

Lärmmissionen öffentlicher Verkehr

Städtische Verkehrsbusse



Mit Unterstützung von:

- Bundesamtes für Umwelt (BAFU)
- Amt für Umwelt und Energie Basel (AUE)
- Stadt Luzern, Tiefbauamt

Definition von Emissionswerten



Hybridbus Volvo 7900 LAH



Doppelgelenktrolley RBUS mit eingehausten Rädern

Projektleiter: Bernhard Kindler
Berichtsverfasserin: Anne Klausner

Datum: 31. Juli 2018

Impressum

Auftraggeber	Bundesamt für Umwelt Sektion Strassenlärm 3003 Bern
	VBZ Verkehrsbetriebe Zürich 8048 Zürich
	Amt für Umwelt und Energie Basel (AUE) 4019 Basel
	Stadt Luzern Tiefbauamt 6005 Luzern
Projektverfasser	B+S AG Weltpoststrasse 5 Postfach 313 3000 Bern 15
Projektleiter	Bernhard Kindler
Berichtverfasserin	Anne Klauser
sonROAD18	Kurt Heutschi, EMPA
Messungen	Bernhard Kindler, Anne Klauser, Pierre Perrenoud, Benjamin Stoll

Änderungsverzeichnis

VERSION	DATUM	VERFASSEN	BEMERKUNGEN
0.1	15.06.2018	Klauser / Kindler	Vernehmlassung Auftraggeber
1.0	31.07.2018	Klauser / Kindler	Endversion

Abkürzungsverzeichnis

AUE	Amt für Umwelt und Energie Basel
BAFU	Bundesamt für Umwelt
BVB	Basler Verkehrs-Betriebe
DGT	Doppelgelenktrolley
EMPA	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
GT	Gelenktrolley
i	Gefälle / Steigung
kB	Belagskennwert
LE	Schallexpositionspegel
LEm	Energetisches Mittel der Schallexpositionspegel
Leq	Energieäquivalenter Dauerschallpegel (Mittelungspegel)
Leqh	Stundenbezogener energieäquivalenter Dauerschallpegel (Mittelungspegel)
LKW	Lastwagen
Lqr	Quellenwert einer Busdurchfahrt pro Stunde in 1 m Abstand
Lr	Beurteilungspegel
LSV	Lärmschutz-Verordnung des Bundes
LW	Schalleistungspegel
MIV	Motorisierter Individualverkehr
PW	Personenwagen
SB	Standardbus
STAB	Standardabweichung (auch STABW)
vbl	Verkehrsbetriebe Luzern
VBZ	Verkehrsbetriebe Zürich

Inhalt

Zusammenfassung	5
1 Einleitung	6
1.1 Ausgangslage	6
1.2 Auftrag	6
1.3 Zielsetzung.....	6
2 Grundlagen.....	7
3 Vorgehen / Methodik	8
3.1 Vorgehen	8
3.2 Methodik	8
4 Messkonzept	10
4.1 Messvorgang	10
4.2 Messstrecken.....	11
4.3 Zeitpunkt der Messungen.....	13
4.4 Belagstypen	14
4.5 Bustypen	15
4.6 Einteilung in Kategorien	19
4.7 Haltestellen	19
5 Messergebnisse	20
5.1 Übersicht Messergebnisse.....	20
5.2 Spektrale Betrachtung der Busdurchfahrten	23
5.3 Einfluss Belag	27
6 Auswertung der Messergebnisse	29
6.1 Boxplot.....	29
6.2 Busdurchfahrten.....	33
6.3 Steigung.....	36
6.4 Simulierte Haltestelle	37
7 Schlussfolgerungen.....	39
7.1 Schallabstrahlung und Quellenwerte Busdurchfahrten	39
7.2 Schallabstrahlung und Quellenwerte Busdurchfahrten in der Steigung	39
7.3 Schallabstrahlung und Quellenwerte Busdurchfahrten bei Haltestellen	39
7.4 Vergleich mit bisher bekannten Werten.....	41
8 Integration der Messresultate in das sonROAD18-Modell.....	42
8.1 Ausgangslage	42
8.2 SonRoad18 Emissionsmodell	42
8.3 Ergebnisse / Schlussfolgerungen	42
8.4 Fazit.....	43
9 Schlussbemerkung	44

Zusammenfassung

Ausgangslage

Heute gibt es keine offizielle Datengrundlage zu Lärmemissionen von Bussen städtischer Verkehrsbetriebe. Sollen Aussagen zu Lärmemissionen, z.B. bei Verlegung von Haltestellen, zusätzlichen Buskursen oder separaten Buslinien gemacht werden, ist die Datengrundlage gering und betriebsabhängig, das heisst in der Schweiz wird dies bis anhin nicht einheitlich gehandhabt.

Die Lärmschutzverordnung sowie das in der Schweiz gängige Berechnungsmodell StL-86+ teilen den Strassenlärm in zwei Kategorien¹ ein. Dabei werden Busse i.d.R. den lärmigen Fahrzeugen (Kategorie N2) zugeordnet resp. wird keine Unterscheidung zwischen den einzelnen Bustypen gemacht, da die separate Erfassung und Unterscheidung mit gängigen Verkehrszählgeräten oftmals nicht möglich ist.

Zielsetzung

Die Datengrundlage soll helfen, bei Projekten, Lärmkatasterberechnungen, aber auch rechtlichen Auseinandersetzungen eine verlässliche akustische Basis zur Verfügung zu stellen. Die Studie soll dabei für die zukünftige Ermittlung und Beurteilung von Buslärmissionen die Basis für eine einheitlichen Handhabung schaffen.

Messungen

In den Städten Basel, Luzern und Zürich wurden in Zusammenarbeit mit den jeweiligen Verkehrsbetrieben (BVB, vbl und VBZ) Messungen mit verschiedenen Bustypen mit unterschiedlichen Antriebssystemen (Diesel, Gas, Hybrid, Trolley) auf unterschiedlichen Belägen durchgeführt.

Ergebnisse

Basierend auf den durchgeführten Messungen und deren Auswertungen resultieren folgende wesentliche Ergebnisse und Erkenntnisse:

- Die Emissionen von Bussen sind deutlich geringer als die Emissionen der Kategorie lärmige Fahrzeuge gemäss LSV resp. StL-86+.
- Der Hybridbus ist generell der leiseste Bus und bis zu 5 dB(A) leiser als der lauteste Bus.
- Deutliche Unterschiede und gut wahrnehmbare Schalldruckpegelunterschiede im Vergleich von Tempo 30 und 50: Bei Tempo 30 sind die Busse im Schnitt 4–6 dB(A) leiser.
- In Steigungsstrecken sind Diesel- und Hybridbusse 2–4 dB(A) lauter als auf der horizontalen Strecke. Trolleybusse zeigen keine Pegelunterschiede zwischen Steigung und horizontaler Strecke.
- Das Frequenzspektrum des gleichen Busses auf unterschiedlichen Belägen ist praktisch identisch. Je nach Geschwindigkeit sieht das Spektrum anders aus, behält jedoch i. d. R. die Charakteristik der jeweiligen Buskategorie.
- Der Unterschied der Busemissionen zwischen den Belägen SDA4 und AC11 beträgt je nach Geschwindigkeit 2–4 dB(A).

