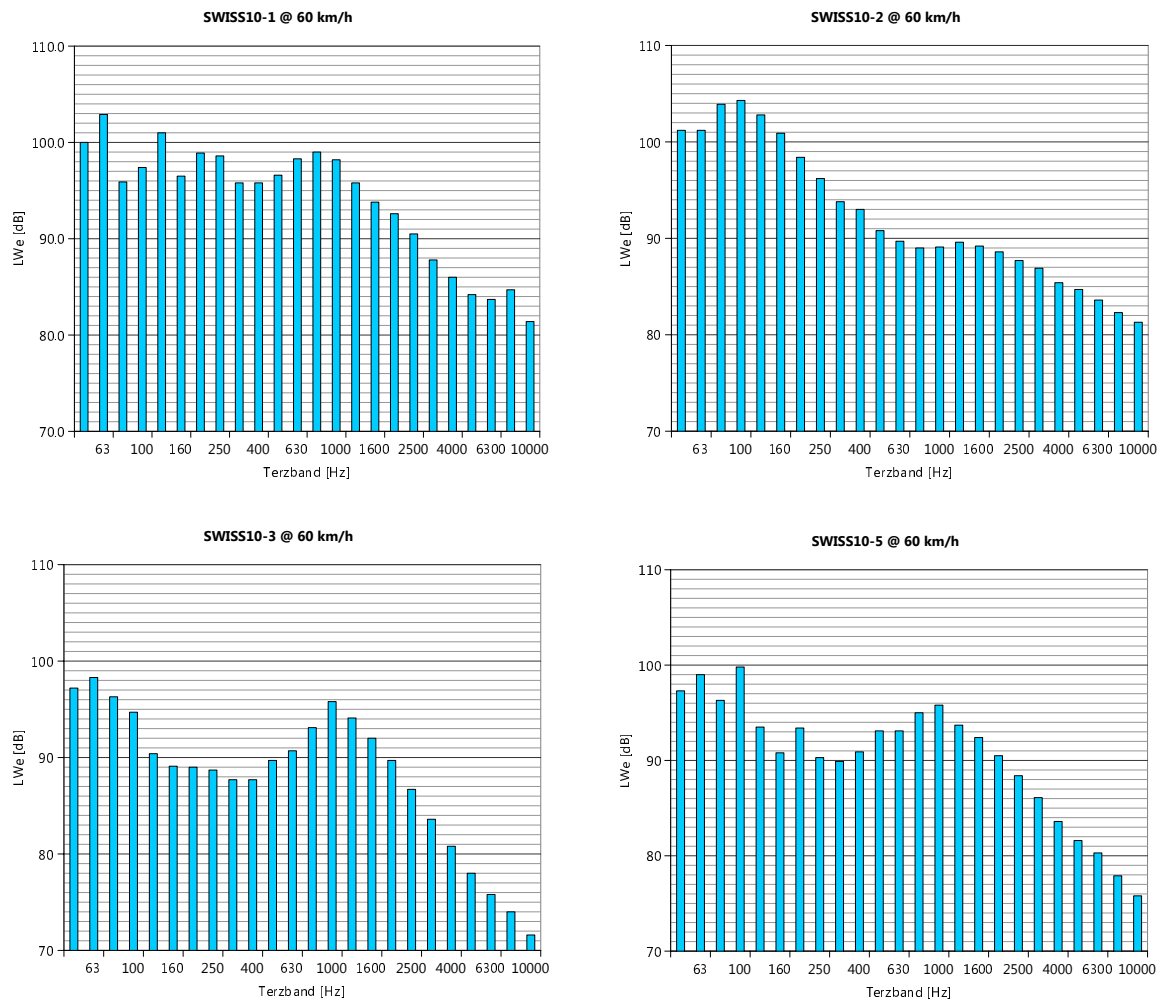


Abbildung 5.12: Energetisch gebildete mittlere Schalleistungsspektren bei 60 km/h für die auswertbaren SWISS10-Kategorien am Standort Amsteg und die Fahrtrichtung Silenen.

5.5 Diskussion der Pegel-Ortsverläufe der Einzelereignis Tempo 60 Messungen

Die Abbildung 5.13 zeigt die durchschnittlichen Pegel-Ortsverläufe in der SWISS10-Kategorie 3 (PW) an den beiden Standorten Frenkendorf und Amsteg. In die Mittelwertbildung wurden alle SWISS10-Kategorie 3 Fahrzeuge mit einer Geschwindigkeit zwischen 50 und 70 km/h einbezogen. Für die Pegelverläufe wurde jeweils eine Normierung auf den Maximalwert (im kürzesten Abstand erreicht) vorgenommen. Wie schon bei den MFM-U Auswertungen verlaufen die Pegelabnahmen flacher als bei einer omnidirektionale Punktquelle. Es zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den beiden Standorten Frenkendorf und Amsteg.

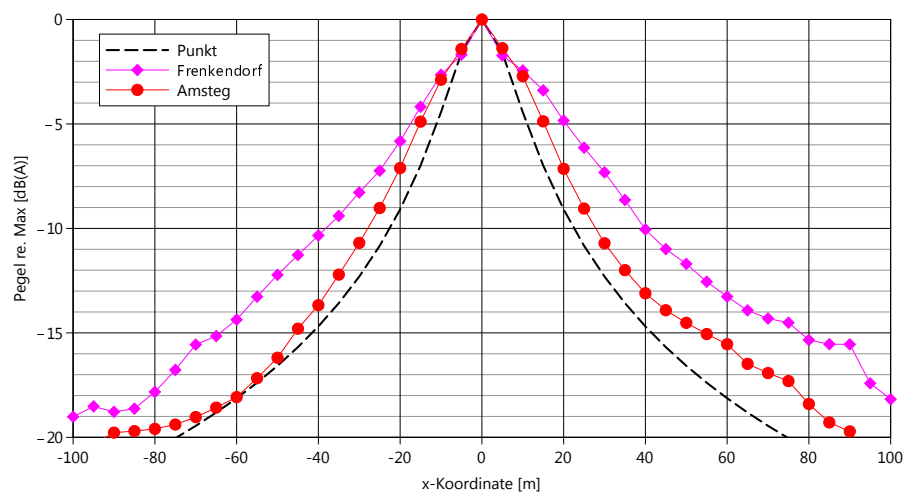


Abbildung 5.13: Mittlere Pegel-Ortsverläufe an den beiden T60 Standorten Frenkendorf und Amsteg für die SWISS10-Kategorie 3 (PW) im Vergleich zum Verhalten einer omnidirektionalen Punktquelle.

5.6 Einzelereignismessung Michelstrasse Tempo 30, Steigung: 9 %

5.6.1 Situation

Um den Einfluss von Steigungen bei tiefer Geschwindigkeit zu analysieren, wurden Messdaten in 30er Zonen in der Stadt Zürich mit einer bedeutenden Strassenlängsneigung erhoben. Die Messstandorte wurden so gesetzt, dass sie sich an Stellen mit nur einer befahrenen Spur befinden. Dies ist in 30-er Zonen häufig der Fall, wenn sich auf der einen Strassenseite Parkplätze befinden. Dieser Messaufbau hat den Vorteil, dass die aufwärts- und abwärtsfahrenden Fahrzeuge mit nur einem Messmikrophon erfasst werden können.

In der Abbildung 5.14 ist der Messstandort an der Michelstrasse in Zürich bei einer Steigung von 9 % auf dem Satellitenfoto dargestellt. In der Abbildung 5.15 ist der Messaufbau des Standortes dokumentiert.

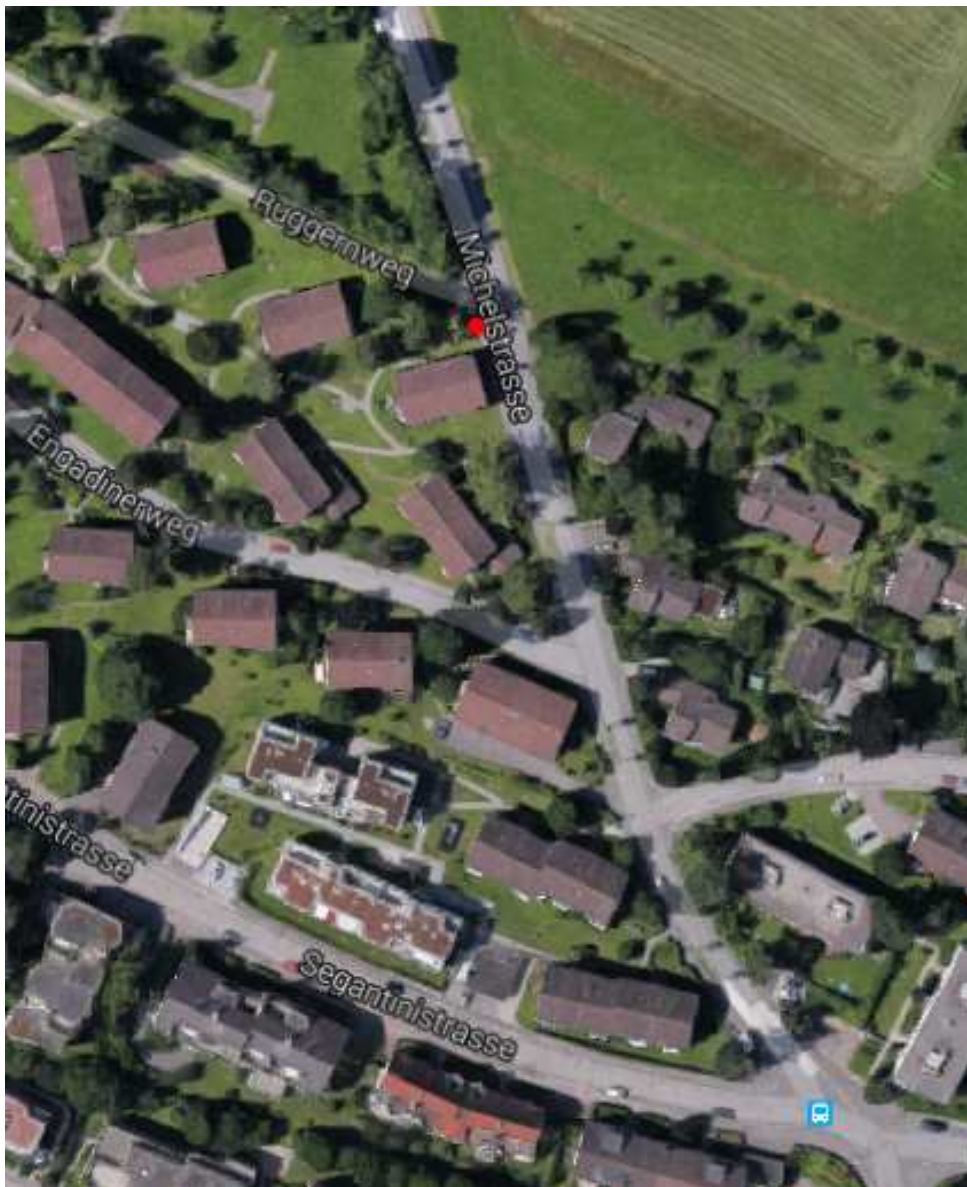


Abbildung 5.14: Standort der Messung an der Michelstrasse



Abbildung 5.15: Foto des Messtandortes vom Geschwindigkeitsmesspunkt aus gesehen.

5.6.2 Messung

Die Messungen wurden am 15.7.2016, vormittags bei 15 °C und am 20.7.2016 nachmittags bei 32 °C durchgeführt. Für die Messung wurde die Audiospur mit einem Impedanzwandler von Microtech Gefell, Typ MV 220 P48, sowie einem polarisierten Halb-Zoll Kondensatormikrophon auf einen Sounddevice, Modell 702T, aufgezeichnet. Dabei befand sich das Mikrophon in der Höhe von 1.2 m und in einem Abstand von 7.5 m bzgl. der (einspurigen) Fahrbahnmitte. Gleichzeitig wurde aus dem Auto mittels Radarpistole die Geschwindigkeit der Fahrzeuge mit genauem Zeitstempel protokolliert. Im Protokoll wurden die Fahrzeuge gemäss der Klassierung SWISS10 sowie Fahrtrichtung unterschieden. Allfällige Störgeräusche und äussere Einflüsse wurden ebenfalls vermerkt.

5.6.3 Auswertung

Abbildung 5.16 zeigt für die SWISS10-Kategorie 3 (PW) die A-bewerteten Schallleistungspegel in jeweils 4 km/h breiten Geschwindigkeitsklassen. In Abbildung 5.17 sind die Spektren für die Nenngeschwindigkeit von 30 km/h gezeigt. Die Tabelle 5.5 zeigt die A-Pegel, in Tabelle 5.6 sind die über alle Geschwindigkeitsklassen gemittelten Standardabweichungen gezeigt.

	cat 1	cat 2	cat 3	cat 4	cat 5	cat 6	cat 7	cat 8	cat 9	cat 10
aufwärts			89.7							
abwärts			87.6							

Tabelle 5.5: Zusammenstellung der A-bewerteten Schallleistungspegel für die auswertbaren SWISS10-Kategorien bei 30 km/h am Standort Michelstrasse.

	cat 1	cat 2	cat 3	cat 4	cat 5	cat 6	cat 7	cat 8	cat 9	cat 10
aufwärts			1.5							
abwärts			2.4							

Tabelle 5.6: Zusammenstellung der durchschnittlichen Standardabweichungen der A-bewerteten Schallleistungspegel für die auswertbaren SWISS10-Kategorien am Standort Michelstrasse.

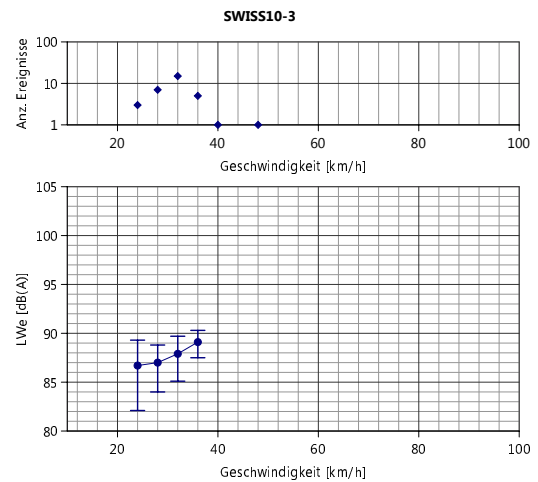
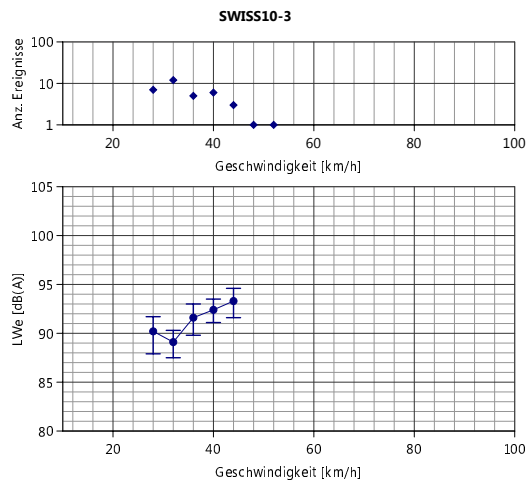


Abbildung 5.16: In Geschwindigkeitsklassen à 4 km/h energetisch gemittelte Schallleistungspegel für die SWISS10-Kategorie 3 (PW) am Standort Michelstrasse, aufwärts (links) und abwärts (rechts). Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den arithmetischen Pegelmittelwert auf. Zusätzlich sind die Anzahl Fahrzeuge pro Geschwindigkeitsklasse gezeigt.

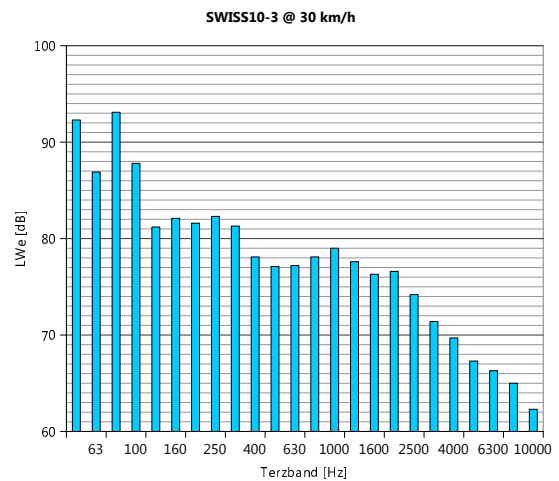
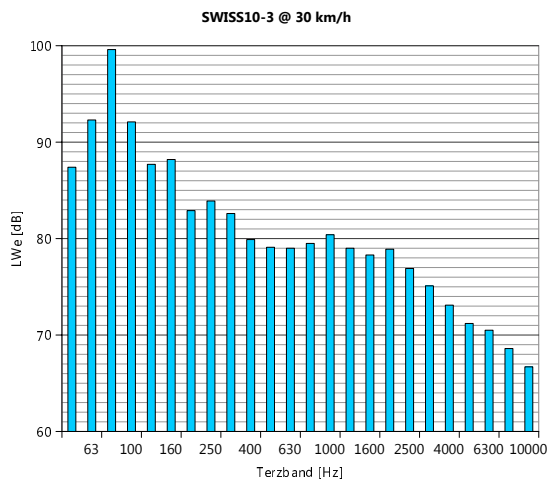


Abbildung 5.17: Energetisch gebildete mittlere Schallleistungsspektren bei 30 km/h für die SWISS10-Kategorie 3 (PW) am Standort Michelstrasse, aufwärts (links) und abwärts (rechts).

5.7 Einzelereignismessung Kürbergstrasse Tempo 30, Steigung: 14 %

5.7.1 Situation

In der Abbildung 5.18 ist der Messstandort an der Kürbergstrasse in Zürich bei einer Steigung von 14 % auf dem Satellitenfoto dargestellt.



Abbildung 5.18: Standort der Messung an der Kürbergstrasse.

5.7.2 Messung

Es wurde wiederum an zwei Tagen gemessen: am 15.07.2016 und am 20.07.2016. Da am ersten Messtag relativ bald nach der Messinstallation um die Mittagszeit eine Baustelle im Hintergrund für periodische Störgeräusche sorgte, wurde am zweiten Messtag über Mittag gemessen um so die Mittagspause der Baustelle für die Messungen auszunutzen. Die Messausrüstung ist dieselbe, wie in Kapitel 5.6.2 beschrieben. Das Mikrophon wurde in einer Höhe von 1.2 m ab Boden, in 7.5 m Abstand zur (einspurig) befahrenen Fahrbahn aufgestellt. Mittels Radarpistole wurde wiederum die Geschwindigkeit der vorbeifahrenden Fahrzeuge bestimmt. Im Protokoll wurden zudem Fahrtrichtung, Fahrzeugkategorie, Störgeräusche und der genaue Zeitstempel vermerkt. In der Abbildung 5.19 ist der Messstandort mit Fotos dokumentiert.

5.7.3 Auswertung

Abbildung 5.20 zeigt für die SWISS10-Kategorie 3 (PW) die A-bewerteten Schallleistungspegel in jeweils 4 km/h breiten Geschwindigkeitsklassen. In Abbildung 5.21 sind die Spektren für die Nenngeschwindigkeit von 30 km/h gezeigt. Die Tabelle 5.7 zeigt die A-Pegel, in Tabelle 5.8 sind die über alle Geschwindigkeitsklassen gemittelten Standardabweichungen gezeigt.



Abbildung 5.19: Fotos des Messtandortes Kürbergstrasse.

	cat 1	cat 2	cat 3	cat 4	cat 5	cat 6	cat 7	cat 8	cat 9	cat 10
aufwärts			90.1							
abwärts			88.8							

Tabelle 5.7: Zusammenstellung der A-bewerteten Schallleistungspegel für die auswertbaren SWISS10-Kategorien bei 30 km/h am Standort Kürbergstrasse.

	cat 1	cat 2	cat 3	cat 4	cat 5	cat 6	cat 7	cat 8	cat 9	cat 10
aufwärts			1.8							
abwärts			1.4							

Tabelle 5.8: Zusammenstellung der durchschnittlichen Standardabweichungen der A-bewerteten Schallleistungspegel für die auswertbaren SWISS10-Kategorien am Standort Kürbergstrasse.

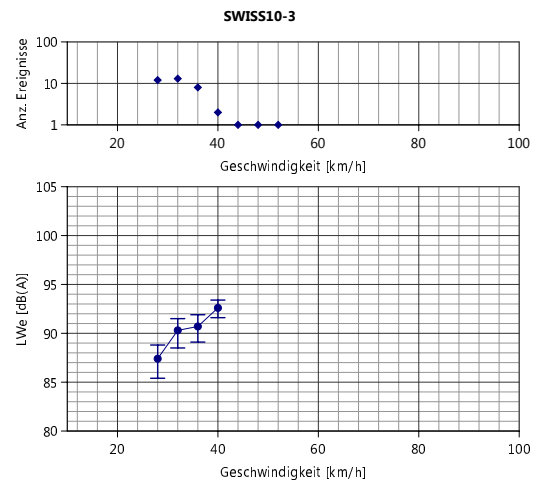
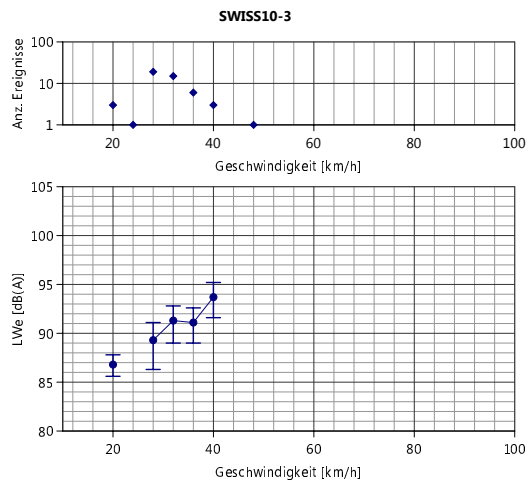


Abbildung 5.20: In Geschwindigkeitsklassen à 4 km/h energetisch gemittelte Schallleistungspegel für die SWISS10-Kategorie 3 (PW) am Standort Kürbergstrasse, aufwärts (links) und abwärts (rechts). Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den arithmetischen Pegelmittelwert auf. Zusätzlich sind die Anzahl Fahrzeuge pro Geschwindigkeitsklasse gezeigt.

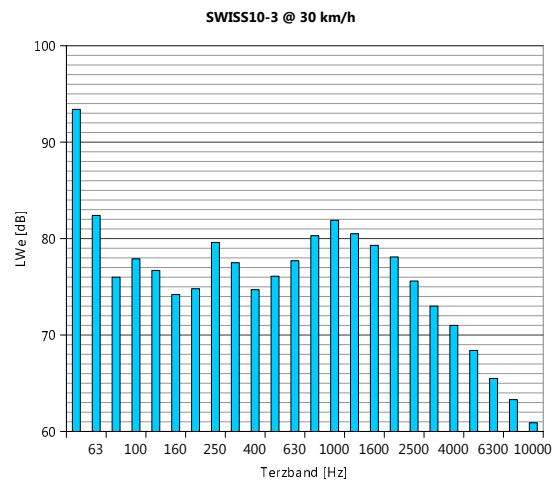
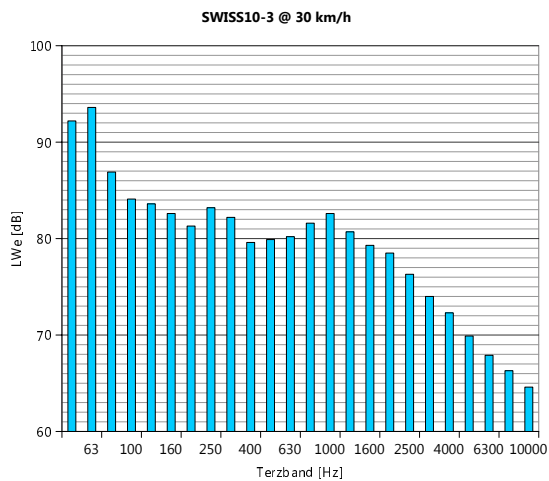


Abbildung 5.21: Energetisch gebildete mittlere Schallleistungsspektren bei 30 km/h für die SWISS10-Kategorie 3 (PW) am Standort Kürbergstrasse, aufwärts (links) und abwärts (rechts).

5.8 Einzelereignismessung Langensteinenstrasse Tempo 30, Steigung: 7 %

5.8.1 Situation

Die Langensteinenstrasse in Zürich ist eine Tempo-30 Zone mit einer moderaten Steigung von 7 %. Der Verkehr wird aufgrund von Parkplätzen am Strassenrand teilweise einspurig geführt. Dies wurde ausgenutzt, sodass nur ein Messmikrophon eingerichtet werden musste, um die auf- und abwärts-fahrenden Fahrzeuge zu vermessen. Dabei wurde der Standort wie in der Abbildung 5.22 abgebildet ausgewählt:



Abbildung 5.22: Messstandort (roter Punkt) an der Langensteinenstrasse.

5.8.2 Messung

Die Messung wurde am 15.07.2016 von 14:00 - 15:00 Uhr durchgeführt. Dabei war es sonnig und 16 °C warm. Das Messequipment bestand aus den in Kapitel 5.6.2 beschriebenen Komponenten. Das Messmikrophon konnte aufgrund der Topografie des Strassenbords nicht im flachen Gelände aufgebaut werden sondern musste - wie in Abbildung 5.23 gezeigt - aufgebaut werden.

Die vorbeifahrenden Fahrzeuge wurden im Protokoll in die Fahrzeugkategorien der SWISS10 unterteilt. Weiter wurde mittels Radarpistole die Geschwindigkeit bestimmt und protokolliert.

5.8.3 Auswertung

Abbildung 5.24 zeigt für die SWISS10-Kategorie 3 (PW) die A-bewerteten Schallleistungspegel in jeweils 4 km/h breiten Geschwindigkeitsklassen. In Abbildung 5.25 sind die Spektren für die Nenngeschwindigkeit von



Abbildung 5.23: Fotos des Messstandorts Langensteinstrasse.

30 km/h gezeigt. Die Tabelle 5.9 zeigt die A-Pegel, in Tabelle 5.10 sind die über alle Geschwindigkeitsklassen gemittelten Standardabweichungen gezeigt.

	cat 1	cat 2	cat 3	cat 4	cat 5	cat 6	cat 7	cat 8	cat 9	cat 10
aufwärts			91.3							
abwärts			88.5							

Tabelle 5.9: Zusammenstellung der A-bewerteten Schallleistungspegel für die auswertbaren SWISS10-Kategorien bei 30 km/h am Standort Langensteinstrasse.

	cat 1	cat 2	cat 3	cat 4	cat 5	cat 6	cat 7	cat 8	cat 9	cat 10
aufwärts			3.3							
abwärts			1.8							

Tabelle 5.10: Zusammenstellung der durchschnittlichen Standardabweichungen der A-bewerteten Schallleistungspegel für die auswertbaren SWISS10-Kategorien am Standort Langensteinstrasse.

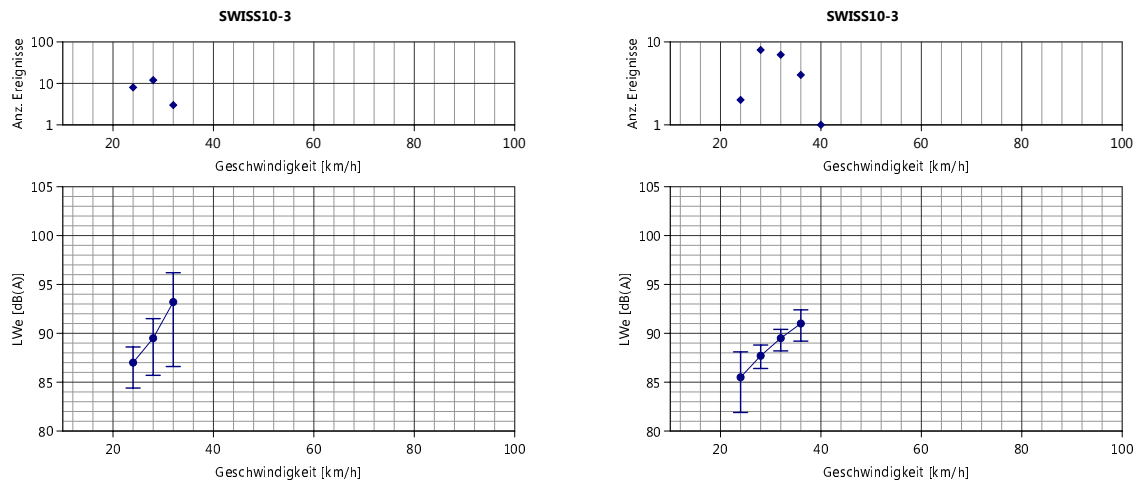


Abbildung 5.24: In Geschwindigkeitsklassen $\Delta 4$ km/h energetisch gemittelte Schallleistungspegel für die SWISS10-Kategorie 3 (PW) am Standort Langensteinstrasse, aufwärts (links) und abwärts (rechts). Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den arithmetischen Pegelmittelwert auf. Zusätzlich sind die Anzahl Fahrzeuge pro Geschwindigkeitsklasse gezeigt.

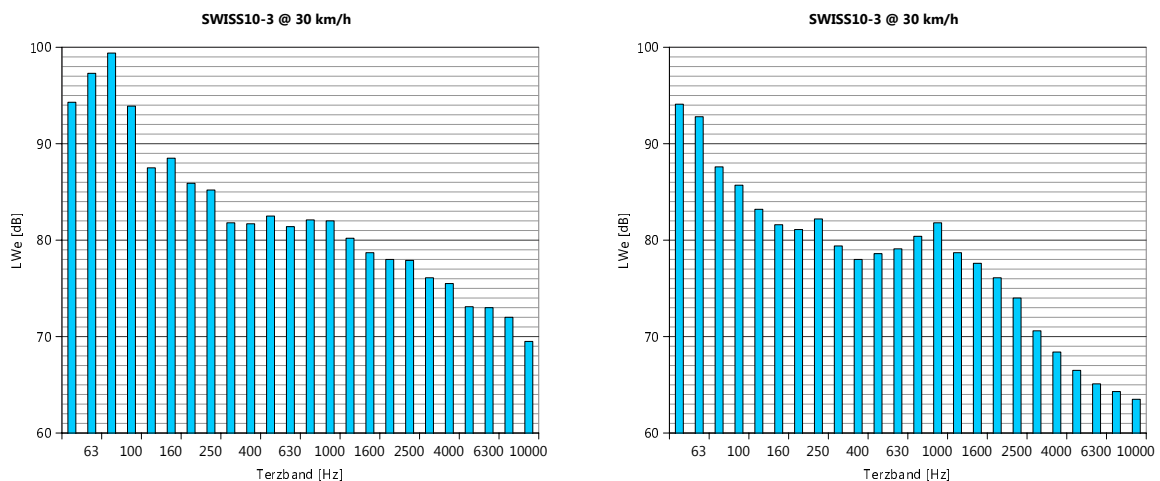


Abbildung 5.25: Energetisch gebildete mittlere Schallleistungsspektren bei 30 km/h für die SWISS10-Kategorie 3 (PW) am Standort Langensteinstrasse, aufwärts (links) und abwärts (rechts).

5.9 Diskussion der Pegel-Ortsverläufe der Einzelereignis Tempo 30 Messungen

Die Abbildung 5.26 zeigt die durchschnittlichen Pegel-Ortsverläufe in der SWISS10-Kategorie 3 (PW) an den drei Standorten Michelstrasse, Kürbergstrasse und Langensteinstrasse. In die Mittelwertbildung wurden alle SWISS10-Kategorie 3 Fahrzeuge mit einer Geschwindigkeit zwischen 20 und 40 km/h einbezogen. Für die Pegelverläufe wurde jeweils eine Normierung auf den Maximalwert (im kürzesten Abstand erreicht) vorgenommen. Im Unterschied zu den Messungen bei höheren Geschwindigkeiten bzw. im Flachen verlaufen hier die Pegelabnahmen leicht steiler als bei der omnidirektionalen Punktquelle.

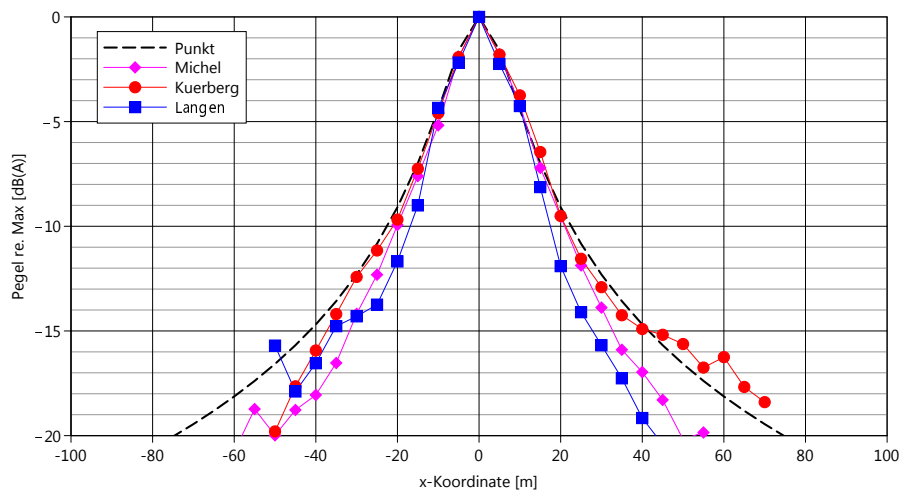


Abbildung 5.26: Mittlere Pegel-Ortsverläufe an den drei T30 Standorten Michelstrasse, Kürbergstrasse und Langensteinstrasse für die SWISS10-Kategorie 3 (PW) im Vergleich zum Verhalten einer omnidirektionalen Punktquelle.

5.10 Validierungsmessung Tobelhofstrasse: Tempo 50 und Steigung 7.5%

5.10.1 Situation

Der Messstandort Tobelhofstrasse befindet sich in Zürich (Koordinaten: 2685577, 1248031) auf Höhe der Hausnummern 34/36. Die Strasse hat dort eine Steigung von 7.5%. Beim Belag handelt es sich um einen AB 11 mit Oberflächenbehandlung (OB) und diversen Flickern. Zum Alter liegen keine Angaben vor.

In der Abbildung 5.27 ist der Messstandort Tobelhofstrasse auf dem Satellitenfoto dargestellt und Abbildung 5.28 zeigt ein Foto des Standortes.



Abbildung 5.27: Standort der Messung Tobelhofstrasse (roter Punkt).



Abbildung 5.28: Foto des Messtandortes Tobelhofstrasse. Blick in Fahrtrichtung Dübendorf (aufwärts).

5.10.2 Messung

Die Messung wurde am 5.5.2017 von ca. 9.30 bis 10 Uhr durchgeführt. Es war sonnig bei 15°C. Der Messpunkt wurde 7.5 m ab Mitte der Strasse auf Seite der Fahrspur abwärts in Richtung Zürich und einer Höhe von 1.2 m über Fahrbahn aufgestellt. Eine an die Strasse angrenzende Zone von etwa 2 m Breite ist nicht schallhart. Die signalisierte Geschwindigkeit ist 50 km/h. Für die Messung wurde die Audiospur mit einem Schallpegelmesser B & K 2238 #2 auf einen Sounddevice, Modell 702T #23, aufgezeichnet. Es wurde eine Verkehrszählung kategorisiert nach SWISS10 spurgetrennt durchgeführt und die Geschwindigkeit der Fahrzeuge mit einer Bushnell Radarpistole (Genauigkeit: ± 2 km/h) gemessen. Die Ergebnisse werden im Abschnitt zur Modellvalidierung vorgestellt.

5.11 Validierungsmessung Gsteigstrasse: Tempo 50 und Steigung 13%

5.11.1 Situation

Der Messstandort Gsteigstrasse befindet sich in Zürich Höngg (Koordinaten: 2680308, 1250821). Die Strasse hat dort eine Steigung von 13%. Beim Belag handelt es sich um einen SMA 11 mit Einbaujahr 2004.

In der Abbildung 5.29 ist der Messstandort Gsteigstrasse auf dem Satellitenfoto dargestellt und Abbildung 5.30 zeigt ein Foto des Standortes.

5.11.2 Messung

Die Messung wurde am 5.5.2017 von ca. 10.40 bis 11.20 Uhr durchgeführt. Es war sonnig bei 17°C. Der Messpunkt wurde 7.5 m ab Mitte der Strasse auf Seite der Fahrspur abwärts in Richtung Zürich und einer Höhe von 1.2 m über Fahrbahn aufgestellt. Die ganze für die Bodenreflexion massgebende Zone ist schallhart. Die signalisierte Geschwindigkeit ist 50 km/h. Für die Messung wurde die Audiospur mit einem Schallpegelmesser B & K 2238 #2 auf einen Sounddevice, Modell 702T #23, aufgezeichnet. Es wurde eine Verkehrszählung kategorisiert nach SWISS10 spurgetrennt durchgeführt und die Geschwindigkeit der Fahrzeuge mit einer Bushnell Radarpistole (Genauigkeit: ± 2 km/h) gemessen. Die Ergebnisse werden im Abschnitt zur Modellvalidierung vorgestellt.

5.12 Validierungsmessung Fällanden: Tempo 50 und Steigung 7.2%

5.12.1 Situation

Der Messstandort Fällanden, Kt. Zürich befindet sich an der Zürichstrasse (Koordinaten: 2690188, 1247421). Die Strasse hat dort eine Steigung von 7.2%. Beim Belag handelt es sich um einen AC 11 H mit Einbaujahr

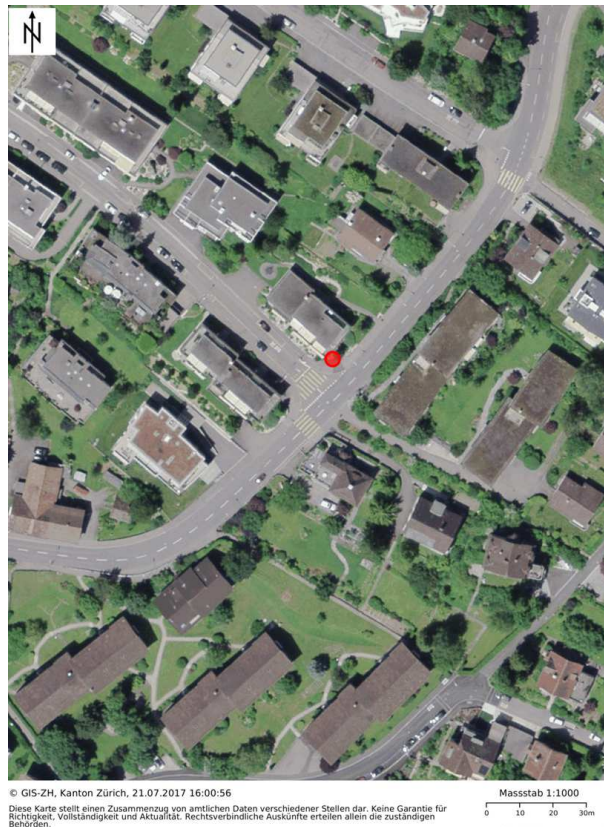


Abbildung 5.29: Standort der Messung Gsteigstrasse (roter Punkt).



Abbildung 5.30: Foto des Messstandortes Gsteigstrasse. Blick aufwärts in Richtung Höngg.

2012.

In der Abbildung 5.31 ist der Messstandort Fällanden auf dem Satellitenfoto dargestellt und Abbildung 5.32 zeigt ein Foto des Standortes.

5.12.2 Messung

Die Messung wurde am 5.5.2017 von ca. 12.00 bis 12.30 Uhr durchgeführt. Es war sonnig bei 17°C. Der Messpunkt wurde 7.5 m ab Mitte der Strasse auf Seite der Fahrspur aufwärts in Richtung Zürich und einer Höhe von 1.2 m über Fahrbahn aufgestellt. Die ganze für die Bodenreflexion massgebende Zone ist schallhart. Die signalisierte Geschwindigkeit ist 50 km/h. Für die Messung wurde die Audiospur mit einem



Abbildung 5.31: Standort der Messung Fällanden (roter Punkt).



Abbildung 5.32: Foto des Messstandortes Fällanden. Blick aufwärts in Richtung Zürich.

Schallpegelmesser B & K 2238 #2 auf einen Sounddevice, Modell 702T #23, aufgezeichnet.

Es wurde eine Verkehrszählung kategorisiert nach SWISS10 spurgetrennt durchgeführt und die Geschwindigkeit der Fahrzeuge mit einer Bushnell Radarpistole (Genauigkeit: ± 2 km/h) gemessen. Die Ergebnisse werden im Abschnitt zur Modellvalidierung vorgestellt.

5.13 Einzelereignismessung Vauffelin im Stillstand

Im Rahmen der Begleitung des von Grolimund + Partner bearbeiteten VSS Forschungsprojekts "VSS 2012/214, Lärmwirkung von Tempo 30" [11] wurden durch die Empa am 22.4.2015 bei rund 18 °C Lufttemperatur anlässlich der Messkampagne *Vauffelin* mit allen 22 teilnehmenden Fahrzeugen (21 PW und 1 Lieferwagen) Messungen des Motorgeräusches im Stillstand durchgeführt. Dabei wurde der Schalldruck auf 1.2 m Höhe in einem Abstand von 5.0 m von der Fahrzeugmitte mit dem Environmental-Noise Analyzer Norsonic 121, Empa Nr. 2 registriert und spektral ausgewertet. Der Boden zwischen Fahrzeug und Mikrophon kann als schallhart erachtet werden. Die Messungen wurden einerseits im Leerlauf-Zustand, andererseits bei einer Motordrehzahl von 2000 U/min (aber ohne Last) durchgeführt.



Abbildung 5.33: Stillstandsmessungen in Vauffelin.

Für die während der Messung herrschenden atmosphärischen Bedingungen wurde die in Tabelle 5.11 gezeigte spektrale Luftdämpfung angesetzt.

≤ 2 kHz	2.5 kHz	3.15 kHz	4.0 kHz	5.0 kHz	6.3 kHz	8.0 kHz	10.0 kHz
0	0.013	0.018	0.027	0.041	0.062	0.096	0.146

Tabelle 5.11: Angesetzte spektrale Luftdämpfungskoeffizienten α_{atm} für die Messung in Vauffelin in dB/m.

Unter Annahme eines Punktquellenverhaltens wurden sämtliche Messpegel um $20 \lg \left(\frac{5.0}{7.5} \right) = -3.5$ dB korrigiert und so als Schalldruckpegel in 7.5 m Abstand ausgedrückt. Der Schallleistungspegel $L_{W,e}$ wurde aus dem 7.5 m Schalldruckpegelspektrum mit Gl. 4.8 mit $d = 7.5$ m bestimmt. Die Abbildung 5.34 zeigt die so gewonnenen Schalldruck- und Schallleistungs-Terzbandspektren. Für Personenwagen kann dieses Schallleistungsspektrum als repräsentativ für Stausituationen eingesetzt werden.

Der Vollständigkeit halber zeigt Abbildung 5.35 die Ergebnisse für die Stillstandsmessungen bei 2000 U/min. Es gilt hier zu beachten, dass diese Messung ohne externe Last erfolgte und deshalb lediglich als untere Schranke für das Motorgeräusch bei 2000 U/min betrachtet werden kann.

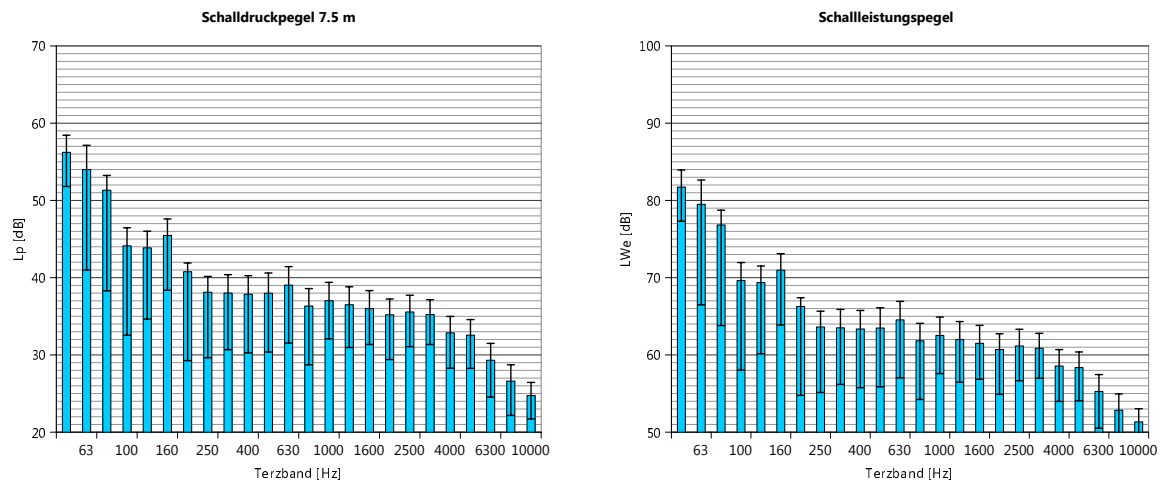


Abbildung 5.34: Schalldruck in 7.5 m (links) und Schallleistung (rechts) der Leerlauf-Stillstandsmessungen in Vauffelin. Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den arithmetischen Pegelmittelwert auf.

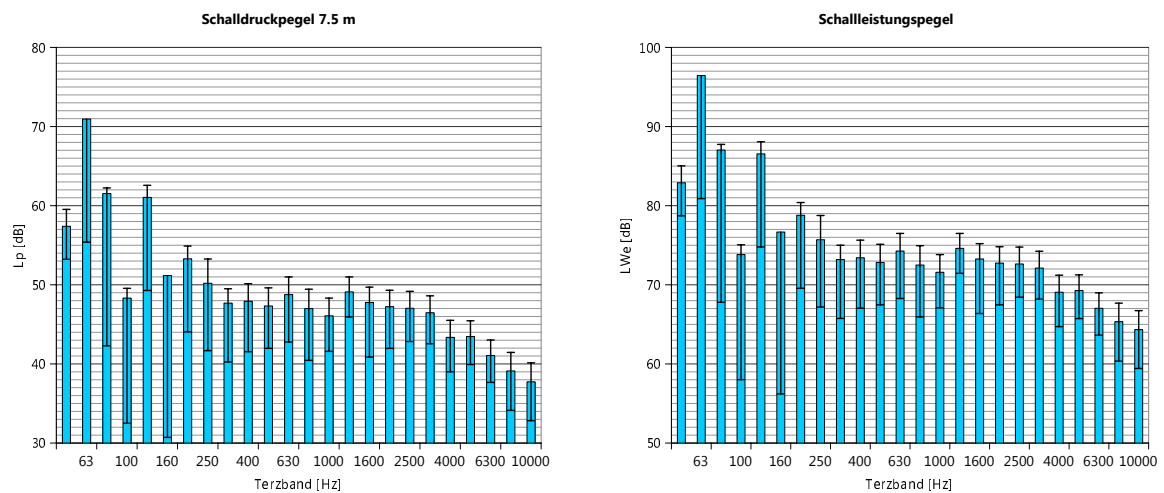


Abbildung 5.35: Schalldruck in 7.5 m (links) und Schallleistung (rechts) der Stillstandsmessungen bei 2000 U/min ohne Last in Vauffelin. Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den arithmetischen Pegelmittelwert auf.

6 Vertikale Abstrahlcharakteristik

sonROAD18 berücksichtigt eine vertikale Abstrahlcharakteristik zur Erhöhung der Prognosegenauigkeit bei quellennahen Lärmschirmen oder bei quellennahen, hoch gelegenen Empfangspunkten. Anhand verschiedener Messungen wurde ein empirisches Modell abgeleitet, das getrennt für PW und LKW eine elevationswinkelabhängige spektrale Korrektur der Abstrahlung spezifiziert.

6.1 Methoden und Messgeräte

6.1.1 Messanordnung

Für die Vermessung der vertikalen Abstrahlcharakteristik wurden Einzelereignisvorbeifahrtmessungen unter den in Tabelle 6.1 aufgeführten Winkeln registriert.

Winkel [°]	9.2	25	2 x 35	45	55	65	75
------------	-----	----	--------	----	----	----	----

Tabelle 6.1: In der messtechnischen Untersuchung verwendete Elevationswinkel.

Die Messgeometrie wurde entsprechend Abbildung 6.1 gewählt. Das Referenzmikrophon M1 (7.5/1.2 m) sowie die Mikrofonkanäle 2 und 3 wurden auf der einen, die Mikrofonkanäle 4 bis 8 auf der anderen Strassenseite installiert.

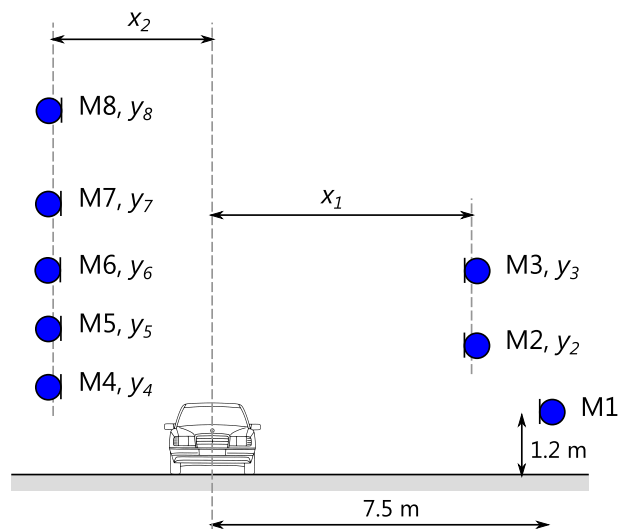


Abbildung 6.1: Gewählte Mikrofonanordnung (M1 bis M8) im Strassenquerschnitt und zugehörige Geometrieangaben x und y .

6.1.2 Messgeräte

An allen Messstandorten wurde dieselbe Messkette eingesetzt. Die Mikrophone M1 und M8 beinhalteten einen Schallpegelmesser, Brüel & Kjær 2238, die Mikrophone M2 bis M7 waren über einen phantomgespiesenen Impedanzwandler Mikrotech Gefell Typ MV 220 P48 direkt mit den Audiorekordern (Sound Devices 744T/702T) verbunden. Die Spezifikationen sind in Tabelle 6.2 ersichtlich. Die Geschwindigkeit der Fahrzeuge wurde mit einer Bushnell Radarpistole (Genauigkeit: ± 2 km/h) gemessen.

Mikrophon	Sound Device	Sound Device Kanal	Mikrophon	Impedanz- wandler	Schallpegel- messer
M1	Intern Nr. 31	3	-	-	Intern Nr. 6
M2	Intern Nr. 31	2	2356113	0111	-
M3	Intern Nr. 31	1	2345497	0169	-
M4	Intern Nr. 25	2	2542921	0110	-
M5	Intern Nr. 25	1	2887447	0170	-
M6	Intern Nr. 32	2	2695370	0171	-
M7	Intern Nr. 32	1	2294348	0168	-
M8	Intern Nr. 32	3	-	-	Intern Nr. 7

Tabelle 6.2: Bezeichnungen der verwendeten Messgeräte.

6.1.3 Messstandorte

Die Messungen wurden an den Standorten Breite und Flaach (Tempo 50) sowie Rümikon und Volken (Tempo 80) durchgeführt.

6.2 Messungen

6.2.1 Messung T50 Breite

Die Messung in Breite, Kt. ZH (Nürensdorf; 47°27'37.5"N, 8°39'33.7"E, bzw. 2692044 / 1257341) wurde am 28.10.2016 von 10:30 bis 14:45 Uhr durchgeführt. Zu Beginn war es neblig bei 7.8°C. Während der Messung löste sich der Nebel auf, es blieb jedoch bedeckt. Die Temperatur betrug am Ende 12°C. Die relative Luftfeuchtigkeit sank von anfänglichen 91% auf 84%.

Gemessen wurden die Fahrzeuge auf der alten Winterthurerstrasse am Dorfeingang von Breite in Fahrtrichtung Winterthur. Gemäss Aktennotiz vom 11.4. von Urs Waldner von der FALS Kt. Zürich ist der Belag ein AC 8 S mit einem Hohlraumgehalt von 4.0 Volumenprozent. Die signalisierte Geschwindigkeit beträgt 50 km/h. Die Mikrofonanordnung wurde wie in Abbildung 6.1 gewählt. Die zugehörigen Höhen y_2 bis y_8 können der Tabelle 6.3 entnommen werden, die horizontalen Distanzen betrugen $x_1 = 6.40$ m und $x_2 = 3.25$ m.

Tabelle 6.3: Höhen der Mikrophone über Boden (gemäss Abbildung 6.1).

Höhe	Wert [m]
y_2	2.80
y_3	4.20
y_4	2.00
y_5	2.85
y_6	4.07
y_7	6.11
y_8	11.85

Die Mikrophone M2 und M3 wurden im gleichen Querschnitt wie die Mikrophone M4 bis M8 aufgestellt. Leicht versetzt dazu stand das Referenzmikrofon M1. Die Abbildung 6.2 zeigt die Messstelle in Breite.

6.2.2 Messung T50 Flaach

Die Messung in Flaach, Kt. ZH (47°34'26.8"N, 8°36'06.5"E, bzw. 2687517 / 1269915) wurde am 13.10.2016 von 11:30 bis 14:00 Uhr durchgeführt. Während der gesamten Messung war der Himmel bedeckt. Die Temperatur betrug zu Beginn 8°C und am Nachmittag stieg sie auf 12°C. Die relative Luftfeuchtigkeit sank von anfänglichen 73% auf 62%.

