

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

sonROAD18 - Weiterentwicklungen und Ergänzungen

Version 3.0

Berechnungsmodell für Strassenlärm

Empa-Nr. 5214.019298, 5214.023513
2024-10-14



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: Kurt Heutschi, Urs Pachale
Begleitung BAFU: Michael Gerber

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

Änderungsverzeichnis

Version	Datum	Bemerkungen	Kap./Abs.
1.0	30.11.2020	-	-
2.0	07.02.2023	<ul style="list-style-type: none">• Korrektur im DTV-SWISS10-Konverter: Eintrag für cat8 in Zeile SS-50 nachts: richtig 0.00647, falsch 0.03416• Erweiterung des DTV- und N1/N2-SWISS10-Konverters um die Verkehrssituation sechsspurige Autobahn• Hinzufügen der Emissionskoeffizienten für den Tramtyp Flexity Zürich der VBZ und für die Forchbahn Be 4/6	Kap. 4 Kap. 4 Abs. 3.3
3.0	14.10.2024	<ul style="list-style-type: none">• Aktualisieren der Emissionskoeffizienten für den Tramtyp Flexity Zürich der VBZ. Hinzufügen der Emissionskoeffizienten für den Tramtyp Tramlink der Limmattalbahn	Abs. 3.3

Zitiervorschlag

Heutschi K, Pachale U, 2024: sonROAD18 - Berechnungsmodell für Strassenlärm - Weiterentwicklungen und Ergänzungen.

PDF-Download

Dieses Dokument kann auf der BAFU-Webseite (www.bafu.admin.ch) heruntergeladen werden.

Eine gedruckte Fassung kann nicht bestellt werden.

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	5
2	Auftrag und Projektteam	6
3	Emissionskoeffizienten weiterer Fahrzeugkategorien	7
3.1	Einleitung	7
3.2	Busse städtischer Verkehrsbetriebe	7
3.3	Tramfahrzeuge	14
3.4	Landwirtschaftliche Fahrzeuge	22
4	Ergänzter SWISS10-Konverter	27
4.1	Einleitung	27
4.2	Zusätzliche Verkehrszählungen	27
4.3	Auswertung	29
4.4	Gegenüberstellung der gezählten und geschätzten MFM-U Verkehrsmengen	32
5	Akustisch relevante Geschwindigkeit	39
5.1	Einleitung	39
5.2	Datenbasis	39
5.3	Auswerteprozedur	39
5.4	Ergebnisse	40
5.5	Analyse der Verteilungsfunktion der Normalverteilung	40
6	CPX-Schnittstelle bzw. CPX-Umrechnungsmodell	41
6.1	Einleitung	41
6.2	Existierende CPX-SPB-KB-Umrechnungsmodelle	41
6.3	Datengrundlage für das neue Umrechnungsmodell	45
6.4	Datenaufbereitung	46
6.5	Formalismus der Schnittstelle $\Delta L_{W,R,road,\leftarrow-CPX,v}[i]$	53
6.6	Parameteranpassung	53
6.7	CPX-Standardspektren	56
6.8	sonROAD18-Standard-Belagskorrekturspektren	59
7	Testaufgaben inklusive Ausbreitungsrechnung	62
7.1	Einleitung	62
7.2	Eigene Implementierung	62
7.3	Detaillierte Rechenschritte in Oktavbändern	62
7.4	Detaillierte Rechenschritte in Terzbändern	63
7.5	Testaufgabe 1: Lange Strasse, freie Ausbreitung über Grasboden	65
7.6	Testaufgabe 2: Lange Strasse, freie Ausbreitung über hartem Boden	67
7.7	Testaufgabe 3: Lange Strasse, parallele Häuserzeile, harter Boden	69
7.8	Testaufgabe 4: Lange Strasse, abgeschirmte Ausbreitung über hartem Boden	72
7.9	Testaufgabe 5: Lange Strasse, freie Ausbreitung über hartem Boden, hohe Elevationswinkel	75
7.10	Testaufgabe 6: Kurze Strasse, freie Ausbreitung über hartem Boden, hohe Elevationswinkel	77

8	Immissionspegelvergleich sonROAD18 und StL-86+	79
8.1	Verkehrs- und Meteoszenario	79
8.2	Unabgeschirmte Ausbreitung über ebenem Grasboden	80
8.3	Unabgeschirmte Ausbreitung über ebenem hartem Boden	82
8.4	Abgeschirmte Ausbreitung über ebenem hartem Boden	84
8.5	Quellennah abgeschirmte Ausbreitung über ebenem Grasboden	86
8.6	Interpretation des Vergleichs	88
9	Vergleich VSS-T30 und sonROAD18	89
9.1	Einleitung	89
9.2	Szenarien	89
9.3	Beobachtete akustische Grösse	89
9.4	Ergebnisse	90
	Literaturverzeichnis	91
A	Geschwindigkeitsperzentil-Details	93
A.1	SWISS10-Kategorie 1	93
A.2	SWISS10-Kategorie 2	94
A.3	SWISS10-Kategorie 3	95
A.4	SWISS10-Kategorie 4	96
A.5	SWISS10-Kategorie 5	97
A.6	SWISS10-Kategorie 6	98
A.7	SWISS10-Kategorie 7	99
A.8	SWISS10-Kategorie 8	100
A.9	SWISS10-Kategorie 9	101
A.10	SWISS10-Kategorie 10	102

1 Zusammenfassung

In Ergänzung der sonROAD18-Modelldokumentation [1] werden hier die zwischenzeitlich entwickelten Modellerweiterungen beschrieben. Für die Fahrzeugkategorien *Busse städtischer Verkehrsbetriebe* sowie *Tramfahrzeuge* sind jetzt sonROAD18 Modellparameter verfügbar. Unter Einbezug von zusätzlichen Verkehrszähl-daten wurde der SWISS10-Konverter aktualisiert und neu in einer Version ausgewertet, die die Eingabe von Tag/Nacht-aufgeschlüsselten N1 und N2 Werten ermöglicht. Für die Charakterisierung einer gemessenen Geschwindigkeitsverteilung durch einen geeigneten Perzentilwert wurde eine statistische Analyse von Daten aus automatischen Verkehrszählungen vorgenommen. Dabei haben sich optimale Perzentilwerte zwischen 50 und 60 % ergeben. Die Empfindlichkeit hinsichtlich der Wahl des Perzentils ist aber gering, sodass auch die mittlere gefahrene Geschwindigkeit oder der Medianwert gute Indikatoren sind. Mit der CPX-Schnittstelle steht ein Umrechnungsmodell zur Verfügung, das CPX-Spektren in sonROAD18-Belagskorrekturspektren übersetzt. Der Anschluss an die Belagscharakterisierung mittels KB-Wert ist über von der Grolimund + Partner AG, Bern festgelegte CPX-Standardspektren möglich. Für die Implementierung der Ausbreitungsrechnung nach ISO 9613-2 in Terzbandauflösung wurden die bisherigen Testaufgaben entsprechend ergänzt. Und schliesslich zeigt ein Immissionspegelvergleich zwischen sonROAD18 mit Ausbreitungsrechnung nach ISO-9613-2 und StL-86+ anhand der Prototyp-Ausbreitungssituationen: *ebener Grasboden*, *ebener Hartbelag* und *Abschirmung* modellspezifische Unterschiede auf.

2 Auftrag und Projektteam

Mit Vertrag vom 24. Mai 2018, 14. Mai und 27. November 2019 beauftragte das BAFU, Abteilung Lärm und NIS die Empa, Abteilung Akustik/Lärmminderung mit ergänzenden Arbeiten rund um die Umsetzung des neuen Strassenlärmemissionsmodells sonROAD18 [1].

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 (bis 2023); Urs Pachale (ab 2024)

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

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

Kirk Ingold, 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

3 Emissionskoeffizienten weiterer Fahrzeugkategorien

3.1 Einleitung

Hier werden für Fahrzeugtypen, die nicht oder nur verallgemeinert durch die SWISS10-Fahrzeugkategorien abgedeckt sind, zusätzliche Emissionsmodelle angeboten. Diese Fahrzeugtypen umfassen Busse städtischer Verkehrsbetriebe, Trams und landwirtschaftliche Fahrzeuge.

3.2 Busse städtischer Verkehrsbetriebe

Gestützt auf eine Messkampagne der B+S AG, 3000 Bern 15 [2] an Bussen städtischer Verkehrsbetriebe werden hier für verschiedene Bus-Kategorien sonROAD18-Emissionsmodelle hergeleitet. Ausgehend von der Ereignisenergiemessung L_E in der Referenzgeometrie im Abstand $d = 7.5$ m wurde in jedem Terzband eine Schalleistung gemäss Gleichung 3.1 bestimmt und dann in einer Parameter-Anpass-Prozedur die optimalen sonROAD18-Parameter A_P , B_P , A_R und B_R ermittelt.

$$L_W = L_E + 10\lg(v) + 10\lg(2) - 10\lg(3.6) + 10\lg(d) - A'_{\text{atm}} \quad (3.1)$$

In Gleichung 3.1 bezeichnet v die Geschwindigkeit in km/h und A'_{atm} die frequenzabhängige Luftdämpfung für die ganze Vorbeifahrt gemäss Tabelle 3.1.

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

Tabelle 3.1: Spektraler A'_{atm} Term in Gleichung 3.1.

Die vermessenen Busse wurden der Einteilung in [2] folgend in sechs Typen gruppiert:

- A** Diesel-Standardbus, 2 Achsen
- B** Diesel-Gelenkbus, 3 Achsen
- C** Gasbus, 3 Achsen
- D** Hybridbus, 2...3 Achsen
- E** Elektro-Gelenkrolley, 3 Achsen
- F** Elektro-Doppelgelenkrolley, 4 Achsen

Zur Festigung der statistischen Basis wurde für alle Buskategorien pro Achse ein identisches Rollgeräusch angenommen. Damit ergeben sich im festgelegten Parameter-Suchbereich die in Tabellen 3.2 bis 3.5 aufgelisteten sonROAD18 Modelle. Wenn in einem Anwendungsfall keine spezifische Information über die Akustik des zu modellierenden Bustyps vorliegt, wird empfohlen, als Repräsentanten den ähnlichsten Typ aus dem Katalog A bis F einzusetzen.

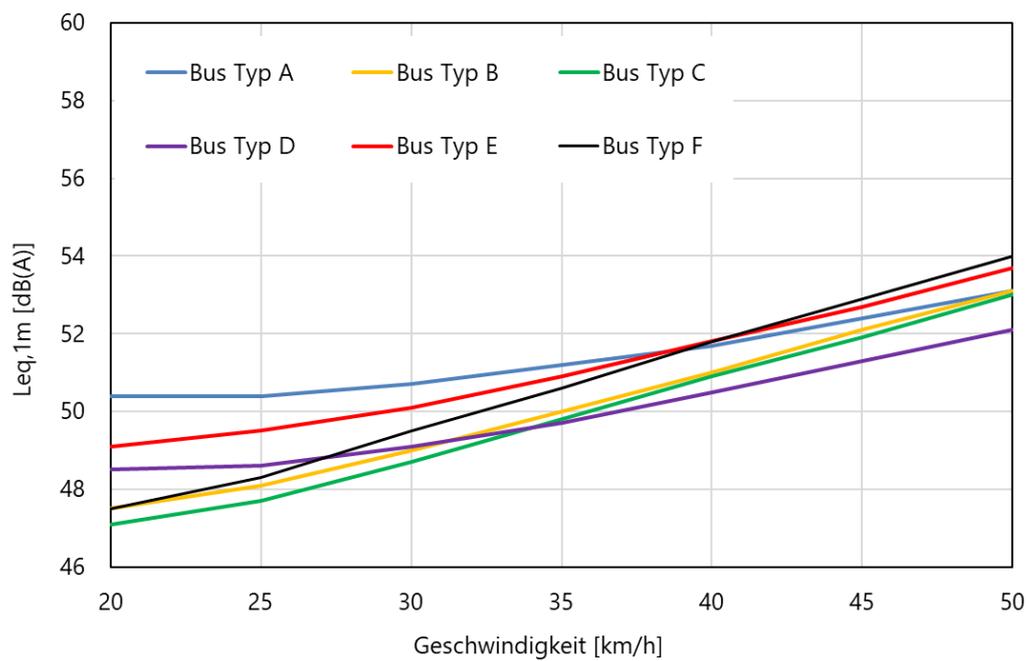


Abbildung 3.1: Zusammenstellung der geschwindigkeitsabhängigen Emissionen der sechs Bustypen als Leq in 1 m Abstand für eine Vorbeifahrt pro Stunde.

Terzband	Typ A	Typ B	Typ C	Typ D	Typ E	Typ F
50	96.7	106.0	106.1	100.8	101.9	99.0
63	92.7	106.2	106.3	88.9	93.5	93.8
80	90.1	99.3	99.2	90.9	91.2	91.2
100	91.5	94.4	94.3	87.7	93.2	91.2
125	94.1	95.0	95.0	88.3	94.7	92.9
160	92.7	94.4	94.2	89.8	93.5	93.8
200	92.9	90.6	90.6	90.1	94.1	96.4
250	98.7	93.5	93.4	93.5	98.2	95.0
315	95.0	92.9	92.8	88.9	96.7	92.4
400	92.4	92.9	92.8	86.0	93.8	91.2
500	94.7	82.5	81.7	93.8	95.0	88.6
630	94.4	91.5	90.7	92.7	94.4	88.3
800	95.8	90.3	87.2	93.5	93.8	89.5
1000	94.4	91.2	90.5	92.1	92.9	89.5
1250	92.4	85.7	83.7	88.9	89.8	88.3
1600	90.3	84.0	82.0	87.5	86.6	84.9
2000	88.0	83.7	82.9	84.6	82.3	80.5
2500	86.9	84.0	83.4	84.9	79.4	78.8
3150	84.9	83.4	83.1	83.1	81.7	79.4
4000	82.8	84.0	83.8	81.1	81.4	84.3
5000	80.8	82.0	81.7	75.3	76.8	81.4
6300	77.6	81.4	81.4	71.6	75.0	79.9
8000	75.3	79.7	79.7	71.3	76.5	77.6
10000	73.6	78.2	78.1	71.6	75.0	75.6

Tabelle 3.2: Spektrale A_P Parameter der Antriebsgeräuschkomponente für die verschiedenen Bustypen.

Terzband	Typ A	Typ B	Typ C	Typ D	Typ E	Typ F
50	1.0	1.0	1.0	9.9	9.9	9.9
63	9.9	9.9	10.0	1.0	5.4	9.9
80	1.0	9.9	10.0	1.0	3.4	1.0
100	7.3	1.0	1.0	1.0	9.9	1.0
125	8.1	9.9	10.0	1.0	9.7	6.9
160	1.0	6.9	6.6	1.0	1.0	3.4
200	2.1	1.0	1.0	6.0	4.1	9.9
250	9.9	9.9	10.0	9.9	9.9	9.9
315	9.9	9.9	10.0	1.0	9.9	9.9
400	9.9	9.9	10.0	1.0	9.9	9.9
500	9.9	1.0	1.0	9.9	9.9	9.9
630	9.3	9.9	10.0	6.5	9.9	9.9
800	9.9	9.9	5.8	9.9	9.9	9.9
1000	9.9	9.9	10.0	9.9	9.9	9.9
1250	8.0	9.9	10.0	7.8	9.9	9.9
1600	9.8	9.9	10.0	9.9	9.9	9.9
2000	8.3	9.9	10.0	9.9	9.9	9.9
2500	7.7	9.9	10.0	9.5	9.9	9.9
3150	7.6	9.9	10.0	9.6	9.6	1.0
4000	4.8	9.9	10.0	9.6	9.9	5.6
5000	5.9	9.9	10.0	1.9	9.9	9.9
6300	6.8	9.9	10.0	1.1	9.9	9.9
8000	7.2	9.6	9.9	1.0	9.9	9.9
10000	9.3	9.9	10.0	1.0	9.9	9.9

Tabelle 3.3: Spektrale B_P Parameter der Antriebsgeräuschkomponente für die verschiedenen Bustypen.

Terzband	Typ A	Typ B	Typ C	Typ D	Typ E	Typ F
50	88.8	90.5	90.5	88.8	90.5	91.8
63	94.1	95.9	95.9	94.1	95.9	97.1
80	90.4	92.1	92.1	90.4	92.1	93.4
100	90.6	92.4	92.4	90.6	92.4	93.6
125	90.6	92.4	92.4	90.6	92.4	93.6
160	86.7	88.4	88.4	86.7	88.4	89.7
200	87.1	88.9	88.9	87.1	88.9	90.1
250	92.6	94.3	94.3	92.6	94.3	95.6
315	92.5	94.3	94.3	92.5	94.3	95.5
400	93.4	95.2	95.2	93.4	95.2	96.4
500	97.9	99.7	99.7	97.9	99.7	100.9
630	100.0	101.8	101.8	100.0	101.8	103.0
800	100.2	102.0	102.0	100.2	102.0	103.2
1000	97.7	99.4	99.4	97.7	99.4	100.7
1250	96.6	98.4	98.4	96.6	98.4	99.6
1600	94.2	95.9	95.9	94.2	95.9	97.2
2000	91.3	93.0	93.0	91.3	93.0	94.3
2500	88.1	89.9	89.9	88.1	89.9	91.1
3150	85.3	87.1	87.1	85.3	87.1	88.3
4000	82.5	84.3	84.3	82.5	84.3	85.5
5000	80.7	82.4	82.4	80.7	82.4	83.7
6300	79.0	80.8	80.8	79.0	80.8	82.0
8000	76.1	77.9	77.9	76.1	77.9	79.1
10000	73.4	75.2	75.2	73.4	75.2	76.4

Tabelle 3.4: Spektrale A_R Parameter der Rollgeräuschkomponente für die verschiedenen Bustypen.

Terzband	Typ A	Typ B	Typ C	Typ D	Typ E	Typ F
50	32.4	32.4	32.4	32.4	32.4	32.4
63	35.2	35.2	35.2	35.2	35.2	35.2
80	35.9	35.9	35.9	35.9	35.9	35.9
100	35.5	35.5	35.5	35.5	35.5	35.5
125	38.6	38.6	38.6	38.6	38.6	38.6
160	34.9	34.9	34.9	34.9	34.9	34.9
200	35.4	35.4	35.4	35.4	35.4	35.4
250	39.2	39.2	39.2	39.2	39.2	39.2
315	39.7	39.7	39.7	39.7	39.7	39.7
400	34.6	34.6	34.6	34.6	34.6	34.6
500	39.4	39.4	39.4	39.4	39.4	39.4
630	39.2	39.2	39.2	39.2	39.2	39.2
800	39.6	39.6	39.6	39.6	39.6	39.6
1000	36.8	36.8	36.8	36.8	36.8	36.8
1250	34.9	34.9	34.9	34.9	34.9	34.9
1600	33.4	33.4	33.4	33.4	33.4	33.4
2000	33.1	33.1	33.1	33.1	33.1	33.1
2500	32.3	32.3	32.3	32.3	32.3	32.3
3150	29.1	29.1	29.1	29.1	29.1	29.1
4000	29.1	29.1	29.1	29.1	29.1	29.1
5000	33.3	33.3	33.3	33.3	33.3	33.3
6300	34.7	34.7	34.7	34.7	34.7	34.7
8000	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3
10000	35.4	35.4	35.4	35.4	35.4	35.4

Tabelle 3.5: Spektrale B_R Parameter der Rollgeräuschkomponente für die verschiedenen Bustypen.

In einer zusätzlichen Messkampagne wurden in der Stadt Zürich die folgenden Batteriebusse im Auftrag der Verkehrsbetriebe Zürich (VBZ) und des Umwelt- und Gesundheitsschutzes der Stadt Zürich (UGZ) vermessen und deren Emissionsunterschiede diskutiert [3]:

SOR EBN 8 Elektromidibus, 2 Achsen

Volvo 7900 EH Elektrohybridstandardbus, 2 Achsen

Caetano Elektrostandardbus, 2 Achsen

Swisstrolley+ Gelenkbus mit Batterie, 3 Achsen

Analog der oben beschriebenen Prozedur wurden entsprechende sonROAD18-Emissionsmodellparameter bestimmt (Tabellen 3.6 bis 3.9). Die A-bewerteten Messpegel werden durch das Modell fahrzeugtypabhängig mit einer Standardunsicherheit von 0.6 bis 2.6 dB(A) reproduziert.

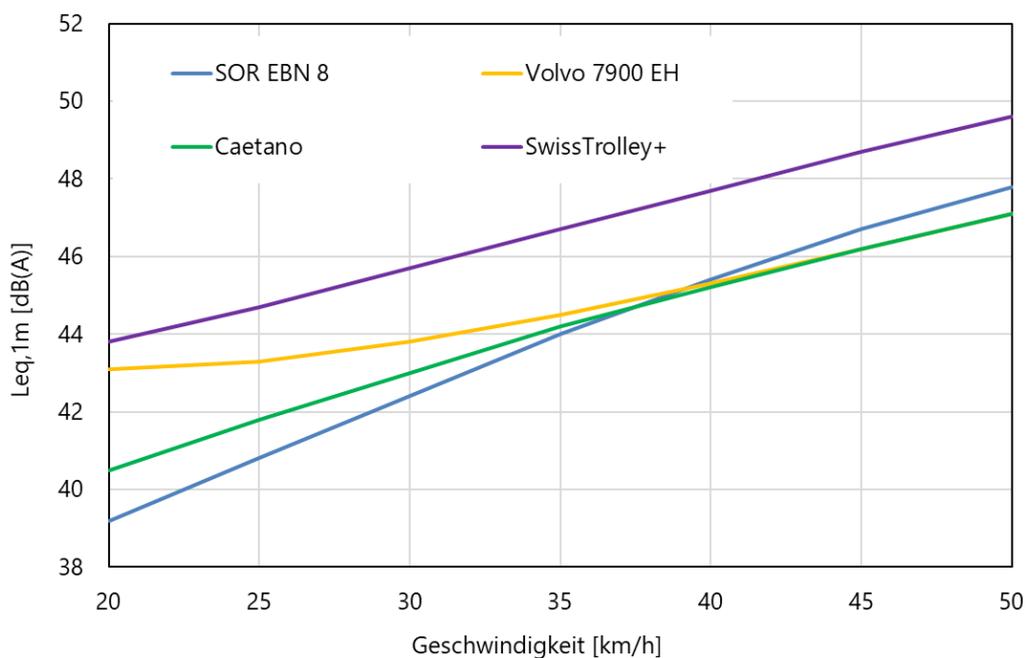


Abbildung 3.2: Zusammenstellung der geschwindigkeitsabhängigen Emissionen der vier Batteriebusstypen als Leq in 1 m Abstand für eine Vorbeifahrt pro Stunde.

Terzband	SOR EBN 8	Volvo 7900EH	Caetano	Swisstrolley+
50	60.0	89.9	86.1	85.4
63	80.1	90.6	60.0	88.4
80	77.9	86.9	60.0	89.9
100	60.0	83.9	77.2	88.4
125	60.0	87.6	67.5	89.1
160	80.1	84.6	71.2	83.9
200	79.4	85.4	81.6	86.1
250	82.4	81.6	75.7	60.0
315	81.6	83.1	60.0	77.9
400	60.0	82.4	80.1	76.4
500	60.0	81.6	60.0	88.4
630	78.7	77.0	60.0	88.4
800	60.0	74.9	60.0	60.0
1000	60.0	75.7	78.7	86.9
1250	60.0	80.1	73.4	83.1
1600	60.0	79.4	60.0	77.9
2000	60.0	77.2	60.0	70.4
2500	71.9	78.7	71.9	68.2
3150	69.7	75.7	65.2	71.9
4000	60.0	73.4	69.0	72.7
5000	60.0	72.7	66.7	71.2
6300	60.0	69.0	61.5	66.7
8000	60.0	68.2	60.0	68.2
10000	62.2	66.7	62.2	66.7

Tabelle 3.6: Spektrale A_P Parameter der Antriebsgeräuschkomponente für die verschiedenen Batteriebstypen.

Terzband	SOR EBN 8	Volvo 7900EH	Caetano	Swisstrolley+
50	9.9	10.0	1.0	5.7
63	1.0	10.0	9.9	1.0
80	9.9	1.0	9.9	1.3
100	8.4	2.0	1.0	9.9
125	8.4	1.5	1.0	9.9
160	5.3	1.0	1.0	1.0
200	9.9	1.0	1.0	1.5
250	1.3	1.3	4.1	9.9
315	1.3	1.0	9.9	3.3
400	9.9	1.0	1.4	1.0
500	8.4	5.9	9.9	8.8
630	1.0	10.0	9.9	9.1
800	9.9	1.0	9.9	9.7
1000	9.9	1.0	1.1	9.9
1250	8.4	6.1	9.9	9.2
1600	9.9	2.7	9.9	5.0
2000	9.9	1.0	8.4	1.0
2500	9.9	1.0	1.7	1.4
3150	1.3	1.1	1.0	5.0
4000	9.9	1.0	9.6	9.3
5000	9.9	1.4	9.5	6.1
6300	9.9	1.0	1.4	4.2
8000	9.9	1.1	1.7	9.5
10000	6.2	1.0	1.0	7.0

Tabelle 3.7: Spektrale B_P Parameter der Antriebsgeräuschkomponente für die verschiedenen Batteriebstypen.

Terzband	SOR EBN 8	Volvo 7900EH	Caetano	Swisstrolley+
50	92.6	95.0	94.8	97.0
63	86.1	95.0	94.8	83.9
80	88.3	95.0	92.6	90.0
100	97.0	92.6	92.6	95.0
125	97.0	88.3	90.4	94.0
160	90.4	86.0	88.3	92.6
200	92.6	83.0	88.0	83.9
250	91.0	81.7	88.3	94.8
315	90.4	84.0	90.4	99.1
400	94.8	87.0	86.1	99.1
500	99.1	90.4	92.6	90.4
630	99.1	99.1	97.0	97.0
800	94.8	97.0	94.8	99.1
1000	94.8	90.4	90.4	94.8
1250	92.6	88.3	90.4	92.6
1600	88.3	86.1	90.4	90.4
2000	86.1	86.1	92.6	88.3
2500	81.7	81.7	83.9	86.1
3150	79.6	83.9	83.9	83.9
4000	79.6	81.7	81.7	81.7
5000	77.4	75.2	79.6	79.6
6300	75.2	73.0	75.2	77.4
8000	73.0	60.0	70.9	70.9
10000	62.2	60.0	66.5	64.3

Tabelle 3.8: Spektrale A_R Parameter der Rollgeräuschkomponente für die verschiedenen Batteriebstypen.

Terzband	SOR EBN 8	Volvo 7900EH	Caetano	Swisstrolley+
50	28.4	38.0	25.0	25.0
63	25.0	30.4	29.5	25.0
80	25.0	40.0	28.6	39.8
100	39.8	39.3	25.0	27.2
125	39.8	25.0	25.0	36.9
160	39.8	40.0	25.0	39.8
200	30.8	40.0	25.0	39.8
250	39.8	25.0	25.0	27.5
315	39.8	40.0	25.0	39.8
400	32.4	40.0	25.0	39.8
500	39.8	25.0	26.6	26.3
630	39.8	34.1	31.7	25.0
800	29.3	40.0	28.8	27.9
1000	34.6	25.0	25.0	36.6
1250	39.8	25.0	27.5	39.6
1600	34.9	40.0	34.2	39.8
2000	39.3	40.0	39.8	39.8
2500	39.6	40.0	39.8	39.8
3150	39.8	40.0	39.8	39.8
4000	39.6	40.0	39.6	39.6
5000	39.6	40.0	39.6	39.8
6300	28.8	40.0	39.8	39.8
8000	39.6	40.0	28.8	35.3
10000	39.8	40.0	39.8	39.8

Tabelle 3.9: Spektrale B_R Parameter der Rollgeräuschkomponente für die verschiedenen Batteriebstypen.

3.3 Tramfahrzeuge

3.3.1 Einleitung

Wenn sich Tramfahrzeuge und der übrige Strassenverkehr die gleiche Fahrbahn teilen, sind die von Tramfahrzeugen verursachten Emissionen jenen des übrigen Strassenverkehrs zu überlagern. Damit besteht ein Interesse, Tramemissionen in sonROAD18 im gleichen Formalismus wie die übrigen Quellen als neue Fahrzeugkategorien zur Verfügung zu stellen. Diese Darstellung ergänzt die Web-Applikation sonTRAM¹, welche auf das sonRAIL-Emissionsmodell abstützt. Es ist zu beachten, dass die beiden Methoden auf unterschiedlichen Formelsätzen beruhen und entsprechend unterschiedliche Parameteroptimierungen zugrunde liegen. Demzufolge liefern die beiden Modelle nicht identische Ergebnisse.

3.3.2 Messdaten

Datenbasis für die hier vorgenommene Auswertung bilden die von der B+S AG durchgeführten Messungen an verschiedenen Tramkompositionen in verschiedenen Schweizer Städten [4],[5],[6],[7]. Die Messungen wurden als spektrale Ereignisenergiepegel L_E für ganze Vorbeifahrten in 7.5 m Distanz auf 1.2 m Höhe für verschiedene Fahrgeschwindigkeiten im Flachen und teilweise an Steigungsstrecken erhoben. Der pro Tramtyp und Situation ermittelte Ereignisenergiepegel entspricht einem Mittelwert über mindestens 5 Ereignisse.

3.3.3 Auswertstrategie und Parameteranpassung

Dem Konzept von B+S [5] folgend wird hier pro Tramtyp ein die Geschwindigkeitsabhängigkeit beschreibendes Emissionsmodell für Flachfahrten (d.h. bei Steigung 0) bestimmt und ein universeller, für alle Tramtypen gleichermaßen anzuwendender Steigungszuschlag angenommen.

Die Konvertierung der gemessenen Ereignisenergien L_E in Schallleistungspegel L_W einer Ersatzpunktquelle erfolgte gemäss [1] mit

$$L_W = L_E + 10 \lg(v) + 10 \lg(2) - 10 \lg(3.6) + 10 \lg(d) - A'_{\text{atm}} = L_E + 10 \lg(v) + 6.2 - A'_{\text{atm}} \quad (3.2)$$

wobei v der Fahrzeuggeschwindigkeit im km/h entspricht und A'_{atm} [dB] die frequenzabhängige Luftdämpfung für die ganze Vorbeifahrt gemäss Tabelle 3.10 repräsentiert.

≤ 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 3.10: Spektraler A'_{atm} -Term in dB aus Gleichung 3.2.

Für die so aufbereiteten spektralen Schallleistungen wurde pro Tramtyp c in einem Parameteranpassungsprozess ein sonROAD18 kompatibles, spektrales (mit i : Terznummer) Emissionsmodell gemäss Gleichung 3.3 geschätzt.

$$L_W[c, i] = 10 \lg (10^{0.1L_{W,P}[c,i]} + 10^{0.1L_{W,R}[c,i]}) + \Delta L_{W,\theta}[c, i] \quad (3.3)$$

Da die vertikale Abstrahlcharakteristik nicht explizit untersucht worden war, wird von gleichförmiger Abstrahlung ausgegangen, d.h. die im entsprechenden Term

$$\Delta L_{W,\theta}[c, f] = D_1[c] \sin(\theta)^3 \cdot (\lg(f) + D_2[c])^3 \quad (3.4)$$

auftauchenden Parameter $D_1[c] = D_2[c]$ werden 0 gesetzt.

Damit die Tramemissionen keine Belagsabhängigkeit zeigen, werden die das Rollgeräusch beschreibenden Parameter $A_R = -99.9$ und $B_R = 0$ gesetzt und so die ganze Emission dem *Antriebsgeräusch* zugewiesen. Man beachte, dass damit der begriffliche Bezug zum physikalischen Schallentstehungsmechanismus verloren geht, da die wesentliche Tramemission effektiv eine Rollgeräuschquelle ist.

¹<https://sontram.empa.ch/Default.aspx>

3.3.4 Ergebnisse

Der spektrale Schallleistungspegel des Antriebsgeräusches des Tramtyps c ist gegeben als:

$$L_{W,P}[c, i] = A_P[c, i] + B_P[c, i] \frac{v[c] - v_{\text{ref}}}{v_{\text{ref}}} + \Delta L_{W,P,\text{grad}} \quad (3.5)$$

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 3.11 und 3.12 gesetzt werden.

Terzband	Bern Combino	Basel BVB Combino	Basel BLT Tango	Basel Flexity	Zuerich Cobra	Zuerich Tram2000	Zürich Flexity	Zürich Forchbahn Be 4/6	Limmattal- bahn Tramlink
50	99.5	102.9	103.7	95.5	89.2	93.3	97.4	90.4	98.2
63	105.7	104.7	101.9	105.8	95.6	96.4	105.3	95.3	100.0
80	109.9	108.6	106.8	109.9	100.3	108.9	119.4	107.6	105.0
100	108.1	109.8	109.9	109.9	97.7	106.3	123.9	111.4	100.4
125	101.6	109.9	105.6	109.9	102.3	99.4	121.0	102.2	93.2
160	106.6	108.0	101.1	100.9	102.1	107.2	111.8	97.1	95.6
200	109.9	109.9	100.0	96.9	97.8	113.6	111.4	97.5	93.9
250	109.9	109.9	101.6	94.7	95.2	113.7	103.0	95.3	96.0
315	109.9	109.9	102.6	101.2	96.5	116.6	104.7	101.0	97.4
400	107.8	109.9	106.0	98.4	100.9	119.8	113.0	105.9	103.1
500	108.3	109.9	105.6	100.3	102.6	118.8	108.4	102.4	102.9
630	106.7	109.9	109.6	108.3	104.6	126.2	108.9	99.8	103.6
800	108.8	109.9	109.9	107.8	106.7	125.8	109.1	101.7	103.3
1000	109.9	109.9	109.9	109.9	104.9	123.5	107.8	100.2	104.1
1250	103.2	108.8	107.8	108.2	107.2	124.9	103.4	95.1	101.7
1600	101.1	104.8	105.3	101.7	109.9	114.9	99.3	96.4	101.2
2000	98.4	103.1	105.2	102.4	109.9	112.2	98.5	91.7	96.6
2500	99.4	102.2	103.1	101.1	107.8	108.9	96.2	92.6	95.9
3150	99.9	99.9	100.9	103.2	102.9	108.2	93.2	89.8	96.8
4000	98.7	99.3	93.6	95.4	96.8	99.1	90.2	90.2	91.1
5000	95.1	97.1	95.1	89.2	96.1	94.7	95.8	90.0	92.0
6300	89.6	97.9	91.3	93.5	98.2	94.7	92.2	87.6	90.4
8000	89.1	91.3	82.9	84.9	95.2	91.6	89.0	87.2	90.2
10000	91.8	89.9	81.1	82.2	92.1	89.3	88.3	87.5	87.9

Tabelle 3.11: Spektrale A_P Parameter der Antriebsgeräuschkomponente für die verschiedenen Tramtypen.

Terzband	Bern Combino	Basel BVB Combino	Basel BLT Tango	Basel Flexity	Zuerich Cobra	Zuerich Tram2000	Zürich Flexity	Zürich Forchbahn Be 4/6	Limmattal- bahn Tramlink
50	17.1	18.6	16.1	4.9	1.0	1.0	1.0	6.0	10.7
63	22.0	18.0	15.2	16.8	13.6	6.3	12.6	8.0	11.4
80	23.0	22.6	20.6	17.5	19.9	16.4	29.6	21.9	20.0
100	27.3	23.1	25.2	17.5	10.6	8.7	38.5	28.5	10.4
125	16.0	18.7	18.9	20.8	17.4	7.0	40.4	15.2	7.3
160	24.3	21.7	17.5	12.4	19.7	24.9	27.8	11.9	14.3
200	25.2	26.6	20.1	7.7	16.2	35.8	33.4	13.8	13.8
250	30.4	26.7	21.0	1.0	15.9	38.5	18.2	10.0	15.6
315	36.0	33.3	21.2	19.8	20.8	29.7	23.0	14.4	19.5
400	25.3	32.0	24.0	13.5	21.4	40.9	39.2	15.2	25.1
500	28.6	31.0	28.2	16.8	22.5	42.7	31.3	16.0	25.2
630	30.1	36.0	32.8	32.9	26.7	50.0	32.7	1.0	25.0
800	31.7	34.1	31.1	28.0	29.6	44.1	37.4	1.0	26.7
1000	30.5	33.4	30.7	28.2	30.5	44.1	33.8	5.9	27.0
1250	28.7	36.6	32.7	29.6	29.0	41.3	30.4	3.8	26.4
1600	25.8	35.4	31.8	28.9	35.1	40.3	30.4	17.3	30.3
2000	29.5	34.8	33.1	28.7	38.4	42.4	31.7	12.2	23.7
2500	32.6	37.6	33.9	32.2	40.2	38.1	29.9	13.5	28.5
3150	34.6	37.8	32.8	34.3	33.6	37.5	18.9	7.9	29.8
4000	34.0	37.4	4.9	15.0	21.2	27.0	7.4	12.4	16.4
5000	33.4	40.3	29.9	1.0	22.4	24.1	8.4	18.2	27.6
6300	27.3	46.2	25.9	21.3	36.6	27.2	19.6	15.2	25.7
8000	32.2	35.5	10.9	18.4	34.9	26.2	20.1	13.6	25.9
10000	39.9	43.4	20.3	22.7	30.8	25.9	25.7	14.4	25.8

Tabelle 3.12: Spektrale B_P Parameter der Antriebsgeräuschkomponente für die verschiedenen Tramtypen.