Schlussfolgerungen

Die Messungen zeigen grosse Unterschiede in den Emissionswerten zwischen den einzelnen Bustypen. Bei der Durchfahrt in der Ebene sind Hybridbusse generell und Trolleybusse nur bei Tempo 30 leiser als Dieselsebusse. Auch Dieselsebusse sind leiser als "lärmige Fahrzeuge". Werden Busse, wie oft üblich, den lärmigen Fahrzeugen zugeteilt, kann dies (gerade im innerstädtischen Bereich und hohen Busfrequenzen) zu einer Überschätzung der Lärmsituation führen.

Weiter kann festgehalten werden, dass eine Tempo 30 Situation im Vergleich zu einer Tempo 50 Situation eine merkliche Pegelwirkung zeigt und somit auch bei vom öffentlichen Verkehr befahrenen Strecken Tempo 30 eine probate Lärmsanierungsmassnahme ist.

¹ gemäss Anhang 3, Ziffer 32, LSV umfassen die beiden Teilverkehrsmengen folgende Fahrzeuge: **N1**: Personenwagen, Lieferwagen, Kleinbusse, Motorfahräder und Trolleybusse. **N2**: Lastwagen, Sattelschlepper, Gesellschaftswagen, Motoräder und Traktoren.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Werden Aussagen zu Lärmmissionen von Bussen städtischer Verkehrsbetriebe, z.B. bei Verlegung von Haltestellen, zusätzlichen Buskursen oder separaten Buslinien gemacht, ist die diesbezügliche Datengrundlage nicht sehr gross und wurde bis anhin nicht einheitlich gehandhabt. Die Lärmschutzverordnung teilt den Strassenlärm in zwei Kategorien² ein. Auch beim StL-86+-Modell wird nur von zwei Kategorien ausgegangen. So werden Busse oft der Kategorie N2 (lärmige Fahrzeuge) zugeordnet und Lastwagen gleichgesetzt. Die separate Erfassung und Unterscheidung mit gängigen Verkehrszählgeräten, die aufgrund der Fahrzeuglänge die Fahrzeuge den Kategorien zuordnen, ist oftmals nicht möglich.

Ein Blick über die Grenze zeigt, dass die Gesetzgebung in Deutschland (RLS-90 [16]) und Österreich (RVS 04.02.11 [17]) jeweils einen prozentualen Anteil des Schwerverkehrs am Gesamtverkehr ausweisen. Wie in der Schweiz wird ebenfalls von zwei Fahrzeugkategorien ausgegangen.

Emissionswerte für Haltestellen sind keine bekannt.

Für die Zulassung müssen Motorfahrzeuge hinsichtlich Lärmmissionen die Anforderungen entsprechend ihrer Kategorien- und Klasseneinteilungen gemäss SR 741.41 Verordnung über die technischen Anforderungen an Strassenfahrzeuge (VTS) erfüllen. Solche Messungen sind nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchungen.

1.2 Auftrag

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), der Verkehrsbetriebe Zürich, des Amtes für Umwelt und Energie Basel und des Tiefbauamtes der Stadt Luzern sowie mit der Unterstützung der städtischen Verkehrsbetriebe von Basel, Luzern und Zürich, soll die Datengrundlage für Busemissionen verbessert werden. Es gilt, die Emissionswerte nach Buskategorien für verschiedene Geschwindigkeitsmodi, mit und ohne Steigungen sowohl für Konstantfahrt aber auch Haltestellen zu evaluieren.

Die Datengrundlage soll helfen, bei Projekten, Lärmkatasterberechnungen, aber auch rechtlichen Auseinandersetzungen eine verlässliche akustische Basis zur Verfügung zu stellen. Die Emissionswerte werden so ermittelt und aufgearbeitet, dass sie in das Berechnungsmodell sonROAD18 der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA) integriert werden können.

1.3 Zielsetzung

Die Auswertung der Messergebnisse soll für künftige Ermittlungen und Beurteilungen von Buslärmissionen die Basis zu allgemeingültigen Richtlinien schaffen. Die Emissionswerte sollen so ermittelt und aufgearbeitet werden, dass sie in das Berechnungsmodell der EMPA sonROAD18 integriert werden können. Insbesondere sollten die Messungen Aufschluss geben über

- mögliche Emissionsunterschiede der verschiedenen Bustypen und Antriebssysteme, sowohl als Gesamtpegel als auch spektral (um die für sonRoad18 benötigte Einteilung in Rollgeräusch und Antriebsgeräusch zu ermöglichen),
- geschwindigkeitsabhängige Emissionen,
- steigungsabhängige Emissionen,
- Emissionspegel bei Haltestellen,
- mögliche Emissionsunterschiede bei verschiedenen Belagstypen.

² gemäss Art. 32, LSV umfassen die beiden Teilverkehrsmengen folgende Fahrzeuge: **N1**: Personenwagen, Lieferwagen, Kleinbusse, Motorfahrräder und Trolleybusse. **N2**: Lastwagen, Sattelschlepper, Gesellschaftswagen, Motorräder und Traktoren.

2 Grundlagen

Folgende Grundlagen wurden für den vorliegenden Bericht verwendet

Projektgrundlagen

- [1] Bau- und Verkehrsdepartement des Kantons Basel-Stadt, Handbuch Strassenbau, Version 1.0, 10. Mai 2010
- [2] Eggenschwiler K., Heutschi K., Wunderli J.M., Emrich F., Bütikofer R.: Lärmbekämpfung, ETH Zürich, EMPA Dübendorf, Herbstsemester 2016, 363 S.
- [3] Kephelopoulos S., Paviotti M., Anfosso-Lédée F. 2012: Common Noise Assessment Methodes in Europe (CNOSSOS-EU) (<https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/reference-reports/common-noise-assessment-methods-europe-cnossos-eu>)
- [4] Heutschi K., Locher B., 2018: sonROAD18 – Berechnungsmodell für Strassenlärm, im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt, nicht publiziert (Stand Juli 2018)
- [5] Gloor, H. Umwelt Aargau Nr. 22, Linderung für Lärmgeplagte, August 2014
- [6] Kanton Aargau, Dept. Bau, Verkehr und Umwelt, Lärmarme Strassenbeläge – Neue Erkenntnisse, Präsentation Gloor 2016
- [7] Pallas M.A., Chatagnon R., Lelong J.: Noise emissions and noise sources of a hybrid bus, Internoise, 2013