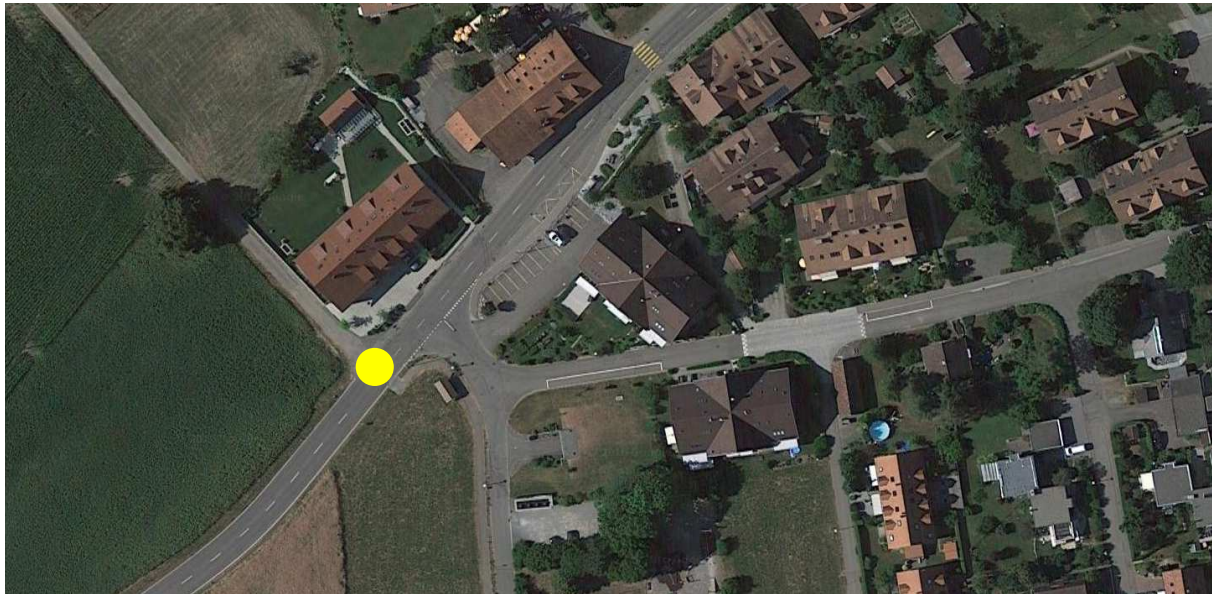


Abbildung 6.2: Messstelle in Breite.

Gemessen wurden die Fahrzeuge auf der Hauptstrasse, welche in Richtung Volken fuhren. Gemäss Aktennotiz vom 11.4. von Urs Waldner von der FALS Kt. Zürich ist der Belag ein AB 11 S aus dem Jahr 2003 mit einem Hohlraumgehalt von 4.5 Volumenprozent. Die signalisierte Geschwindigkeit beträgt 50 km/h. Die Mikrophanordnung wurde wie in Abbildung 6.1 gewählt mit den zugehörigen Höhen gemäss Tabelle 6.4, die horizontalen Distanzen betrugen $x_1 = 5.6$ m und $x_2 = 3.1$ m.

Tabelle 6.4: Höhen der Mikrophone über Boden (gemäss Abbildung 6.1).

Höhe	Wert [m]
y_2	2.42
y_3	3.64
y_4	1.91
y_5	2.73
y_6	3.90
y_7	5.86
y_8	11.41

Aufgrund des rege benutzten Parkplatzes konnten die Mikrophone nicht alle in einem Querschnitt angeordnet werden. Die Mikrophone M1 bis M3 wurden entsprechend um 57 m in Richtung Rüdlingen verschoben. Die Abbildung 6.3 zeigt die Messstellen in Flaach.

6.2.3 Messung T80 Rümikon

Die Messung in Rümikon, Kt. AG (47°34'07.0" N, 8°23'17.6" E) wurde am 27.10.2016 von 11:30 bis 14:30 Uhr durchgeführt. Zu Beginn der Messung war es neblig. Der Nebel löste sich schnell auf, so dass der Himmel fast wolkenlos und sonnig wurde. Die Temperatur betrug zu Beginn 12°C und am Nachmittag stieg sie auf 14°C. Die relative Luftfeuchtigkeit sank von anfänglichen 79% auf 64%.

Gemessen wurden die Fahrzeuge auf der Hauptstrasse, zwischen Kaiserstuhl und Rümikon, welche in Richtung Rümikon fuhren. Der Belag ist ein ACMR8 aus dem Jahr 2010. Die signalisierte Geschwindigkeit beträgt 80 km/h. Die Mikrophanordnung wurde wie in Abbildung 6.1 gewählt mit den zugehörigen Höhen gemäss Tabelle 6.5, die horizontalen Distanzen betrugen $x_1 = 6.40$ m und $x_2 = 3.25$ m.

Die Mikrophone M4 bis M8 wurden im gleichen Querschnitt wie die Mikrophone M2 und M3 bzw. M1 aufgestellt. Die Abbildung 6.4 zeigt die Messstelle in Rümikon.



Abbildung 6.3: Messstelle in Flaach mit den auf zwei Standorte aufgeteilten Mikrofonpositionen.

Tabelle 6.5: Höhen der Mikrophone über Boden (gemäss Abbildung 6.1).

Höhe	Wert [m]
y_2	2.80
y_3	4.20
y_4	2.00
y_5	2.85
y_6	4.07
y_7	6.11
y_8	11.85



Abbildung 6.4: Messstelle in Rümikon.

6.2.4 Messung T80 Volken

Die Messung in Volken, Kt. ZH ($47^{\circ}34'23.9''$ N, $8^{\circ}38'10.8''$ E, bzw. 2690116 / 1269865) wurde am 20.10.2016 von 10:45 bis 14:00 Uhr durchgeführt. Während der gesamten Messung war der Himmel grösstenteils bedeckt. Die Temperatur betrug zu Beginn 10°C und am Nachmittag stieg sie auf 16°C . Die relative Luftfeuchtigkeit sank von anfänglichen 66% auf 58%.

Gemessen wurden die Fahrzeuge auf der Flaachtalstrasse zwischen Dorf und Volken, welche in Richtung Volken

führen. Gemäss Aktennotiz vom 11.4. von Urs Waldner von der FALS Kt. Zürich ist der Belag ein AC 11 S aus dem Jahr 2011 mit einem Hohlraumgehalt von 4.1 Volumenprozent. Die signalisierte Geschwindigkeit beträgt 80 km/h. Die Mikrofonanordnung wurde wie in Abbildung 6.1 gewählt mit den zugehörigen Höhen gemäss Tabelle 6.6, die horizontalen Distanzen betragen $x_1 = 6.4$ m und $x_2 = 3.3$ m.

Tabelle 6.6: Höhen der Mikrophone über Boden (gemäss Abbildung 6.1).

Höhe	Wert [m]
y_2	2.80
y_3	4.20
y_4	2.00
y_5	2.85
y_6	4.07
y_7	6.11
y_8	11.85

Die Mikrophone M4 bis M8 wurden im gleichen Querschnitt wie die Mikrophone M2 und M3 bzw. M1 aufgestellt. Die Abbildungen 6.5 und 6.6 zeigen die Messstelle in Volken.

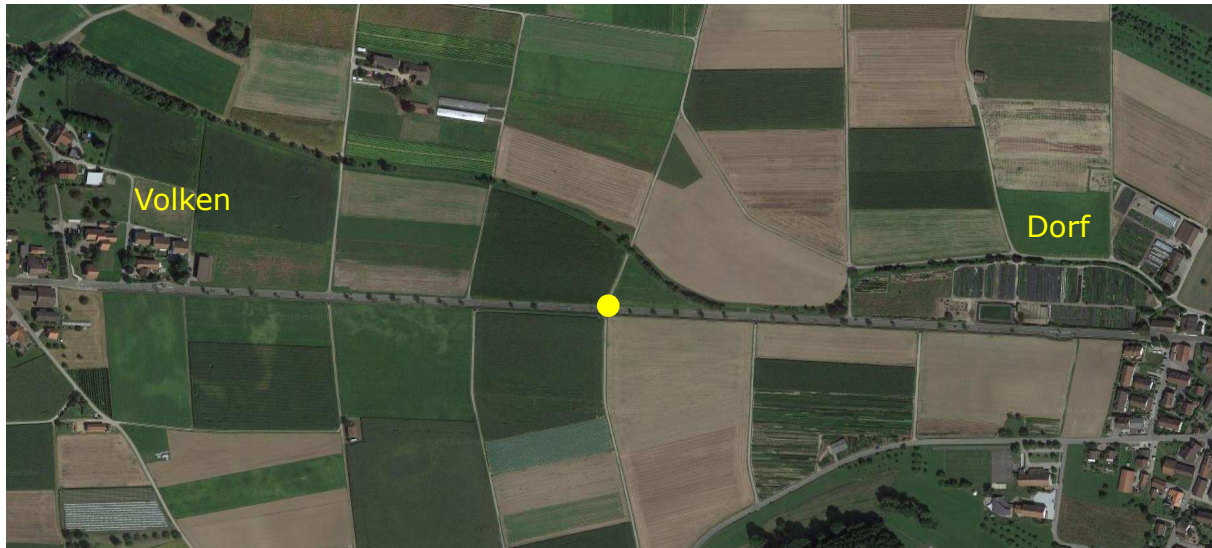


Abbildung 6.5: Messstelle in Volken.

6.3 Resultate

6.3.1 Ereignisübersicht

Tabelle 6.7 gibt einen Überblick zu allen gemessenen Fahrzeugen.

Standort	v [km/h]	PW (cat3)	LKW (cat8-10)	Anzahl Sonstige	Total pro Standort
Breite	50	129	5	9	143
Flaach	50	84	14	10	108
Rümikon	80	140	46	17	203
Volken	80	116	15	18	149
Total		469	80	54	

Tabelle 6.7: Anzahl erfasste Durchfahrten pro Standort und Fahrzeugkategorie.



Abbildung 6.6: Messstelle in Volken. Links: Messstelle mit Blick Richtung Volken. Rechts: Messaufbau quer zur Fahrtrichtung. Unten: Messstelle in Blickrichtung Dorf.

Ausgewertet wurden nur die Kategorien PW (cat3) und eine Sammelkategorie LKW (cat8-10), von allen anderen Fahrzeugkategorien der SWISS10-Kategorisierung waren zu wenige gemessene Durchfahrten vorhanden.

6.3.2 Vorgehen Auswertung

Die aufgezeichneten Mikrophonsignale wurden mittels der Audioanalyse-Software FAMOS in Schalldruckpegelspektren mit einer zeitlichen Auflösung von 0.1 s übersetzt. Anschliessend wurden die Schalldruckquadrate pro

Durchfahrtsereignis zum Schallereignispegel (L_E) aufsummiert. Zur Bestimmung der Integrationszeit wurde der A-Pegel-Zeitverlauf herangezogen und dort der Abschnitt vom Pegelminimum über das Ereignismaximum bis wieder zum Pegelminimum identifiziert. Die so gefundene Integrationszeit wurde auf alle Terzen des jeweiligen Mikrophons angewendet.

Um die Mikrophonpegel untereinander vergleichbar zu machen, wurden sie mit $10\lg(\frac{d}{d_0})$ auf die Referenzdistanz von 7.5 m normiert. Dazu wurde die Schallquelle 0.05 m über Boden der Fahrbahnmitte angenommen.

Für jedes Vorbeifahrtsereignis wurde schliesslich pro Mikrophon i das Schallereignispegel-Delta $\Delta L_E(i)$ zum Referenzmikrophon berechnet (6.1). Ein negatives Delta bedeutet, dass unter dem betrachteten Winkel ein tieferer Schallereignispegel als am Referenzmikrophon resultiert.

$$\Delta L_E(i) = \text{Ereignispegel}(i) - \text{Ereignispegel}(\text{Referenzmikrophon}) \quad (6.1)$$

Da bei den PW's pro Standort zwischen 84 und 140 Durchfahrten protokolliert wurden, konnte eine Selektion nach „Qualität“ der Durchfahrt gemacht werden. Als Qualitätsmass wurde die Summe der links- und rechtsseitigen Pegeldifferenzen von Ereignismaximum zu den Minima herangezogen. Für die weiteren Berechnungen wurden nur die 40% besten Durchfahrten pro Standort berücksichtigt.

Bei den LKW's war auf Grund der kleineren Ereigniszahlen eine Qualitätsselektion nicht möglich, allerdings waren die LKW Ereignisse generell weniger störgeräuschbehaftet.

6.3.3 Ergebnisse für PW

Ein erster Vergleich der ΔL_E -Werte zwischen den Standorten ergab keine systematischen Unterschiede, sodass für die weiteren Auswertungen die Ergebnisse aller Standorte zusammengefasst wurden. Abbildung 6.7 zeigt die spektralen Ereignispegeldifferenzen für die untersuchten Elevationswinkel. Im A-Pegel ergibt sich unter 75° eine Pegelabnahme von 2 bis 3 dB(A).

6.3.4 Ergebnisse für LKW

Wie schon für die PW Kategorie wurde auch bei den LKW's keine standortspezifische Auswertung vorgenommen. Abbildung 6.8 zeigt die spektralen Ereignispegeldifferenzen für die untersuchten Elevationswinkel. Im A-Pegel ergibt sich unter 75° eine Pegelabnahme von 4 bis 5 dB(A).

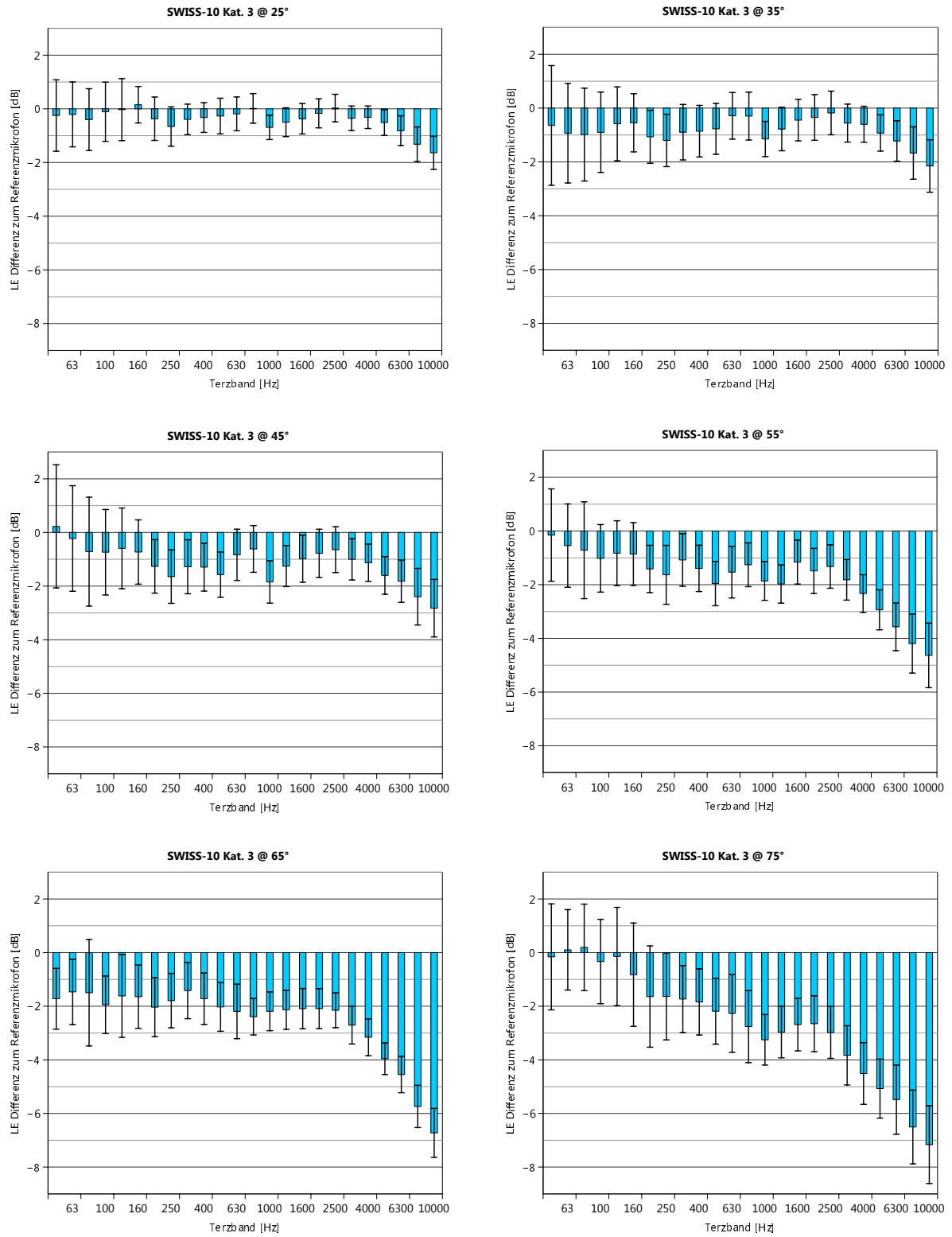


Abbildung 6.7: Median der Schallereignispegeldifferenz zum Referenzmikrofon pro Winkel und Terzband für PW's. Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den Median des ΔL_E auf.

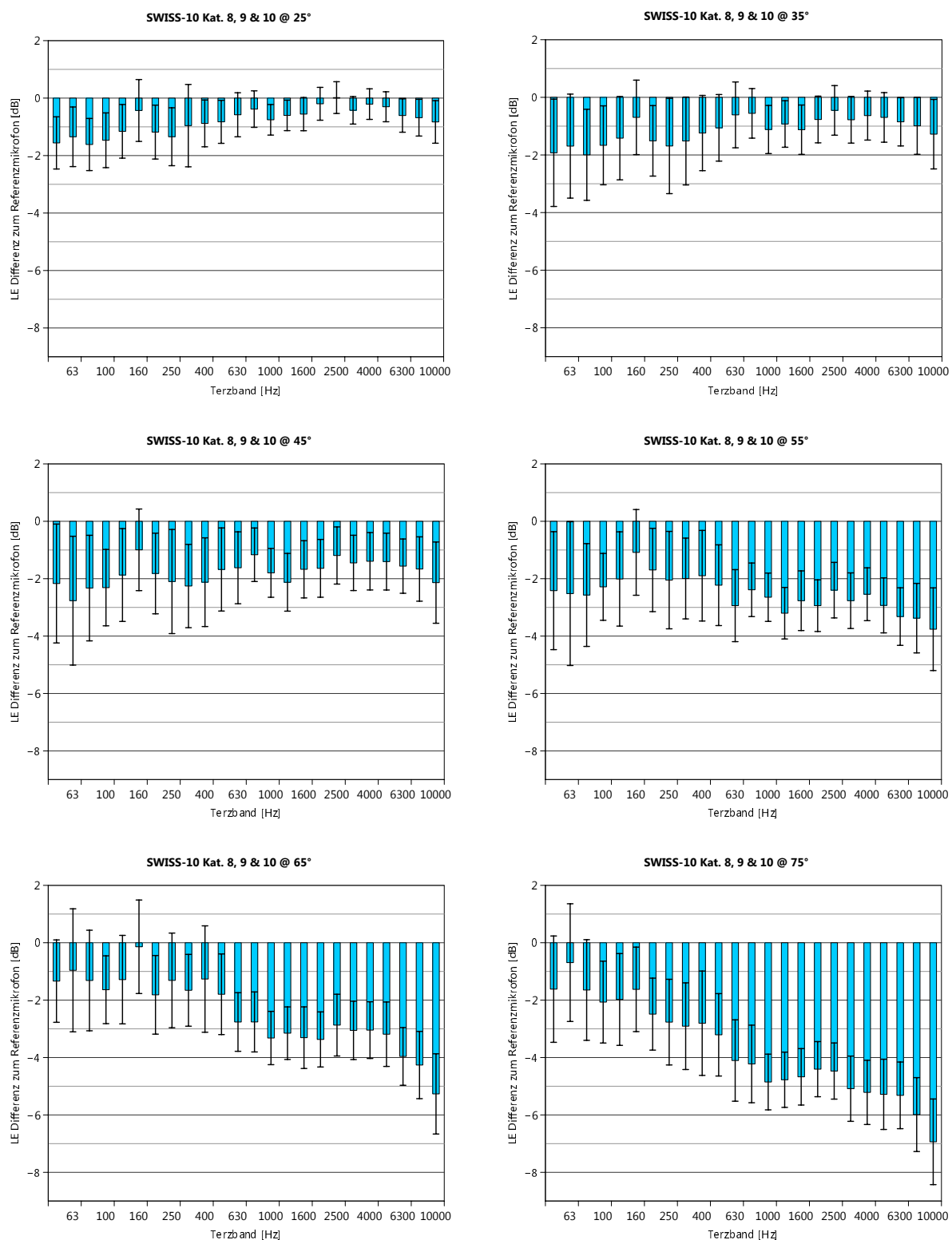


Abbildung 6.8: Median der Schallereignispegeldifferenz zum Referenzmikrofon pro Winkel und Terzband für LKW's. Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den Median des ΔL_E auf.

6.4 Modell zur Beschreibung der vertikalen Abstrahlcharakteristik

Für die Nachbildung der oben dargestellten Messergebnisse wurde ein Modellansatz gemäss Gl. 6.2 (mit f : Frequenz) entwickelt. Die Modellparameter D_1 und D_2 wurden für beste Übereinstimmung mit den Messwerten angepasst (Tabelle 6.8). Man beachte, dass θ den Elevationswinkel im lotrechten Abstand bezeichnet und bei der Integration über eine Vorbeifahrt als konstant anzunehmen ist.

$$\Delta L_{W,\theta}[c, f] = D_1[c] \sin(\theta)^3 \cdot (\lg(f) + D_2[c])^3 \quad (6.2)$$

Parameter	PW	LKW
D_1	-0.11	-0.04
D_2	0.0	1.6

Tabelle 6.8: Angepasste Modellparameter D_1 und D_2 gemäss Gl. 6.2

Die exemplarische Auswertung von Gl. 6.2 ist in Abbildung 6.9 dargestellt.

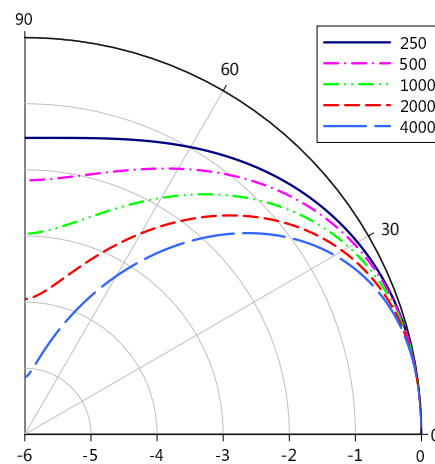


Abbildung 6.9: Vertikale Richtcharakteristik [dB] für 250, 500, 1000, 2000 und 4000 Hz gemäss Gl. 6.2.

Die Abbildung 6.10 zeigt exemplarisch für die drei Elevationswinkel 25, 45 und 65° die Nachbildung der Messwerte durch das Modell.

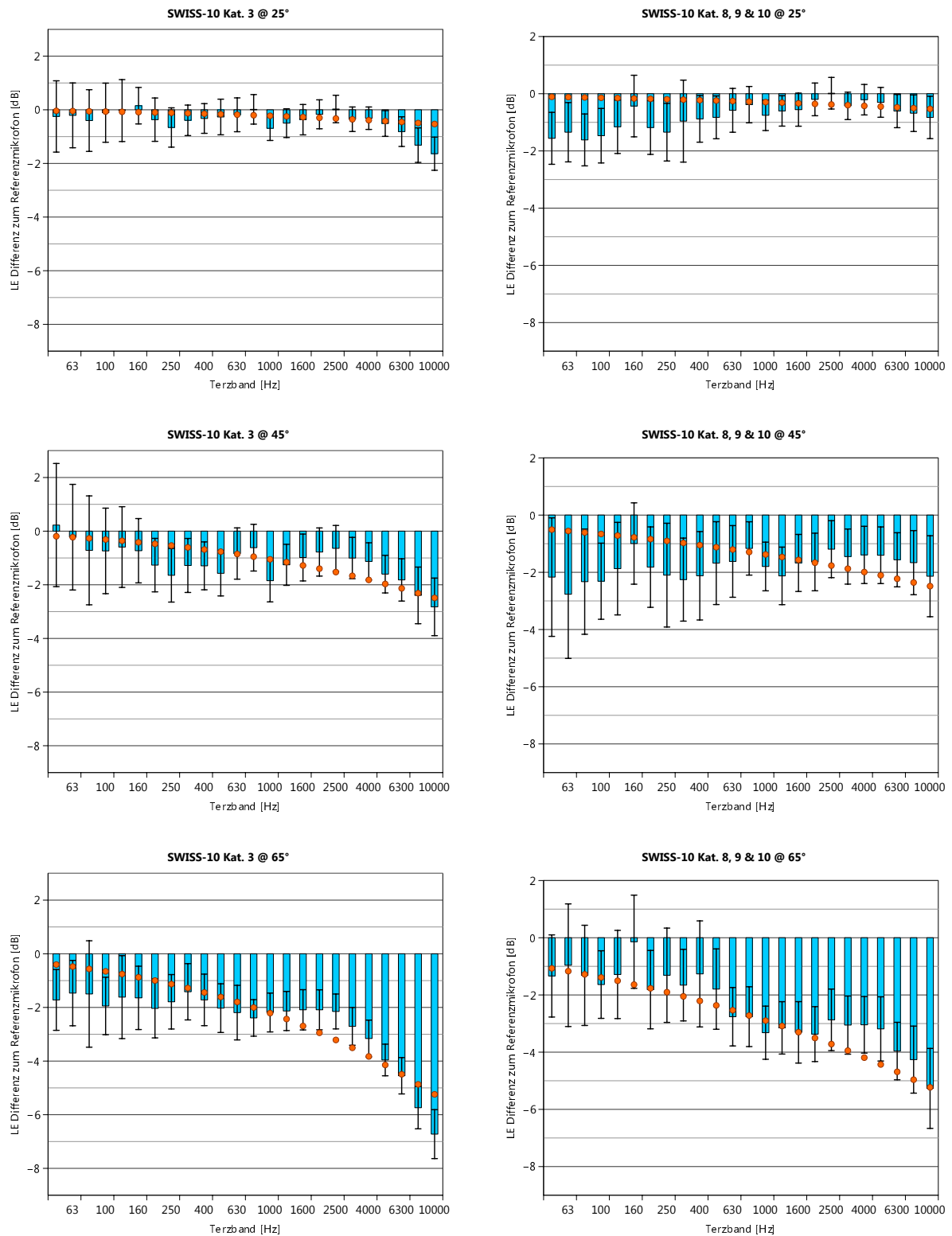


Abbildung 6.10: Median der gemessenen Schallereignispegeldifferenz zum Referenzmikrofon pro Winkel und Terzband für PW's und LKW's und Vergleich mit dem Modell (rote Punkte).

7 Emissionsdaten von Elektro- und Hybridfahrzeugen

7.1 Vorhandene Emissionsdaten in der Literatur

7.1.1 Personenwagen

Als ein Teil des COMPETT Projektes (Competitive Electric Town Transport) [13] wurde im Jahr 2013 eine Literaturstudie zum Lärm von Elektrofahrzeugen durchgeführt [14]. Diese Literaturstudie kommt zum Schluss, dass die bisher ermittelten Schallemissionen von Elektrofahrzeugen im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor stark variieren und entsprechend die Unsicherheiten für eine Prognose des Lärmverminderungspotenzials durch Elektrofahrzeuge gross sind. Der einzige klare Trend der acht untersuchten Studien (2001 - 2012) für Personenwagen ist, dass Elektrofahrzeuge im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor leiser sind, dies jedoch nur bei tiefen Geschwindigkeiten. Die Geschwindigkeit, ab welcher der Unterschied verschwindet, variiert je nach Studie zwischen 25 und 50 km/h.

Innerhalb des COMPETT Projektes wurden 2014 Messungen durchgeführt, von welchen erste Resultate als Entwurf vorliegen [15]. Es wurden 2 elektrische Fahrzeuge und 2 vergleichbare Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor in verschiedenen Fahrsituationen gemessen. Bei konstanter Geschwindigkeit sind die elektrischen Fahrzeuge bei Geschwindigkeiten unter 30 km/h 4 - 5 dB(A) leiser als vergleichbare Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor. Bei grösseren Geschwindigkeiten wird diese Differenz kleiner oder verschwindet (0 - 1.5 dB) aufgrund des dominanter werdenden Rollgeräuschs. Dies ist auch in den spektralen Daten sichtbar, mit grossen Unterschieden zwischen elektrischen und konventionellen Fahrzeugen bei tiefen Geschwindigkeiten und nur noch kleinen Differenzen bei höheren Geschwindigkeiten.

Beim Abbremsen unter 30 km/h sind die Elektrofahrzeuge 2 - 4 dB leiser als die konventionellen Fahrzeuge. Aufgrund des Energierückkopplungssystems der elektrischen Fahrzeuge ist das Motorengeräusch beim Abbremsen etwas höher als bei konstanter Geschwindigkeit. Für Geschwindigkeiten unter 30 km/h konnten die Beschleunigungsmessungen der Fahrzeuge nicht verglichen werden, da sie nicht die gleichen Beschleunigungen aufweisen. Für Geschwindigkeiten über 30 km/h sind beim Abbremsen sowie Beschleunigen die Lärmemissionen der Elektro- und der konventionellen Fahrzeuge ähnlich (< 1 dB).

FOREVER ist ein weiteres Projekt in der EU, welches den Einfluss von Elektro- und Hybridfahrzeugen auf den Strassenverkehrslärm ermitteln möchte. Die Resultate dieses Projektes finden sich in [17], [18] und [19]. Insgesamt standen Messdaten von 8 Personenwagen im elektrischen Modus (inklusive Hybridfahrzeuge im elektrischen Modus) und 3 PWs im Hybridmodus zur Verfügung, welche sie mit den von CNOSSOS prognostizierten Emissionen für PWs mit Verbrennungsmotor verglichen. Die totalen Schallemissionen im elektrischen Modus nehmen linear mit dem Logarithmus der Geschwindigkeit zu. Die Differenz zwischen dem leisesten und lautesten Fahrzeug beträgt 4.5 dB(A). Bei tiefen Geschwindigkeiten überschätzt CNOSSOS die Schallemissionen von elektrischen Fahrzeugen deutlich im A-Pegel sowie in den meisten Frequenzbändern. Die elektrischen Fahrzeuge liegen im Bereich des Rollgeräuschanteils oder darunter. Das bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor im tiefen Geschwindigkeitsbereich relevanter werdende Antriebsgeräusch fällt für die elektrischen Fahrzeuge gemäss diesen Ergebnissen im A-Pegel weg. Bei höheren Geschwindigkeiten sind die Emissionen der Elektrofahrzeuge immer noch unter CNOSSOS, aber die Differenzen sind kleiner. Die Unterschiede bei grösseren Geschwindigkeiten sind auf die Reifen zurückzuführen. Der Abschnitt 7.2 widmet sich dem Thema Bereifung von Elektrofahrzeugen. Die Schallemissionen der wenigen Hybridfahrzeuge weichen nicht wesentlich von PWs mit Verbrennungsmotor ab.

In [18] und [19] wird ein Vorschlag für die Erweiterung von CNOSSOS auf Elektro- und Hybridfahrzeuge gemacht. Für das Antriebsgeräusch von Elektrofahrzeugen werden Korrekturkoeffizienten pro Oktave vorgeschlagen, mit welchen das Emissionsmodell CNOSSOS ergänzt werden soll. Diese Werte sind in der Tabelle 7.1 zusammengestellt.

Für das Rollgeräusch wird vorgeschlagen das CNOSSOS-Modell ohne Anpassungen zu verwenden [19]. Für die Elektrofahrzeuge entspricht damit die gesamte Schallemission in etwa dem Rollgeräuschanteil. Bei tiefen Geschwindigkeiten unter 30 km/h erhöht sich die Gesamtemission durch das Antriebsgeräusch um maximal circa

Oktave	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Antriebsgeräuschkorrektur	-1.7 dB	-4.2 dB	-15 dB	-15 dB	-15 dB	-13.8 dB

Tabelle 7.1: Pegelkorrektur $\Delta L_{WP, EV, i}$ für das Antriebsgeräusch, welche auf dem CNOSSOS-EU Modell für Personenwagen in rein elektrischem Modus angewendet werden sollen [19].

1.3 dB(A). Für Hybridfahrzeuge im Hybridmodus wird empfohlen, das CNOSSOS-Modell ohne Anpassungen zu verwenden. Im elektrischen Modus verhalten sich Hybridfahrzeuge wie Elektrofahrzeuge.

7.1.2 Hybrid/Elektrobusse und Elektrolastwagen

Biermann et al. haben 2012 [20] in einer Studie 5 Hybridbusse mit 2 konventionellen Bussen mit Dieselmotor verglichen. Diese Studie hat eine maximale Lärmreduktion der Hybridbusse im elektrischen Modus bis zu 12 dB während Manövern an Bushaltestellen festgestellt. Eine andere Studie [21] verglich einen Hybridbus mit einem konventionellen Bus. Der Hybridbus hat signifikant tiefere Lärmemissionen (1 - 6 dB(A)) bei konstanter tiefer Geschwindigkeit (< 25-30 km/h). Rein elektrisch betrieben sind die Lärmemissionen nochmals 1 - 2 dB(A) tiefer. Diese Lärmreduktion wird mit steigender Geschwindigkeit kleiner und verschwindet mit 30 km/h, da das Rollgeräusch zunehmend dominant wird. In einigen Beschleunigungs- oder Bremssituationen verursacht der Hybridbus bei höheren Frequenzen höhere Lärmemissionen und verliert den Lärmbonus gegenüber dem konventionellen Bus.

Pallas et al. [22] verglichen die akustischen Emissionen eines mittelgrossen Hybrid-LKWs (19 t) mit jenen eines vergleichbaren konventionellen LKWs. Dazu wurden Messungen an einem Hybrid-Lastwagen und einem konventionellen Lastwagen mit Dieselmotor durchgeführt. Rein elektrisch betrieben ist der Hybridlastwagen bei tiefen Geschwindigkeiten bis 8.4 dB(A) leiser als der konventionelle LKW. Diese Lärmreduktion verringert sich mit zunehmender Geschwindigkeit und ist schlussendlich über 50 km/h nicht mehr signifikant. Im elektrischen Modus werden die Schallemissionen über alle Geschwindigkeiten hauptsächlich durch das Rollgeräusch verursacht. Im Hybridmodus verhält sich der Hybrid-LKW gleich wie der konventionelle LKW, d.h. bei tiefen Geschwindigkeiten dominiert das Antriebsgeräusch. Bis zu einer Geschwindigkeit von 50 km/h ist der LKW im Hybridmodus mit 1 - 2.7 dB(A) nur wenig leiser als der konventionelle LKW. Bei höheren Geschwindigkeiten dominiert das Rollgeräusch bei allen Betriebsmodi und die Differenzen zwischen den LKWs sind klein. Die Lärmreduktion im elektrischen Modus ist während Beschleunigungs- oder Bremsvorgängen kleiner. In allen Fahrsituationen ist die Lärmreduktion in vertikaler Richtung etwas höher.

7.1.3 Schlussfolgerungen

Zusammenfassend und vereinfacht kann festgehalten werden, dass elektrisch betriebene Fahrzeuge bei tiefen Geschwindigkeiten unter 30 km/h aufgrund leiserem Antriebsgeräusch deutlich leiser sind als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor. Für Geschwindigkeiten über 30 km/h wird das Rollgeräusch entscheidend und die Unterschiede zwischen elektrischen und konventionellen Fahrzeugen werden klein resp. verschwinden. Für die Modellierung von Personenwagen wird vorgeschlagen, das Antriebsgeräusch mit den in Tabelle 7.1 aufgeführten Pegelkorrekturen anzupassen und das Rollgeräusch wie bei konventionellen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor zu berechnen. Die Gesamtemissionen von Elektrofahrzeugen entsprechen in relativ guter Annäherung dem Rollgeräuschanteil, d.h. vereinfacht können die Elektrofahrzeuge auch ohne Antriebsgeräusch modelliert werden - entsprechend gross ist die Abhängigkeit von den verwendeten Reifen.

Für Hybridfahrzeuge wird vorgeschlagen, diese im Regelfall wie konventionelle Fahrzeuge zu behandeln und das Antriebsgeräusch nur bei Fahrt im rein elektrischen Modus zu ignorieren [18]. Es ist zu erwähnen, dass die Datengrundlage für Hybridfahrzeuge sehr klein ist.

In den oben präsentierten Angaben und Diskussion zu den Emissionen von Elektro- und Hybridfahrzeugen wurden akustische Warnsysteme für Fussgänger und Radfahrer ignoriert, da diese zum Zeitpunkt der durchgeführten Messungen kaum präsent waren. Die Blindenverbände in den USA forderten bereits 2008 ein Gesetz, die leisen Elektroautos deutlicher hörbar zu machen. In vielen Ländern, z.B. Japan ist dies bereits vorgeschrieben. Auch in Europa müssen ab 2019 (European regulation No 540/2014) alle neu zugelassenen Fahrzeuge mit Elektroantrieb ein AVAS (Acoustic Vehicle Alerting System) eingebaut haben, ein Klangmodul mit Aussenlautsprecher, vorn, neben der Hupe. Die Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen (UNECE) hat einen

Vorschlag für ein künstliches Geräusch vorgestellt. Dieses soll bis zu 20 km/h bzw. beim Rückwärtsfahren ertönen (<http://ecomento.tv/2016/03/14/warnton-fuer-fussgaenger-so-sollen-elektroautos-kuenftig-klingen/>, 14.03.2016). In der Schweiz forderte eine Interpellation akustische Warnsignale für Elektroautos. Der Bundesrat hat darauf geantwortet und will gleichzeitig EU-Recht übernehmen, d.h. die Ausrüstung mit dem akustischen Fahrzeug-Warnsystem soll deshalb ab dem 1. Juli 2019 für neue Fahrzeugtypen mit elektrischem Antrieb obligatorisch werden.

7.2 Bereifung von Elektrofahrzeugen

Wie im vorangegangenen Abschnitt 7.1 beschrieben, sind die Emissionen bei elektrischen Fahrzeugen auch bei tiefen Geschwindigkeiten durch das Rollgeräusch dominiert. Deshalb hat die Bereifung einen wesentlichen Einfluss auf die Emissionen. In der Schweiz gibt es keine Statistik zur Bereifung von Elektrofahrzeugen. Die einzige Möglichkeit, etwas über die Reifenwahl zu erfahren, erschliesst sich anhand der Erstbereifung dieser Fahrzeuge. Dazu wurden 19 Autohersteller von Elektro- und/oder Hybridfahrzeugen angeschrieben, wovon 14 eine Antwort zur Bereifung ihrer Fahrzeuge gaben. Sechs dieser 14 Autohersteller weisen darauf hin, dass sie auf den Elektrofahrzeugen keine speziellen Reifen auswählen. Die Erstbereifung wechselt je nach dem, welcher Reifenhersteller gerade Lieferant ist resp. bestimmen die Reifenhersteller in welchem Monat welche Reifen montiert werden, je nach Lieferbarkeit. Die erhaltene Reifenliste deutet darauf hin, dass dies heutzutage für fast alle Elektro- und Hybridfahrzeuge der Fall ist. Lediglich 3 von 32 Fahrzeugmodellen haben spezielle, extra für Elektrofahrzeuge entwickelte Reifen. Bei allen anderen ist einzig teilweise ein schwacher Trend zu treibstoffsparenden Reifen erkennbar. Diese Resultate decken sich auch mit der Aussage des Danish Road Directorate, gemäss welchem die Benutzer von Elektrofahrzeugen in städtischen Gebieten nicht energiesparende Reifen wählen würden, sondern „normale“ Reifen, die stabiler und weniger teuer sind [15].

Das Thema der Bereifung von Elektrofahrzeugen wurde auch im FOREVER Projekt untersucht [19], [23] und [24]. In [23] wurde mittels einer Literaturstudie aufgezeigt, dass die Wahl für die Reifen von Elektrofahrzeuge basierend auf dem Rollwiderstand resp. der Treibstoffeffizienz erfolgt. Zwischen dem Rollwiderstand und der Lärmemission der Reifen konnte kein Zusammenhang festgestellt werden. Es wurden CPB (controlled pass-by) Messungen mit 9 verschiedenen Reifen durchgeführt. Die Wahl der Reifen erfolgte primär anhand des Kriteriums Rollwiderstand, da energieeffiziente Reifen mit einem kleinen Rollwiderstand eine grössere Reichweite bedeuten. Als zweites Kriterium wurde die Nasshaftung hinzugezogen. Nur einer der 9 untersuchten Reifen wurde extra für ein Elektrofahrzeug entwickelt (Michelin Energy E-V für den Renault Zoe). Die Differenz zwischen den gemessenen Lärmemissionen im untersuchten Sample (9 Reifen) beträgt maximal 3.6 dB für tiefe Geschwindigkeiten (20 - 50 km/h) und 2.1 dB für Geschwindigkeiten von 50 - 120 km/h [19]. Die gemessenen Lärmemissionen auf realen dichten Strassenbelägen zeigten keinen Zusammenhang zu den Lärmemissionen gemäss EU-Label, und zwar auch nicht hinsichtlich der Reihenfolge.

Basierend auf dem heutigen Stand des Wissens unterscheidet sich das Rollgeräusch von Elektrofahrzeugen (PWs) nicht von jenem konventioneller Fahrzeuge. In den Studien [19], [24] wird deshalb vorgeschlagen, das Rollgeräusch von Elektrofahrzeugen mittels CNOSSOS-EU-Methode analog den konventionellen Fahrzeugen zu modellieren, ohne irgendwelche Anpassungen vorzunehmen.

8 Messungen zur Untersuchung der Kombinierbarkeit der Reifen- und Belagswirkung

Im Sinne einer maximalen Ausschöpfung des Lärminderungspotenzials im Strassenverkehr interessiert die Wirkung einer Kombination von lärmarmen Belägen und leisen Reifen. Ziel der hier durchgeführten exemplarischen Untersuchung ist zu klären, ob leise Reifen ihre günstigen Eigenschaften auch auf leisen Belägen behalten.

8.1 Untersuchte Reifen und Beläge

Die bereits in Kapitel 7.2 erwähnte FOREVER-Studie zeigte, dass die gemessenen Reifengeräusche auf einem AC 11 nicht mit den Lärmemissionen gemäss EU-Label korrelieren [23, 24]. Einen Mangel an Repräsentativität des EU-Rollgeräuschlabels für reale Strassenbeläge zeigen auch weitere Studien [25, 26].

Neben den EU-Rollgeräuschlabels und den Ergebnissen der FOREVER-Studie standen für die hier beschriebene Untersuchung Messwerte aus Reifentests des TCS zur Verfügung. Für die Untersuchung wurden vier Reifen der Dimension 205/55 R16 ausgewählt, die einen möglichst grossen Unterschied vom leisesten zum lautesten Reifen aufspannen. In der Tabelle 8.1 sind die Angaben der ausgewählten Reifen zusammengestellt. Als Testfahrzeug diente ein Skoda Octavia der Empa. Der Continental ContiWinterContact TS 850 war auf dem Testfahrzeug bereits montiert und wurde bereits ca. 1 Jahr gefahren. Die anderen drei Reifen wurden für diese Untersuchung neu gekauft. Diese wurden vor der ersten Messung jeweils mit ca. 100 km eingefahren. Der Reifendruck wurde immer auf 2.5 bar vorne und hinten eingestellt.

Um akustisch möglichst unterschiedliche Beläge zu untersuchen, hat uns der Kanton Aargau, Abteilung Tiefbau / Lärmsanierung (Hanspeter Gloor) einige Standortvorschläge unterbreitet. Daraus wurden vier Standorte mit verschiedenen Belägen ausgewählt. Grolimund+Partner AG hat auf diesen Belägen in den Jahren 2015 und 2016 CPX-Messungen durchgeführt. Die so gefundenen Belagsgütewerte sowie weitere Angaben über die Standorte sind in der Tabelle 8.2 zusammengestellt.

Reifen	Sommer- vs. Winter- reifen	EU-Label	Rollgeräusch in dB(A)			
			Msg. TCS gem. UN Nr. 117 ^a / original	FOREVER 80 km/h auf AC 11 [23]	FOREVER 50 km/h auf AC 11 [23]	
Continental ContiWinterContact TS 850	WR	72	70 / 71.7	—	—	
Dunlop Sport BluResponse	SR	68	71 / 72.7	76.2	69.4	
Hankook kinergy Eco K425	SR	70	69 / 70.6	74.5	67.5	
Toyo Snowprox S953	WR	71	73 / 74.5	—	—	

^a Gemäss UN(ECE)-Regelung Nr. 117 [27] wird Resultat um 1 dB(A) reduziert und abgerundet (analog EU-Label).

Tabelle 8.1: Untersuchte Reifen, alle mit der Dimension 205/55 R16 91H resp. 91V. Die EU-Label- sowie die TCS- Messungen wurden auf einem ISO-Referenzbelag durchgeführt.

Belag	Einbau	HRG	BGW PW	BGW LKW	Ort	Fahrtrichtung	Koordinaten
AC MR 8	2010	7.7% (2016)	0.9 (2016)	-1.5 (2016)	Rümikon, AG, Hauptstrasse	Kaiserstuhl (Ost)	2670626/1268817
AC 11	2000	-	-0.2 (2015)	-3.8 (2015)	Magden, AG, Maispracher- strasse	Magden (West)	2629523/1264020
PMA	2014	7.8% (2016)	-0.7 (2016)	-3.4 (2016)	Mellikon, AG, Hauptstrasse	Bad Zurzach (West)	2668940/1269039
SDA 4	2016	15.6% (2016)	-5.6 (2016)	-6.5 (2016)	Küttigen, AG, Bibersteiner- strasse	Aarau (West)	2647190/1251043

Tabelle 8.2: Untersuchte Beläge und Messstandorte. Die Charakterisierung des Hohlraumgehalts HRG erfolgte mittels dem Tauchwägetverfahren. Die CPX-Belagsgütwerte BGW wurden von der Grolimund + Partner AG, CH-3006 Bern in den Jahren 2015 und 2016 gemessen. Es wurden die Werte des jeweiligen 20m-Segments am Messstandort sowie der direkt benachbarten 20m-Segmente energetisch gemittelt. In Küttigen war das Messsegment verschmutzt, weshalb nur die beiden benachbarten Segmente berücksichtigt wurden.

8.2 Messungen

Für jeden der vier Reifensätze wurde je ein Messtag mit Vorbeifahrtmessungen an den vier Standorten mit unterschiedlichen Belägen aufgewendet. In der Tabelle 8.3 sind die Messdaten sowie die meteorologischen Bedingungen zusammengestellt. Die Vorbeifahrtmessungen wurden für 50 und 80 km/h in ausgekuppeltem Zustand (Vorbeifahren) durchgeführt. Pro Reifen, Belag und Geschwindigkeit wurden mindestens 5 gültige Messungen erfasst. Die Messungen wurden nur in einer Fahrtrichtung durchgeführt, das heisst es wurde lediglich ein Mikrophon in einem Abstand von 7.5 m von der Fahrbahnmitte und einer Höhe von 1.2 m über Boden aufgestellt. Zwischen Fahrbahn und Messpunkt befand sich an allen Standorten ausschliesslich harter Untergrund.

Während der Messung wurde jeweils das mit einem Schallpegelmesser (B&K 2238, # 2) gewonnene Audiosignal auf einen Sounddevices Harddisc-Recorder (Modell 702T, # 23), aufgezeichnet. Die Geschwindigkeiten wurden mit einer Bushnell Radarpistole (Genauigkeit: ± 2 km/h) gemessen.

Reifen	Messdatum	Temperatur	Wetter
Continental ContiWinterContact TS 850	28.9.2016	15 - 26°C	Vormittag Nebel, Nachmittag Sonne; windstill
Dunlop Sport BluResponse	30.9.2016	15 - 25°C	sonnig, windstill
Hankook kinergy Eco K425	5.10.2016	11 - 15°C	sonnig, leichte Bise
Toyo Snowprox S953	7.10.2016	10 - 16°C	Hochnebel, windstill

Tabelle 8.3: Messdaten und meteorologische Bedingungen der Reifen-Belags-Messungen.

8.3 Auswertungen und Ergebnisse

Mit der Audioanalyse-Software FAMOS wurden anhand des aufgezeichneten Signals Terzband- und A-Pegel-Spektren in einer zeitlichen Auflösung von 0.1 s erzeugt. Aus dem Pegel-Zeitverlauf des $L_{eq,A}$ wurde für jede Vorbeifahrt manuell die Ereignis-Start- und Stopzeit bestimmt. Anschliessend wurde für jede ungestörte resp. gültige Vorbeifahrt der Ereignispegel L_E berechnet. Da die Lufttemperatur während den verschiedenen Messungen zwischen 10 und 26°C variierte, wurde eine Temperaturkorrektur $\Delta L_{W,Temp}$ nach CNOSSOS gemäss Formel 8.1 (T in °C) durchgeführt. Um die Temperaturnormierung möglichst klein zu halten, wurden die Messwerte hier auf 20°C und nicht auf die sonROAD18 Referenztemperatur 10°C umgerechnet.

$$\Delta L_{W,Temp} = 0.08 \cdot (20 - T) \quad [\text{dB(A)}] \quad (8.1)$$

Für jeden Belag und Reifen sind für 50 und 80 km/h je ca. 5 Ereignispegel vorhanden. Um die Geschwindigkeitsabhängigkeit zu berücksichtigen, wurde eine lineare Regression durch die insgesamt ca. 10 A-bewerteten Ereignispegel (L_{AE}) gelegt (siehe Anhang C.1). Aus der Literatur ist bekannt, dass von einer logarithmischen Geschwindigkeitsabhängigkeit auszugehen ist. Für x wurde deshalb $\lg(v)$ eingesetzt. Die aufgrund der linearen Regression erwarteten Schätzwerte für 50 und 80 km/h sind in den Abbildungen 8.1 und 8.2 dargestellt. Diese Schätzwerte wurden arithmetisch ermittelt. Auf eine Umrechnung in energetische Schätzwerte konnte verzichtet werden, da die Differenzen zwischen arithmetischen und energetischen Schätzwerten < 0.05 dB betrugen.

Eine spektrale Auswertung der Ereignispegel ist dem Anhang C.2 zu entnehmen. Spektral wurde keine lineare Regression durchgeführt, sondern für jede Terz der energetische Mittelwert berechnet.

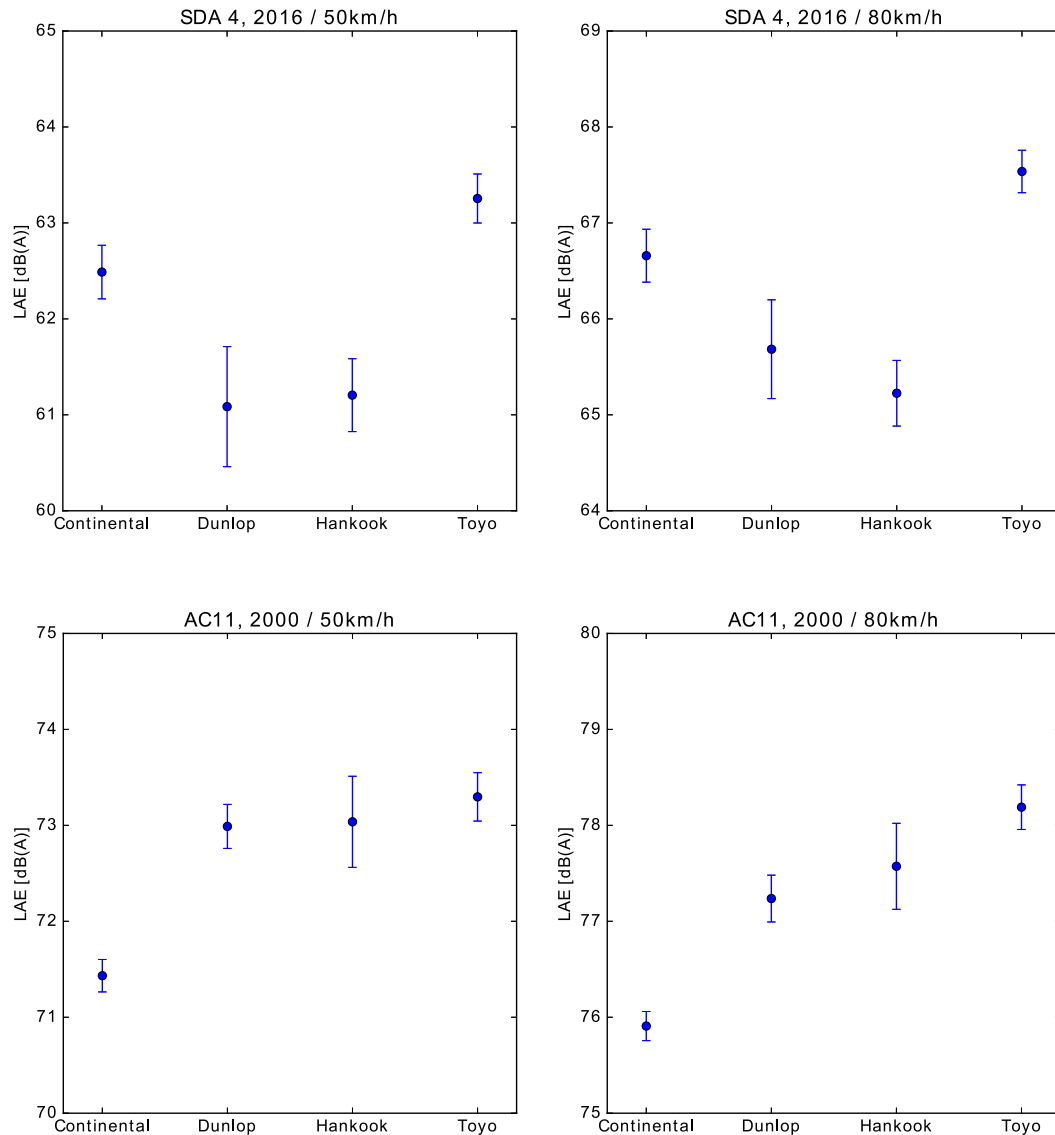


Abbildung 8.1: Arithmetische Schätzwerte der mittleren Ereignispegel L_{AE} mit 95%-Konfidenzintervall (bezogen auf Mittelwert) für die Standorte Küttigen (SDA 4) und Magden (AC 11).