Der Term $\Delta L_{W,P,grad}$ ist gemäss B+S [5] eine frequenzunabhängige Steigungskorrektur für eine Strassenlängsneigung s mit

$$\Delta L_{W,P,grad} = \begin{cases} 0 & : s \leq +3\% \\ 0.5(s - 3) & : +3\% < s \leq 8\% \\ 2.5 & : s > 8\% \end{cases} \quad (3.6)$$

Da sich Steigungen bei der Aufwärts- (positive s) und bei der Abwärts- (negative s)-Fahrt unterschiedlich auswirken, sind die Fahrten anteilmässig aufzuteilen und die Emissionen der beiden Richtungen separat zu berechnen.

3.3.5 Repräsentant bei nicht spezifiziertem Tramtyp

Wenn keine nähere Angabe zum modellierenden Tramtyp vorliegt, wird empfohlen, das Tram *Zürich Cobra* als Repräsentanten einzusetzen.

3.3.6 Verifizierung des Modells

Die Abbildungen 3.3 bis 3.11 zeigen die spektralen Differenzen der mit sonROAD18 modellierten Tramemissionen bezogen auf die Messung. Dazu wurden die Messungen bei allen Geschwindigkeiten, aber ausschliesslich im Flachen berücksichtigt. Der Vergleich wird anhand der Ereignisenergiepegel L_E geführt, wobei die sonROAD18-Berechnung auf Gleichung 3.7 basiert, die ihrerseits aus Gleichung 3.2 folgt. Man beachte, dass das Zürcher Tram2000 nur bei zwei Geschwindigkeiten vermessen wurde und deshalb eine exakte Übereinstimmung zwischen Modell und Messung erzielt werden konnte. Bei den übrigen Trams zeigen die Differenzen die Grenzen der mit sonROAD18 modellierbaren Geschwindigkeitsabhängigkeiten auf.

$$L_E = L_W - 10 \lg(v) - 6.2 + A'_{atm} \quad (3.7)$$

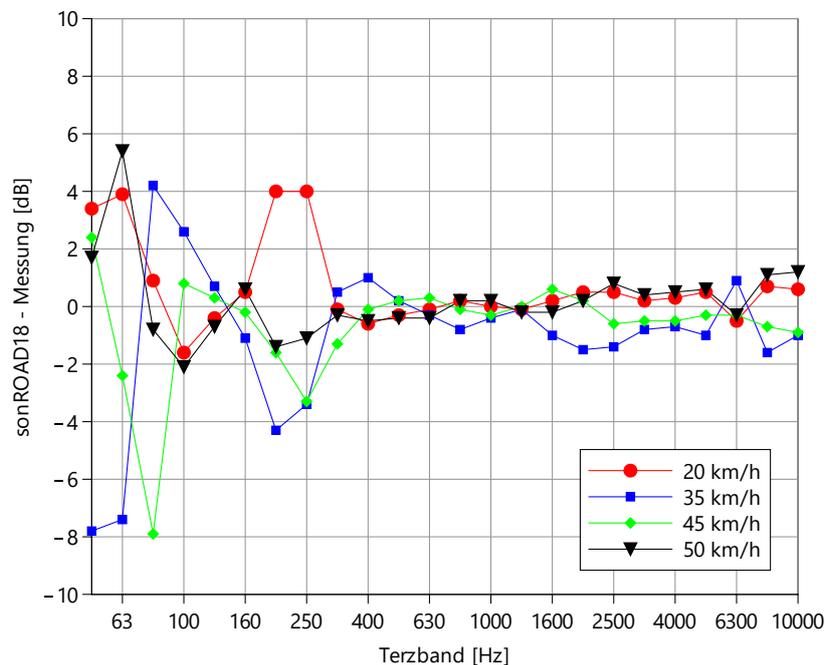


Abbildung 3.3: Spektrale Ereignispegel-Differenzen sonROAD18 - Messung für das Tram Bern Combino.

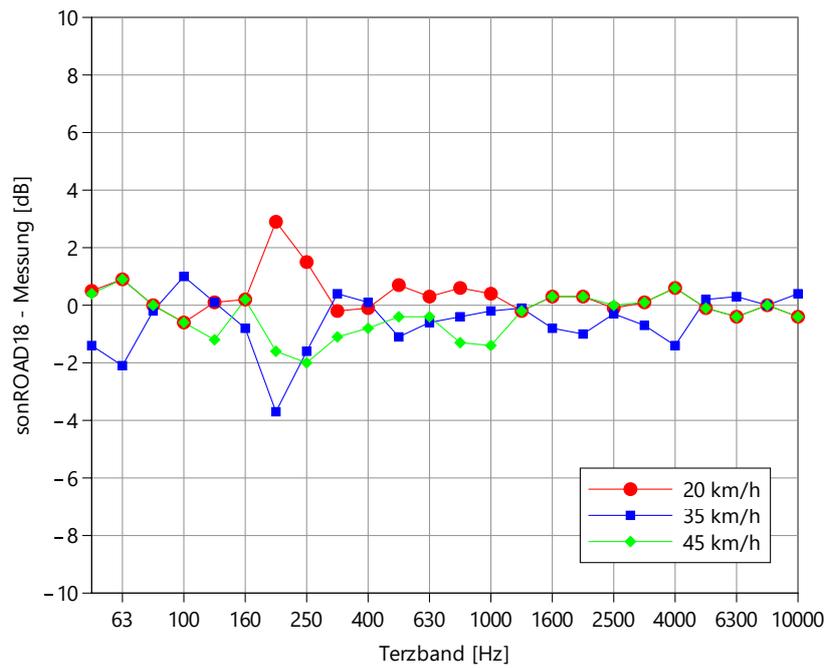


Abbildung 3.4: Spektrale Ereignispegel-Differenzen sonROAD18 - Messung für das Tram Basel BVB Combino (rechts).

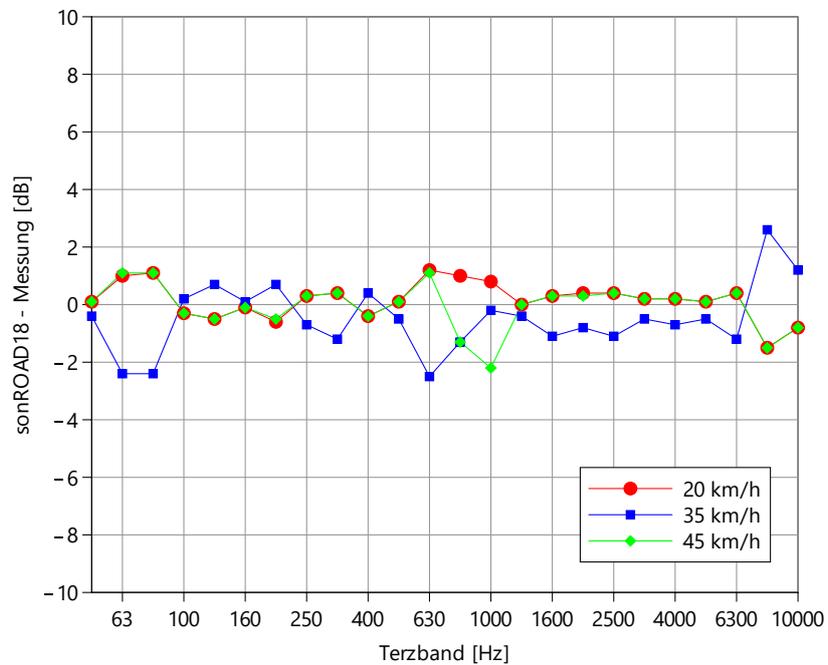


Abbildung 3.5: Spektrale Ereignispegel-Differenzen sonROAD18 - Messung für das Tram Basel BLT Tango.

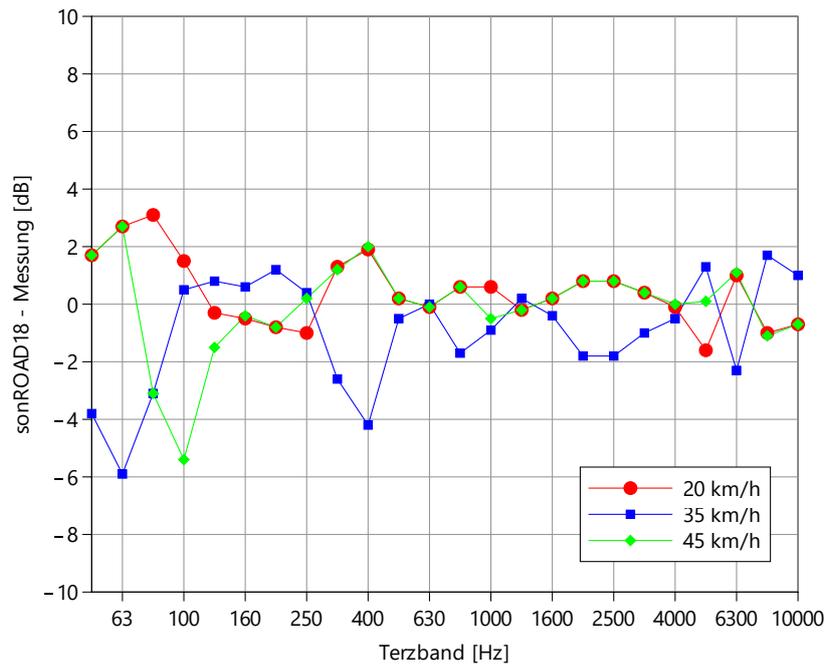


Abbildung 3.6: Spektrale Ereignispegel-Differenzen sonROAD18 - Messung für das Tram Basel Flexity.

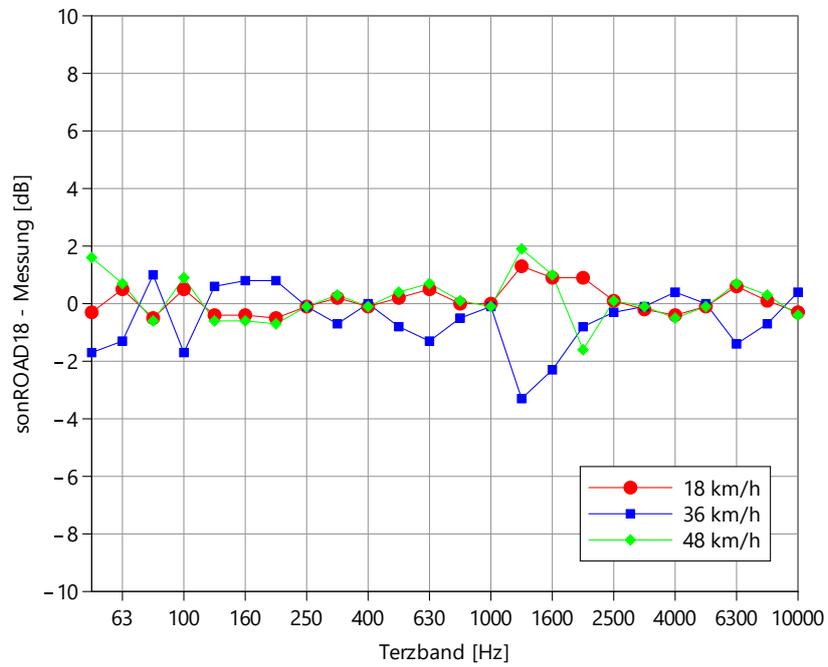


Abbildung 3.7: Spektrale Ereignispegel-Differenzen sonROAD18 - Messung für das Tram Zürich Cobra.

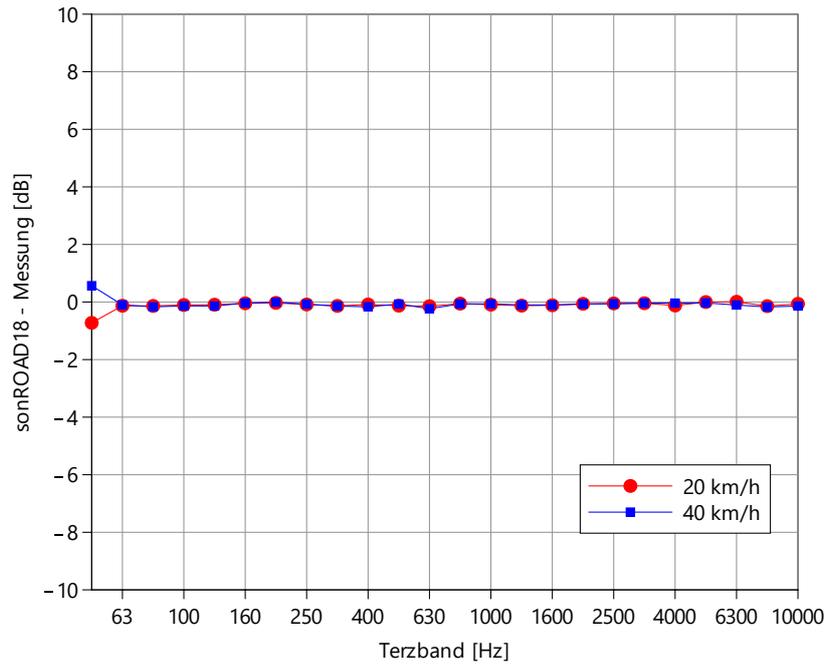


Abbildung 3.8: Spektrale Ereignispegel-Differenzen sonROAD18 - Messung für das Tram Zürich Tram2000.

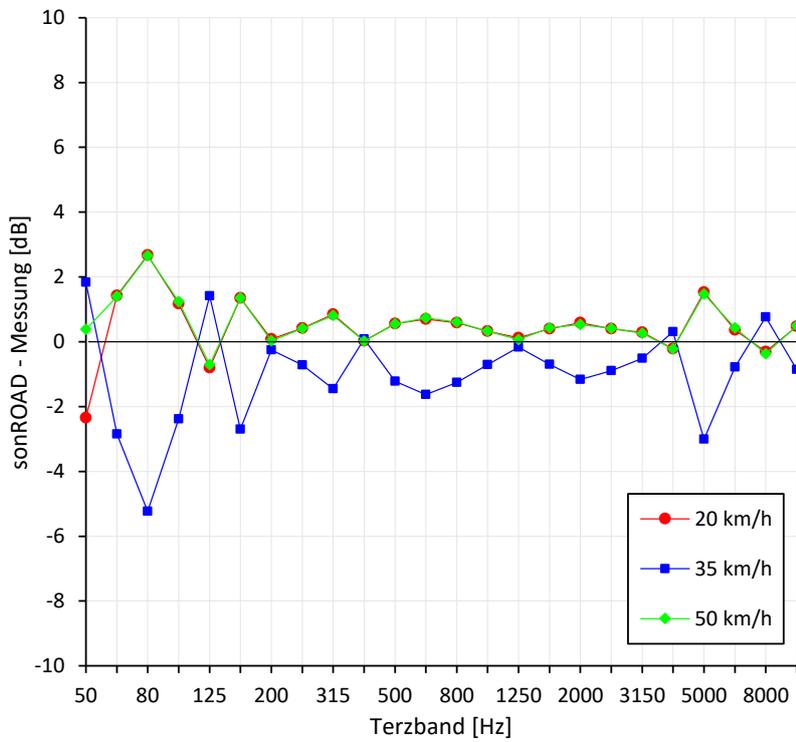


Abbildung 3.9: Spektrale Ereignispegel-Differenzen sonROAD18 - Messung für das Tram Zürich Flexity.

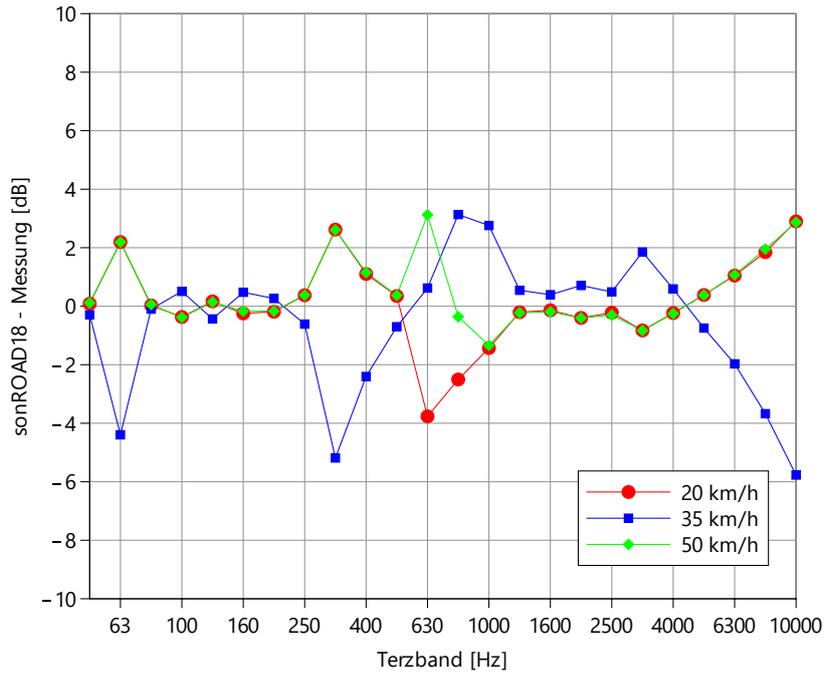


Abbildung 3.10: Spektrale Ereignispegel-Differenzen sonROAD18 - Messung für die Zürcher Forchbahn.

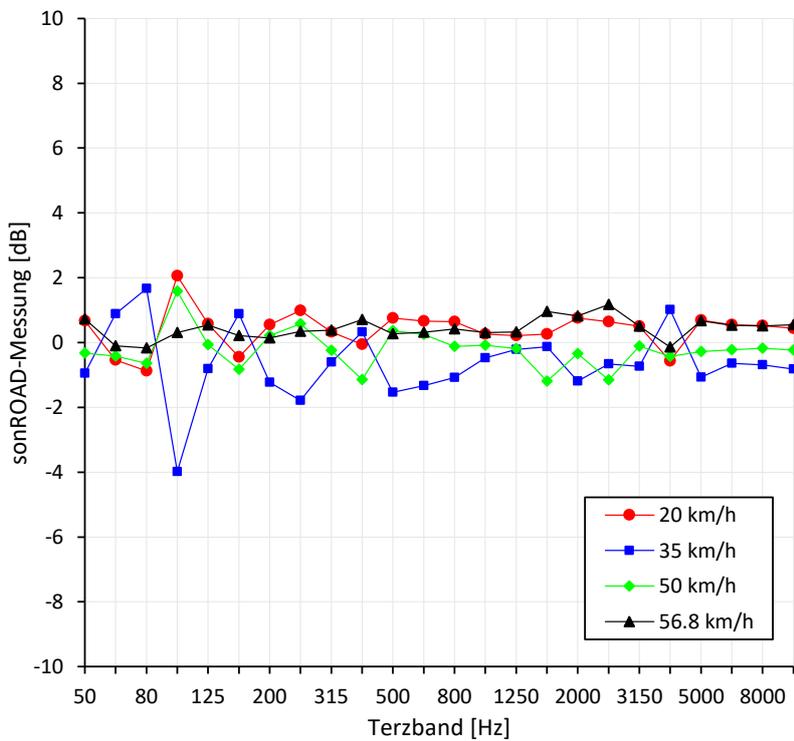


Abbildung 3.11: Spektrale Ereignispegel-Differenzen sonROAD18 - Messung für die Limmattalbahnen Tramlink.

3.4 Landwirtschaftliche Fahrzeuge

3.4.1 Einleitung

Gestützt auf eine Messkampagne der B+S AG, 3000 Bern 15 [8] an den drei Standorten: *Zollikofen*, *Oberbipp* und *Hindelbank* mit landwirtschaftlichen Fahrzeugen werden hier für Traktoren, Traktoren mit Anhänger sowie einen Maishäcksler sonROAD18-Emissionsmodelle hergeleitet. Die Grundlage bilden spektrale Ereignispegel von einzelnen Fahrzeugvorbeifahrten.

3.4.2 Bodeneffektnormierung

Auf Grund der geringen Strassenbreiten in den Messquerschnitten breitete sich der Schall zwischen Fahrzeug und Mikrofon teilweise über Grasland aus. Im sonROAD18-Formalismus werden die aus Messungen abgeleiteten Schalleistungen jedoch für die Ausbreitung in der Referenzgeometrie über hartem Boden verstanden. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, werden hier die Messspektren um die erwartete Bodeneffektdifferenz korrigiert, d.h. auf die Ausbreitung über hartem Boden normiert. Mit der Bodeneffektnormierung werden damit die erwarteten Messpegel geschätzt, wenn die Bodenzone zwischen Quelle und Mikrofon eine Asphaltfläche gewesen wäre. Dazu wird angenommen, dass das Gesamtgeräusch durch den Antrieb dominiert wird und eine repräsentative Quellenhöhe von 100 cm angesetzt werden kann. Die Bodeneffektberechnung verwendet das ISO 9613-2 Modell. Die Figur 3.12 zeigt die Messquerschnittsgeometrie, wobei für die halbe Strassenbreite b gemäss Angaben von B+S AG an den verschiedenen Standorten folgende Werte einzusetzen sind: *Zollikofen*: 2.6 m, *Oberbipp*: 2.3 m, *Hindelbank*: 1.7 m. In Oberbipp konnte die horizontale Distanz nicht zu 7.5 m gewählt werden, sondern musste auf 5 m verkürzt werden. Die Abbildungen 3.13 bis 3.15 zeigen für die ganzen Vorbeifahrten die entsprechend gefundenen Korrekturen, die zu den Messwerten zu addieren sind.

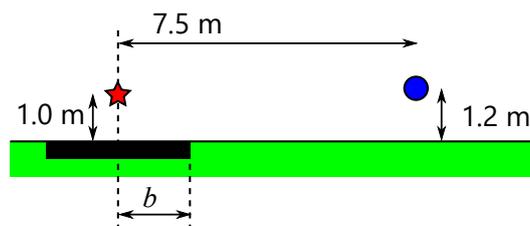


Abbildung 3.12: Querschnittsgeometrie der Traktorvermessungen.

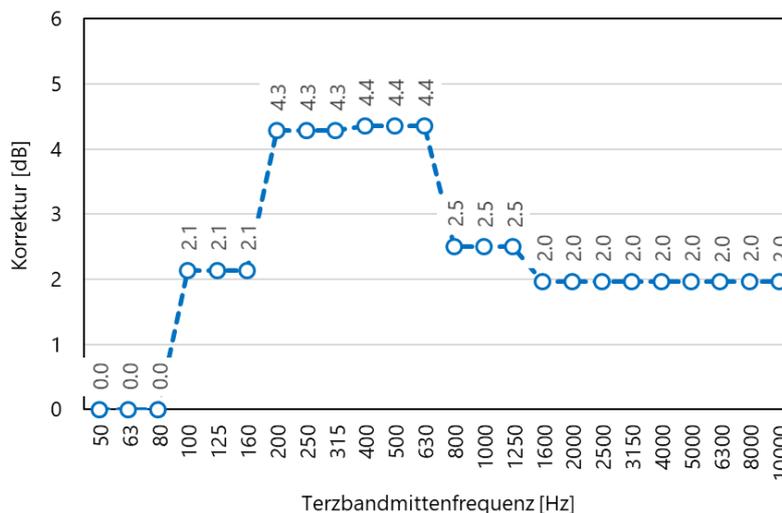


Abbildung 3.13: Bodeneffektkorrektur für die Normierung auf harten Boden am Standort Zollikofen.

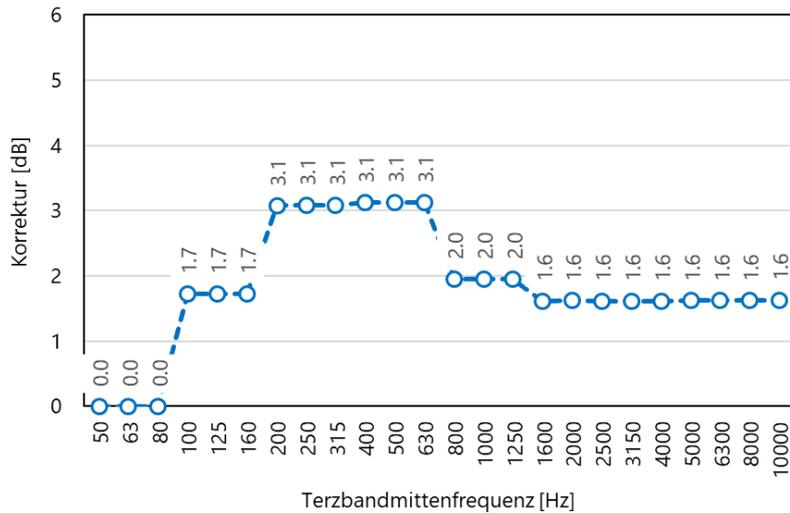


Abbildung 3.14: Bodeneffektkorrektur für die Normierung auf harten Boden am Standort Oberbipp (horizontale Distanz = 5 m).

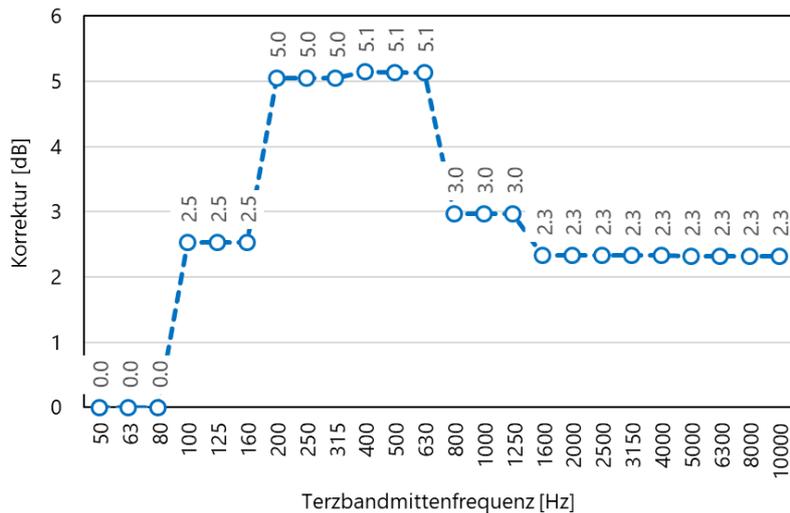


Abbildung 3.15: Bodeneffektkorrektur für die Normierung auf harten Boden am Standort Hindelbank.

3.4.3 Auswertstrategie und Parameteranpassung

Die Messungen von B+S umfassten 9 verschiedene Traktortypen mit Motorleistungen zwischen 75 und 217 kW sowie zwei Maishäcksler mit Motorleistungen von 430 und 570 kW. Die Traktoren passierten die Messstellen typisch mit 20 und 40 km/h, jeweils ohne und mit Anhänger. In wenigen Fällen konnte *mit Anhänger* die Geschwindigkeit von 40 km/h nicht erreicht werden. Die Maishäcksler fuhren mit 10 bzw. 30 km/h. Eine erste Datenanalyse über alle Traktoren bzw. die beiden Maishäcksler ergab keine signifikante, globale Abhängigkeit der akustischen Emission von der Motorenleistung, sodass für die Modellbildung drei Kategorien von landwirtschaftlichen Fahrzeugen gebildet wurden:

1. Traktor mit einer Leistung zwischen 75 kW und 217 kW
2. Traktor mit einer Leistung zwischen 75 kW und 217 kW und mit Anhänger
3. Erntefahrzeug (Maishäcksler) mit einer Leistung zwischen 430 kW und 570 kW

Für die Parameteranpassung wurde das gemessene Gesamtgeräusch vollumfänglich als Antriebsgeräusch interpretiert und entsprechend die Rollgeräuschkomponente zu 0 gesetzt. Selbst wenn die Reifen zur Schallabstrahlung beitragen würden, ist auf Grund der sehr groben Profilierung nicht davon auszugehen, dass eine relevante Belagsabhängigkeit auftritt. Damit verliert die Aufschlüsselung in die Komponenten Antriebs- und Rollgeräusch ihre Bedeutung.

Zur Stabilisierung der Statistik wurde für alle Traktoren auf der einen Seite und für die Erntefahrzeuge auf der anderen Seite eine einheitliche Geschwindigkeitsabhängigkeit angenommen. Für den Betrieb *Traktor mit Anhänger* wurde ein einheitlicher Zuschlag der Traktoremission ermittelt.

Die Konvertierung der gemessenen und auf harten Boden umgerechneten Ereignisenergien L_E in Schallleistungspegel L_W einer Ersatzpunktquelle erfolgte gemäss [1] mit

$$L_W = L_E + 10 \lg(v) + 10 \lg(2) - 10 \lg(3.6) + 10 \lg(d) - A'_{\text{atm}} = L_E + 10 \lg(v) + 6.2 - A'_{\text{atm}} \quad (3.8)$$

wobei v der Fahrzeuggeschwindigkeit im km/h entspricht und A'_{atm} [dB] die frequenzabhängige Luftdämpfung für die ganze Vorbeifahrt gemäss Tabelle 3.13 bzw. 3.14 repräsentiert.

≤ 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 3.13: Spektraler A'_{atm} -Term in dB aus Gleichung 3.8 für die Referenzgeometrie (Zollikofen und Hindelbank).

≤ 800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000
0	0	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.3	-0.4	-0.6	-0.9	-1.3	-1.8

Tabelle 3.14: Spektraler A'_{atm} -Term in dB aus Gleichung 3.8 für den horizontalen Messabstand von 5 m (Oberbipp).

Für die so aufbereiteten spektralen Schallleistungen wurde für die Kategorien *Traktor* bzw. *Erntefahrzeug* in einem Parameteranpassungsprozess ein sonROAD18 kompatibles, spektrales (mit i : Terznummer) Emissionsmodell gemäss Gleichung 3.9 geschätzt, wobei die das Rollgeräusch $L_{W,R[c,i]}$ beschreibenden Parameter $A_R = -99.9$ und $B_R = 0$ gesetzt werden.

$$L_W[c, i] = 10 \lg(10^{0.1L_{W,P[c,i]}} + 10^{0.1L_{W,R[c,i]}}) + \Delta L_{W,\theta}[c, i] \quad (3.9)$$

Da die vertikale Abstrahlcharakteristik $\Delta L_{W,\theta}$ nicht explizit untersucht worden war, wird dieser Term durch Setzen von $D_1[c] = D_2[c] = 0$ zu Null gesetzt.

3.4.4 Ergebnisse

Der spektrale Schallleistungspegel des Antriebsgeräusches der landwirtschaftlichen Fahrzeuge der Kategorie c ist gegeben als:

$$L_{W,P}[c, i] = A_P[c, i] + B_P[c, i] \frac{v[c] - v_{\text{ref}}}{v_{\text{ref}}} + \Delta L_{W,P,\text{grad}} \quad (3.10)$$

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 3.15 und 3.16 gesetzt werden. Damit werden die für jedes Fahrzeug und jeden Betriebszustand individuell aus der Messung bestimmten Schallleistungen zufriedenstellend reproduziert (Abbildung 3.16). Der mittlere A-Pegel-Fehler ist = 0.0 dB, die mittleren Terzbandfehler sind nicht grösser als 1 dB. Die Standardabweichungen der Fehler liegen für den A-Pegel zwischen 1.5 und 1.8 dB, in Terzen bei typisch 2.5 dB.

Terzband	Traktor	Traktor mit Anhänger	Erntefahrzeug
50	112.9	114.0	98.1
63	104.5	108.3	114.2
80	108.8	110.0	101.2
100	115.7	117.0	114.7
125	113.2	114.1	110.0
160	114.1	116.1	111.4
200	116.0	117.6	108.7
250	119.2	120.6	115.0
315	118.4	119.7	111.2
400	113.7	115.7	112.7
500	109.8	111.7	106.7
630	104.8	107.4	115.4
800	100.0	102.6	109.4
1000	98.7	100.5	105.8
1250	102.0	103.7	103.5
1600	99.9	101.0	101.7
2000	98.2	99.7	101.9
2500	95.5	96.8	100.3
3150	94.9	96.3	101.6
4000	92.4	93.3	102.4
5000	89.5	90.5	99.7
6300	88.8	89.9	96.3
8000	88.5	88.8	98.1
10000	88.1	88.7	95.4

Tabelle 3.15: Spektrale A_P Parameter der Antriebsgeräuschkomponente für die verschiedenen landwirtschaftlichen Fahrzeuge.

Terzband	Traktor	Traktor mit Anhänger	Erntefahrzeug
50	25.3	25.3	0.4
63	14.5	14.5	23.8
80	20.5	20.5	4.0
100	28.4	28.4	21.5
125	22.8	22.8	15.7
160	26.9	26.9	23.3
200	28.7	28.7	15.9
250	33.6	33.6	21.2
315	33.0	33.0	17.3
400	30.2	30.2	19.4
500	26.0	26.0	9.8
630	17.5	17.5	22.6
800	14.4	14.4	16.4
1000	11.5	11.5	14.0
1250	18.4	18.4	10.8
1600	17.4	17.4	11.6
2000	17.4	17.4	13.7
2500	15.2	15.2	13.3
3150	16.6	16.6	12.9
4000	14.5	14.5	14.1
5000	12.9	12.9	14.8
6300	14.4	14.4	13.1
8000	15.3	15.3	16.1
10000	18.2	18.2	15.1

Tabelle 3.16: Spektrale B_P Parameter der Antriebsgeräuschkomponente für die verschiedenen landwirtschaftlichen Fahrzeuge.

4 Ergänzter SWISS10-Konverter

4.1 Einleitung

Die verkehrstechnische Beschreibung des Zustandes einer Strasse kann durch unterschiedliche Grössen erfolgen. Im einfachsten Fall ist nur der durchschnittliche tägliche Verkehr (DTV) bekannt. Dazu wurde in der sonROAD18 Dokumentation ein Konverter vorgestellt, der daraus die Schätzung der tages- bzw. nachtdurchschnittlichen stündlichen Verkehrsmengen in den einzelnen SWISS10-Kategorien ermöglicht. Zwischenzeitlich konnte die Datenbasis vergrössert werden, sodass hier eine ergänzte Version vorgestellt werden kann. Zusätzlich wurde eine Konverterversion entwickelt, bei der die Verkehrsinformation in Form von stündlichen Teilverkehrsmengen N1 und N2 tags (t) und nachts (n) (beschrieben durch vier Werte: N1t, N2t, N1n, N2n) eingegeben werden kann. Die den Teilverkehrsmengen N1 und N2 zu Grunde liegende Klassierung entspricht dabei der Definition in Anhang 3 der Lärmschutzverordnung [9]:

N1 Personenwagen, Lieferwagen, Kleinbusse, Motorfahräder und Trolleybusse

N2 Lastwagen, Sattelschlepper, Gesellschaftswagen, Motorräder und Traktoren

Damit ergibt sich eine Zuordnung zu den SWISS10-Kategorien wie in Tabelle 4.1 gezeigt.

SWISS10-Kat.	Beschreibung	Teilverkehrsmenge
1	Busse	N2
2	Motorräder	N2
3	Personenwagen	N1
4	Personenwagen mit Anhänger	N1
5	Lieferwagen bis 3.5t	N1
6	Lieferwagen bis 3.5t mit Anhänger	N1
7	Lieferwagen bis 3.5t mit Auflieger	N1
8	Lastwagen	N2
9	Lastenzüge	N2
10	Sattelzüge	N2

Tabelle 4.1: Zuordnung der Teilverkehrsmengen N1 und N2 zu den SWISS10-Kategorien.

Beide Konverterversionen basieren auf Verkehrszählungen an automatischen SWISS10-Zählstellen des ASTRA und Zählungen aus den Kantonen Graubünden und Zürich, ergänzt um die unten beschriebenen zusätzlichen Zählungen aus der Stadt Zürich sowie den Kantonen Graubünden und St. Gallen. Ausgewiesen werden die stündlichen Verkehrsmengen pro Fahrspur in den SWISS10-Kategorien.

Gegenüber einer Verwendung des DTV-SWISS10-Konverters darf vom N1/N2-SWISS10-Konverter eine zuverlässigere Verkehrszahlenschätzung erwartet werden, da Information zur Tag-/Nacht-Aufteilung vorliegt.

4.2 Zusätzliche Verkehrszählungen

4.2.1 Verkehrsdaten Stadt Zürich

Von der Stadt Zürich lagen aus den letzten zwanzig Jahren Daten von Handzählungen und daraus abgeleitete Tag/Nacht-Hochrechnungen vor. Pro Standort wurde während typisch rund 7 halbstündigen Messintervallen der Verkehr in folgenden Kategorien erfasst:

- Motorfahräder
- Motorräder

- leichte Motorwagen
- schwere Motorwagen

Der einen Standort charakterisierenden Strassenabschnitt wurde klassiert gemäss:

SS Sammelstrasse

VS Verbindungsstrasse

HVS Hauptverkehrsstrasse

HLS Hochleistungsstrasse

UKS übrige kommunale Strasse

Für die Weiterverarbeitung wurden Daten von jenen 340 Standorten übernommen, die sich direkt Strassenkategorien des SWISS10-Konverters zuordnen liessen:

SS 50 Standorte

VS 170 Standorte

HVS 120 Standorte

Die grosse Qualität der Daten liegt in der zuverlässigen Erfassung der Motorräder (SWISS10-cat2). Demgegenüber weisen auf einem Längenkriterium basierende automatische Zählstellen in dieser Kategorie eine relativ grosse Unsicherheit auf, da häufig fälschlicherweise auch Fahrräder und Motorfahrräder mitgezählt werden. Da die übrigen Fahrzeugkategorien nicht fein genug aufgelöst sind, werden in den ergänzten SWISS10-Konverter nur die SWISS10-cat2 übernommen.