Normen / Verordnungen / Richtlinien

- [8] ISO 11819-1, Acoustics – Methodes for measuring the influences of road surfaces on traffic noise – Part 1: Statistical pass-by method (1997)
- [9] Lärmschutzverordnung (LSV) des Bundes vom 15. Dezember 1986
- [10] JCGM 100:2008 Evaluation of measurement data „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“ (ISO/IEC Guide 98-3: 2008)
- [11] Schguanin G., Ziegler T., 2006: Leitfaden Strassenlärm. Vollzugshilfe für die Sanierung. Stand: Dezember 2006, Umwelt-Vollzug Nr. 0637, Bundesamt für Umwelt, Bern. 46 S.
- [12] Anhang 1b, Leitfaden Strassenlärm (siehe [11])
- [13] SNR 640 436: Semidichtes Mischgut und Deckschichten, Festlegungen, Anforderungen, Konzeption und Ausführung, Ausgabe 2013-06
- [14] BAFU, Liste der besten leisen Beläge innerorts in der Schweiz 4mm-6mm, Stand 17.08.2017
- [15] BAFU, Liste der besten leisen Beläge innerorts in der Schweiz 8mm-11mm, Stand 17.08.2017
- [16] Der Bundesminister für Verkehr, Abteilung Strassenbau, Richtlinien für den Lärmschutz an Strassen, RLS-90, Ausgabe 1990
- [17] Österreichische Forschungsgesellschaft Strasse – Schiene – Verkehr, Umweltschutz, Lärm und Schadstoffe, Lärmschutz, Auszug aus RVS 04.02.11, 2. September 2014, Nr. 215

3 Vorgehen / Methodik

3.1 Vorgehen

Die Basis der Untersuchung bildet die Ermittlung der akustischen Emissionen an realen städtischen Verkehrsbussen unter klar definierten Bedingungen. Aufgrund der effektiven Einsatzbedingungen wurden nachfolgend genannte Anforderungen definiert.

Busse

- Busse der aktuellen Fahrzeugflotte, die regelmässig im Einsatz sind
- Busse mit unterschiedlichen Antriebssystemen: Diesel, Gas, Hybrid und Trolley (Elektromotor mit Energiezufuhr über Fahrleitungen)
- Busse ohne Passagiere (Leergewicht, inkl. 1 Chauffeur/Chauffeuse)

Belag

- Strassenabschnitte mit unterschiedlichen Belagstypen und somit unterschiedlichen Belagskennwerten

Fahrszenarien

- Messtechnische Ermittlung einer Durchfahrt mit 30 km/h bzw. 50 km/h und wenn möglich 60 km/h
- Messtechnische Ermittlung einer simulierten Haltestelle (Abbremsen, Anhalten, alle Türen auf, ca. 30 Sekunden später alle Türen zu, Weiterfahrt)
- Horizontale Strecke sowie eine zusätzlich Steigungsstrecke (ca. 8 % Steigung)

3.2 Methodik

In Zusammenarbeit mit den Verkehrsbetrieben wurden geeignete Messstrecken ausgewählt, die soweit möglich folgende Kriterien erfüllen:

- Unterschiedliche Belagsgüteklassen
- Fahrleitungen vorhanden (Strecke auf dem bestehenden Busnetz)
- Horizontale Strecken sowie wenn möglich Steigungstrecken
- Kein messrelevanter Einfluss von Reflexionen gegenüberliegender oder angrenzender Gebäude³
- Streckenabschnitt ist kurzfristig und technisch möglich für den allgemeinen Verkehr absperrbar

Die Messungen wurden nachts und bei normgerechter Witterung (trocken, kein Wind) durchgeführt. Im Einsatz standen 4 Messgeräte des Types Sound Analyser Norsonic 140 und zwei Kalibratoren (Auflistung der gesamten Messausrüstung siehe Anhang 1). Die Messwerte wurden mit der Auswertungssoftware NorReview, Type 1026, Version 6.1 von Norsonic SA 2017 ausgewertet. Um die Messungen untereinander und mit Werten aus anderen Quellen oder Berechnungsmodellen zu vergleichen, wurde der Quellenwert wie nachfolgend beschrieben berechnet.

³ Bei der Seevogelstrasse in Basel könnte die Reflexion einen Einfluss auf die Messung haben, da das Schulhaus (mit Schall absorbierenden Fassaden) rund 6 m vom Mikrofon entfernt war. Die Auswertung der Messungen zeigt keine signifikanten Unterschiede zu anderen Messorten. Falls die Reflexion einen Einfluss auf die Messungen hätte, läge diese im Bereich der Messunsicherheit von ± 0.7 dB(A).

Umrechnung der Messergebnisse in den Quellenwert

Pro Messort, Belagstyp, Geschwindigkeit und Bustyp wurde aus den Expositionspegelmessungen das energetische Mittel des LE (LE_m) in dBA und eines jeden Terzbandes zwischen 6.3 Hz und 20 kHz gebildet

$$LE_m = 10 \log \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{LE_i/10} \quad (1)$$

Die gemittelten Schallexpositionspegel (LE_m) wurden in einen energieäquivalenten Dauerschallpegel Leq umgerechnet, indem die Messzeit (T) berücksichtigt wurde:

$$Leq = LE_m - 10 \log(T) \quad (2)$$

und anschliessend ein stundenbezogener energieäquivalenter Dauerschallpegel gebildet:

$$Leqh = LE_m - 10 \log(3600) \quad (3)$$

Daraus folgt schlussendlich der sogenannte Quellenwert für $d = 1.0$ m (eine Busdurchfahrt pro Stunde in 1m Abstand) mit:

$$Lqr = Leqh + 10 \log(7.5) \quad (4)$$

Schliesslich wurden die Messungen der einzelnen Busse in 6 Kategorien (Antriebsystem und Buslänge/Achsenzahl) eingeteilt und ausgewertet. Die Standardabweichung und die Messunsicherheit wurde pro Auswertungseinheit (Busdurchfahrten, Steigung, Haltestelle) angegeben (siehe Anhang 2). Die Boxplots zeigen pro Kategorie und Geschwindigkeitsregime die Verteilung der Daten (siehe Kap. 6.1).

Und anschliessend ein stundenbezogener energieäquivalenter Dauerschallpegel gebildet

4 Messkonzept

4.1 Messvorgang

4.1.1 Allgemeine Messanordnung

Die Messanordnung wurde entsprechend den Normdistanzen [8] durchgeführt, das heisst 7.5 m seitlicher Abstand zur Busachse und 1.20 m über Boden.

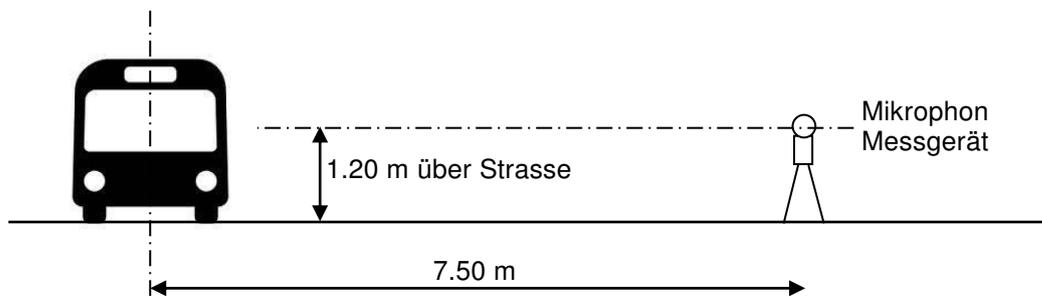


Abb. 1: Allgemeine Messanordnung

4.1.2 Messvorgang

Die Messungen wurden nachts durchgeführt, um mögliche Fremdeinflüsse und Störungen zu minimieren. Nachfolgend ist das Messprozedere erläutert:

- Nachtmessungen mit kurzfristiger Sperrung des Strassenabschnittes für den jeweiligen Messdurchgang.
- Konstante Geschwindigkeit des Busses, Geschwindigkeitsbereich 30 km/h und 50 km/h (resp. in Zürich zusätzlich $v = 60$ km/h).
- 6–12 Messdurchgänge pro Bustyp und Geschwindigkeit mit verschiedenen Mikrofonstandorten.
- Mindestens 4 Messdurchgänge eines simulierten Haltes (Abbremsen, Anhalten, alle Türen auf und ca. 30 Sek. später wieder zu, Weiterfahrt).
- In Zürich wurde mit 2 x 2 Messketten auf beiden Seiten des Busses gemessen.
- Erfassung des Pegel-Zeitverlaufes spektral und in dBA der einzelnen Durchfahrten.
- Erfassung des spektralen Schallleistungspegels LE des ganzen Ereignisses.
- In einer separaten Messkampagne wurden die Belagseigenschaften der verwendeten Messstrecken anhand von PW-Einzelereignismessungen ermittelt (nur in Luzern und Basel).