Den Abbildungen 8.1 und 8.2 ist zu entnehmen, dass auf dem neuen SDA 4 Belag deutlich tiefere Pegel gemessen wurden. Dies bestätigt ein Vergleich der Beläge untereinander, wie in Abbildung 8.3 dargestellt. Die gemessenen L_{AE} sind auf dem SDA 4 in Küttigen im Mittel 11 dB(A) tiefer als auf dem AC 11 in Magden,

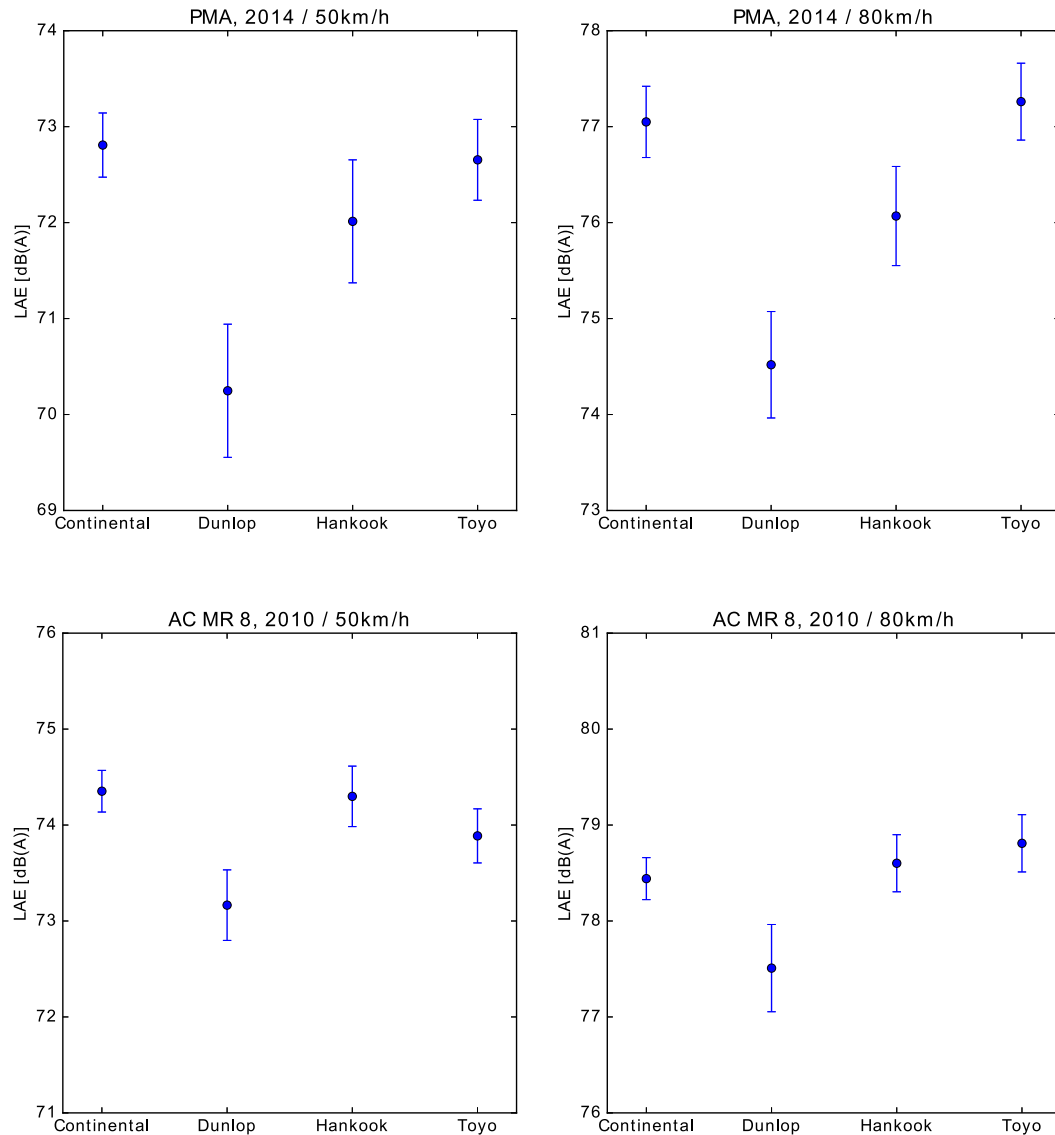


Abbildung 8.2: Arithmetische Schätzwerte der mittleren Ereignispegel L_{AE} mit 95%-Konfidenzintervall (bezogen auf Mittelwert) für die Standorte Mellikon (PMA) und Rümikon (AC MR 8).

Belag	Einbaujahr	Ort	leisester Reifen	lautester Reifen	Differenz L_{AE} [dB]
AC MR 8	2010	Rümikon	Dunlop	keine signifikanten Unterschiede	1.3
AC 11	2000	Magden	Continental	Toyo (Unterschiede nicht signifikant)	2.3
PMA	2014	Mellikon	Dunlop	Toyo/Continental/(Hankook)	2.7
SDA 4	2016	Küttigen	Hankook/Dunlop	Toyo	2.3

Tabelle 8.4: Zusammenstellung leisester versus lautester Reifen und deren Differenz im L_{AE} auf den verschiedenen Belägen. Wenn mehrere Reifen aufgeführt sind, gibt es keine signifikanten Unterschiede zwischen diesen.

welcher als Referenz genommen wird. Der PMA in Mellikon ist 1 dB(A) tiefer als der AC 11 und der AC MR 8 in Rümikon 1 dB(A) höher, was jedoch im Bereich der Unsicherheiten (Standardabweichungen) liegt. Diese Resultate stimmen für den AC 11, PMA und AC MR 8 relativ gut mit den CPX-Belagsgütwerten (sh. Tabelle 8.2) überein (± 0.5 dB). Beim SDA 4 in Küttigen zeigt der CPX-Belagsgütwert mit - 5.6 dB eine deutlich geringere Pegelreduktion. Die Umrechnung (Regressionsmodelle) der mit dem CPX-Verfahren erhobenen Werte wurden für repräsentative Beläge in der Schweiz gemacht. Die Differenzen beim SDA 4 zeigen, dass die Korrelation zwischen den mittels CPX-Verfahren erhobenen Werte und dem SPB-Verfahren (statistical-pass-by) für jeden Belag neu gemacht werden müsste.

Ein spektraler Vergleich der vier Beläge ist im Anhang C.3 zu finden.

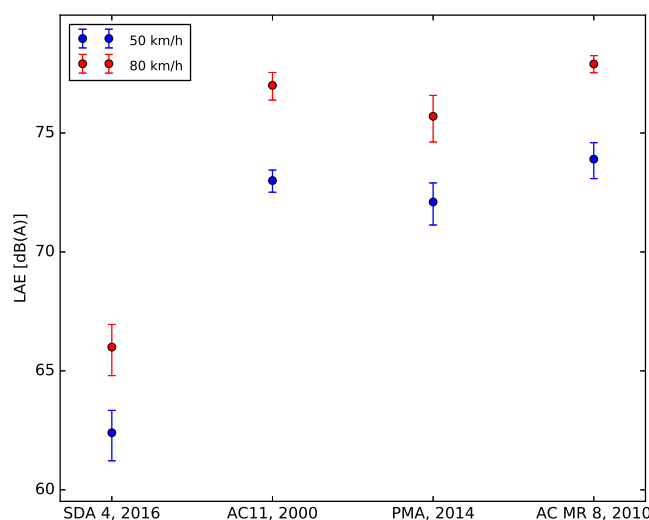


Abbildung 8.3: Energetisch gemittelte Ereignispegel L_{AE} über alle vier Reifen für die verschiedenen Beläge. Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den arithmetischen Pegelmittelwert auf.

8.4 Diskussion

Ein Vergleich der A-bewerteten Ereignispegel der verschiedenen Reifen ergibt je nach Belag eine unterschiedliche Reihenfolge. Das heisst z.B. dass der Continental auf dem AC 11 am leisesten ist und gleichzeitig auf dem PMA zu den lautesten Reifen gehört. Die Differenzen zwischen den Reifen befinden sich mit ≤ 2.7 dB(A) häufig im Bereich der Unsicherheiten. Deshalb sind meist keine signifikanten Unterschiede zwischen den Reifen erkennbar. Auch sind diese Differenzen kleiner als die gemäss EU-Label oder TCS-Messungen erwarteten Unterschiede von bis zu ca. 4 dB, dort jedoch bezogen auf den L_{AFmax} .

Wie bereits in Kapitel 8.1 erwähnt, gibt es Zweifel darüber ob das EU-Label die Reifenwirkung für reale Strassen genügend gut repräsentiert. Bei den vorliegenden Resultaten scheint tendenziell (bei 3 von 4 Standorten) der Dunlop zu den leisesten Reifen zu gehören, was auch das EU-Label bestätigt. Ansonsten ist aber die Reihenfolge gemäss EU-Label in diesen Messresultaten nicht klar ersichtlich.

Es muss gefolgert werden, dass - zumindest für die gewählten Reifen - das EU-Reifenlabel nicht als einfache und zuverlässige Grundlage für die Berücksichtigung des Einflusses von Reifen auf das Rollgeräusch verwendet werden kann.

Die in der FOREVER-Studie publizierten Messresultate auf einem AC 11 können für die zwei Reifen Dunlop und Hankook nicht reproduziert werden. Auf dem AC 11 in Magden wurden zwischen diesen beiden Reifen keine signifikanten Unterschiede gemessen.

Die Messresultate zeigen, dass sich die verschiedenen Reifen auf den verschiedenen Belägen unterschiedlich verhalten und somit die pegelmindernde Wirkung von Belag und Reifen nicht unabhängig ist.

9 Schätzung der Modell-Koeffizienten

9.1 Annahmen und Anpassstrategie

Die Anpassung der spektralen sonROAD18 Modellparameter A und B erfolgte anhand einer Minimierung der quadratischen Abweichungen zwischen Modellberechnungen und Messungen. Dazu wurde angenommen, dass

- das Antriebsgeräusch abhängig von der Fahrzeugkategorie aber bei identischer Steigung unabhängig vom Standort ist
- die Belagskorrektur unabhängig von der Fahrzeugkategorie ist

In einem ersten Durchlauf wurde die Belagskorrektur auf 0 gesetzt. Nach erfolgter A/B Parameteranpassung wurden anschliessend die Belagskorrekturwerte für minimale Abweichung Rechnung-Messung justiert und spektral geglättet (Tabelle 9.1). Schliesslich wurde in einem zweiten Durchlauf eine erneute Parameteranpassung - unter Einbezug der gefundenen Belagskorrekturen - vorgenommen.

Generell wurden in einem Anpassungs-Durchlauf jeweils alle Parameter in einem weiten Suchbereich systematisch variiert. Wie sich gezeigt hat, ist die Schätzung der Geschwindigkeitsabhängigkeit des Antriebsgeräusches unsicher, sodass für die SWISS10 Kategorien 1 und 5 bis 10 B_{prop} von CNOSSOS übernommen wurde. Die schliesslich gefundene optimale Parametersetzung wird im Kapitel 10 vorgestellt.

9.2 Messwertumrechnung auf Schallleistungspegel

Bei Vorliegen von Einzelereignisenergien L_E bzw. von maximalen Vorbeifahrtpegeln L_{max} wurde mit

$$L_W[i] = L_E[i] + 10 \lg(v) - 2.6 + 10 \lg(d) - A'_{\text{atm}}[i] \quad (9.1)$$

(siehe Gl.4.17), bzw.

$$L_W[i] = L_{\text{max}}[i] + 20 \lg(d) + 8.0 + \Delta L_{\text{richt}} \quad (9.2)$$

auf die Schallleistung $L_W[i]$ im Terzband i geschlossen. Hierbei bezeichnen v die Geschwindigkeit in km/h und d den Messabstand in m, $A'_{\text{atm}}[i]$ ist die Luftdämpfung gemäss Abbildung 4.6 und ΔL_{richt} eine Korrektur zur Berücksichtigung der horizontalen Richtwirkung. Diese wurde situativ durch Vergleich von exemplarischen Einzelereignispegeln mit Maximalpegeln bestimmt.

In der Referenzgeometrie mit $d = 7.5$ m führen die beiden Umrechnungen auf:

$$L_W[i] = L_{E,7.5\text{m}}[i] + 10 \lg(v) + 6.2 - A'_{\text{atm}}[i] \quad (9.3)$$

bzw.

$$L_W[i] = L_{\text{max},7.5\text{m}}[i] + 25.5 + \Delta L_{\text{richt}} \quad (9.4)$$

9.3 Messdatenliste für die Modellanpassung

Untenstehende Übersicht zeigt die für die Modellparameteranpassung herangezogenen Messdaten. Alle Datenpunkte wurden gleich gewichtet.

MFM-U Reiden 2015 Einzelereignisenergiemessungen, SWISS10-Kategorien: 1 bis 10, Geschwindigkeiten: 88, 100, 120 km/h, Belag: SMA11 (siehe Kapitel 4)

MFM-U Camignolo 2015 Einzelereignisenergiemessungen, SWISS10-Kategorien: 1 bis 10, Geschwindigkeiten: 88, 100, 120 km/h, Belag: SDA8 (siehe Kapitel 4)

- MFM-U Rothenbrunnen 2015** Einzelereignisenergiemessungen, SWISS10-Kategorien: 1 bis 10, Geschwindigkeiten: 88, 100, 120 km/h, Belag: SDA8 (siehe Kapitel 4)
- Frenkendorf 2016** Einzelereignisenergiemessungen, SWISS10-Kategorien: 3, 5, 8, 9, 10, Geschwindigkeiten: 60 km/h, Belag: Beton (siehe Abschnitt 5.3)
- Amsteg 2016** Einzelereignisenergiemessungen, SWISS10-Kategorien: 1, 2, 3, 5, Geschwindigkeiten: 60 km/h, Belag: ACMR11 (siehe Abschnitt 5.4)
- Küttigen 2016** Einzelereignisenergiemessungen, SWISS10-Kategorien: 3, Geschwindigkeiten: 60 km/h, Belag: SDA4 (siehe Kapitel 8)
- Magden 2016** Einzelereignisenergiemessungen, SWISS10-Kategorien: 3, Geschwindigkeiten: 80 km/h, Belag: AC11 (siehe Kapitel 8)
- Mellikon 2016** Einzelereignisenergiemessungen, SWISS10-Kategorien: 3, 8, Geschwindigkeiten: 70, 80 km/h, Belag: PMA (siehe Kapitel 8)
- Rümikon 2016** Einzelereignisenergiemessungen, SWISS10-Kategorien: 3, 8, Geschwindigkeiten: 80 km/h, Belag: ACMR8 (siehe Kapitel 8)
- Breite 2016** Einzelereignisenergiemessungen, SWISS10-Kategorien: 3, 8, Geschwindigkeiten: 50 km/h, Belag: AC 8 S (siehe Kapitel 6)
- Rümikon 2016** Einzelereignisenergiemessungen, SWISS10-Kategorien: 3, 8, Geschwindigkeiten: 80 km/h, Belag: ACMR8 (siehe Kapitel 6)
- Volken 2016** Einzelereignisenergiemessungen, SWISS10-Kategorien: 3, 8, Geschwindigkeiten: 80 km/h, Belag: AC11 S (siehe Kapitel 6)
- Ofenpass 2010** Einzelereignisenergiemessungen, SWISS10-Kategorie: 2, Geschwindigkeiten: 80, 100, 120 km/h, Belag: AB11. Im Auftrag des Schweizer Nationalparks hat die Empa vom 2. August bis 2. September 2010 an der Ofenpassstrasse an der Lingia Lungia zwischen Parkplatz 8 und Parkplatz 9 eine Langzeitmessung zur Beobachtung der Motorrademissionen durchgeführt [28]. Im Unterschied zur Auswertung im Originalbericht wurde hier eine Neuauswertung der Daten vorgenommen, um die quellennahe Bodenreflexion in die Schallleistung zu integrieren.
Aus den Messdaten wurden energetisch mittlere Schallleistungsspektren für Motorräder für die Geschwindigkeitsklassen 80 km/h, 100 km/h und 120 km/h gebildet, indem dazu aus allen Ereignissen jene selektiert wurden, die innerhalb von ± 3 km/h um die Referenzgeschwindigkeit lagen. In die Mittelwertbildung in den drei Geschwindigkeitsklassen gingen 143 (80 km/h), 221 (100 km/h) bzw. 82 (120 km/h) Motorradvorbeifahrten ein.
- Melide-Bissone 2008** Einzelereignisenergiemessungen von IFEC ingegneria SA, SWISS10-Kategorien: 3, 8, Geschwindigkeiten: 88, 100 km/h, Belag: PA8 Drainbelag neu (1 jährig)
- Melide-Bissone 2016** Einzelereignisenergiemessungen von IFEC ingegneria SA, SWISS10-Kategorien: 3, 8, Geschwindigkeiten: 88, 100 km/h, Belag: PA8 Drainbelag alt (9 jährig)
- VSS-T30-Modell 2017** Einzelereignis-Maximalpegelmessungen von Grolimund + Partner AG, CH-3006 Bern, SWISS10-Kategorie: 3, Geschwindigkeiten: 30, 50 km/h, Belag: SMA11. Im Rahmen des VSS Forschungsprojekts VSS 2012/214 [11] hat Grolimund + Partner ein Strassenlärmemissionsmodell für den tiefen Geschwindigkeitsbereich entwickelt. Kernstück des Modells sind kontrollierte Vorbeifahrtmessungen an 22 Fahrzeugen (21 Personenwagen und 1 Lieferwagen) auf dem Testgelände des Dynamic Test Centers in Vauffelin. Für jedes Fahrzeug wurden in der Referenzgeometrie 7.5/1.2 m verschiedene Betriebszustände erfasst. Mit einem basierend auf Feldbeobachtungen entwickelten Geschwindigkeits-Gangbezug wurde schliesslich ein Emissionsmodell formuliert, das unter Berücksichtigung des Belags und der Anteile beschleunigender Fahrzeuge die Emission in 7.5 m Abstand prognostiziert. In das Datenset hier wurden zwei Spektren für Konstantfahrt bei 30 und bei 50 km/h auf einem SMA11 Belag aufgenommen.
- Kappel 2014** Einzelereignis-Maximalpegelmessungen von Grolimund + Partner AG, CH-3006 Bern, SWISS10-Kategorien: 3, 8, Geschwindigkeiten: 30, 50 km/h, Belag: ACMR8, siehe [30].

Ottenbach 2014 Einzelereignis-Maximalpegelmessungen von Grolimund + Partner AG, CH-3006 Bern, SWISS10-Kategorien: 3, Geschwindigkeiten: 30, 50 km/h, Belag: ACMR8, Steigung: $\pm 5\%$, siehe [30].

9.4 Belagseinfluss

Für die Schätzung der Modellparameter und die Validierung wurden die in Tabelle 9.1 aufgelisteten Belagskorrekturen $\Delta L_{W,R,road}[i]$ verwendet, wobei der ACMR8 bzw. SDA8-12 als Referenzbelag verstanden wird. Es ist zu beachten, dass auf Grund der kleinen zur Verfügung gestandenen Stichprobe die Repräsentativität nicht garantiert und damit eine Verallgemeinerung nicht zulässig ist.

	SMA11	SDA8	Beton	ACMR11	SDA4	AC11	PMA	ACMR8	AC8S	AC11S	AB11	PA8-neu	PA8-alt
50	1.0	0.3	9.0	3.0	-3.0	-0.5	1.0	0.0	7.5	0.0	1.0	1.0	-6.0
63	1.0	0.2	9.0	3.0	-3.0	-0.5	1.0	0.0	7.0	0.0	1.0	0.2	-6.0
80	1.0	0.1	9.0	3.0	-3.0	-0.5	1.0	0.0	6.5	0.0	1.0	-0.6	-6.0
100	1.1	0.1	9.1	3.1	-2.9	-0.5	1.1	0.0	6.1	0.1	1.1	-1.4	-5.9
125	1.0	0.0	8.7	3.0	-3.6	-0.5	0.6	0.0	5.3	0.0	1.0	-2.5	-6.3
160	1.1	0.0	8.9	3.1	-4.3	-0.5	0.0	0.0	4.8	0.1	1.1	-3.0	-6.3
200	1.3	-0.1	8.9	3.2	-4.3	-1.6	0.3	0.0	4.4	0.1	1.2	-3.0	-6.5
250	1.2	-0.4	8.5	3.0	-5.1	-2.5	-1.1	0.0	4.1	-0.2	1.2	-3.5	-6.1
315	1.5	-0.6	8.1	3.0	-5.8	-3.2	-1.5	0.0	4.0	0.4	1.4	-5.0	-5.5
400	1.7	-0.8	7.4	2.9	-6.1	-3.4	-1.4	0.0	3.2	0.7	1.3	-6.4	-5.3
500	1.8	-1.0	6.5	2.7	-7.8	-3.3	-1.7	0.0	3.3	0.7	1.2	-8.1	-5.6
630	2.1	-1.1	5.8	2.6	-8.7	-2.6	-1.3	0.0	3.7	0.3	1.2	-9.5	-6.1
800	1.8	-1.6	5.0	2.3	-10.7	-2.4	-1.3	0.0	3.7	0.5	0.8	-11.3	-6.8
1000	1.8	-1.8	4.6	2.2	-11.8	-1.5	-1.1	0.0	3.9	1.2	0.7	-12.8	-7.3
1250	1.9	-1.9	4.1	2.1	-12.5	-0.3	0.1	0.0	3.9	1.5	0.5	-14.3	-8.7
1600	2.2	-1.8	4.0	2.0	-12.7	1.1	1.0	0.0	4.2	1.3	0.6	-13.8	-9.9
2000	2.3	-1.8	4.2	1.8	-12.6	2.1	1.4	0.0	4.3	1.0	0.9	-13.7	-10.8
2500	2.7	-1.3	4.4	1.7	-11.8	2.8	2.1	0.0	4.4	0.9	1.5	-12.9	-11.3
3150	3.2	-0.7	4.8	1.8	-10.8	2.8	2.5	0.0	4.5	0.8	2.2	-11.9	-11.7
4000	4.1	0.3	5.4	2.1	-9.3	3.0	2.9	0.0	4.6	0.7	3.1	-10.4	-11.7
5000	5.0	1.5	6.0	2.4	-7.8	3.2	3.2	0.0	4.7	0.5	3.8	-8.7	-11.4
6300	5.5	2.0	6.3	2.5	-6.9	3.0	3.2	0.0	4.7	0.4	4.3	-7.8	-11.1
8000	6.1	2.7	6.8	2.7	-6.1	3.1	3.4	0.0	4.7	0.3	4.8	-7.0	-10.9
10000	6.6	3.4	7.1	3.0	-5.7	3.0	3.5	0.0	4.9	0.1	5.1	-5.9	-10.9

Tabelle 9.1: Für die Modellparameteranpassung und Validierung verwendeten spektralen Belagskorrekturen $\Delta L_{W,R,road}[i]$. PA8-neu entspricht einem einjährigen, PA8-alt einem 9 jährigen Belag.

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

Reisecars 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 $\Delta L_{W,\theta}[c, i]$:

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

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 Belageseinfluss¹. 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 in Abschnitt 9.4 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 Terzfiltermittelfrequenzen 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.

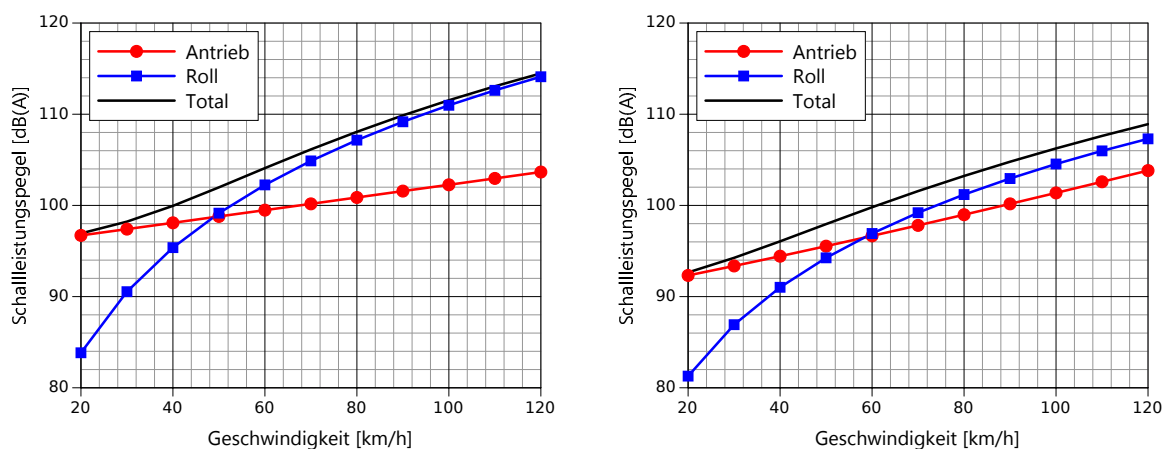


Abbildung 10.1: Geschwindigkeitsabhängigkeiten der Antriebs- und Rollgeräusch-Komponente sowie Total der A-bewerteten Schallleistung für die SWISS10 Kategorie 1 (links) und 2 (rechts).

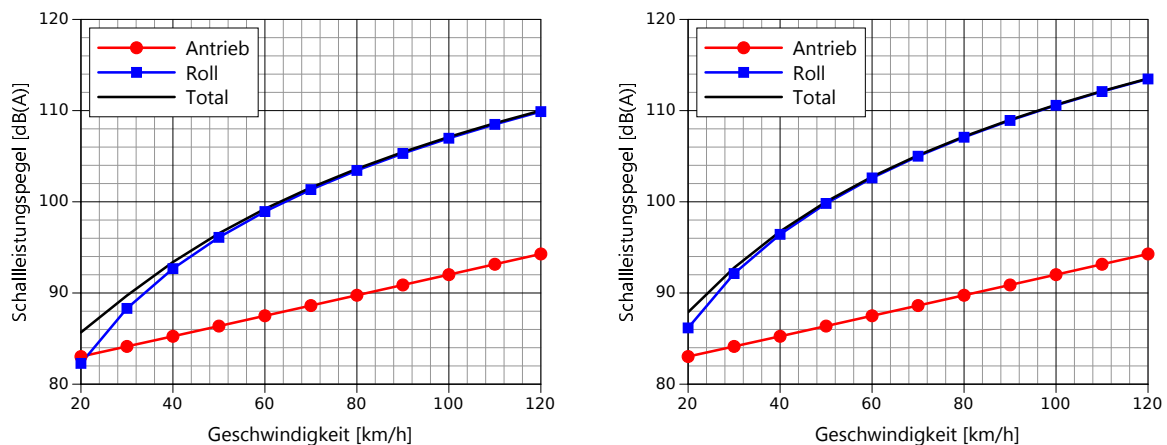


Abbildung 10.2: Geschwindigkeitsabhängigkeiten der Antriebs- und Rollgeräusch-Komponente sowie Total der A-bewerteten Schallleistung für die SWISS10-Kategorie 3 (links) und 4 (rechts).

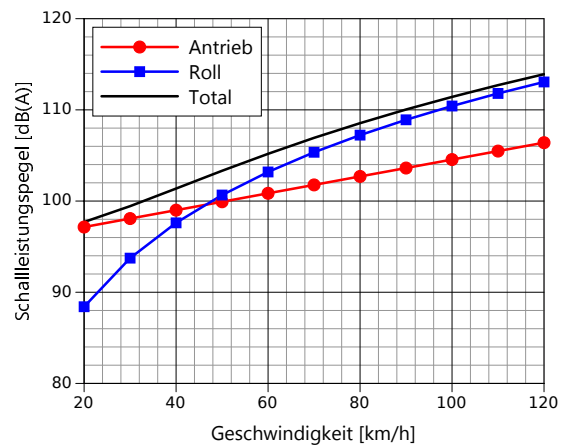
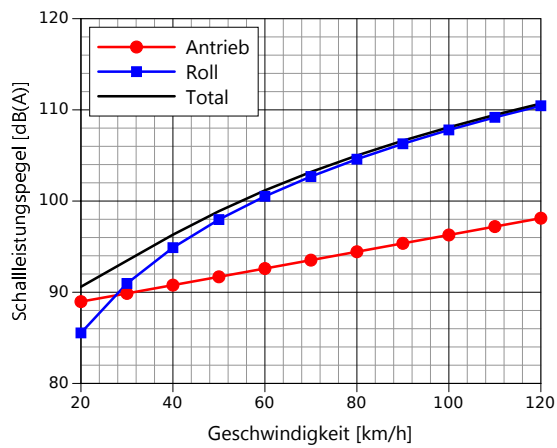


Abbildung 10.3: Geschwindigkeitsabhängigkeiten der Antriebs- und Rollgeräusch-Komponente sowie Total der A-bewerteten Schallleistung für die SWISS10-Kategorie 5 (links) und 6 (rechts).

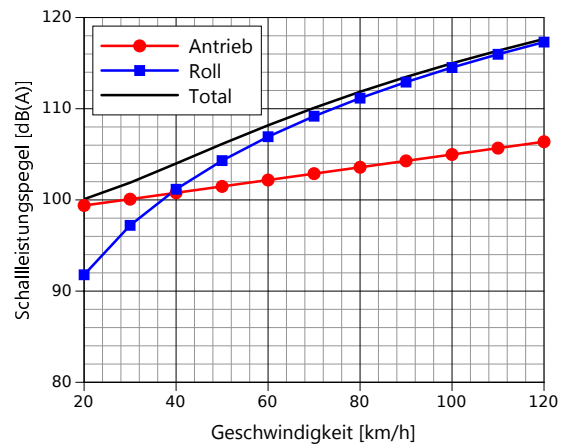
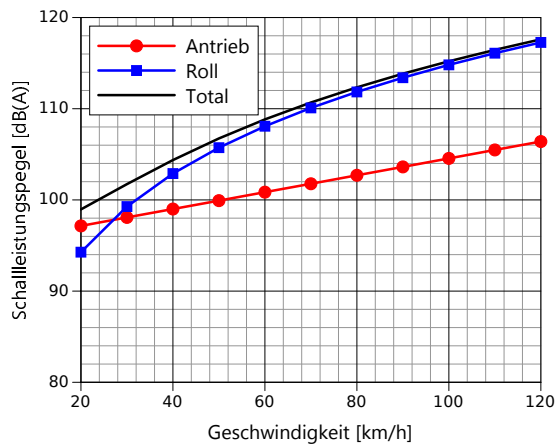


Abbildung 10.4: Geschwindigkeitsabhängigkeiten der Antriebs- und Rollgeräusch-Komponente sowie Total der A-bewerteten Schallleistung für die SWISS10-Kategorie 7 (links) und 8 (rechts).

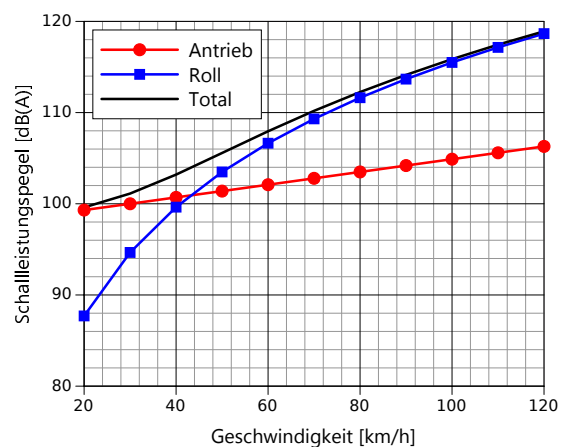
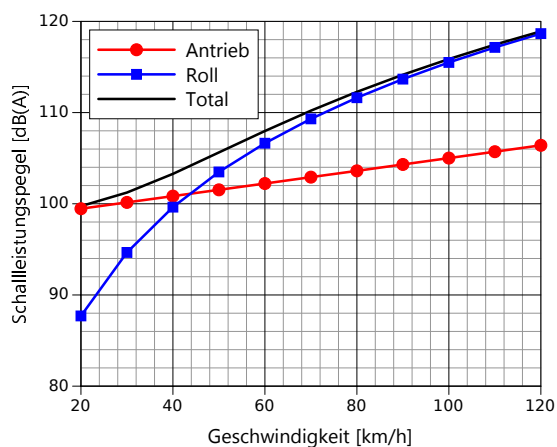


Abbildung 10.5: Geschwindigkeitsabhängigkeiten der Antriebs- und Rollgeräusch-Komponente sowie Total der A-bewerteten Schallleistung für die SWISS10-Kategorie 9 (links) und 10 (rechts).

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 Schallleistung im Stillstand wird hier auf die Leerlaufmessungen in Vauffelin (siehe Abschnitt 5.13) abgestellt. Diese Messkampagne umfasste allerdings 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 Schallleistung 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-Schallleistungspegel $L_{W,0\text{km/h}}[c, i]$ 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 $\Delta L_{\text{Stau}}[3, i]$.

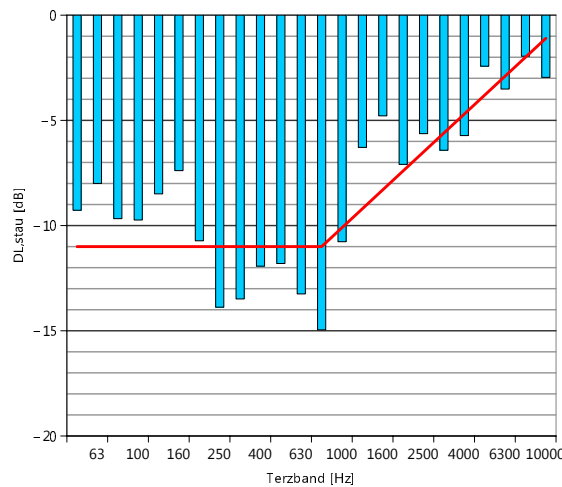


Abbildung 10.6: Gemessene (Balken) und idealisierte (Linie) spektrale Pegelunterschiede der Stillstandsmessungen in Vauffelin und der Antriebsgeräuschkomponente von SWISS10-Kategorie 3 Fahrzeugen bei 20 km/h.

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

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 Streutерms gemäss Gl. 10.11 dargestellt werden:

	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.

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

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 H) und $n(\sigma[c])$ eine normalverteilte Zufallszahl mit Mittelwert 0 und Standardabweichung $\sigma[c]$ ist. Für reifengeräuschkdominierte 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 gemäss Tabelle 4.12.

10.10 Schätzung des Leqs 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 [kg/m²s]

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 Schallleistungspegel 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).

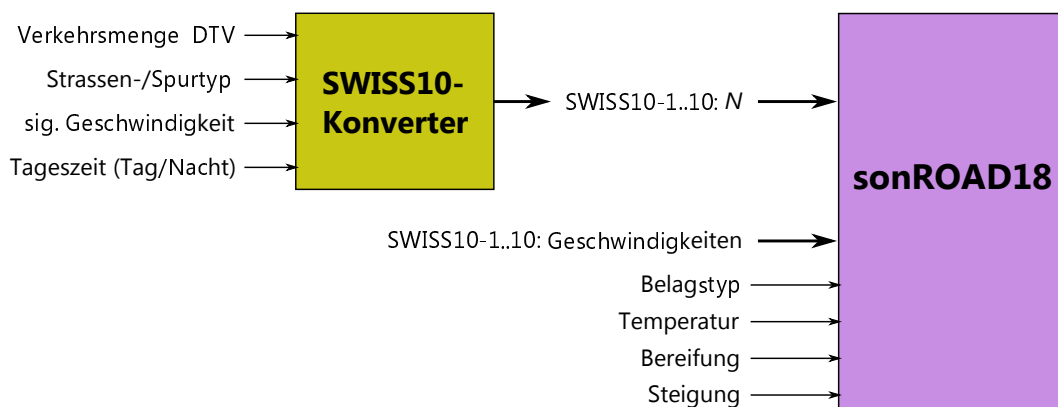


Abbildung 11.1: SWISS10-Konverter.

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 D 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 Verkehringenieur 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.

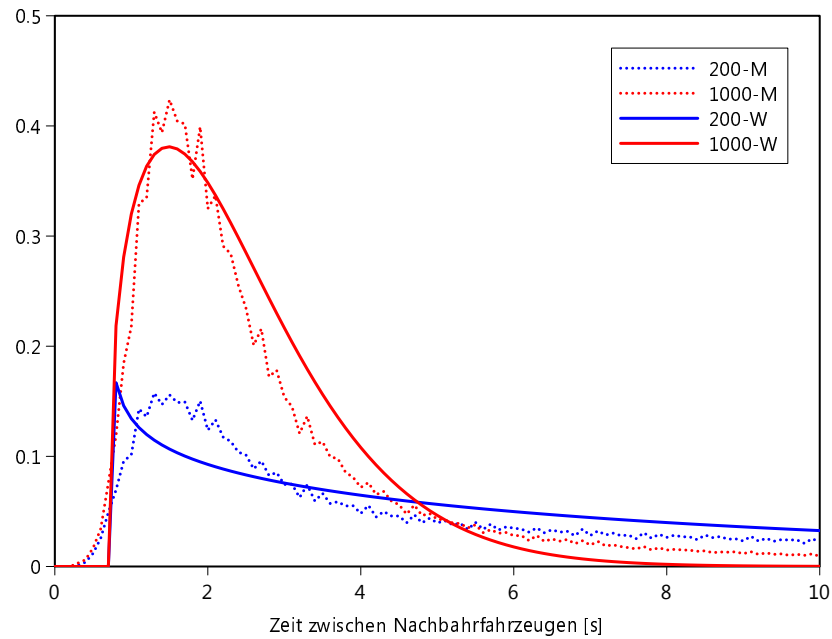


Abbildung 11.2: Auf einer Spur einer typischen Hauptverkehrsstrasse (HVS) bei Tempo 80 gemessene (M) und durch eine Weibullverteilung (W) approximierte Dichtefunktionen für Δt als zeitlicher Abstand zwischen zwei Nachbahrfahrzeugen für zwei exemplarische stündliche Verkehrsmengen von 200 bzw. 1000 Fz/h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

Im Anhang E 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 5.10 – 5.12)

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 abbremssende 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 abbremssende 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 spurgenau durchgeführt, d.h. es wurde pro Spur eine Linienquelle in der Fahrbahnmitte angenommen.

Die Berechnung der totalen Schallleistung pro m einer Linienquelle erfolgte mit v' : Geschwindigkeit in m/s bzw. v : Geschwindigkeit in km/h gemäss Formel 12.1, wobei als Belageinfluss die in der Parameteroptimierung gefundenen Korrekturen gemäss Tabelle 9.1 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 Schallleistung $L_{W',eq,line[c,i]}$ angenommen wurde. Als Ausbreitungseffekte wurde die geometrische Verdünnung und die Luftdämpfung gemäss Gleichung 4.8 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	Verkehrs- daten	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 abbremssende 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.

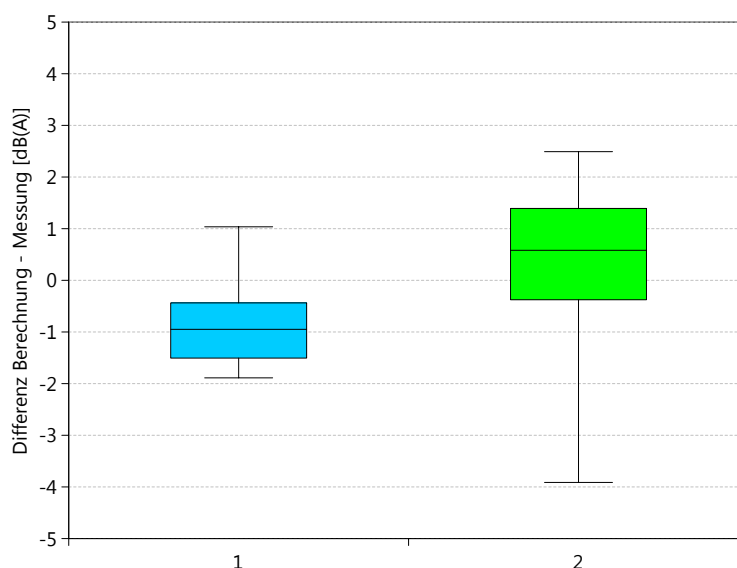


Abbildung 12.1: Differenzen zwischen Berechnungen und Messungen. Die Boxplots zeigen den Median (horizontale Linie in Box), das 25% und 75% Quantil (untere und obere Grenze der Box), sowie die Spanne zwischen kleinsten und grössten Werten. Die blaue Datengruppe (1) umfasst die einzelnen Validierungsstandorte, 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 in Tabelle 9.1 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 Schallleistung pro m einer Linienquelle erfolgt gemäss Formel 12.1. Die Resultate sind in den Tabellen im Anhang F zusammengestellt.

15 Belagscharakterisierung mittels SPB-Messungen

15.1 Konzept

Der Belageinfluss 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 Vorbeifahrtverfahren) 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 Belageinflusses 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 G). 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 Belageigenschaft) 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 Tabelle I.1 im Anhang.

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 Belageigenschaft) 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 mit Gl. 4.17 bzw. 10.20 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 Schallleistung gemäss Gl. 10.1. Der Luftdämpfungsterm $A'_{atm}[s,i]$ kann anhand Tabelle I.1 im Anhang 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

Die oben abgeleitete Modellparametersetzung bezieht sich auf die typischen, d.h. durchschnittlichen Fahrzeuge innerhalb der SWISS10 Fahrzeugklassen. Die Modellierung von speziellen Fahrzeugen wie z.B. besondere Busse eines Verkehrsunternehmens kann das Einführen einer neuen Kategorie notwendig machen. Dies erfordert die Identifikation der zugehörigen Modellparameter - in der Regel anhand von gezielt durchgeführten Messungen.

Mit den Messungen werden in der Referenzgeometrie im Abstand von 7.5 m und einer Höhe von 1.2 m Einzelereignis-Vorbeifahrtsenergien des Totalgeräusches erfasst. Damit eine Aufschlüsselung in Antriebs- und Rollgeräusch möglich wird, sind mehrere Messungen in Situationen, die sich hinsichtlich der Auswirkungen auf die beiden Geräuschkomponenten unterscheiden, durchzuführen. Geeignet ist eine Variation der Fahrzeuggeschwindigkeit, der Belageigenschaften und des Gefälles. Für die notwendige akustische Charakterisierung des Belags wird eine Untersuchung mittels SPB (siehe Kapitel 15) empfohlen.

19 Anbindung an Ausbreitungsmodelle

Wie bereits erwähnt, berücksichtigt sonROAD18 die quellennahe Bodenreflexion pauschal. Für Empfangspunkte, die höchstens 7.5 m von der Fahrspurmitte entfernt über hartem Boden liegen, ist in der Ausbreitungsrechnung lediglich die geometrische Verdünnung und die Luftdämpfung zu berücksichtigen. Ein zusätzlicher Bodeneffekt tritt nur für Empfängerabstände grösser als 7.5 m in Erscheinung.

19.1 Schnittstelle zum Ausbreitungsmodell ISO 9613-2

Das Ausbreitungsmodell ISO 9613-2 stellt einen Formalismus für die Berechnung der geometrischen Verdünnung, der Luftdämpfung, des Bodeneffekts, allfälliger Hinderniswirkung sowie Bewuchsdämpfung zur Verfügung. Für eine spektrale Bodeneffektberechnung wie sie hier benötigt wird, muss das reale Terrain durch eine repräsentative Ebene approximiert werden. Da ISO 9613-2 den Bodeneffekt in Oktaven berechnet, wird das ganze Ausbreitungsmodell in Oktaven formuliert. Entsprechend werden die terzbandweise spezifizierten Emissionswerte vor der Übergabe an die Ausbreitungsrechnung zu Oktavwerten zusammengefasst.

Eine Analyse des mit 9613-2 berechneten Bodeneffekts für eine unendlich ausgedehnte Linienquelle zeigt für

- harten Untergrund
- eine Quellenhöhe = 0.05 m
- eine Empfängerdistanz ≤ 7.5 m
- Empfängerhöhen zwischen 1.2 und 4 m

in allen Oktaven einen Wert zwischen 3.0 und 3.2 dB, d.h. eine Verstärkung von rund 3 dB im Vergleich zu Freifeldausbreitung. Dies widerspiegelt mit ausreichender Genauigkeit die obige Annahme zur pauschalen quellenseitigen Bodenreflexionen, so dass die Ausbreitungsrechnung vollständig normgemäss ausgeführt werden kann. Mit Gl. 19.1 lassen sich die in die Rechnung einzusetzenden A-bewerteten Oktavband-Schallleistungspegel $L_{W,9613,A}[c, o]$ bestimmen.

$$L_{W,9613,A}[c, o] = 10 \lg \left(\sum_{i=i_u}^{i_o} 10^{0.1(L_W[c,i] + A[i])} \right) \quad (19.1)$$

mit c : Fahrzeugkategorie, $i_u \dots i_o$: Indizes der zum Oktavband o gehörenden Terzbänder, $A[i]$: A-Bewertung für das Terzband i .

Die Abbildung 19.1 zeigt exemplarisch den gemäss ISO 9613-2 bestimmten Bodeneffekt in verschiedenen Distanzen bei einer Empfängerhöhe von 4 m für eine unendlich ausgedehnte Linienquellenhöhe auf 0.05 m Höhe. Dazu wurde angenommen, dass sich von der Linienquelle aus in Richtung Empfänger ein 7.5 m breites akustisch hartes Band ($G = 0$) erstreckt, anschliessend ist Grasboden ($G = 1$). Wenn die Schallausbreitung vollständig über hartem Boden verläuft, ergibt sich ein Bodeneffekt gemäss Abbildung 19.2.

19.2 Schnittstelle zu sonX

Zur Befriedigung der Konvention, dass die Bodenreflexion in Quellennähe pauschal zu berücksichtigen ist, muss für eine sonX Ausbreitungsrechnung der Emissionswert um 3 dB erhöht werden und im Gegenzug ab der Fahrspurachse ein 7.5 m breites, vollständig absorbierendes Band am Boden ausgelegt werden. Für weiter als 7.5 m entfernte Empfangspunkte trägt dann nur die an dieses Band angrenzende Zone zu einer Bodenreflexion bei. Dank der Fresnelzonengewichtung der Reflexionsanteile erfolgt dieser Übergang kontinuierlich.

Die Abbildung 19.3 zeigt exemplarisch den so bestimmten Bodeneffekt in verschiedenen Distanzen bei einer Empfängerhöhe von 4 m für eine unendlich ausgedehnte Linienquellenhöhe auf 0.05 m Höhe. Die an das

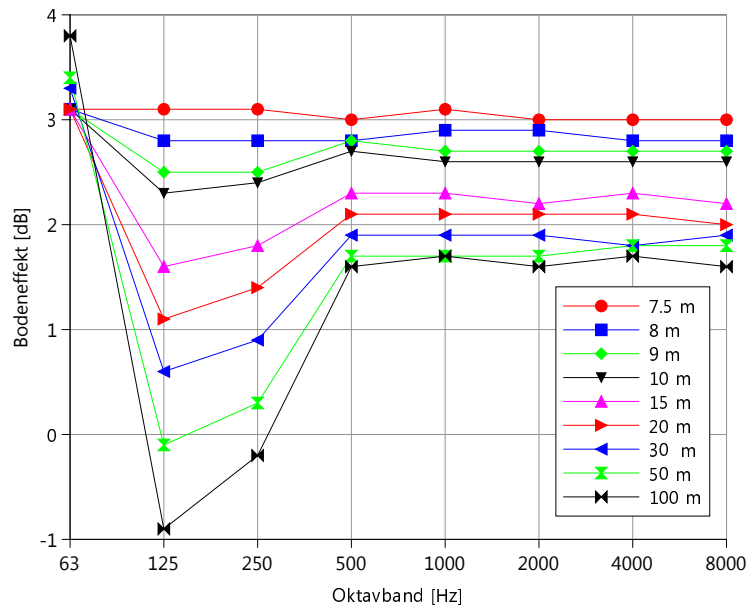


Abbildung 19.1: Exemplarischer Bodeneffekt gemäss ISO 9613-2 für eine Linienquelle auf 0.05 m über 7.5 m breitem hartem Boden mit angrenzendem Grasland für einen Empfänger auf 4 m Höhe in unterschiedlichen Abständen.

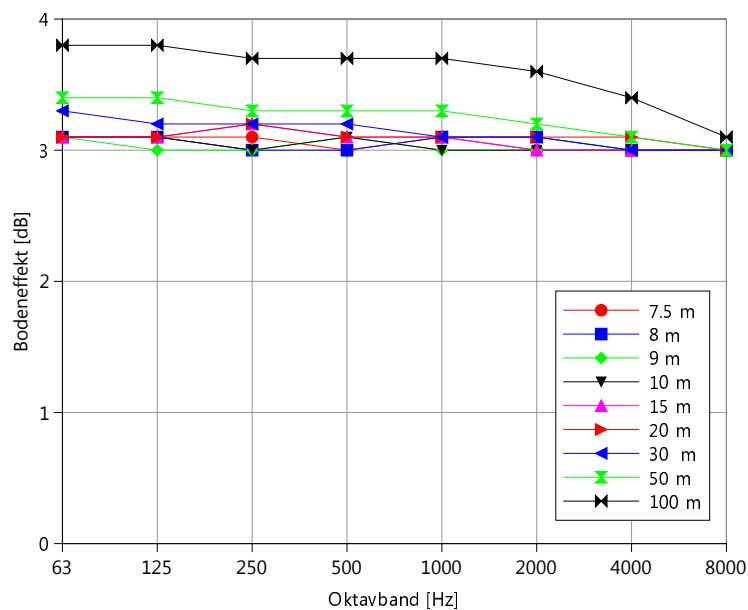


Abbildung 19.2: Exemplarischer Bodeneffekt gemäss ISO 9613-2 für eine Linienquelle auf 0.05 m über vollflächig hartem Boden für einen Empfänger auf 4 m Höhe in unterschiedlichen Abständen.

vollabsorbierende Band angrenzende Zone wurde als Grasboden mit einem Strömungswiderstand von 200 Rayl angenommen, die Rechnung erfolgte ohne Kohärenzverlust. Ein direkter Vergleich mit Abbildung 19.1 ist nur unter Berücksichtigung der angesprochenen 3.0 dB Korrektur möglich.

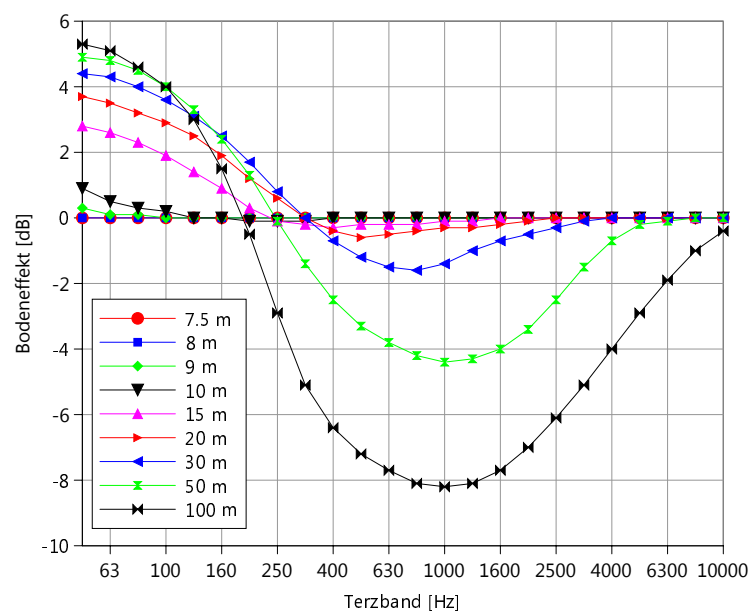


Abbildung 19.3: Exemplarischer Bodeneffekt gemäss sonX für eine Linienquelle mit vollabsorbierendem, 7.5 m breitem Quellenband für einen Empfänger auf 4 m Höhe in unterschiedlichen Abständen.

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 Schallleistungspegel $L_{W,A}[c]$ 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).

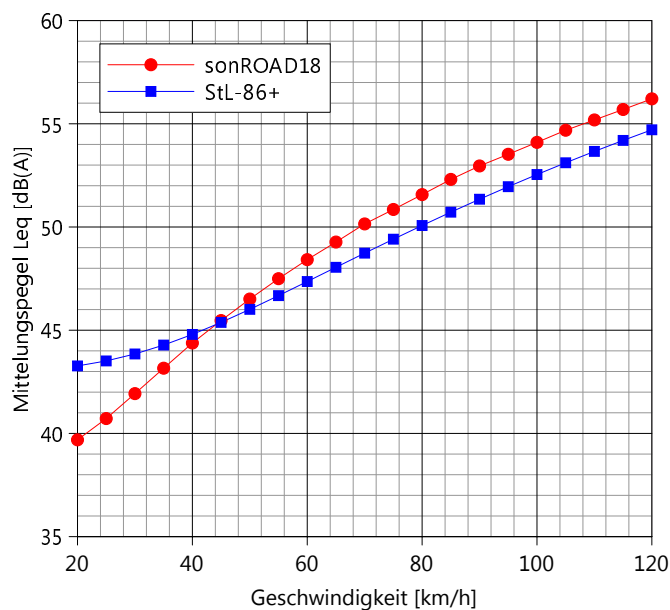


Abbildung 20.1: sonROAD18 und StL-86+ Emissionsprognose auf dem Referenzbelag in Abhängigkeit der Geschwindigkeit als $L_{eq,A}$ in 1 m Abstand für 1 PW/h.

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°
- 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 Punktuellen, 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 $\Delta K_{\max}$ abgeleitet, der die Schätzung des Maximalpegels anhand des Schallleistungspegels ermöglicht. Dazu wird mit Gl. 4.8 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 in Abbildung 4.5 zusammengefasste Auswertung der MFM-U Daten 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 $\Delta K_{\max}$.

Standort	Geschw.	Steigung [%]	Belag	$\Delta K_{\max}$
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 $\Delta K_{\max}$.

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

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

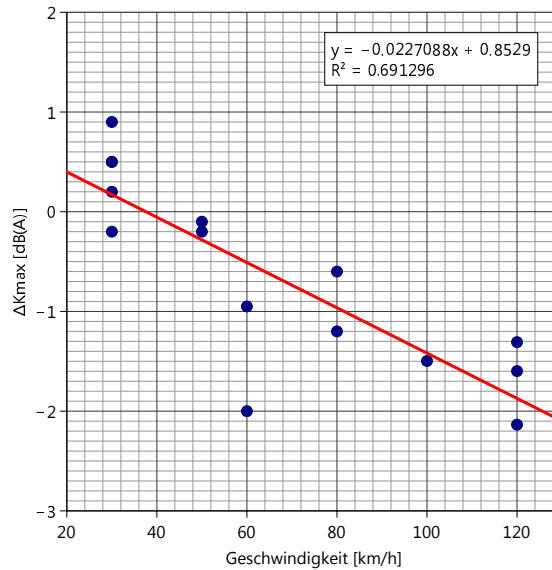


Abbildung 21.1: Aus den Messdaten abgeleitete Maximalpegelkorrekturen $\Delta K_{\max}$ in Abhängigkeit der Geschwindigkeit sowie lineare Trendlinie.

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 $\Delta K_{\max}$ 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. Anfossio 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 Amts für Natur und Umwelt Kanton Graubünden, 2017.
- [33] J.M. Wunderli, R. Pieren, M. Habermacher, D. Vienneau, C. Cajochen, N. Probst-Hensch, M. Rösli, 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 Lärmschutzmassnahme, Studie im Auftrag der Stadt Zürich und Kanton Aargau, A4398, 16.01.2015.