4.2.2 Verkehrsdaten Kt. Graubünden

Aus dem Kanton Graubünden wurden in Ergänzung zu den bisherigen Daten aus der Stadt Chur zusätzliche Verkehrszählungen an rund 20 Standorten (Klosters, Lenz, Silvaplana) aus den Jahren 2018 und 2019 zur Verfügung gestellt. Die Fahrzeug-Klassierung basierte auf einem Längenkriterium mit einer Aufschlüsselung in *Zweiräder*, *PW*, *Transporter LKW* und *Lastenzug*. Auf Grund der Unsicherheit der in der Klasse *Zweiräder* gezählten Fahrzeuge wurden die entsprechenden Daten nicht in die Datensammlung des ergänzten SWISS10-Konverters aufgenommen.

4.2.3 Verkehrsdaten Kanton St. Gallen

Das Tiefbauamt im Baudepartement des Kantons St. Gallen stellte für den ergänzten SWISS10-Konverter Zählungen, die zwischen 2017 und 2019 auf dem ganzen Kantonsgebiet erhoben wurden, zur Verfügung. Die Verkehrszählungen basieren auf unterschiedlichen Beobachtungsmethoden:

Permanente Zählstelle SWISS10 mit vollständiger Aufschlüsselung in SWISS10 Kategorien

Handzählungen/Videozählungen mit Aufschlüsselung in Velos, Mofas, PW/Lieferwagen, LKW, Lastenzug/Sattelschlepper, Car/Bus, Traktoren, Motorräder

Radarzählung mit Akustikererkennung mit Aufschlüsselung in Velos, PW, Lieferwagen, PW mit Anhänger, Lieferwagen mit Anhänger, LKW, Lastenzug, Sattelschlepper, Car/Bus, Motorräder

Radarzählung ohne Akustikererkennung mit Aufschlüsselung in PW/Lieferwagen, LKW, Lastenzug/Sattelschlepper

Permanente Zählstellen SWISS10

Aus der kantonalen Sammlung von SWISS10-Zählstellen wurden 21 Standorte ausgewählt, die keine besonderen situationsspezifischen Merkmale wie z.B. Stauanfälligkeit in Nähe einer Zollstation zeigten. Anhand der Standortkoordinaten wurde eine Klassierung der Strassen geschätzt, wobei 7 Zählstellen *VS-50-60*, 5 Zählstellen *VS-80*, 3 Zählstellen *HVS-50-60* und 6 Zählstellen *HVS-80* zugeordnet wurden. Von den Zählstellen lagen für das ganze Jahr 2018 für jede Stunde aufkumulierte Mengen in SWISS10-Auflösung zur Verfügung, aus welchen die Prozentanteile am DTV bzw. N1/N2 bestimmt wurden.

Temporäre Zählstellen

Für die Integration der temporären Zählstellendaten in den SWISS10-Konverter wurden zum einen die *Radarzählungen mit Akustikererkennung* und zum anderen die *Hand/Videozählungen* verwendet. Generell liegen die Zähldaten nur als 24h-Werte ohne Aufschlüsselung in Tag/Nacht-Perioden vor. Für die Weiterverarbeitung wurde hier generell basierend auf [10] ein Nachtanteil (22-6 Uhr) am 24h-Verkehr von 8% für die SWISS10-Kategorien 2 bis 7, bzw. von 4% für die SWISS10-Kategorien 1 und 8 bis 10 angenommen. Da die Zählungen nicht vollständig alle SWISS10-Kategorien auflösen, wurden nur die Werte für die SWISS10-cat1, SWISS10-cat2, SWISS10-cat8 berücksichtigt.

Die Kategorisierung der Strassen basierte auf dem Schema:

- Agglostrecke
- Ausflugsstrecke
- Innerortsstrecke
- Überlandstrassen
- Zubringerstrecken

Um einen Anschluss an die Klassierung der Strassen im sonROAD18 Formalismus herzustellen, wurde eine Selektion und Zuordnung wie folgt vorgenommen:

- Agglostrecke \Leftrightarrow VS-50-60, 122 Zählungen
- Innerortsstrecke \Leftrightarrow SS-50, 226 Zählungen
- Überlandstrassen \Leftrightarrow HVS-80, 60 Zählungen

4.2.4 ASTRA Verkehrszählungen an sechsspurigen Autobahnen

Grundlage bildeten vom ASTRA zur Verfügung gestellte Daten (zeit-, spur- und kategorienaufgelöste stündliche Mengen) der automatischen ASTRA-Verkehrszähler aus dem Zeitraum 1.1.2021 bis 30.6.2022. Im ganzen Messstellennetz wurden in einem ersten Schritt jene Standorte identifiziert, an welchen zumindest in eine Richtung genau drei Fahrspuren (Normalspur, 1. Überholspur (Mittelspur) und 2. Überholspur) geführt werden. Für diese insgesamt 30 Standorte bzw. Abschnitte wurden die Zähldaten extrahiert und die Auswertungen für die beiden Konverterversionen vorgenommen.

4.3 Auswertung

4.3.1 DTV-SWISS10-Konverter: Durchschnittliche Verkehrsmengen

Mit der erweiterten Datenbasis stellt die Tabelle 4.2 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 *Code* beschreibt den Strassentyp, die Anzahl Fahrspuren (für HLS), die Fahrspurlage (sofern mehr als 2 Fahrspuren: N = Normalspur, U = Überholspur, U1 = 1. Überholspur, U2 = 2. Überholspur) 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.

Code	Zeit	cat1	cat2	cat3	cat4	cat5	cat6	cat7	cat8	cat9	cat10
SS-30	tags	0.00000	0.07952	2.63401	0.00000	0.07842	0.00000	0.00000	0.08224	0.08685	0.00000
SS-30	nachts	0.00000	0.01679	0.30059	0.00000	0.00677	0.00000	0.00000	0.00785	0.01136	0.00000
SS-50	tags	0.02645	0.07758	2.56536	0.00000	0.12877	0.00000	0.00000	0.08452	0.06210	0.00000
SS-50	nachts	0.00220	0.01638	0.28458	0.00000	0.01159	0.00000	0.00000	0.00647	0.00842	0.00000
VS-50-60	tags	0.01946	0.08557	2.55656	0.01561	0.16770	0.01098	0.00437	0.04961	0.01399	0.01245
VS-50-60	nachts	0.00286	0.01275	0.35204	0.00089	0.01695	0.00066	0.00039	0.00408	0.00318	0.00134
VS-80	tags	0.01195	0.07694	2.54320	0.01637	0.16545	0.01377	0.00475	0.04677	0.01818	0.01566
VS-80	nachts	0.00219	0.00723	0.38007	0.00090	0.01916	0.00095	0.00060	0.00459	0.00545	0.00283
HVS-50-60	tags	0.02252	0.09122	2.50888	0.01527	0.17706	0.01095	0.00632	0.04775	0.01199	0.01693
HVS-50-60	nachts	0.00561	0.00958	0.37270	0.00099	0.02238	0.00111	0.00069	0.00458	0.00233	0.00210
HVS-80	tags	0.01609	0.07224	2.50481	0.01737	0.16415	0.01325	0.00997	0.05894	0.01983	0.03097
HVS-80	nachts	0.00257	0.00887	0.40973	0.00154	0.02419	0.00186	0.00068	0.00563	0.00427	0.00350
HLS-2-80	tags	0.02761	0.03726	2.28149	0.02659	0.33375	0.01518	0.00644	0.06218	0.03626	0.09110
HLS-2-80	nachts	0.00383	0.00236	0.35345	0.00430	0.05712	0.00379	0.00078	0.00921	0.00548	0.00921
HLS-2-100	tags	0.01105	0.02883	2.41976	0.01379	0.15818	0.01368	0.00890	0.04992	0.04598	0.09709
HLS-2-100	nachts	0.00232	0.00562	0.52573	0.00219	0.02849	0.00322	0.00129	0.00764	0.00859	0.01293
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
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
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
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
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
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
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
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
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
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
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
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
HLS-6-N-120	tags	0.00332	0.01405	0.68420	0.00653	0.09117	0.00859	0.00379	0.03592	0.01997	0.04177
HLS-6-U1-120	tags	0.00174	0.01882	1.04548	0.00474	0.12903	0.00554	0.00151	0.01711	0.00805	0.01768
HLS-6-U2-120	tags	0.00017	0.01418	0.60640	0.00046	0.07435	0.00048	0.00005	0.00305	0.00032	0.00078
HLS-6-N-120	nachts	0.00092	0.00345	0.16699	0.00078	0.01900	0.00184	0.00071	0.00733	0.00673	0.00832
HLS-6-U1-120	nachts	0.00039	0.00435	0.21445	0.00059	0.02255	0.00107	0.00030	0.00371	0.00248	0.00319
HLS-6-U2-120	nachts	0.00003	0.00219	0.05329	0.00005	0.00605	0.00006	0.00001	0.00042	0.00010	0.00014

Tabelle 4.2: Durchschnittliche stündliche Verkehrsmengen pro Fahrspur in den SWISS10-Kategorien als Prozentanteil am DTV.

4.3.2 N1/N2-SWISS10-Konverter: Durchschnittliche Verkehrsmengen

Die Tabelle 4.3 stellt die durchschnittlichen stündlichen Verkehrsmengen, getrennt für die Nacht (22.00 - 06.00 Uhr) und den Tag (06.00 - 22.00 Uhr), in Prozent an N1 bzw. N2 zusammen. Die Spalte *Code* beschreibt den Strassentyp, die Anzahl Fahrspuren (für HLS), die Fahrspurlage (sofern mehr als 2 Fahrspuren: N = Normalspur, U = Überholspur, U1 = 1. Überholspur, U2 = 2. Überholspur) 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 N1 von rund 3.1 % auszugehen. Auf einer Überholspur beträgt der Anteil rund 1.7 %. Bei einem angenommenen N1 von 3'000 Fz/h verkehren demnach am Tag auf einer Normalspur 93 und auf einer Überholspur 51 cat5 Lieferwagen. Den ganzen Querschnitt passieren tagsüber pro Stunde $2 \cdot 93 + 2 \cdot 51 = 288$ cat5 Fahrzeuge.

Code	Zeit	cat1	cat2	cat3	cat4	cat5	cat6	cat7	cat8	cat9	cat10
SS-30	tags	0.000	27.208	48.560	0.000	1.440	0.000	0.000	13.966	8.826	0.000
SS-30	nachts	0.000	29.525	48.864	0.000	1.136	0.000	0.000	11.697	8.779	0.000
SS-50	tags	4.306	22.788	47.989	0.000	2.011	0.000	0.000	12.452	10.446	0.000
SS-50	nachts	3.132	27.101	48.402	0.000	1.598	0.000	0.000	9.025	10.788	0.000
VS-50-60	tags	5.166	24.480	46.389	0.284	3.047	0.200	0.080	13.236	3.754	3.373
VS-50-60	nachts	6.047	24.675	47.388	0.121	2.345	0.088	0.057	9.696	6.402	3.204
VS-80	tags	3.552	24.934	46.370	0.297	3.007	0.242	0.084	12.565	5.010	3.939
VS-80	nachts	4.336	20.665	47.080	0.143	2.540	0.164	0.073	11.754	8.731	4.514
HVS-50-60	tags	4.681	24.564	45.975	0.302	3.430	0.186	0.107	12.737	3.240	4.806
HVS-50-60	nachts	10.852	20.423	46.569	0.145	3.054	0.154	0.077	10.008	4.389	4.351
HVS-80	tags	3.663	18.558	46.110	0.344	3.146	0.235	0.164	14.677	5.112	8.026
HVS-80	nachts	4.742	17.155	46.485	0.215	3.001	0.223	0.076	12.138	8.183	7.813
HLS-2-80	tags	5.739	8.584	42.856	0.502	6.223	0.296	0.122	13.602	6.303	15.772
HLS-2-80	nachts	6.181	4.830	41.916	0.493	7.119	0.381	0.091	17.072	8.423	13.494
HLS-2-100	tags	2.428	6.828	46.285	0.263	3.016	0.265	0.172	12.166	9.115	19.462
HLS-2-100	nachts	2.829	8.257	46.877	0.191	2.559	0.263	0.110	11.753	11.164	15.998
HLS-4-N-80	tags	1.777	8.305	28.785	0.148	2.325	0.198	0.105	14.216	5.516	11.004
HLS-4-U-80	tags	0.195	6.198	17.426	0.018	0.959	0.022	0.014	1.908	0.303	0.578
HLS-4-N-80	nachts	2.938	10.259	38.231	0.113	2.273	0.164	0.068	12.583	7.189	9.937
HLS-4-U-80	nachts	0.159	4.975	8.740	0.006	0.390	0.010	0.004	0.956	0.260	0.743
HLS-4-N-100	tags	1.725	5.632	27.992	0.235	3.125	0.159	0.137	14.855	6.189	13.078
HLS-4-U-100	tags	0.295	3.969	16.569	0.021	1.735	0.018	0.010	1.632	0.529	2.095
HLS-4-N-100	nachts	2.302	5.502	37.167	0.148	3.546	0.152	0.109	12.371	8.840	12.667
HLS-4-U-100	nachts	0.304	3.936	7.868	0.020	0.953	0.027	0.011	1.455	0.784	1.838
HLS-4-N-120	tags	2.491	5.995	26.579	0.251	3.429	0.220	0.126	12.458	7.789	15.750
HLS-4-U-120	tags	0.161	4.174	17.225	0.011	2.143	0.010	0.005	0.451	0.223	0.507
HLS-4-N-120	nachts	3.033	5.313	36.625	0.202	4.195	0.236	0.112	11.287	11.663	14.206
HLS-4-U-120	nachts	0.084	3.349	7.673	0.005	0.942	0.007	0.003	0.353	0.298	0.414
HLS-6-N-120	tags	0.844	3.977	12.808	0.123	1.711	0.163	0.072	9.478	4.684	9.889
HLS-6-U1-120	tags	0.465	5.254	19.612	0.090	2.427	0.106	0.029	4.483	1.959	4.280
HLS-6-U2-20	tags	0.039	3.576	11.438	0.009	1.402	0.009	0.001	0.780	0.096	0.195
HLS-6-N-120	nachts	0.975	4.730	17.263	0.079	1.968	0.184	0.072	8.663	6.991	8.651
HLS-6-U1-120	nachts	0.534	5.676	21.927	0.061	2.321	0.108	0.031	4.415	2.759	3.491
HLS-6-U2-20	nachts	0.037	2.283	5.365	0.005	0.609	0.006	0.001	0.494	0.142	0.162

Tabelle 4.3: Durchschnittliche stündliche Verkehrsmengen pro Fahrspur in den SWISS10-Kategorien als Prozentanteil an der Teilverkehrsmenge N1 bzw. N2.

4.4 Gegenüberstellung der gezählten und geschätzten MFM-U Verkehrsmengen

Zur exemplarischen Einordnung der Unsicherheit einer Verkehrsmengenschätzung gemäss einem der beiden SWISS-10-Konverter wird hier an den MFM-U Standorten

- Camignolo (CH289): vierspurige Hochleistungsstrasse, Tempo 120 km/h
- Moleno (CH265): vierspurige Hochleistungsstrasse, Tempo 120 km/h
- Reiden (CH239): vierspurige Hochleistungsstrasse, Tempo 120 km/h
- Rothenbrunnen (CH238): vierspurige Hochleistungsstrasse, Tempo 100 km/h

ein Vergleich der Mikrofonpegelberechnung basierend auf den 2017 gezählten Verkehrsmengen und einer Berechnung gestützt auf den DTV-SWISS10-Konverter bzw. den N1/N2-SWISS10-Konverter angestellt. Die echten Zählraten sind direkt aus den unbearbeiteten Einzelereignisprotokollen der automatischen Verkehrszähler abgeleitet. Dabei ergeben sich aggregierte Mengen gemäss Tabelle 4.4.

Standort	DTV	N1-tag	N2-tag	N1-nacht	N2-nacht
Camignolo	56979	2958.5	262.8	640.9	38.5
Moleno	28643	1459.2	160.5	319.1	23.7
Reiden	53192	2664.9	327.4	589.5	74.0
Rothenbrunnen	17649	962.4	70.1	133.1	9.6

Tabelle 4.4: Verkehrsmengen (echte Zählraten) im Querschnitt als DTV bzw. N1/N2 an den MFM-U Standorten im Jahr 2017.

Die folgenden Abschnitte zeigen für die vier Standorte die ermittelten Verkehrsmengen und die mit sonROAD18 berechneten Emissionspegel als A-bewerteter Leq in 1 m Abstand. An den Standorten Camignolo, Moleno und Rothenbrunnen wurde ein SDA8 Belag, in Reiden ein SMA11 Belag angenommen. Die Geschwindigkeiten wurden entsprechend den erlaubten Maximalgeschwindigkeiten eingesetzt unter Berücksichtigung von $v_{\max} = 80$ km/h für SWISS10-4,6,7,8,9,10 und $v_{\max} = 100$ km/h für SWISS10-1.

4.4.1 Standort Camignolo

		N-cat1	N-cat2	N-cat3	N-cat4	N-cat5	N-cat6	N-cat7	N-cat8	N-cat9	N-cat10	Leq,A,1m
tags	Summe Normalspuren	15.6	33.3	1244.8	13.1	208.3	11.6	7.1	44.9	28.8	103.8	87.8
tags	Summe Überholspuren	1.7	28.4	1296.2	1.0	175.4	0.7	0.3	2.1	0.9	3.4	86.6
nachts	Summe Normalspuren	4.5	6.6	427.0	3.6	62.5	3.3	0.8	6.0	4.3	13.1	82.3
nachts	Summe Überholspuren	0.1	3.2	126.2	0.1	17.4	0.1	0.0	0.2	0.1	0.4	76.5

Tabelle 4.5: Echte Zählzeiten als stündliche Verkehrsmengen in den SWISS-10 Kategorien 1 bis 10 auf den Normal- bzw. Überholspuren und mit sonROAD18 berechnete 1m-A-Pegel-Leq-Werte in Camignolo im Jahr 2017.

		N-cat1	N-cat2	N-cat3	N-cat4	N-cat5	N-cat6	N-cat7	N-cat8	N-cat9	N-cat10	Leq,A,1m
tags	Summe Normalspuren	10.5	22.8	1638.2	15.2	209.9	13.4	7.7	47.8	33.2	69.8	88.4
tags	Summe Überholspuren	0.7	15.9	1050.1	0.6	130.1	0.6	0.3	1.9	1.0	2.3	85.6
nachts	Summe Normalspuren	2.3	3.5	398.4	2.2	46.0	2.6	1.2	8.0	9.4	11.4	82.0
nachts	Summe Überholspuren	0.1	2.3	85.9	0.1	10.6	0.1	0.0	0.3	0.3	0.3	74.8

Tabelle 4.6: Mit dem DTV-SWISS10-Konverter geschätzte stündliche Verkehrsmengen in den SWISS-10 Kategorien 1 bis 10 auf den Normal- bzw. Überholspuren und mit sonROAD18 berechnete 1m-A-Pegel-Leq-Werte in Camignolo im Jahr 2017.

		N-cat1	N-cat2	N-cat3	N-cat4	N-cat5	N-cat6	N-cat7	N-cat8	N-cat9	N-cat10	Leq,A,1m
tags	Summe Normalspuren	13.1	31.5	1572.7	14.9	202.9	13.0	7.5	65.5	40.9	82.8	88.5
tags	Summe Überholspuren	0.8	21.9	1019.2	0.6	126.8	0.6	0.3	2.4	1.2	2.7	85.5
nachts	Summe Normalspuren	2.3	4.1	469.4	2.6	53.8	3.0	1.4	8.7	9.0	10.9	82.6
nachts	Summe Überholspuren	0.1	2.6	98.4	0.1	12.1	0.1	0.0	0.3	0.2	0.3	75.4

Tabelle 4.7: Mit dem N1/N2-SWISS10-Konverter geschätzte stündliche Verkehrsmengen in den SWISS-10 Kategorien 1 bis 10 auf den Normal- bzw. Überholspuren und mit sonROAD18 berechnete 1m-A-Pegel-Leq-Werte in Camignolo im Jahr 2017.

4.4.2 Standort Moleno

		N-cat1	N-cat2	N-cat3	N-cat4	N-cat5	N-cat6	N-cat7	N-cat8	N-cat9	N-cat10	Leq,A,1m
tags	Summe Normalspuren	10.7	20.9	782.7	11.5	128.3	9.8	3.8	20.8	21.8	73.9	85.9
tags	Summe Überholspuren	0.7	8.9	454.9	0.6	67.0	0.5	0.1	0.7	0.5	1.6	82.1
nachts	Summe Normalspuren	2.6	4.0	221.7	2.9	36.5	3.1	0.5	3.3	3.3	9.2	79.8
nachts	Summe Überholspuren	0.1	1.0	46.5	0.1	7.6	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	72.3

Tabelle 4.8: Echte Zählzeiten als stündliche Verkehrsmengen in den SWISS-10 Kategorien 1 bis 10 auf den Normal- bzw. Überholspuren und mit sonROAD18 berechnete 1m-A-Pegel-Leq-Werte in Moleno im Jahr 2017.

		N-cat1	N-cat2	N-cat3	N-cat4	N-cat5	N-cat6	N-cat7	N-cat8	N-cat9	N-cat10	Leq,A,1m
tags	Summe Normalspuren	5.3	11.4	823.5	7.6	105.5	6.7	3.9	24.0	16.7	35.1	85.4
tags	Summe Überholspuren	0.4	8.0	527.9	0.3	65.4	0.3	0.1	1.0	0.5	1.2	82.6
nachts	Summe Normalspuren	1.2	1.8	200.3	1.1	23.1	1.3	0.6	4.0	4.7	5.7	79.0
nachts	Summe Überholspuren	0.0	1.2	43.2	0.0	5.3	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	71.8

Tabelle 4.9: Mit dem DTV-SWISS10-Konverter geschätzte stündliche Verkehrsmengen in den SWISS-10 Kategorien 1 bis 10 auf den Normal- bzw. Überholspuren und mit sonROAD18 berechnete 1m-A-Pegel-Leq-Werte in Moleno im Jahr 2017.

		N-cat1	N-cat2	N-cat3	N-cat4	N-cat5	N-cat6	N-cat7	N-cat8	N-cat9	N-cat10	Leq,A,1m
tags	Summe Normalspuren	8.0	19.2	775.7	7.3	100.1	6.4	3.7	40.0	25.0	50.5	85.6
tags	Summe Überholspuren	0.5	13.4	502.7	0.3	62.6	0.3	0.1	1.4	0.7	1.6	82.5
nachts	Summe Normalspuren	1.4	2.5	233.7	1.3	26.8	1.5	0.7	5.4	5.5	6.7	79.7
nachts	Summe Überholspuren	0.0	1.6	49.0	0.0	6.0	0.0	0.0	0.2	0.1	0.2	72.4

Tabelle 4.10: Mit dem N1/N2-SWISS10-Konverter geschätzte stündliche Verkehrsmengen in den SWISS-10 Kategorien 1 bis 10 auf den Normal- bzw. Überholspuren und mit sonROAD18 berechnete 1m-A-Pegel-Leq-Werte in Moleno im Jahr 2017.

4.4.3 Standort Reiden

		N-cat1	N-cat2	N-cat3	N-cat4	N-cat5	N-cat6	N-cat7	N-cat8	N-cat9	N-cat10	Leq,A,1m
tags	Summe Normalspuren	7.7	19.5	1123.7	15.4	215.9	21.2	10.9	60.4	75.5	137.3	91.5
tags	Summe Überholspuren	1.1	16.2	1072.8	0.9	202.6	1.1	0.4	2.5	2.3	4.9	89.6
nachts	Summe Normalspuren	2.3	4.0	379.0	3.2	65.4	4.8	3.0	15.2	25.1	23.2	86.3
nachts	Summe Überholspuren	0.1	2.7	113.1	0.1	20.7	0.1	0.1	0.5	0.5	0.6	79.9

Tabelle 4.11: Echte Zählzeiten als stündliche Verkehrsmengen in den SWISS-10 Kategorien 1 bis 10 auf den Normal- bzw. Überholspuren und mit sonROAD18 berechnete 1m-A-Pegel-Leq-Werte in Reiden im Jahr 2017.

		N-cat1	N-cat2	N-cat3	N-cat4	N-cat5	N-cat6	N-cat7	N-cat8	N-cat9	N-cat10	Leq,A,1m
tags	Summe Normalspuren	9.8	21.2	1529.3	14.2	195.9	12.5	7.2	44.6	31.0	65.1	91.6
tags	Summe Überholspuren	0.7	14.9	980.3	0.6	121.5	0.6	0.3	1.8	0.9	2.2	88.9
nachts	Summe Normalspuren	2.1	3.3	372.0	2.1	43.0	2.4	1.1	7.5	8.8	10.7	85.3
nachts	Summe Überholspuren	0.1	2.1	80.2	0.1	9.9	0.1	0.0	0.3	0.2	0.3	78.1

Tabelle 4.12: Mit dem DTV-SWISS10-Konverter geschätzte stündliche Verkehrsmengen in den SWISS-10 Kategorien 1 bis 10 auf den Normal- bzw. Überholspuren und mit sonROAD18 berechnete 1m-A-Pegel-Leq-Werte in Reiden im Jahr 2017.

		N-cat1	N-cat2	N-cat3	N-cat4	N-cat5	N-cat6	N-cat7	N-cat8	N-cat9	N-cat10	Leq,A,1m
tags	Summe Normalspuren	16.3	39.3	1416.6	13.4	182.8	11.7	6.7	81.6	51.0	103.1	91.9
tags	Summe Überholspuren	1.1	27.3	918.1	0.6	114.2	0.5	0.2	3.0	1.5	3.3	88.7
nachts	Summe Normalspuren	4.5	7.9	431.8	2.4	49.5	2.8	1.3	16.7	17.3	21.0	86.4
nachts	Summe Überholspuren	0.1	5.0	90.5	0.1	11.1	0.1	0.0	0.5	0.4	0.6	78.8

Tabelle 4.13: Mit dem N1/N2-SWISS10-Konverter geschätzte stündliche Verkehrsmengen in den SWISS-10 Kategorien 1 bis 10 auf den Normal- bzw. Überholspuren und mit sonROAD18 berechnete 1m-A-Pegel-Leq-Werte in Reiden im Jahr 2017.

4.4.4 Standort Rothenbrunnen

		N-cat1	N-cat2	N-cat3	N-cat4	N-cat5	N-cat6	N-cat7	N-cat8	N-cat9	N-cat10	Leq,A,1m
tags	Summe Normalspuren	5.7	11.8	670.0	8.8	109.6	6.4	1.9	18.1	7.4	21.0	82.9
tags	Summe Überholspuren	0.1	5.4	143.8	0.2	21.6	0.1	0.0	0.3	0.1	0.2	75.1
nachts	Summe Normalspuren	1.1	0.7	103.2	1.2	18.1	1.2	0.3	2.9	1.2	2.1	74.7
nachts	Summe Überholspuren	0.0	1.3	7.6	0.0	1.5	0.0	0.0	0.2	0.0	0.1	63.4

Tabelle 4.14: Echte Zählzeiten als stündliche Verkehrsmengen in den SWISS-10 Kategorien 1 bis 10 auf den Normal- bzw. Überholspuren und mit sonROAD18 berechnete 1m-A-Pegel-Leq-Werte in Rothenbrunnen im Jahr 2017.

		N-cat1	N-cat2	N-cat3	N-cat4	N-cat5	N-cat6	N-cat7	N-cat8	N-cat9	N-cat10	Leq,A,1m
tags	Summe Normalspuren	2.3	6.7	526.0	4.4	59.6	3.2	2.6	18.3	8.9	19.4	81.8
tags	Summe Überholspuren	0.4	4.9	313.9	0.4	33.0	0.3	0.2	2.6	0.9	4.1	78.5
nachts	Summe Normalspuren	0.5	1.1	117.8	0.5	11.2	0.5	0.4	2.8	2.4	3.3	75.0
nachts	Summe Überholspuren	0.1	0.9	28.0	0.1	3.0	0.1	0.0	0.5	0.2	0.7	68.5

Tabelle 4.15: Mit dem DTV-SWISS10-Konverter geschätzte stündliche Verkehrsmengen in den SWISS-10 Kategorien 1 bis 10 auf den Normal- bzw. Überholspuren und mit sonROAD18 berechnete 1m-A-Pegel-Leq-Werte in Rothenbrunnen im Jahr 2017.

		N-cat1	N-cat2	N-cat3	N-cat4	N-cat5	N-cat6	N-cat7	N-cat8	N-cat9	N-cat10	Leq,A,1m
tags	Summe Normalspuren	2.4	7.9	538.8	4.5	60.1	3.1	2.6	20.8	8.7	18.3	81.9
tags	Summe Überholspuren	0.4	5.6	318.9	0.4	33.4	0.3	0.2	2.3	0.7	2.9	78.5
nachts	Summe Normalspuren	0.4	1.1	98.9	0.4	9.4	0.4	0.3	2.4	1.7	2.4	74.1
nachts	Summe Überholspuren	0.1	0.8	20.9	0.1	2.5	0.1	0.0	0.3	0.2	0.4	67.2

Tabelle 4.16: Mit dem N1/N2-SWISS10-Konverter geschätzte stündliche Verkehrsmengen in den SWISS-10 Kategorien 1 bis 10 auf den Normal- bzw. Überholspuren und mit sonROAD18 berechnete 1m-A-Pegel-Leq-Werte in Rothenbrunnen im Jahr 2017.

4.4.5 Zusammenstellung der Emissionspegelberechnungen

Die Tabellen 4.17 bis 4.20 zeigen die mit den unterschiedlichen Datengrundlagen berechneten Emissionspegel in einer Zusammenstellung. Die Referenz bildet jeweils die Rechnung mit den echten Zählwerten, die beiden anderen Berechnungen sind als Abweichung zu dieser Referenz ausgewiesen. Die grössten Abweichungen finden sich erwartungsgemäss bei den spurtypscharfen Emissionswerten. Wenn nur der Querschnitt betrachtet wird, sind die Differenzen geringer. Beim DTV-SWISS10-Konverter ergibt sich als Folge der zu schätzenden Tag/Nacht-Aufschlüsselung eine Unsicherheit der Querschnitts-Nachtwerte von etwa 1 dB, die Differenzen der Tagwerte sind deutlich geringer. Mit dem N1/N2-SWISS10-Konverter sind sowohl für den Tag als auch für die Nacht die Querschnitts-Differenzen nicht grösser als 0.1 dB. Dies zeigt, dass der N1/N2-SWISS10-Konverter erwartungsgemäss eine höhere Präzision und geringere Unsicherheit aufweist.

		echte Zählung	DTV-SWISS10	N1/N2-SWISS10
tags	Normalspuren	87.8	0.6	0.7
tags	Überholspuren	86.6	-1.0	-1.1
nachts	Normalspuren	82.3	-0.3	0.3
nachts	Überholspuren	76.5	-1.7	-1.1
tags	Querschnitt	90.3	0.0	0.0
nachts	Querschnitt	83.3	-0.6	0.0

Tabelle 4.17: Emissionspegelberechnungen für Camignolo als A-bewerteter Leq in 1 m Abstand basierend auf der echten Zählung und Abweichungen dazu bei Verkehrsmengenschätzungen mit dem DTV-SWISS10-Konverter bzw. mit dem N1/N2-SWISS10-Konverter.

		echte Zählung	DTV-SWISS10	N1/N2-SWISS10
tags	Normalspuren	85.9	-0.5	-0.3
tags	Überholspuren	82.1	0.5	0.4
nachts	Normalspuren	79.8	-0.8	-0.1
nachts	Überholspuren	72.3	-0.5	0.1
tags	Querschnitt	87.4	-0.2	-0.1
nachts	Querschnitt	80.5	-0.8	-0.1

Tabelle 4.18: Emissionspegelberechnungen für Moleno als A-bewerteter Leq in 1 m Abstand basierend auf der echten Zählung und Abweichungen dazu bei Verkehrsmengenschätzungen mit dem DTV-SWISS10-Konverter bzw. mit dem N1/N2-SWISS10-Konverter.

		echte Zählung	DTV-SWISS10	N1/N2-SWISS10
tags	Normalspuren	91.5	0.1	0.4
tags	Überholspuren	89.6	-0.7	-0.9
nachts	Normalspuren	86.3	-1.0	0.1
nachts	Überholspuren	79.9	-1.8	-1.1
tags	Querschnitt	93.7	-0.2	-0.1
nachts	Querschnitt	87.2	-1.1	-0.1

Tabelle 4.19: Emissionspegelberechnungen für Reiden als A-bewerteter Leq in 1 m Abstand basierend auf der echten Zählung und Abweichungen dazu bei Verkehrsmengenschätzungen mit dem DTV-SWISS10-Konverter bzw. mit dem N1/N2-SWISS10-Konverter.

		echte Zählung	DTV-SWISS10	N1/N2-SWISS10
tags	Normalspuren	82.9	-1.1	-1.0
tags	Überholspuren	75.1	3.4	3.4
nachts	Normalspuren	74.7	0.3	-0.6
nachts	Überholspuren	63.4	5.1	3.8
tags	Querschnitt	83.6	-0.1	0.0
nachts	Querschnitt	75.0	0.9	-0.1

Tabelle 4.20: Emissionspegelberechnungen für Rothenbrunnen als A-bewerteter Leq in 1 m Abstand basierend auf der echten Zählung und Abweichungen dazu bei Verkehrsmengenschätzungen mit dem DTV-SWISS10-Konverter bzw. mit dem N1/N2-SWISS10-Konverter.

5 Akustisch relevante Geschwindigkeit

5.1 Einleitung

Die Charakterisierung des Verkehrszustandes einer Strasse umfasst Angaben zu den fahrzeugkategorien-spezifischen Verkehrsmengen und Geschwindigkeiten. Bei der Vermessung von Einzelvorbeifahrten stellt sich die Frage, durch welches repräsentative Perzentil v_x eine beobachtete Geschwindigkeitsverteilung, wie sie exemplarisch in Abbildung 5.1 gezeigt ist, dargestellt werden soll. Die Grösse v_x wird so verstanden, dass sie in sonROAD18 eingesetzt die gleiche Emission ergibt wie eine Rechnung mit der beobachteten Geschwindigkeitsverteilung. Eine erste Abschätzung dazu hat Walter Krebs [11] vom ANU Kt. Graubünden vorgenommen. Unter der Annahme von normalverteilten Geschwindigkeiten resultierten geschwindigkeits- und streuungsabhängig Werte für x zwischen 56 und 61%, d.h. die Geschwindigkeitsverteilung wird optimal durch ein Perzentil zwischen v_{56} und v_{61} beschrieben.

Hier wird eine analoge Auswertung basierend auf echten Geschwindigkeitsverteilungen durchgeführt.

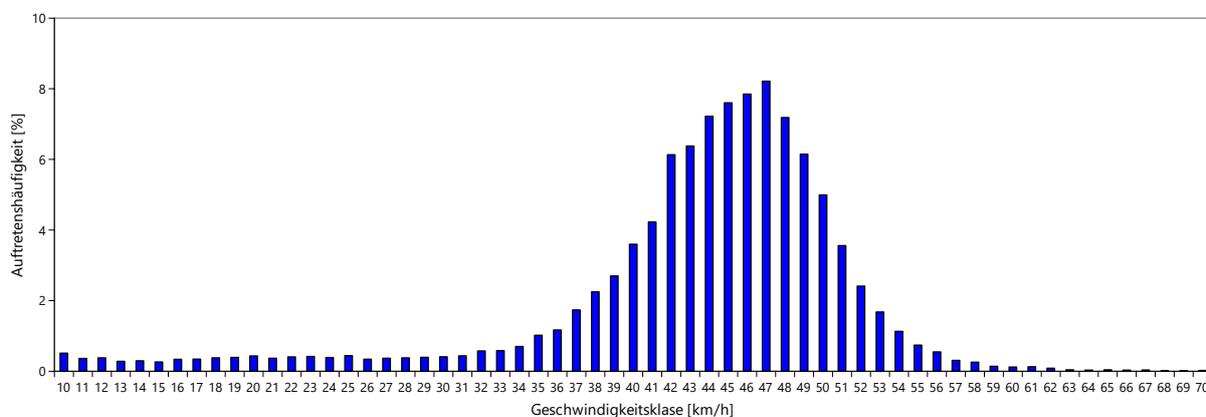


Abbildung 5.1: Exemplarische Geschwindigkeitsverteilung von Personenkraftwagen auf einer Tempo 50 Strecke.

5.2 Datenbasis

Datengrundlage für die Ermittlung des repräsentativen Geschwindigkeitsperzentils bilden die Einzelereignisprotokolle der automatischen SWISS10-Strassenverkehrszählungen des ASTRA (Periode 2014-10 bis 2015-10) sowie Tempo 50/30 Einzelereignismessungen der Stadt Zürich an den vier Standorten: Albisstrasse, Breitensteinstrasse, Dübendorfstrasse und Hardstrasse aus dem Jahr 2018. Diese letztgenannten Verkehrsbeobachtungen schlüsselten allerdings lediglich in die Kategorien N1 und N2 auf.