4.1.3 Wesentliche Lärmquellen

Bei den Messungen der städtischen Verkehrsbusse wurde bei einer Busdurchfahrt von folgenden Lärmquellen ausgegangen:

- Motorgeräusch (Antriebsgeräusch)
- Rollgeräusch
- Lüftung bzw. Klimaanlage (bei kühlen/angenehmen Wetterbedingungen, die Klimaanlage war bei den Messungen ausgeschaltet)
- Trolleybusse: Geräusche bei den Weichen an den Fahrleitungen

Bei der simulierten Haltestelle kommen noch folgende Lärmquellen hinzu:

- Geräusch des Türe Öffnen und Schliessen
- Piepton kurz vor dem Schliessen
- Pneumatischer Vorgang zum Neigen des Busses

Folgende Lärmquellen wurden mit der angewandten Messmethode nicht erfasst und sind gemäss den Erfahrungen von Busbetrieben trotzdem relevant:

- Komponenten (z.B. Lüfter) werden bei Elektrobussen vermehrt auf dem Dach platziert. Diese blasen nach oben und stören Anwohner in der zweiten oder dritten Etage.
- Bei warmen Wetter kommt es zu deutlichen Lüftergeräuschen (teilweise alternierend) von der Klimaanlage.
- Die Heizung im Winter ist nicht so laut wie die Klimaanlage.

4.2 Messstrecken

An den in den nächsten Kapiteln vorgestellten Standorten wurden die Messungen durchgeführt. Die genaue Messanordnung (Mikropositionen) ist dem Anhang 3 zu entnehmen.

4.2.1 Messkampagne Basel

Zürcherstrasse

Belag: ACMR 8 LN (2012)



2'613'016 / 1'267'125

Haltestelle Allmendstrasse

Belag: Betonplatte (Bushaltestelle)



2'614'120 / 1'267'982

Sevogelstrasse

Belag: AC11



2'612'363 / 1'266'585

Haltestelle Erlenmatt

Belag: Confalt (2017)



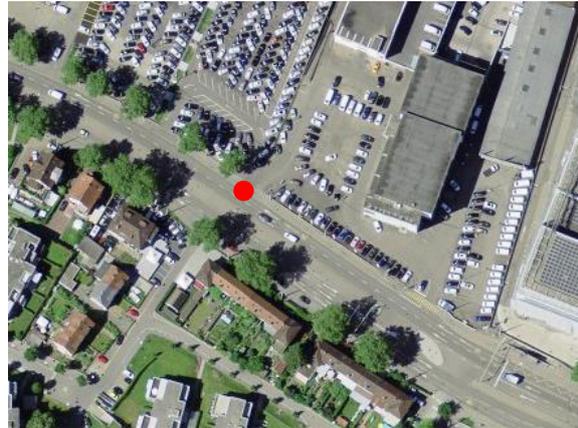
2'612'371 / 1'268'742

4.2.2 Messkampagne Zürich

Zürcherstrasse, westlich Postverteilzentrum

Belag: ACMR (2009)

2'677'542 / 1'250'024



4.2.3 Messkampagne Luzern

Tribschenstrasse, Fahrtrichtung Eisfeld

Belag: AC11 (1999)



2' 666'654 / 1'210'569

Langensandstrasse, Fahrtrichtung Bahnhof

Belag: SDA4 (2016)



2'667'431 / 1'210'040

Tribschenstrasse, Fahrtrichtung Eisfeld

Belag: SDA8 (2014)



2'666'968 / 1'210'376

Hirtenhofstrasse Steigung, beide Richtungen

Belag: AC11 (alt)



2'667'569 / 1'209'785

4.3 Zeitpunkt der Messungen

Die Messungen erfolgten jeweils in der Zeitperiode ab ca. 23.00 – 04.00 Uhr während folgenden Nächten.

Messort	Datum	Temperatur	Wetter
Zürich: Verkehrsbetriebe Zürich (VBZ)	21. / 22.08.17	ca. 13°C	trocken
Basel: Basler Verkehrsbetriebe (BVB)	28. / 29.08.17 und 29. / 30.08.17	ca. 15°C	trocken
Luzern: Verkehrsbetriebe Luzern AG (vbl)	03. / 04.09.17	ca. 10°C	trocken

Tab. 1: Messorte, Zeitpunkt und meteorologische Bedingungen

4.4 Belagstypen

4.4.1 Ausgangslage

Für die akustische Wirkung eines Belages sind die Eigenschaften des Deckbelags bzw. der Deckschicht verantwortlich. Aussagekräftig ist vor allem die Textur und die Entlüftungswirkung eines möglichst grossen, durchgängig verfügbaren Porenvolumens. Vereinfacht ausgedrückt bestimmt das Grösstkorn der verwendeten Gesteinskörnung der Deckschicht (häufig als Zahl in der Bezeichnung des Belages angegeben), wie die lärmmindernde Wirkung des Belages aussieht. Bei offenporigen und semidichten Belägen gilt, je geringer das Grösstkorn, je feiner sind die von der Oberfläche zugänglichen Hohlräume/Poren. Und je höher der Hohlraumgehalt eines Deckbelages, desto besser ist seine lärmmindernde Wirkung [5]. Hinzu kommt, dass die lärmmindernde Wirkung mit dem Alter des Belages nachlässt.

4.4.2 Belagstypen

Die Messungen auf verschiedenen Belägen wurden durchgeführt um einerseits den Ereignispegel in Antriebs- und Rollgeräusche aufzuschlüsseln (sonROAD18) und andererseits zu untersuchen, ob die Belagswirkung Geschwindigkeits und/oder Bustyp abhängig ist resp. signifikante Unterschiede festzustellen sind.

Auf folgenden Belägen wurden Messfahrten durchgeführt. Alle Beläge sind entsprechend ihrem Alter in einem guten, homogenen Zustand (keine Ausbrüche u. ä.).