A Kategorienabhängige Fahrzeuglängen

Die automatischen Verkehrszähler an den MFM-U Standorten weisen jedes Fahrzeugereignis einer SWISS10-Kategorie zu, protokollieren darüber hinaus aber auch die registrierte Fahrzeuglänge. Für eine mögliche Herleitung eines reinen Fahrzeuglängen-Klassierungsschemas basierend auf der Astra- Verkehrszähler-Fahrzeugzuordnung wurden hier sämtliche verwertbaren Fahrzeugvorbeifahrten an den vier MFM-U Standorten statistisch ausgewertet. Abbildung A.1 zeigt die Minimal- und Maximalwerte der gefundenen Fahrzeuglängen pro SWISS10-Kategorie, in Tabelle A.1 sind die entsprechenden Statistikwerte aufgelistet.

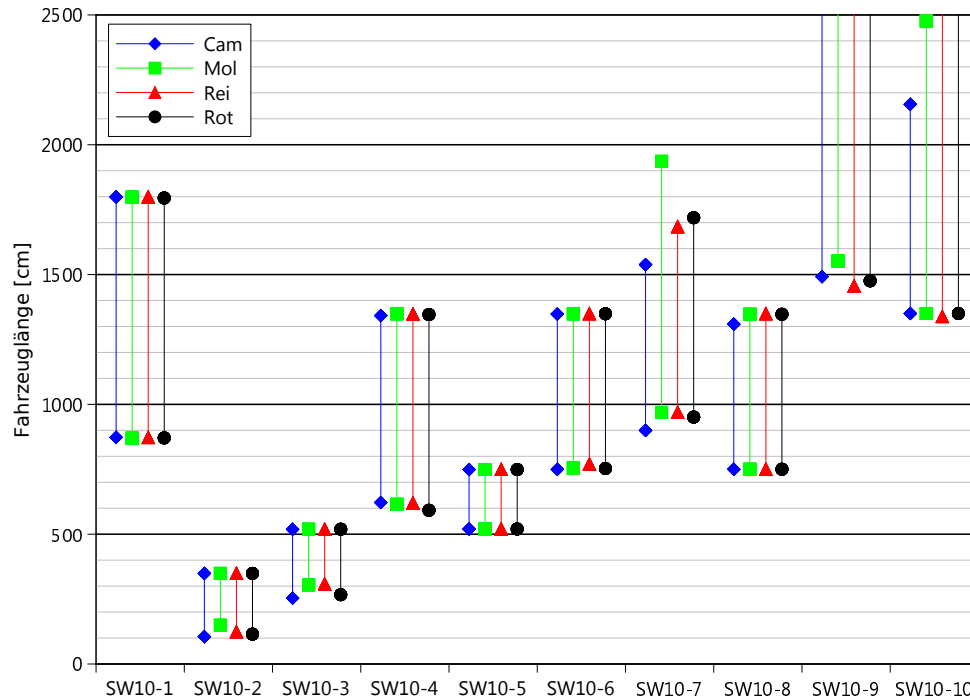


Abbildung A.1: Minimale und maximale Fahrzeuglängen [cm] für die zehn SWISS10-Kategorien an den vier MFM-U Standorten.

	cat1	cat2	cat3	cat4	cat5	cat6	cat7	cat8	cat9	cat10
Cam-Min	873	105	254	622	520	750	900	750	1492	1350
Mol-Min	870	149	305	615	520	755	969	750	1552	1350
Rei-Min	872	124	308	620	520	770	969	750	1456	1338
Rot-Min	871	115	267	592	520	753	951	750	1476	1350
Cam-25%	1219	295	428	828	531	1060	1098	777	1841	1572
Mol-25%	1227	303	436	845	529	1064	1158	782	1826	1603
Rei-25%	1228	298	437	847	529	1080	1107	787	1837	1594
Rot-25%	1225	295	434	840	532	1024	1093	787	1832	1594
Cam-50%	1261	308	455	985	559	1193	1193	834	1889	1624
Mol-50%	1273	316	464	996	546	1186	1223	819	1894	1638
Rei-50%	1275	316	464	947	550	1197	1179	927	1909	1641
Rot-50%	1265	304	460	949	557	1138	1197	887	1893	1635
Cam-75%	1296	321	481	1140	633	1272	1286	983	1931	1654
Mol-75%	1310	329	489	1159	595	1273	1288	950	1941	1665
Rei-75%	1307	332	488	1078	613	1287	1261	1035	1950	1680
Rot-75%	1297	315	485	1104	610	1248	1261	1004	1938	1664
Cam-Max	1799	349	519	1342	749	1348	1538	1309	2972	2156
Mol-Max	1798	349	519	1349	749	1349	1936	1347	3913	2477
Rei-Max	1799	349	519	1348	749	1349	1684	1349	4268	2970
Rot-Max	1795	349	519	1346	749	1349	1719	1347	3568	2663

Tabelle A.1: Statistik der Fahrzeuglängen [cm] an den MFM-U Standorten.

B Sämtliche MFM-U Auswertungen

B.1 Ergebnisse für die Gesamtschallleistung

B.1.1 Camignolo - Mikrofonkanal 1 (Richtung Süden)

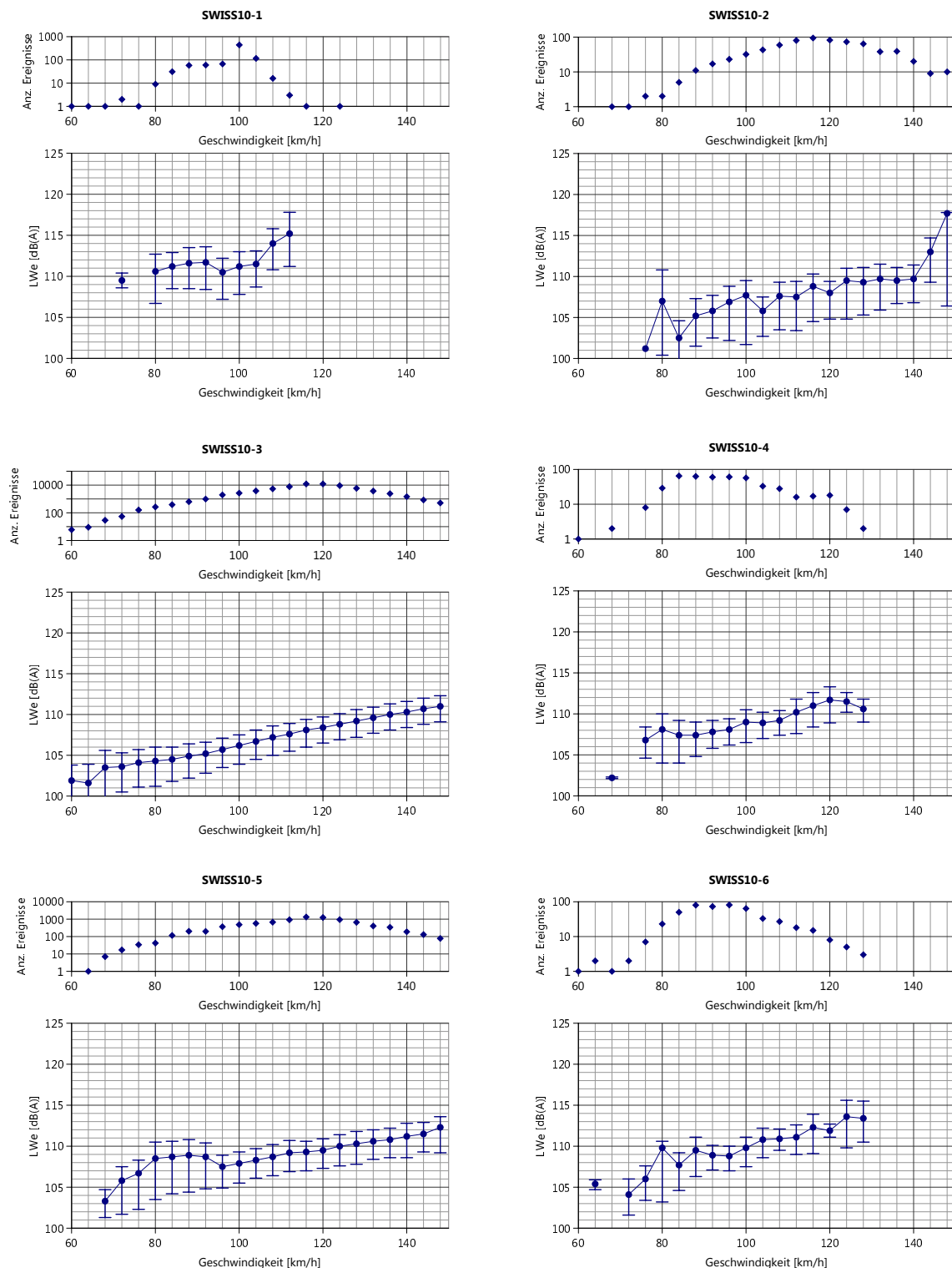


Abbildung B.1: In Geschwindigkeitsklassen à 4 km/h energetisch gemittelter Schallleistungspegel für die SWISS10-Kategorien 1...6 am Standort Camignolo und den Mikrofonkanal 1 (Richtung Süden). Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den arithmetischen Pegelmittelwert auf. Zusätzlich sind die Anzahl Fahrzeuge pro Geschwindigkeitsklasse gezeigt.

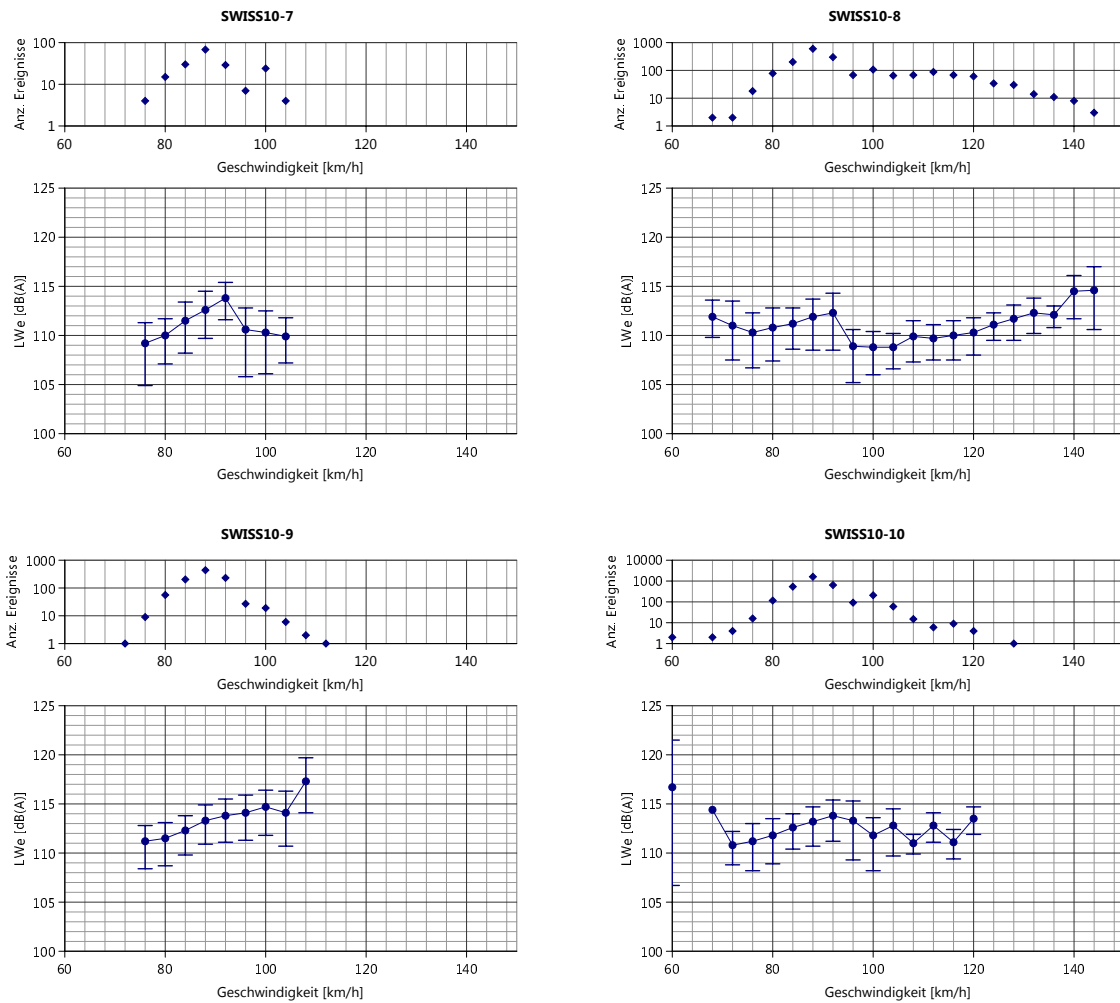


Abbildung B.2: In Geschwindigkeitsklassen à 4 km/h energetisch gemittelte Schallleistungspegel für die SWISS10-Kategorien 7...10 am Standort Camignolo und den Mikrophonkanal 1 (Richtung Süden). Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den arithmetischen Pegelmittelwert auf. Zusätzlich sind die Anzahl Fahrzeuge pro Geschwindigkeitsklasse gezeigt.

B.1.2 Camignolo - Mikrofonkanal 2 (Richtung Norden)

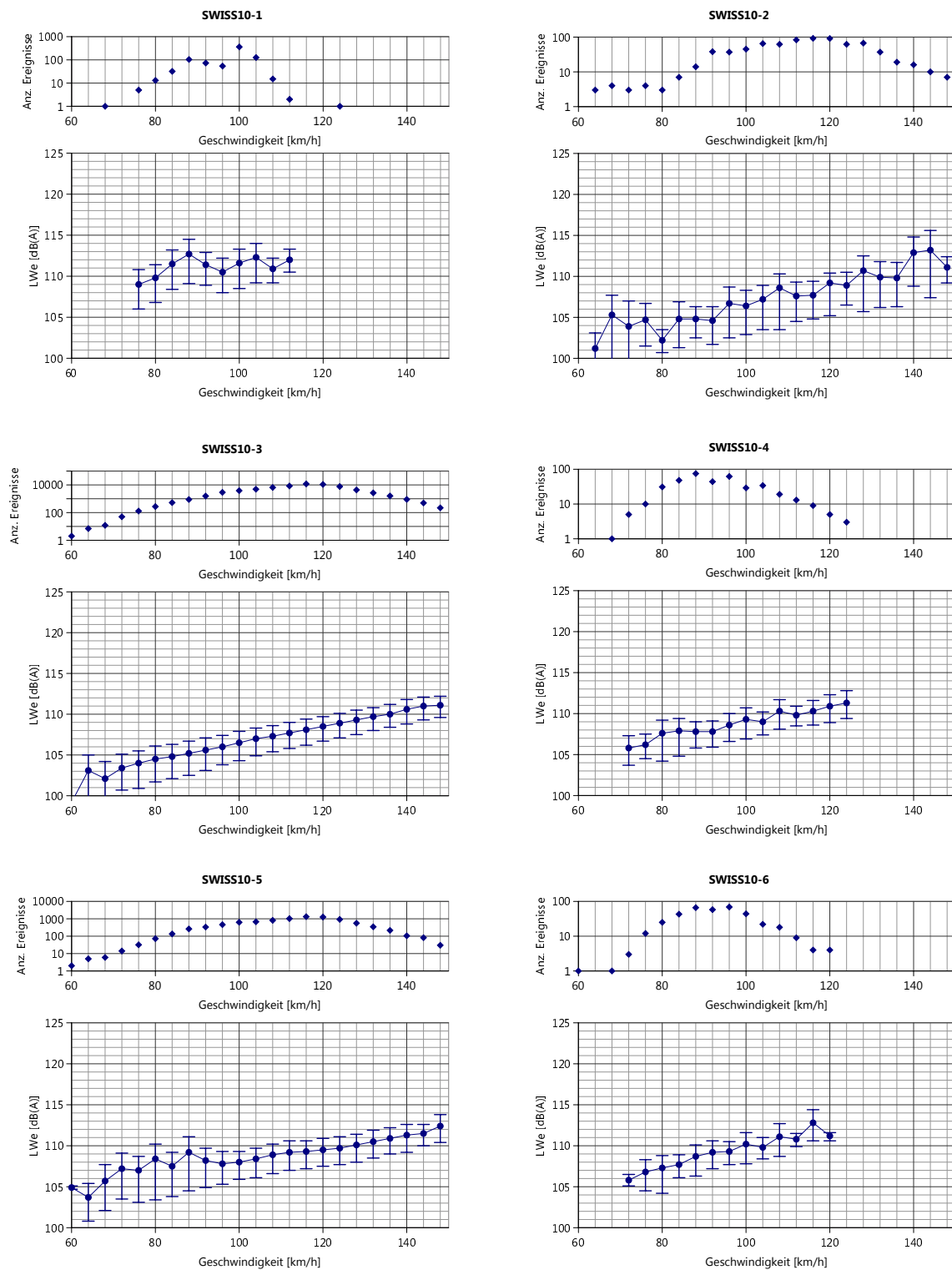


Abbildung B.3: In Geschwindigkeitsklassen à 4 km/h energetisch gemittelter Schallleistungspegel für die SWISS10-Kategorien 1...6 am Standort Camignolo und den Mikrofonkanal 2 (Richtung Norden). Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den arithmetischen Pegelmittelwert auf. Zusätzlich sind die Anzahl Fahrzeuge pro Geschwindigkeitsklasse gezeigt.

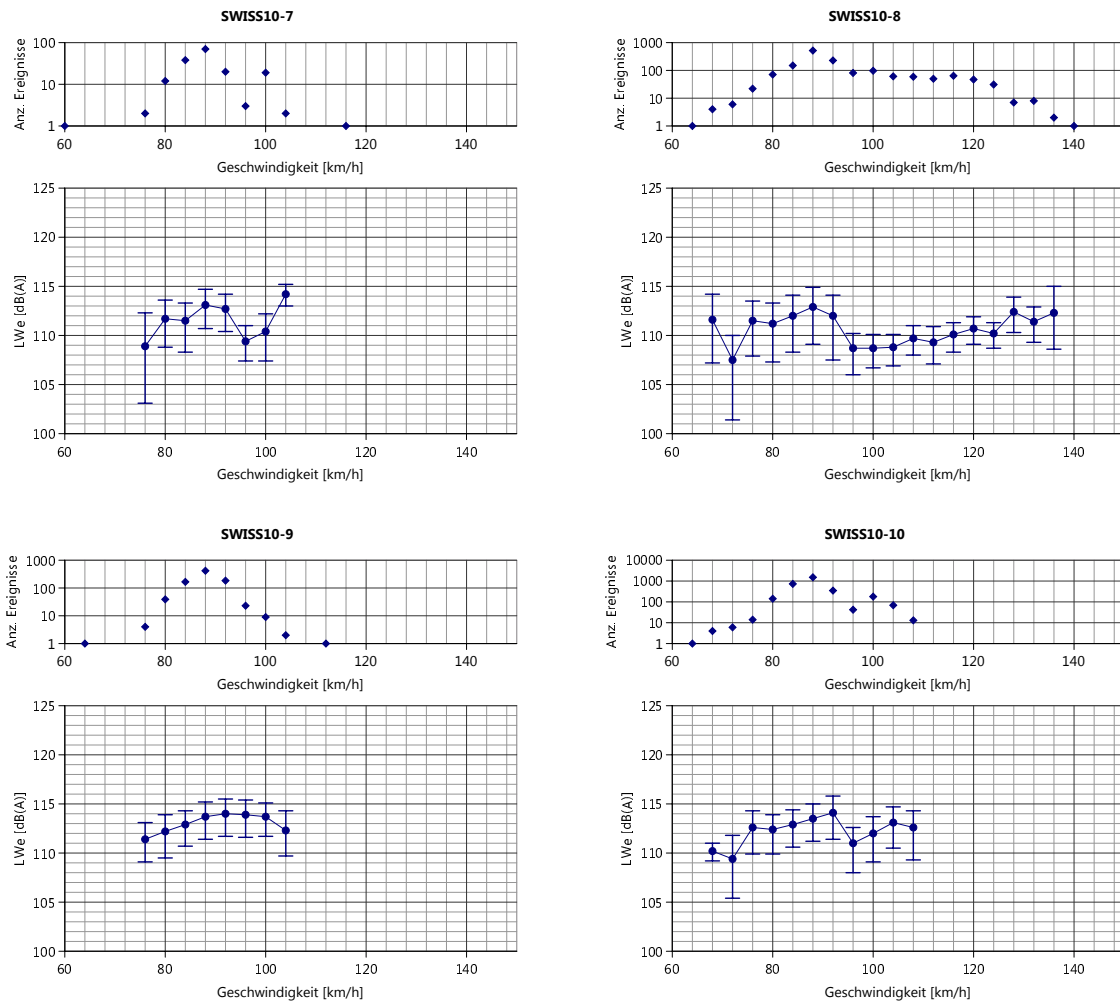


Abbildung B.4: In Geschwindigkeitsklassen à 4 km/h energetisch gemittelte Schallleistungspegel für die SWISS10-Kategorien 7...10 am Standort Camignolo und den Mikrophonkanal 2 (Richtung Norden). Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den arithmetischen Pegelmittelwert auf. Zusätzlich sind die Anzahl Fahrzeuge pro Geschwindigkeitsklasse gezeigt.

B.1.3 Moleno - Mikrofonkanal 1 (Richtung Süden)

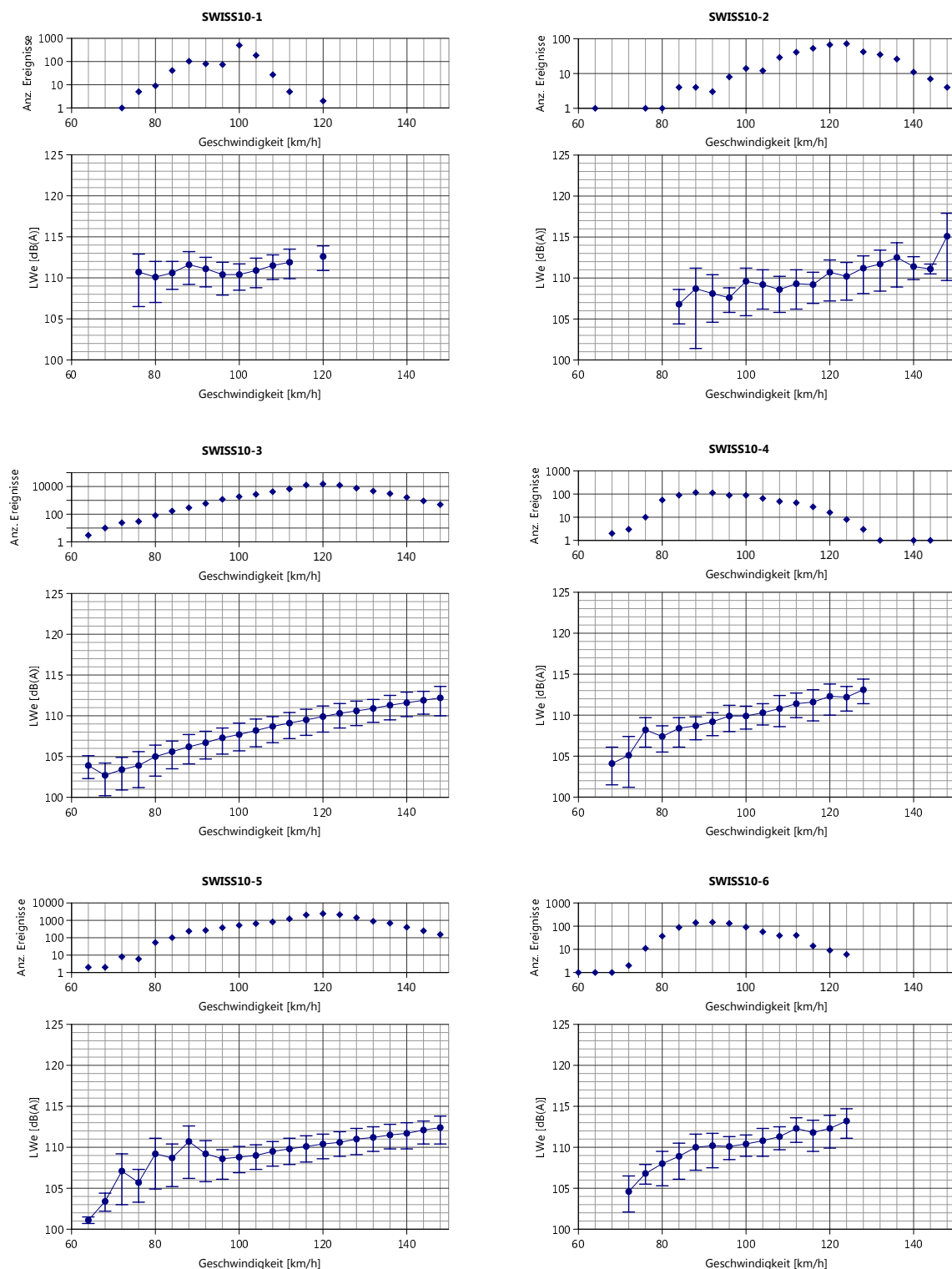


Abbildung B.5: In Geschwindigkeitsklassen à 4 km/h energetisch gemittelter Schallleistungspegel für die SWISS10-Kategorien 1...6 am Standort Moleno und den Mikrofonkanal 1 (Richtung Süden). Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den arithmetischen Pegelmittelwert auf. Zusätzlich sind die Anzahl Fahrzeuge pro Geschwindigkeitsklasse gezeigt.

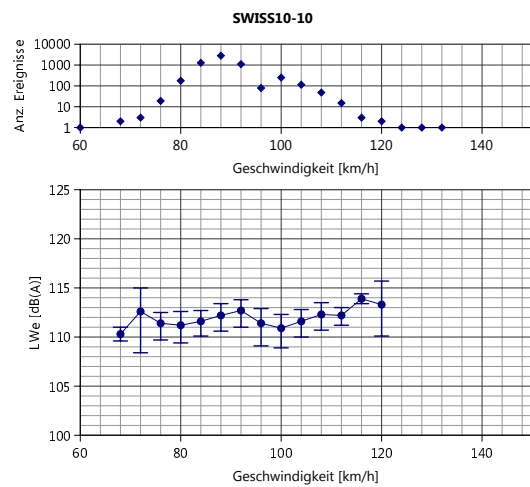
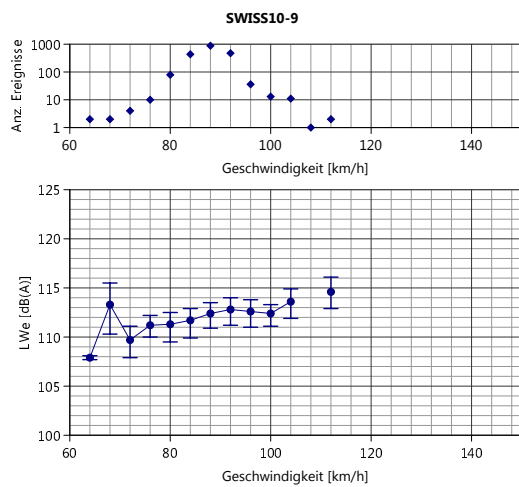
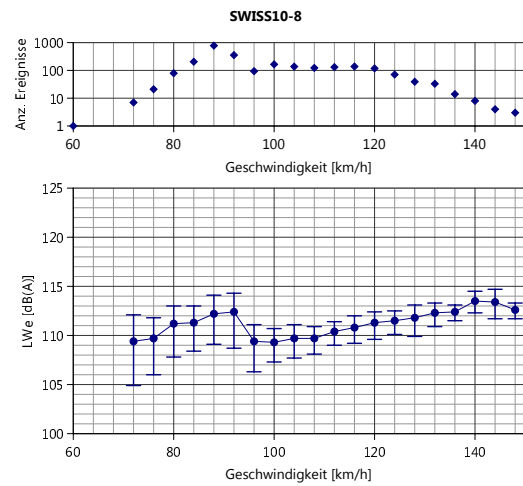
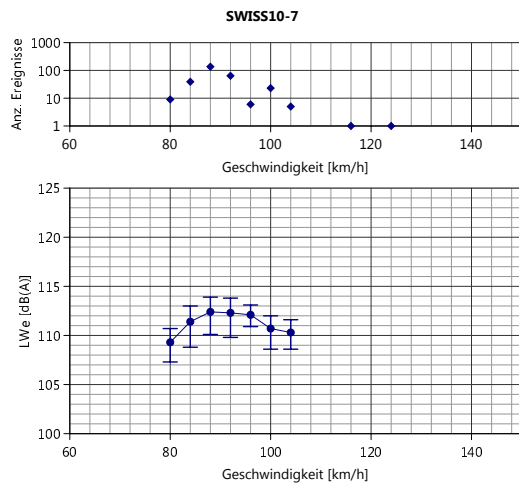


Abbildung B.6: In Geschwindigkeitsklassen à 4 km/h energetisch gemittelte Schallleistungspegel für die SWISS10-Kategorien 7...10 am Standort Moleno und den Mikrophonkanal 1 (Richtung Süden). Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den arithmetischen Pegelmittelwert auf. Zusätzlich sind die Anzahl Fahrzeuge pro Geschwindigkeitsklasse gezeigt.

B.1.4 Moleno - Mikrofonkanal 2 (Richtung Norden)

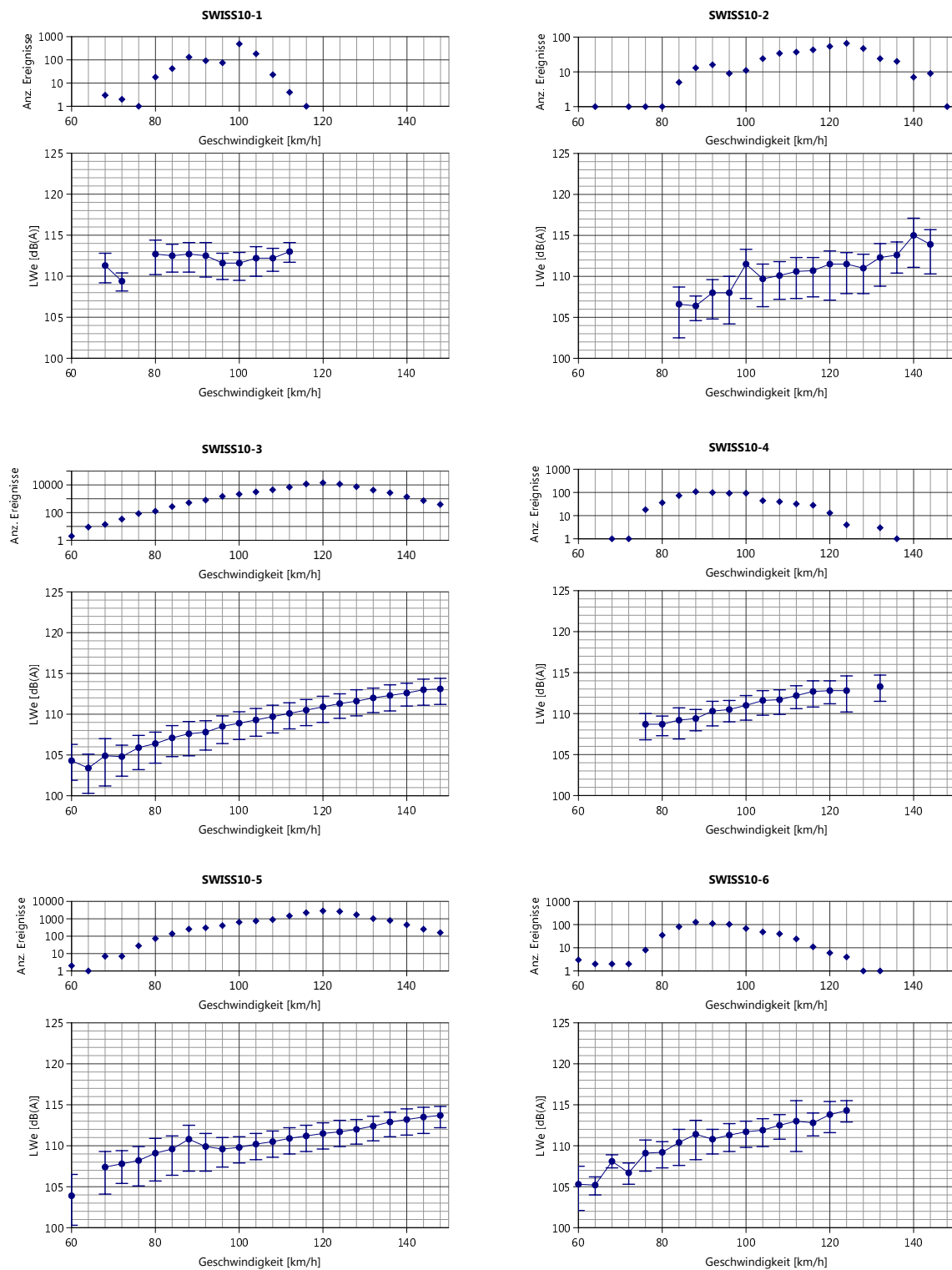


Abbildung B.7: In Geschwindigkeitsklassen $\Delta 4$ km/h energetisch gemittelter Schallleistungspegel für die SWISS10-Kategorien 1...6 am Standort Moleno und den Mikrofonkanal 2 (Richtung Norden). Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den arithmetischen Pegelmittelwert auf. Zusätzlich sind die Anzahl Fahrzeuge pro Geschwindigkeitsklasse gezeigt.

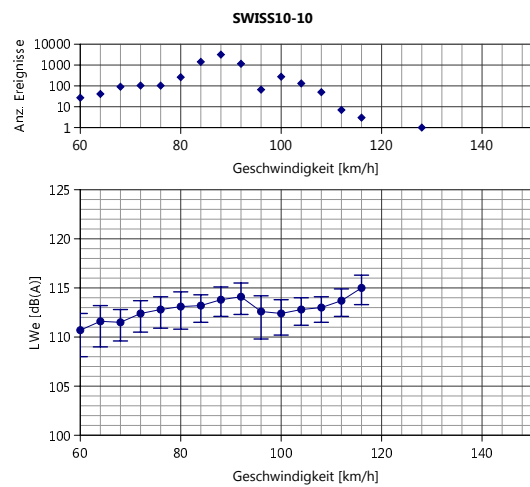
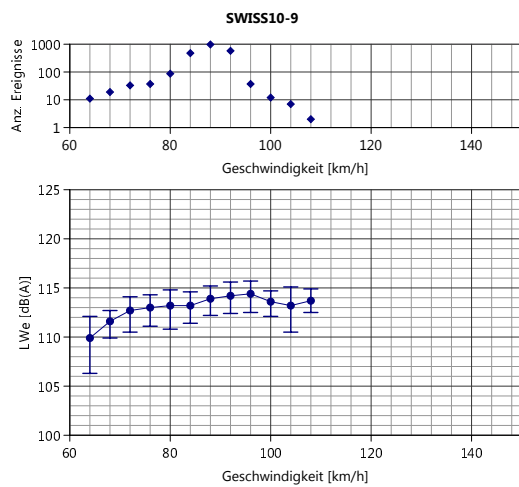
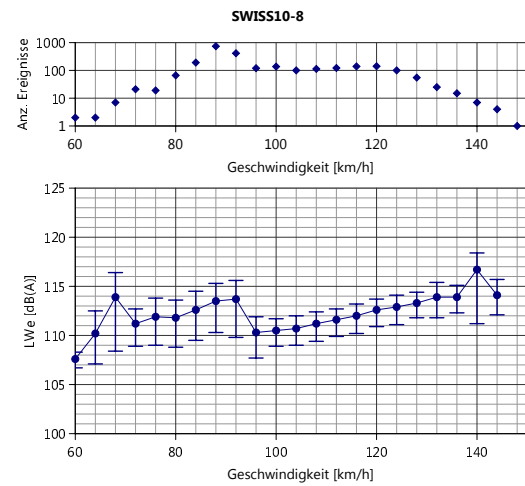
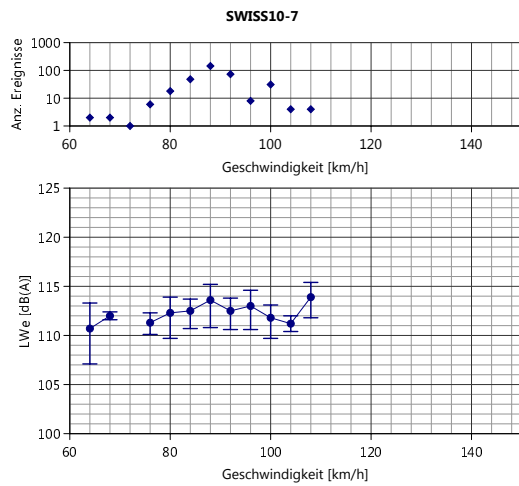


Abbildung B.8: In Geschwindigkeitsklassen à 4 km/h energetisch gemittelte Schallleistungspegel für die SWISS10-Kategorien 7...10 am Standort Moleno und den Mikrophonkanal 2 (Richtung Norden). Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den arithmetischen Pegelmittelwert auf. Zusätzlich sind die Anzahl Fahrzeuge pro Geschwindigkeitsklasse gezeigt.

B.1.5 Reiden - Mikrofonkanal 1 (Richtung Süden)

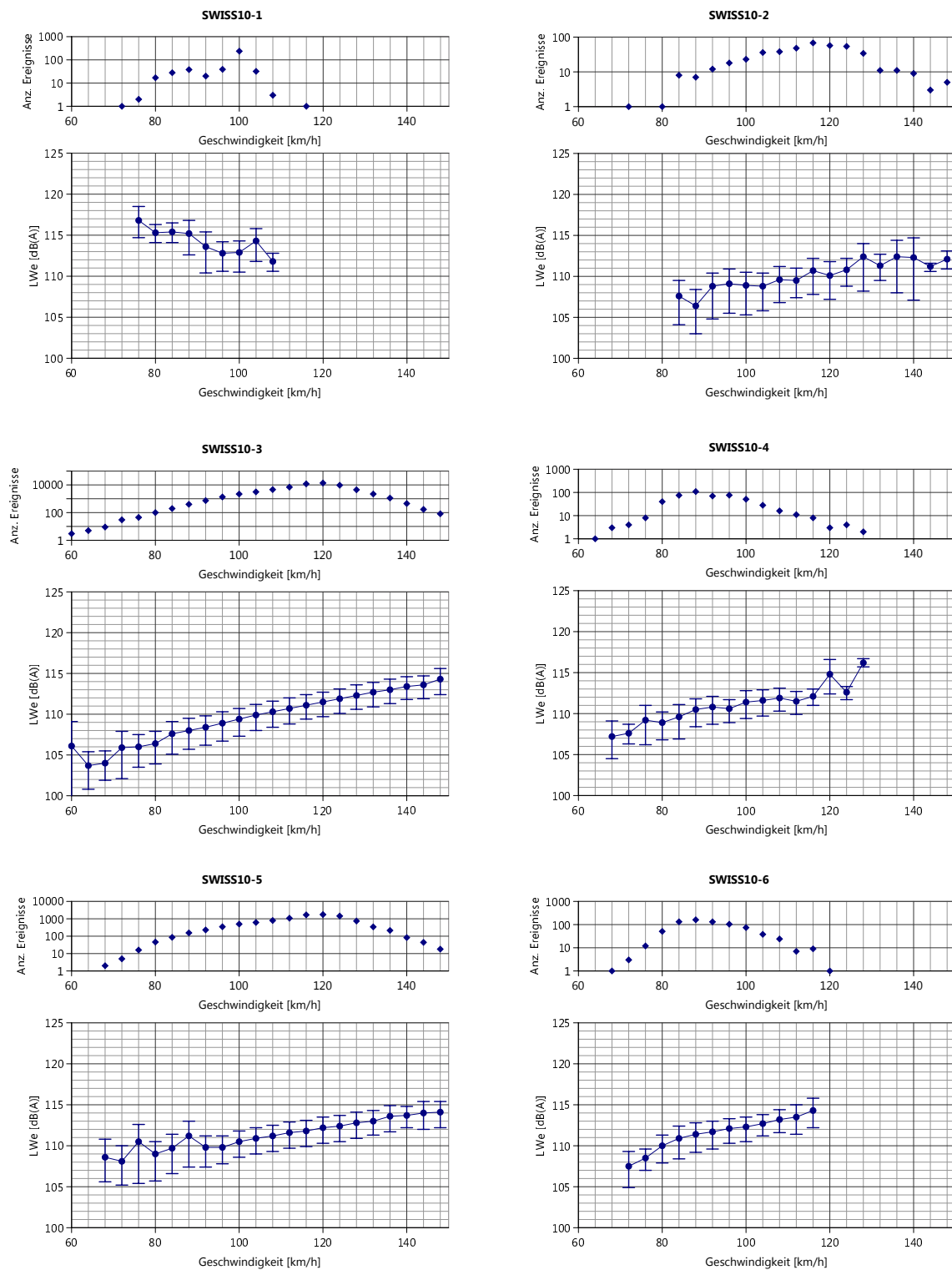


Abbildung B.9: In Geschwindigkeitsklassen $\Delta 4$ km/h energetisch gemittelter Schallleistungspegel für die SWISS10-Kategorien 1...6 am Standort Reiden und den Mikrofonkanal 1 (Richtung Süden). Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den arithmetischen Pegelmittelwert auf. Zusätzlich sind die Anzahl Fahrzeuge pro Geschwindigkeitsklasse gezeigt.

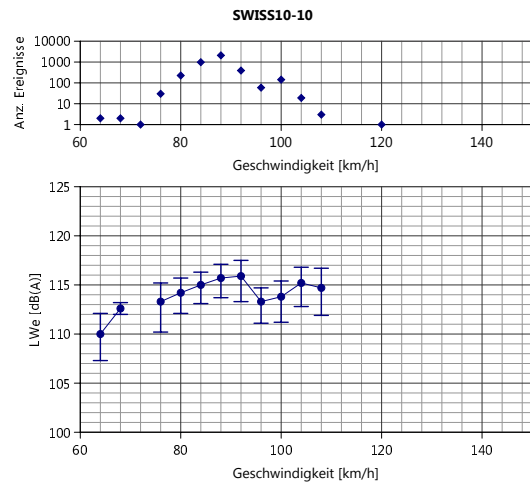
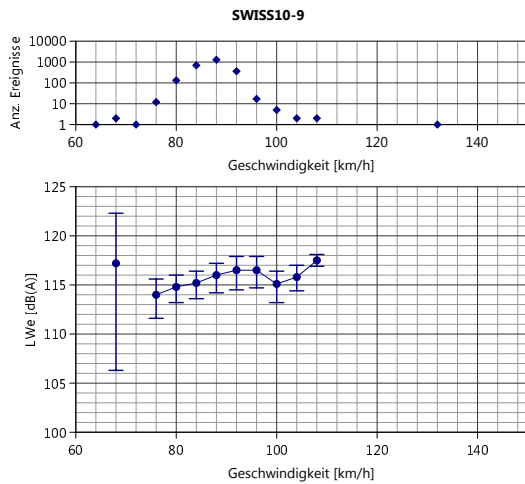
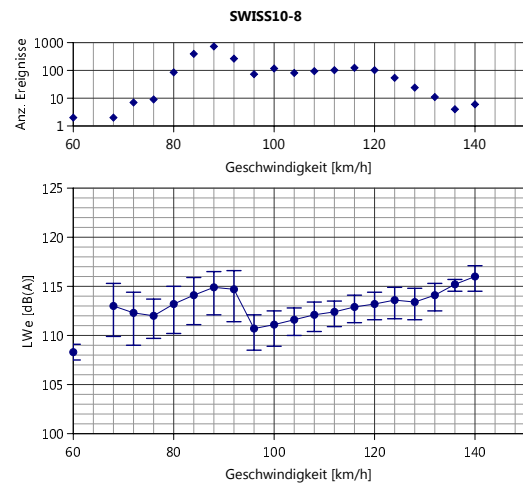
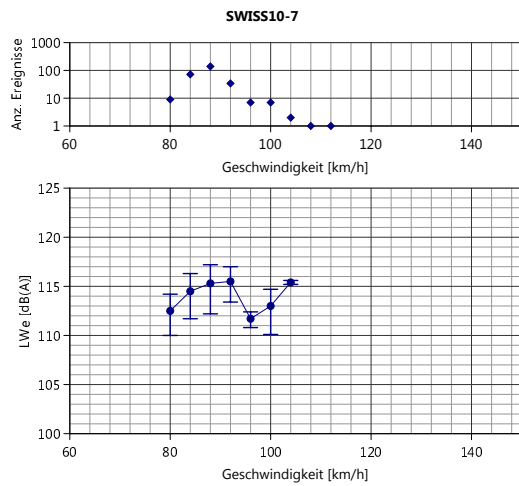


Abbildung B.10: In Geschwindigkeitsklassen à 4 km/h energetisch gemittelte Schallleistungspegel für die SWISS10-Kategorien 7...10 am Standort Reiden und den Mikrophonkanal 1 (Richtung Süden). Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den arithmetischen Pegelmittelwert auf. Zusätzlich sind die Anzahl Fahrzeuge pro Geschwindigkeitsklasse gezeigt.

B.1.6 Reiden - Mikrofonkanal 2 (Richtung Norden)

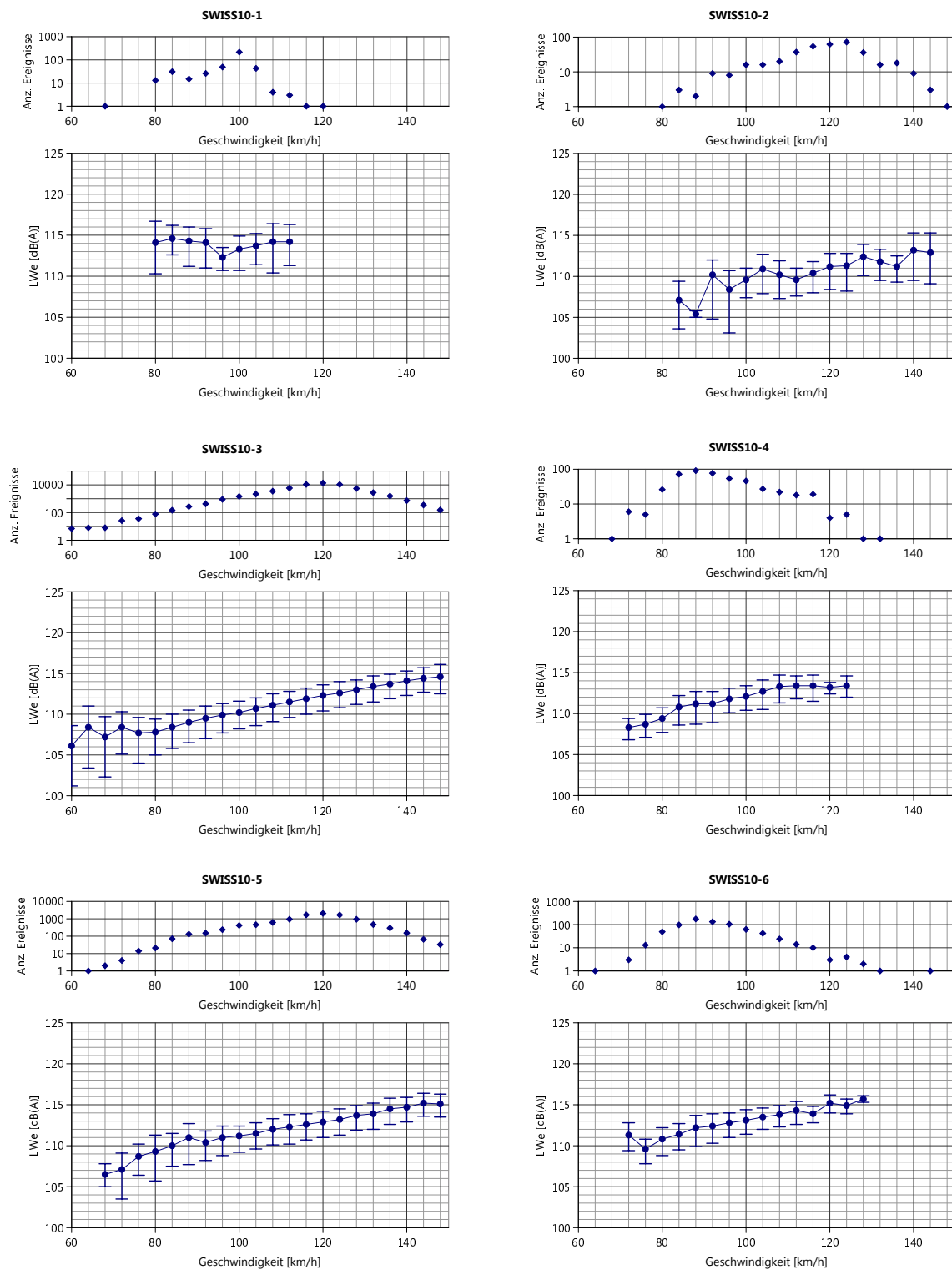


Abbildung B.11: In Geschwindigkeitsklassen à 4 km/h energetisch gemittelte Schallleistungspegel für die SWISS10-Kategorien 1..6 am Standort Reiden und den Mikrofonkanal 2 (Richtung Norden). Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den arithmetischen Pegelmittelwert auf. Zusätzlich sind die Anzahl Fahrzeuge pro Geschwindigkeitsklasse gezeigt.

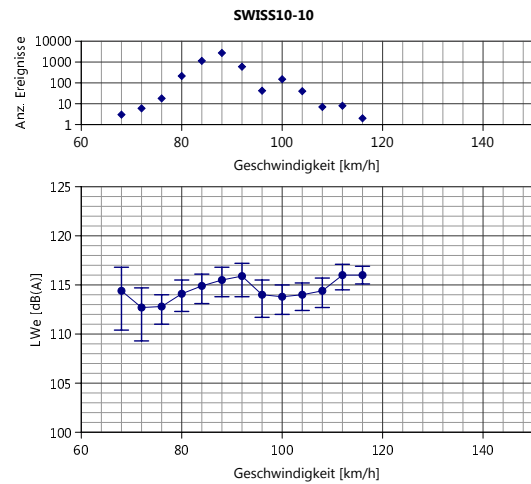
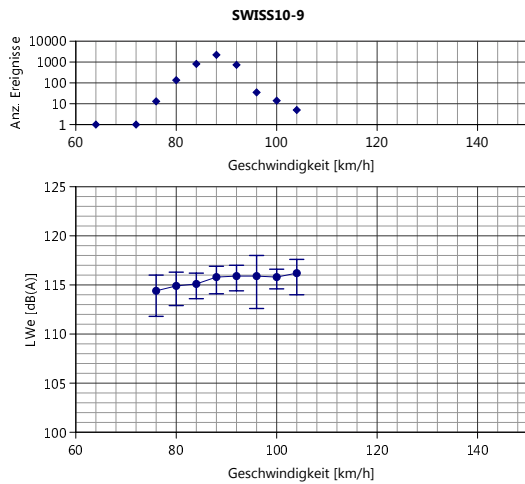
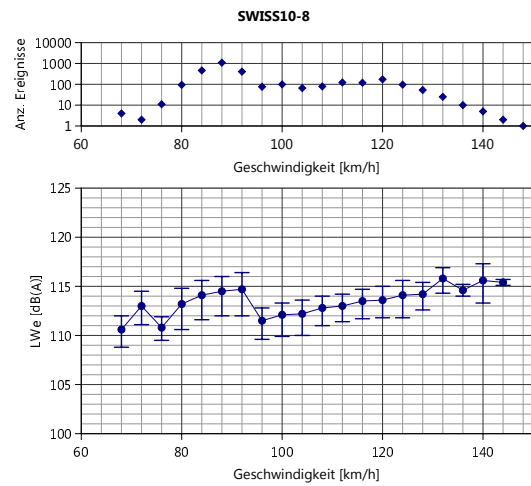
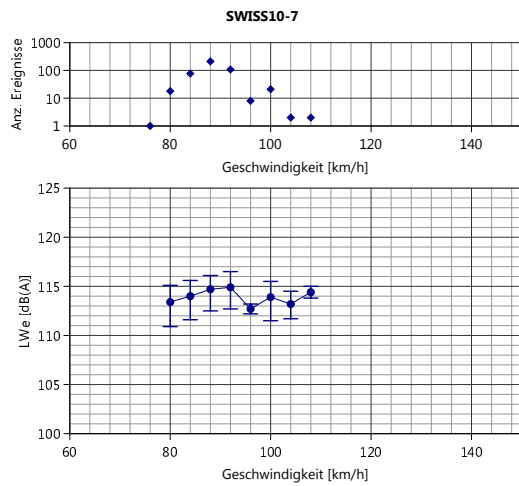


Abbildung B.12: In Geschwindigkeitsklassen à 4 km/h energetisch gemittelte Schallleistungspegel für die SWISS10-Kategorien 7...10 am Standort Reiden und den Mikrophonkanal 2 (Richtung Norden). Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den arithmetischen Pegelmittelwert auf. Zusätzlich sind die Anzahl Fahrzeuge pro Geschwindigkeitsklasse gezeigt.