5.3 Auswerteprozedur

In einem vorbereitenden Auswerteschritt wurden für alle gezählten Spuren nach Fahrzeugkategorien differenzierte Histogramme der gefahrenen Geschwindigkeiten in Klassenbreiten von 1 km/h erstellt. Anschliessend wurden ungewöhnliche Verteilungen als *ungültig* ausgeschieden, wenn sie mindestens eine der beiden Bedingungen erfüllten:

1. mehr als 10% der Fahrzeug weisen eine Geschwindigkeit kleiner als 20 km/h auf
2. mehrbucklige Verteilung mit um das Maximum herum innerhalb von ± 4 Geschwindigkeitsklassen nicht monotonem Verlauf

Zur Klärung der Frage, durch welches Perzentil die Geschwindigkeitsverteilung optimal beschrieben wird, wurden folgende Rechnungen ausgeführt:

- Bestimmung des A-bewerteten Mittelungspegels $L_{\text{Verteilung}}$ in 1 m Abstand mit sonROAD18 unter Referenzbedingungen für jede Fahrzeugkategorie und jede *gültige* Verteilung anhand der Geschwindigkeitsklassen.
- Bestimmung der äquivalenten Geschwindigkeit $v_{\text{äquivalent}}$, die den über die Geschwindigkeitsverteilung mit sonROAD18 bestimmten Mittelungspegel $L_{\text{Verteilung}}$ reproduziert.
- Suchen des Perzentils x innerhalb der Verteilung für welches gilt: $v_x = v_{\text{äquivalent}}$.

Zusätzlich wurden $\Delta L_{v_{60\%}}$ und $\Delta L_{v_{50\%}}$ als Abweichung einer Leq-Berechnung mit $v_{60\%}$ und $v_{50\%}$ im Vergleich zu $L_{\text{Verteilung}}$ berechnet, und analog $\Delta L_{v_{\text{mittel}}}$, wenn als Geschwindigkeit der Mittelwert eingesetzt wird.

5.4 Ergebnisse

Im Anhang A sind für jede Fahrzeugkategorie die Perzentilgrößen und die Fehlergrößen $\Delta L_{v_{\text{mittel}}}$ bzw. $\Delta L_{v_{60\%}}$ und $\Delta L_{v_{50\%}}$ in Abhängigkeit der äquivalenten Geschwindigkeit $v_{\text{äquivalent}}$ gezeigt. Da die Geschwindigkeitsabhängigkeit nur schwach ausgeprägt ist, lassen sich die Daten sinnvoll durch einen Mittelwert (siehe Tabelle 5.1) repräsentieren. Die in der Tabelle gezeigten optimalen Perzentilwerte x bestätigen weitgehend die unter der Annahme von normalverteilten Geschwindigkeiten gefundenen Perzentilwerte [11]. Überdies zeigt die Tabelle mit mittleren Abweichungen von 0.2 dB bei Verwendung von v_{mittel} bzw. $v_{50\%}$ eine relativ geringe Empfindlichkeit gegenüber der eingesetzten Geschwindigkeitsgrösse.

Grösse	cat1	cat2	cat3	cat4	cat5	cat6	cat7	cat8	cat9	cat10
opt. Perzentil x [%]	49	58	56	56	57	57	54	61	52	58
$\Delta L_{v_{60\%}}$ [dB(A)]	0.3	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	0.2	0.1
$\Delta L_{v_{50\%}}$ [dB(A)]	0.0	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.0	-0.2	0.0	-0.1
$\Delta L_{v_{\text{mittel}}}$ [dB(A)]	-0.1	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.0	-0.1	-0.1	-0.2

Tabelle 5.1: Fahrzeugkategorienabhängige durchschnittliche optimale Geschwindigkeitsperzentilwerte und Pegelfehler ΔL bei Verwendung von $v_{60\%}$, $v_{50\%}$ bzw. v_{mittel} als repräsentative Geschwindigkeit.

5.5 Analyse der Verteilungsfunktion der Normalverteilung

Die in Tabelle 5.1 gezeigten Ergebnisse weisen bei einer Rechnung mit $v_{60\%}$ oder $v_{50\%}$ relativ geringe Pegelunterschiede zur Rechnung mit dem optimalen Perzentil aus. Zur Einordnung dieser Beobachtung wird hier die Steilheit der Verteilungsfunktion $\Phi(v)$ (aufkumulierte Dichtefunktion) der Normalverteilung in Abhängigkeit der Standardabweichung σ untersucht. Diese Steilheit s

$$s = \frac{d\Phi}{dv} \quad (5.1)$$

ist rund um den Erwartungswert, d.h. bei $v_{50\%}$ am grössten und kann zu $s \approx 0.4/\sigma$ abgeschätzt werden. Daraus lässt sich exemplarisch die Geschwindigkeitsdifferenz $\Delta v_{50\% \rightarrow 60\%}$ zwischen $v_{60\%}$ und $v_{50\%}$ abschätzen zu

$$\Delta v_{50\% \rightarrow 60\%} = v_{60\%} - v_{50\%} \approx 0.25 \cdot \sigma \quad (5.2)$$

Bei einer normalverteilten Geschwindigkeitsverteilung mit einer Standardabweichung von 4 km/h differieren $v_{60\%}$ und $v_{50\%}$ lediglich um rund 1 km/h, bei einer Standardabweichung von 8 km/h liegen die beiden Perzentile rund 2 km/h auseinander. Dies bestätigt die in Tabelle 5.1 gemachte Beobachtung, dass die Verwendung von $v_{50\%}$ anstelle von $v_{60\%}$ nur zu kleinen Emissionsänderungen führt.

6 CPX-Schnittstelle bzw. CPX-Umrechnungsmodell

6.1 Einleitung

Mit der CPX-Schnittstelle bzw. dem CPX-Umrechnungsmodell wird ein Werkzeug bereitgestellt, das die Konvertierung von mit der CPX-Methode [12] gewonnenen Belagsmessungen in sonROAD18-Belagskorrekturen $\Delta L_{W,R,road}[i]$ erlaubt (siehe [1], Abs. 10.5.3).

6.2 Existierende CPX-SPB-KB-Umrechnungsmodelle

6.2.1 Leitfaden Strassenlärm

Im Anhang 1c [13] des Leitfadens Strassenlärm wird ein Zusammenhang zwischen normierten A-bewerteten CPX-Messwerten L_P^{CPX} und auf StL-86+ [14] anzuwendende Korrekturen KB hergestellt. Dieser Zusammenhang basiert auf CPX- und Leq-basierten SPB-Messwertpaaren und lautet für den P-Reifen und Personenwagen für 50 bzw. 80 km/h wie folgt:

$$KB_{50km/h,PW} = 1.2468 \cdot L_{P,50km/h}^{CPX} - 112.3 \quad (6.1)$$

$$KB_{80km/h,PW} = 1.5268 \cdot L_{P,80km/h}^{CPX} - 148.3 \quad (6.2)$$

Bemerkenswert an obigem Modell ist der Umstand, dass sich eine 1 dB(A) CPX-Messpegeländerung in eine 1.2 dB (bei 50 km/h) bzw. 1.5 dB (bei 80 km/h) KB -Wert-Änderung überträgt. Dies deutet darauf hin, dass die CPX-Anhänger-Messung und die Messung der typischen Fahrzeugflotte am Strassenrand nicht genau die gleichen Phänomene erfassen.

6.2.2 Forschungsprojekt MBBM

Im Rahmen des Forschungsprojekts ASTRA 2011/007 OBF [15] hat die Müller-BBM Schweiz AG ein Modell zur spektralen Maximalpegel- bzw. KB-Wert-Schätzung aus CPX-Messungen entwickelt. Die Datenbasis bildeten 33 CPX-SPB-Messwertepaare. Mit der Schätzung des maximalen Vorbeifahrtspegelspektrums bei 80 km/h lassen sich die Ergebnisse auch ausserhalb von StL-86+ verwenden. Allerdings verbleibt aus sonROAD18 Sicht die Einschränkung, dass das Modell keine direkte Aussage zu Ereignisenergien macht.

Für das A-bewertete Maximalpegelspektrum $L_{A,max,7.5m,t,s}^{SPB,80km/h}[i]$ einer Vorbeifahrt mit 80 km/h in 7.5 m Abstand wird angesetzt:

$$L_{A,max,7.5m,t,s}^{SPB,80km/h}[i] = L_{t,s}^{CPX}[i] + \Delta_{norm}^{CPX}[i] + K'_{t,s}[i] \quad (6.3)$$

wobei $L_{t,s}^{CPX}[i]$ dem CPX-Messpegel in der Terz mit Index i entspricht, $\Delta_{norm}^{CPX}[i]$ bezeichnet die Normierung auf CPX-Referenzbedingungen und $K'_{t,s}[i]$ ist ein spektraler Korrekturwert, der sich aus der Summe eines Schalleistungsergänzungsbeitrags und eines Umrechnungsbeitrags bildet. Das Modell postuliert, dass sich eine CPX-Messpegeländerung $\Delta L_{t,s}^{CPX}[i]$ 1:1 in einer Maximalpegeländerung widerspiegelt.

Die Korrekturwerte für die Schätzung des Maximalpegelspektrums eines Personenwagens sind in Figur 6.1 bzw. in Tabelle 6.1 gezeigt.

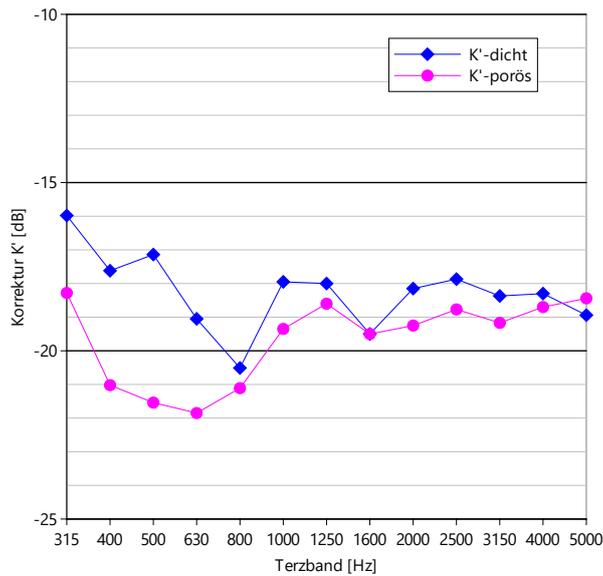


Abbildung 6.1: Spektrale Korrekturwerte $K'_{t,s}[i]$ für den P-Reifen bei 80 km/h für die spektrale Maximalpegelschätzung eines Personenwagens auf dichten bzw. porösen Belägen im MBBM-Modell.

Terzband	$K'_{t,s,f}$ dicht	$K'_{t,s,f}$ porös
315	-16.0	-18.3
400	-17.6	-21.0
500	-17.1	-21.5
630	-19.1	-21.9
800	-20.5	-21.1
1000	-18.0	-19.4
1250	-18.0	-18.6
1600	-19.5	-19.5
2000	-18.2	-19.3
2500	-17.9	-18.8
3150	-18.4	-19.2
4000	-18.3	-18.7
5000	-18.9	-18.4

Tabelle 6.1: Spektrale Korrekturwerte $K'_{t,s}[i]$ für den P-Reifen bei 80 km/h für die spektrale Maximalpegelschätzung eines Personenwagens auf dichten bzw. porösen Belägen im MBBM-Modell.

6.2.3 Forschungsprojekt Rosanne

Im EU Forschungsprojekt Rosanne wurde mit dem Deliverable D2.3 [16] eine aktuelle Analyse und Gegenüberstellung verschiedener Messmethoden zur akustischen Charakterisierung von Strassenoberflächen erarbeitet, wobei ausschliesslich A-Pegel als Indikatoren untersucht wurden.

Gestützt auf die Analyse einer Vielzahl von SPB-CPX-Messwertepaaren auf unterschiedlichsten Belägen (dichte, offeneporige sowie poroelastische) wurde festgestellt, dass bei identischer Geschwindigkeit der CPX-Messfahrt und der SPB-Fahrzeuge der CPX-A-Pegel $L_{A,P}^{CPX}$ am P-Reifen und der A-bewertete maximale Vorbeifahrtspegel $L_{A,F,max}^{SPB}$ von Personenwagen hoch miteinander korrelieren. Die Steigung von 0.95 der linearen Beziehung (Gleichung 6.4) bringt zum Ausdruck, dass eine 1 dB(A) CPX-Messpegeländerung eine 0.95 dB(A) Änderung des Maximalpegels bewirkt.

$$L_{A,F,\max}^{\text{SPB}} = 0.95 \cdot L_{A,P}^{\text{CPX}} - 15.6 \quad (6.4)$$

90% aller Datenpaare erfüllten mit einer Abweichung ≤ 1 dB(A) die Gleichung 6.4.

Für eine grössere Zahl von Messungen lagen bei den SPB-Messungen sowohl Maximalpegel $L_{A,F,\max}^{\text{SPB}}$ als auch Ereignispegel $L_{A,E}^{\text{SPB}}$ vor. Für Personenwagen wurde eine Beziehung zwischen den beiden Grössen gemäss Gleichung 6.5 gefunden, wobei v der Geschwindigkeit in km/h entspricht.

$$L_{A,F,\max}^{\text{SPB}} - L_{A,E}^{\text{SPB}} = 2.79 \cdot \ln(v) - 13.5 \quad (6.5)$$

Die Geschwindigkeitsabhängigkeit lässt sich aufschlüsseln in eine für eine omnidirektionale Punktquelle erwartete $10 \lg(v)$ Abhängigkeit und einen nicht offensichtlichen Rest:

$$L_{A,F,\max}^{\text{SPB}} - L_{A,E}^{\text{SPB}} = 6.4 \cdot \lg(v) - 13.5 = 10 \cdot \lg(v) - 3.6 \cdot \log(v) - 13.5 \quad (6.6)$$

Die in Gleichung 6.6 auftauchende *zusätzliche* Geschwindigkeitsabhängigkeit von $-3.6 \cdot \log(v)$ dürfte der horizontalen Abstrahlcharakteristik geschuldet sein und passt sehr gut mit der Schätzung des A-bewerteten maximalen Vorbeifahrtpegels gemäss sonROAD18 (Abbildung 6.2) überein ([1], Kap. 21).

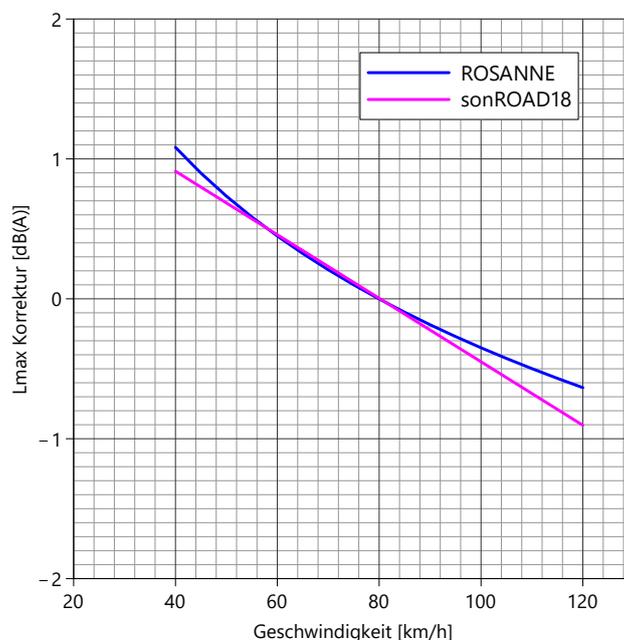


Abbildung 6.2: Für die Maximalpegelschätzung anzuwendende Korrektur gemäss ROSANNE bzw. sonROAD18.

6.2.4 Modellvergleich

Der Vergleich der oben dargestellten existierenden CPX-SPB-KB-Umrechnungsmodelle wird anhand der aus einer CPX-Messung mit dem P-Reifen bei 80 km/h geschätzten Ereignisenergie eines Personenwagens bei 80 km/h in 7.5 m Abstand angestellt. Dabei wird nur der A-Pegel betrachtet. Ausgangslage bilden die mit $KB = -9$ bis $KB = +6$ bezeichneten Standard-CPX-Spektren $L_{P,80\text{km/h}}^{\text{CPX}}[i]$ gemäss G+P [17]. Für die reinen A-Pegelmodelle wurde aus jedem Standard-CPX-Spektrum der A-Summenpegel $L_{P,80\text{km/h},A}^{\text{CPX}}$ durch Aufsummation der Terzbandwerte bestimmt. Die verschiedenen Modelle wurden wie folgt ausgewertet:

StL-86+

Die Ereignisenergie gemäss StL-86+ [14] und Leitfaden Strassenlärm wurde mit Gleichung 6.7 bestimmt.

$$L_{E,A}^{\text{StL-86+}} = 43 + 10 \lg \left(1 + \left[\frac{80}{50} \right]^3 \right) + 10 \lg(3600) - 10 \lg(7.5) + 1.5268 \cdot L_{P,80\text{km/h},A}^{\text{CPX}} - 148.3 \quad (6.7)$$

MBBM

Für die Schätzung der Ereignisenergie gemäss dem Modell von MBBM wurden zuerst die A-bewerteten Maximalpegelspektren $L_{A,\text{max},7.5\text{m},t,s}^{\text{SPB},80\text{km/h}}[i]$ aus den CPX-Standardspektren mit den Korrekturen aus Tabelle 6.1 für dichte bzw. poröse Beläge ermittelt. Daraus wurde ein A-Summenpegel $L_{A,\text{max},7.5\text{m},P,A}^{\text{SPB},80\text{km/h}}$ gebildet und mit Gleichung 6.8 bzw. 6.9 in einen Ereignispegel konvertiert.

$$L_{E,A}^{\text{MBBM}} = L_{A,\text{max},7.5\text{m},P,A}^{\text{SPB},80\text{km/h}} + 25.5 - \Delta K_{\text{max}} - 10 \lg(80) - 6.1 \quad (6.8)$$

Für 80 km/h erreicht ΔK_{max} gemäss dem Modell für die Maximalpegelschätzung einen Wert von -1.0 dB(A), sodass sich ergibt:

$$L_{E,A}^{\text{MBBM}} = L_{A,\text{max},7.5\text{m},P,A}^{\text{SPB},80\text{km/h}} + 1.4 \quad (6.9)$$

Rosanne

Die Ereignisenergie gemäss Rosanne wurde mit Gleichung 6.10 berechnet.

$$L_{E,A}^{\text{Rosanne}} = 0.95 \cdot L_{P,80\text{km/h},A}^{\text{CPX}} - 15.6 - 2.79 \ln(80) + 13.5 = 0.95 \cdot L_{P,80\text{km/h},A}^{\text{CPX}} - 15.6 + 1.3 \quad (6.10)$$

Gegenüberstellung

In Abbildung 6.3 sind die Ergebnisse des oben beschriebenen Vergleichs dargestellt.

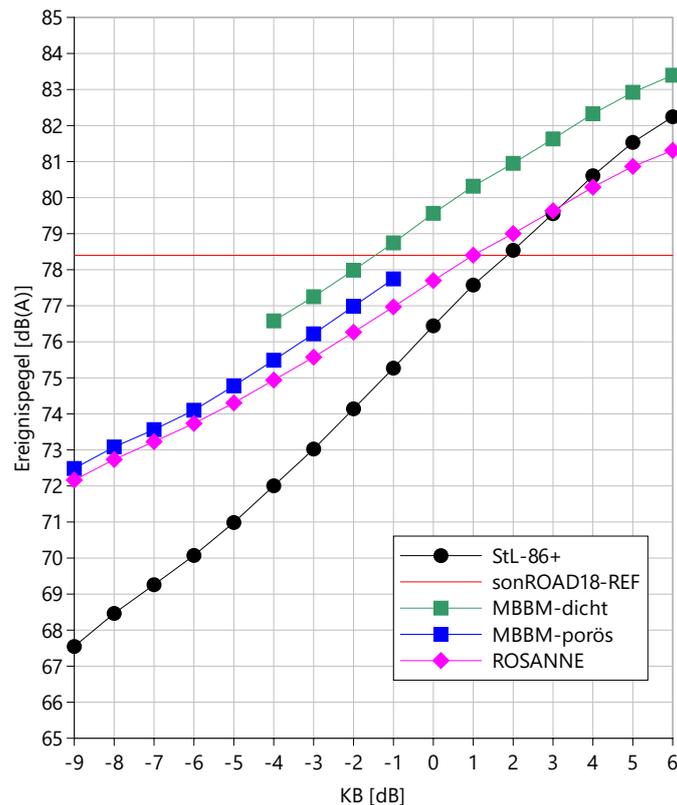


Abbildung 6.3: Vergleich der mit den unterschiedlichen Modellen geschätzten Ereignispegel einer PW-Vorbeifahrt mit 80 km/h basierend auf dem zum entsprechenden KB -Wert gehörenden CPX-Standardspektrum. Zum Vergleich ist zusätzlich der sonROAD18 Ereignispegel unter Referenzbedingungen gezeigt.

6.3 Datengrundlage für das neue Umrechnungsmodell

Grundlage für die Festlegung der CPX-Schnittstelle bildeten folgende Datensammlungen:

sonROAD18 SPB-Messdaten an den Standorten: MFM-U Reiden, MFM-U Camignolo, MFM-U Rothenbrunnen, Küttigen, Magden, Mellikon, Rümikon, Kappel, Ottenbach [1]

CPX G+P 1 durch Grolimund + Partner AG, Bern erhobene CPX-Daten an den Standorten: MFM-U Reiden, MFM-U Camignolo, MFM-U Rothenbrunnen, Küttigen, Magden, Mellikon, Rümikon, Kappel, Ottenbach [18]

SPB G+P 2 durch Grolimund + Partner AG, Bern im Laufe des Jahres 2019 erhobene SPB-Daten an 30 Standorten [19]

CPX G+P 2 durch Grolimund + Partner AG, Bern im Laufe des Jahres 2019 erhobene CPX-Daten an 30 Standorten [19]

SPB G+P 3 im Auftrag des Kt. Aargau durch Grolimund + Partner AG, Bern im Laufe des Jahres 2019 erhobene SPB-Daten an 9 Standorten [20]

CPX G+P 3 im Auftrag des Kt. Aargau durch Grolimund + Partner AG, Bern im Laufe des Jahres 2019 erhobene CPX-Daten an 9 Standorten [20]

SPB B+S CPX-RR durch B+S AG, Bern im Oktober und November 2019 erhobene SPB-Daten an 11 Standorten [21]

CPX-RR durch Grolimund + Partner AG, Bern, im Oktober 2019 erhobene CPX-Daten an 11 Standorten.

6.4 Datenaufbereitung

6.4.1 SPB-Daten

Aus den an einem Standort erhobenen SPB-Einzelereignisenergie-Daten wurde die totale gemessene Energie als Summe über alle erfassten Vorbeifahrten bestimmt. Unter Berücksichtigung der Lufttemperatur und der Fahrzeuggeschwindigkeiten wurde diese totale Energie anschliessend rechnerisch nachgebildet [1]. Die standortspezifische sonROAD18-Belagskorrektur $\Delta L_{W,R,road}[i]$ ergab sich schliesslich für Übereinstimmung der berechneten und der gemessenen Energie.

SPB-Datensammlung: sonROAD18

Die SPB-Datensammlung **sonROAD18** (Tabelle 6.2) enthält Einzelvorbeifahrtsmessungen von Personenwagen (SWISS10-3). Die Abbildung 6.4 zeigt die daraus abgeleiteten sonROAD18- Belagskorrekturen.

Standort	Belag	sig. Geschw. [km/h]
MFM-U Reiden	SMA11	120
MFM-U Camignolo	SDA8	120
MFM-U Rothenbrunnen	SDA8	120
Küttigen Richtung West	SDA4	60
Magden Richtung Nord	AC11	80
Mellikon, Richtung West	PMA	80
Rümikon2, Richtung Ost	ACMR8	80
Kappel 50, Richtung Süd	ACMR8	50
Ottenbach, 50, auf	ACMR8	50
Ottenbach 50, ab	ACMR8	50

Tabelle 6.2: Standorte, Belagstypen und signalisierte Geschwindigkeiten der Datensammlung sonROAD18.

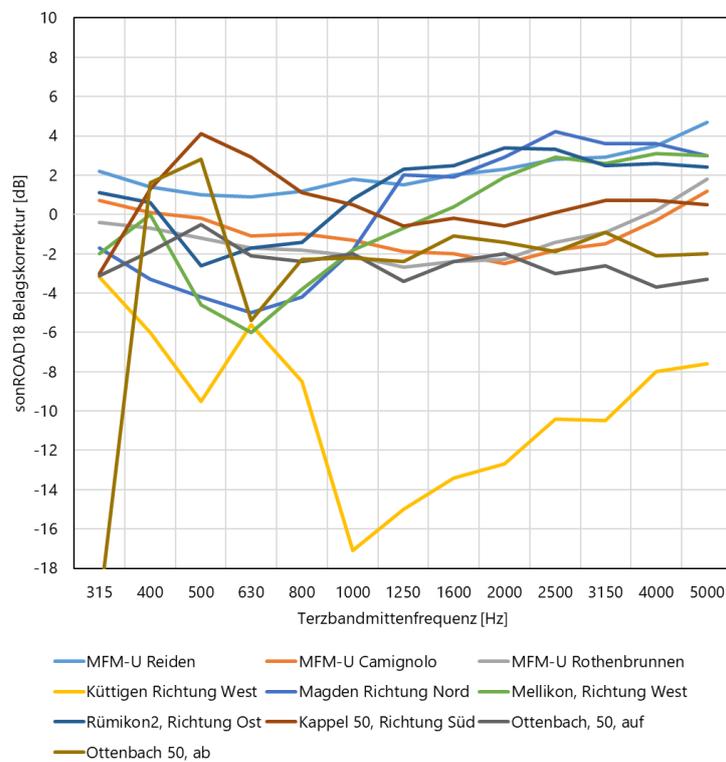


Abbildung 6.4: Aus den SPB-Daten der Datensammlung sonROAD18 abgeleitete sonROAD18- Belagskorrekturspektren.

SPB-Datensammlung: SPB G+P 2

Die SPB-Datensammlung **SPB G+P 2** (Tabellen 6.3 und 6.4) enthält Einzelvorbeifahrtsmessungen von Personewagen (SWISS10-3). Gemäss Empfehlung von G+P wurden die direkt erfassten spektralen Ereignisenergien ohne Aspektwinkelkorrektur verwendet. Die Abbildungen 6.5 und 6.6 zeigen die daraus abgeleiteten sonROAD18- Belagskorrekturen.

Standort	Belag	durchschn. Geschw. [km/h]
Aarburg	SMA11_2007	51
Dintikon	SDA4-12_2014	45
Haerkingen	SDA8-12_2017	45
Latterbach	SDA4_2018	50
LeMouret	Famsi_2018	47
Mooslerau	SDA4-12_2018	49
Muenchwilen	TA_1982	48
Obersiggenthal	ACMR11_2002	48
Rheinau	AC8_2018	47
Roggwil	SDA4-16_2016	47
Romont	Famsi_2011	43
Rose	Famsi_2017	47
Ruegsauschachen	SDA8-12_2012	44
Zofingen	SDA4-12_2012	44

Tabelle 6.3: Innerorts-Standorte, Belagstypen und durchschnittliche Geschwindigkeiten der Datensammlung SPB G+P 2.

Standort	Belag	durchschn. Geschw. [km/h]
Matran	Sapaphone4_2012	73
N1_Haerkingen	SDA8_2014	101
N1_Hindelbank(neuerBelag)	?_?	116
N1_Mattstetten	?_2019	120
N1_Oberbipp	AC16_1990	104
N1_Othmarsingen	PA_?	121
N1_Payerne	PA11_2003	114
N1_RastplatzSuhr	SMA11_2000	118
N1_Suhr	PA_?	119
N2_Huebbach	?_?	111
N2_Rivera	?_?	116
N6_Buchholz	ACMR11_2013	118
N6_Kiesen	SDA8_2016	116
N12_Niederwangen	ACMR8_2008	97
N12_Wuennwil-Flamatt	?_?	118
N51_Winkel	SDA8-12_2018	117

Tabelle 6.4: Ausserorts-Standorte, Belagstypen und durchschnittliche Geschwindigkeiten der Datensammlung SPB G+P 2.

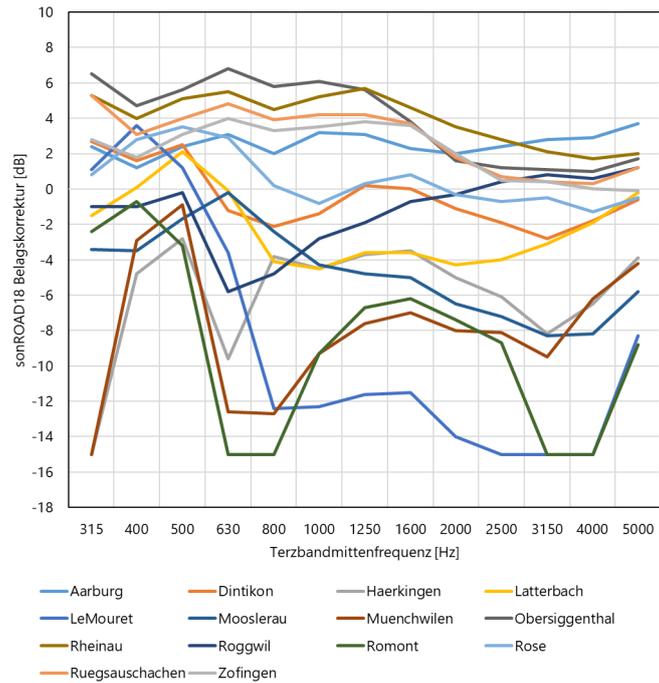


Abbildung 6.5: Aus den innerorts SPB-Daten der Datensammlung SPB G+P 2 abgeleitete sonROAD18-Belagskorrekturspektren.

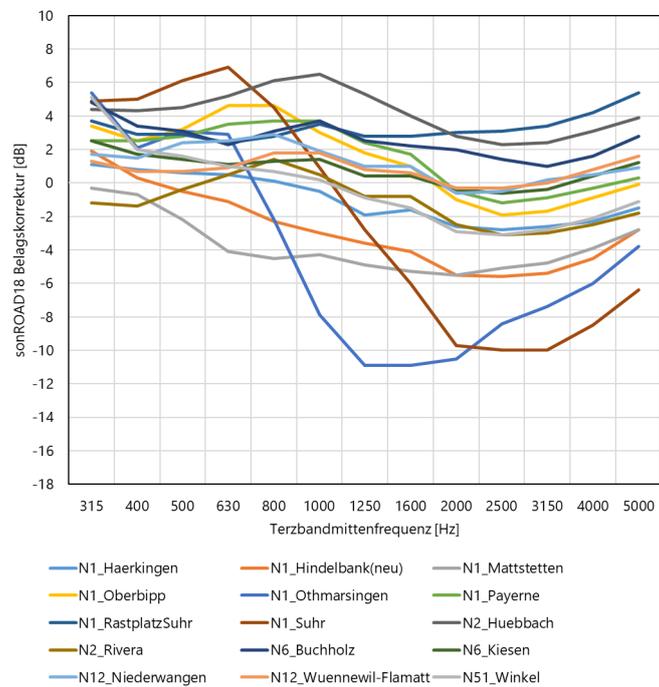


Abbildung 6.6: Aus den ausserorts SPB-Daten der Datensammlung SPB G+P 2 abgeleitete sonROAD18-Belagskorrekturspektren.

SPB-Datensammlung: SPB G+P 3

Die SPB-Datensammlung **SPB G+P 3** (Tabelle 6.5) enthält Einzelvorbeifahrtsmessungen von Personewagen (SWISS10-3). Gemäss Empfehlung von G+P wurden die direkt erfassten spektralen Ereignisenergien ohne Aspektwinkelkorrektur verwendet. Die Abbildung 6.7 zeigt die daraus abgeleiteten sonROAD18-Belagskorrekturen.

Standort	Belag	durchschn. Geschw. [km/h]
Ammerswil	SDA4-12_2019	52
Brunegg	SDA4-12_2017	49
Killwangen		51
Oberwil	SDA8_2018	52
Oftringen	SDA4-16_2014	48
Reinach	SDA8-12_2016	50
Safenwil	SDA4-16_2013	49
Teufenthal	ACMR8_2012	49
Zofingen	SDA4-12_2012	47

Tabelle 6.5: Belagstypen und durchschnittliche Geschwindigkeiten der Datensammlung SPB G+P 3.

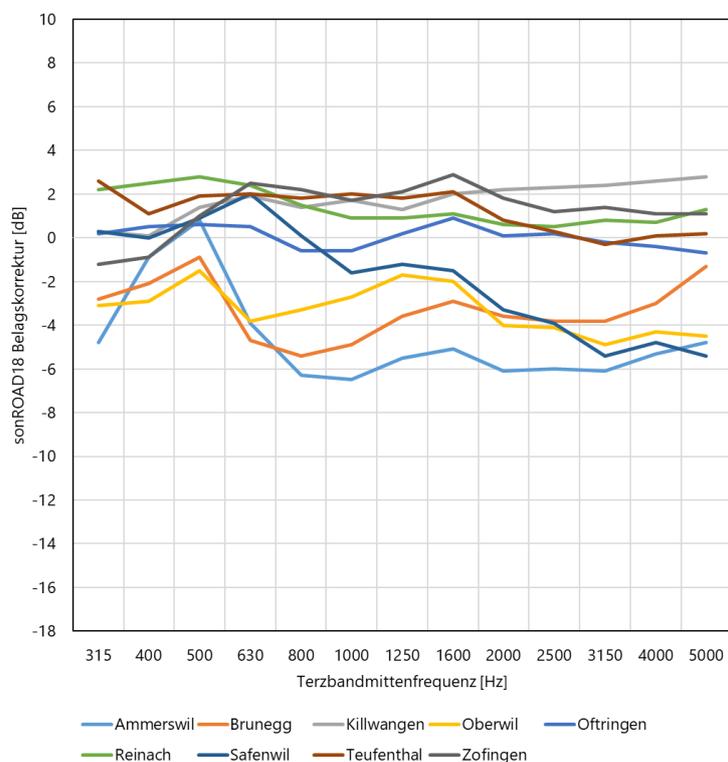


Abbildung 6.7: Aus den SPB-Daten der Datensammlung SPB G+P 3 abgeleitete sonROAD18-Belagskorrekturspektren.

SPB-Datensammlung: SPB B+S CPX-RR

Die SPB-Datensammlung **SPB B+S CPX-RR** (Tabellen 6.6 und 6.7) enthält Einzelvorbeifahrtmessungen von hauptsächlich Personenwagen (SWISS10-3) und wenigen übrigen Fahrzeugen an Standorten, die im Rahmen der CPX-Round-Robin Messkampagne befahren wurden. Am Standort *N01_Walterswil-Breitmatt* betrug der Messabstand 8.4 m, sodass hier alle Terzbandpegel um 0.5 dB erhöht wurden. Die Abbildungen 6.8 und 6.9 zeigen die daraus abgeleiteten sonROAD18-Belagskorrekturen.

Standort	Belag	durchschn. Geschw. [km/h]
K387_Gemeindehaus-Rtg-Dottikon	AC11_1993	45
K387_Freikirche-Rtg-Dottikon	SDA4_2012	44
K387_Freikirche-Rtg-Dintikon	SDA4_2012	41
K387_Lindenbergstrasse-Rtg-Dottikon	ACMR8_2013	41
K387_Lindenbergstrasse-Rtg-Dintikon	ACMR8_2013	42
K387_Güterstrasse-Rtg-Dottikon	AC11	45
K387_Güterstrasse-Rtg-Dintikon	AC11	47
K387_Neuquartierstrasse-Rtg-Dottikon	SDA4_2015	45

Tabelle 6.6: Innerorts-Standorte, Belagstypen und durchschnittliche Geschwindigkeiten der Datensammlung SPB B+S CPX-RR.

Standort	Belag	durchschn. Geschw. [km/h]
N01_Raststätte-Kölliken-Nord	PA11_2010	111
N01_Rastplatz-Walterswil	PA11_2010	113
N01_Walterswil-Breitmatt	PA11_2010	114
N01_ESP-Oftringen	SMA11_1998	112

Tabelle 6.7: Ausserorts-Standorte, Belagstypen und durchschnittliche Geschwindigkeiten der Datensammlung SPB B+S CPX-RR.

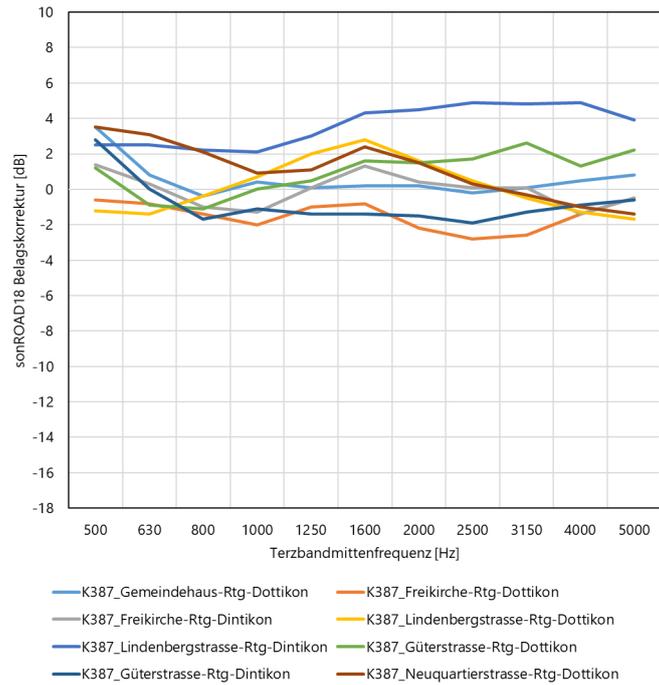


Abbildung 6.8: Aus den innerorts SPB-Daten der Datensammlung SPB B+S CPX-RR abgeleitete sonROAD18-Belagskorrekturspektren.