"Normalbelag" **AC11, früher AB 11**

Der Asphaltbetonbelag (neue Abkürzung aus der englischen Bezeichnung: Asphalt Concrete) gilt als der Standard-Deckbelag und besteht aus Bitumen und einer Gesteinsmischung mit unterschiedlichen Korngrössen. Grösstkorn = 11 mm

ACMR8LN **(Rauasphalt)**

Der ACMR 8 LN gilt als Nachfolger des früher verwendeten SMA8. Der MR (aus dem Englischen Macro-Rough) besitzt bessere lärmmindernde Eigenschaften und der Bindegehalt ist etwas reduziert. MR-Beläge haben eine hohe Beständigkeit gegen Verformungen und sind ausgeprägt verschleissfest.

Anwendung: stark verkehrsbelastete Strassen und Busrouten

Beton

Diese sehr langlebige und widerstandsfähige Platte aus Zement und Kies/Sand wird v.a. für hohe Belastungen bei Wendepunkten, Bushaltestellen und Verkehrskreisel eingesetzt.

Confalt

Der fugenlose vermörtelte Asphaltbelag, auch halbstarrer Belag, ist wie die Betonplatten, für sehr hohe Belastungen und grosse Temperaturschwankungen geeignet.

Anwendung: Bushaltestellen, Aufstellflächen vor Verkehrssignalanlagen, Parkplätze und -häuser, Strassenkreuzungen, Industrieböden,...

SDA8

Die semidichten Asphalte umfassen ein semidichtes Mischgut, welches einen charakteristischen Hohlraumgehalt der Marshall-Prüfkörper zwischen 8 und 20 Volumen-% aufweist [13]. Ihre lärmmindernde Wirkung ist deutlich besser als beim AC11: Der SDA8 mit Grösstkorn 8 mm hat gemäss Gloor [5] sowie der Best-Practice-Liste vom BAFU [15] eine akustische Wirkung wie eine Halbierung des Verkehrs (bzw. eine Reduktion um 3 dB(A)).

SDA 4

Die lärmmindernde Wirkung dieses semidichten Asphaltbelages ist seiner feinen Oberflächenstruktur mit einer Gesteinskörnung von max. 4 Millimeter Grösse und einem Hohlraumgehalt von mindestens 12 Vol.-% zu verdanken.

Gemäss Gloor [5] und der Best-Practice-Liste vom BAFU [14] entspricht die akustische Wirkung eines SDA4 einer Reduktion des Verkehrs um Dreiviertel bzw. eine Reduktion um 6 dB(A). Längerfristig kann von einer Wirkung von -3 dB(A) ausgegangen werden.

4.5 Bustypen

4.5.1 Basler Verkehrsbetriebe BVB



Mercedes-Benz O 530 (Citaro Euro VI)

Antrieb:	Diesel
Baujahr:	2015
Länge:	18 m
Anzahl Türen:	4
Leergewicht:	17 t
Sitzplätze:	42



Citaro Gelenkbus CNG (EvoBus/Mercedes)

Antrieb:	Gas
Baujahr:	2008
Länge:	18 m
Anzahl Türen:	4
Leergewicht:	18 t
Sitzplätze:	42

4.5.2 Verkehrsbetriebe Luzern vbl



Mercedes-Benz Citaro

Antrieb:	Diesel
Baujahr:	2014
Länge:	12 m
Anzahl Türen:	3
Leergewicht:	12 t
Sitzplätze:	33



Volvo 7900H, Hybrid-Standardbus

Antrieb:	Diesel-Hybrid
Baujahr:	2015
Länge:	12 m
Anzahl Türen:	3
Leergewicht:	12 t
Sitzplätze:	32



HESS BGT-N2D, Gelenktrolley

Antrieb: Elektrisch
Baujahr: 2016
Länge: 19 m
Anzahl Türen: 4
Leergewicht: 20 t
Sitzplätze: 38



HESS BGGT-N2D "RBUS"

Antrieb: Elektrisch
Baujahr: 2016
Länge: 25 m
Anzahl Türen: 5
Leergewicht: 24 t
Sitzplätze: 57

4.5.3 Verkehrsbetriebe Zürich VBZ



Mercedes O 530 G, Gelenkbus

Antrieb: Diesel
Baujahr: 2014
Länge: 18 m
Anzahl Türen: 4
Leergewicht: 18 t
Sitzplätze: 43



MAN A40 Lions City, Gelenkbus

Antrieb: Diesel
Baujahr: 2015
Länge: 19 m
Anzahl Türen: 4
Leergewicht: 18 t
Sitzplätze: 43



Mercedes-Benz Citaro, Standardbus

Antrieb: Diesel
Baujahr: 2008
Länge: 12 m
Anzahl Türen: 3
Leergewicht: 12 t
Sitzplätze: 33



Neoplan Centroliner N4522, Gelenkbus

Antrieb: Diesel
Baujahr: 2006
Länge: 19 m
Anzahl Türen: 4
Leergewicht: 18 t
Sitzplätze: 48



MAN A 35 Midibus

Antrieb: Diesel
Baujahr: 2011
Länge: 10 m
Anzahl Türen: 2
Leergewicht: 10 t
Sitzplätze: 23



HESS BGGT-N2C, lighTram 3 "Longo"

Antrieb: Elektrisch
Baujahr: 2007
Länge: 25 m
Anzahl Türen: 5
Leergewicht: 24 t
Sitzplätze: 60



HESS BGT-N2C Swisstrolley 3

Antrieb: Elektrisch
Baujahr: 2007
Länge: 19 m
Anzahl Türen: 4
Leergewicht: 20 t
Sitzplätze: 44



HESS BGGT-N2C lighTram 3 "Longo 2"

Antrieb: Elektrisch
Baujahr: 2012
Länge: 25 m
Anzahl Türen: 5
Leergewicht: 24 t
Sitzplätze: 60



Volvo 7900 LAH, Hybrid-Gelenkbus

Antrieb: Diesel-Hybrid
Baujahr: 2017
Länge: 18 m
Anzahl Türen: 4
Leergewicht: 18 t
Sitzplätze: 42

4.6 Einteilung in Kategorien

Die 15 gemessenen Bustypen wurden gemäss ihrer Antriebsart, ihrer Länge bzw. Anzahl Achsen in folgende 6 Kategorien gemäss Tab. 2 eingeteilt.

Bustyp/Kategorie	Stadt	Bus-Nr.	Modell	Länge (m)	Achsen	Leergewicht (t)
Diesel, Standardbus	Luzern	1	Mercedes-Benz Citaro	12	2	12
	Zürich	1.3	Mercedes-Benz Citaro	12	2	12
	Zürich	1.5	MAN A35 Midibus	10	2	10
Diesel, Gelenkbus	Basel	1	Mercedes-Benz O 530 G	18	3	17
	Zürich	1.1	Mercedes-Benz O 530 G	18	3	18
	Zürich	1.2	MAN A40 Lions City	19	3	18
	Zürich	1.4	Neoplan Centroliner	19	3	18
Gasbus	Basel	2	Citaro Gelenkbus CNG	18	3	18
Hybridbus	Luzern	2	Volvo 7900H, Standardbus	12	2	12
	Zürich	2.4	Volvo 7900 LAH, Gelenkbus	18	3	18
Gelenktrolley	Luzern	3	HESS Gelenktrolley	19	3	20
	Zürich	2.2	HESS Swisstrolley 3	19	3	20
Doppelgelenktrolley	Luzern	4	HESS RBUS*	25	4	24
	Zürich	2.1	HESS lighTram 3 Longo	25	4	24
	Zürich	2.3	HESS lighTram 3 Longo 2	25	4	24

*eingehauste Räder

Tab. 2: Übersicht Einteilung in Kategorien, Busmodelle, projektinterne Busnummern und Eigenschaften

4.7 Haltestellen

Im Bereich von Bus- oder Tramhaltestellen treten diverse Lärmarten auf. Neben dem eigentlichen Fahrgeräusch des Busses, welcher vor der Haltestelle abbremst und danach wieder beschleunigt, gibt es weitere Lärmmissionen infolge Türöffnen und Schliessvorgang, Ein- und Aussteigen der Personen, Gespräche der Personen sowie häufig ein Warnsignal (mehrfaches Piepen) vor dem Schliessen der Türen. Zudem ist, insbesondere beim längeren Warten an Haltestellen (z.B. Endstation), mit Lärmmissionen der Lüftung bzw. der Klimaanlage zu rechnen.