B.1.7 Rothenbrunnen - Mikrofonkanal 1 (Richtung Süden)

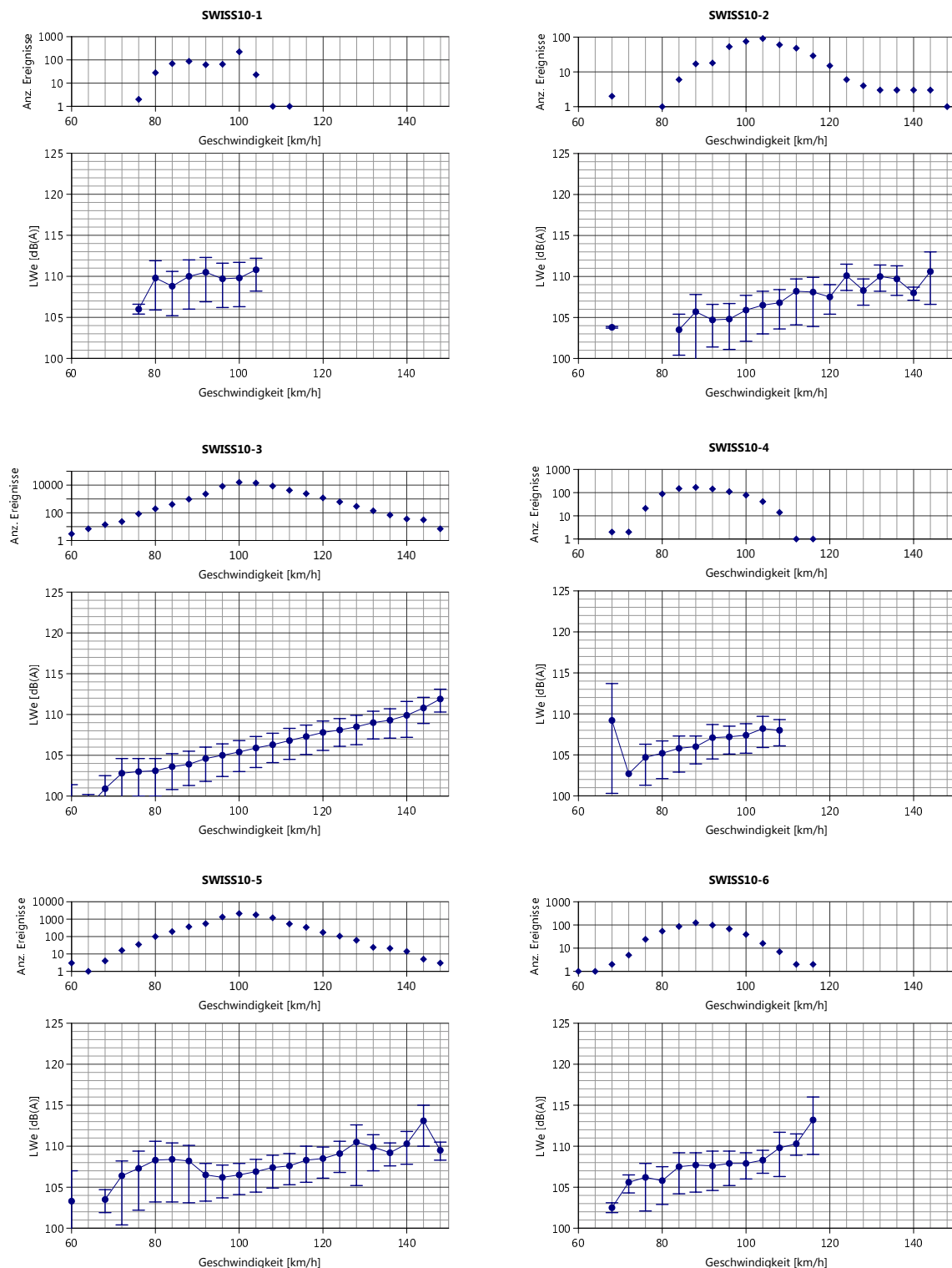


Abbildung B.13: In Geschwindigkeitsklassen $\Delta 4$ km/h energetisch gemittelter Schallleistungspegel für die SWISS10-Kategorien 1...6 am Standort Rothenbrunnen und den Mikrofonkanal 1 (Richtung Süden). Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den arithmetischen Pegelmittelwert auf. Zusätzlich sind die Anzahl Fahrzeuge pro Geschwindigkeitsklasse gezeigt.

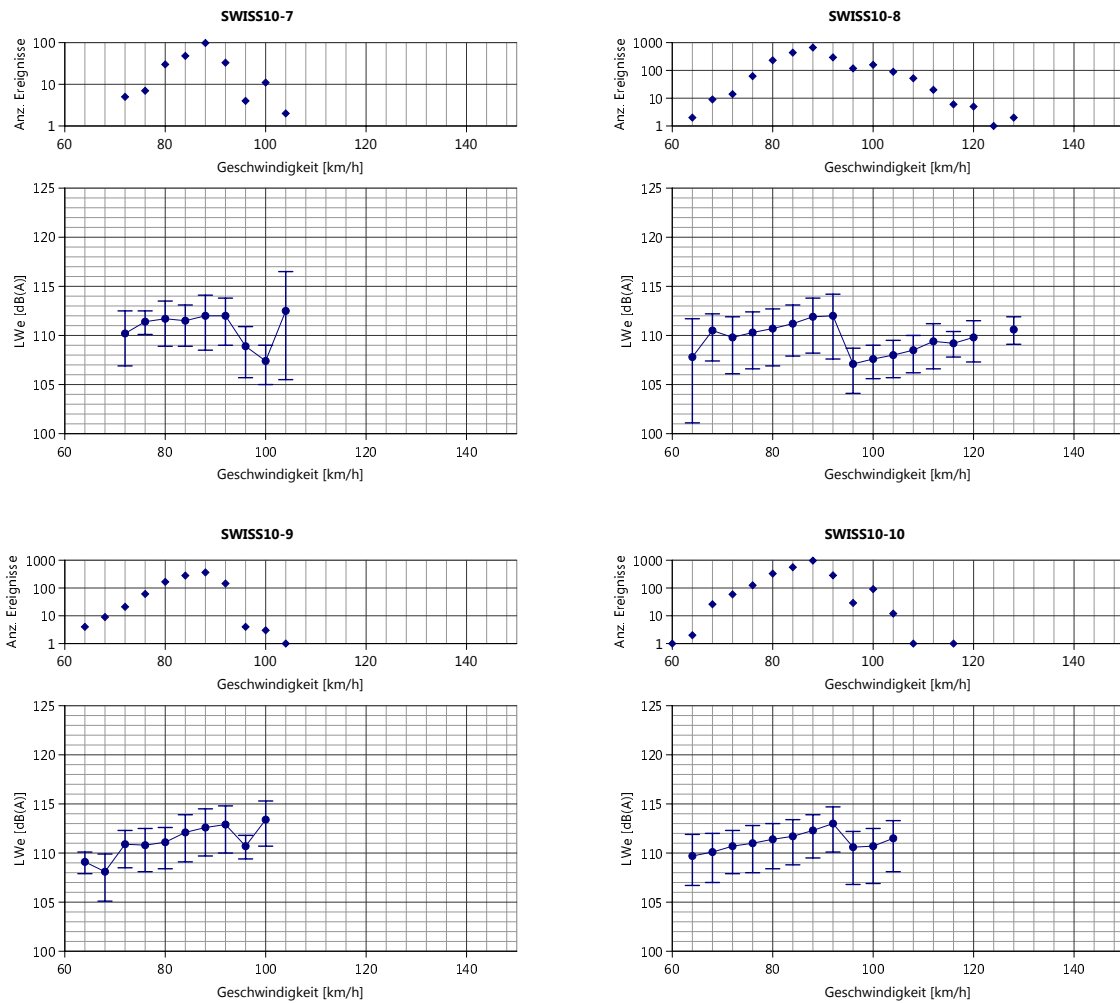


Abbildung B.14: In Geschwindigkeitsklassen à 4 km/h energetisch gemittelte Schallleistungspegel für die SWISS10-Kategorien 7...10 am Standort Rothenbrunnen und den Mikrophonkanal 1 (Richtung Süden). Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den arithmetischen Pegelmittelwert auf. Zusätzlich sind die Anzahl Fahrzeuge pro Geschwindigkeitsklasse gezeigt.

B.1.8 Rothenbrunnen - Mikrofonkanal 2 (Richtung Norden)

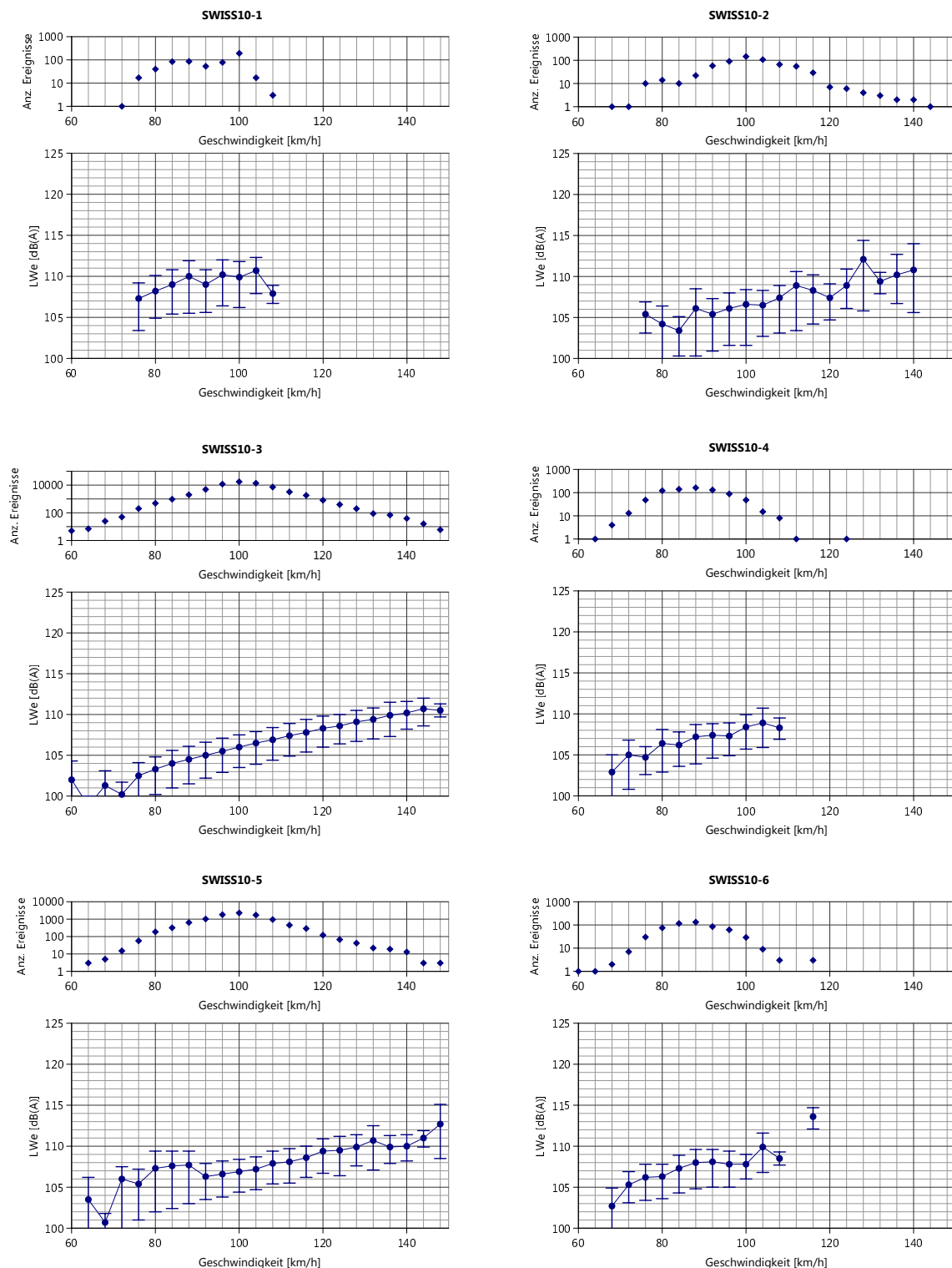


Abbildung B.15: In Geschwindigkeitsklassen $\Delta 4$ km/h energetisch gemittelter Schallleistungspegel für die SWISS10-Kategorien 1...6 am Standort Rothenbrunnen und den Mikrofonkanal 2 (Richtung Norden). Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den arithmetischen Pegelmittelwert auf. Zusätzlich sind die Anzahl Fahrzeuge pro Geschwindigkeitsklasse gezeigt.

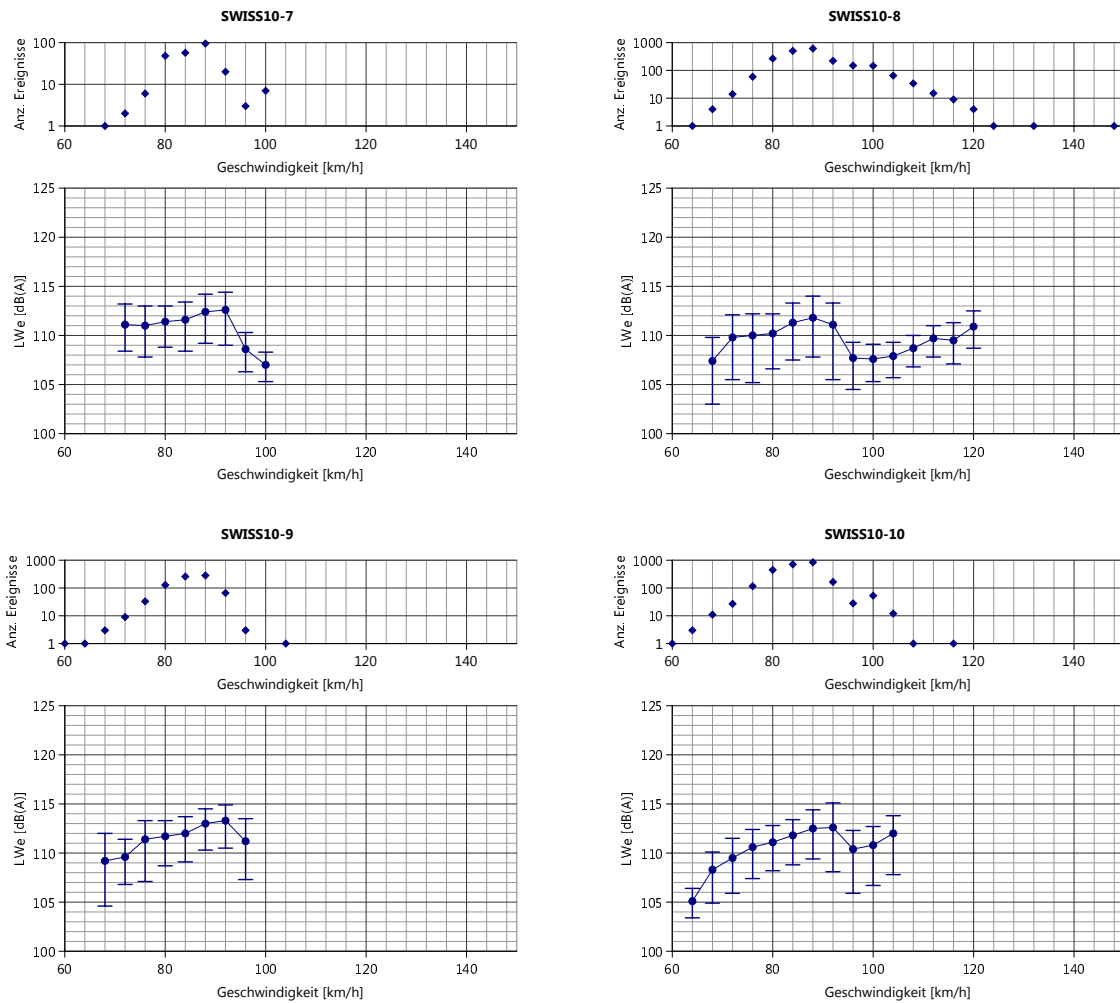


Abbildung B.16: In Geschwindigkeitsklassen à 4 km/h energetisch gemittelte Schallleistungspegel für die SWISS10-Kategorien 7...10 am Standort Rothenbrunnen und den Mikrofonkanal 2 (Richtung Norden). Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den arithmetischen Pegelmittelwert auf. Zusätzlich sind die Anzahl Fahrzeuge pro Geschwindigkeitsklasse gezeigt.

B.2 Ergebnisse für die Schallleistungsspektren

B.2.1 Camignolo - Mikrofonkanal 1 (Richtung Süden)

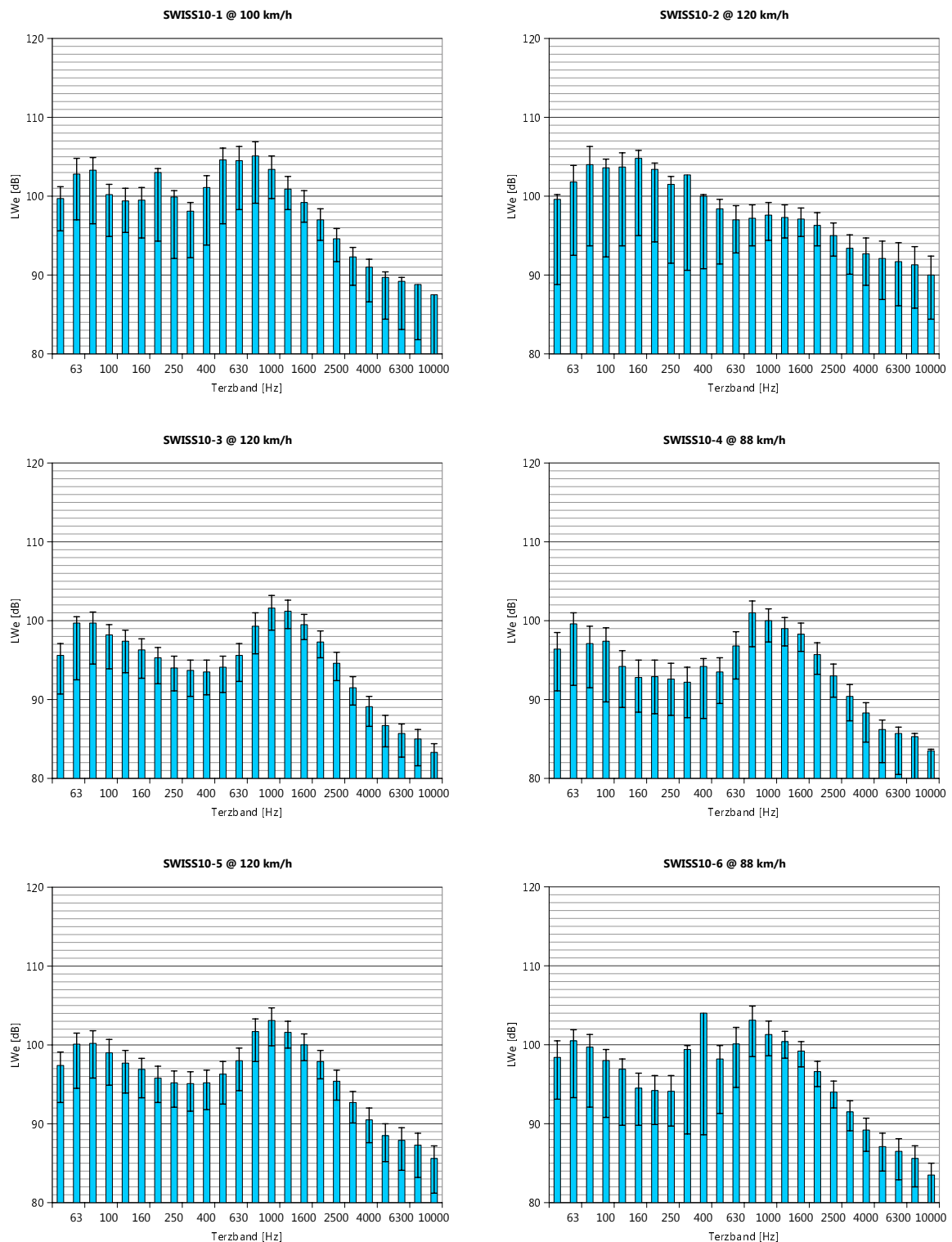


Abbildung B.17: In den jeweiligen repräsentativen Geschwindigkeitsklassen energetisch gemittelte Schallleistungs-Terzbandspektren für die SWISS10-Kategorien 1..6 am Standort Camignolo und den Mikrofonkanal 1 (Richtung Süden). Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den arithmetischen Pegelmittelwert auf.

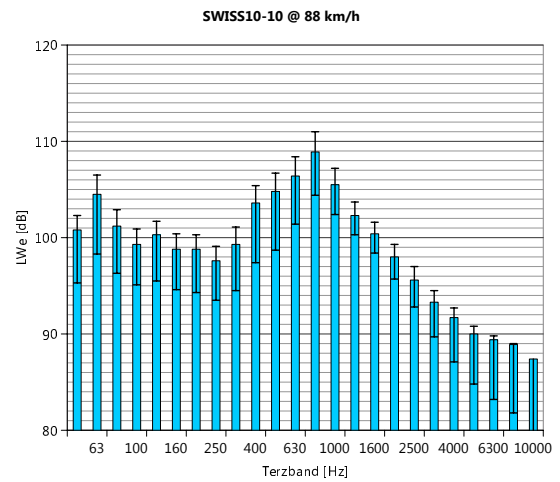
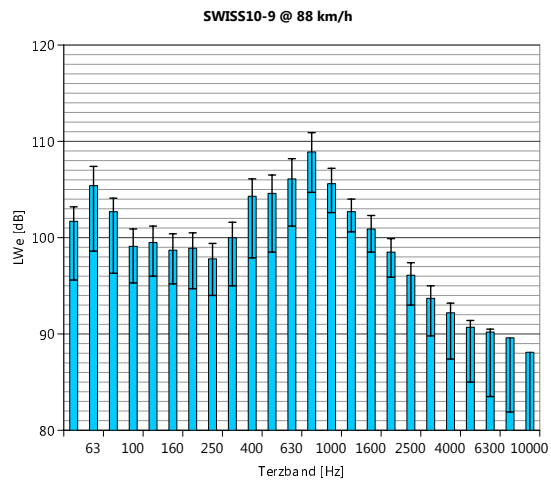
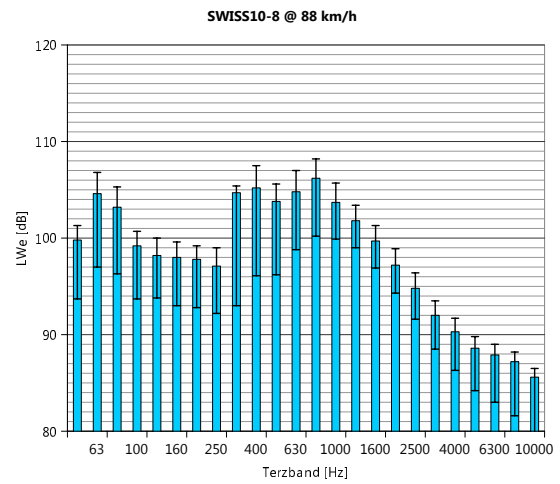
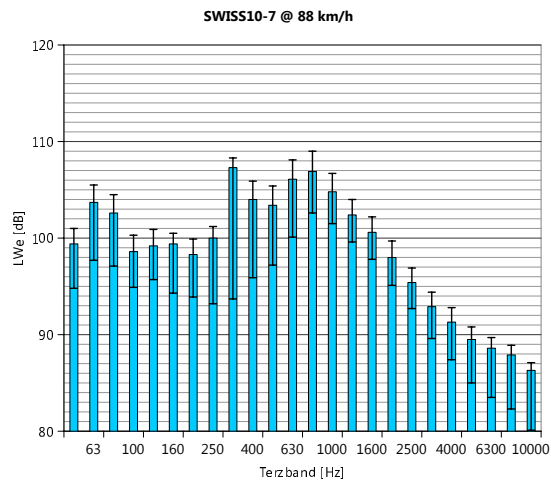


Abbildung B.18: In den jeweiligen repräsentativen Geschwindigkeitsklassen energetisch gemittelte Schallleistungs-Terzbandspektren für die SWISS10-Kategorien 7...10 am Standort Camignolo und den Mikrophonkanal 1 (Richtung Süden). Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den arithmetischen Pegelmittelwert auf.

B.2.2 Camignolo - Mikrofonkanal 2 (Richtung Norden)

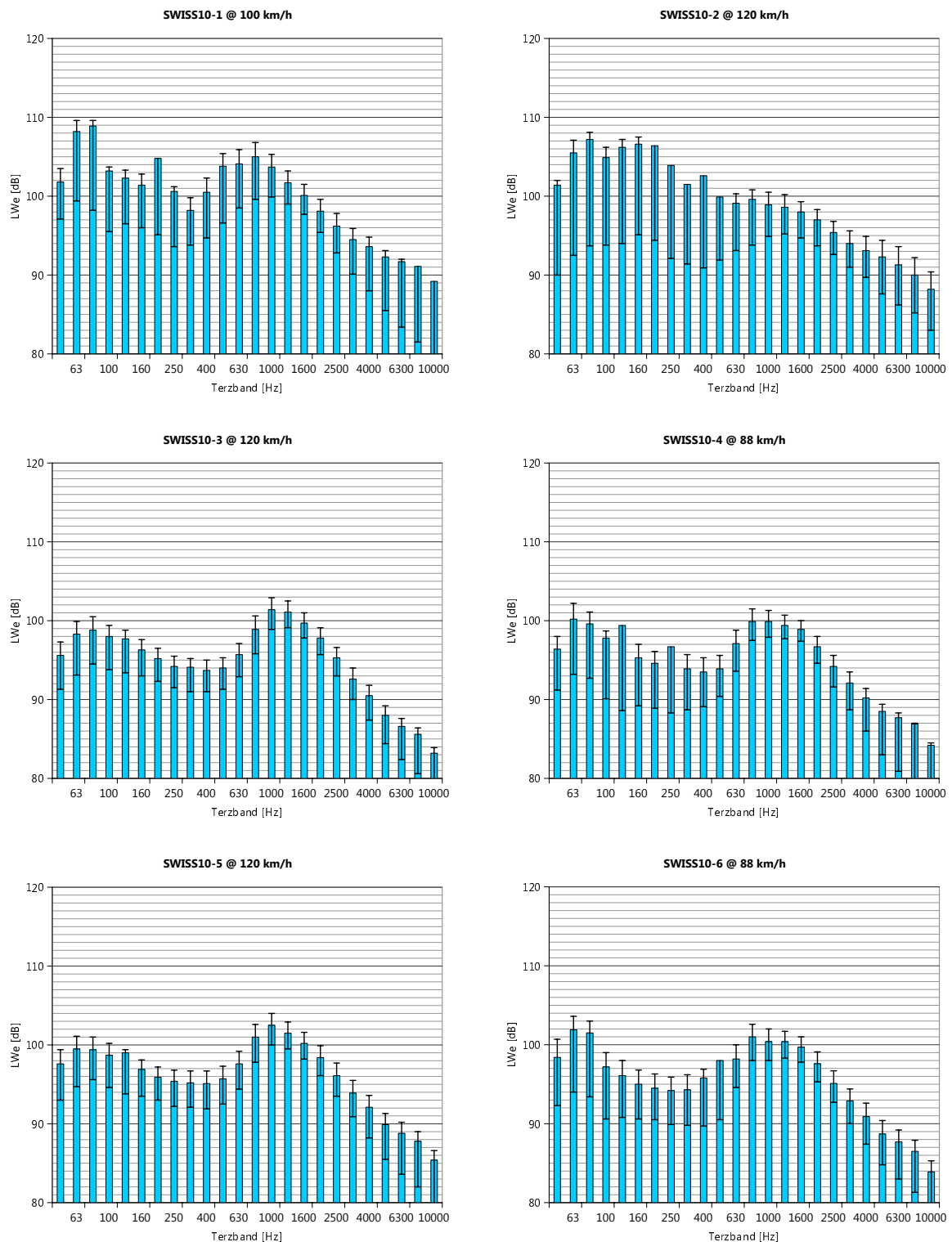


Abbildung B.19: In den jeweiligen repräsentativen Geschwindigkeitsklassen energetisch gemittelte Schallleistungs-Terzbandspektren für die SWISS10-Kategorien 1..6 am Standort Camignolo und den Mikrofonkanal 2 (Richtung Norden). Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den arithmetischen Pegelmittelwert auf.

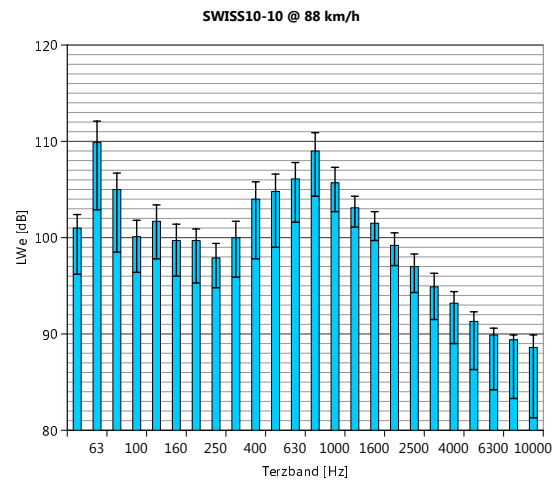
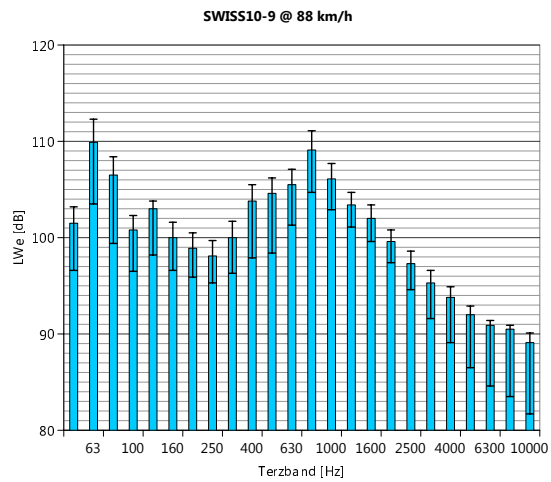
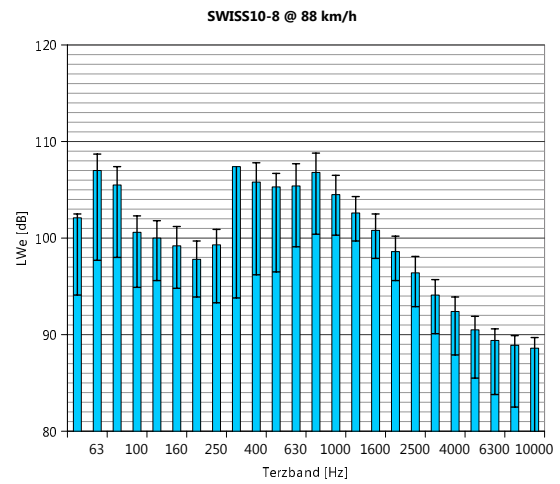
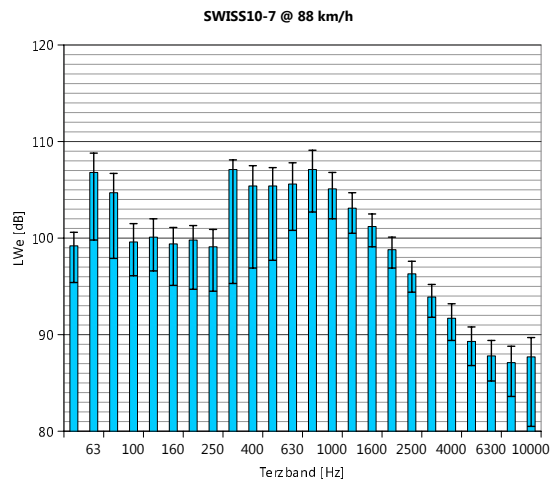


Abbildung B.20: In den jeweiligen repräsentativen Geschwindigkeitsklassen energetisch gemittelte Schallleistungs-Terzbandspektren für die SWISS10-Kategorien 7...10 am Standort Camignolo und den Mikrofonkanal 2 (Richtung Norden). Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den arithmetischen Pegelmittelwert auf.

B.2.3 Moleno - Mikrofonkanal 1 (Richtung Süden)

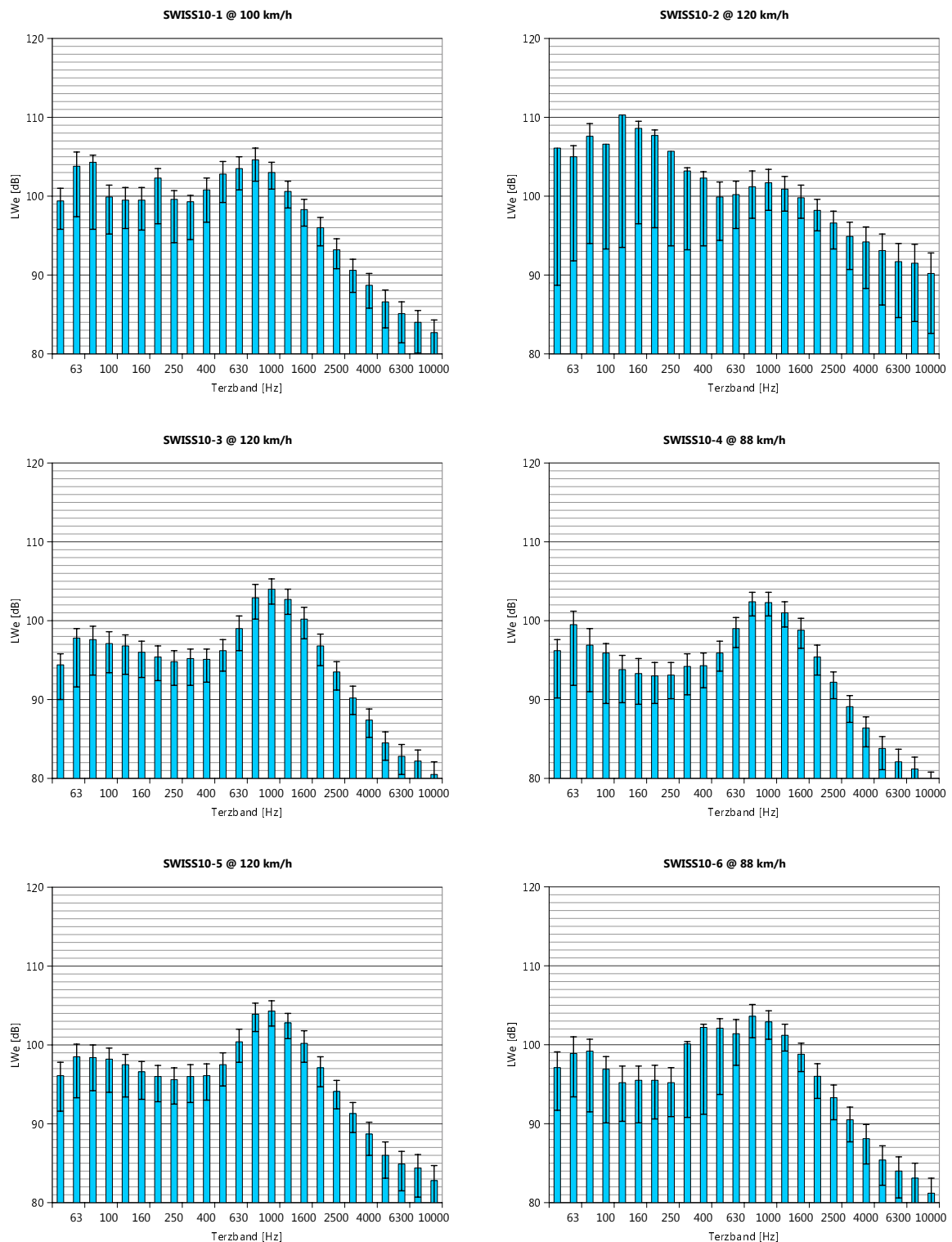


Abbildung B.21: In den jeweiligen repräsentativen Geschwindigkeitsklassen energetisch gemittelte Schallleistungs-Terzbandspektren für die SWISS10-Kategorien 1..6 am Standort Moleno und den Mikrofonkanal 1 (Richtung Süden). Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den arithmetischen Pegelmittelwert auf.

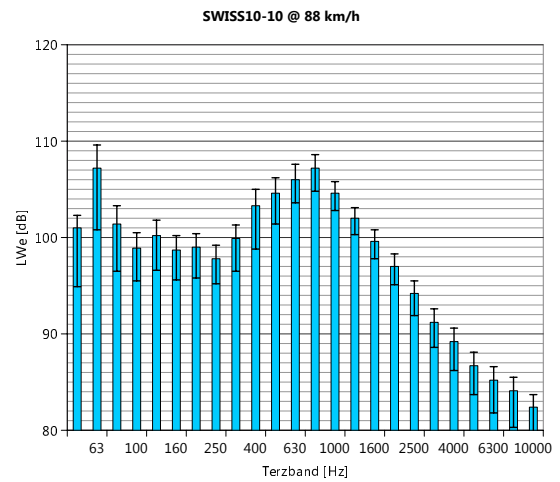
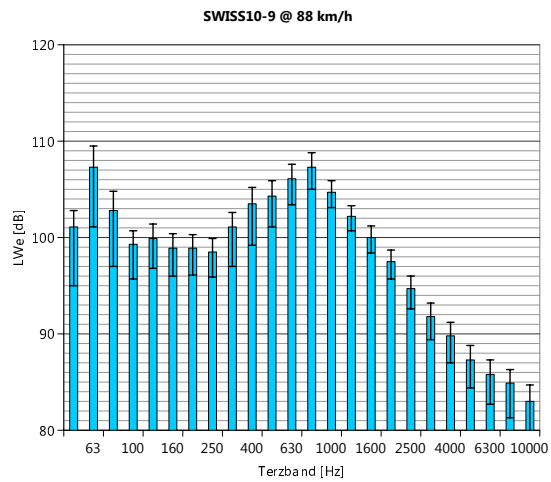
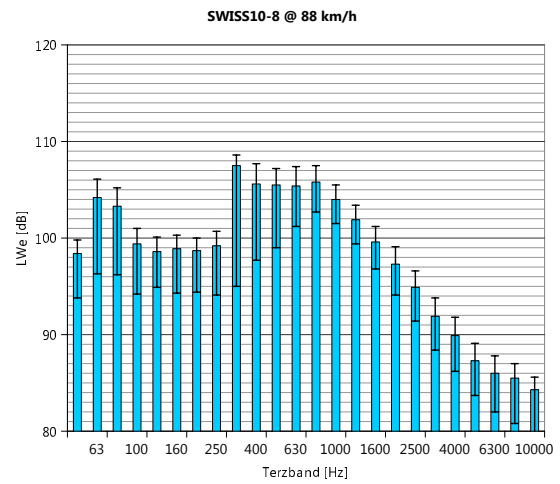
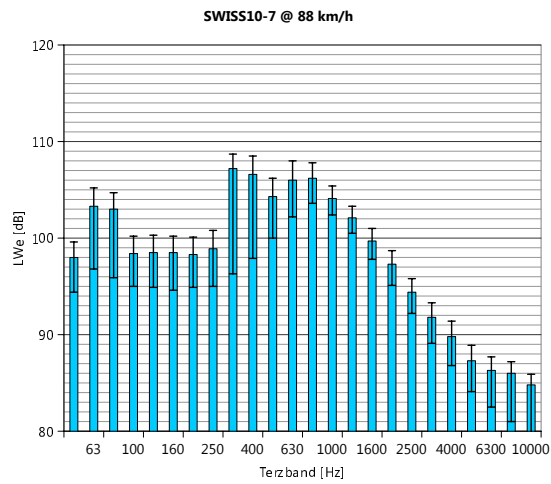


Abbildung B.22: In den jeweiligen repräsentativen Geschwindigkeitsklassen energetisch gemittelte Schallleistungs-Terzbandspektren für die SWISS10-Kategorien 7...10 am Standort Moleno und den Mikrofonkanal 1 (Richtung Süden). Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den arithmetischen Pegelmittelwert auf.

B.2.4 Moleno - Mikrofonkanal 2 (Richtung Norden)

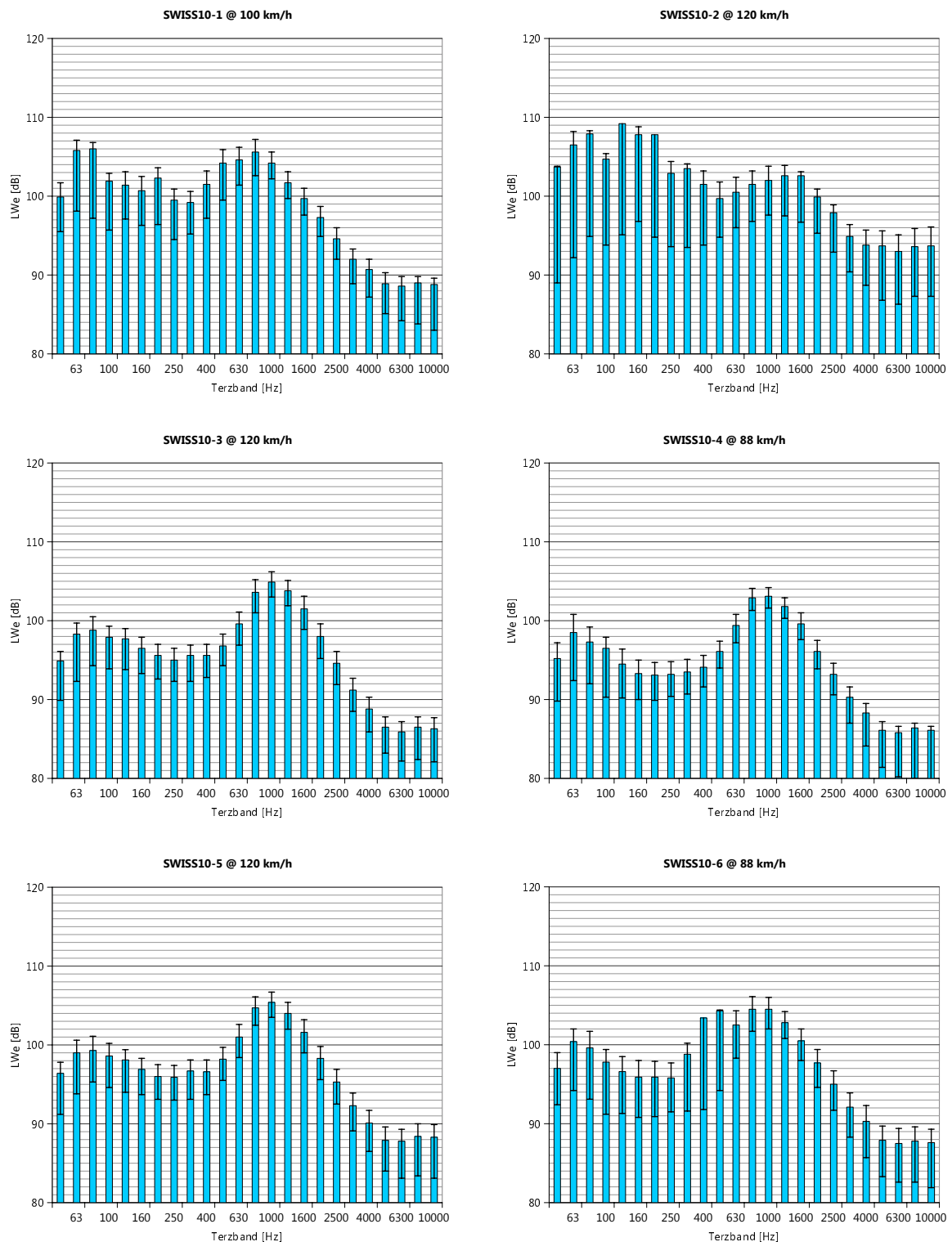


Abbildung B.23: In den jeweiligen repräsentativen Geschwindigkeitsklassen energetisch gemittelte Schallleistungs-Terzbandspektren für die SWISS10-Kategorien 1..6 am Standort Moleno und den Mikrofonkanal 2 (Richtung Norden). Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den arithmetischen Pegelmittelwert auf.

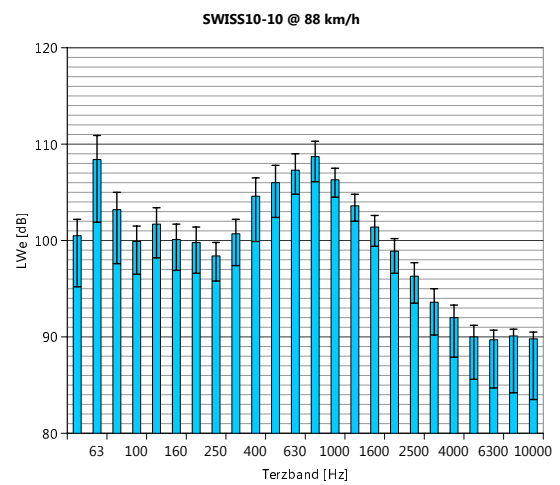
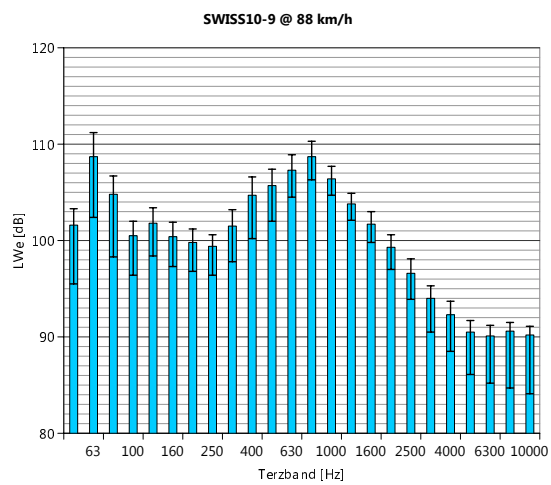
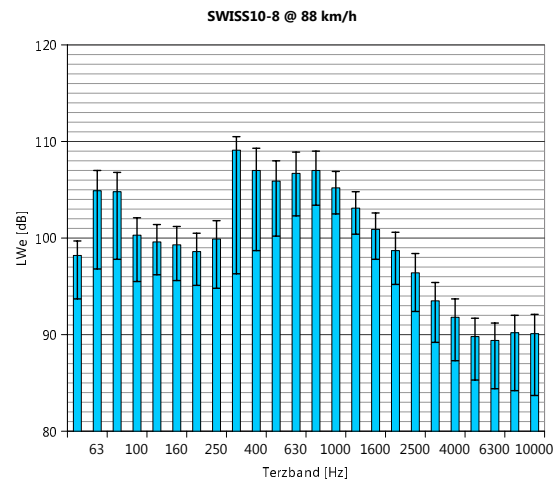
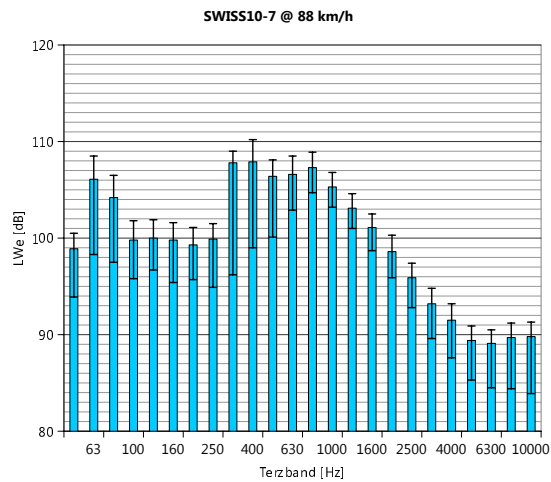


Abbildung B.24: In den jeweiligen repräsentativen Geschwindigkeitsklassen energetisch gemittelte Schallleistungs-Terzbandspektren für die SWISS10-Kategorien 7...10 am Standort Moleno und den Mikrofonkanal 2 (Richtung Norden). Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den arithmetischen Pegelmittelwert auf.

B.2.5 Reiden - Mikrofonkanal 1 (Richtung Süden)

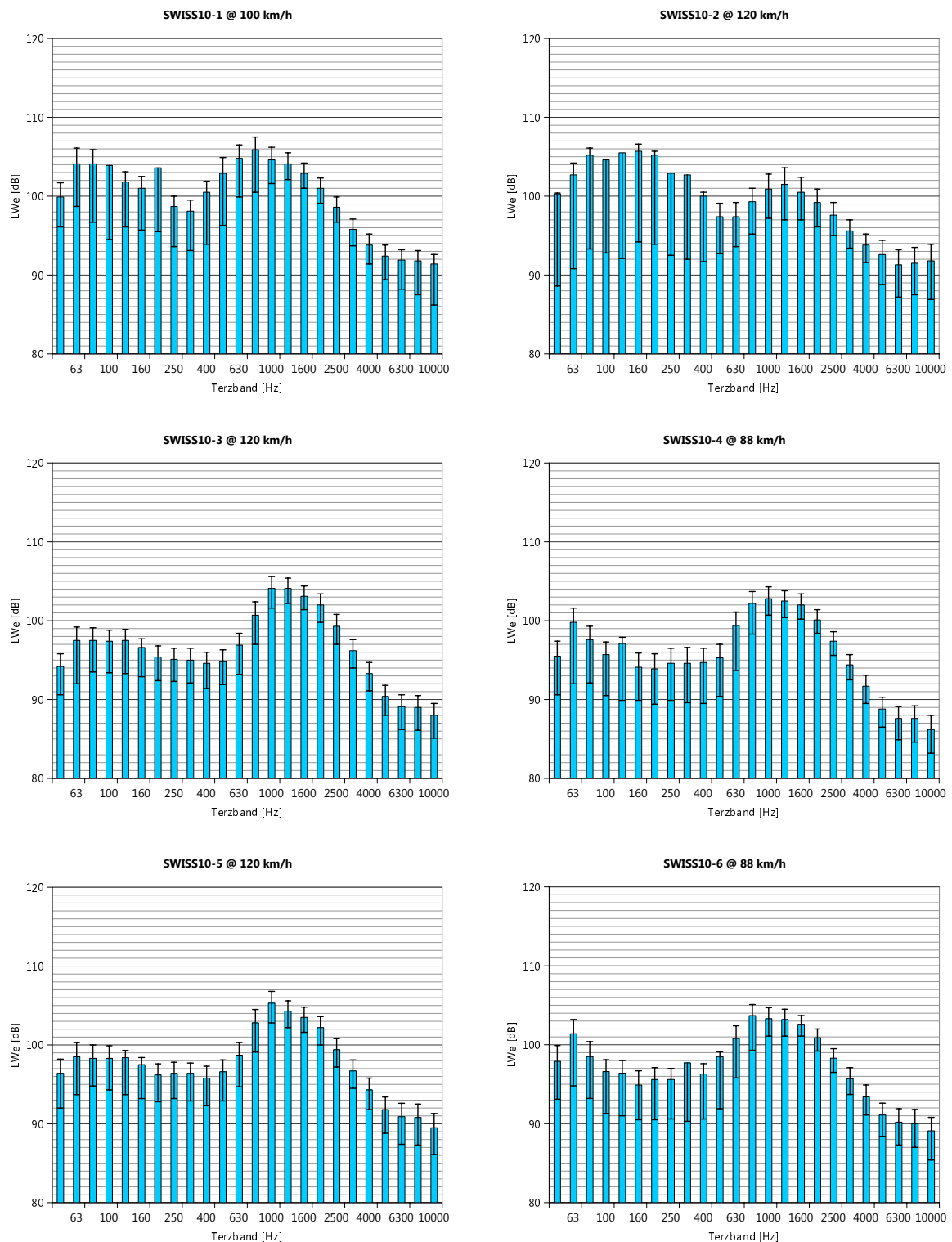


Abbildung B.25: In den jeweiligen repräsentativen Geschwindigkeitsklassen energetisch gemittelte Schallleistungs-Terzbandspektren für die SWISS10-Kategorien 1...6 am Standort Reiden und den Mikrofonkanal 1 (Richtung Süden). Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den arithmetischen Pegelmittelwert auf.

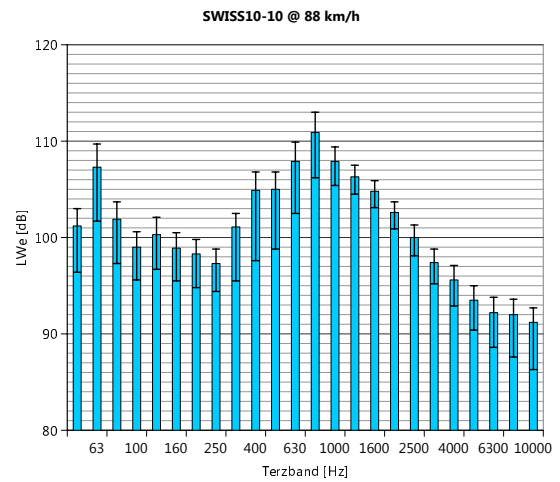
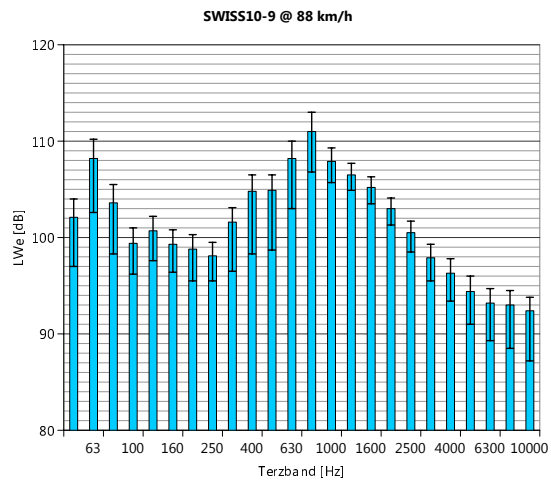
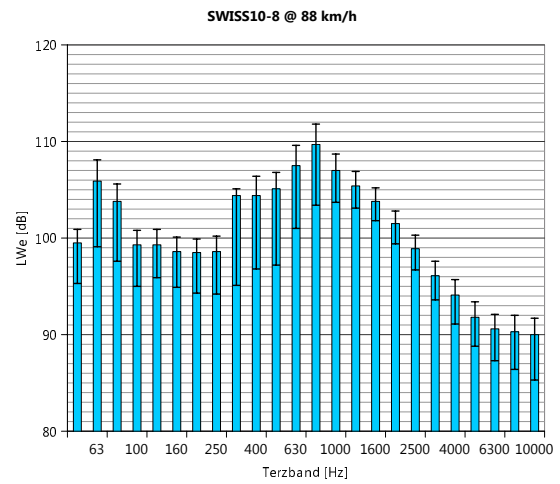
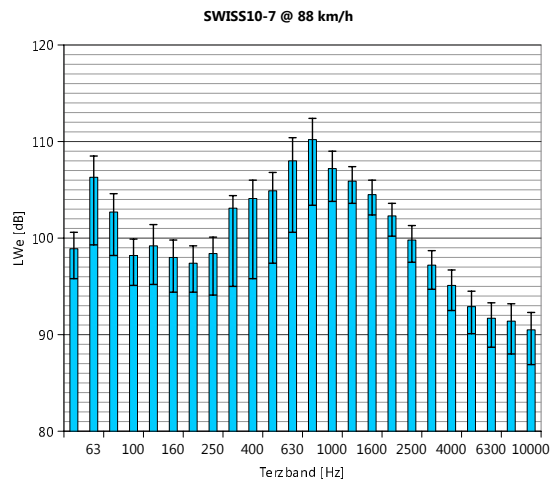


Abbildung B.26: In den jeweiligen repräsentativen Geschwindigkeitsklassen energetisch gemittelte Schallleistungs-Terzbandspektren für die SWISS10-Kategorien 7...10 am Standort Reiden und den Mikrofonkanal 1 (Richtung Süden). Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den arithmetischen Pegelmittelwert auf.