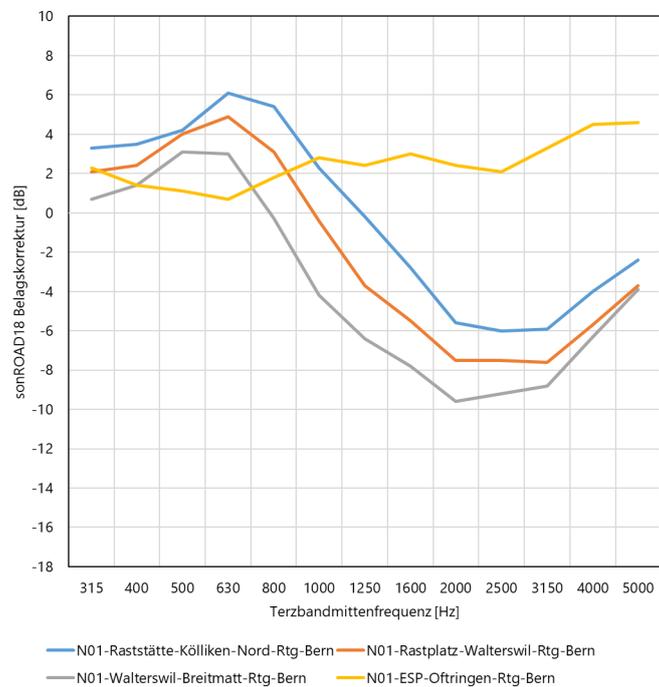


Abbildung 6.9: Aus den ausserorts SPB-Daten der Datensammlung SPB B+S CPX-RR abgeleitete sonROAD18-Belagskorrekturspektren.

6.4.2 CPX-Daten

CPX-Datensammlungen: CPX G+P 1 bis 3

Die CPX-Datensammlungen **CPX G+P 1 bis 3** dokumentieren CPX-Messfahrten von Grolimund + Partner AG, Bern auf den Strassenabschnitten, auf welchen entsprechende SPB-Messungen erhoben wurden. Die Daten liegen als CPX-Terzbandpegel in lokaler Auflösung von 20 m langen Segmenten vor, wobei jeder Strassenabschnitt mit dem hier interessierenden PW-Reifen (A1) typisch dreimal befahren wurde. Für die weitere Auswertung wurde als repräsentatives CPX-Spektrum der arithmetische Mittelwert des linken und rechten Rads und über die drei dem SPB-Standort am nächsten gelegenen CPX-Segmente und die drei Messfahrten auf der mit der SPB-Messung erfassten Fahrspur bestimmt.

CPX-Datensammlung: CPX-RR

Die CPX-Datensammlung CPX-RR umfasst die von Grolimund + Partner AG, Bern im Rahmen eines Round Robin erhobenen Rohdaten mit entsprechenden Korrekturwerten in lokaler Auflösung von 20 m. Ausgehend von den SPB-Messstandorten aus der Datensammlung **SPB B+S CPX-RR** wurden von allen CPX-Messfahrten mit dem PW-Reifen (P) nach der Normierung auf Referenzbedingungen jeweils die drei am nächsten liegenden Segmente ausgewählt und der arithmetische Mittelwert über das linke und rechte Rad, die drei 20m-Segmente und alle Messfahrten gebildet.

6.5 Formalismus der Schnittstelle $\Delta L_{W,R,road,\leftarrow CPX,v}[i]$

Die CPX-Schnittstelle $\Delta L_{W,R,road,\leftarrow CPX,v}[i]$ stellt einen funktionalen Zusammenhang zwischen dem auf Referenzbedingungen normierten CPX-Messpegel-Spektrum $L_{CPX,v}[i]$ und dem Belagskorrektur-Spektrum $\Delta L_{W,R,road}[i]$ dar. Da nicht a priori davon ausgegangen werden kann, dass sich eine bestimmte CPX-Pegeländerung 1:1 in eine Belagskorrekturänderung übersetzt, wird der in Gleichung 6.11 gezeigte Ansatz gewählt, wobei $\Delta_{CPX,v}[i] = L_{CPX,v}[i] - L_{CPX,v,ref}[i]$. Der Index v bezieht sich auf die CPX-Referenz-Geschwindigkeit 50 oder 80 km/h.

$$\Delta L_{W,R,road,\leftarrow CPX,v}[i] = \begin{cases} A_{1,v}[i] \cdot \Delta_{CPX,v}[i] & : \Delta_{CPX,v}[i] \geq 0 \\ A_{2,v}[i] \cdot \Delta_{CPX,v}[i] + A_{3,v}[i] \cdot \Delta_{CPX,v}[i]^2 & : \Delta_{CPX,v}[i] < 0 \end{cases} \quad (6.11)$$

Für die Festlegung des Umrechnungsmodells werden in jeder Terz i die Grössen $L_{CPX,v,ref}$ sowie $A_{1,v}$, $A_{2,v}$ und $A_{3,v}$ benötigt. CPX-Messungen werden standardmässig bei 50 und 80 km/h durchgeführt. Wie sich bei der Analyse zeigt, muss für beide Geschwindigkeiten ein eigener Parametersatz bestimmt werden.

6.6 Parameteranpassung

6.6.1 Vorgehen

Die Anpassung der Parameter des Umrechnungsmodells (Gleichung 6.11) erfolgte unabhängig für die beiden CPX-Referenzgeschwindigkeiten $v = 50$ km/h und 80 km/h jeweils unter Berücksichtigung aller entsprechenden CPX-SPB-Messwertpaare. Dazu wurde in jeder Terz von 315 bis 5000 Hz eine erschöpfende Suche für das kleinste mittlere Quadrat der Abweichung zwischen modelliertem und aus den SPB-Messungen abgeleiteter sonROAD18-Belagskorrektur durchgeführt. Zusätzlich wurde gefordert, dass das Modell einen streng monotonen (stetig wachsenden) Verlauf erzeugt. Die Tabelle 6.8 zeigt den Suchbereich und die Diskretisierung des Parameterraumes.

Parameter	Minimum	Maximum	Schrittweite
$L_{CPX,v,ref}$	60	100	0.27
$A_{1,v}$	0	3	0.02
$A_{2,v}$	-3	+3	0.04
$A_{3,v}$	-3	+3	0.04

Tabelle 6.8: Suchbereiche und Schrittweiten für die Modellparameteranpassungen.

6.6.2 Modell für 50 km/h

Die Abbildung 6.10 zeigt terzbandweise als Scatterplot die 50 km/h-CPX-Messpegel und die aus SPB-Messungen gewonnenen sonROAD18-Belagskorrekturwerte. Zusätzlich ist das mit den Parametersetzungen aus Tabelle 6.9 angepasste Modell eingezeichnet. Die Schätzung der mit SPB bestimmten sonROAD18-Belagskorrekturspektren aus den CPX-Messungen gelingt mit einer durch die Standardabweichungen in Abbildung 6.11 gezeigten Unsicherheit.

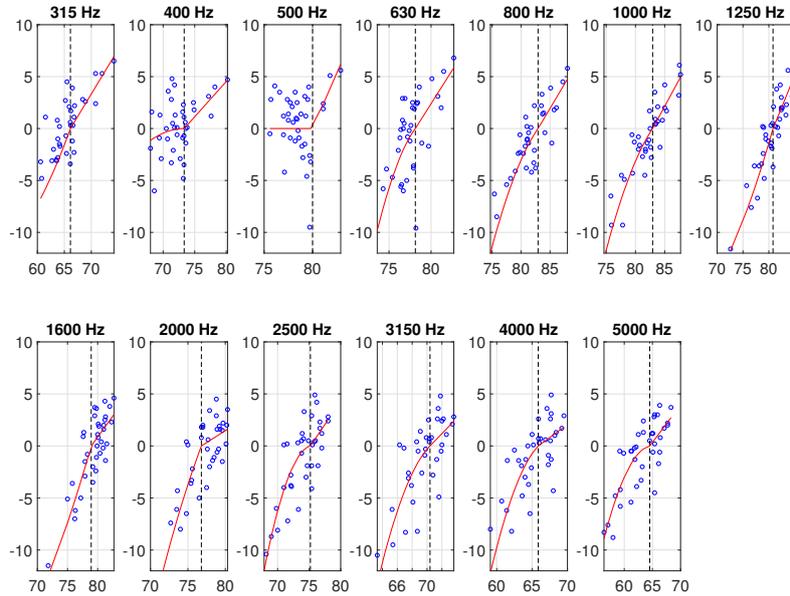


Abbildung 6.10: XY-Kreis-Darstellung der spektralen CPX-Messpegel (horizontale Achse) und der sonROAD18-Belagskorrektur (vertikale Achse) für CPX bei 50 km/h. Die Linie zeigt das angepasste Modell.

Terzband	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
$L_{CPX,50km/h,ref}$	66.1	73.3	80.0	78.1	82.9	82.9	80.8	78.9	76.8	75.2	70.4	65.9	64.5
$A_{1,50km/h}$	0.86	0.68	2.14	1.28	0.94	1.04	1.22	0.80	0.46	0.90	0.74	0.50	0.72
$A_{2,50km/h}$	1.44	0.00	0.00	1.08	0.80	0.84	1.76	2.04	1.92	0.16	0.72	0.72	0.12
$A_{3,50km/h}$	0.04	-0.04	0.00	-0.24	-0.08	-0.08	0.04	0.04	-0.08	-0.20	-0.16	-0.16	-0.12

Tabelle 6.9: Spektrale Modellparameter für CPX-Messungen bei 50 km/h.

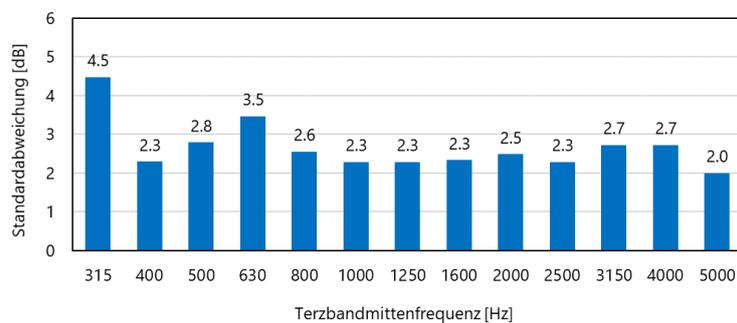


Abbildung 6.11: Terzbandweise Standardabweichung der Differenz der mittels SPB ermittelten sonROAD18-Belagskorrektur zur Modellprognose aus der CPX-Messung.

6.6.3 Modell für 80 km/h

Die Abbildung 6.12 zeigt terzbandweise als XY-Plot die 80 km/h-CPX-Messpegel und die aus SPB-Messungen gewonnenen sonROAD18-Belagskorrekturwerte. Zusätzlich ist das mit den Parameterstellungen aus Tabelle 6.10 angepasste Modell eingezeichnet. Die Schätzung der mit SPB bestimmten sonROAD18-Belagskorrekturspektren aus den CPX-Messungen gelingt mit einer durch die Standardabweichungen in Abbildung 6.13 gezeigten Unsicherheit.

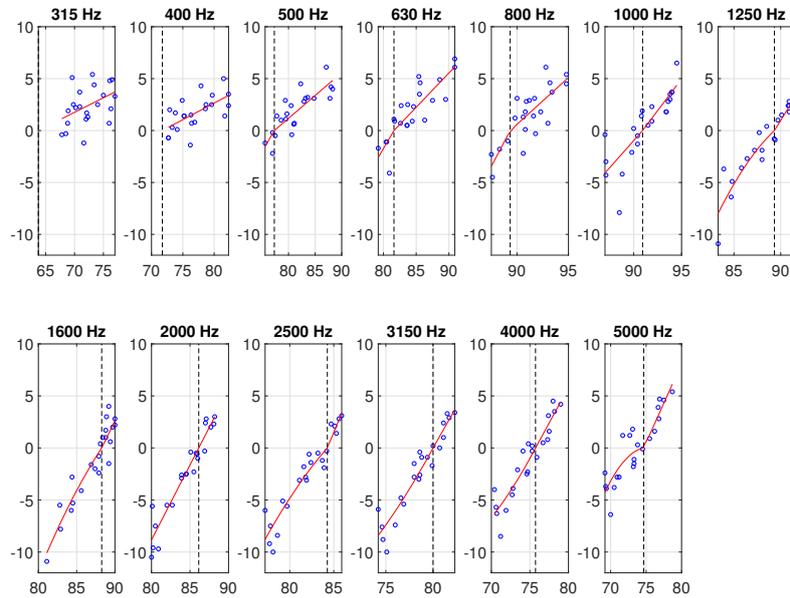


Abbildung 6.12: XY-Kreis-Darstellung der spektralen CPX-Messpegel (horizontale Achse) und der sonROAD18-Belagskorrektur (vertikale Achse) für CPX bei 80 km/h. Die Linie zeigt das angepasste Modell.

Terzband	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
$L_{CPX,80km/h,ref}$	63.7	71.7	77.3	81.6	89.3	90.9	89.3	88.3	86.1	84.3	80.0	75.7	74.7
$A_{1,80km/h}$	0.28	0.32	0.44	0.66	0.90	1.22	1.46	1.50	1.44	2.04	1.60	1.36	1.52
$A_{2,80km/h}$	-0.68	-0.16	0.88	1.08	1.88	1.04	0.84	1.12	1.44	0.96	1.68	1.40	0.12
$A_{3,80km/h}$	-2.96	-0.72	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.08	-0.04	0.00	-0.04	0.04	0.04	-0.12

Tabelle 6.10: Spektrale Modellparameter für CPX-Messungen bei 80 km/h.

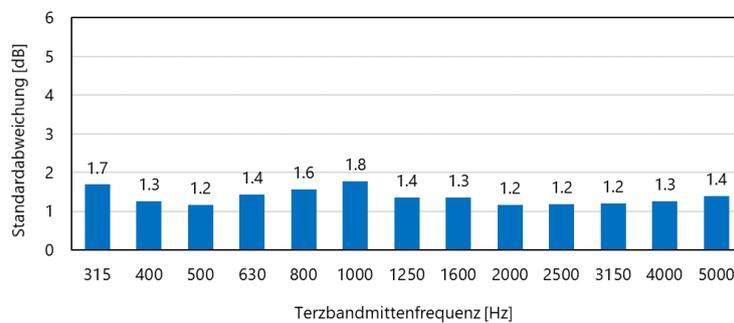


Abbildung 6.13: Terzbandweise Standardabweichung der Differenz der mittels SPB ermittelten sonROAD18-Belagskorrektur zur Modellprognose aus der CPX-Messung.

6.7 CPX-Standardspektren

6.7.1 Konzept

Wenn keine spezifischen CPX-Messdaten für den interessierenden Standort vorliegen, kann eine Belagscharakterisierung anhand des Belagskennwerts KB gemäss Definition Leitfadend Strassenlärm [22] vorgenommen werden. Zu diesem Zweck hat die Grolimund + Partner AG, Bern, die Sammlung ihrer gemessenen CPX-Spektren nach KB sortiert und zu ganzzahligen Klassen zusammengefasst [17]. Dabei hat sich gezeigt, dass innerhalb einer KB Klasse die CPX-Spektren ähnlich verlaufen, sodass sich pro Klasse *CPX-Standard-Spektren* festlegen lassen. Damit lässt sich anhand eines KB-Wertes das entsprechende CPX-Standard-Spektrum auswählen und mit der CPX-Schnittstelle das sonROAD18-Belagskorrekturspektrum finden (Abbildung 6.14).

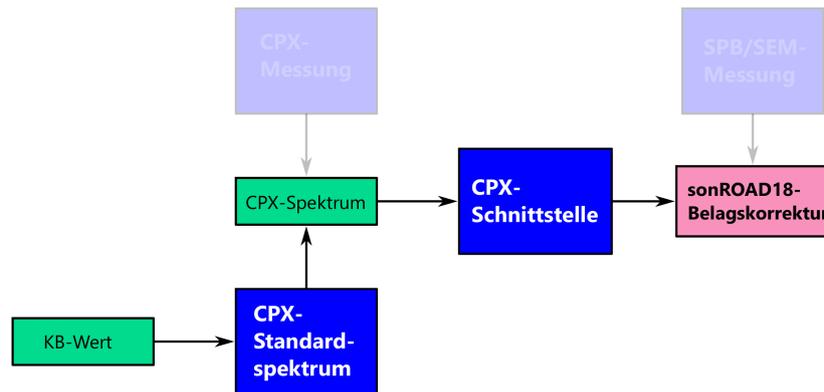


Abbildung 6.14: Ermittlung der sonROAD18-Belagskorrektur anhand eines KB-Wertes und zugehörigem CPX-Standardspektrum.

6.7.2 CPX-Standardspektren bei 50 km/h

Die Abbildung 6.15 zeigt für einen Belagskennwert $KB = 0$ dB und 50 km/h das zugehörige A-bewertete CPX-Standardspektrum. Mit diesem Spektrum als Referenz zeigt Abbildung 6.16 die Abhängigkeit der CPX-Terzbandpegel vom KB Wert. Die Steigung der CPX-Messpegel/KB-Kurven verläuft spektral unterschiedlich. Für KB-Werte < -1 dB sind die untersten Terzen nur noch schwach bzw. überhaupt nicht mehr vom KB-Wert abhängig.

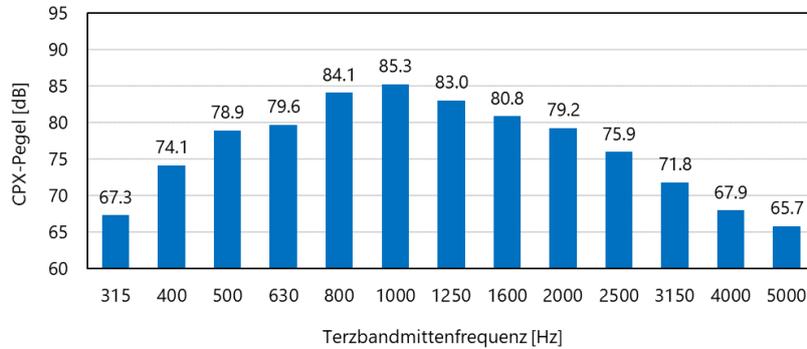


Abbildung 6.15: A-bewertetes CPX-Standardspektrum für 50 km/h und $KB = 0$ dB.

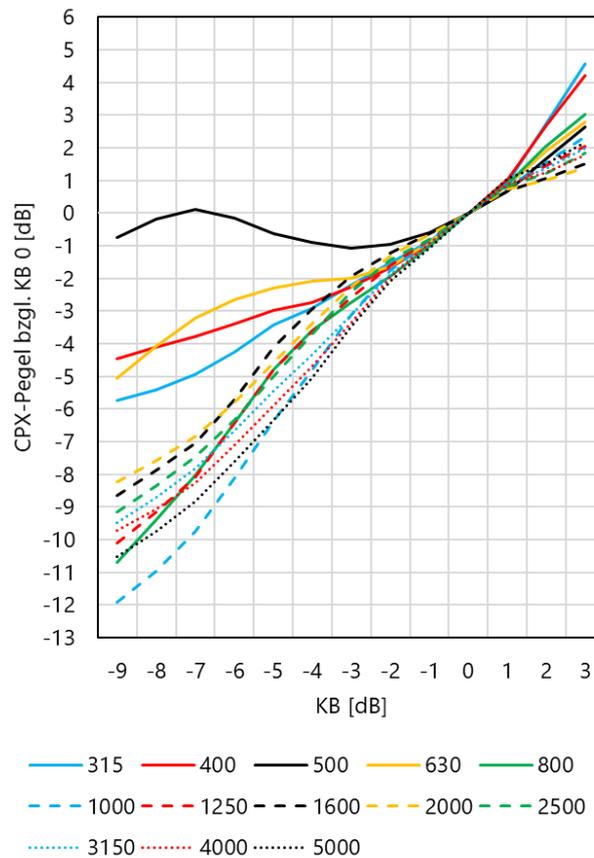


Abbildung 6.16: Spektrale Abhängigkeiten der CPX-Standardspektren vom KB-Wert bezogen auf die Referenz $KB = 0$ dB für 50 km/h.

6.7.3 CPX-Standardspektren bei 80 km/h

Die Abbildung 6.17 zeigt für einen Belagskennwert $KB = 0$ dB und 80 km/h das zugehörige A-bewertete CPX-Standardspektrum. Mit diesem Spektrum als Referenz zeigt Abbildung 6.18 die Abhängigkeit der CPX-Terzbandpegel vom KB Wert. Die Steigung der CPX-Messpegel/KB-Kurven verläuft spektral unterschiedlich. Für KB-Werte < -2 dB wird die Steigung der untersten Terzen negativ, d.h. mit abnehmendem KB nimmt der CPX-Pegel zu.

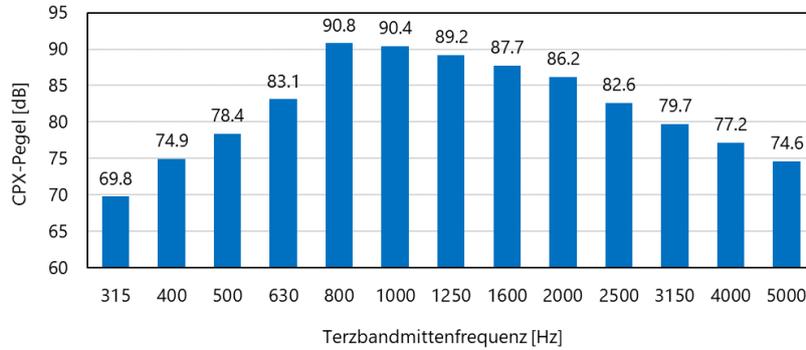


Abbildung 6.17: A-bewertetes CPX-Standardspektrum für 80 km/h und $KB = 0$ dB.

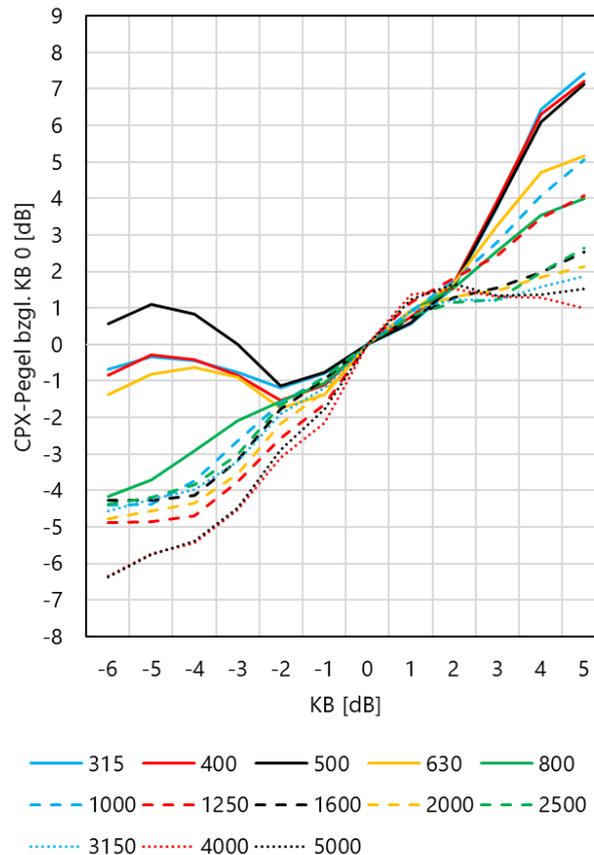


Abbildung 6.18: Spektrale Abhängigkeiten der CPX-Standardspektren vom KB-Wert bezogen auf die Referenz $KB = 0$ dB für 80 km/h.

6.8 sonROAD18-Standard-Belagskorrekturspektren

6.8.1 Konzept und Fazit

Die obigen von Grolimund + Partner AG, Bern definierten CPX-Standardspektren für die entsprechenden KB-Werte lassen sich mit dem Modell der CPX-Schnittstelle in sonROAD18-Standard-Belagskorrekturspektren $\Delta L_{W,R,road}[i]$ übersetzen. Obwohl die sonROAD18-Belagskorrektur geschwindigkeitsunabhängig formuliert ist, muss hier gleichwohl nach KB-Werten für 50 bzw. 80 km/h unterschieden werden. Der Grund liegt darin, dass die KB-Werte die Anpassung des StL-86+-Modells ausdrücken, welches geschwindigkeitsabhängig die Emission der heutigen Fahrzeugflotte nicht mehr korrekt abbildet.

Die Analyse der über KB \rightarrow CPX-Standardspektren \rightarrow CPX-Schnittstelle gewonnenen sonROAD18-Standard-Belagskorrekturspektren (siehe Abbildungen 6.19 und 6.20) zeigt in den Terzen unterhalb von 800 Hz nur relativ geringe Variationen. Anhand eines Vergleichs mit aus SPB-Messungen gewonnenen sonROAD18 Belagskorrekturen muss in diesem Frequenzbereich von einer grösseren Unsicherheit ausgegangen werden.

Grundsätzlich ist der KB-Wert in Zusammenhang mit sonROAD18 als Label aufzufassen. Abgesehen von der angesprochenen, belagsunabhängigen StL-86+-Modellanpassung auf den heutigen Fahrzeugpark ist der KB-Wert bei 20°C justiert, wogegen sonROAD18 in den Referenzeinstellungen für eine jahresdurchschnittliche Temperatur von 10°C ausgelegt ist. Gegenüber einer Charakterisierung von Belägen mittels KB-Werten sind direkter gewonnene Daten vorzuziehen.

6.8.2 Standardspektren aus KB für 50 km/h

Die Abbildung 6.19 und die Tabelle 6.11 zeigen die aus den CPX-Standardspektren bei 50 km/h bestimmten sonROAD18-Belagskorrekturspektren. Während hochfrequent ab 800 Hz die Kurvenschar gleichmässig auffächert, ist bei tieferen Frequenzen die sonROAD18-Belagskorrektur-Abhängigkeit vom KB-Wert geringer als die aus SPB-Messungen abgeleiteten Belagskorrekturen erwarten lassen.

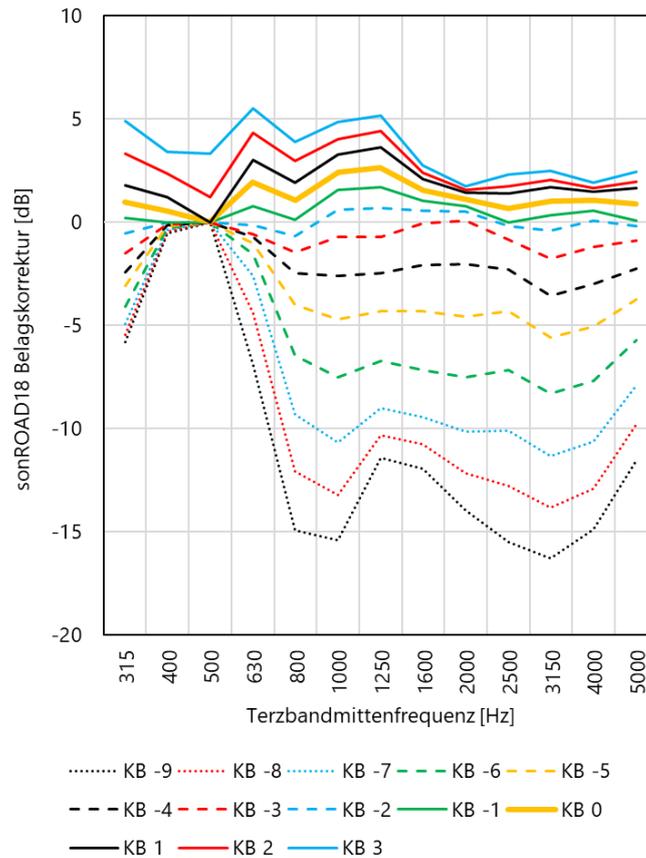


Abbildung 6.19: sonROAD18-Standard-Belagskorrekturspektren für KB Werte bei 50 km/h.

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

Tabelle 6.11: sonROAD18-Standard-Belagskorrekturspektren für KB Werte bei 50 km/h.

6.8.3 Standardspektren aus KB für 80 km/h

Die Abbildung 6.20 und die Tabelle 6.12 zeigen die aus den CPX-Standardspektren bei 80 km/h bestimmten sonROAD18-Belagskorrekturspektren. Während hochfrequent ab 800 Hz die Kurvenschar gleichmässig auffächert, ist bei tieferen Frequenzen die sonROAD18-Belagskorrektur-Abhängigkeit vom KB-Wert geringer als die aus SPB-Messungen abgeleiteten Belagskorrekturen erwarten lassen.

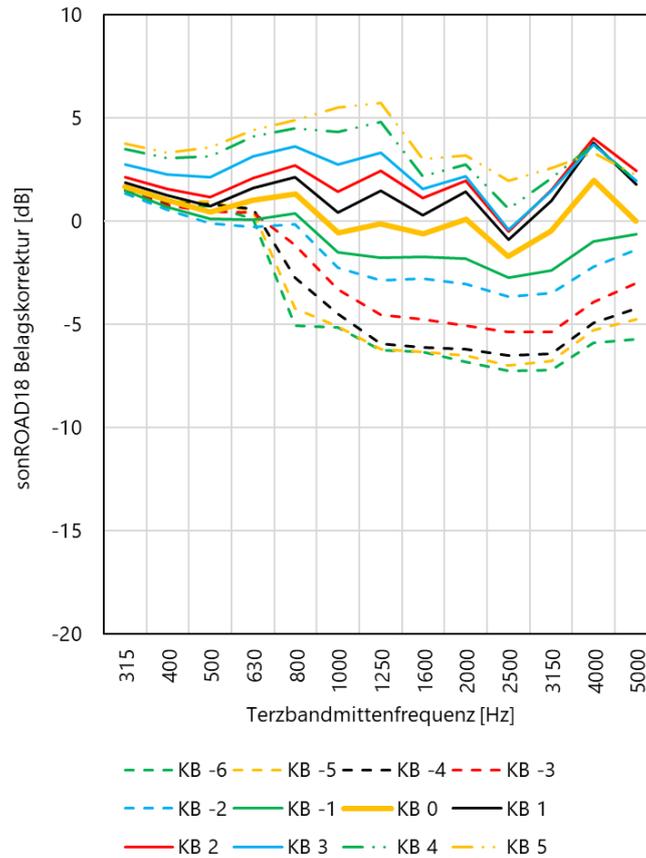


Abbildung 6.20: sonROAD18-Standard-Belagskorrekturspektren für KB Werte bei 80 km/h.

Terzband	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
KB -6	1.5	0.8	0.7	0.1	-5.1	-5.1	-6.3	-6.3	-6.8	-7.3	-7.2	-5.9	-5.7
KB -5	1.6	0.9	0.9	0.5	-4.2	-5.1	-6.2	-6.3	-6.5	-7.0	-6.8	-5.3	-4.7
KB -4	1.6	0.9	0.8	0.6	-2.7	-4.5	-5.9	-6.1	-6.2	-6.5	-6.4	-4.9	-4.2
KB -3	1.5	0.8	0.5	0.4	-1.2	-3.3	-4.5	-4.7	-5.0	-5.4	-5.4	-3.9	-3.0
KB -2	1.4	0.5	-0.1	-0.3	-0.2	-2.2	-2.9	-2.8	-3.0	-3.6	-3.5	-2.2	-1.4
KB -1	1.5	0.7	0.1	0.1	0.4	-1.5	-1.8	-1.7	-1.8	-2.7	-2.4	-1.0	-0.6
KB 0	1.7	1.0	0.5	1.0	1.3	-0.6	-0.1	-0.6	0.1	-1.7	-0.5	2.0	0.0
KB 1	1.9	1.3	0.7	1.6	2.1	0.4	1.5	0.3	1.4	-0.9	1.0	3.8	1.8
KB 2	2.1	1.6	1.2	2.1	2.7	1.4	2.4	1.1	2.0	-0.5	1.5	4.0	2.4
KB 3	2.7	2.3	2.1	3.2	3.6	2.7	3.3	1.5	2.2	-0.4	1.5	3.7	1.9
KB 4	3.5	3.0	3.1	4.1	4.5	4.3	4.8	2.2	2.7	0.6	2.1	3.7	2.0
KB 5	3.8	3.3	3.6	4.4	4.9	5.5	5.7	3.0	3.2	2.0	2.6	3.3	2.2

Tabelle 6.12: sonROAD18-Standard-Belagskorrekturspektren für KB Werte bei 80 km/h.

7 Testaufgaben inklusive Ausbreitungsrechnung

7.1 Einleitung

Für die Überprüfung einer Implementierung des sonROAD18-Emissionsmodells stehen in der Modelldokumentation Rechenbeispiele zur Verfügung. Die hier vorgestellten Testaufgaben gehen weiter und umfassen je eine vollständige Immissionspegelbestimmung unter Einbezug einer Ausbreitungsrechnung gemäss ISO 9613-2:1996. Dabei wurden die Berechnungen einmal mit Oktavbandauflösung und einmal mit Terzbandauflösung durchgeführt.

7.2 Eigene Implementierung

Die hier gezeigten Berechnungen basieren für die Ermittlung der Emissionen auf dem sonROAD18 Excel-Tool und für die Ausbreitungsdämpfung auf einer eigenen Delphi/Pascal-Implementierung der ISO 9613-2 für eine Punkt-Punkt-Ausbreitung. Dieser Code bildete seinerzeit die Grundlage für die von der Schweizerischen Gesellschaft für Akustik SGA erarbeiteten und publizierten Testaufgaben zu ISO 9613-2 [23] und wurde mit unabhängigen Implementierungen überprüft. Für die hier interessierende Anwendung wurde die Software so modifiziert, dass automatisch eine Diskretisierung einer gegebenen Linienquelle mit entsprechender Anpassung der Quellpunkt-Empfängerpunkt-Geometrie vorgenommen wird und die Teilergebnisse in ein Protokollfile für die Aufintegration in Excel geschrieben werden.

7.3 Detaillierte Rechenschritte in Oktavbändern

Für die Immissionspegelberechnung wird die Linienquelle in eine Punktquellenreihe P_k diskretisiert (hier äquidistant zu 2 m angenommen). Für jede SWISS10-Fahrzeugkategorie c wird eine Vorbeifahrt modelliert, indem jeder Quellenpunkt P_k für eine Zeitdauer $T_k[c] = l_k/(v[c]/3.6)$ mit der Schallleistung $L_{W,9613,A}[c, o] + 10 \lg(N[c])$ aktiviert wird. Dabei ist l_k der durch P_k repräsentierte Längenabschnitt, $v[c]$ die Geschwindigkeit in km/h und $N[c]$ die Anzahl Fahrzeuge pro Stunde in der Kategorie c , o ist der Index des Oktavbandes. Der A-bewertete Oktavband-Schallleistungspegel $L_{W,9613,A}[c, o]$ berechnet sich mit Gleichung 7.1 aus den zugehörigen sonROAD18-Terzbandwerten unter Berücksichtigung der A-Bewertung gemäss Tabelle 7.1.

$$L_{W,9613,A}[c, o] = 10 \lg \left(\sum_{i=i_u}^{i_o} 10^{0.1(L_{W,c,i} + A_f[i])} \right) \quad (7.1)$$

In Gleichung 7.1 bezeichnet c die Fahrzeugkategorie, $i_u \dots i_o$ sind die Indizes der zum Oktavband o gehörenden Terzbänder, $A_f[i]$ ist die A-Bewertung für das Terzband i .