Im Rahmen der vorliegenden Messkampagne wurden solche Haltevorgänge simuliert, d.h. Abbremsen, Öffnen der Türen, Schliessen der Türe und Weiterfahrt. Die Simulation eines Haltes erfolgte auf offener Strecke, d.h. es gab keine Hindernisse wie z.B. ein Haltestellenunterstand oder Perronkanten.

5 Messergebnisse

5.1 Übersicht Messergebnisse

5.1.1 Busdurchfahrten

Die berechneten Quellenwerte der Busdurchfahrten sind in Tab. 3 dargestellt. Sie wurden nach Buskategorien geordnet. Die Tab. 3 zeigt die korrigierten Quellwerte, welche gemäss StL-86+ auf einen akustisch neutralen Belag (Belagskennwert = 0) korrigiert wurden, indem der Belagskennwert des jeweiligen Asphaltbelages (siehe Anhang 4) berücksichtigt wurde. Dadurch sind die Quellenwerte untereinander vergleichbar.

Übersicht der korrigierten Quellenwerte Busdurchfahrten

Stadt	Bus-Nr.	Typ	Kat.	Belag	Korrigierter Quellenwert Leqh in 1 m ab Achse		
					30 km/h	50 km/h	60 km/h
Luzern	1	Mercedes-Benz Citaro	Diesel, 2-Achser	SDA 8	48.0	53.2	--
Luzern	1	Mercedes-Benz Citaro		AC 11	47.7	52.4	--
Luzern	1	Mercedes-Benz Citaro		SDA 4	49.1	54.7	--
Zürich	1.3l	Mercedes-Benz Citaro		AC MR	50.6	53.5	55.7
Zürich	1.3r	Mercedes-Benz Citaro		AC MR	50.5	53.6	56.7
Zürich	1.5l	MAN A 35 Midibus		AC MR	47.8	50.4	52.4
Zürich	1.5r	MAN A 35 Midibus		AC MR	45.9	49.1	51.0
Basel	1	Mercedes-Benz O 530 G	Diesel, 3-Achser	AC11	49.1	53.2	--
Basel	1	Mercedes-Benz O 530 G		ACMR8LN	49.6	53.9	--
Basel	1	Mercedes-Benz O 530 G		Beton	48.0	51.7	--
Basel	1	Mercedes-Benz O 530 G		Confalt	48.4	55.3	--
Zürich	1.1l	Mercedes-Benz O 530 G		AC MR	51.1	53.4	54.4
Zürich	1.1r	Mercedes-Benz O 530 G		AC MR	49.7	53.0	53.8
Zürich	1.2l	MAN A40 Lions City		AC MR	47.6	52.5	54.1
Zürich	1.2r	MAN A40 Lions City		AC MR	48.4	53.9	54.8
Zürich	1.4l	Neoplan Centroliner		AC MR	48.3	52.1	53.7
Zürich	1.4r	Neoplan Centroliner		AC MR	48.5	52.6	54.1
Basel	2	Citaro Gelenkbus CNG	Gas	AC11	51.6	54.5	--
Basel	2	Citaro Gelenkbus CNG		ACMR8LN	51.9	55.1	--
Basel	2	Citaro Gelenkbus CNG		Confalt	50.2	52.8	--
Basel	2	Citaro Gelenkbus CNG		Beton	51.1	52.1	--
Luzern	2	Volvo 7900H	Hybrid	SDA 8	45.9	51.5	--
Luzern	2	Volvo 7900H		AC 11	46.0	51.3	--
Luzern	2	Volvo 7900H		SDA 4	46.8	53.1	--
Zürich	2.4l	Volvo 7900 LAH		AC MR	46.2	51.1	53
Zürich	2.4r	Volvo 7900 LAH		AC MR	46.6	51.5	53.5
Luzern	3	HESS Gelenktrolley	Trolley, 3-A.	SDA 8	46.3	53.8	--
Luzern	3	HESS Gelenktrolley		AC 11	46.8	53.7	--
Luzern	3	HESS Gelenktrolley		SDA 4	47.5	55.8	--
Zürich	2.2l	HESS Swisstrolley 3		AC MR	48.6	54.3	56.3
Zürich	2.2r	HESS Swisstrolley 3		AC MR	49.4	55.3	53.8
Luzern	4	HESS RBUS	Trolley, 4-Achser	SDA 8	46.8	52.4	--
Luzern	4	HESS RBUS		AC 11	47.6	52.9	--
Luzern	4	HESS RBUS		SDA 4	47.2	52.6	--
Zürich	2.1l	HESS lighTram 3 Longo		AC MR	47.5	53.2	55.4
Zürich	2.1r	HESS lighTram 3 Longo		AC MR	49.3	54.5	56.2
Zürich	2.3l	HESS lighTram 3 Longo 2		AC MR	47.8	52.4	55
Zürich	2.3r	HESS lighTram 3 Longo 2		AC MR	49.8	54.0	56.3

Tab. 3: Übersicht der korrigierten Quellenwerte aller Busdurchfahrten, alle Angaben in dB(A)

Kommentar zu den Trolleybussen

Aufgrund der technischen Weiterentwicklung gibt es bei den Trolleybussen akustisch relevante Unterschiede: Die von den vbl (Jahrgang 2016) verwendeten Trolleybusse verfügen über eine elektrische Lenkhilfepumpe und der Antriebsstrang (Kardanwelle zwischen Elektromotor und Achse) ist in einem akustisch optimaleren Winkel angeordnet. Bei den Modellen der VBZ (Jahrgang 2007, 2012) ist die Lenkhilfepumpe am Antriebsstrang verbaut und wird ab dem Fahrmotor angetrieben. Letzteres wird subjektiv als lauter wahrgenommen. Die Quellenwerte der Luzerner Trolleybusse fallen tendenziell leiser aus, wie dies in Tab. 3 ersichtlich ist.