B.2.6 Reiden - Mikrofonkanal 2 (Richtung Norden)

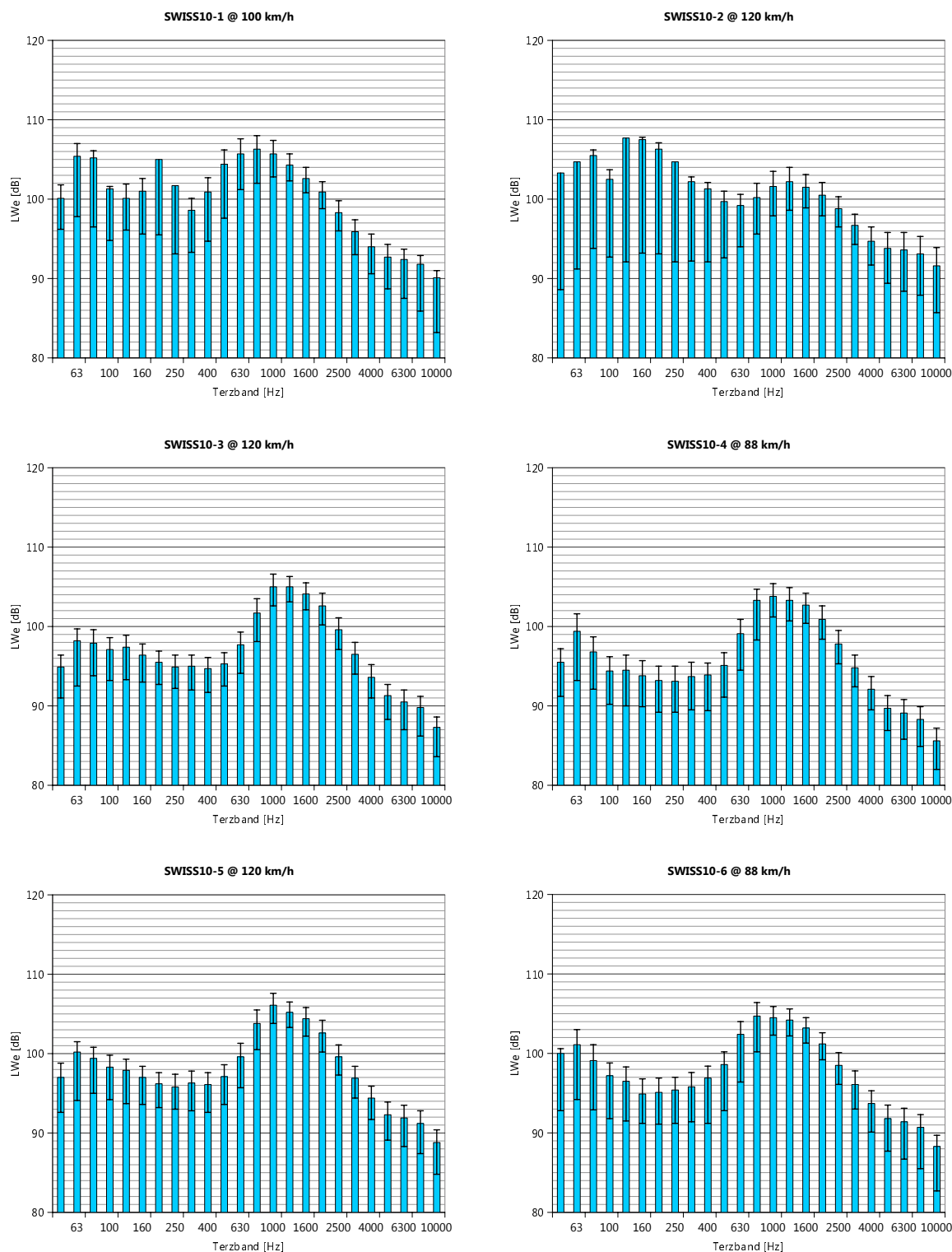


Abbildung B.27: In den jeweiligen repräsentativen Geschwindigkeitsklassen energetisch gemittelte Schallleistungs-Terzbandspektren für die SWISS10-Kategorien 1...6 am Standort Reiden und den Mikrofonkanal 2 (Richtung Norden). Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den arithmetischen Pegelmittelwert auf.

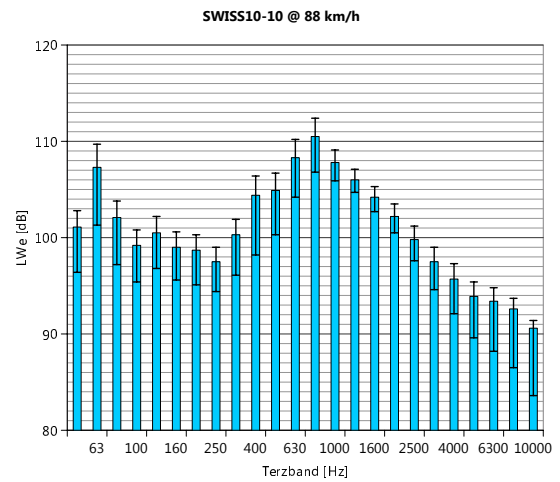
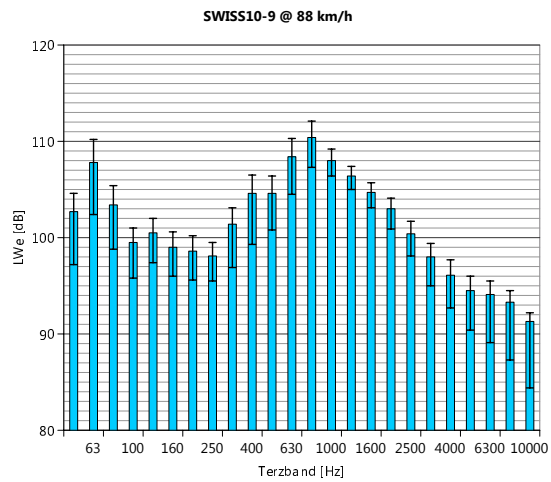
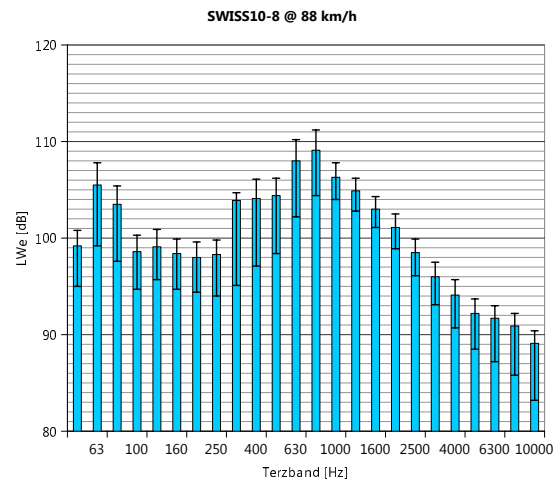
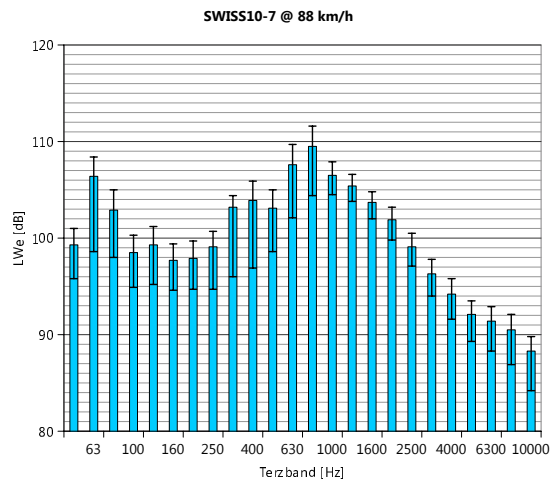


Abbildung B.28: In den jeweiligen repräsentativen Geschwindigkeitsklassen energetisch gemittelte Schallleistungs-Terzbandspektren für die SWISS10-Kategorien 7...10 am Standort Reiden und den Mikrofonkanal 2 (Richtung Norden). Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den arithmetischen Pegelmittelwert auf.

B.2.7 Rothenbrunnen - Mikrofonkanal 1 (Richtung Süden)

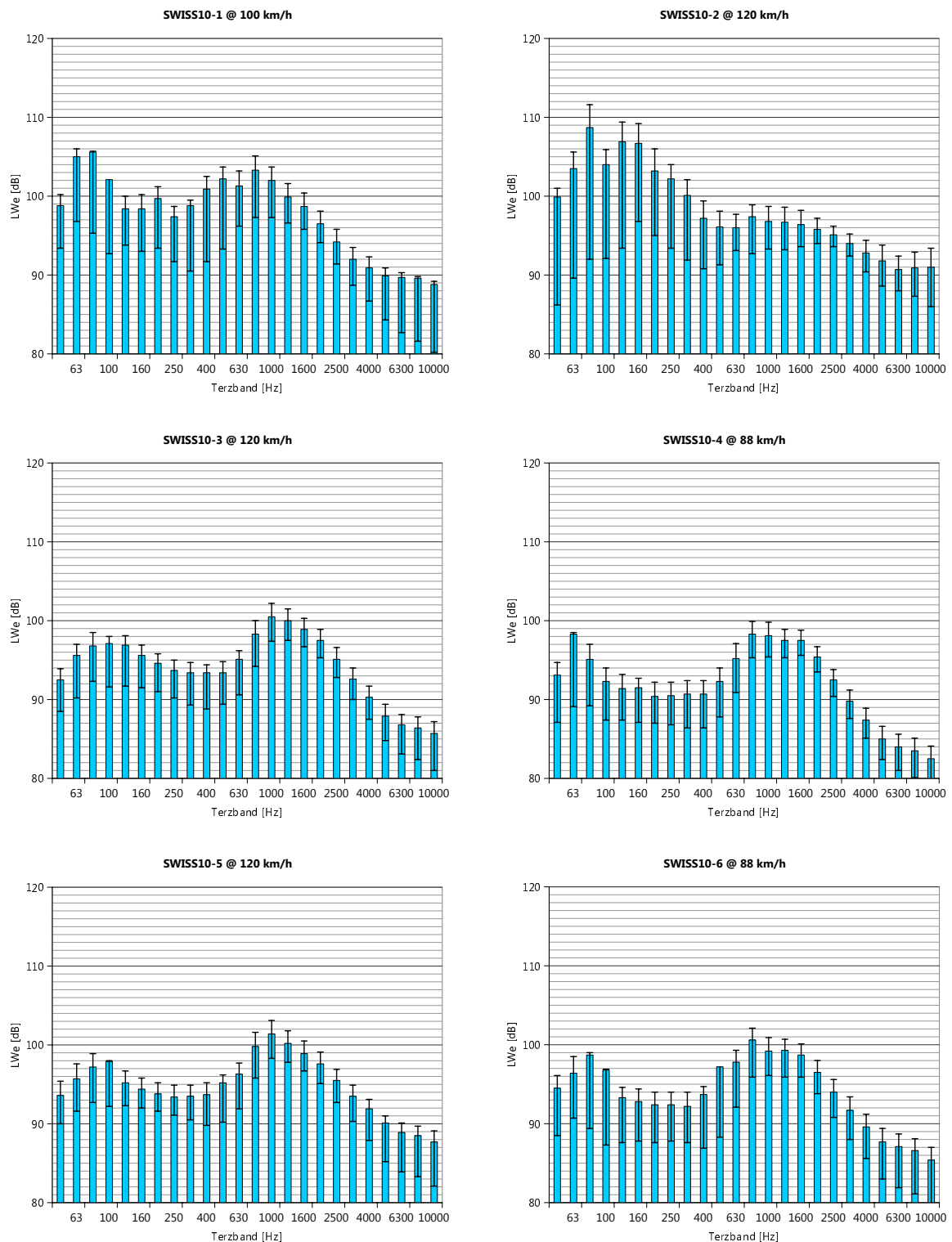


Abbildung B.29: In den jeweiligen repräsentativen Geschwindigkeitsklassen energetisch gemittelte Schallleistungs-Terzbandspektren für die SWISS10-Kategorien 1..6 am Standort Rothenbrunnen und den Mikrofonkanal 1 (Richtung Süden). Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den arithmetischen Pegelmittelwert auf.

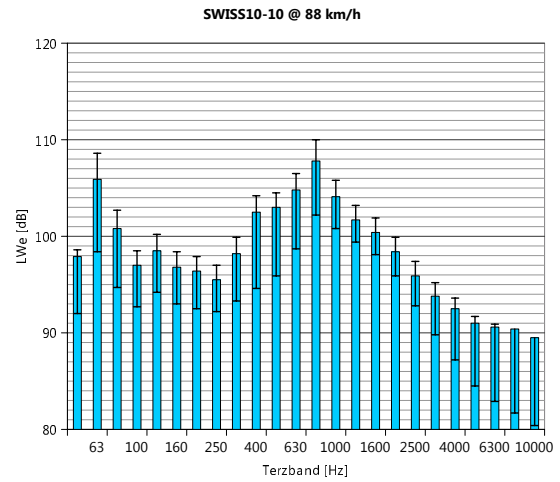
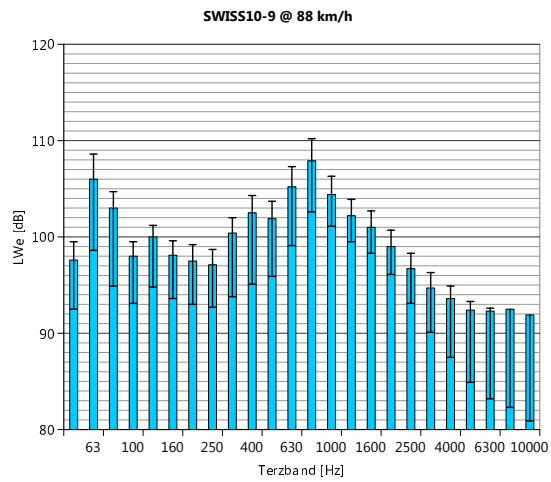
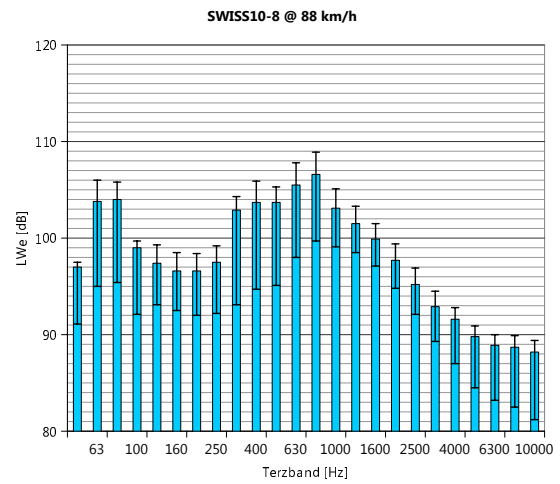
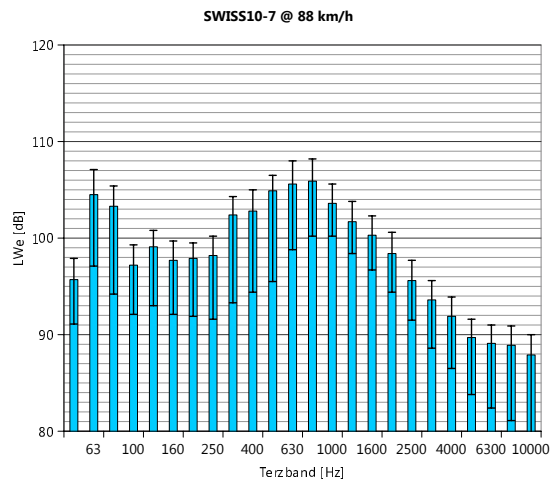


Abbildung B.30: In den jeweiligen repräsentativen Geschwindigkeitsklassen energetisch gemittelte Schallleistungs-Terzbandspektren für die SWISS10-Kategorien 7...10 am Standort Rothenbrunnen und den Mikrofonkanal 1 (Richtung Süden). Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den arithmetischen Pegelmittelwert auf.

B.2.8 Rothenbrunnen - Mikrofonkanal 2 (Richtung Norden)

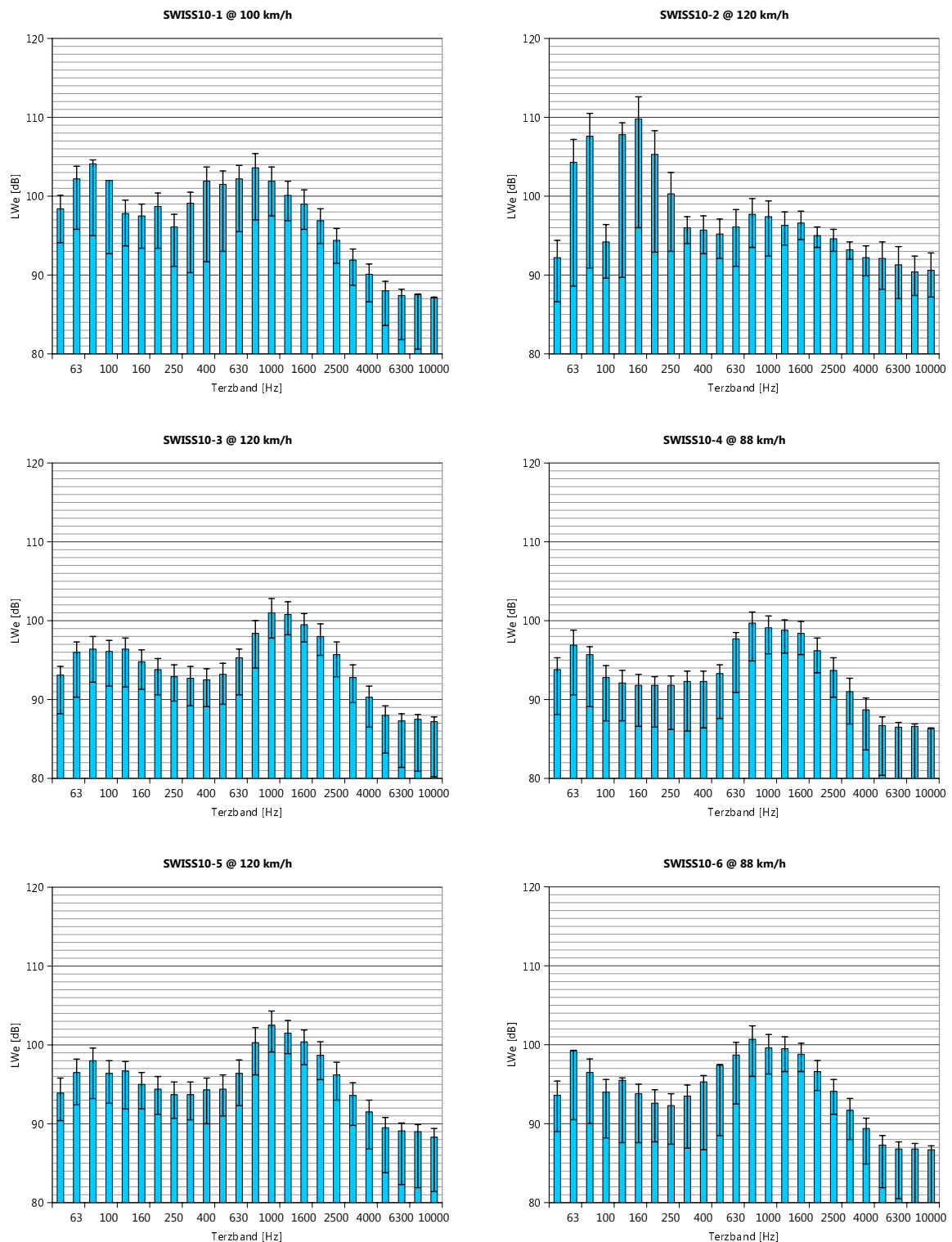


Abbildung B.31: In den jeweiligen repräsentativen Geschwindigkeitsklassen energetisch gemittelte Schallleistungs-Terzbandspektren für die SWISS10-Kategorien 1..6 am Standort Rothenbrunnen und den Mikrofonkanal 2 (Richtung Norden). Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den arithmetischen Pegelmittelwert auf.

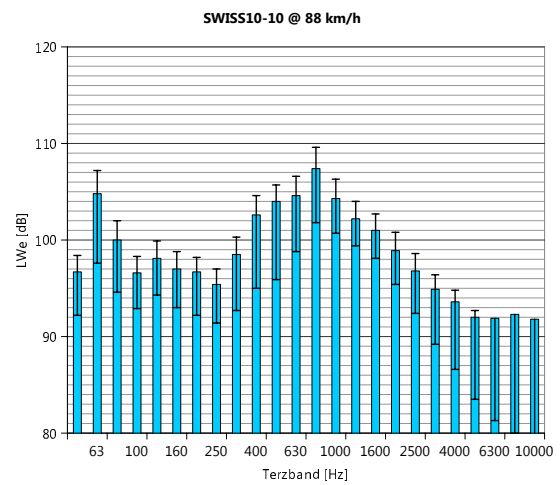
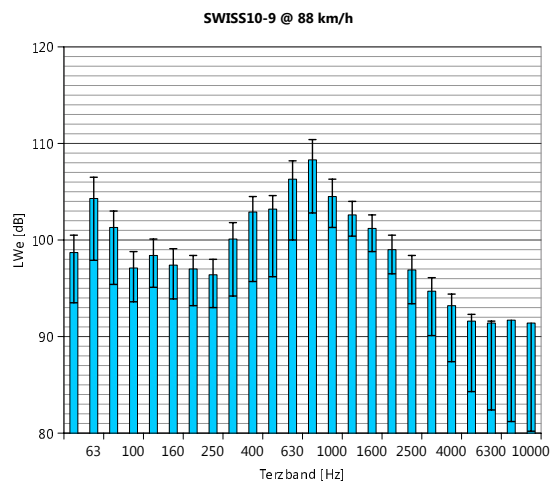
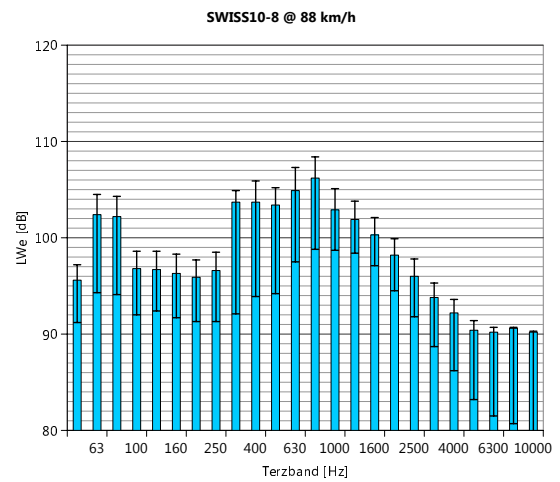
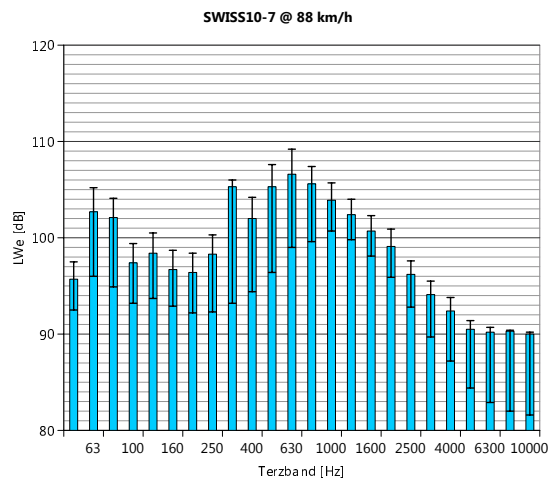


Abbildung B.32: In den jeweiligen repräsentativen Geschwindigkeitsklassen energetisch gemittelte Schallleistungs-Terzbandspektren für die SWISS10-Kategorien 7...10 am Standort Rothenbrunnen und den Mikrophonkanal 2 (Richtung Norden). Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den arithmetischen Pegelmittelwert auf.

C Auswertungen Kombinierbarkeit

Reifen- und Belagswirkung

C.1 Resultate lineare Regression

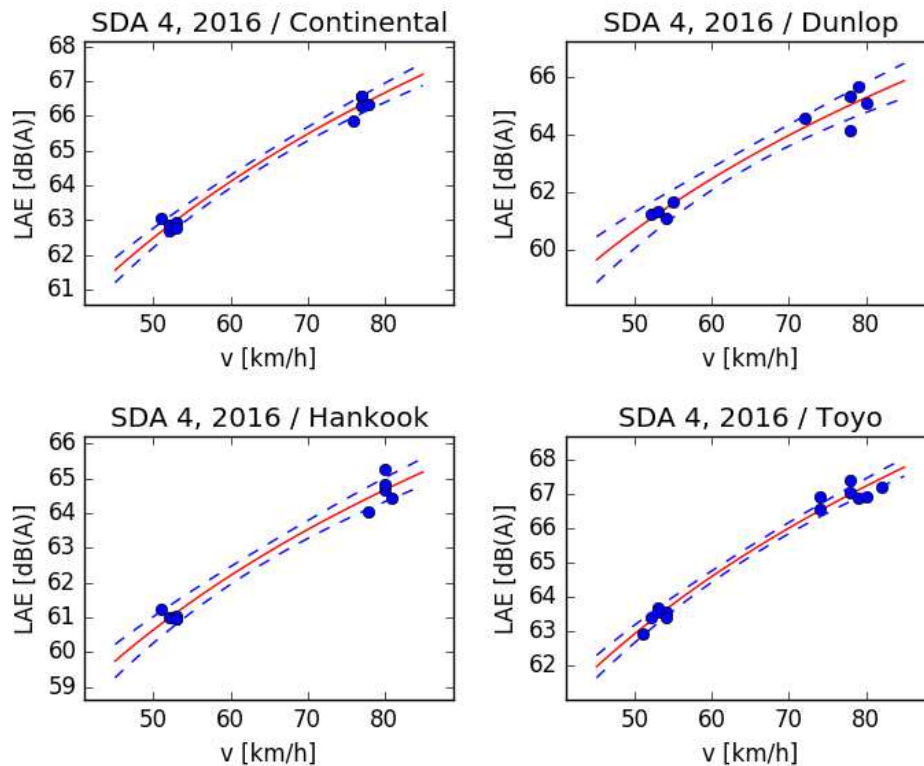


Abbildung C.1: Messpunkte (blau) und lineare Regression (rot) für den Standort Küttigen (SDA 4) und alle vier Reifen. Die blau gestrichelten Kurven geben das 95%-Konfidenzintervall an.

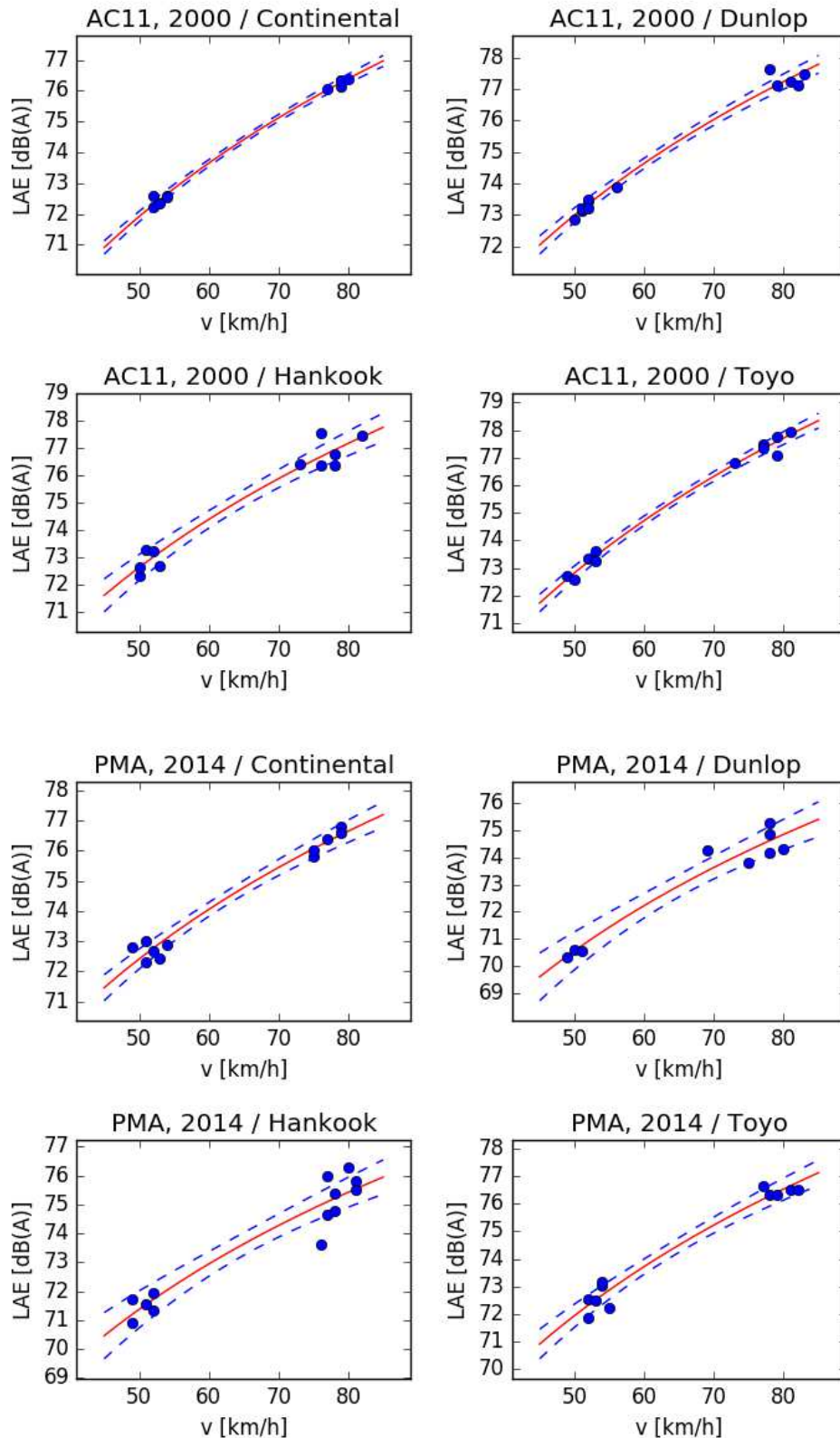


Abbildung C.2: Messpunkte (blau) und lineare Regression (rot) für die Standorte Magden (AC 11) und Mellikon (PMA) und alle vier Reifen. Die blau gestrichelten Kurven geben das 95%-Konfidenzintervall an.

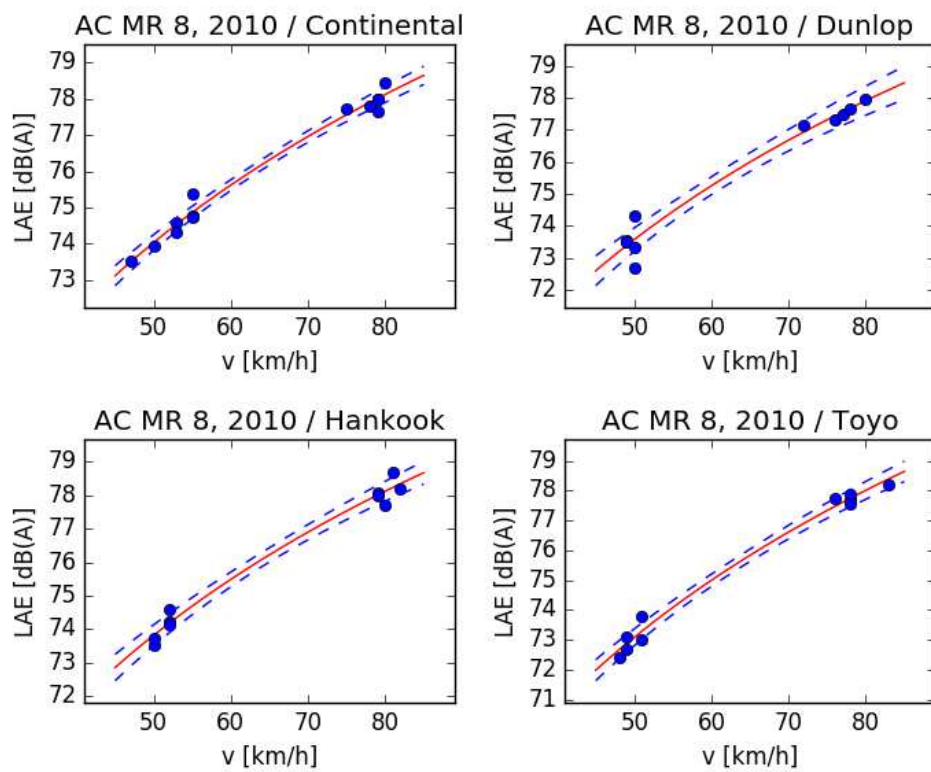


Abbildung C.3: Messpunkte (blau) und lineare Regression (rot) für den Standort Rümikon (AC MR 8) und alle vier Reifen. Die blau gestrichelten Kurven geben das 95%-Konfidenzintervall an.

C.2 Spektrale Resultate pro Reifen und Belag

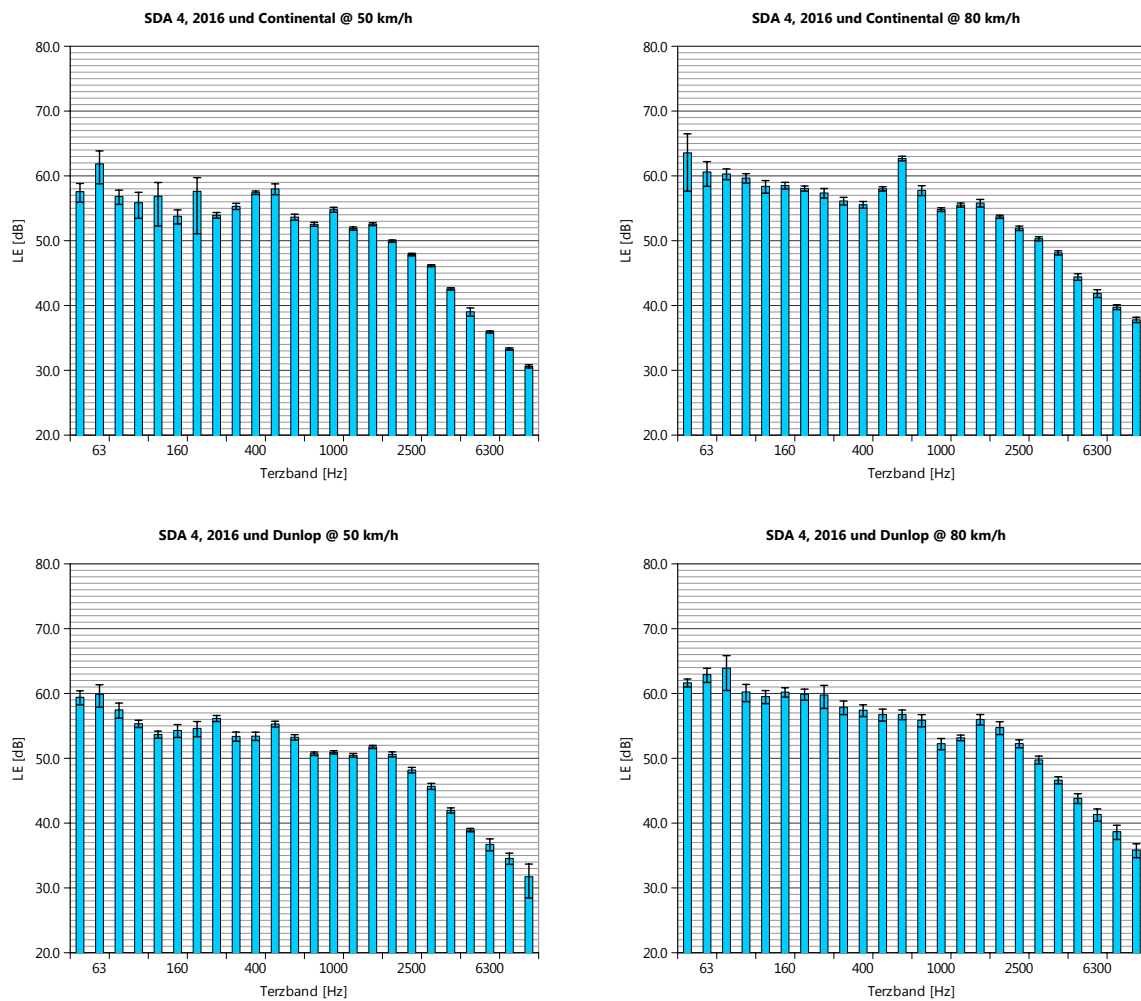


Abbildung C.4: Energetisch gemittelte Ereignispegel-Terzbandspektren für die Reifen Continental und Dunlop am Standort Küttigen (SDA 4, 2016). Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den arithmetischen Pegelmittelwert auf.

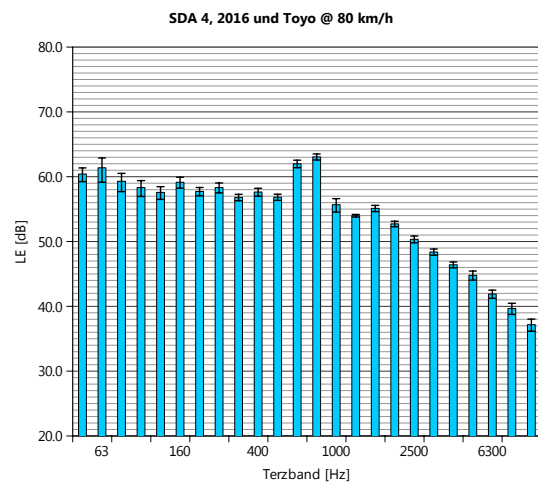
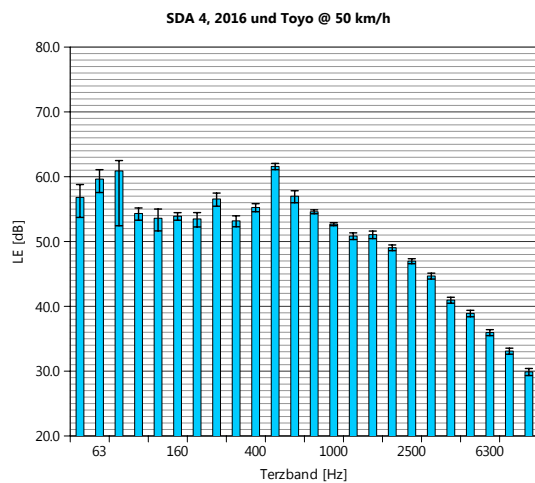
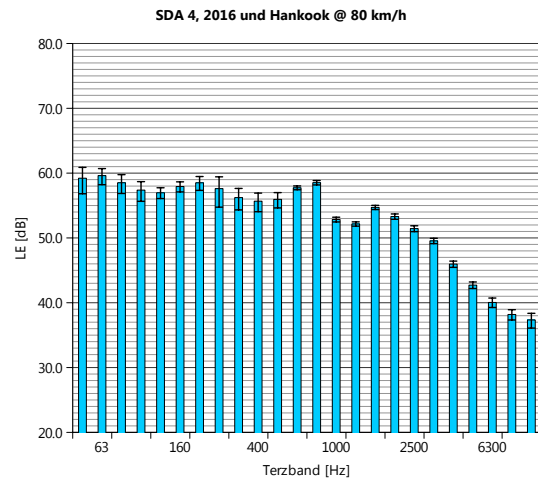
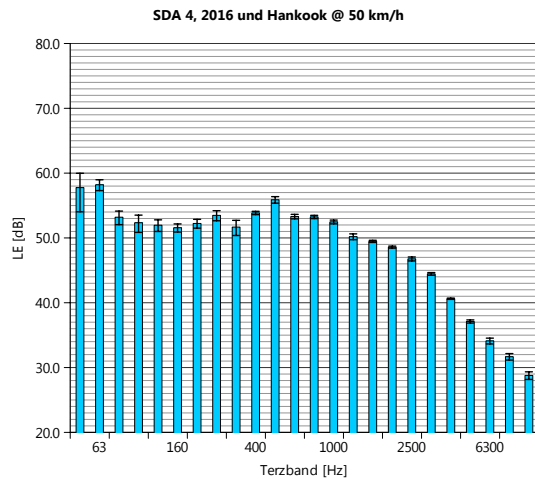


Abbildung C.5: Energetisch gemittelte Ereignispegel-Terzbandspektren für die Reifen Hankook und Toyo am Standort Küttigen (SDA 4, 2016). Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den arithmetischen Pegelmittelwert auf.

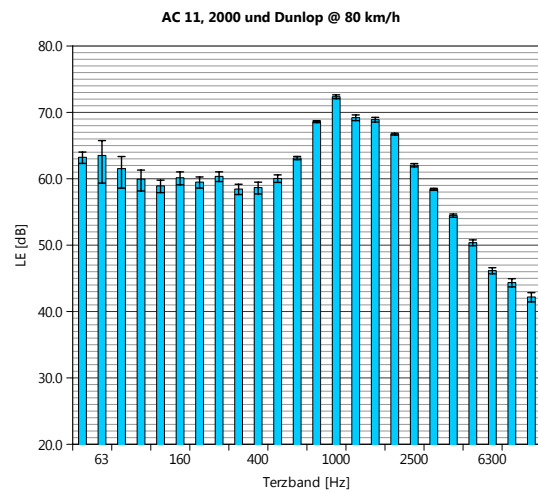
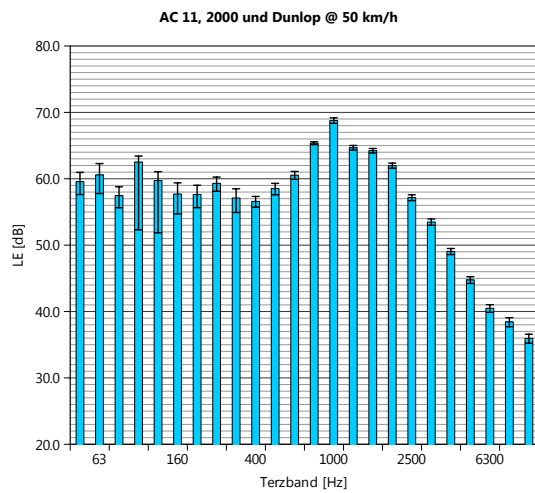
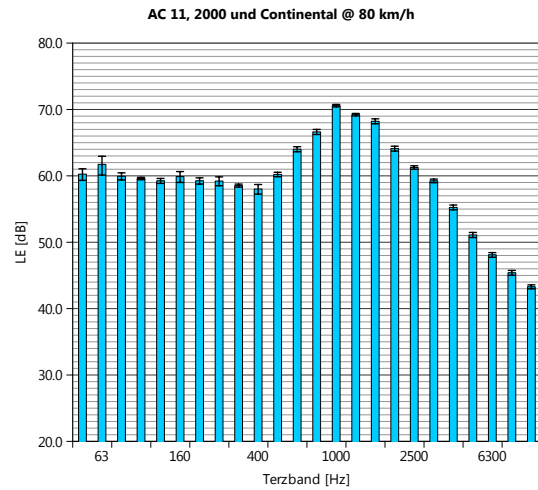
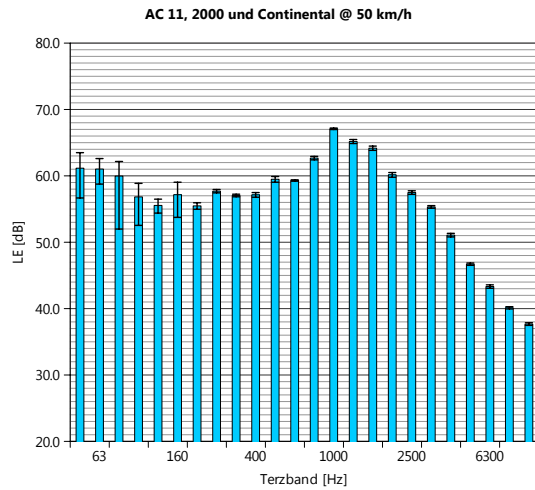


Abbildung C.6: Energetisch gemittelte Ereignispegel-Terzbandspektren für die Reifen Continental und Dunlop am Standort Magden (AC 11, 2000). Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den arithmetischen Pegelmittelwert auf.

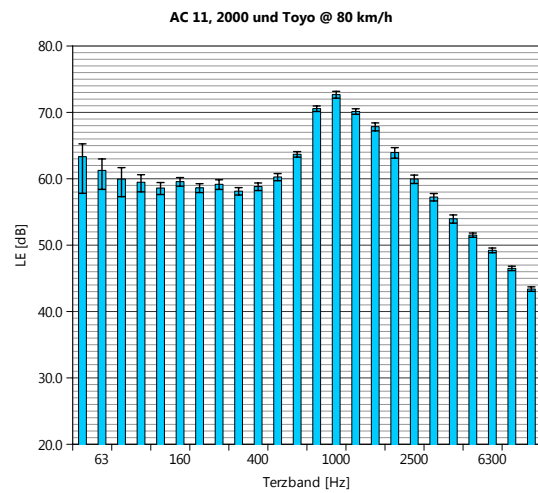
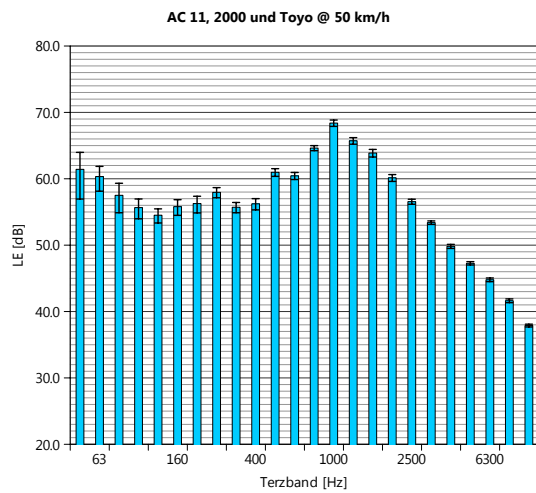
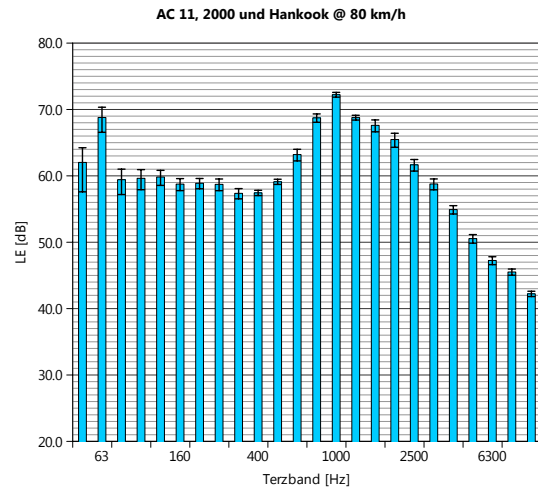
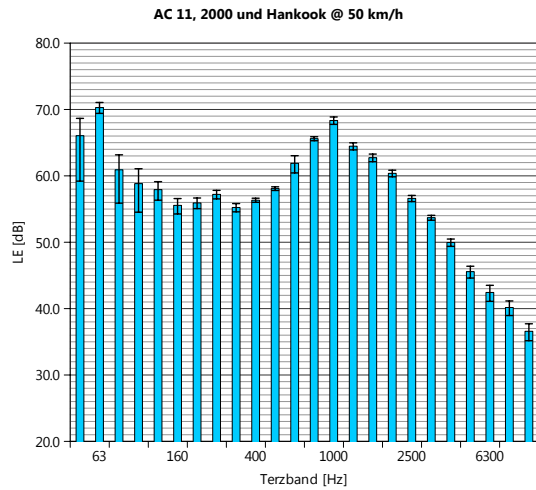


Abbildung C.7: Energetisch gemittelte Ereignispegel-Terzbandspektren für die Reifen Hankook und Toyo am Standort Magden (AC 11, 2000). Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den arithmetischen Pegelmittelwert auf.

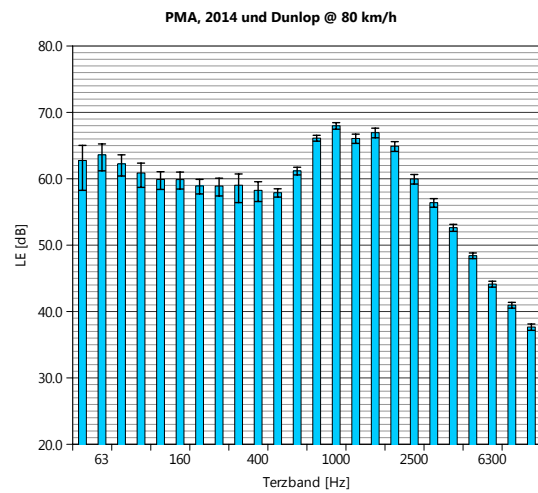
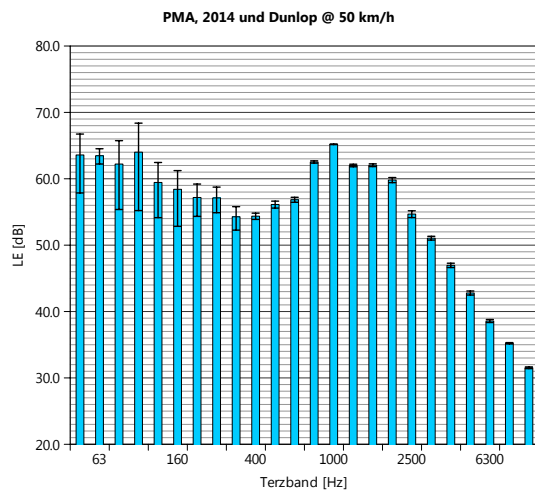
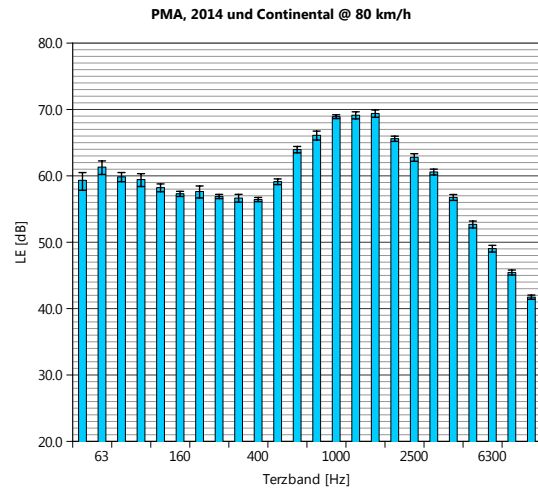
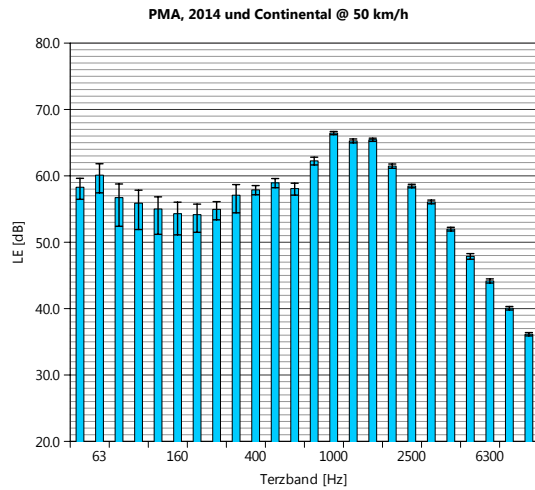


Abbildung C.8: Energetisch gemittelte Ereignispegel-Terzbandspektren für die Reifen Continental und Dunlop am Standort Mellikon (PMA, 2014). Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den arithmetischen Pegelmittelwert auf.

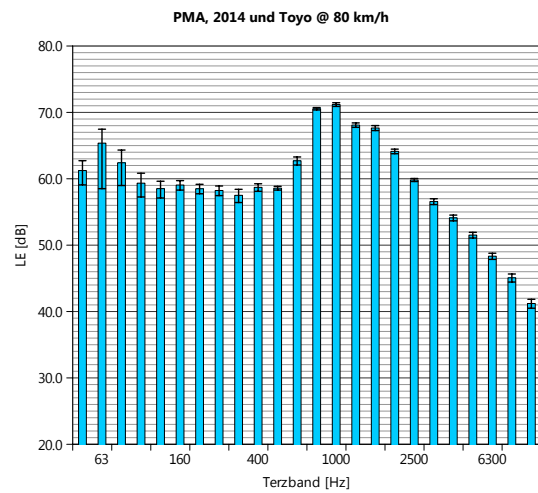
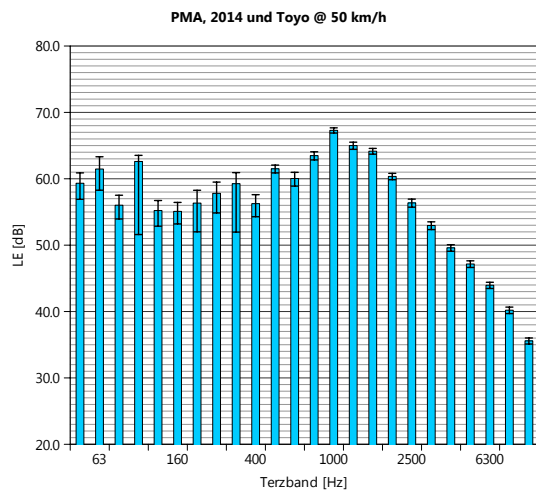
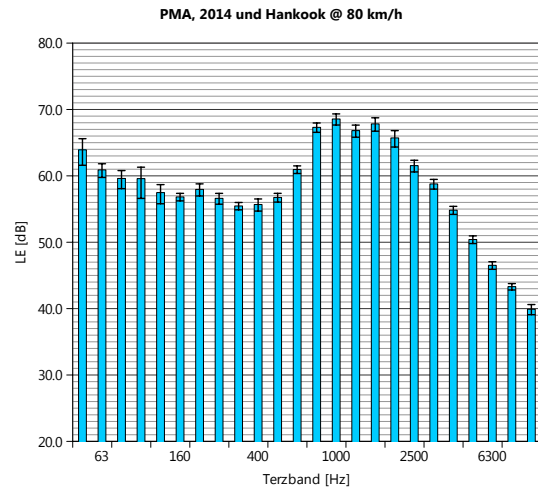
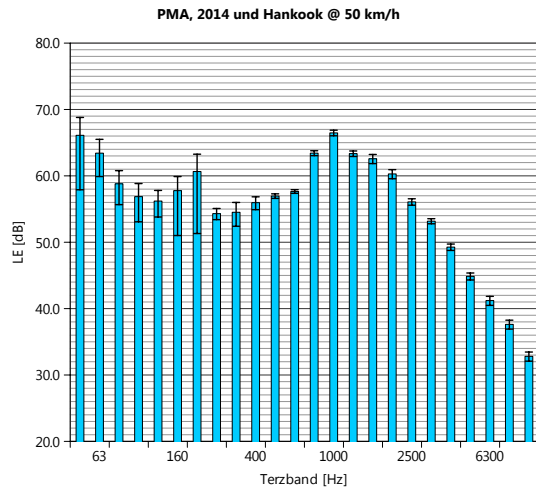


Abbildung C.9: Energetisch gemittelte Ereignispegel-Terzbandspektren für die Reifen Hankook und Toyo am Standort Mellikon (PMA, 2014). Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den arithmetischen Pegelmittelwert auf.