Mit der gemäss ISO9613-2 bestimmten Oktavband-Dämpfung $A_k[o]$ für die Ausbreitung vom Quellenpunkt P_k zum Immissionspunkt ergibt sich der A-bewertete Immissionspegelbeitrag $L_{eq,A,k}[o]$ der durch den Quellenpunkt P_k beigesteuert wird zu

$$L_{eq,A,k}[o] = 10 \lg \left(\sum_{c=1}^{10} \frac{T_k[c]}{3600} N[c] 10^{0.1 L_{W,9613,A}[c,o]} \right) - A_k[o] = 10 \lg \left(\sum_{c=1}^{10} \frac{l_k N[c]}{v[c] 1000} 10^{0.1 L_{W,9613,A}[c,o]} \right) - A_k[o] \quad (7.2)$$

Das A-bewertete Gesamtimmisionspegelspektrum $L_{eq,A}[o]$ wird durch energetische Aufsummation der Beiträge jedes Quellenpunktes gebildet:

1	2	3	4	5	6	7	8
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
9	10	11	12	13	14	15	16
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
17	18	19	20	21	22	23	24
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 7.1: A-Bewertung $A_f[i]$ für die Terzbänder 1 (50 Hz) bis 24 (10 kHz) in dB. Positive Werte entsprechen einer Verstärkung, negative Werte einer Abschwächung.

$$L_{eq,A}[o] = 10 \lg \left(\sum_k 10^{0.1L_{eq,A,k}[o]} \right) \quad (7.3)$$

Durch energetische Aufsummation der A-bewerteten Oktavbandpegel $L_{eq,A}[o]$ wird schliesslich der A-bewertete Immissionspegel $L_{eq,A,tot}$ gefunden:

$$L_{eq,A,tot} = 10 \lg \left(\sum_{o=1}^8 10^{0.1L_{eq,A}[o]} \right) \quad (7.4)$$

7.4 Detaillierte Rechenschritte in Terzbändern

Für die Immissionspegelberechnung wird die Linienquelle wie oben diskretisiert und über Punktquellen mit der Schalleistung $L_{W,9613,A}[c, i] + 10 \lg(N[c])$ aktiviert. Dabei ist $N[c]$ die Anzahl Fahrzeuge pro Stunde in der Kategorie c , i ist der Index des Terzbandes. Der A-bewertete Terzband-Schalleistungspegel $L_{W,9613,A}[c, i]$ berechnet sich mit Gleichung 7.5 aus den zugehörigen sonROAD18-Terzbandwerten unter Berücksichtigung der A-Bewertung $A_f[i]$ gemäss Tabelle 7.1.

$$L_{W,9613,A}[c, i] = L_W[c, i] + A_f[i] \quad (7.5)$$

ISO 9613-2 ist als Ausbreitungsmodell grundsätzlich in Oktaven beschrieben. Die Ausbreitungseffekte *Luftdämpfung* und *Hinderniswirkung* sind aber frequenzkontinuierlich formuliert und lassen sich damit ohne weiteres in Terzbandauflösung angeben. Der *Bodeneffekt* sowie die übrigen Zusatzdämpfungen stehen dagegen nur in Oktavbändern zur Verfügung. Hier wird jeweils den drei zu einem Oktavband gehörenden Terzen der entsprechende Oktavwert zugeordnet. Mit der so gemäss ISO9613-2 bestimmten Dämpfung $A_k[i]$ für die Ausbreitung vom Quellenpunkt P_k zum Immissionspunkt ergibt sich der A-bewertete Immissionspegelbeitrag $L_{eq,A,k}[i]$ der durch den Quellenpunkt P_k beigesteuert wird zu

$$L_{eq,A,k}[i] = 10 \lg \left(\sum_{c=1}^{10} \frac{T_k[c]}{3600} N[c] 10^{0.1L_{W,9613,A}[c,i]} \right) - A_k[i] = 10 \lg \left(\sum_{c=1}^{10} \frac{l_k N[c]}{v[c] 1000} 10^{0.1L_{W,9613,A}[c,i]} \right) - A_k[i] \quad (7.6)$$

Das A-bewertete Gesamtimmisionspegelspektrum $L_{eq,A}[i]$ wird durch energetische Aufsummation der Beiträge jedes Quellenpunktes gebildet:

$$L_{eq,A}[i] = 10 \lg \left(\sum_k 10^{0.1L_{eq,A,k}[i]} \right) \quad (7.7)$$

Durch energetische Aufsummation der A-bewerteten Terzbandpegel $L_{eq,A}[i]$ wird schliesslich der A-bewertete Immissionspegel $L_{eq,A,tot}$ gefunden:

$$L_{eq,A,tot} = 10 \lg \left(\sum_{i=1}^{24} 10^{0.1 L_{eq,A}[i]} \right) \quad (7.8)$$

7.5 Testaufgabe 1: Langer gerader Fahrstreifen bei freier Schallausbreitung über Grasboden

7.5.1 Situation

Die Situation ist in Abbildung 7.1 gezeigt und wie folgt gegeben:

- ebenes horizontales Gelände mit Grasboden (poröser Boden, $G = 1$)
- 10 m breite Strasse (Achse bei $x = 0$), die sich von $y = -500$ m bis $y = +500$ m erstreckt, mit Referenzbelag ACMR8 (harter Boden, $G = 0$)
- 1000 Fz/h fahren mit 60 km/h auf der Strassenachse (d.h. bei $x = 0$ m)
- der Verkehr schlüsselt sich wie folgt auf: 80% SWISS10-cat3, 15% SWISS10-cat5, 5% SWISS10-cat8
- der Immissionspunkt liegt 4 m über Boden bei $x = 90$ m, $y = 0$ m und erscheint von der Quelle aus gesehen unter einem Elevationswinkel von 2.5°
- die Lufttemperatur beträgt 10° , die Luftfeuchte 70%

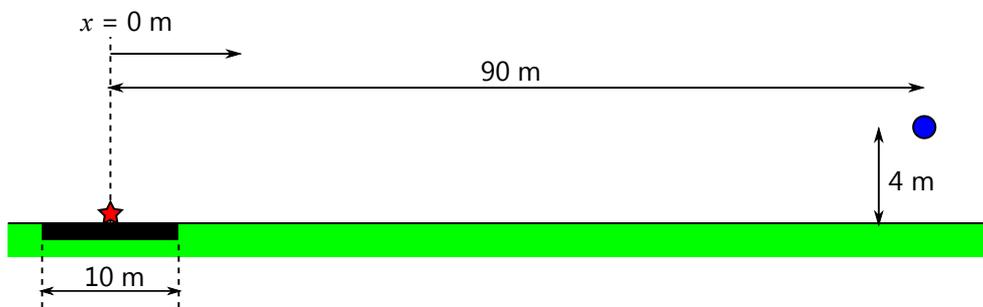


Abbildung 7.1: Geometrie zur Testaufgabe 1.

7.5.2 Ergebnisse der Rechnung in Oktaven

Die Tabelle 7.2 zeigt die in Oktavbänder aufgeschlüsselten Ergebnisse sowie den A-Summenpegel.

Oktavband	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
$L_{W,9613,A}[3, o]$	70.4	75.3	82.5	88.6	96.6	93.9	85.3	74.5
$L_{W,9613,A}[5, o]$	74.0	78.7	85.0	91.3	98.9	94.8	87.2	78.5
$L_{W,9613,A}[8, o]$	80.1	86.1	94.2	101.8	105.1	101.0	93.3	84.9
$A_{k=250}[o]$	47.1	50.7	50.2	48.7	48.8	49.4	51.5	59.1
$L_{eq,A,k=250}[o]$	10.6	12.2	20.1	28.4	34.5	30.7	20.4	3.1
$L_{eq,A}[o]$	32.2	32.9	40.8	49.3	55.3	51.1	39.9	20.9
$L_{eq,A,tot}$	57.6							

Tabelle 7.2: Teil- und Schlussergebnisse in dB für die Testaufgabe 1. Der Index $k = 250$ in den Termen $A_{k=250}[o]$ und $L_{eq,A,k=250}[o]$ bezeichnet den Quellenpunkt im kürzesten Abstand.

7.5.3 Ergebnisse der Rechnung in Terzen

Die Tabelle 7.3 zeigt die in Terzbänder aufgeschlüsselten Ergebnisse sowie den A-Summenpegel.

Terzband	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000
$L_{W,9613,A}[3, i]$	61.5	64.9	68.1	69.0	70.0	72.1	74.5	77.7	79.5	81.3	83.3	85.7	90.1	92.9	92.1	90.7	89.4	86.2	83.1	79.9	76.0	72.4	68.9	65.1
$L_{W,9613,A}[5, i]$	65.6	70.7	70.0	69.9	73.4	76.2	78.0	80.4	81.6	83.3	85.9	88.7	93.1	95.3	93.5	92.0	89.7	87.2	84.6	82.0	79.0	76.2	73.1	69.6
$L_{W,9613,A}[8, i]$	70.3	75.9	77.2	78.5	81.1	83.1	84.5	87.8	92.5	94.1	96.3	99.2	100.8	100.5	99.5	98.2	96.2	92.9	90.4	88.4	85.1	82.5	79.5	76.5
$A_{k=250}[i]$	47.1	47.1	47.1	50.7	50.7	50.7	50.2	50.2	50.2	48.7	48.7	48.7	48.8	48.9	49.0	49.1	49.4	49.8	50.5	51.6	53.2	55.7	59.3	64.6
$L_{eq,A,k=250}[i]$	1.6	6.0	7.8	5.1	7.1	9.2	11.6	14.7	17.6	20.8	23.0	25.7	28.8	30.6	29.4	27.9	26.0	22.5	18.9	15.0	9.8	4.2	<0	<0
$L_{eq,A}[i]$	23.1	27.6	29.4	25.8	27.7	29.9	32.4	35.5	38.3	41.8	43.9	46.5	49.7	51.4	50.1	48.5	46.4	42.7	38.8	34.5	28.8	22.6	15.1	5.7
$L_{eq,A,tot}$	57.6																							

Tabelle 7.3: Teil- und Schlussergebnisse in dB für die Testaufgabe 1. Der Index $k = 250$ in den Termen $A_{k=250}[i]$ und $L_{eq,A,k=250}[i]$ bezeichnet den Quellenpunkt im kürzesten Abstand.

7.6 Testaufgabe 2: Langer gerader Fahrstreifen bei freier Schallausbreitung über hartem Boden

7.6.1 Situation

Die Situation ist in Abbildung 7.2 gezeigt und wie folgt gegeben:

- ebenes horizontales Gelände mit hartem Boden ($G = 0$)
- 10 m breite Strasse (Achse bei $x = 0$), die sich von $y = -500$ m bis $y = +500$ m erstreckt, mit Referenzbelag ACMR8 (harter Boden, $G = 0$)
- 1000 Fz/h fahren mit 60 km/h auf der Strassenachse (d.h. bei $x = 0$ m)
- der Verkehr schlüsselt sich wie folgt auf: 80% SWISS10-cat3, 15% SWISS10-cat5, 5% SWISS10-cat8
- der Immissionspunkt liegt 4 m über Boden bei $x = 90$ m, $y = 0$ m und erscheint von der Quelle aus gesehen unter einem Elevationswinkel von 2.5°
- die Lufttemperatur beträgt 10° , die Luftfeuchte 70%

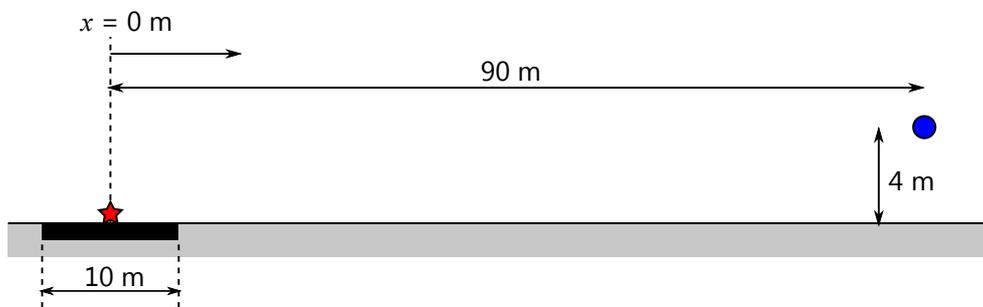


Abbildung 7.2: Geometrie zur Testaufgabe 2.

7.6.2 Ergebnisse der Rechnung in Oktaven

Die Tabelle 7.4 zeigt die in Oktavbänder aufgeschlüsselten Ergebnisse sowie den A-Summenpegel.

Oktavband	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
$L_{W,9613,A}[3, o]$	70.4	75.3	82.5	88.6	96.6	93.9	85.3	74.5
$L_{W,9613,A}[5, o]$	74.0	78.7	85.0	91.3	98.9	94.8	87.2	78.5
$L_{W,9613,A}[8, o]$	80.1	86.1	94.2	101.8	105.1	101.0	93.3	84.9
$A_{k=250}[o]$	47.1	47.1	47.2	47.3	47.4	48.0	50.1	57.6
$L_{eq,A,k=250}[o]$	10.6	15.8	23.1	29.8	35.9	32.1	21.8	4.5
$L_{eq,A}[o]$	32.2	37.3	44.6	51.2	57.2	53.0	41.5	22.4
$L_{eq,A,tot}$	59.5							

Tabelle 7.4: Teil- und Schlussergebnisse in dB für die Testaufgabe 2. Der Index $k = 250$ in den Termen $A_{k=250}[o]$ und $L_{eq,A,k=250}[o]$ bezeichnet den Quellenpunkt im kürzesten Abstand.

7.6.3 Ergebnisse der Rechnung in Terzen

Die Tabelle 7.5 zeigt die in Terzbänder aufgeschlüsselten Ergebnisse sowie den A-Summenpegel.

Terzband	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000
$L_{W,9613,A}[3, i]$	61.5	64.9	68.1	69.0	70.0	72.1	74.5	77.7	79.5	81.3	83.3	85.7	90.1	92.9	92.1	90.7	89.4	86.2	83.1	79.9	76.0	72.4	68.9	65.1
$L_{W,9613,A}[5, i]$	65.6	70.7	70.0	69.9	73.4	76.2	78.0	80.4	81.6	83.3	85.9	88.7	93.1	95.3	93.5	92.0	89.7	87.2	84.6	82.0	79.0	76.2	73.1	69.6
$L_{W,9613,A}[8, i]$	70.3	75.9	77.2	78.5	81.1	83.1	84.5	87.8	92.5	94.1	96.3	99.2	100.8	100.5	99.5	98.2	96.2	92.9	90.4	88.4	85.1	82.5	79.5	76.5
$A_{k=250}[i]$	47.1	47.1	47.1	47.1	47.1	47.2	47.2	47.2	47.2	47.2	47.3	47.3	47.4	47.4	47.5	47.7	48.0	48.4	49.1	50.2	51.8	54.2	57.9	63.2
$L_{eq,A,k=250}[i]$	1.6	6.0	7.8	8.7	10.6	12.8	14.7	17.7	20.6	22.3	24.4	27.1	30.3	32.0	30.9	29.3	27.4	23.9	20.3	16.4	11.2	5.6	<0	<0
$L_{eq,A}[i]$	23.1	27.6	29.4	30.2	32.1	34.3	36.2	39.2	42.0	43.7	45.8	48.5	51.6	53.3	52.0	50.3	48.2	44.5	40.5	36.1	30.4	24.1	16.6	7.2
$L_{eq,A,tot}$	59.6																							

Tabelle 7.5: Teil- und Schlussergebnisse in dB für die Testaufgabe 2. Der Index $k = 250$ in den Termen $A_{k=250}[i]$ und $L_{eq,A,k=250}[i]$ bezeichnet den Quellenpunkt im kürzesten Abstand.

7.7 Testaufgabe 3: Langer gerader Fahrstreifen mit langer paralleler Häuserfront bei freier Schallausbreitung über hartem Boden

7.7.1 Situation

Die Situation ist in Abbildung 7.3 gezeigt und wie folgt gegeben:

- ebenes horizontales Gelände mit hartem Boden ($G = 0$)
- 10 m breite Strasse (Achse bei $x = 0$), die sich von $y = -500$ m bis $y = +500$ m erstreckt, mit Referenzbelag ACMR8 (harter Boden, $G = 0$)
- 1000 Fz/h fahren mit 60 km/h auf der Strassenachse (d.h. bei $x = 0$ m)
- der Verkehr schlüsselt sich wie folgt auf: 80% SWISS10-cat3, 15% SWISS10-cat5, 5% SWISS10-cat8
- parallel zur Strasse verlaufende, 8.0 m hohe Hausfront bei $x = -25.0$ m (Reflexionsverlust = 1 dB(A))
- der Immissionspunkt liegt 4 m über Boden bei $x = 90$ m, $y = 0$ m und erscheint von der Quelle aus gesehen unter einem Elevationswinkel von 2.5°
- die Lufttemperatur beträgt 10° , die Luftfeuchte 70%

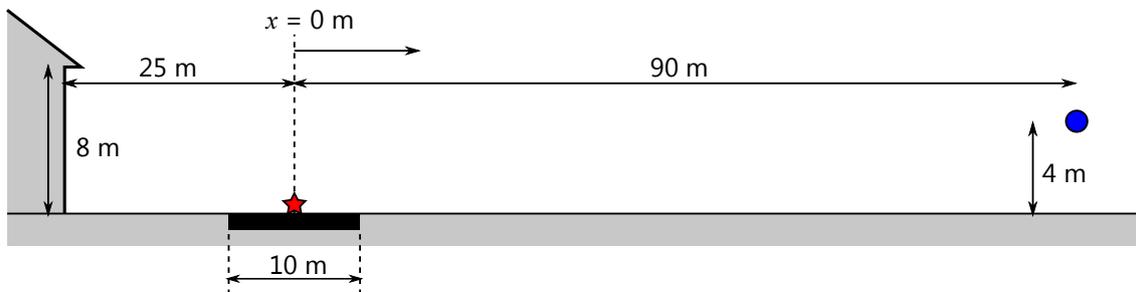


Abbildung 7.3: Geometrie zur Testaufgabe 3.

7.7.2 Ergebnisse der Rechnung in Oktaven

Die Tabellen 7.6 und 7.7 zeigen die in Oktavbänder aufgeschlüsselten Ergebnisse sowie den A-Summenpegel für den Direktschall und den reflektierten Anteil. In Tabelle 7.8 ist die energetische Überlagerung der beiden Komponenten berechnet.

Oktavband	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
$L_{W,9613,A}[3, o]$	70.4	75.3	82.5	88.6	96.6	93.9	85.3	74.5
$L_{W,9613,A}[5, o]$	74.0	78.7	85.0	91.3	98.9	94.8	87.2	78.5
$L_{W,9613,A}[8, o]$	80.1	86.1	94.2	101.8	105.1	101.0	93.3	84.9
$A_{k=250}[o]$	47.1	47.1	47.2	47.3	47.4	48.0	50.1	57.6
$L_{eq,A,k=250}[o]$	10.6	15.8	23.1	29.8	35.9	32.1	21.8	4.5
$L_{eq,A}[o]$	32.2	37.3	44.6	51.2	57.2	53.0	41.5	22.4
$L_{eq,A,tot}$	59.5							

Tabelle 7.6: Teil- und Schlussergebnisse für den Direktschall in Testaufgabe 3. Der Index $k = 250$ in den Termen $A_{k=250}[o]$ und $L_{eq,A,k=250}[o]$ bezeichnet den Quellenpunkt im kürzesten Abstand.

Oktavband	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
$L_{W,9613,A}[3, o]$	70.4	75.3	82.5	88.6	96.6	93.9	85.3	74.5
$L_{W,9613,A}[5, o]$	74.0	78.7	85.0	91.3	98.9	94.8	87.2	78.5
$L_{W,9613,A}[8, o]$	80.1	86.1	94.2	101.8	105.1	101.0	93.3	84.9
$A_{k=250}[o]$	-	-	51.7	51.8	52.1	52.9	56.1	67.9
$L_{eq,A,k=250}[o]$	-	-	18.6	25.3	31.3	27.2	15.7	-5.8
$L_{eq,A}[o]$	-	-	36.9	47.7	54.3	49.8	37.0	13.4
$L_{eq,A,tot}$	56.3							

Tabelle 7.7: Teil- und Schlussergebnisse für den reflektierten Schall in Testaufgabe 3. Der Index $k = 250$ in den Termen $A_{k=250}[o]$ und $L_{eq,A,k=250}[o]$ bezeichnet den Quellenpunkt im kürzesten Abstand. Für die Oktaven 63 Hz und 125 Hz ist der Reflektor generell zu klein, für die Oktaven 250 Hz und 500 Hz hängt die Berücksichtigung der Reflexion von der Quellenposition ab.

Oktavband	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
$L_{eq,A}[o]$	32.2	37.3	45.3	52.8	59.0	54.7	42.8	22.9
$L_{eq,A,tot}$	61.2							

Tabelle 7.8: Schlussergebnisse für die Überlagerung der Direktschall- und Reflexionskomponenten in Testaufgabe 3.

7.7.3 Ergebnisse der Rechnung in Terzen

Die Tabellen 7.9 und 7.10 zeigen die in Terzbänder aufgeschlüsselten Ergebnisse sowie den A-Summenpegel für den Direktschall und den reflektierten Anteil. In Tabelle 7.11 ist die energetische Überlagerung der beiden Komponenten berechnet.

Terzband	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000
$L_{W,9613,A} [3, i]$	61.5	64.9	68.1	69.0	70.0	72.1	74.5	77.7	79.5	81.3	83.3	85.7	90.1	92.9	92.1	90.7	89.4	86.2	83.1	79.9	76.0	72.4	68.9	65.1
$L_{W,9613,A} [5, i]$	65.6	70.7	70.0	69.9	73.4	76.2	78.0	80.4	81.6	83.3	85.9	88.7	93.1	95.3	93.5	92.0	89.7	87.2	84.6	82.0	79.0	76.2	73.1	69.6
$L_{W,9613,A} [8, i]$	70.3	75.9	77.2	78.5	81.1	83.1	84.5	87.8	92.5	94.1	96.3	99.2	100.8	100.5	99.5	98.2	96.2	92.9	90.4	88.4	85.1	82.5	79.5	76.5
$A_{k=250} [i]$	47.1	47.1	47.1	47.1	47.1	47.2	47.2	47.2	47.2	47.2	47.3	47.3	47.4	47.4	47.5	47.7	48.0	48.4	49.1	50.2	51.8	54.2	57.9	63.2
$L_{eq,A,k=250} [i]$	1.6	6.0	7.8	8.7	10.6	12.8	14.7	17.7	20.6	22.3	24.4	27.1	30.3	32.0	30.9	29.3	27.4	23.9	20.3	16.4	11.2	5.6	<0	<0
$L_{eq,A} [i]$	23.1	27.6	29.4	30.2	32.1	34.3	36.2	39.2	42.0	43.7	45.8	48.5	51.6	53.3	52.0	50.3	48.2	44.5	40.5	36.1	30.4	24.1	16.6	7.2
$L_{eq,A,tot}$	59.6																							

Tabelle 7.9: Teil- und Schlussergebnisse für den Direktschall in Testaufgabe 3. Der Index $k = 250$ in den Termen $A_{k=250} [i]$ und $L_{eq,A,k=250} [i]$ bezeichnet den Quellenpunkt im kürzesten Abstand.

Terzband	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000
$L_{W,9613,A} [3, i]$	61.5	64.9	68.1	69.0	70.0	72.1	74.5	77.7	79.5	81.3	83.3	85.7	90.1	92.9	92.1	90.7	89.4	86.2	83.1	79.9	76.0	72.4	68.9	65.1
$L_{W,9613,A} [5, i]$	65.6	70.7	70.0	69.9	73.4	76.2	78.0	80.4	81.6	83.3	85.9	88.7	93.1	95.3	93.5	92.0	89.7	87.2	84.6	82.0	79.0	76.2	73.1	69.6
$L_{W,9613,A} [8, i]$	70.3	75.9	77.2	78.5	81.1	83.1	84.5	87.8	92.5	94.1	96.3	99.2	100.8	100.5	99.5	98.2	96.2	92.9	90.4	88.4	85.1	82.5	79.5	76.5
$A_{k=250} [i]$	-	-	-	-	-	-	-	51.7	51.7	51.8	51.8	51.9	51.9	52.1	52.2	52.5	52.9	53.6	54.6	56.3	58.8	62.6	68.2	76.2
$L_{eq,A,k=250} [i]$	-	-	-	-	-	-	-	13.2	16.1	17.8	19.9	22.6	25.7	27.4	26.2	24.5	22.5	18.7	14.8	10.3	4.2	<0	<0	<0
$L_{eq,A} [i]$	-	-	-	-	-	-	-	31.4	36.8	39.5	42.3	45.3	48.7	50.4	49.1	47.3	45.0	41.0	36.6	31.6	24.9	17.3	7.7	<0
$L_{eq,A,tot}$	56.4																							

Tabelle 7.10: Teil- und Schlussergebnisse für den reflektierten Schall in Testaufgabe 3. Der Index $k = 250$ in den Termen $A_{k=250} [i]$ und $L_{eq,A,k=250} [i]$ bezeichnet den Quellenpunkt im kürzesten Abstand. Für die Terzen kleiner als 250 Hz ist der Reflektor generell zu klein, für die Terzen 250 bis 800 Hz hängt die Berücksichtigung der Reflexion von der Quellenposition ab.

Terzband	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000
$L_{eq,A} [i]$	23.1	27.6	29.4	30.2	32.1	34.3	36.2	39.9	43.2	45.1	47.4	50.2	53.4	55.1	53.8	52.1	49.9	46.1	42.0	37.5	31.5	25.0	17.1	7.5
$L_{eq,A,tot}$	61.3																							

Tabelle 7.11: Schlussergebnisse für die Überlagerung der Direktschall- und Reflexionskomponenten in Testaufgabe 3.

7.8 Testaufgabe 4: Langer gerader Fahrstreifen mit langem parallelem Hindernis und hartem Boden

7.8.1 Situation

Die Situation ist in Abbildung 7.4 gezeigt und wie folgt gegeben:

- ebenes horizontales Gelände mit hartem Boden ($G = 0$)
- 10 m breite Strasse (Achse bei $x = 0$), die sich von $y = -500$ m bis $y = +500$ m erstreckt, mit Referenzbelag ACMR8 (harter Boden, $G = 0$)
- 1000 Fz/h fahren mit 60 km/h auf der Strassenachse (d.h. bei $x = 0$ m)
- der Verkehr schlüsselt sich wie folgt auf: 80% SWISS10-cat3, 15% SWISS10-cat5, 5% SWISS10-cat8
- parallel zur Strasse verlaufendes, 7.0 m hohes Hindernis bei $x = 45.0$ m. Die Oberkante erscheint von der Quelle aus gesehen unter einem Elevationswinkel von 9°
- der Immissionspunkt liegt 4 m über Boden bei $x = 90$ m, $y = 0$ m
- die Lufttemperatur beträgt 10° , die Luftfeuchte 70%

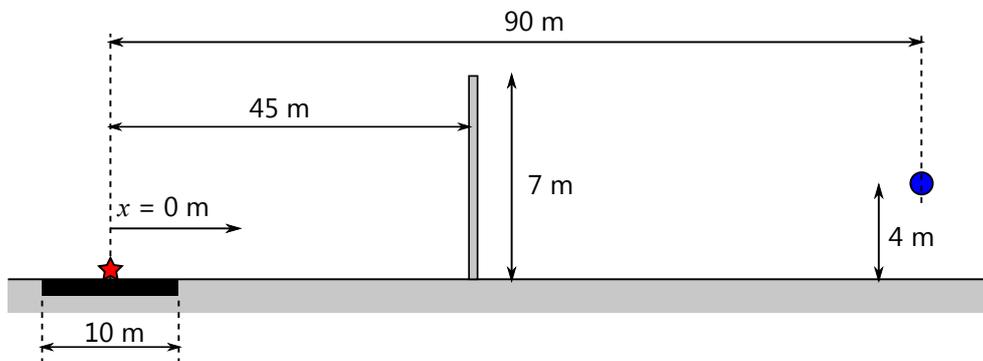


Abbildung 7.4: Geometrie zur Testaufgabe 4.

Die Rechnung wird hier in zwei Varianten durchgeführt:

- streng nach ISO 9613-2
- ohne Abzug einer negativen Bodendämpfung gemäss Empfehlung ISO/TR 17534-3 [24]

7.8.2 Ergebnisse der Rechnung in Oktaven

Die Tabelle 7.12 zeigt für die Rechnung streng nach ISO 9613-2 die in Oktavbänder aufgeschlüsselten Ergebnisse sowie den A-Summenpegel.

Oktavband	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
$L_{W,9613,A}[3, o]$	70.4	75.3	82.5	88.6	96.6	93.9	85.3	74.5
$L_{W,9613,A}[5, o]$	74.0	78.7	85.0	91.3	98.9	94.8	87.2	78.5
$L_{W,9613,A}[8, o]$	80.1	86.1	94.2	101.8	105.1	101.0	93.3	84.9
$A_{k=250}[o]$	56.8	58.1	60.0	62.3	65.1	68.4	73.1	80.6
$L_{eq,A,k=250}[o]$	0.9	4.8	10.3	14.8	18.2	11.7	-1.2	-18.5
$L_{eq,A}[o]$	22.7	27.1	33.3	38.5	42.8	36.5	21.3	-0.6
$L_{eq,A,tot}$	45.3							

Tabelle 7.12: Teil- und Schlussergebnisse für die Testaufgabe 4 streng nach ISO 9613-2. Der Index $k = 250$ in den Termen $A_{k=250}[o]$ und $L_{eq,A,k=250}[o]$ bezeichnet den Quellenpunkt im kürzesten Abstand.

Die Tabelle 7.13 zeigt für die Rechnung ohne Abzug einer negativen Bodendämpfung die in Oktavbänder aufgeschlüsselten Ergebnisse sowie den A-Summenpegel.

Oktavband	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
$L_{W,9613,A}[3, o]$	70.4	75.3	82.5	88.6	96.6	93.9	85.3	74.5
$L_{W,9613,A}[5, o]$	74.0	78.7	85.0	91.3	98.9	94.8	87.2	78.5
$L_{W,9613,A}[8, o]$	80.1	86.1	94.2	101.8	105.1	101.0	93.3	84.9
$A_{k=250}[o]$	53.8	55.1	57.0	59.3	62.1	65.4	70.1	77.6
$L_{eq,A,k=250}[o]$	3.9	7.8	13.3	17.8	21.2	14.7	1.8	-15.5
$L_{eq,A}[o]$	26.4	30.8	37.1	42.5	47.0	40.7	25.1	2.5
$L_{eq,A,tot}$	49.4							

Tabelle 7.13: Teil- und Schlussergebnisse für die Testaufgabe 4 ohne Abzug einer negativen Bodendämpfung. Der Index $k = 250$ in den Termen $A_{k=250}[o]$ und $L_{eq,A,k=250}[o]$ bezeichnet den Quellenpunkt im kürzesten Abstand.

7.8.3 Ergebnisse der Rechnung in Terzen

Die Tabelle 7.14 zeigt für die Rechnung streng nach ISO 9613-2 die in Terzbänder aufgeschlüsselten Ergebnisse sowie den A-Summenpegel.

Terzband	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000
$L_{W,9613,A}^{[3,i]}$	61.5	64.9	68.1	69.0	70.0	72.1	74.5	77.7	79.5	81.3	83.3	85.7	90.1	92.9	92.1	90.7	89.4	86.2	83.1	79.9	76.0	72.4	68.9	65.1
$L_{W,9613,A}^{[5,i]}$	65.6	70.7	70.0	69.9	73.4	76.2	78.0	80.4	81.6	83.3	85.9	88.7	93.1	95.3	93.5	92.0	89.7	87.2	84.6	82.0	79.0	76.2	73.1	69.6
$L_{W,9613,A}^{[8,i]}$	70.3	75.9	77.2	78.5	81.1	83.1	84.5	87.8	92.5	94.1	96.3	99.2	100.8	100.5	99.5	98.2	96.2	92.9	90.4	88.4	85.1	82.5	79.5	76.5
$A_{k=250}^{[i]}$	56.4	56.8	57.2	57.6	58.1	58.7	59.3	60.0	60.7	61.5	62.3	63.2	64.1	65.1	66.1	67.2	68.4	69.8	71.5	73.2	74.8	77.2	80.9	86.2
$L_{eq,A,k=250}^{[i]}$	<0	<0	<0	<0	<0	1.2	2.5	4.9	7.1	8.0	9.4	11.2	13.5	14.3	12.3	9.8	7.0	2.5	<0	<0	<0	<0	<0	<0
$L_{eq,A}^{[i]}$	13.8	18.1	19.7	20.3	21.9	23.7	25.2	27.9	30.3	31.5	33.1	35.3	37.8	38.9	37.1	34.7	31.7	26.9	21.7	15.9	8.7	1.6	<0	<0
$L_{eq,A,tot}$	45.3																							

Tabelle 7.14: Teil- und Schlussergebnisse für die Testaufgabe 4 streng nach ISO 9613-2. Der Index $k = 250$ in den Termen $A_{k=250}^{[i]}$ und $L_{eq,A,k=250}^{[i]}$ bezeichnet den Quellenpunkt im kürzesten Abstand.

Die Tabelle 7.15 zeigt für die Rechnung ohne Abzug einer negativen Bodendämpfung die in Terzbänder aufgeschlüsselten Ergebnisse sowie den A-Summenpegel.

Terzband	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000
$L_{W,9613,A}^{[3,i]}$	61.5	64.9	68.1	69.0	70.0	72.1	74.5	77.7	79.5	81.3	83.3	85.7	90.1	92.9	92.1	90.7	89.4	86.2	83.1	79.9	76.0	72.4	68.9	65.1
$L_{W,9613,A}^{[5,i]}$	65.6	70.7	70.0	69.9	73.4	76.2	78.0	80.4	81.6	83.3	85.9	88.7	93.1	95.3	93.5	92.0	89.7	87.2	84.6	82.0	79.0	76.2	73.1	69.6
$L_{W,9613,A}^{[8,i]}$	70.3	75.9	77.2	78.5	81.1	83.1	84.5	87.8	92.5	94.1	96.3	99.2	100.8	100.5	99.5	98.2	96.2	92.9	90.4	88.4	85.1	82.5	79.5	76.5
$A_{k=250}^{[i]}$	53.4	53.8	54.2	54.6	55.1	55.7	56.3	57.0	57.7	58.5	59.3	60.2	61.1	62.1	63.1	64.2	65.4	66.8	68.5	70.2	71.8	74.2	77.9	83.2
$L_{eq,A,k=250}^{[i]}$	<0	<0	0.8	1.2	2.6	4.2	5.5	7.9	10.1	11.0	12.4	14.2	16.5	17.3	15.3	12.8	10.0	5.5	1.0	<0	<0	<0	<0	<0
$L_{eq,A}^{[i]}$	17.5	21.8	23.4	24.0	25.7	27.5	29.1	31.7	34.2	35.4	37.1	39.3	41.9	43.1	41.2	38.9	35.9	31.1	25.7	19.7	12.3	4.9	<0	<0
$L_{eq,A,tot}$	49.4																							

Tabelle 7.15: Teil- und Schlussergebnisse für die Testaufgabe 4 ohne Abzug einer negativen Bodendämpfung. Der Index $k = 250$ in den Termen $A_{k=250}^{[i]}$ und $L_{eq,A,k=250}^{[i]}$ bezeichnet den Quellenpunkt im kürzesten Abstand.

7.9 Testaufgabe 5: Langer gerader Fahrstreifen bei freier Schallausbreitung über hartem Boden und hohem Elevationswinkel

7.9.1 Situation

Die Situation ist in Abbildung 7.5 gezeigt und wie folgt gegeben:

- ebenes horizontales Gelände mit hartem Boden ($G = 0$)
- 10 m breite Strasse (Achse bei $x = 0$), die sich von $y = -500$ m bis $y = +500$ m erstreckt, mit Referenzbelag ACMR8 (harter Boden, $G = 0$)
- 1000 Fz/h fahren mit 60 km/h auf der Strassenachse (d.h. bei $x = 0$ m)
- der Verkehr schlüsselt sich wie folgt auf: 80% SWISS10-cat3, 15% SWISS10-cat5, 5% SWISS10-cat8
- die Immissionspunkte liegen 2 bzw. 10 m über Boden bei $x = 10$ m, $y = 0$ m und erscheinen von der Quelle aus gesehen unter einem Elevationswinkel von 11 bzw. 45°
- die Lufttemperatur beträgt 10° , die Luftfeuchte 70%

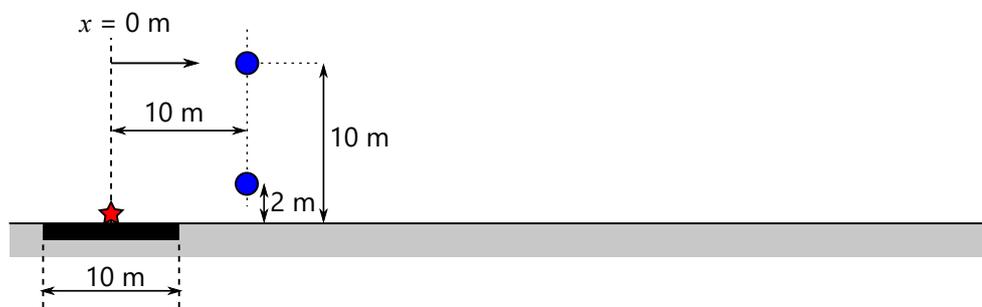


Abbildung 7.5: Geometrie zur Testaufgabe 5.

7.9.2 Ergebnisse der Rechnung in Oktaven

Die Tabellen 7.16 und 7.17 zeigt die in Oktavbänder aufgeschlüsselten Ergebnisse sowie den A-Summenpegel.

Oktavband	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
$L_{W,9613,A}[3,o]$	70.4	75.3	82.5	88.6	96.6	93.9	85.3	74.5
$L_{W,9613,A}[5,o]$	74.0	78.7	85.0	91.3	98.9	94.8	87.2	78.5
$L_{W,9613,A}[8,o]$	80.1	86.1	94.2	101.8	105.1	101.0	93.3	84.9
$A_{k=250}[o]$	28.2	28.2	28.2	28.2	28.2	28.3	28.5	29.4
$L_{eq,A,k=250}[o]$	29.5	34.7	42.1	48.9	55.1	51.8	43.3	32.7
$L_{eq,A}[o]$	41.7	46.9	54.2	61.0	67.1	63.7	54.9	43.6
$L_{eq,A,tot}$	69.8							

Tabelle 7.16: Teil- und Schlussergebnisse in dB für die Testaufgabe 5 und den 2 m hohen Immissionspunkt. Der Index $k = 250$ in den Termen $A_{k=250}[o]$ und $L_{eq,A,k=250}[o]$ bezeichnet den Quellenpunkt im kürzesten Abstand.