5.1.2 Steigung

In Luzern an der Hirtenhofstrasse wurden die Busdurchfahrten an einer Steigung von rund 8 % gemessen, sowohl beim Hinauffahren wie auch beim Hinunterfahren. Auf dieser Strecke ist Tempo 30 signalisiert, daher gibt es nur Messungen mit dieser Geschwindigkeit. Die Resultate sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Bus-Nr.	Typ	Kat.	Belag	Korrigierter Quellenwert Leqh, 1m ab Achse 30km/h	
				Bergfahrt	Talfahrt
1	Mercedes-Benz Citaro	Diesel 2-A.	AC 11	52.5	50.9
2	Volvo 7900H	Hybrid	AC 11	50.4	48.0
3	HESS Gelenktrolley	Trolley 3-A.	AC 11	47.4	47.7
4	HESS RBUS	Trolley 4-A.	AC 11	45.2	45.5
	PW		AC 11	41.3	40.5

Tab. 4: Übersicht des korrigierten Quellwertes der Busdurchfahrten an der Steigung Hirtenhofstrasse in Luzern, alle Angaben in dB(A)

5.1.3 Haltestelle

In allen 3 Städten bei fast allen Messstandorten wurde auf horizontaler Strecke eine Haltestelle simuliert. Der Bus fährt mit einer Geschwindigkeit von 30 km/h heran und bremst ab. Er hält auf offener Strecke, öffnet alle Türen, schliesst sie ca. 30 Sekunden später und fährt weiter. Teilweise wurde der Bus mittels eines pneumatischen Vorganges geneigt, da dies dem bequemeren Aussteigen der Passagiere dient.

Die Quellwerte der simulierten Haltestellen sind in Tab. 5 dargestellt.

Übersicht der korrigierten Quellwerte Haltestellen

Stadt	Bus-Nr.	Typ	Kat	Belag	Korrigierter Quellenwert Leqh, 1 m ab Achse Haltestelle
Luzern	1	Mercedes-Benz Citaro	Diesel, 2-Achser	SDA 8	52.9
Luzern	1	Mercedes-Benz Citaro		AC 11	51.2
Zürich	1.3l	Mercedes-Benz Citaro		AC MR	54.2
Zürich	1.3r	Mercedes-Benz Citaro		AC MR	54.6
Zürich	1.5l	MAN A 35 Midibus		AC MR	54.4
Zürich	1.5r	MAN A 35 Midibus		AC MR	52.6
Basel	1	Mercedes-Benz O 530 G	Diesel, 3-Achser	AC11	56.4
Basel	1	Mercedes-Benz O 530 G		ACMR8LN	56.7
Basel	1	Mercedes-Benz O 530 G		Beton	54.4
Basel	1	Mercedes-Benz O 530 G		Confalt	53.1
Zürich	1.1l	Mercedes-Benz O 530 G		AC MR	55.3
Zürich	1.1r	Mercedes-Benz O 530 G		AC MR	52.1
Zürich	1.2l	MAN A40 Lions City		AC MR	52.1
Zürich	1.2r	MAN A40 Lions City		AC MR	51.1
Zürich	1.4l	Neoplan Centroliner		AC MR	52.8
Zürich	1.4r	Neoplan Centroliner		AC MR	52.3
Basel	2	Citaro Gelenkbus CNG	Gas	AC11	57.5
Basel	2	Citaro Gelenkbus CNG		ACMR8LN	55.7
Basel	2	Citaro Gelenkbus CNG		Confalt	54.0
Basel	2	Citaro Gelenkbus CNG		Beton	57.2
Luzern	2	Volvo 7900H	Hybrid	SDA 8	46.0
Luzern	2	Volvo 7900H		AC 11	47.1
Zürich	2.4l	Volvo 7900 LAH		AC MR	49.0
Zürich	2.4r	Volvo 7900 LAH		AC MR	49.9
Luzern	3	HESS Gelenktrolley	Trolley, 3-A.	SDA 8	47.0
Luzern	3	HESS Gelenktrolley		AC 11	47.8
Zürich	2.2l	HESS Swisstrolley 3		AC MR	49.4
Zürich	2.2r	HESS Swisstrolley 3		AC MR	49.7
Luzern	4	HESS RBUS	Trolley, 4-Achser	SDA 8	48.4
Luzern	4	HESS RBUS		AC 11	49.1
Zürich	2.1l	HESS lighTram 3 Longo		AC MR	48.6
Zürich	2.1r	HESS lighTram 3 Longo		AC MR	49.5
Zürich	2.3l	HESS lighTram 3 Longo 2		AC MR	47.3
Zürich	2.3r	HESS lighTram 3 Longo 2		AC MR	48.9

Tab. 5: Übersicht der korrigierten Quellenwerte der gemessenen simulierten Haltestelle, alle Angaben in dB(A)

5.2 Spektrale Betrachtung der Busdurchfahrten

Für die spektrale Betrachtung der gemessenen Durchfahrten wurde jeweils das energetische Mittel LE_m der gemessenen Schalldruckpegel im Terzband verwendet. Die Auswertungen dieser Daten zeigen folgende Erkenntnisse:

Belag

Der gleiche Bus hat auf unterschiedlichen Belägen ein sehr ähnliches Spektral-Bild. Dies trifft bei allen gemessenen Bussen zu und wird am Beispiel des Luzerner Standardbusses Mercedes-Benz Citaro aufgezeigt.

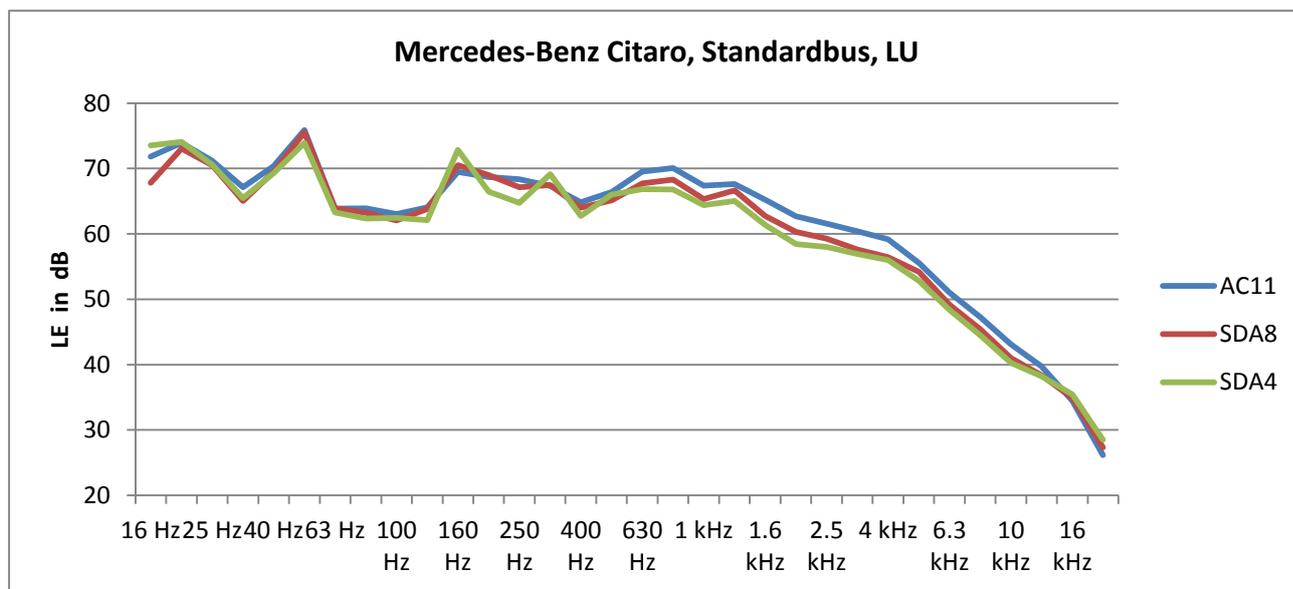


Abb. 2: Frequenzspektren unterschiedlicher Beläge des Luzerner Standardbusses mit Dieselantrieb, Schalldruckpegel in dB

Links / rechts

Die Messungen sowohl auf der linken wie auf der rechten Seite des Busse aus Zürich zeigen, dass das Spektrum auf beiden Seiten ähnlich gemessen wurde. In Abb. 3 zeigt der HESS lighTram 3 Longo 2 beispielhaft, wie das Frequenzspektrum der Messungen links oder rechts vom Bus einen ähnlich Pegelverlauf aufweist, jedoch auch Unterschiede von 0–3 dB.