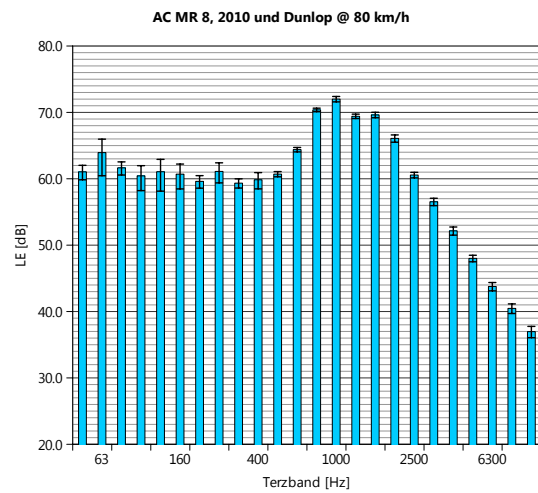
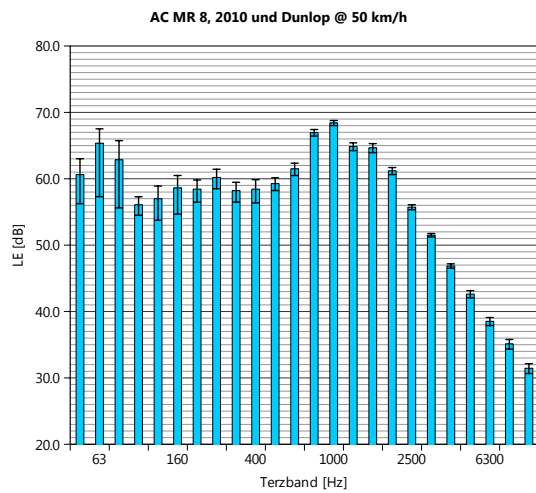
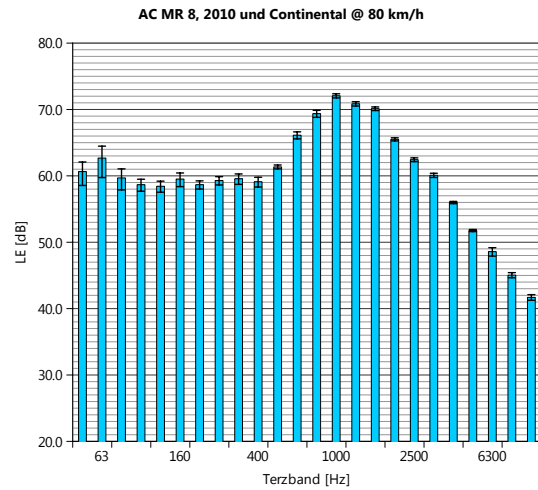
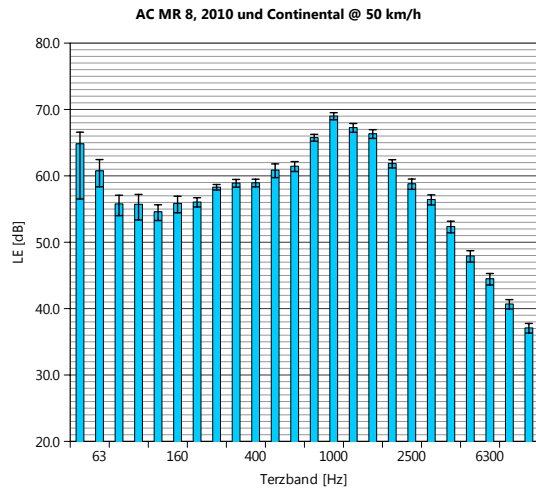


Abbildung C.10: Energetisch gemittelte Ereignispegel-Terzbandspektren für die Reifen Continental und Dunlop am Standort Rümikon (AC MR 8, 2010). Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den arithmetischen Pegelmittelwert auf.

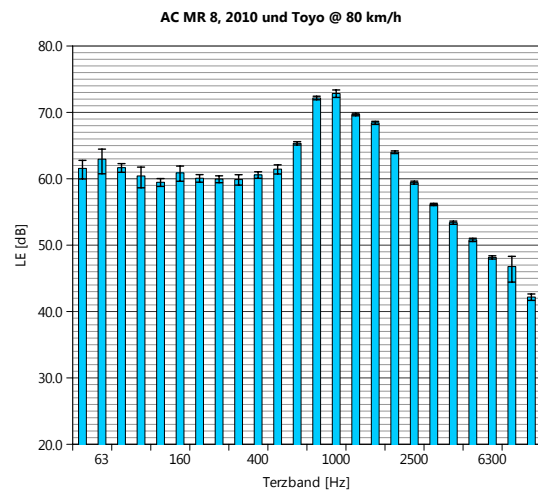
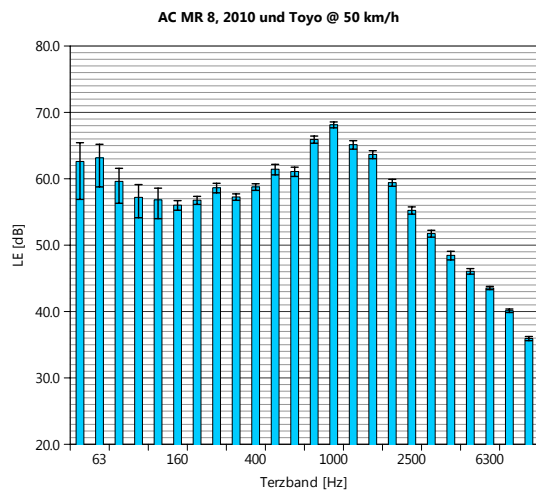
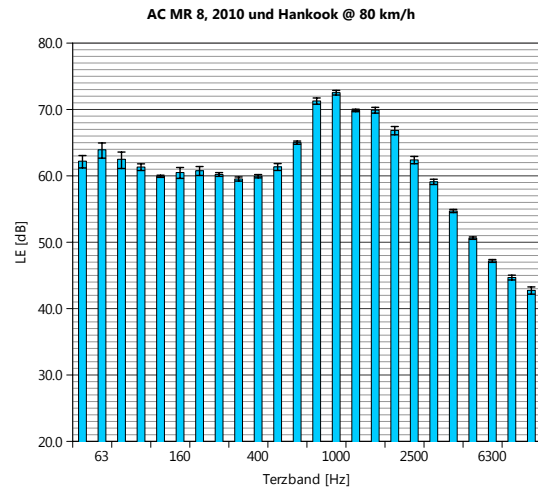
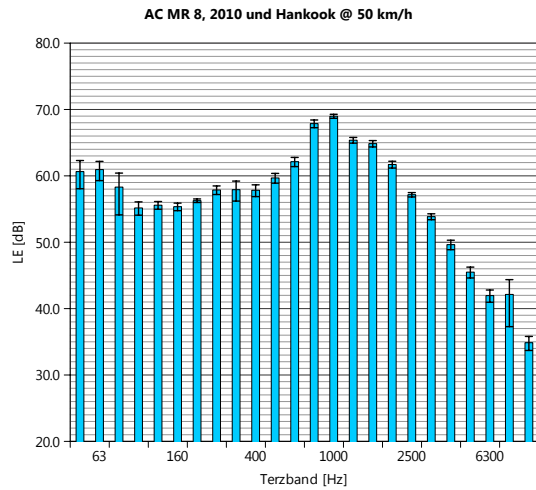


Abbildung C.11: Energetisch gemittelte Ereignispegel-Terzbandspektren für die Reifen Hankook und Toyo am Standort Rümikon (AC MR 8, 2010). Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den arithmetischen Pegelmittelwert auf.

C.3 Spektrale Resultate der Beläge

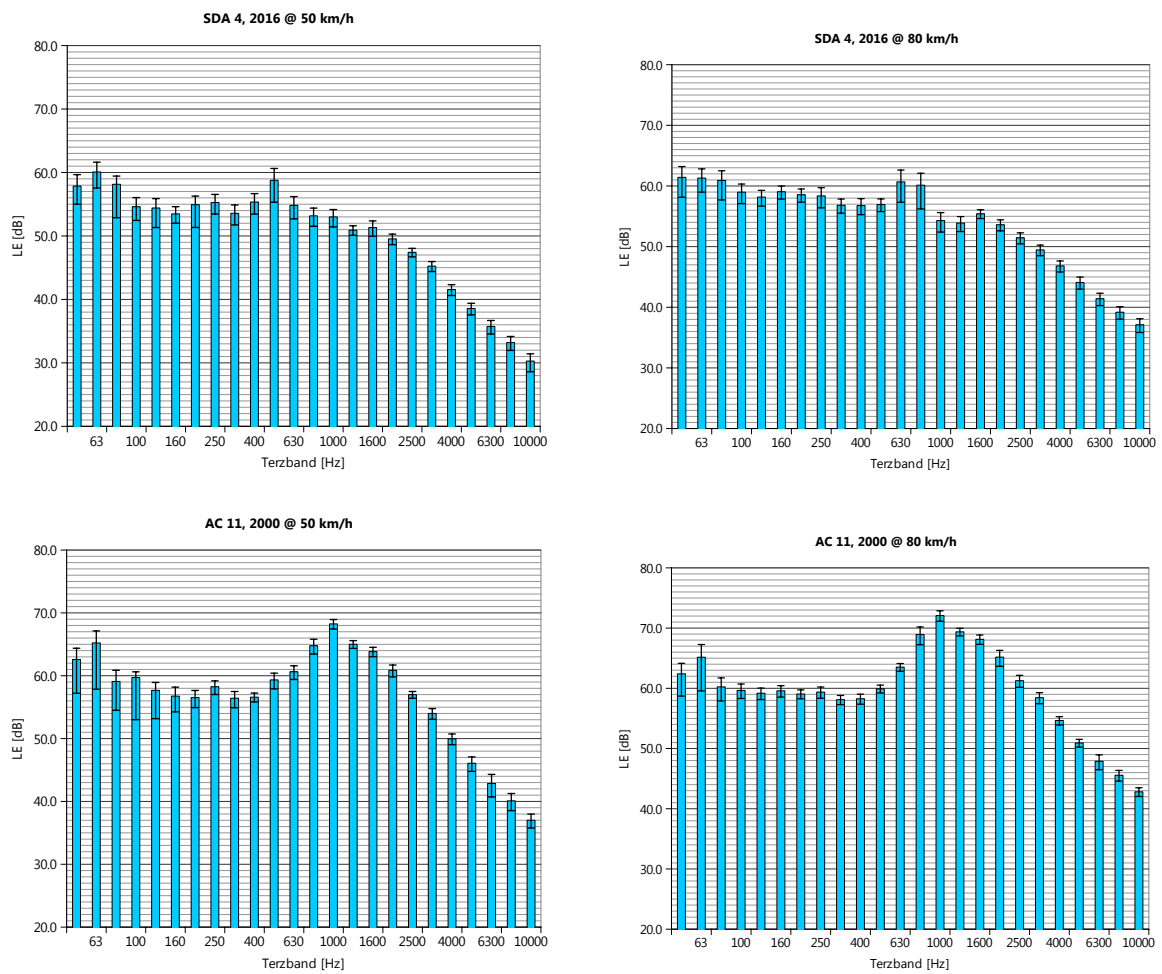


Abbildung C.12: Energetisch gemittelte Ereignispegel-Terzbandspektren über alle Reifen für die Standorte Küttigen (SDA 4, 2016) und Magden (AC 11, 2000). Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den arithmetischen Pegelmittelwert auf.

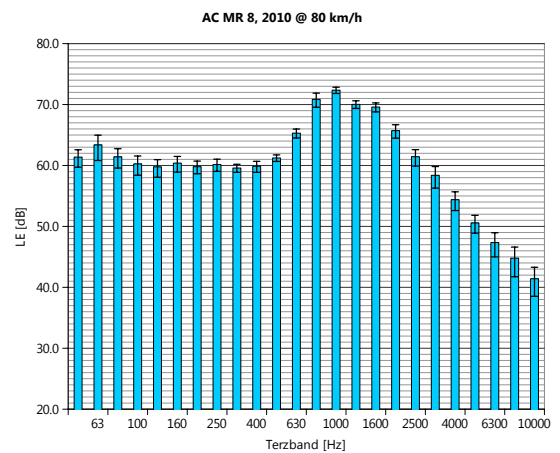
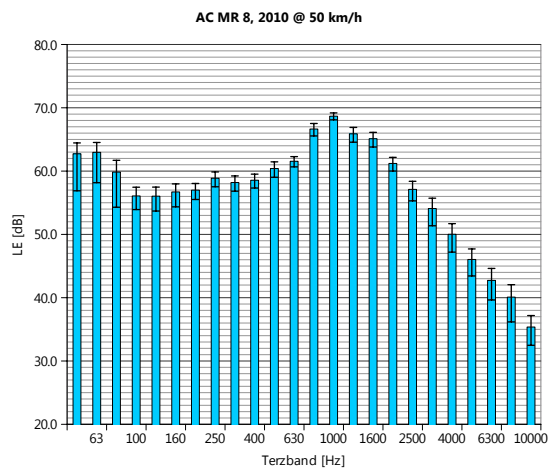
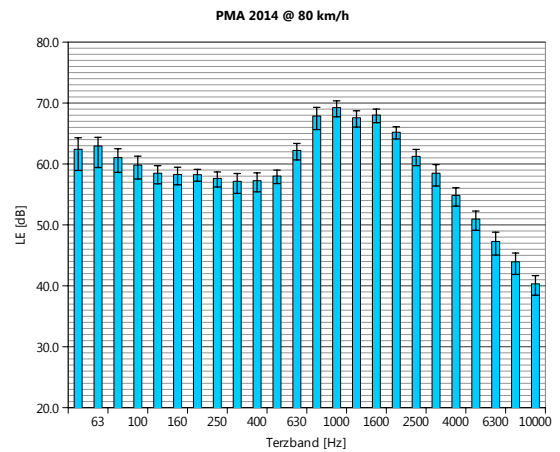
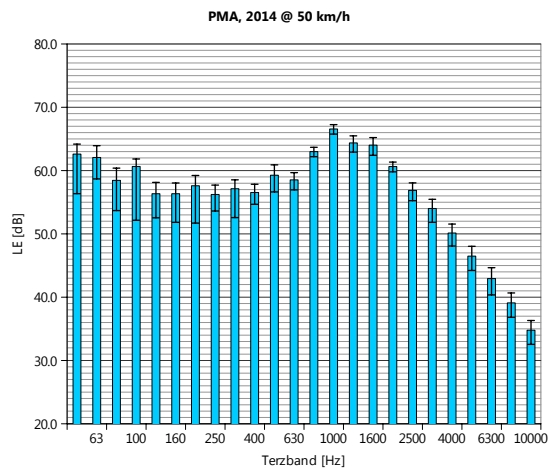


Abbildung C.13: Energetisch gemittelte Ereignispegel-Terzbandspektren über alle Reifen für die Standorte Mellikon (PMA, 2014) und Rümikon (AC MR 8, 2010). Die Fehlerbalken spannen ± 1 Standardabweichung um den arithmetischen Pegelmittelwert auf.

D Auswertungen zur gefahrenen Geschwindigkeit

Die für die Festlegung der durchschnittlichen Verkehrsmengen im SWISS10-Konverter verwendeten Verkehrszählerdaten umfassten teilweise auch Geschwindigkeitsangaben. Die Tabelle D.1 stellt hier informativ die durchschnittlich gefahrenen Geschwindigkeiten v_m , getrennt für die Nacht (22.00 - 06.00 Uhr) und den Tag (06.00 - 22.00 Uhr) zusammen, die Tabelle D.2 zeigt die Werte in Prozent der signalisierten Geschwindigkeit und Tabelle D.3 listet die Streuungen auf. Die Spalte *Anz* bezeichnet die für die Statistik zur Verfügung gestandenen Anzahl Standorte und *Code* beschreibt gemäss dem SWISS10-Konverter den Strassentyp, die Anzahl Fahrspuren (für HLS), die Fahrpurlage (sofern mehr als 2 Fahrspuren) sowie die signalisierte Geschwindigkeit.

Anz	Code	Zeit	cat1	cat2	cat3	cat4	cat5	cat6	cat7	cat8	cat9	cat10
11	SS-30	tags			30					27	27	
11	SS-30	nachts			31					31	31	
60	SS-50	tags			36					34	34	
60	SS-50	nachts			38					36	36	
17	VS-50	tags			38					36	36	
17	VS-50	nachts			41					41	41	
16	VS-60	tags			46					44	44	
16	VS-60	nachts			50					49	49	
4	HVS-50	tags	44	49	48	45	47	45	46	46	43	45
4	HVS-50	nachts	42	51	49	46	49	46	45	47	43	46
4	HVS-60	tags	52	59	57	54	57	54	55	55	52	54
4	HVS-60	nachts	51	61	59	55	59	55	54	57	52	55
4	HVS-80	tags	72	76	76	72	74	72	72	72	72	71
4	HVS-80	nachts	73	78	78	73	77	74	73	74	72	72
5	HLS-2-80	tags	76	77	76	74	76	75	75	76	75	75
5	HLS-2-80	nachts	77	80	79	76	79	76	78	78	78	77
10	HLS-2-100	tags	91	95	94	87	92	85	86	86	80	82
10	HLS-2-100	nachts	92	96	97	88	95	85	87	85	83	84
5	HLS-4-N-80	tags	71	75	72	70	73	70	70	71	70	70
5	HLS-4-U-80	tags	74	79	79	75	79	74	75	76	71	73
5	HLS-4-N-80	nachts	75	80	78	73	78	74	75	76	75	75
5	HLS-4-U-80	nachts	77	82	83	76	83	77	76	76	75	75
16	HLS-4-N-100	tags	86	93	92	83	91	82	83	84	81	81
16	HLS-4-U-100	tags	89	95	95	69	95	68	66	87	76	80
16	HLS-4-N-100	nachts	88	94	94	84	93	83	85	85	83	83
16	HLS-4-U-100	nachts	86	96	95	65	95	63	63	82	78	80
62	HLS-4-N-120	tags	93	112	112	89	107	88	86	86	86	86
62	HLS-4-U-120	tags	95	116	120	99	117	95	86	86	84	85
62	HLS-4-N-120	nachts	93	113	113	90	110	89	87	86	86	85
62	HLS-4-U-120	nachts	92	117	121	90	119	96	84	83	87	85

Tabelle D.1: Durchschnittliche Geschwindigkeiten in den SWISS10-Kategorien in km/h.

Anz	Code	Zeit	cat1	cat2	cat3	cat4	cat5	cat6	cat7	cat8	cat9	cat10
11	SS-30	tags			99					91	91	
11	SS-30	nachts			105					104	104	
60	SS-50	tags			72					67	67	
60	SS-50	nachts			77					72	72	
33	VS-50-60	tags			76					73	73	
33	VS-50-60	nachts			83					82	82	
8	HVS-50-60	tags	87	98	95	90	94	91	91	91	86	90
8	HVS-50-60	nachts	84	101	98	91	98	91	91	95	86	92
4	HVS-80	tags	90	95	94	90	93	90	90	90	90	89
4	HVS-80	nachts	91	97	97	92	97	93	91	92	90	89
5	HLS-2-80	tags	95	96	95	93	95	93	94	94	94	94
5	HLS-2-80	nachts	97	101	99	95	99	95	97	97	97	96
10	HLS-2-100	tags	91	95	94	87	92	85	86	86	80	82
10	HLS-2-100	nachts	92	96	97	88	95	85	87	85	83	84
5	HLS-4-N-80	tags	89	94	90	88	91	88	88	89	88	88
5	HLS-4-U-80	tags	93	99	98	94	99	93	93	96	89	91
5	HLS-4-N-80	nachts	93	100	97	91	97	92	93	95	94	94
5	HLS-4-U-80	nachts	96	102	104	95	104	96	95	96	94	94
16	HLS-4-N-100	tags	86	93	92	83	91	82	83	84	81	81
16	HLS-4-U-100	tags	89	95	95	69	95	68	66	87	76	80
16	HLS-4-N-100	nachts	88	94	94	84	93	83	85	85	83	83
16	HLS-4-U-100	nachts	86	96	95	65	95	63	63	82	78	80
62	HLS-4-N-120	tags	77	93	94	74	89	73	72	72	71	71
62	HLS-4-U-120	tags	80	96	100	83	97	79	72	72	70	71
62	HLS-4-N-120	nachts	77	95	94	75	92	74	72	72	71	71
62	HLS-4-U-120	nachts	77	97	101	75	100	80	70	69	72	71

Tabelle D.2: Durchschnittliche Geschwindigkeiten in den SWISS10-Kategorien in Prozent der signalisierten Geschwindigkeit.

Anz	Code	Zeit	cat1	cat2	cat3	cat4	cat5	cat6	cat7	cat8	cat9	cat10
11	SS-30	tags			12.0					13.6	13.6	
11	SS-30	nachts			11.9					20.8	20.8	
60	SS-50	tags			12.1					11.8	11.8	
60	SS-50	nachts			12.2					12.7	12.7	
33	VS-50-60	tags			15.0					19.7	19.7	
33	VS-50-60	nachts			13.1					15.8	15.8	
8	HVS-50-60	tags	9.2	7.8	5.0	7.1	6.1	8.2	9.2	8.6	8.8	11.0
8	HVS-50-60	nachts	9.5	12.0	4.9	8.3	7.4	9.2	12.1	10.6	9.9	14.1
4	HVS-80	tags	8.4	4.8	3.4	6.0	4.7	6.7	9.5	8.2	9.5	8.9
4	HVS-80	nachts	9.8	5.5	4.3	6.6	5.8	7.8	8.2	9.6	12.8	13.5
5	HLS-2-80	tags	5.0	7.2	4.1	4.8	4.4	4.8	5.0	4.7	5.4	5.5
5	HLS-2-80	nachts	4.3	6.2	3.4	4.0	3.6	3.5	3.8	3.7	5.2	5.0
10	HLS-2-100	tags	5.6	6.6	5.5	5.3	6.1	4.5	5.4	4.5	5.0	3.5
10	HLS-2-100	nachts	5.2	5.4	4.2	5.3	3.9	4.1	5.4	3.1	3.7	3.2
5	HLS-4-N-80	tags	6.5	4.7	6.2	6.6	6.4	6.5	8.6	7.1	8.3	8.2
5	HLS-4-N-80	nachts	5.7	4.0	4.3	5.3	4.9	6.4	6.4	5.1	8.0	7.8
5	HLS-4-U-80	tags	6.7	6.9	7.9	7.8	7.3	7.5	8.9	7.0	10.3	8.9
5	HLS-4-U-80	nachts	5.8	5.1	4.8	8.9	5.4	7.6	8.2	8.4	9.9	9.6
16	HLS-4-N-100	tags	5.7	9.4	6.0	5.1	5.9	4.5	5.1	4.4	4.0	4.3
16	HLS-4-N-100	nachts	4.6	9.1	4.4	5.1	4.4	4.4	3.7	2.7	2.9	2.9
16	HLS-4-U-100	tags	6.7	9.3	5.4	22.6	5.5	22.0	21.4	4.3	7.0	6.4
16	HLS-4-U-100	nachts	8.2	9.7	6.1	22.7	6.4	21.8	22.1	5.6	7.7	8.2
62	HLS-4-N-120	tags	2.0	3.7	4.6	2.2	4.6	2.1	2.0	1.4	1.6	1.5
62	HLS-4-N-120	nachts	2.2	3.3	3.0	2.0	3.4	2.0	1.8	1.2	1.5	1.5
62	HLS-4-U-120	tags	1.9	3.6	4.0	3.8	4.3	3.5	3.2	2.2	3.3	2.4
62	HLS-4-U-120	nachts	3.5	3.4	2.6	9.2	3.0	8.8	9.1	5.6	7.1	7.0

Tabelle D.3: Standardabweichungen der standortspezifischen Streuungen der durchschnittlich gefahrenen Geschwindigkeiten in den SWISS10-Kategorien in Prozent der durchschnittlichen Geschwindigkeit.

E Weibullparameter zur Charakterisierung der Abstände zwischen zwei Fahrzeugen

E.0.1 VS bzw. HVS bei signalisierter Geschwindigkeit 50 km/h

N_{spur}	α	β	μ
100	0.85	20.00	0.7
125	0.81	12.63	0.7
160	0.82	11.21	0.7
200	0.85	9.59	0.7
250	0.88	7.93	0.7
315	1.02	5.18	0.8
400	1.01	4.29	0.9
500	1.02	3.30	0.9
630	1.02	2.53	0.9
800	1.04	1.97	0.8
1000	1.04	1.60	0.8
1250	1.37	1.25	0.7
1600	1.57	1.20	0.6

Tabelle E.1: Weibullparameter zur Charakterisierung der Verteilungs-Dichtefunktion des zeitlichen Abstandes Δt zwischen zwei Nachbarfahrzeugen in Abhängigkeit der stündlichen Verkehrsmenge N_{spur} auf der betrachteten Spur einer VS bzw. HVS bei Tempo 50 km/h.

E.0.2 VS bzw. HVS bei signalisierter Geschwindigkeit 60 km/h

N_{spur}	α	β	μ
100	0.79	20.00	0.7
125	0.78	13.05	0.7
160	0.81	10.11	0.7
200	0.82	8.21	0.7
250	0.86	6.64	0.7
315	0.92	5.34	0.7
400	1.02	3.66	0.8
500	1.03	2.88	0.8
630	1.03	2.45	0.8
800	1.03	2.28	0.8
1000	1.02	2.23	0.8

Tabelle E.2: Weibullparameter zur Charakterisierung der Verteilungs-Dichtefunktion des zeitlichen Abstandes Δt zwischen zwei Nachbarfahrzeugen in Abhängigkeit der stündlichen Verkehrsmenge N_{spur} auf der betrachteten Spur einer VS bzw. HVS bei Tempo 60 km/h.

E.0.3 HVS bei signalisierter Geschwindigkeit 80 km/h

N_{spur}	α	β	μ
100	0.81	20.00	0.7
125	0.80	15.96	0.7
160	0.81	14.03	0.7
200	0.83	10.80	0.7
250	0.87	7.99	0.7
315	0.91	6.06	0.7
400	1.02	3.96	0.8
500	1.03	3.23	0.8
630	1.02	2.72	0.9
800	1.20	2.18	0.8
1000	1.40	1.93	0.7
1250	1.49	1.69	0.7

Tabelle E.3: Weibullparameter zur Charakterisierung der Verteilungs-Dichtefunktion des zeitlichen Abstandes Δt zwischen zwei Nachbarfahrzeugen in Abhängigkeit der stündlichen Verkehrsmenge N_{spur} auf der betrachteten Spur einer HVS bei Tempo 80 km/h.

E.0.4 Zweispurige HLS bei signalisierter Geschwindigkeit 100 km/h

N_{spur}	α	β	μ
100	0.85	20.00	0.6
125	0.78	20.00	0.6
160	0.78	16.77	0.6
200	0.79	12.94	0.6
250	0.81	9.95	0.6
315	0.84	7.77	0.6
400	0.89	6.12	0.6
500	0.94	4.58	0.6
630	1.04	3.31	0.5
800	1.12	2.66	0.5
1000	1.15	2.21	0.6
1250	1.31	1.81	0.5
1600	1.46	1.45	0.5
2000	1.53	1.06	0.4
2500	1.65	0.96	0.4

Tabelle E.4: Weibullparameter zur Charakterisierung der Verteilungs-Dichtefunktion des zeitlichen Abstandes Δt zwischen zwei Nachbarfahrzeugen in Abhängigkeit der stündlichen Verkehrsmenge N_{spur} auf der betrachteten Spur einer HLS-2 bei Tempo 100 km/h.

E.0.5 Vierspurige HLS bei signalisierter Geschwindigkeit 80 km/h

Normalspur				Ueberholspur			
N_{spur}	α	β	μ	N_{spur}	α	β	μ
100	1.11	20.00	0.6	100	0.79	20.00	0.6
125	0.96	20.00	0.7	125	0.69	20.00	0.6
160	0.93	18.36	0.7	160	0.69	16.36	0.6
200	0.95	14.31	0.7	200	0.71	13.22	0.6
250	1.01	10.92	0.8	250	0.72	10.25	0.6
315	1.01	8.58	0.8	315	0.73	8.09	0.6
400	1.01	6.68	0.8	400	0.75	6.32	0.6
500	1.02	5.23	0.8	500	1.01	3.87	0.5
630	1.02	4.15	0.8	630	1.01	3.11	0.5
800	1.02	3.25	0.8	800	1.02	2.44	0.5
1000	1.22	2.50	0.6	1000	1.03	2.02	0.5
1250	1.33	1.95	0.6	1250	1.20	1.59	0.5
1600	1.40	1.54	0.5	1600	1.37	1.31	0.5
2000	1.46	1.15	0.5	2000	1.66	1.15	0.4
2500	1.82	0.99	0.4	2500	1.44	0.89	0.4

Tabelle E.5: Weibullparameter zur Charakterisierung der Verteilungs-Dichtefunktion des zeitlichen Abstandes Δt zwischen zwei Nachbarfahrzeugen in Abhängigkeit der stündlichen Verkehrsmenge N_{spur} auf der betrachteten Spur einer HLS-4 bei Tempo 80 km/h.

E.0.6 Vierspurige HLS bei signalisierter Geschwindigkeit 100 km/h

Normalspur				Ueberholspur			
N_{spur}	α	β	μ	N_{spur}	α	β	μ
100	1.18	20.00	0.5	100	0.79	20.00	0.6
125	1.01	20.00	0.8	125	0.72	20.00	0.6
160	0.95	18.85	0.7	160	0.71	17.37	0.6
200	0.94	15.07	0.7	200	0.72	13.79	0.6
250	0.98	11.65	0.6	250	0.72	10.82	0.6
315	1.01	9.07	0.8	315	0.72	8.50	0.6
400	1.01	7.28	0.8	400	0.75	6.51	0.6
500	1.07	5.66	0.6	500	1.01	4.05	0.5
630	1.10	4.35	0.6	630	1.01	3.21	0.5
800	1.16	3.45	0.6	800	1.02	2.58	0.5
1000	1.20	2.74	0.6	1000	1.02	2.29	0.5
1250	1.35	2.13	0.5	1250	1.03	1.72	0.5
1600	1.43	1.62	0.5	1600	1.45	1.21	0.4
2000	1.50	1.25	0.5	2000	1.51	1.04	0.5

Tabelle E.6: Weibullparameter zur Charakterisierung der Verteilungs-Dichtefunktion des zeitlichen Abstandes Δt zwischen zwei Nachbarfahrzeugen in Abhängigkeit der stündlichen Verkehrsmenge N_{spur} auf der betrachteten Spur einer HLS-4 bei Tempo 100 km/h.

E.0.7 Vierspurige HLS bei signalisierter Geschwindigkeit 120 km/h

Normalspur				Ueberholspur			
N_{spur}	α	β	μ	N_{spur}	α	β	μ
100	1.24	20.00	0.5	100	0.75	20.00	0.6
125	1.04	20.00	0.8	125	0.68	20.00	0.6
160	1.02	18.52	0.8	160	0.69	16.34	0.6
200	1.02	15.13	0.8	200	0.70	13.18	0.6
250	1.02	12.23	0.8	250	0.71	10.35	0.6
315	1.02	9.84	0.8	315	0.72	8.10	0.6
400	1.12	7.52	0.6	400	1.01	4.47	0.4
500	1.15	5.94	0.6	500	1.02	3.50	0.4
630	1.19	4.74	0.6	630	1.02	2.87	0.4
800	1.28	3.77	0.5	800	1.03	2.36	0.4
1000	1.30	2.99	0.5	1000	1.03	1.92	0.4
1250	1.31	2.32	0.5	1250	1.02	1.48	0.5
1600	1.41	1.80	0.4	1600	1.02	1.27	0.5
2000	1.49	1.25	0.4	2000	1.45	1.02	0.4

Tabelle E.7: Weibullparameter zur Charakterisierung der Verteilungs-Dichtefunktion des zeitlichen Abstandes Δt zwischen zwei Nachbarfahrzeugen in Abhängigkeit der stündlichen Verkehrsmenge N_{spur} auf der betrachteten Spur einer HLS-4 bei Tempo 120 km/h.

E.0.8 Sechsspurige HLS bei signalisierter Geschwindigkeit 120 km/h

Normalspur				Mittelspur				Ueberholspur			
N_{spur}	α	β	μ	N_{spur}	α	β	μ	N_{spur}	α	β	μ
100	1.03	20.00	0.5	100	1.00	20.00	0.5	100	0.72	20.00	0.6
125	1.12	20.00	0.6	125	0.92	20.00	0.6	125	0.69	20.00	0.6
160	1.03	19.16	0.8	160	0.91	17.91	0.6	160	0.69	16.79	0.6
200	1.03	15.75	0.8	200	0.93	14.12	0.6	200	0.70	13.13	0.6
250	1.12	12.30	0.7	250	1.02	10.50	0.5	250	1.00	7.08	0.4
315	1.13	9.88	0.7	315	1.02	8.63	0.5	315	1.00	5.86	0.4
400	1.16	7.85	0.6	400	1.02	7.03	0.5	400	1.01	4.57	0.4
500	1.15	6.25	0.6	500	1.03	5.63	0.5	500	1.01	3.74	0.4
630	1.18	5.00	0.6	630	1.03	4.55	0.5	630	1.01	3.06	0.4
800	1.18	3.85	0.5	800	1.03	3.62	0.5	800	1.02	2.38	0.4
1000	1.22	2.97	0.4	1000	1.03	2.82	0.5	1000	1.02	1.98	0.4
1250	1.23	2.19	0.4	1250	1.23	2.20	0.4	1250	1.03	1.67	0.4
1600	1.33	1.70	0.4	1600	1.29	1.78	0.4	1600	1.03	1.43	0.4
2000	1.51	1.44	0.4	2000	1.33	1.40	0.4	2000	1.35	1.12	0.4

Tabelle E.8: Weibullparameter zur Charakterisierung der Verteilungs-Dichtefunktion des zeitlichen Abstandes Δt zwischen zwei Nachbarfahrzeugen in Abhängigkeit der stündlichen Verkehrsmenge N_{spur} auf der betrachteten Spur einer HLS-6 bei Tempo 120 km/h.

F Rechenbeispiele: Ergebnisse

Terzen	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10k	
Antriebsgeräusch:																									
L _{WPgrad} [1,8..10]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
L _{WPgrad} [2]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
L _{WPgrad} [3..7]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
L _{WP} [1]	99.5	98.0	96.0	92.8	97.3	88.3	83.9	92.9	92.4	93.6	89.1	88.1	89.1	90.6	84.6	82.1	79.1	80.1	78.6	79.1	76.6	74.1	73.6	57.1	
L _{WP} [2]	98.5	99.7	100.2	100.2	101.8	96.1	90.4	84.6	79.9	81.5	82.1	83.4	82.6	79.5	79.6	80.5	78.3	77.9	77.9	78.1	78.7	76.4	74.8	74.8	
L _{WP} [3]	91.0	87.5	86.5	80.4	78.9	79.4	78.1	78.6	78.1	76.4	76.4	78.9	77.9	74.4	69.4	67.4	68.9	67.9	68.4	65.4	61.9	59.9	55.9	55.4	
L _{WP} [4]	91.0	87.5	86.5	80.4	78.9	79.4	78.1	78.6	78.1	76.4	76.4	78.9	77.9	74.4	69.4	67.4	68.9	67.9	68.4	65.4	61.9	59.9	55.9	55.4	
L _{WP} [5]	95.5	96.5	89.5	83.3	82.3	83.3	81.3	81.3	81.3	81.3	79.8	78.8	85.3	81.3	76.8	72.3	75.8	76.8	76.3	74.8	73.3	69.8	66.3	64.3	
L _{WP} [6]	92.0	92.0	92.0	89.0	89.0	89.0	87.3	87.3	87.3	87.3	87.3	87.3	90.1	90.1	90.1	86.7	86.7	86.7	80.3	80.3	80.3	74.2	74.2	74.2	
L _{WP} [7]	92.0	92.0	92.0	89.0	89.0	89.0	87.3	87.3	87.3	87.3	87.3	87.3	90.1	90.1	90.1	86.7	86.7	86.7	80.3	80.3	80.3	74.2	74.2	74.2	
L _{WP} [8]	100.0	101.6	99.1	95.9	95.3	94.2	91.3	93.4	95.0	93.1	95.1	94.5	92.7	86.2	83.1	86.6	87.2	85.4	83.1	81.5	80.5	78.6	76.5	74.9	
L _{WP} [9]	100.6	106.0	102.1	95.8	97.5	94.0	91.1	93.4	95.0	93.1	95.1	94.5	92.7	86.2	83.1	86.6	87.2	85.4	83.1	81.5	80.5	78.6	76.5	74.9	
L _{WP} [10]	99.1	105.6	100.6	94.5	96.3	94.0	88.8	91.2	93.9	94.5	96.2	93.3	93.0	89.1	87.1	85.4	83.4	82.8	82.3	79.7	75.0	64.2	57.1	57.1	
Rollgeräusch:																									
L _{WRtemp} [1,8..10]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
L _{WRtemp} [2]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
L _{WRtemp} [3..7]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
L _{WRroad}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
L _{WR} [1]	74.7	83.2	82.2	79.6	73.1	82.0	89.6	82.7	71.7	75.5	81.4	82.4	83.9	82.4	81.5	79.8	78.3	76.1	72.1	68.9	67.0	66.0	65.0	63.7	
L _{WR} [2]	74.8	84.2	84.2	81.0	79.3	76.3	84.0	79.7	77.9	76.4	75.9	74.3	73.7	75.0	77.8	75.5	76.8	75.7	75.3	73.8	71.7	69.7	69.6	64.5	
L _{WR} [3]	76.3	81.3	80.5	77.5	73.1	71.5	73.5	76.8	76.8	77.3	77.4	76.4	81.1	82.8	79.8	77.8	76.1	72.8	69.5	67.0	64.0	60.1	57.8	55.0	
L _{WR} [4]	80.8	86.6	83.5	80.2	77.0	75.1	76.8	80.7	80.5	80.9	81.1	82.4	86.6	85.7	82.7	81.7	79.3	76.1	72.9	70.3	67.6	65.0	64.0	61.7	
L _{WR} [5]	77.8	79.8	81.6	79.2	79.0	79.1	79.6	79.8	77.4	78.4	80.5	82.5	83.9	85.8	82.5	80.1	76.2	72.8	69.5	66.4	62.9	62.1	60.8	58.5	
L _{WR} [6]	83.4	87.2	85.0	82.1	78.4	75.4	76.8	76.9	78.9	83.0	84.8	87.0	88.3	86.5	84.5	83.4	79.1	74.7	73.2	69.4	65.1	65.9	64.6	62.1	
L _{WR} [7]	84.6	92.7	89.7	84.6	83.8	83.1	84.4	85.9	90.9	91.6	92.5	94.8	94.3	91.1	87.5	85.0	80.9	76.8	74.9	71.7	67.7	67.6	66.5	64.8	
L _{WR} [8]	78.6	75.3	75.3	80.7	81.2	82.4	83.7	79.3	82.9	84.4	83.6	87.2	88.6	91.5	90.5	88.2	83.9	77.3	76.2	75.6	68.0	66.2	64.4	62.4	
L _{WR} [9]	83.4	77.1	76.0	82.6	83.3	83.0	85.0	81.7	76.6	82.5	83.1	86.7	89.7	87.6	85.6	83.6	81.0	78.2	75.2	72.9	70.2	69.0	67.8	65.9	
L _{WR} [10]	83.4	77.1	76.0	82.6	83.3	83.0	85.0	81.7	76.6	82.5	83.1	86.7	89.7	87.6	85.6	83.6	81.0	78.2	75.2	72.9	70.2	69.0	67.8	65.9	

Tabelle F.1: Rechenbeispiel A: Teil 1 von 2 (Berechnung Antriebs- und Rollgeräusch)

180	Terzen	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10k
	<i>Vertikale Richtwirkung:</i>																								
	L _{Wθ} [1,8..10]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	L _{Wθ} [2]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	L _{Wθ} [3..7]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	<i>Totale Schallleistung von einem Fahrzeug:</i>																								
	L _W [1]	99.5	98.1	96.2	93.0	97.3	89.2	90.6	93.3	92.4	93.7	89.8	89.1	90.3	91.2	86.3	84.1	81.7	81.6	79.5	79.5	77.1	74.7	74.2	64.5
	L _W [2]	98.5	99.8	100.3	100.3	101.8	96.2	91.3	85.8	82.0	82.6	83.1	83.9	83.1	80.8	81.8	81.7	80.6	79.9	79.8	79.5	79.5	77.2	75.9	75.1
	L _W [3]	91.1	88.4	87.5	82.2	79.9	80.0	79.4	80.8	80.5	79.9	79.9	80.9	82.8	83.4	80.1	78.1	76.8	74.0	72.0	69.3	66.0	63.0	59.9	58.2
	L _W [4]	91.4	90.1	88.2	83.3	81.0	80.8	80.5	82.8	82.5	82.2	82.4	84.0	87.1	86.0	82.8	81.8	79.6	76.7	74.2	71.5	68.6	66.1	64.6	62.5
	L _W [5]	95.6	96.6	90.1	84.7	84.0	84.7	83.6	83.6	82.8	83.1	83.2	84.0	87.6	87.1	83.5	80.8	79.0	78.2	77.1	75.3	73.6	70.4	67.3	65.3
	L _W [6]	92.6	93.2	92.8	89.8	89.4	89.2	87.7	87.7	87.9	88.6	89.2	90.1	92.3	91.6	91.1	88.3	87.4	86.9	81.0	80.6	80.4	74.7	74.6	74.4
	L _W [7]	92.7	95.4	94.0	90.4	90.1	90.0	89.1	89.7	92.5	92.9	93.6	95.5	95.7	93.6	92.0	88.9	87.7	87.1	81.4	80.8	80.5	75.0	74.8	74.6
	L _W [8]	100.1	101.6	99.1	96.0	95.4	94.5	92.0	93.5	95.2	93.7	95.4	95.3	94.1	92.6	91.2	90.5	88.9	86.0	83.9	82.5	80.7	78.8	76.8	75.1
	L _W [9]	100.7	106.0	102.1	96.0	97.6	94.3	92.0	93.6	95.0	93.5	95.4	95.2	94.5	90.0	87.5	88.4	88.1	86.2	83.8	82.1	80.9	79.1	77.1	75.4
	L _W [10]	99.2	105.6	100.6	94.7	96.5	94.3	90.3	91.6	93.9	94.8	96.4	94.2	94.7	91.4	89.4	87.6	85.4	84.1	83.1	80.5	76.2	70.2	68.1	66.4
180	<i>Totale Schallleistung pro Meter einer Linienquelle:</i>																								
	L _{Weq,l} [1]	54.7	53.4	51.4	48.2	52.5	44.4	45.8	48.5	47.6	48.9	45.0	44.4	45.5	46.5	41.6	39.3	36.9	36.8	34.7	34.7	32.3	30.0	29.4	19.7
	L _{Weq,l} [2]	56.8	58.0	58.5	58.5	60.1	54.4	49.5	44.0	40.2	40.9	41.3	42.1	41.3	39.0	40.1	40.0	38.9	38.2	38.0	37.7	37.7	35.4	34.2	33.4
	L _{Weq,l} [3]	64.8	62.1	61.1	55.9	53.6	53.7	53.1	54.5	54.2	53.6	53.6	54.5	56.5	57.1	53.8	51.8	50.5	47.6	45.6	43.0	39.7	36.7	33.6	31.9
	L _{Weq,l} [4]	46.6	45.3	43.5	38.6	36.3	36.0	35.7	38.0	37.7	37.4	37.6	39.2	42.4	41.2	38.1	37.0	34.8	31.9	29.4	26.7	23.8	21.3	19.8	17.8
	L _{Weq,l} [5]	57.8	58.8	52.4	47.0	46.2	46.9	45.8	45.9	45.0	45.3	45.4	46.2	49.8	49.3	45.7	43.0	41.2	40.4	39.3	37.6	35.9	32.6	29.5	27.5
	L _{Weq,l} [6]	47.8	48.5	48.0	45.0	44.6	44.4	42.9	42.9	43.1	43.9	44.4	45.4	47.5	46.9	46.4	43.6	42.6	42.2	36.3	35.8	35.6	30.0	29.8	29.6
	L _{Weq,l} [7]	48.0	50.6	49.2	45.6	45.4	45.2	44.3	44.9	47.7	48.2	48.9	50.7	50.9	48.8	47.2	44.2	42.9	42.3	36.6	36.0	35.7	30.2	30.1	29.8
	L _{Weq,l} [8]	62.3	63.8	61.4	58.2	57.7	56.7	54.2	55.7	57.4	55.9	57.6	57.5	56.4	54.8	53.4	52.7	51.1	48.3	46.1	44.7	43.0	41.1	39.0	37.4
	L _{Weq,l} [9]	55.9	61.3	57.4	51.2	52.9	49.5	47.2	48.9	50.2	48.7	50.6	50.4	49.7	45.2	42.7	43.6	43.4	41.4	39.0	37.3	36.1	34.3	32.3	30.6
	L _{Weq,l} [10]	54.5	60.9	55.9	50.0	51.7	49.5	45.5	46.9	49.2	50.0	51.7	49.4	49.9	46.7	44.6	42.8	40.6	39.3	38.3	35.8	31.5	25.4	23.3	21.6
<i>Energetische Summe aller Fahrzeugkategorien:</i>																									
L _{Weq,l}		68.4	69.3	66.8	63.4	63.9	61.1	58.9	59.9	60.8	60.0	61.0	61.1	61.5	60.7	58.3	56.7	55.3	53.1	50.8	49.1	47.3	44.6	42.7	41.2

Tabelle F.2: Rechenbeispiel A: Teil 2 von 2 (Berechnung vertikale Richtwirkung und totale Schallleistung)

181	Terzen	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10k
	<i>Antriebsgeräusch:</i>																								
	L _{WPgrad} [1,8..10]	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
	L _{WPgrad} [2]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	L _{WPgrad} [3..7]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	L _{WP} [1]	100.3	98.8	96.8	94.4	98.9	89.9	86.0	95.0	94.5	95.9	91.4	90.4	91.4	92.9	86.9	84.4	81.4	82.4	80.9	81.4	78.9	76.4	75.9	59.4
	L _{WP} [2]	98.8	100.1	101.2	101.2	102.8	98.4	93.1	87.1	82.4	84.0	84.4	85.7	85.3	82.2	82.3	82.8	80.9	80.6	80.6	80.8	81.0	79.1	77.5	77.5
	L _{WP} [3]	91.0	87.5	86.5	82.4	80.9	81.4	80.3	80.8	80.3	78.7	78.7	81.2	80.2	76.7	71.7	69.7	71.2	70.2	70.7	67.7	64.2	62.2	58.2	57.7
	L _{WP} [4]	91.0	87.5	86.5	82.4	80.9	81.4	80.3	80.8	80.3	78.7	78.7	81.2	80.2	76.7	71.7	69.7	71.2	70.2	70.7	67.7	64.2	62.2	58.2	57.7
	L _{WP} [5]	95.5	96.5	89.5	84.7	83.7	84.7	83.2	83.2	83.2	83.1	81.6	80.6	87.1	83.1	78.6	74.1	77.6	78.6	78.1	76.6	75.1	71.6	68.1	66.1
	L _{WP} [6]	92.0	92.0	92.0	90.4	90.4	90.4	89.2	89.2	89.2	89.1	89.1	89.1	91.9	91.9	91.9	88.5	88.5	88.5	82.1	82.1	82.1	76.0	76.0	76.0
	L _{WP} [7]	92.0	92.0	92.0	90.4	90.4	90.4	89.2	89.2	89.2	89.1	89.1	89.1	91.9	91.9	91.9	88.5	88.5	88.5	82.1	82.1	82.1	76.0	76.0	76.0
	L _{WP} [8]	101.1	102.7	100.2	97.5	96.9	95.8	93.4	95.5	97.1	95.4	97.4	96.8	95.0	88.5	85.4	88.9	89.5	87.7	85.4	83.8	82.8	80.9	78.8	77.2
	L _{WP} [9]	101.7	107.1	103.2	97.4	99.1	95.6	93.2	95.5	97.1	95.4	97.4	96.8	95.0	88.5	85.4	88.9	89.5	87.7	85.4	83.8	82.8	80.9	78.8	77.2
	L _{WP} [10]	100.2	106.7	101.7	96.1	97.9	95.6	90.9	93.3	96.0	96.8	98.5	95.6	95.3	91.4	89.4	87.7	85.7	85.1	84.6	82.0	77.3	66.5	59.4	59.4
	<i>Rollgeräusch:</i>																								
	L _{WRtemp} [1,8..10]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	L _{WRtemp} [2]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	L _{WRtemp} [3..7]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	L _{WRroad}	-3.0	-3.0	-3.0	-2.9	-3.6	-4.3	-4.3	-5.1	-5.8	-6.1	-7.8	-8.7	-10.7	-11.8	-12.5	-12.7	-12.6	-11.8	-10.8	-9.3	-7.8	-6.9	-6.1	-5.7
	L _{WR} [1]	77.2	88.6	88.1	85.6	75.0	84.8	90.8	83.1	74.8	78.3	82.5	82.6	82.1	79.5	77.8	76.0	74.3	72.5	70.1	68.5	67.9	68.0	67.8	66.9
	L _{WR} [2]	77.3	86.7	86.7	83.6	81.4	77.5	85.2	82.9	80.5	78.7	75.9	73.4	71.4	71.8	73.1	70.9	71.5	70.7	70.5	70.0	69.4	68.5	69.0	65.4
	L _{WR} [3]	78.8	83.8	83.5	81.2	77.6	75.3	76.3	77.2	76.5	76.8	75.5	74.8	77.3	78.4	75.8	73.8	72.3	69.8	67.5	66.1	64.3	62.0	60.5	58.1
	L _{WR} [4]	83.3	89.1	86.5	83.9	81.5	78.9	79.6	81.1	80.2	80.4	79.2	80.8	82.8	81.3	78.7	77.7	75.5	73.1	70.9	69.4	67.9	66.9	66.7	64.8
	L _{WR} [5]	80.3	82.3	84.6	81.8	82.0	81.0	80.8	80.2	78.0	77.8	78.2	79.3	79.6	80.7	77.5	75.4	72.4	69.8	67.5	65.9	63.9	64.0	63.5	61.6
	L _{WR} [6]	85.9	89.7	88.0	84.7	81.4	77.3	78.0	77.3	79.5	82.4	82.5	83.8	84.0	81.4	79.5	78.7	75.3	71.7	71.2	68.9	66.1	67.8	67.3	65.2
	L _{WR} [7]	87.1	95.2	92.7	87.2	86.8	85.0	85.6	86.3	91.5	91.0	90.2	91.6	90.0	86.0	82.5	80.3	77.1	73.8	72.9	71.2	68.7	69.5	69.2	67.9
	L _{WR} [8]	81.1	81.2	81.2	83.3	83.1	83.6	84.9	81.7	86.0	87.2	84.7	87.4	86.8	86.1	84.1	81.7	78.4	74.4	73.3	73.2	69.1	68.2	67.2	65.6
	L _{WR} [9]	85.9	83.0	81.9	85.2	85.2	84.2	86.2	82.1	79.7	85.3	84.2	86.9	87.9	84.7	82.0	79.8	77.3	75.3	73.3	72.5	71.3	71.0	70.6	69.1
	L _{WR} [10]	85.9	83.0	81.9	85.2	85.2	84.2	86.2	82.1	79.7	85.3	84.2	86.9	87.9	84.7	82.0	79.8	77.3	75.3	73.3	72.5	71.3	71.0	70.6	69.1

Tabelle F.3: Rechenbeispiel B: Teil 1 von 2 (Berechnung Antriebs- und Rollgeräusch)