Oktavband	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
$L_{W,9613,A}[3,o]$	70.2	75.0	81.9	87.8	95.6	92.5	83.6	72.3
$L_{W,9613,A}[5,o]$	73.8	78.3	84.5	90.5	97.8	93.5	85.5	76.3
$L_{W,9613,A}[8,o]$	79.5	85.4	93.3	100.7	103.7	99.4	91.3	82.6
$A_{k=250}[o]$	31.0	31.0	31.0	31.0	31.1	31.1	31.5	32.6
$L_{eq,A,k=250}[o]$	26.4	31.4	38.6	45.1	51.1	47.5	38.6	27.2
$L_{eq,A}[o]$	39.8	44.8	51.9	58.5	64.4	60.7	51.4	39.2
$L_{eq,A,tot}$	67.0							

Tabelle 7.17: Teil- und Schlussergebnisse in dB für die Testaufgabe 5 und den 10 m hohen Immissionspunkt. Der Index $k = 250$ in den Termen $A_{k=250}[o]$ und $L_{eq,A,k=250}[o]$ bezeichnet den Quellenpunkt im kürzesten Abstand.

7.9.3 Ergebnisse der Rechnung in Terzen

Die Tabellen 7.18 und 7.19 zeigen die in Terzbänder aufgeschlüsselten Ergebnisse sowie den A-Summenpegel.

Terzband	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000
$L_{W,9613,A}[3,i]$	61.5	64.9	68.1	69.0	70.0	72.1	74.5	77.7	79.5	81.3	83.3	85.7	90.1	92.9	92.0	90.7	89.3	86.2	83.1	79.9	75.9	72.3	68.9	65.0
$L_{W,9613,A}[5,i]$	65.6	70.7	70.0	69.9	73.4	76.2	78.0	80.4	81.6	83.3	85.9	88.7	93.1	95.3	93.5	92.0	89.7	87.2	84.6	81.9	79.0	76.1	73.0	69.5
$L_{W,9613,A}[8,i]$	70.3	75.9	77.2	78.5	81.1	83.1	84.4	87.7	92.4	94.1	96.3	99.2	100.8	100.4	99.5	98.2	96.1	92.8	90.4	88.4	85.0	82.5	79.5	76.4
$A_{k=250}[i]$	28.3	28.3	28.3	28.3	28.3	28.3	28.3	28.4	28.4	28.4	28.4	28.4	28.4	28.4	28.4	28.4	28.4	28.5	28.6	28.7	28.9	29.2	29.6	30.2
$L_{eq,A,k=250}[i]$	20.3	24.8	26.6	27.4	29.4	31.6	33.5	36.6	39.4	41.1	43.3	46.0	49.2	51.0	50.0	48.6	46.9	43.8	40.8	37.9	34.1	30.6	27.0	22.8
$L_{eq,A}[i]$	32.6	37.1	38.9	39.7	41.7	43.9	45.8	48.8	51.7	53.4	55.6	58.3	61.5	63.2	62.2	60.7	59.0	55.8	52.7	49.6	45.6	41.9	38.0	33.5
$L_{eq,A,tot}$	69.8																							

Tabelle 7.18: Teil- und Schlussergebnisse in dB für die Testaufgabe 5 und den 2 m hohen Immissionspunkt. Der Index $k = 250$ in den Termen $A_{k=250}[i]$ und $L_{eq,A,k=250}[i]$ bezeichnet den Quellenpunkt im kürzesten Abstand.

Terzband	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000
$L_{W,9613,A}[3,i]$	61.3	64.7	67.9	68.7	69.7	71.7	74.0	77.2	78.9	80.6	82.5	84.8	89.2	91.9	90.9	89.4	88.0	84.7	81.4	78.1	74.0	70.3	66.6	62.6
$L_{W,9613,A}[5,i]$	65.4	70.5	69.7	69.6	73.1	75.8	77.5	79.9	81.0	82.6	85.2	87.9	92.1	94.2	92.4	90.7	88.3	85.7	83.0	80.2	77.0	74.0	70.8	67.1
$L_{W,9613,A}[8,i]$	69.8	75.3	76.6	77.8	80.4	82.4	83.6	86.8	91.5	93.1	95.2	98.0	99.6	99.1	98.1	96.7	94.5	91.1	88.6	86.4	83.0	80.3	77.2	74.0
$A_{k=250}[i]$	31.1	31.1	31.1	31.1	31.1	31.1	31.1	31.1	31.1	31.1	31.1	31.1	31.1	31.1	31.2	31.2	31.2	31.3	31.4	31.6	31.8	32.2	32.8	33.7
$L_{eq,A,k=250}[i]$	17.3	21.7	23.5	24.3	26.2	28.3	30.2	33.2	35.9	37.6	39.7	42.3	45.4	47.2	46.0	44.5	42.7	39.5	36.3	33.2	29.2	25.5	21.5	17.0
$L_{eq,A}[i]$	30.8	35.2	37.0	37.7	39.6	41.7	43.6	46.6	49.4	51.0	53.1	55.7	58.8	60.6	59.4	57.8	56.0	52.6	49.3	46.0	41.8	37.9	33.6	28.7
$L_{eq,A,tot}$	67.0																							

Tabelle 7.19: Teil- und Schlussergebnisse in dB für die Testaufgabe 5 und den 10 m hohen Immissionspunkt. Der Index $k = 250$ in den Termen $A_{k=250}[i]$ und $L_{eq,A,k=250}[i]$ bezeichnet den Quellenpunkt im kürzesten Abstand.

7.10 Testaufgabe 6: Kurzer gerader Fahrstreifen bei freier Schallausbreitung über hartem Boden und hohem Elevationswinkel

7.10.1 Situation

Die Situation ist in Abbildung 7.6 gezeigt und wie folgt gegeben:

- ebenes horizontales Gelände mit hartem Boden ($G = 0$)
- 10 m breite Strasse (Achse bei $x = 0$), die sich von $y = -100$ m bis $y = -20$ m erstreckt, mit Referenzbelag ACMR8 (harter Boden, $G = 0$)
- 1000 Fz/h fahren mit 60 km/h auf der Strassenachse (d.h. bei $x = 0$ m)
- der Verkehr schlüsselt sich wie folgt auf: 80% SWISS10-cat3, 15% SWISS10-cat5, 5% SWISS10-cat8
- die Immissionspunkte liegen 2 bzw. 10 m über Boden bei $x = 10$ m, $y = 0$ m und erscheinen vom Lotpunkt der verlängerten Linienquelle aus gesehen unter einem Elevationswinkel von 11 bzw. 45°
- die Lufttemperatur beträgt 10°, die Luftfeuchte 70%

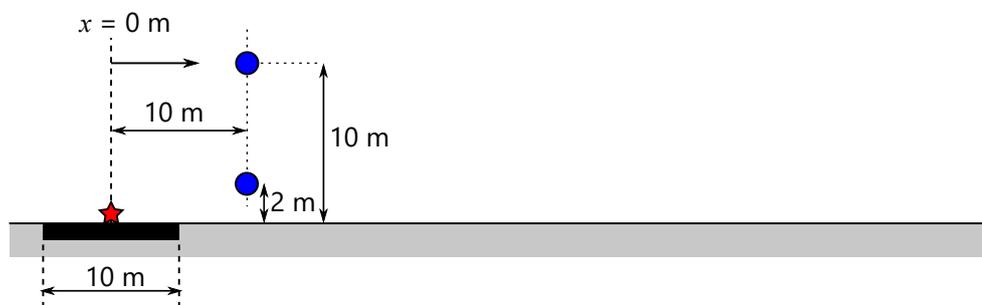


Abbildung 7.6: Geometrie zur Testaufgabe 6.

7.10.2 Ergebnisse der Rechnung in Oktaven

Die Tabellen 7.20 und 7.21 zeigt die in Oktavbänder aufgeschlüsselten Ergebnisse sowie den A-Summenpegel.

Oktavband	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
$L_{W,9613,A}[3,o]$	70.4	75.3	82.5	88.6	96.6	93.9	85.3	74.5
$L_{W,9613,A}[5,o]$	74.0	78.7	85.0	91.3	98.9	94.8	87.2	78.5
$L_{W,9613,A}[8,o]$	80.1	86.1	94.2	101.8	105.1	101.0	93.3	84.9
$L_{eq,A}[o]$	32.4	37.6	44.9	51.7	57.8	54.3	45.1	32.2
$L_{eq,A,tot}$	60.4							

Tabelle 7.20: Teil- und Schlussergebnisse in dB für die Testaufgabe 6 und den 2 m hohen Immissionspunkt.

Oktavband	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
$L_{W,9613,A}[3,o]$	70.2	75.0	81.9	87.8	95.6	92.5	83.6	72.3
$L_{W,9613,A}[5,o]$	73.8	78.3	84.5	90.5	97.8	93.5	85.5	76.3
$L_{W,9613,A}[8,o]$	79.5	85.4	93.3	100.7	103.7	99.4	91.3	82.6
$L_{eq,A}[o]$	31.6	36.7	43.8	50.3	56.3	52.5	42.9	29.4
$L_{eq,A,tot}$	58.8							

Tabelle 7.21: Teil- und Schlussergebnisse in dB für die Testaufgabe 6 und den 10 m hohen Immissionspunkt.

7.10.3 Ergebnisse der Rechnung in Terzen

Die Tabellen 7.22 und 7.23 zeigen die in Terzbänder aufgeschlüsselten Ergebnisse sowie den A-Summenpegel.

Terzband	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000
$L_{W,9613,A}[3,i]$	61.5	64.9	68.1	69.0	70.0	72.1	74.5	77.7	79.5	81.3	83.3	85.7	90.1	92.9	92.0	90.7	89.3	86.2	83.1	79.9	75.9	72.3	68.9	65.0
$L_{W,9613,A}[5,i]$	65.6	70.7	70.0	69.9	73.4	76.2	78.0	80.4	81.6	83.3	85.9	88.7	93.1	95.3	93.5	92.0	89.7	87.2	84.6	81.9	79.0	76.1	73.0	69.5
$L_{W,9613,A}[8,i]$	70.3	75.9	77.2	78.5	81.1	83.1	84.4	87.7	92.4	94.1	96.3	99.2	100.8	100.4	99.5	98.2	96.1	92.8	90.4	88.4	85.0	82.5	79.5	76.4
$L_{eq,A}[i]$	23.3	27.8	29.6	30.5	32.4	34.6	36.5	39.6	42.4	44.1	46.3	49.0	52.2	53.9	52.9	51.4	49.6	46.3	43.1	39.8	35.5	31.3	26.5	21.0
$L_{eq,A,tot}$	60.4																							

Tabelle 7.22: Teil- und Schlussergebnisse in dB für die Testaufgabe 6 und den 2 m hohen Immissionspunkt.

Terzband	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000
$L_{W,9613,A}[3,i]$	61.3	64.7	67.9	68.7	69.7	71.7	74.0	77.2	78.9	80.6	82.5	84.8	89.2	91.9	90.9	89.4	88.0	84.7	81.4	78.1	74.0	70.3	66.6	62.6
$L_{W,9613,A}[5,i]$	65.4	70.5	69.7	69.6	73.1	75.8	77.5	79.9	81.0	82.6	85.2	87.9	92.1	94.2	92.4	90.7	88.3	85.7	83.0	80.2	77.0	74.0	70.8	67.1
$L_{W,9613,A}[8,i]$	69.8	75.3	76.6	77.8	80.4	82.4	83.6	86.8	91.5	93.1	95.2	98.0	99.6	99.1	98.1	96.7	94.5	91.1	88.6	86.4	83.0	80.3	77.2	74.0
$L_{eq,A}[i]$	22.6	27.1	28.8	29.6	31.5	33.6	35.5	38.5	41.2	42.8	44.9	47.5	50.7	52.4	51.2	49.6	47.7	44.3	41.0	37.5	33.0	28.6	23.6	17.8
$L_{eq,A,tot}$	58.8																							

Tabelle 7.23: Teil- und Schlussergebnisse in dB für die Testaufgabe 6 und den 10 m hohen Immissionspunkt.

8 Immissionspegelvergleich sonROAD18 und StL-86+

Anhand von vier Prototypsituationen:

- unabgeschirmte Ausbreitung über ebenem Grasboden
- unabgeschirmte Ausbreitung über ebenem hartem Boden
- abgeschirmte Ausbreitung über ebenem hartem Boden
- quellennah abgeschirmte Ausbreitung über ebenem Grasboden

wird hier ein exemplarischer Vergleich zwischen Immissionspegelberechnungen nach sonROAD18/ISO 9613-2 und gemäss StL-86+ angestellt. Die Berechnungen nach sonROAD18 wurden mit der oben für die Testaufgaben beschriebenen eigenen Implementation ohne Abzug einer negativen Bodendämpfung bei hartem Boden (gemäss Empfehlung ISO/TR 17534-3) durchgeführt, die StL-86+ Berechnungen erfolgten mit CadnaA.

Der Immissionspegel-Vergleich bringt sowohl emissionsseitige Modellunterschiede als auch Unterschiede in der Ausbreitungsrechnung zum Ausdruck. Das Verkehrsszenario ist aber so gewählt, dass die Emissionsunterschiede zwischen den beiden Modellen klein sind und die Differenzen damit primär auf die Ausbreitungsrechnung zurückzuführen sind.

8.1 Verkehrs- und Meteoszenario

Die Quelle sowie die atmosphärischen Bedingungen wurden in allen Fällen wie folgt angenommen:

- 10 m breite Strasse (Achse bei $x = 0$), die sich von $y = -500$ m bis $y = +500$ m erstreckt, mit Referenzbelag ACMR8 (harter Boden, $G = 0$)
- 1000 Fz/h fahren mit 60 km/h auf der Strassenachse (d.h. bei $x = 0$ m)
- der Verkehr schlüsselt sich wie folgt auf: 80% SWISS10-cat3, 15% SWISS10-cat5, 5% SWISS10-cat8 bzw. in StL-86+: 12.5% Schwerverkehrsanteil
- die Lufttemperatur beträgt 10° , die Luftfeuchte 70%

8.2 Unabgeschirmte Ausbreitung über ebenem Grasboden

Die Abbildung 8.1 zeigt die angenommene Situation für die Ausbreitung über ebenem Grasboden. Die Immissionspunkte sind in horizontalen Abständen $d = 20, 100, 200$ und 500 m auf Höhen $h = 2, 4$ und 10 m angenommen. Es ist anzumerken, dass mindestens die Ausbreitungsrechnung über 500 m mit einem Modell erfolgen müsste, welches die meteorologischen Effekte auf die Schallausbreitung explizit berücksichtigen kann. Die 500 m Ergebnisse sind hier nur der Vollständigkeit halber aufgeführt. Die Tabelle 8.1 zeigt die mit sonROAD18 bzw. StL-86+ berechneten A-bewerteten Immissionspegel sowie die Differenz zwischen den beiden Modellen. Die in Tabelle 8.1 ausgewiesenen Differenzen sind überdies in Abbildung 8.2 grafisch dargestellt.

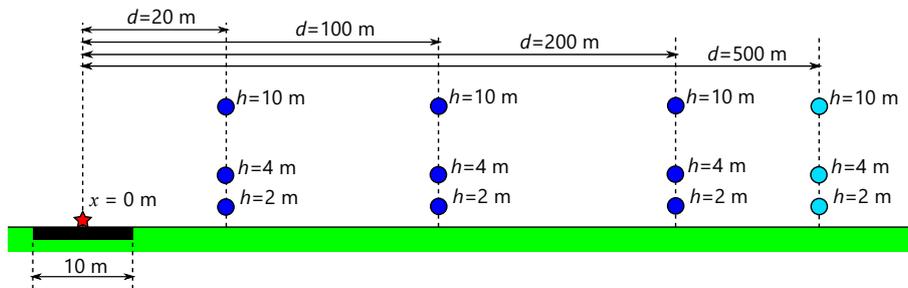


Abbildung 8.1: Geometrie zur Prototypsituation *unabgeschirmte Ausbreitung über ebenem Grasboden*.

d	h	sonROAD18	StL-86+	sonROAD18 - StL-86+
20	2	65.3	66.9	-1.6
20	4	65.2	67.2	-2.0
20	10	64.6	67.1	-2.5
100	2	56.7	56.7	0.0
100	4	57.0	57.6	-0.6
100	10	57.0	58.7	-1.7
200	2	52.4	50.8	1.6
200	4	52.8	52.4	0.4
200	10	52.9	53.9	-1.0
500	2	45.2	41.1	4.1
500	4	45.7	43.4	2.3
500	10	45.8	45.9	-0.1

Tabelle 8.1: Immissionspegelberechnungen mit sonROAD18 und StL-86+ für die Situation *unabgeschirmte Ausbreitung über ebenem Grasboden* mit d : Abstand zur Straße und h : Höhe des Immissionspunktes über Boden.

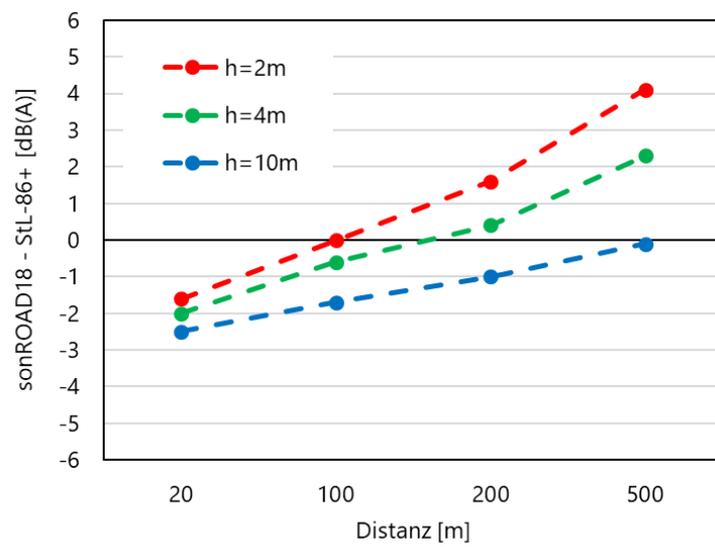


Abbildung 8.2: Differenzen der berechneten Immissionspegel in Abhängigkeit der Distanz d mit dem Scharparameter Empfängerhöhe h in der Situation *unabgeschirmte Ausbreitung über ebenem Grasboden*.

8.3 Unabgeschirmte Ausbreitung über ebenem hartem Boden

Die Abbildung 8.3 zeigt die angenommene Situation für die Ausbreitung über ebenem hartem Boden. Die Immissionspunkte sind in horizontalen Abständen $d = 20, 100$ und 200 m auf Höhen $h = 2, 4$ und 10 m angenommen. Die Tabelle 8.2 zeigt die mit sonROAD18 bzw. StL-86+ berechneten A-bewerteten Immissionspegel sowie die Differenz zwischen den beiden Modellen. Die in Tabelle 8.2 ausgewiesenen Differenzen sind überdies in Abbildung 8.4 grafisch dargestellt.

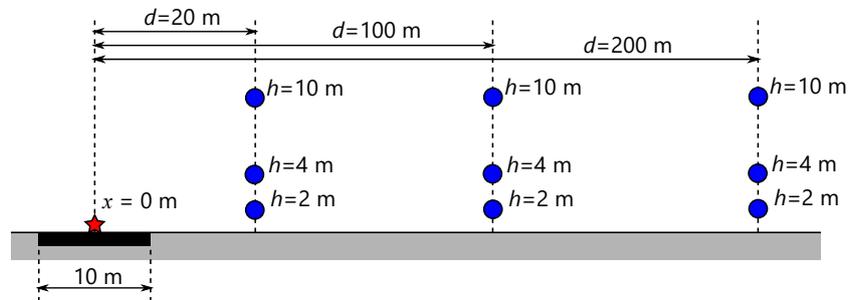


Abbildung 8.3: Geometrie zur Prototypsituation *unabgeschirmte Ausbreitung über ebenem hartem Boden*.

d	h	sonROAD18	StL-86+	sonROAD18 - StL-86+
20	2	66.8	66.9	-0.1
20	4	66.6	67.2	-0.6
20	10	65.7	67.1	-1.4
100	2	60.2	56.7	3.5
100	4	59.1	57.6	1.5
100	10	58.5	58.7	-0.2
200	2	56.6	50.8	5.8
200	4	55.9	52.4	3.5
200	10	54.5	53.9	0.6

Tabelle 8.2: Immissionspegelberechnungen mit sonROAD18 und StL-86+ für die Situation *unabgeschirmte Ausbreitung über ebenem hartem Boden* mit d : Abstand zur Straße und h : Höhe des Immissionspunktes über Boden.

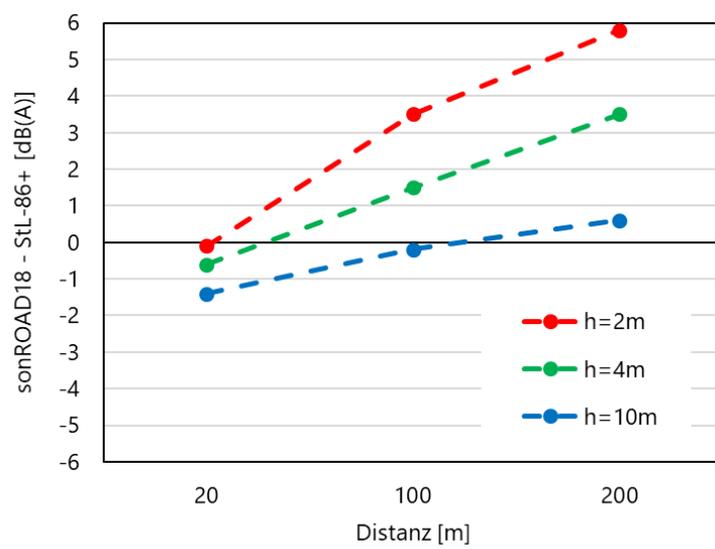


Abbildung 8.4: Differenzen der berechneten Immissionspegel in Abhängigkeit der Distanz d mit dem Scharparameter Empfängerhöhe h in der Situation *unabgeschirmte Ausbreitung über ebenem hartem Boden*.

8.4 Abgeschirmte Ausbreitung über ebenem hartem Boden

Die Abbildung 8.5 zeigt die angenommene Situation für die abgeschirmte Ausbreitung über ebenem hartem Boden. Der Immissionspunkt ist in einer Distanz d von 90 m auf einer Höhe h von 4 m angenommen. In halber Entfernung zwischen Strasse und Empfänger ist eine abschirmende Wand deren Höhe hh von 3 bis 7 m variiert. Die Tabelle 8.3 zeigt die mit sonROAD18 bzw. StL-86+ berechneten A-bewerteten Immissionspegel sowie die Differenz zwischen den beiden Modellen. Die sonROAD18-Berechnung ist einmal in der Standardeinstellung mit K_{met} (d.h. förderliche Bedingungen) und einmal ohne K_{met} (d.h. neutrale Bedingungen) ausgeführt. Die in Tabelle 8.3 ausgewiesenen Differenzen sind überdies in Abbildung 8.6 grafisch dargestellt.

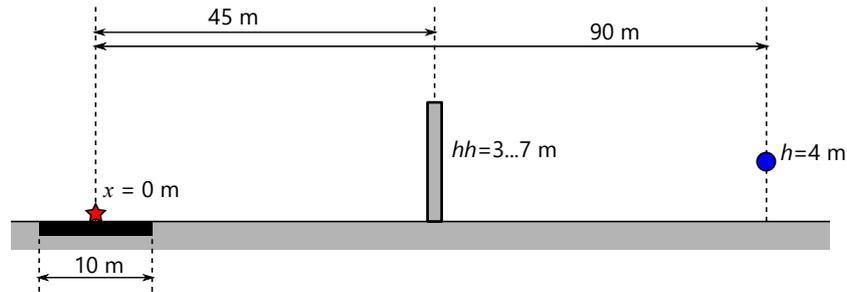


Abbildung 8.5: Geometrie zur Prototypsituation *abgeschirmte Ausbreitung über ebenem hartem Boden*.

hh	sonROAD18F	StL-86+	sonROAD18F-StL-86+	sonROAD18N	StL-86+	sonROAD18N-StL-86+
3	54.5	52.6	1.9	53.6	52.6	1.0
4	53.3	49.7	3.6	51.6	49.7	1.9
5	51.9	47.7	4.2	49.6	47.7	1.9
6	50.6	46.0	4.6	48.0	46.0	2.0
7	49.4	44.5	4.9	46.5	44.5	2.0

Tabelle 8.3: Immissionspegelberechnungen mit sonROAD18 und StL-86+ für die Situation *abgeschirmte Ausbreitung über ebenem hartem Boden* mit der Wandhöhe hh . sonROAD18F bezeichnet das Ergebnis der Rechnung für förderliche Bedingungen, sonROAD18N steht für neutrale Bedingungen.

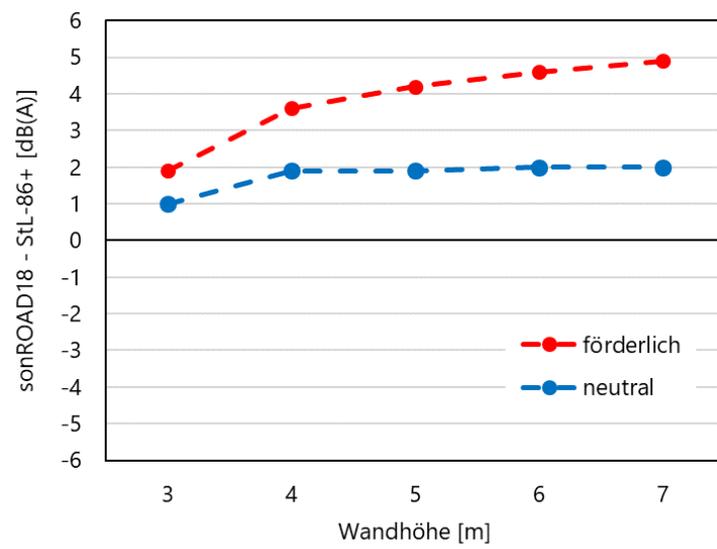


Abbildung 8.6: Differenzen der berechneten Immissionspegel in Abhängigkeit der Wandhöhe hh in der Situation *abgeschirmte Ausbreitung über ebenem hartem Boden*.

8.5 Quellennah abgeschirmte Ausbreitung über ebenem Grasboden

Die Abbildung 8.7 zeigt die angenommene Situation für die quellennah abgeschirmte Ausbreitung. Der Boden auf den ersten 10 m ist hart, die weitere Ausbreitung erfolgt über ebenem Grasboden. Der Immissionspunkt ist in einer Distanz d von 90 m auf einer Höhe h von 4 m angenommen. In 10 m Entfernung zwischen Strasse und Empfänger ist eine abschirmende Wand deren Höhe hh von 3 bis 7 m variiert. Die Tabelle 8.4 zeigt die mit sonROAD18 bzw. StL-86+ berechneten A-bewerteten Immissionspegel sowie die Differenz zwischen den beiden Modellen. Die sonROAD18-Berechnung ist einmal in der Standardeinstellung mit K_{met} (d.h. förderliche Bedingungen) und einmal ohne K_{met} (d.h. neutrale Bedingungen) ausgeführt. Die in Tabelle 8.4 ausgewiesenen Differenzen sind überdies in Abbildung 8.8 grafisch dargestellt.

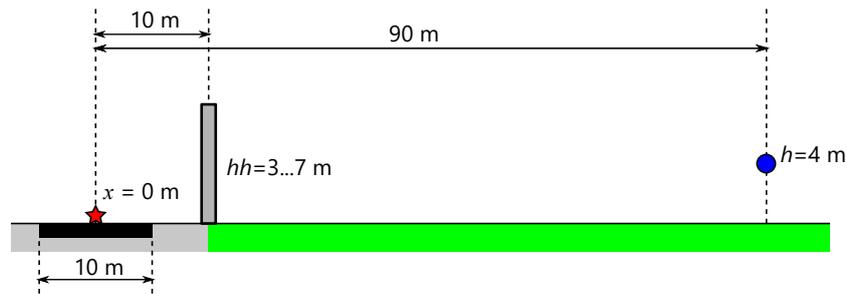


Abbildung 8.7: Geometrie zur Prototypsituation *quellennah abgeschirmte Ausbreitung über ebenem Grasboden*.

hh	sonROAD18F	StL-86+	sonROAD18F-StL-86+	sonROAD18N	StL-86+	sonROAD18N-StL-86+
3	45.9	46.9	-1.0	44.1	46.9	-2.8
4	43.7	44.4	-0.7	41.8	44.4	-2.6
5	41.7	42.3	-0.6	39.9	42.3	-2.4
6	40.0	40.7	-0.7	38.4	40.7	-2.3
7	38.6	39.4	-0.8	37.2	39.4	-2.2

Tabelle 8.4: Immissionspegelberechnungen mit sonROAD18 und StL-86+ für die Situation *quellennah abgeschirmte Ausbreitung über ebenem Grasboden* mit der Wandhöhe hh . sonROAD18F bezeichnet das Ergebnis der Rechnung für förderliche Bedingungen, sonROAD18N steht für neutrale Bedingungen.

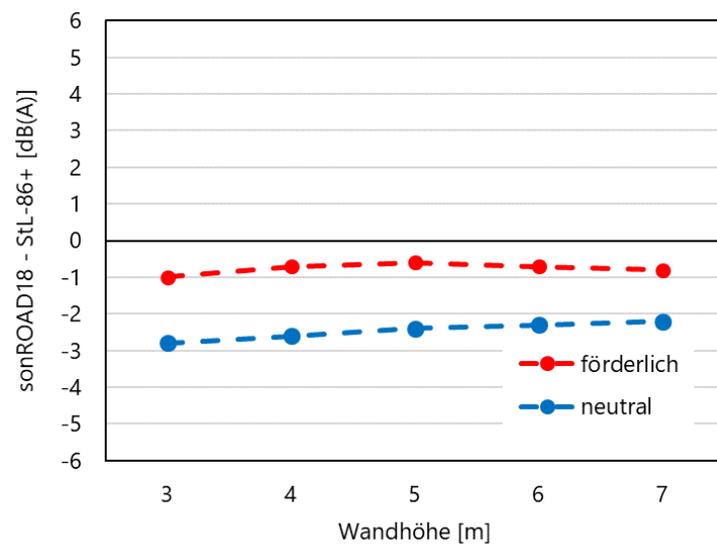


Abbildung 8.8: Differenzen der berechneten Immissionspegel in Abhängigkeit der Wandhöhe hh in der Situation *quellennah abgeschirmte Ausbreitung über ebenem Grasboden*.

8.6 Interpretation des Vergleichs

Als Erklärung für die oben dokumentierten Differenzen zwischen den Berechnungen nach sonROAD18 und StL-86+ kommen primär folgende Aspekte in Frage:

- in sonROAD18 berücksichtigte vertikale Abstrahlcharakteristik
- die Bodeneffektberechnung
- die Hinderniswirkungsberechnung

8.6.1 Vertikale Abstrahlcharakteristik

Die ausschliesslich in sonROAD18 berücksichtigte Abnahme der Emission mit zunehmendem Elevationswinkel führt in den beiden Situation mit freier Ausbreitung beim nächst- und höchstgelegenen Immissionspunkt (20m/10m) zu systematisch bis zu 0.3 dB(A) tieferen Pegeln. Im Fall des quellennahen Hindernisses reduziert sich die Abstrahlung bei der 7 m hohen Wand um 0.6 dB(A).

8.6.2 Bodeneffektberechnung

Für die Ausbreitung über der akustisch harten Strassenoberfläche und den angrenzenden Grasboden verbleibt bei der sonROAD18/ISO9613-Berechnung im A-Pegel-relevanten mittel- und hochfrequenten Bereich lediglich eine geringe Verstärkung durch den Bodeneffekt. Bei der Ausbreitung über vollumfänglich harten Boden liegt diese Verstärkung deutlich höher. StL-86+ differenziert den Bodentyp nicht und nimmt einen vom Abstand und der mittleren Ausbreitungshöhe abhängigen abschwächenden Bodeneffekt an. In der Möglichkeit, den akustisch relevanten Effekt unterschiedlicher Bodentypen in der Ausbreitungsrechnung zu berücksichtigen, ist sonROAD18/ISO9613 dem Modell StL-86+ überlegen.

8.6.3 Hinderniswirkung

Die Hindernisformeln in sonROAD18/ISO9613 und in StL-86+ sind vom Typ *Maekawa*, unterscheiden sich aber hinsichtlich der Parametersetzung. Ein systematischer Unterschied zu StL-86+ liegt darin, dass sonROAD18/ISO9613 generell leicht förderliche Ausbreitungsbedingungen annimmt und dazu die Hinderniswirkung mittels eines Faktors K_{met} abmindert. Wenn im Testfall mit Hindernis und hartem Boden in der sonROAD18/ISO9613-Berechnung neutrale Ausbreitungsbedingungen angenommen würden, blieben die Differenzen zu StL-86+ auf 2 dB(A) beschränkt. Umgekehrt liegen im abgeschirmten Fall über Grasboden sonROAD18/ISO9613 und StL-86+ näher beieinander, wenn K_{met} berücksichtigt, also förderliche Bedingungen angenommen werden.

9 Vergleich VSS-T30 und sonROAD18

9.1 Einleitung

Im Rahmen des Forschungsprojekts VSS 2012/214: Grundlagen zur Beurteilung der Lärmwirkung von Tempo 30 [25] wurde von der Grolimund + Partner AG das Strassenlärmemissionsmodell VSS-T30 für den tiefen Geschwindigkeitsbereich entwickelt. Die Modellkoeffizienten wurden anhand einer Messkampagne mit 22 Fahrzeugen, die auf dem Testgelände in Vauffelin in verschiedensten Zuständen betrieben und vermessen wurden, bestimmt. Das Modell kann nicht nur die Emission bei Konstantfahrt prognostizieren, sondern liefert auch Angaben zu beschleunigter Fahrweise. Anhand von Beobachtungen an mehreren Tempo 30 Standorten wurden überdies statistische Analysen zum Fahrverhalten abgeleitet sowie Validierungsmessungen zum Testen des Modells gewonnen.

Da mit VSS-T30 und sonROAD18 zwei Emissionsmodelle für den tiefen Geschwindigkeitsbereich zur Auswahl stehen, soll hier anhand einiger Szenarien ein Vergleich angestellt und die Differenzen diskutiert werden. Als Rechenwerkzeuge dienten die sonROAD18 Excel-Implementation der Empa sowie die Empa-eigene Delphi-Implementation des VSS-T30 Modells. Hierzu ist jedoch zu bemerken, dass diese Implementierung den Status einer β -Version hat und nicht in der Lage ist, alle im Bericht [25] dokumentierten Modellergebnisse korrekt nachzubilden.

9.2 Szenarien

Für den Vergleich wurden insgesamt 8 Szenarien definiert. Dazu wurden die Situationsparameter: *Geschwindigkeit*, *Schwerverkehrsanteil* und *Strassenbelag* in jeweils zwei Varianten gemäss Tabelle 9.1 durchkombiniert.

Situationsparameter	Bezeichner	Wert 1	Wert 2
Geschwindigkeit	G	30 km/h	50 km/h
Schwerverkehrsanteil	L	0 %	6 %
Strassenbelag	B	ACMR8/AC8	SMA11

Tabelle 9.1: Untersuchte Szenarien für den Vergleich von VSS-T30 mit sonROAD18.

9.3 Beobachtete akustische Grösse

In den verschiedenen Szenarien wurde angenommen, dass der ganze Fahrzeugstrom konzentriert auf einer Fahrspur verkehrt und der A-bewertete Mittelungspegel L_{eq} in 1 m Entfernung die akustische Beobachtung darstellt.

VSS-T30 verwendet den Maximalpegel in 7.5 m Abstand als primäres Quellstärkemerkmale. Die Umrechnung in einen Teil-Mittelungspegel $L_{eq,1Fz/h}$ erfolgte für ein mit der Geschwindigkeit v in km/h verkehrendes Fahrzeug pro Stunde gemäss [1]

$$L_{eq,1Fz/h} = L_{max,7.5m} - 10 \lg(v) - 7.5 \quad (9.1)$$

Die Geschwindigkeiten wurden normalverteilt mit einer Standardabweichung von 4 km/h angenommen, der Fahrzeugpark wurde entsprechend der Defaultaufteilung in die verschiedenen Hubraumklassen gewählt.

sonROAD18 verwendet die akustisch abgestrahlte Leistung als Quellstärkemerkmale. Die Umrechnung in einen Teil-Mittelungspegel $L_{eq,1Fz/h}$ erfolgte für ein mit der Geschwindigkeit v in km/h verkehrendes Fahrzeug pro Stunde gemäss [1]

$$L_{eq,1Fz/h} = L_W - 10 \lg(v) - 33.0 \quad (9.2)$$

Die jeweils berechneten Teil-Mittelungspegel wurden anschliessend energetisch für das ganze Szenario in einen Gesamt- L_{eq} aufkumuliert.