Terzen	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10k
<i>Vertikale Richtwirkung:</i>																								
$L_{W\theta[1,8..10]}$	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3
$L_{W\theta[2]}$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$L_{W\theta[3..7]}$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3
<i>Totale Schallleistung von einem Fahrzeug:</i>																								
$L_{W[1]}$	100.3	99.1	97.3	94.9	98.9	91.0	92.0	95.2	94.4	95.8	91.8	90.9	91.7	92.9	87.2	84.8	82.0	82.6	81.0	81.4	79.0	76.7	76.2	67.3
$L_{W[2]}$	98.8	100.3	101.4	101.3	102.8	98.4	93.8	88.5	84.6	85.2	85.0	86.0	85.5	82.6	82.8	83.0	81.3	81.1	81.0	81.1	81.3	79.5	78.1	77.8
$L_{W[3]}$	91.2	89.0	88.2	84.8	82.5	82.3	81.7	82.3	81.8	80.8	80.3	82.0	81.9	80.5	77.1	75.1	74.6	72.8	72.2	69.8	67.1	64.9	62.2	60.6
$L_{W[4]}$	91.7	91.4	89.5	86.2	84.2	83.3	82.9	83.9	83.2	82.6	81.9	83.9	84.6	82.5	79.4	78.2	76.7	74.7	73.6	71.5	69.2	67.9	67.0	65.3
$L_{W[5]}$	95.6	96.6	90.7	86.5	85.9	86.2	85.1	84.9	84.3	84.2	83.2	83.0	87.7	85.0	81.0	77.7	78.6	79.0	78.3	76.8	75.2	72.1	69.2	67.2
$L_{W[6]}$	92.9	94.0	93.4	91.4	90.8	90.5	89.4	89.4	89.5	89.9	89.9	90.2	92.5	92.2	92.1	88.8	88.6	88.5	82.3	82.1	82.0	76.4	76.3	76.1
$L_{W[7]}$	93.2	96.9	95.3	92.0	91.9	91.4	90.7	90.9	93.4	93.1	92.7	93.5	94.0	92.8	92.3	89.0	88.7	88.5	82.4	82.3	82.1	76.7	76.6	76.4
$L_{W[8]}$	101.1	102.7	100.2	97.6	97.0	96.0	93.9	95.6	97.3	95.9	97.5	97.1	95.4	90.3	87.6	89.4	89.6	87.7	85.4	83.9	82.7	80.8	78.8	77.2
$L_{W[9]}$	101.8	107.1	103.2	97.6	99.2	95.9	93.9	95.6	97.1	95.7	97.4	97.1	95.6	89.8	86.8	89.2	89.5	87.7	85.4	83.9	82.8	81.0	79.1	77.5
$L_{W[10]}$	100.3	106.7	101.7	96.4	98.1	95.9	92.1	93.5	96.0	96.9	98.5	96.0	95.8	92.1	89.9	88.1	86.1	85.3	84.7	82.2	78.0	72.0	70.6	69.2
<i>Totale Schallleistung pro Meter einer Linienquelle:</i>																								
$L_{Weq,l[1]}$	53.3	52.1	50.3	47.9	51.9	44.0	45.0	48.2	47.4	48.8	44.8	43.9	44.7	45.9	40.2	37.8	35.0	35.6	34.0	34.4	32.0	29.7	29.2	20.3
$L_{Weq,l[2]}$	58.8	60.3	61.4	61.3	62.8	58.4	53.8	48.5	44.6	45.2	45.0	46.0	45.5	42.6	42.8	43.0	41.3	41.1	41.0	41.1	41.3	39.5	38.1	37.8
$L_{Weq,l[3]}$	64.2	62.0	61.2	57.8	55.6	55.3	54.7	55.3	54.8	53.8	53.3	55.0	54.9	53.5	50.1	48.1	47.6	45.9	45.2	42.8	40.1	37.9	35.3	33.6
$L_{Weq,l[4]}$	44.7	44.4	42.5	39.2	37.2	36.3	35.9	36.9	36.2	35.6	34.9	36.9	37.6	35.5	32.4	31.2	29.7	27.7	26.6	24.5	22.3	20.9	20.0	18.3
$L_{Weq,l[5]}$	58.6	59.6	53.7	49.5	48.9	49.2	48.1	47.9	47.3	47.2	46.2	46.0	50.7	48.0	44.0	40.7	41.6	42.0	41.3	39.8	38.2	35.1	32.2	30.2
$L_{Weq,l[6]}$	49.0	50.0	49.4	47.4	46.9	46.5	45.5	45.4	45.6	45.9	45.9	46.2	48.5	48.2	48.1	44.8	44.6	44.5	38.3	38.2	38.0	32.4	32.3	32.1
$L_{Weq,l[7]}$	46.2	49.9	48.3	45.1	44.9	44.4	43.7	43.9	46.4	46.1	45.7	46.5	47.0	45.8	45.3	42.0	41.7	41.5	35.5	35.3	35.1	29.7	29.6	29.4
$L_{Weq,l[8]}$	64.1	65.7	63.2	60.6	60.0	59.0	56.9	58.6	60.3	58.9	60.5	60.1	58.4	53.3	50.6	52.5	52.6	50.7	48.4	46.9	45.7	43.9	41.8	40.2
$L_{Weq,l[9]}$	54.8	60.1	56.2	50.6	52.2	48.9	46.9	48.6	50.1	48.7	50.5	50.1	48.6	42.8	39.8	42.2	42.5	40.7	38.4	36.9	35.8	34.1	32.1	30.5
$L_{Weq,l[10]}$	53.3	59.7	54.7	49.4	51.1	48.9	45.1	46.5	49.0	50.0	51.5	49.0	48.9	45.1	42.9	41.2	39.1	38.3	37.7	35.2	31.0	25.0	23.6	22.2
<i>Energetische Summe aller Fahrzeugkategorien:</i>																								
$L_{Weq,l}$	68.8	69.8	67.8	65.5	65.9	63.4	61.0	61.6	62.5	61.6	62.5	62.4	61.7	58.6	56.1	55.5	55.4	54.0	51.9	50.5	49.3	46.9	45.1	43.8

Tabelle F.4: Rechenbeispiel B: Teil 2 von 2 (Berechnung vertikale Richtwirkung und totale Schallleistung)

Terzen	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10k	
Antriebsgeräusch:																									
L _{WPgrad} [1,8..10]	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
L _{WPgrad} [2]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
L _{WPgrad} [3..7]	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3
L _{WP} [1]	109.5	108.0	106.0	104.9	109.4	100.4	97.2	106.2	105.7	107.2	102.7	101.7	102.7	104.2	98.2	95.7	92.7	93.7	92.2	92.7	90.2	87.7	87.2	70.7	70.7
L _{WP} [2]	99.2	100.8	102.7	102.7	104.3	101.7	97.3	91.0	86.3	87.9	87.7	89.3	89.5	86.4	86.3	86.1	84.7	84.8	84.8	84.7	84.6	83.3	81.7	81.7	81.7
L _{WP} [3]	95.3	91.8	90.8	89.8	88.3	88.8	87.9	88.4	87.9	86.4	86.4	88.9	87.9	84.4	79.4	77.4	78.9	77.9	78.4	75.4	71.9	69.9	65.9	65.4	65.4
L _{WP} [4]	95.3	91.8	90.8	89.8	88.3	88.8	87.9	88.4	87.9	86.4	86.4	88.9	87.9	84.4	79.4	77.4	78.9	77.9	78.4	75.4	71.9	69.9	65.9	65.4	65.4
L _{WP} [5]	99.8	100.8	93.8	90.9	89.9	90.9	90.2	90.2	90.2	90.2	88.7	87.7	94.2	90.2	85.7	81.2	84.7	85.7	85.2	83.7	82.2	78.7	75.2	73.2	73.2
L _{WP} [6]	96.3	96.3	96.3	96.6	96.6	96.6	96.2	96.2	96.2	96.2	96.2	96.2	99.0	99.0	99.0	95.6	95.6	95.6	89.2	89.2	89.2	83.1	83.1	83.1	83.1
L _{WP} [7]	96.3	96.3	96.3	96.6	96.6	96.6	96.2	96.2	96.2	96.2	96.2	96.2	99.0	99.0	99.0	95.6	95.6	95.6	89.2	89.2	89.2	83.1	83.1	83.1	83.1
L _{WP} [8]	110.7	112.3	109.8	108.0	107.4	106.3	104.6	106.7	108.3	106.7	108.7	108.1	106.3	99.8	96.7	100.2	100.8	99.0	96.7	95.1	94.1	92.2	90.1	88.5	88.5
L _{WP} [9]	111.3	116.7	112.8	107.9	109.6	106.1	104.4	106.7	108.3	106.7	108.7	108.1	106.3	99.8	96.7	100.2	100.8	99.0	96.7	95.1	94.1	92.2	90.1	88.5	88.5
L _{WP} [10]	109.8	116.3	111.3	106.6	108.4	106.1	102.1	104.5	107.2	108.1	109.8	106.9	106.6	102.7	100.7	99.0	97.0	96.4	95.9	93.3	88.6	77.8	70.7	70.7	70.7
Rollgeräusch:																									
L _{WRtemp} [1,8..10]	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2
L _{WRtemp} [2]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
L _{WRtemp} [3..7]	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4
L _{WRroad}	1.0	1.0	1.0	1.1	0.6	0.0	0.3	-1.1	-1.5	-1.4	-1.7	-1.3	-1.3	-1.1	0.1	1.0	1.4	2.1	2.5	2.9	3.2	3.2	3.4	3.5	3.5
L _{WR} [1]	86.1	100.2	100.0	97.5	84.1	95.5	100.3	92.0	87.0	90.9	96.5	97.9	99.4	98.1	98.3	97.6	96.1	93.9	91.2	88.6	86.8	86.0	85.2	84.0	84.0
L _{WR} [2]	86.4	95.8	95.8	92.7	90.8	86.9	94.9	94.5	92.5	91.2	89.2	88.0	88.5	90.3	92.9	92.1	92.2	90.9	89.3	87.3	85.5	83.8	83.6	80.6	80.6
L _{WR} [3]	87.5	92.5	92.7	90.8	88.8	86.6	87.1	85.9	85.5	86.3	86.6	88.4	92.6	95.4	95.9	95.2	94.0	91.4	88.5	85.7	82.4	79.8	77.7	75.0	75.0
L _{WR} [4]	92.0	97.8	95.7	93.5	92.7	90.2	90.4	89.8	89.2	89.9	90.3	94.4	98.1	98.3	98.8	99.1	97.2	94.7	91.9	89.0	86.0	84.7	83.9	81.7	81.7
L _{WR} [5]	89.0	91.0	93.7	90.5	91.9	90.6	90.1	88.9	87.8	87.3	89.0	91.4	94.5	97.3	96.7	96.0	94.0	91.4	88.5	85.8	82.6	81.8	80.7	78.5	78.5
L _{WR} [6]	94.6	98.4	97.1	93.4	91.3	86.9	87.3	86.0	89.3	91.9	93.3	95.9	98.9	98.0	98.7	99.3	96.9	93.3	92.2	88.8	84.8	85.6	84.5	82.1	82.1
L _{WR} [7]	95.8	103.9	101.8	95.9	96.7	94.6	94.9	95.0	101.3	100.5	101.0	103.7	104.9	102.6	101.7	100.9	98.7	95.4	93.9	91.1	87.4	87.3	86.4	84.8	84.8
L _{WR} [8]	90.0	93.1	93.1	92.2	92.2	92.8	94.4	92.5	98.2	99.8	98.7	102.7	104.1	102.5	102.1	100.8	98.8	96.2	93.8	91.6	88.0	86.2	84.6	82.7	82.7
L _{WR} [9]	94.8	94.9	93.8	94.1	94.3	93.4	95.7	91.0	91.9	97.9	98.2	102.2	105.2	103.3	102.5	101.4	99.2	97.1	94.5	92.6	90.2	89.0	88.0	86.2	86.2
L _{WR} [10]	94.8	94.9	93.8	94.1	94.3	93.4	95.7	91.0	91.9	97.9	98.2	102.2	105.2	103.3	102.5	101.4	99.2	97.1	94.5	92.6	90.2	89.0	88.0	86.2	86.2

Tabelle F.5: Rechenbeispiel C: Teil 1 von 2 (Berechnung Antriebs- und Rollgeräusch)

Terzen	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10k
<i>Vertikale Richtwirkung:</i>																								
$L_{W\theta[1,8..10]}$	-0.5	-0.6	-0.6	-0.7	-0.7	-0.8	-0.8	-0.9	-1.0	-1.0	-1.1	-1.2	-1.3	-1.4	-1.5	-1.6	-1.7	-1.8	-1.9	-2.0	-2.1	-2.2	-2.4	-2.5
$L_{W\theta[2]}$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$L_{W\theta[3..7]}$	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.5	-0.5	-0.6	-0.7	-0.8	-0.9	-1.0	-1.1	-1.2	-1.3	-1.4	-1.5	-1.7	-1.8	-2.0	-2.1	-2.3	-2.5
<i>Totale Schallleistung von einem Fahrzeug:</i>																								
$L_{W[1]}$	109.0	108.1	106.4	105.0	108.7	100.8	101.2	105.4	104.7	106.3	102.5	102.0	103.1	103.8	99.8	98.2	96.0	95.0	92.9	92.2	89.7	87.7	87.0	81.7
$L_{W[2]}$	99.5	102.0	103.5	103.1	104.5	101.9	99.3	96.1	93.4	92.9	91.6	91.7	92.0	91.8	93.8	93.1	92.9	91.8	90.6	89.2	88.1	86.5	85.8	84.2
$L_{W[3]}$	95.8	95.0	94.6	93.0	91.2	90.4	90.0	89.8	89.3	88.7	88.8	90.8	92.9	94.7	94.9	94.0	92.7	90.1	87.2	84.3	80.8	78.1	75.7	73.0
$L_{W[4]}$	96.8	98.6	96.6	94.7	93.7	92.2	91.8	91.6	91.0	90.8	91.1	94.6	97.5	97.4	97.7	97.8	95.9	93.3	90.4	87.4	84.2	82.7	81.7	79.3
$L_{W[5]}$	99.9	101.0	96.5	93.4	93.7	93.4	92.7	92.1	91.5	91.3	91.1	92.1	96.4	97.0	95.9	94.8	93.1	90.9	88.5	86.1	83.4	81.4	79.5	77.1
$L_{W[6]}$	98.4	100.3	99.4	98.0	97.4	96.7	96.2	96.0	96.4	96.9	97.2	98.2	101.0	100.5	100.7	99.5	97.9	96.1	92.3	90.2	88.6	85.4	84.6	83.2
$L_{W[7]}$	98.9	104.4	102.6	99.0	99.3	98.3	98.1	98.1	101.8	101.2	101.5	103.6	104.9	103.1	102.4	100.7	99.0	97.0	93.5	91.4	89.4	86.6	85.8	84.6
$L_{W[8]}$	110.3	111.8	109.3	107.5	106.8	105.7	104.1	105.9	107.7	106.5	108.0	108.0	107.1	103.0	101.7	102.0	101.3	99.1	96.6	94.7	93.0	91.0	88.8	87.0
$L_{W[9]}$	110.9	116.2	112.3	107.4	109.0	105.6	104.1	105.9	107.4	106.2	108.0	107.9	107.5	103.5	102.1	102.3	101.4	99.4	96.9	95.1	93.5	91.7	89.8	88.0
$L_{W[10]}$	109.5	115.8	110.8	106.2	107.9	105.6	102.1	103.7	106.3	107.5	109.0	107.0	107.7	104.7	103.3	101.8	99.6	98.0	96.4	94.0	90.4	87.1	85.7	83.9
<i>Totale Schallleistung pro Meter einer Linienquelle:</i>																								
$L_{Weq,l[1]}$	60.0	59.1	57.3	56.0	59.7	51.8	52.2	56.4	55.7	57.2	53.5	53.0	54.1	54.8	50.8	49.2	47.0	46.0	43.8	43.1	40.7	38.7	38.0	32.7
$L_{Weq,l[2]}$	57.4	60.0	61.5	61.1	62.4	59.8	57.2	54.0	51.4	50.8	49.5	49.7	50.0	49.8	51.8	51.1	50.9	49.8	48.5	47.2	46.1	44.5	43.7	42.2
$L_{Weq,l[3]}$	69.7	68.9	68.6	67.0	65.2	64.4	64.0	63.8	63.2	62.6	62.8	64.8	66.9	68.7	68.9	68.0	66.7	64.1	61.2	58.3	54.8	52.1	49.7	47.0
$L_{Weq,l[4]}$	47.7	49.5	47.6	45.7	44.7	43.1	42.8	42.6	42.0	41.8	42.0	45.6	48.5	48.4	48.7	48.8	46.8	44.2	41.4	38.3	35.2	33.7	32.6	30.3
$L_{Weq,l[5]}$	60.9	61.9	57.4	54.4	54.7	54.3	53.7	53.1	52.5	52.3	52.1	53.1	57.4	58.0	56.8	55.8	54.0	51.9	49.5	47.0	44.4	42.4	40.4	38.1
$L_{Weq,l[6]}$	56.3	58.2	57.4	56.0	55.4	54.6	54.2	54.0	54.3	54.8	55.2	56.2	59.0	58.4	58.7	57.5	55.9	54.0	50.3	48.2	46.5	43.4	42.5	41.1
$L_{Weq,l[7]}$	49.9	55.4	53.5	50.0	50.3	49.3	49.1	49.1	52.8	52.1	52.5	54.6	55.9	54.1	53.4	51.7	50.0	48.0	44.5	42.4	40.4	37.5	36.7	35.5
$L_{Weq,l[8]}$	74.3	75.8	73.3	71.5	70.8	69.7	68.1	69.9	71.7	70.5	72.0	72.0	71.1	67.0	65.7	65.9	65.2	63.1	60.6	58.7	56.9	54.9	52.8	51.0
$L_{Weq,l[9]}$	68.9	74.2	70.2	65.4	67.0	63.5	62.0	63.8	65.3	64.2	65.9	65.9	65.5	61.5	60.0	60.3	59.4	57.4	54.8	53.0	51.5	49.6	47.8	46.0
$L_{Weq,l[10]}$	60.4	66.8	61.8	57.2	58.8	56.5	53.1	54.7	57.3	58.4	60.0	57.9	58.7	55.6	54.2	52.8	50.6	49.0	47.4	45.0	41.4	38.1	36.7	34.8
<i>Energetische Summe aller Fahrzeugkategorien:</i>																								
$L_{Weq,l}$	76.8	79.1	76.4	74.1	73.9	72.2	70.8	72.1	73.4	72.4	73.7	73.9	73.8	72.1	71.6	71.1	70.0	67.7	65.0	62.7	60.4	58.2	56.2	54.2

Tabelle F.6: Rechenbeispiel C: Teil 2 von 2 (Berechnung vertikale Richtwirkung und totale Schallleistung)

Terzen	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10k	
Antriebsgeräusch:																									
L _{WPgrad} [1,8..10]	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	
L _{WPgrad} [2]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
L _{WPgrad} [3..7]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
L _{WP} [1]	101.8	100.3	98.3	97.8	102.3	93.3	90.3	99.3	98.8	100.5	96.0	95.0	96.0	97.5	91.5	89.0	86.0	87.0	85.5	86.0	83.5	81.0	80.5	64.0	
L _{WP} [2]	99.7	101.5	104.2	104.2	105.8	105.1	101.4	94.8	90.1	91.7	91.1	92.8	93.6	90.5	90.4	89.5	88.5	88.9	88.9	88.7	88.1	87.4	85.8	85.8	
L _{WP} [3]	91.0	87.5	86.5	89.6	88.1	88.6	88.0	88.5	88.0	86.7	86.7	89.2	88.2	84.7	79.7	77.7	79.2	78.2	78.7	75.7	72.2	70.2	66.2	65.7	
L _{WP} [4]	91.0	87.5	86.5	86.6	85.1	85.6	84.7	85.2	84.7	83.3	83.3	85.8	84.8	81.3	76.3	74.3	75.8	74.8	75.3	72.3	68.8	66.8	62.8	62.3	
L _{WP} [5]	95.5	96.5	89.5	89.4	88.4	89.4	89.6	89.6	89.6	89.6	88.1	87.1	93.6	89.6	85.1	80.6	84.1	85.1	84.6	83.1	81.6	78.1	74.6	72.6	
L _{WP} [6]	92.0	92.0	92.0	93.0	93.0	93.0	92.8	92.8	92.8	92.9	92.9	92.9	95.7	95.7	95.7	92.3	92.3	92.3	85.9	85.9	85.9	79.8	79.8	79.8	
L _{WP} [7]	92.0	92.0	92.0	93.0	93.0	93.0	92.8	92.8	92.8	92.9	92.9	92.9	95.7	95.7	95.7	92.3	92.3	92.3	85.9	85.9	85.9	79.8	79.8	79.8	
L _{WP} [8]	103.1	104.7	102.2	100.7	100.1	99.0	97.5	99.6	101.2	99.7	101.7	101.1	99.3	92.8	89.7	93.2	93.8	92.0	89.7	88.1	87.1	85.2	83.1	81.5	
L _{WP} [9]	103.7	109.1	105.2	100.6	102.3	98.8	97.3	99.6	101.2	99.7	101.7	101.1	99.3	92.8	89.7	93.2	93.8	92.0	89.7	88.1	87.1	85.2	83.1	81.5	
L _{WP} [10]	102.2	108.7	103.7	99.3	101.1	98.8	95.0	97.4	100.1	101.1	102.8	99.9	99.6	95.7	93.7	92.0	90.0	89.4	88.9	86.3	81.6	70.8	63.7	63.7	
Rollgeräusch:																									
L _{WRtemp} [1,8..10]	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	
L _{WRtemp} [2]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
L _{WRtemp} [3..7]	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	
L _{WRroad}	9.0	9.0	9.0	9.1	8.7	8.9	8.9	8.5	8.1	7.4	6.5	5.8	5.0	4.6	4.1	4.0	4.2	4.4	4.8	5.4	6.0	6.3	6.8	7.1	
L _{WR} [1]	95.4	110.3	110.2	107.7	93.5	106.0	110.2	102.9	98.8	101.9	106.9	107.2	107.9	106.0	104.5	102.8	101.0	98.2	95.6	93.3	91.8	91.3	90.8	89.8	
L _{WR} [2]	97.9	107.3	107.3	104.2	102.4	99.3	107.0	109.2	107.3	105.3	102.3	100.0	100.0	101.4	101.8	100.2	99.6	97.4	95.3	93.3	91.8	90.4	90.5	88.3	
L _{WR} [3]	99.2	104.2	104.7	103.2	102.5	101.1	100.5	99.2	98.8	98.7	98.7	100.3	103.6	106.1	106.0	104.3	103.0	99.9	97.0	94.1	90.9	89.1	87.3	84.8	
L _{WR} [4]	100.5	106.3	104.3	102.2	101.9	100.2	99.8	99.9	99.3	99.2	99.1	102.3	105.2	104.9	104.0	103.3	101.2	98.2	95.4	92.6	89.9	89.0	88.5	86.5	
L _{WR} [5]	100.7	102.7	105.6	102.2	104.5	103.7	102.4	102.2	101.7	99.7	100.9	102.2	105.1	107.5	105.9	104.5	102.9	99.9	97.0	94.5	91.6	91.1	90.3	88.3	
L _{WR} [6]	103.1	106.9	105.6	101.9	100.2	96.5	96.4	96.1	99.6	101.1	102.0	103.5	105.9	104.4	103.6	103.3	100.9	96.8	95.7	92.5	88.8	89.9	89.1	86.9	
L _{WR} [7]	104.3	112.4	110.3	104.4	105.6	104.2	104.0	105.1	111.6	109.7	109.7	111.3	111.9	109.0	106.6	104.9	102.7	98.9	97.4	94.8	91.4	91.6	91.0	89.6	
L _{WR} [8]	98.9	102.8	102.8	101.1	101.2	102.6	103.9	103.4	109.5	110.3	108.6	111.5	112.1	109.2	107.1	104.8	102.8	100.2	97.5	95.3	92.5	91.0	89.7	88.0	
L _{WR} [9]	103.7	104.6	103.5	103.0	103.3	103.2	105.2	101.5	103.2	108.4	108.1	111.0	113.2	110.7	108.2	106.1	103.7	101.1	98.5	96.8	94.7	93.8	93.1	91.5	
L _{WR} [10]	103.7	104.6	103.5	103.0	103.3	103.2	105.2	101.5	103.2	108.4	108.1	111.0	113.2	110.7	108.2	106.1	103.7	101.1	98.5	96.8	94.7	93.8	93.1	91.5	

Tabelle F.7: Rechenbeispiel D: Teil 1 von 2 (Berechnung Antriebs- und Rollgeräusch)

Terzen	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10k
<i>Vertikale Richtwirkung:</i>																								
$L_{W\theta[1,8..10]}$	-0.9	-1.0	-1.1	-1.2	-1.3	-1.4	-1.5	-1.7	-1.8	-1.9	-2.1	-2.2	-2.4	-2.5	-2.7	-2.9	-3.1	-3.2	-3.4	-3.7	-3.9	-4.1	-4.3	-4.6
$L_{W\theta[2]}$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$L_{W\theta[3..7]}$	-0.4	-0.4	-0.5	-0.6	-0.7	-0.8	-0.9	-1.0	-1.1	-1.3	-1.4	-1.6	-1.7	-1.9	-2.1	-2.4	-2.6	-2.8	-3.1	-3.3	-3.6	-3.9	-4.2	-4.6
<i>Totale Schallleistung von einem Fahrzeug:</i>																								
$L_{W[1]}$	101.8	109.7	109.4	106.9	101.5	104.8	108.7	102.8	100.1	102.3	105.2	105.3	105.8	104.1	102.0	100.1	98.1	95.3	92.6	90.4	88.5	87.6	86.9	85.3
$L_{W[2]}$	101.9	108.3	109.0	107.2	107.4	106.1	108.1	109.4	107.4	105.5	102.6	100.8	100.9	101.7	102.1	100.6	99.9	98.0	96.2	94.6	93.4	92.2	91.8	90.3
$L_{W[3]}$	99.4	103.8	104.3	102.8	102.0	100.6	99.9	98.5	98.0	97.7	97.6	99.0	101.9	104.3	103.8	102.0	100.5	97.1	94.0	90.8	87.4	85.3	83.1	80.3
$L_{W[4]}$	100.6	106.0	103.9	101.8	101.3	99.6	99.1	99.1	98.4	98.0	97.8	100.8	103.5	103.0	101.9	101.0	98.7	95.5	92.4	89.3	86.3	85.2	84.3	82.0
$L_{W[5]}$	101.5	103.2	105.2	101.8	104.0	103.0	101.7	101.4	100.8	98.8	99.7	100.7	103.6	105.7	103.8	102.1	100.4	97.3	94.2	91.5	88.4	87.4	86.2	83.9
$L_{W[6]}$	103.1	106.6	105.3	101.9	100.3	97.3	97.1	96.8	99.3	100.5	101.1	102.3	104.5	103.0	102.1	101.3	98.9	95.3	93.1	90.0	87.0	86.4	85.4	83.1
$L_{W[7]}$	104.2	112.1	109.9	104.2	105.2	103.7	103.5	104.4	110.5	108.6	108.4	109.8	110.2	107.3	104.8	102.8	100.5	97.0	94.7	92.0	88.9	88.0	87.1	85.5
$L_{W[8]}$	103.6	105.9	104.4	102.7	102.4	102.8	103.3	103.3	108.3	108.7	107.3	109.6	109.9	106.8	104.5	102.2	100.2	97.5	94.7	92.4	89.7	87.9	86.2	84.3
$L_{W[9]}$	105.8	109.4	106.3	103.8	104.5	103.1	104.3	102.0	103.5	107.0	106.9	109.2	111.0	108.2	105.5	103.4	101.0	98.3	95.6	93.7	91.5	90.2	89.2	87.3
$L_{W[10]}$	105.1	109.1	105.5	103.4	104.1	103.1	104.1	101.3	103.1	107.2	107.1	109.1	111.0	108.3	105.6	103.4	100.8	98.1	95.5	93.5	91.0	89.7	88.7	86.9
<i>Totale Schallleistung pro Meter einer Linienquelle:</i>																								
$L_{Weq,l[1]}$	56.9	64.8	64.5	62.0	56.6	59.9	63.8	57.9	55.1	57.4	60.3	60.4	60.9	59.2	57.1	55.2	53.2	50.4	47.7	45.5	43.6	42.7	42.0	40.4
$L_{Weq,l[2]}$	58.5	64.9	65.6	63.8	64.0	62.7	64.6	65.9	64.0	62.0	59.2	57.4	57.5	58.3	58.7	57.1	56.5	54.6	52.8	51.2	49.9	48.8	48.4	46.8
$L_{Weq,l[3]}$	75.2	79.6	80.0	78.6	77.8	76.3	75.6	74.3	73.7	73.5	73.3	74.8	77.7	80.0	79.6	77.7	76.2	72.9	69.8	66.6	63.1	61.0	58.8	56.0
$L_{Weq,l[4]}$	51.1	56.4	54.3	52.2	51.8	50.0	49.5	49.5	48.8	48.5	48.3	51.3	53.9	53.5	52.4	51.4	49.1	45.9	42.9	39.8	36.8	35.6	34.8	32.4
$L_{Weq,l[5]}$	67.7	69.4	71.4	68.0	70.2	69.2	67.9	67.6	67.0	65.0	65.9	66.9	69.8	71.9	70.0	68.3	66.6	63.5	60.4	57.7	54.6	53.6	52.4	50.1
$L_{Weq,l[6]}$	68.3	71.9	70.6	67.1	65.5	62.6	62.4	62.0	64.5	65.7	66.3	67.5	69.7	68.3	67.4	66.5	64.1	60.6	58.3	55.3	52.2	51.7	50.6	48.4
$L_{Weq,l[7]}$	64.7	72.5	70.4	64.6	65.6	64.2	63.9	64.8	71.0	69.0	68.9	70.3	70.7	67.8	65.3	63.2	61.0	57.4	55.1	52.5	49.3	48.5	47.6	46.0
$L_{Weq,l[8]}$	69.5	71.7	70.3	68.6	68.3	68.7	69.2	69.1	74.2	74.6	73.2	75.5	75.8	72.7	70.4	68.1	66.1	63.4	60.6	58.3	55.6	53.8	52.1	50.2
$L_{Weq,l[9]}$	74.0	77.7	74.6	72.0	72.8	71.4	72.6	70.2	71.7	75.2	75.1	77.4	79.2	76.4	73.8	71.6	69.3	66.6	63.8	61.9	59.7	58.5	57.4	55.6
$L_{Weq,l[10]}$	71.6	75.6	72.0	69.8	70.5	69.6	70.6	67.8	69.6	73.7	73.6	75.6	77.5	74.8	72.1	69.8	67.3	64.6	62.0	60.0	57.5	56.2	55.2	53.4
<i>Energetische Summe aller Fahrzeugkategorien:</i>																								
$L_{Weq,l}$	79.9	84.0	83.0	80.9	80.7	79.5	79.5	78.2	79.9	81.0	80.6	82.6	84.3	83.5	82.1	80.2	78.4	75.2	72.3	69.6	66.6	65.0	63.5	61.3

Tabelle F.8: Rechenbeispiel D: Teil 2 von 2 (Berechnung vertikale Richtwirkung und totale Schallleistung)

G Schallausbreitung in der Referenzgeometrie über hartem und weichem Boden

Strassenlärmemissionsmessungen werden typisch in der Referenzgeometrie 7.5/1.2 m durchgeführt, d.h. der horizontale Abstand zwischen Fahrspurmitte und Mikrofonposition beträgt 7.5 m und die Mikrofonhöhe ist 1.2 m. Wie mit untenstehendem Vergleich nachgewiesen wird, muss die Bodenfläche zwischen Strassenrand und Mikrofon akustisch hart sein um eindeutig reproduzierbare Verhältnisse herzustellen.

Zur Abschätzung des Einflusses von weichem Boden wird hier exemplarisch der Vergleich einer wellentheoretischen 2D-FDTD-Schallausbreitungssimulation, einmal für weichen und einmal für harten Boden gezeigt. Abbildung G.1 zeigt die Situation mit der Quelle 0.05 m über der harten Strasse. Ab dem 2 m entfernten Strassenrand verläuft der Boden einmal akustisch hart bzw. akustisch weich als Grasfläche. In Abbildung G.2 ist das Mikrofon-Terzbandspektrum im Fall des weichen Bodens bezogen auf den Fall des harten Bodens gezeigt. Im Frequenzbereich zwischen rund 200 Hz und 1.6 kHz liegen die Mikrofonpegel über weichem Boden systematisch und bis zu 2 dB tiefer als über hartem Boden.

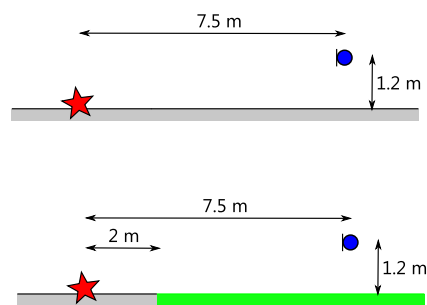


Abbildung G.1: Situation zur Schallausbreitung in der Referenzgeometrie über vollflächig hartem (oben) bzw. Grasboden (unten).

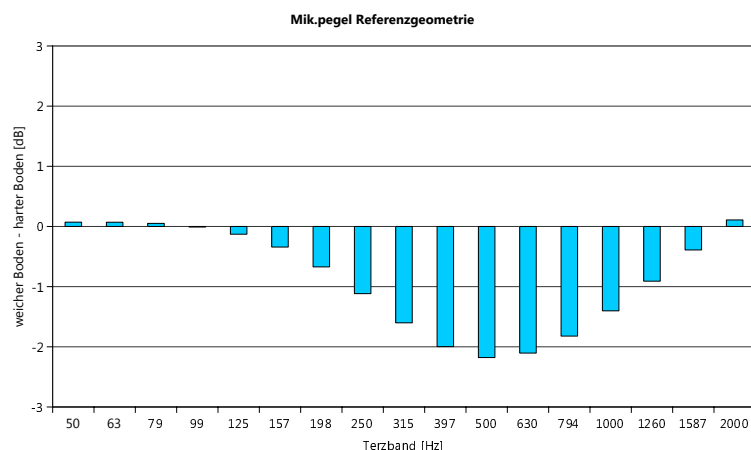


Abbildung G.2: Terzbandspektrum an einem Mikrofon in Referenzgeometrie bei Grasboden zwischen Strassenrand und Mikrofon bezogen auf die Situation mit hartem Boden.

H Zusammenhang zwischen arithmetischem und energetischem Mittelwert

Hier wird der in statistischen Analysen benötigte Zusammenhang zwischen arithmetischem und energetischem Mittelwert von im Pegel normalverteilten Einzelereignissen hergeleitet.

Für mit σ normalverteilte Pegel sind der Median und der arithmetische Mittelwert $\bar{L}$ identisch. Daraus lässt sich der Mittelwert $\bar{p}^2$ des Schalldruckquadrats wie folgt als Integral über die Pegelverteilung bestimmen:

$$\bar{p}^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} p_0^2 10^{0.1L} \phi(L) dL \quad (\text{H.1})$$

wobei p_0^2 das Quadrat des Referenzdrucks ist und $\phi(L)$ der Dichtefunktion der Normalverteilung entspricht.

$$\bar{p}^2 = p_0^2 \int_{-\infty}^{+\infty} 10^{0.1L} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(L - \bar{L})^2}{2\sigma^2}\right) dL \quad (\text{H.2})$$

Mit $10^{0.1L} = \exp(0.1 \ln(10)L)$ ergibt sich

$$\bar{p}^2 = \frac{p_0^2}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(0.1 \ln(10)L - \frac{(L - \bar{L})^2}{2\sigma^2}\right) dL \quad (\text{H.3})$$

Mit der Abkürzung $\alpha = 0.1 \ln(10)$ kann geschrieben werden:

$$\bar{p}^2 = \frac{p_0^2}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(\frac{\alpha 2\sigma^2 L - L^2 + 2L\bar{L} - \bar{L}^2}{2\sigma^2}\right) dL \quad (\text{H.4})$$

Der Integrand wird geeignet ergänzt, sodass der Zähler in der Exponentialfunktion als Quadrat geschrieben werden kann:

$$\bar{p}^2 = \frac{p_0^2}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(\frac{\alpha 2\sigma^2 L - L^2 + 2L\bar{L} - \bar{L}^2 - 2\bar{L}\alpha\sigma^2 - \alpha^2\sigma^4 + 2\bar{L}\alpha\sigma^2 + \alpha^2\sigma^4}{2\sigma^2}\right) dL \quad (\text{H.5})$$

$$\bar{p}^2 = \frac{p_0^2}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(\frac{+2\bar{L}\alpha\sigma^2 + \alpha^2\sigma^4}{2\sigma^2}\right) \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(\frac{\alpha 2\sigma^2 L - L^2 + 2L\bar{L} - \bar{L}^2 - 2\bar{L}\alpha\sigma^2 + \alpha^2\sigma^4}{2\sigma^2}\right) dL \quad (\text{H.6})$$

$$\bar{p}^2 = p_0^2 \exp\left(\frac{+2\bar{L}\alpha\sigma^2 + \alpha^2\sigma^4}{2\sigma^2}\right) \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(\frac{-(L - (\bar{L} + \alpha\sigma^2))^2}{2\sigma^2}\right) dL \quad (\text{H.7})$$

Der Integrand entspricht wiederum einer Dichtefunktion, entsprechend beläuft sich das Integral auf 1. Schliesslich wird der energetisch gemittelte Pegel L_{eq} in Abhängigkeit des arithmetischen Mittelwerts $\bar{L}$ und der Standardabweichung σ :

$$L_{eq} = 10 \lg\left(\frac{\bar{p}^2}{p_0^2}\right) = 10 \lg\left(\exp\left(\frac{2\bar{L}\alpha\sigma^2 + \alpha^2\sigma^4}{2\sigma^2}\right)\right) = 10 \lg(e) \left(\bar{L}\alpha + \frac{\alpha^2\sigma^2}{2}\right) = \bar{L} + 0.115\sigma^2 \quad (\text{H.8})$$

I Spektrale Luftdämpfungen

Die Tabelle I.1 zeigt die spektralen Luftdämpfungen für eine Lufttemperatur von +8 °C und eine relative Luftfeuchte von 76% bei der Integration einer Vorbeifahrt einer omnidirektionalen Punktquelle in unterschiedlichen Abständen.

freq	5 m	6 m	7 m	7.5 m	8 m	9 m	10 m	11 m	12 m	15 m
50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
63	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
125	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
160	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
250	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
315	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
400	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.1
500	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.1	-0.1
630	0	0	0	0	0	0	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1
800	0	0	0	0	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1
1000	0	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1
1250	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2
1600	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2
2000	-0.1	-0.1	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3
2500	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.5
3150	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.5	-0.5	-0.6	-0.6	-0.7
4000	-0.4	-0.5	-0.5	-0.6	-0.6	-0.7	-0.8	-0.8	-0.9	-1.1
5000	-0.6	-0.7	-0.8	-0.8	-0.9	-1.0	-1.1	-1.2	-1.3	-1.6
6300	-0.9	-1.0	-1.2	-1.2	-1.3	-1.5	-1.6	-1.7	-1.9	-2.3
8000	-1.3	-1.5	-1.7	-1.8	-1.9	-2.1	-2.3	-2.5	-2.7	-3.2
10000	-1.8	-2.1	-2.4	-2.5	-2.7	-2.9	-3.2	-3.5	-3.7	-4.5

Tabelle I.1: Spektraler Luftdämpfungsterm $A'_{\text{atm}}[z]$ für unterschiedliche Abstände d .

J Hinweise zu Korrekturen für Beschleunigungsvorgänge (Knoten und Kreisel)

J.1 CNOSSOS

100 m vor und nach ampelgesteuerten Kreuzungen und Kreiseln vergibt CNOSSOS Korrekturen, die das Antriebsgeräusch erhöhen und das Rollgeräusch vermindern, um die Veränderung der akustischen Emission bei ungleichförmiger Fahrweise zu beschreiben. Die Korrektur wird auf den für die signalisierte Geschwindigkeit ermittelten Emissionswert angewendet. Tabelle J.1 zeigt informativ einige exemplarische Berechnungen für Tempo 30 und 50 gemäss CNOSSOS.

30 km/h	Ampel 80 m	Ampel 60 m	Ampel 40 m	Ampel 20 m	Ampel 1 m
cat3 (PW)	-0.2	-0.3	-0.1	0.3	0.9
cat5 (Lieferw.)	0.1	0.4	0.9	1.6	2.4
cat8 (LKW)	1.1	2.4	3.9	5.6	7.2
50 km/h	Ampel 80 m	Ampel 60 m	Ampel 40 m	Ampel 20 m	Ampel 1 m
cat3 (PW)	-0.7	-1.2	-1.6	-1.8	-1.8
cat5 (Lieferw.)	-0.4	-0.7	-0.7	-0.6	-0.2
cat8 (LKW)	0.3	0.9	1.9	3.2	4.7
30 km/h	Kreisel 80 m	Kreisel 60 m	Kreisel 40 m	Kreisel 20 m	Kreisel 1 m
cat3 (PW)	-0.4	-0.7	-0.9	-0.9	-0.8
cat5 (Lieferw.)	-0.2	-0.2	-0.1	0.1	0.4
cat8 (LKW)	0.8	1.8	2.8	4.0	5.1
50 km/h	Kreisel 80 m	Kreisel 60 m	Kreisel 40 m	Kreisel 20 m	Kreisel 1 m
cat3 (PW)	-0.7	-1.4	-1.9	-2.4	-2.8
cat5 (Lieferw.)	-0.6	-1.0	-1.3	-1.6	-1.7
cat8 (LKW)	0.2	0.7	1.3	2.1	2.9

Tabelle J.1: Exemplarisch berechnete Totalgeräusch-Emissionspegelkorrekturen [dB(A)] in unterschiedlichen Abständen von ampelgesteuerten Kreuzungen und Kreiseln auf dem Referenzbelag ACMR8 gemäss CNOSSOS.

J.2 Beschleunigungsvorgangssimulation

sonROAD18 verzichtet auf eine integrale Pegelkorrektur im Nahbereich von Knoten und Kreiseln, wie sie in CNOSSOS vorgesehen ist. Wenn in speziellen Fällen eine Korrektur berücksichtigt werden soll, kann der Beschleunigungsvorgangs explizit simuliert werden. Eine plausible Annahme ist, dass die erhöhte Motorbelastung während einer Beschleunigung mit a der erhöhten Motorbelastung bei der Bergwärtsfahrt auf einer Strecke mit Steigung s gleichgesetzt werden kann, wobei:

$$a = 9.8 \cdot \sin(\alpha) , \quad \tan(\alpha) = \frac{s}{100} , \quad a \text{ in [m/s}^2\text{]} , \quad s \text{ in \%} \quad (\text{J.1})$$

Für nicht zu grosse Winkel α bzw. Steigungen s können $\sin(\alpha)$ und $\tan(\alpha)$ angenähert gleich gesetzt werden:

$$s \approx \frac{a \cdot 100}{9.8} \quad (\text{J.2})$$

Mit Gl. J.2 lässt sich damit der Beschleunigungsvorgang mit a durch eine äquivalente Steigungssituation mit Steigung s ersetzen. Abhängig vom Fahrzeugtyp kann von den in Tabelle J.2 gezeigten Beschleunigungen ausgegangen werden [34]. Zusätzlich zeigt die Tabelle die Distanzen d_{v30} und d_{v50} mit

$$d_v = \frac{(v/3.6)^2}{2a}, \quad v \text{ in [km/h]} \quad (\text{J.3})$$

für das Erreichen der Endgeschwindigkeiten 30 bzw. 50 km/h.

SWISS10-Kat. c	a typisch	a maximal	Distanz bei 30 km/h	Distanz bei 50 km/h
1	1.0	2.0	35	96
1b	1.0	2.0	35	96
2	3.0	6.0	12	32
3	2.0	4.5	17	48
3b	2.0	4.5	17	48
3c	2.0	4.5	17	48
4	2.0	4.5	17	48
5	2.0	4.5	17	48
6	2.0	4.5	17	48
7	2.0	4.5	17	48
8	0.8	1.5	43	121
9	0.6	1.3	58	161
10	0.6	1.3	58	161
11	0.6	1.3	58	161

Tabelle J.2: Typische und maximale Anfahrbeschleunigungen a in $[\text{m/s}^2]$ gemäss [34] und Distanzen in $[\text{m}]$ bei Erreichen der Endgeschwindigkeit 30 bzw. 50 km/h bei typischer Beschleunigung.

Für die Simulation eines anfahrenden Fahrzeugs wird der relevante Strassenabschnitt geeignet in Zonen $z[j]$ unterteilt. Mit der als konstant angenommenen Beschleunigung a in $[\text{m/s}^2]$ wird in jedem Zonenmittelpunkt $x[j]$ in $[\text{m}]$ die Fahrzeuggeschwindigkeit $v[c, j]$ in $[\text{km/h}]$ gemäss

$$v[c, j] = 3.6 \sqrt{2 \cdot a[c] \cdot x[j]} \quad (\text{J.4})$$

bestimmt. Die Beschleunigung wird auf 0 zurückgesetzt, sobald die Endgeschwindigkeit erreicht ist. Der Schallleistungspegel des Antriebsgeräusches in einer Zone ist:

$$L_{W,P}[c, i] = A_P[c, i] + B_P[c, i] \frac{v[c] - v_{\text{ref}}}{v_{\text{ref}}} + \Delta L_{W,P,\text{grad}}[c] \quad (\text{J.5})$$

mit $v[c] = \max(v[c, j]; 20)$, $v_{\text{ref}} = 70 \text{ km/h}$ und A_P und B_P gemäss Tabelle 10.3 und 10.4. $\Delta L_{W,P,\text{grad}}[c]$ ist mit s gemäss Gl. J.2 die äquivalente Steigungskorrektur entsprechend Gl. J.6.

$$\Delta L_{W,P,\text{grad}}[c] = \begin{cases} 0 & : c = 2 \\ \frac{s-2\%}{1.5\%} \cdot \frac{v}{100} & : c = 3, 4, 5, 6, 7 \\ \frac{s}{0.8\%} \cdot \frac{v}{100} & : c = 1, 8, 9, 10 \end{cases} \quad (\text{J.6})$$

Gl. J.6 weicht durch das Fehlen der Begrenzung auf 12% von der gewöhnlichen Steigungskorrektur ab. Diese Begrenzung modelliert im Falle einer echten Steigung die zu erwartende Geschwindigkeitsabnahme bei starken Gefällsstrecken. Da hier im Zusammenhang mit der Beschleunigungssimulation die Geschwindigkeit explizit bestimmt wird, wird diese Begrenzung ignoriert.

Der Schallleistungspegel des Rollgeräusches in einer Zone ist:

$$L_{W,R}[c, i] = A_R[c, i] + B_R[c, i] \lg \left(\frac{v[c]}{v_{\text{ref}}} \right) + \Delta L_{W,R,\text{road}}[i] + \Delta L_{W,R,\text{temp}}[c] + \Delta L_{W,R,\text{tire}}[c, \text{Belag}] \quad (\text{J.7})$$

mit $v[c] = v[c, j] > 0$, $v_{\text{ref}} = 70 \text{ km/h}$ und A_R und B_R gemäss Tabelle 10.5 und 10.6. $\Delta L_{W,R,\text{road}}[i]$, $\Delta L_{W,R,\text{temp}}[c]$ und $\Delta L_{W,R,\text{tire}}[c, \text{Belag}]$ sind die oben beschriebenen Korrekturterme für den Belag, die Lufttemperatur und den Reifentyp.

Die Abbildungen J.1 bis J.3 zeigen die so ermittelten ortsabhängigen Schallleistungspegel für die typische Beschleunigung aus Stillstand auf einem ACMR8 Referenzbelag. Bei der spezifischen Simulation von Beschleunigungsvorgängen ist zu berücksichtigen, dass beispielsweise im Kreuzungsbereich nur ein Teil der Fahrzeuge aus Stillstand beschleunigen und die anderen Fahrzeuge konstant durchfahren, weil sie in eine grüne Phase fallen oder bei einer längeren Kolonne bereits weiter hinten beschleunigen.

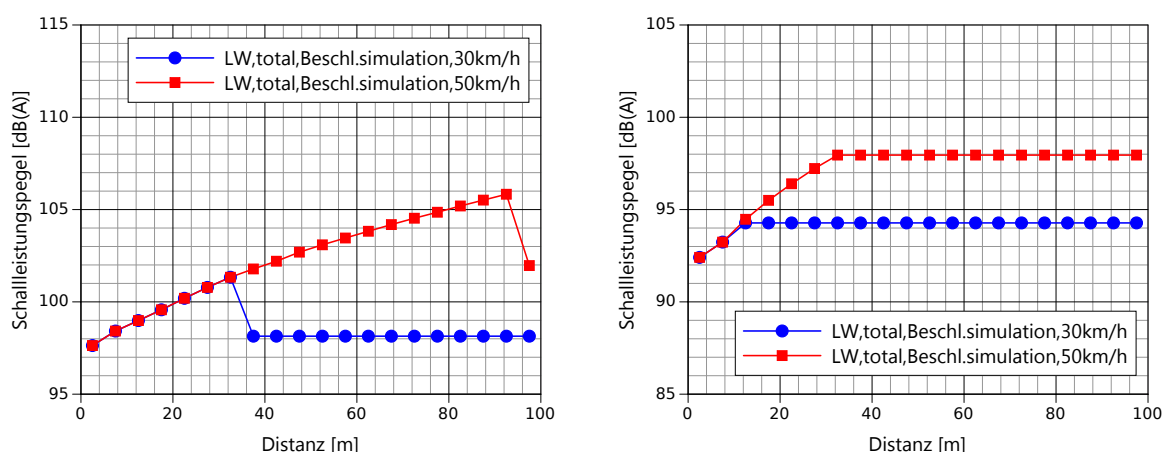


Abbildung J.1: Simulation des ortsabhängigen Schallleistungspegels von Bussen (SWISS10-1) (links) und von Motorrädern (SWISS10-2) (rechts) bei einer typischen Beschleunigung von 0 auf 30 km/h bzw. 50 km/h.

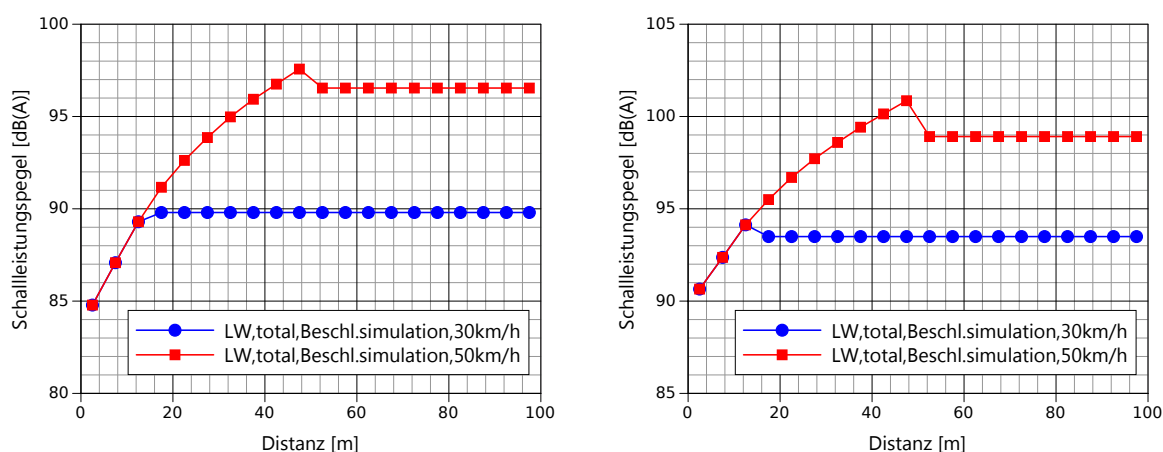


Abbildung J.2: Simulation des ortsabhängigen Schallleistungspegels von PWs (SWISS10-3) (links) und von Lieferwagen (SWISS10-5) (rechts) bei einer typischen Beschleunigung von 0 auf 30 km/h bzw. 50 km/h.

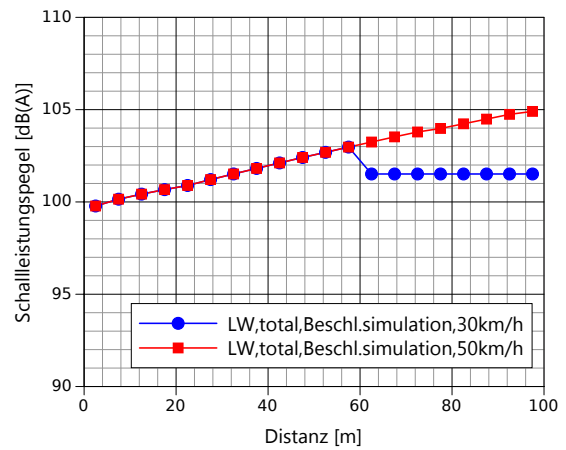
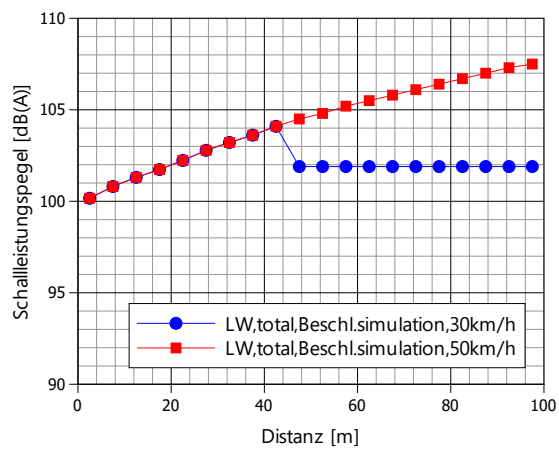


Abbildung J.3: Simulation des ortsabhängigen Schallleistungspegels von Lastwagen (SWISS10-8) (links) und von Sattelzügen (SWISS10-10) (rechts) bei einer typischen Beschleunigung von 0 auf 30 km/h bzw. 50 km/h.

K Konformitätserklärung zur Implementierung von sonROAD18 in Verbindung mit einem Ausbreitungsmodell

Grundlagen:

- *sonROAD18*: Modelldokumentation
- *LSV*: Lärmschutzverordnung vom 15. Dezember 1986 (Stand am 1. Januar 2016).

	ja	eingeschr.	nein
In der Referenzeinstellung kann der Beurteilungspegel von Strassenverkehrslärm an einem oder mehreren Immissionspunkten errechnet werden und zwar			
getrennt für Tag (06.00 - 22.00 Uhr) und Nacht (22.00 - 06.00 Uhr)	☐	☐	☐
unter Berücksichtigung von mehreren Quellen	☐	☐	☐
unter Berücksichtigung der Anzahl Fz. in SWISS10-Kategorien	☐	☐	☐
unter Berücksichtigung der verkehrsmengenabhängigen Korrektur K1 (LSV, Anhang 3)	☐	☐	☐
wahlweise für neutrale oder förderliche Ausbreitungsbedingungen	☐	☐	☐
In der Referenzeinstellung werden die Quellenpolygonzüge geeignet diskretisiert			
in Punktquellen in hinreichend kleinem Abstand	☐	☐	☐
auf einer Höhe von 0.05 m über der Strassenoberfläche	☐	☐	☐
In der Referenzeinstellung wird die Quellenleistung der Punktquellen bestimmt unter Berücksichtigung			
der repräsentierten Segmentlänge	☐	☐	☐
der Geschwindigkeit in den SWISS10-Kategorien	☐	☐	☐
der vertikalen Abstrahlcharakteristik	☐	☐	☐
einer allfälligen Steigungskorrektur	☐	☐	☐
einer allfälligen Belagskorrektur	☐	☐	☐
einer allfälligen Temperaturkorrektur	☐	☐	☐
In der Referenzeinstellung wird im Vertikalschnitt die Direktschall-Ausbreitungsdämpfung von jedem Quellenpunkt zum Empfängerpunkt in Terzen oder Oktaven bestimmt			
indem folgende Dämpfungsterme berücksichtigt werden			
Geometrische Verdünnung	☐	☐	☐
Luftdämpfung	☐	☐	☐
Bodeneffekt (Bodenbeschaffenheit) und Hinderniswirkung (förderlich/neutral)	☐	☐	☐
Dämpfung beim Schalldurchgang durch Vegetation	☐	☐	☐
In der Referenzeinstellung werden mit einem geeigneten Modell die an vertikalen Strukturen reflektierten Anteile in Terzen oder Oktaven bestimmt	☐	☐	☐
In der Referenzeinstellung werden die Beiträge aller Quellen und Reflexionen energetisch zum Immissionspegel aufaddiert	☐	☐	☐
In der Referenzeinstellung werden die im Dokument sonROAD18 aufgeführten Beispielrechnungen (Schallleistungspegel) auf 0.1 dB genau reproduziert	☐	☐	☐

Tabelle K.1: Konformitätserklärung betreffend die Implementierung des Formelwerkes sonROAD18.