9.4 Ergebnisse

Die Abbildung 9.1 zeigt die mit den beiden Modellen bestimmten Mittelungspegel für die untersuchten Szenarien. Für Tempo 30 ist die Übereinstimmung gut, bei Tempo 50 prognostiziert sonROAD18 rund 1 dB(A) höhere Pegel. Dies führt dazu, dass für reinen PW-Verkehr mit sonROAD18 eine rund 0.5 dB(A) grössere Wirkung der Temporeduktionsmassnahme T50-T30 geschätzt wird. Bei gemischtem Verkehr mit 6 % LKW-Anteil wird diese Modelldifferenz grösser und beträgt mehr als 1 dB(A).

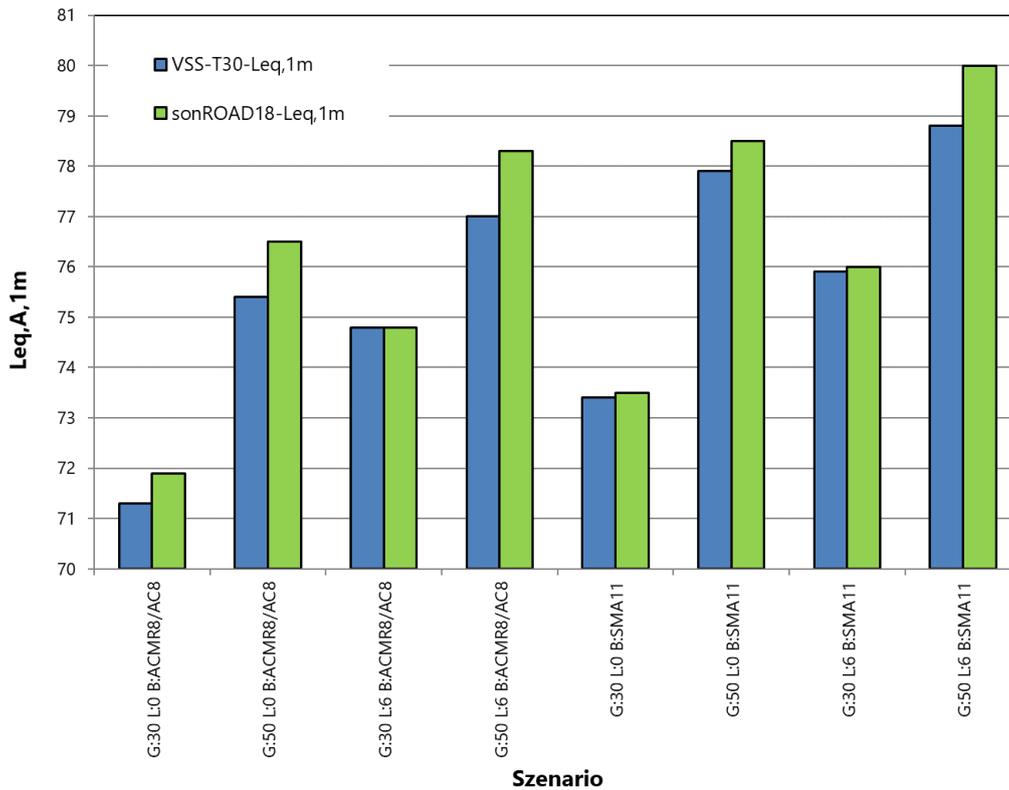


Abbildung 9.1: Vergleich der mit VSS-T30 und sonROAD18 berechneten Mittelungspegel in 1 m Abstand für die Szenarien aus Tabelle 9.1.

Literaturverzeichnis

- [1] K. Heutschi, B. Locher, sonROAD18 - Berechnungsmodell für Strassenlärm, 2018.
- [2] A. Klauser, Lärmemissionen öffentlicher Verkehr, Städtische Verkehrsbusse, Bericht B+S AG, 3000 Bern 15, 31.7.2018.
- [3] A. Klauser, Lärmemissionen öffentlicher Verkehr, Batteriebetriebene Busse, Bericht B+S AG, 3000 Bern 15, 11.12.2018.
- [4] B. Kindler, Forschungsprojekt Tramlärm 2013, Bericht B+S AG, 3000 Bern 31, 2014.
- [5] B. Kindler, Forschungsprojekt Tramlärm 2013 (Aktualisierung 2016), Bericht B+S AG, 3000 Bern 15, 2016.
- [6] Verkehrsbetriebe Zürich, Emissionsmessungen Tram Flexity Zürich und Forchbahn Be 4/6, Messkampagne 2021, Präsentation B+S AG, 3000 Bern 15 vom 9. Dezember 2021.
- [7] Verkehrsbetriebe Zürich / Aargau Verkehr AG, Emissionsmessungen Grüngleis VBZ / LTB, Bericht B+S AG, 3000 Bern 15, 21.12.2023.
- [8] A. Klauser, Lärmemissionen von landwirtschaftlichen Fahrzeugen, Bericht B+S AG, 3000 Bern 15, 14.09.2020.
- [9] Lärmschutz-Verordnung LSV, SR 814.41 vom 15.12.1986 (Stand am 7. Mai 2019).
- [10] VSS-Norm 40005: Verkehrserhebungen, Ganglinien und durchschnittlicher täglicher Verkehr, Ausgabe 2019-03.
- [11] W. Krebs, Berechnungsmodelle Strassenlärm: Massgebende Geschwindigkeit aus akustischer Sicht, CB Fachgruppensitzung 28.3.2018.
- [12] ISO 11819-2:2017, Akustik - Messung des Einflusses von Strassenoberflächen auf Verkehrsgerausche - Teil 2: Nahfeldmessverfahren (CPX).
- [13] Anhang 1c zum Leitfaden Strassenlärm, Technisches Merkblatt für akustische Belagsgütemessungen an Strassen, ASTRA und BAFU, 11.12.2013.
- [14] Strassenlärm: Korrekturen zum Strassenlärm-Berechnungsmodell, Mitteilungen zur Lärmschutz-Verordnung (LSV) Nr. 6, BUWAL, 1995.
- [15] T. Beckenbauer, D. Belcher, G. Kneib, Lärmschutzprojekte ASTRA Filialen - Projektbegleitende Forschung Akustik, Forschungsprojekt ASTRA 2011/007 OBF auf Antrag des Bundesamtes für Strassen (ASTRA), 1576, Oktober 2016.
- [16] J. Kragh et al., ROSANNE Deliverable D2.3: Report on the analysis and comparison of existing noise measurement methods for noise properties of road surfaces, Final report 2015.
- [17] E. Bühlmann, F. Schlatter, J. Schindler, Ermittlung von CPX-Standardspektren für sonROAD18, Grolimund + Partner AG, 3006 Bern, 25.03.2020.
- [18] T. Saurer, CPX-Messdaten für sonROAD18, Kurzdokumentation Datenaufbereitung, Projektbericht, Grolimund + Partner AG, 3006 Bern 2018.

- [19] E. Bühlmann, T. Saurer, B. Probst, L. Cajochen, Ermittlung von SPB-CPX-Messwertpaaren zur Entwicklung eines spektralen Umrechnungsmodells, Grolimund + Partner AG, 3006 Bern, 18.2.2020.
- [20] E. Bühlmann, T. Saurer, B. Probst, L. Cajochen, Zusätzliche Messwertpaaren SPB-CPX-zur Verbesserung der Schnittstelle Belag in sonROAD18, Grolimund + Partner AG, 3006 Bern, 4.2.2020.
- [21] M. Ströhle, CPX-Round-Robin: Ergänzende SPB-Messungen (im Auftrag des ASTRA), B+S AG, 3000 Bern 15, 9.12.2019.
- [22] G. Schgüanin, T. Ziegler: Leitfaden Strassenlärm. Vollzugshilfe für die Sanierung. Stand: Dezember 2006. Umwelt-Vollzug Nr. 0637. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- [23] M. Brechbühl et al., Industrielärm - Testaufgaben gemäss ISO 9613-2, Schweizerische Gesellschaft für Akustik, Version 1.2, 2014.
- [24] ISO/TR 17534-3: Technical Report: Acoustics - Software for the calculation of sound outdoors - Part 3: Recommendations for quality assured implementation of ISO 9613-2 in software according to ISO 17534-1, 2015.
- [25] S. Egger, E. Bühlmann, E. Hammer, T. Ziegler, Grundlagen zur Beurteilung der Lärmwirkung von Tempo 30, Forschungsprojekt VSS 2012/214 auf Antrag des Schweizerischen Verbands der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), 2017.

A Geschwindigkeitsperzentil-Details

A.1 SWISS10-Kategorie 1

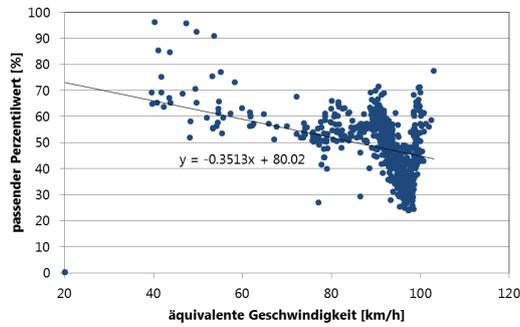


Abbildung A.1: Geschwindigkeitsperzentil für korrekt nachgebildeten Mittelungspegel in Funktion der äquivalenten Geschwindigkeit $v_{\text{äquivalent}}$.

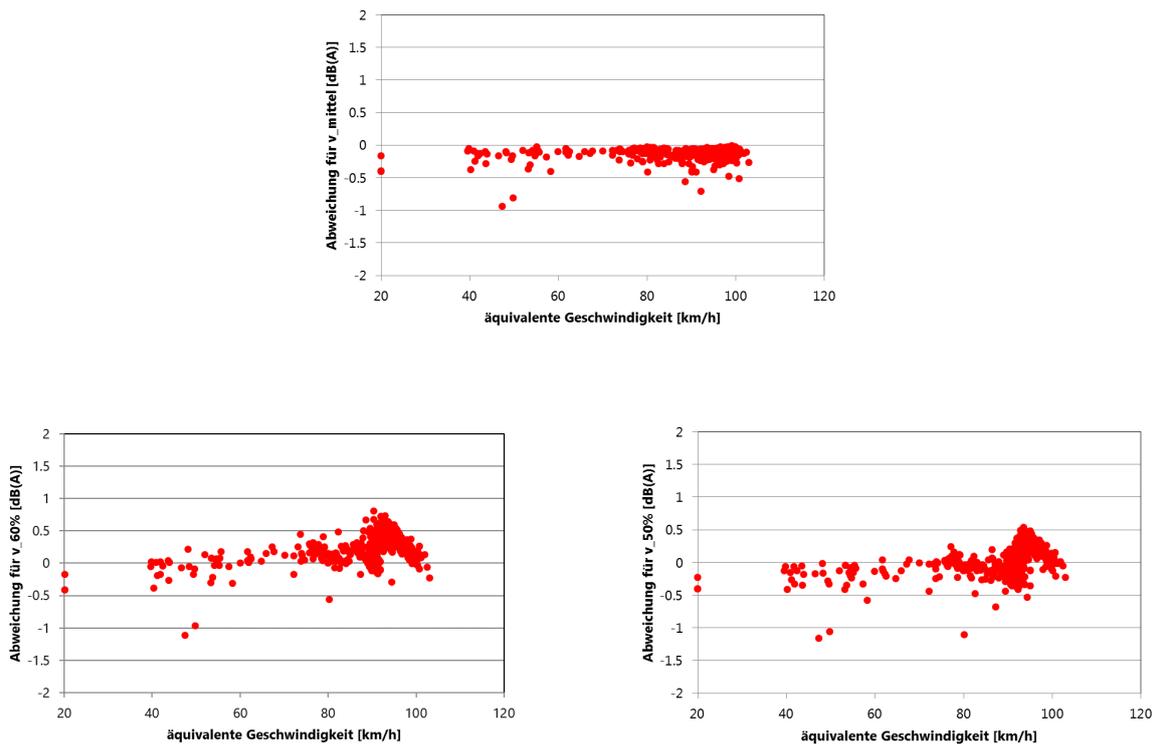


Abbildung A.2: Mittelungspegelabweichungen bei Verwendung von v_{mittel} , $v_{60\%}$ bzw. $v_{50\%}$ in Funktion der äquivalenten Geschwindigkeit $v_{\text{äquivalent}}$.

A.2 SWISS10-Kategorie 2

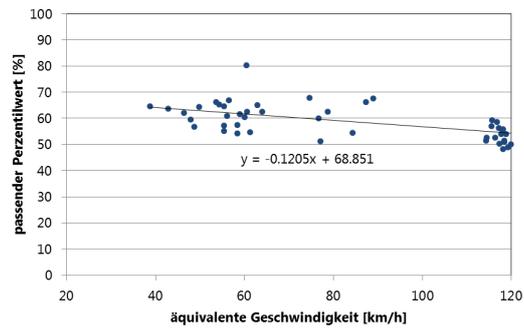


Abbildung A.3: Geschwindigkeitsperzentil für korrekt nachgebildeten Mittelungspegel in Funktion der äquivalenten Geschwindigkeit $v_{\text{äquivalent}}$.

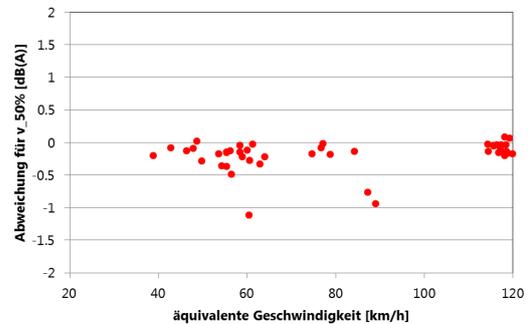
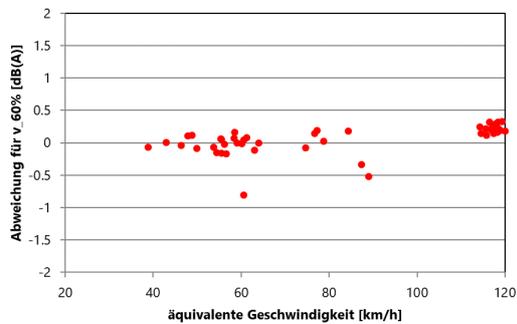
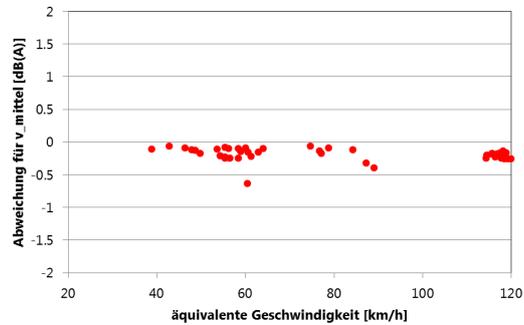


Abbildung A.4: Mittelungspegelabweichungen bei Verwendung von v_{mittel} , $v_{60\%}$ bzw. $v_{50\%}$ in Funktion der äquivalenten Geschwindigkeit $v_{\text{äquivalent}}$.

A.3 SWISS10-Kategorie 3

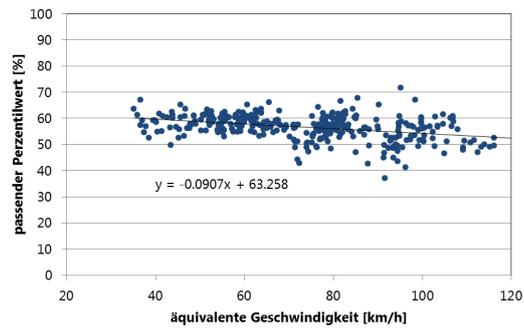


Abbildung A.5: Geschwindigkeitsperzentil für korrekt nachgebildeten Mittelungspegel in Funktion der äquivalenten Geschwindigkeit $v_{\text{äquivalent}}$.

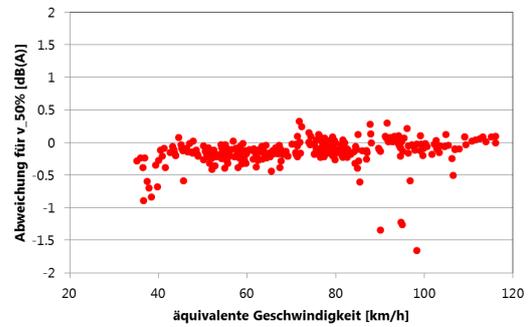
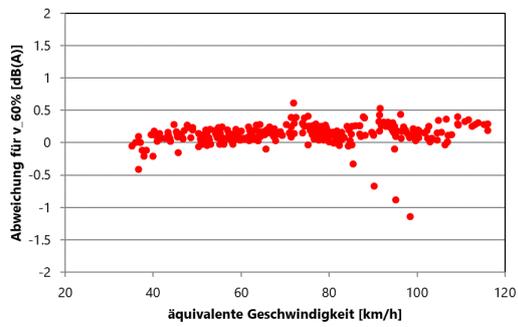
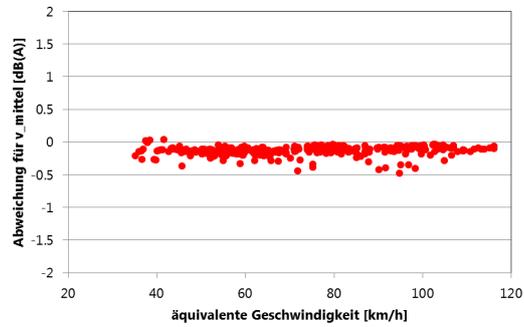


Abbildung A.6: Mittelungspegelabweichungen bei Verwendung von v_{mittel} , $v_{60\%}$ bzw. $v_{50\%}$ in Funktion der äquivalenten Geschwindigkeit $v_{\text{äquivalent}}$.

A.4 SWISS10-Kategorie 4

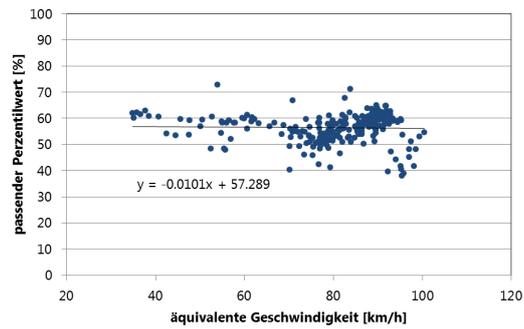


Abbildung A.7: Geschwindigkeitsperzentil für korrekt nachgebildeten Mittelungspegel in Funktion der äquivalenten Geschwindigkeit $v_{\text{äquivalent}}$.

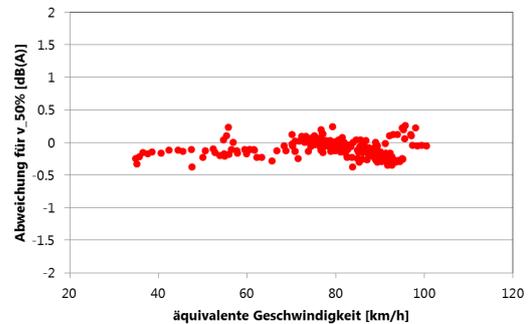
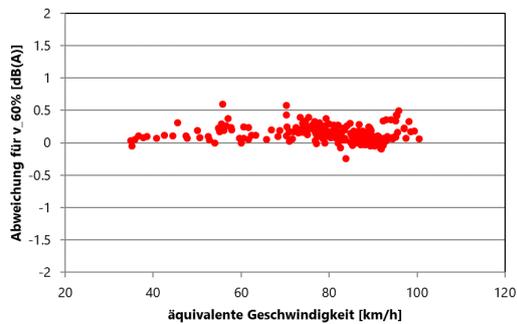
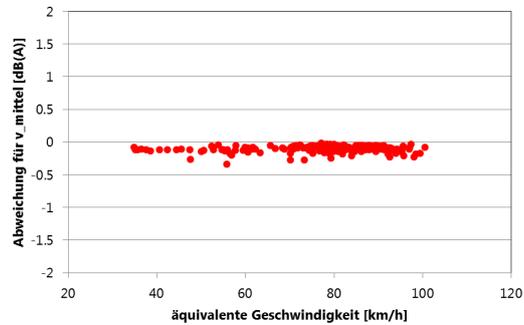


Abbildung A.8: Mittelungspegelabweichungen bei Verwendung von v_{mittel} , $v_{60\%}$ bzw. $v_{50\%}$ in Funktion der äquivalenten Geschwindigkeit $v_{\text{äquivalent}}$.

A.5 SWISS10-Kategorie 5

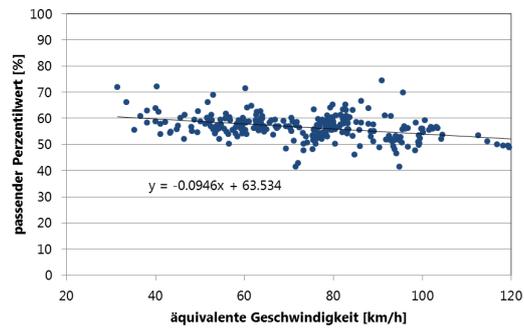


Abbildung A.9: Geschwindigkeitsperzentil für korrekt nachgebildeten Mittelungspegel in Funktion der äquivalenten Geschwindigkeit $v_{\text{äquivalent}}$.

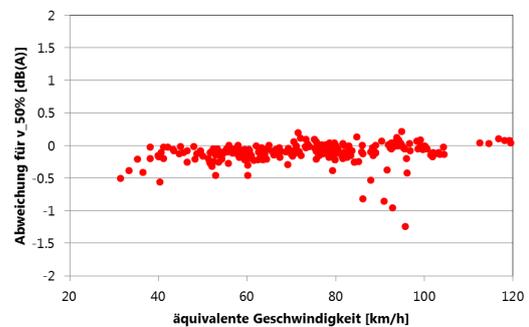
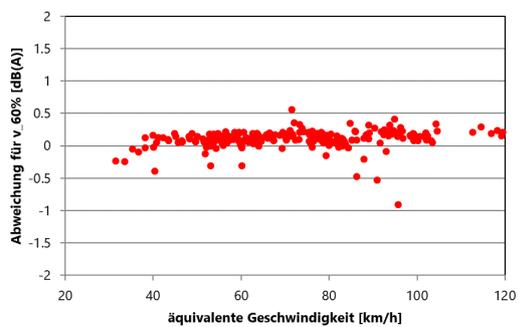
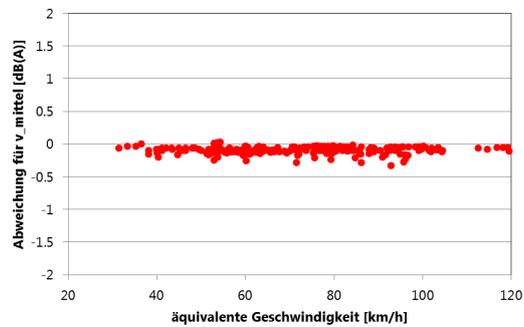


Abbildung A.10: Mittelungspegelabweichungen bei Verwendung von v_{mittel} , $v_{60\%}$ bzw. $v_{50\%}$ in Funktion der äquivalenten Geschwindigkeit $v_{\text{äquivalent}}$.

A.6 SWISS10-Kategorie 6

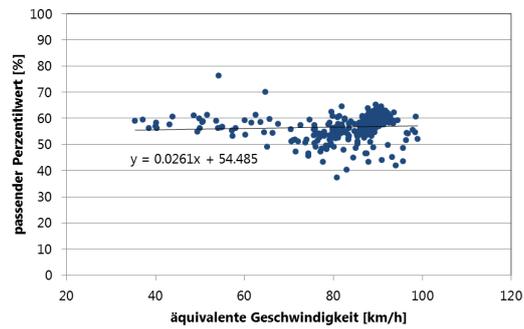


Abbildung A.11: Geschwindigkeitsperzentil für korrekt nachgebildeten Mittelungspegel in Funktion der äquivalenten Geschwindigkeit $v_{\text{äquivalent}}$.

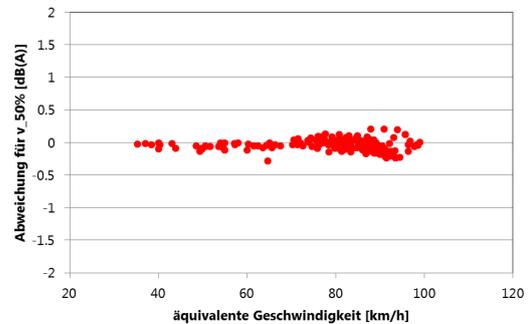
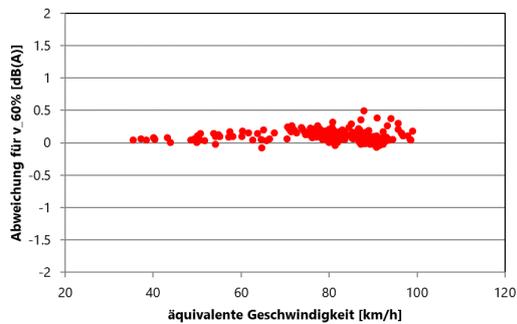
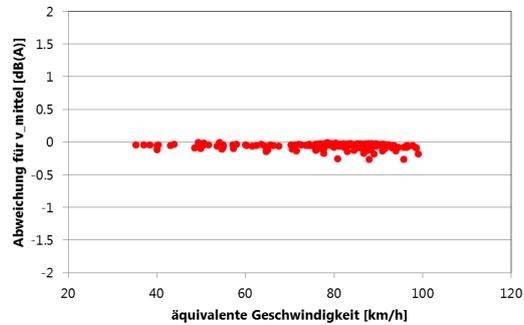


Abbildung A.12: Mittelungspegelabweichungen bei Verwendung von v_{mittel} , $v_{60\%}$ bzw. $v_{50\%}$ in Funktion der äquivalenten Geschwindigkeit $v_{\text{äquivalent}}$.

A.7 SWISS10-Kategorie 7

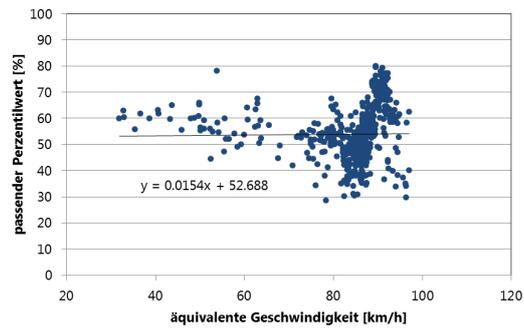


Abbildung A.13: Geschwindigkeitsperzentil für korrekt nachgebildeten Mittelungspegel in Funktion der äquivalenten Geschwindigkeit $v_{\text{äquivalent}}$.

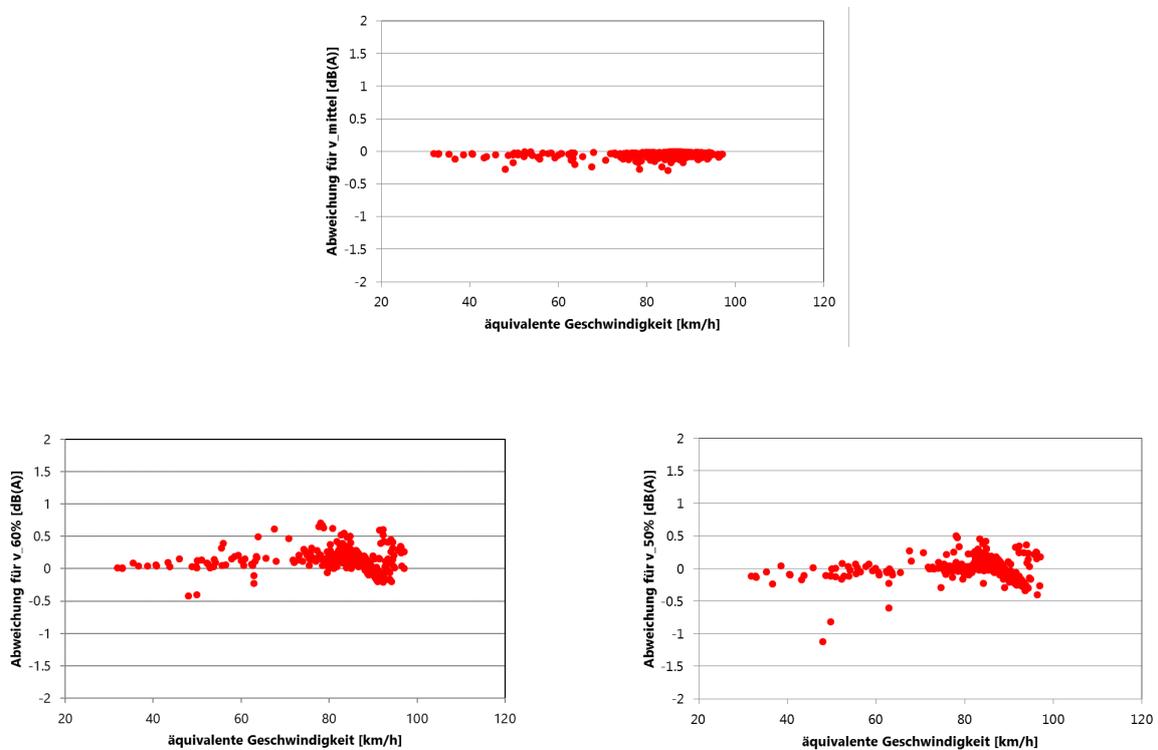


Abbildung A.14: Mittelungspegelabweichungen bei Verwendung von v_{mittel} , $v_{60\%}$ bzw. $v_{50\%}$ in Funktion der äquivalenten Geschwindigkeit $v_{\text{äquivalent}}$.

A.8 SWISS10-Kategorie 8

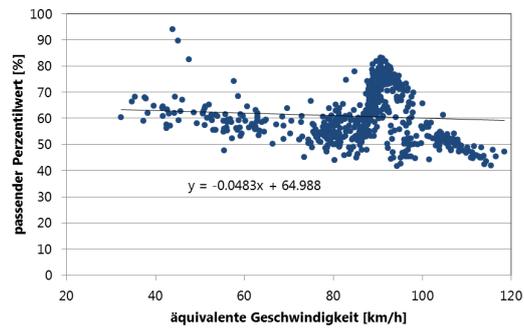


Abbildung A.15: Geschwindigkeitsperzentil für korrekt nachgebildeten Mittelungspegel in Funktion der äquivalenten Geschwindigkeit $v_{\text{äquivalent}}$.

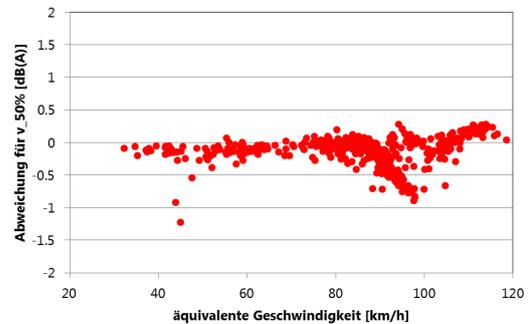
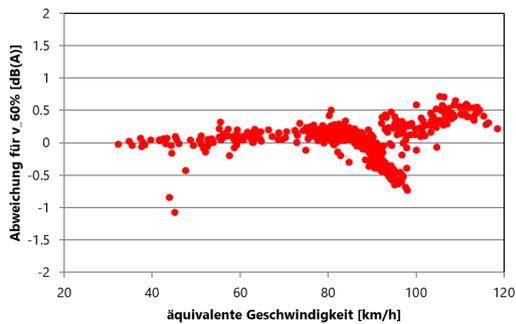
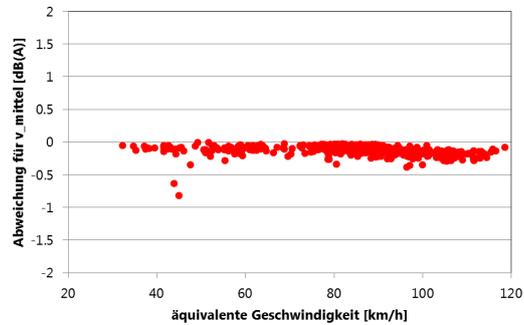


Abbildung A.16: Mittelungspegelabweichungen bei Verwendung von v_{mittel} , $v_{60\%}$ bzw. $v_{50\%}$ in Funktion der äquivalenten Geschwindigkeit $v_{\text{äquivalent}}$.

A.9 SWISS10-Kategorie 9

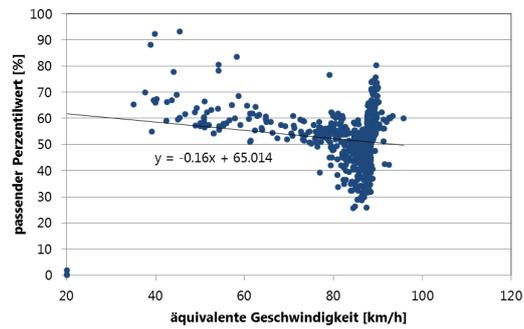


Abbildung A.17: Geschwindigkeitsperzentil für korrekt nachgebildeten Mittelungspegel in Funktion der äquivalenten Geschwindigkeit $v_{\text{äquivalent}}$.

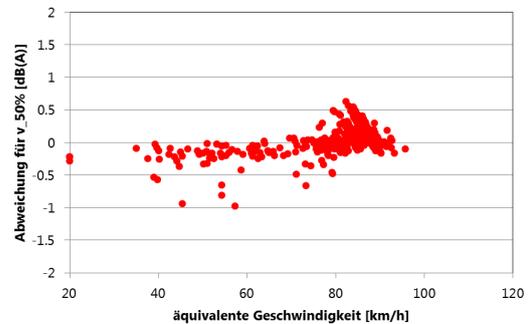
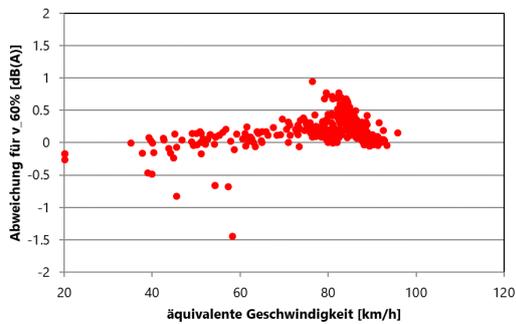
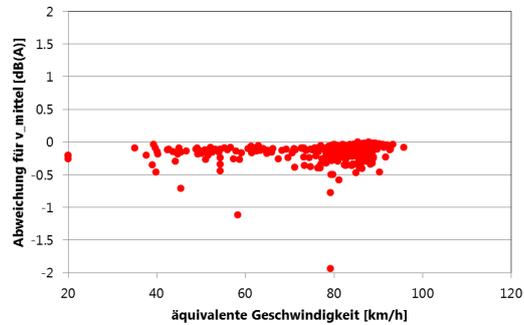


Abbildung A.18: Mittelungspegelabweichungen bei Verwendung von v_{mittel} , $v_{60\%}$ bzw. $v_{50\%}$ in Funktion der äquivalenten Geschwindigkeit $v_{\text{äquivalent}}$.

A.10 SWISS10-Kategorie 10

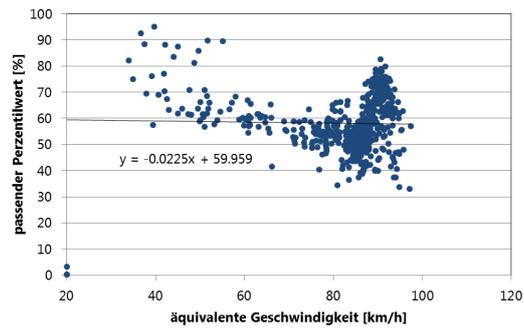


Abbildung A.19: Geschwindigkeitsperzentil für korrekt nachgebildeten Mittelungspegel in Funktion der äquivalenten Geschwindigkeit $v_{\text{äquivalent}}$.

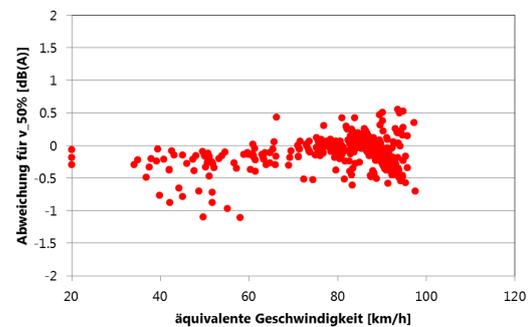
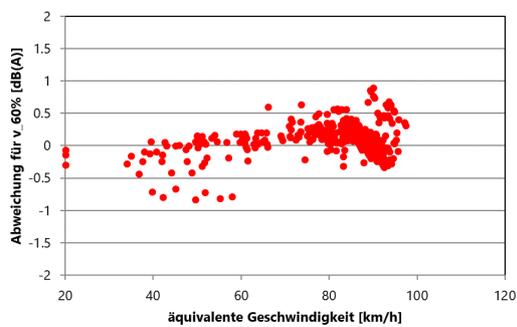
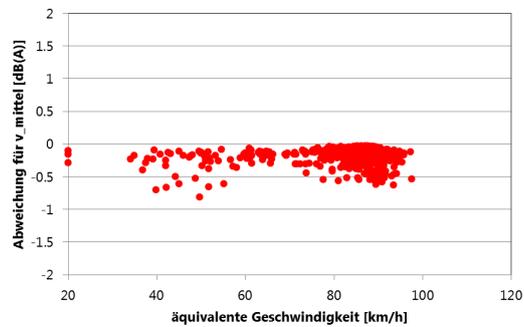


Abbildung A.20: Mittelungspegelabweichungen bei Verwendung von v_{mittel} , $v_{60\%}$ bzw. $v_{50\%}$ in Funktion der äquivalenten Geschwindigkeit $v_{\text{äquivalent}}$.