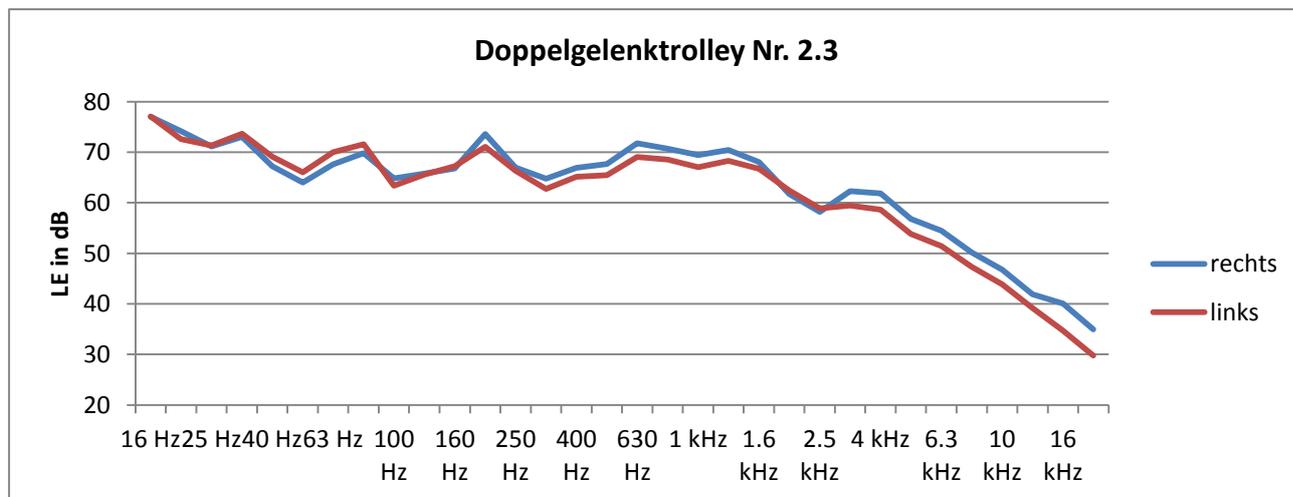


Abb. 3: Frequenzspektren links und rechts des Züricher Doppelgelenktrolleys Nr. 2.3, Schalldruckpegel in dB

Bustyp

Das energetische Mittel der Schalldruckpegel im Frequenzspektrum aller der jeweiligen Kategorie eingeteilter Busse wurde ohne Berücksichtigung des Belags vorgenommen. Der Frequenzverlauf der 6 unterschiedlichen Kategorien bei Tempo 30 und 50 zeigt auf, dass die Frequenzverläufe ausser beim Gelenkbus im für das menschliche Ohr relevanten Bereich (400 Hz bis 4'000 Hz) relativ ähnlich verlaufen. Der sichtbar hohe Schalldruckpegel nur bei 50 Hz ist ausschliesslich auf den Basler Gelenkbus zurückzuführen, welcher auf allen 4 gemessenen Belägen bei 50 Hz Schalldruckpegel von 92 bis 103 dB aufweist.

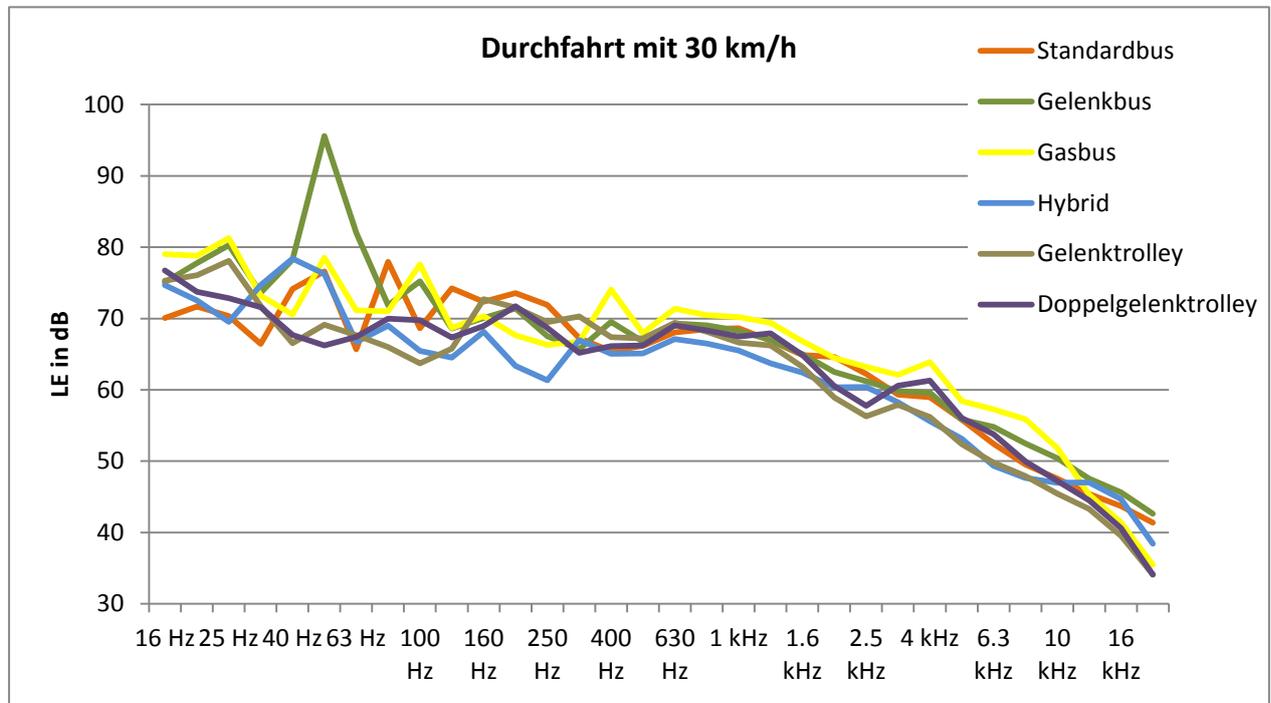


Abb. 4: Frequenzspektren der verschiedenen Kategorien bei einer Durchfahrt mit 30 km/h (ohne Belagsberücksichtigung)

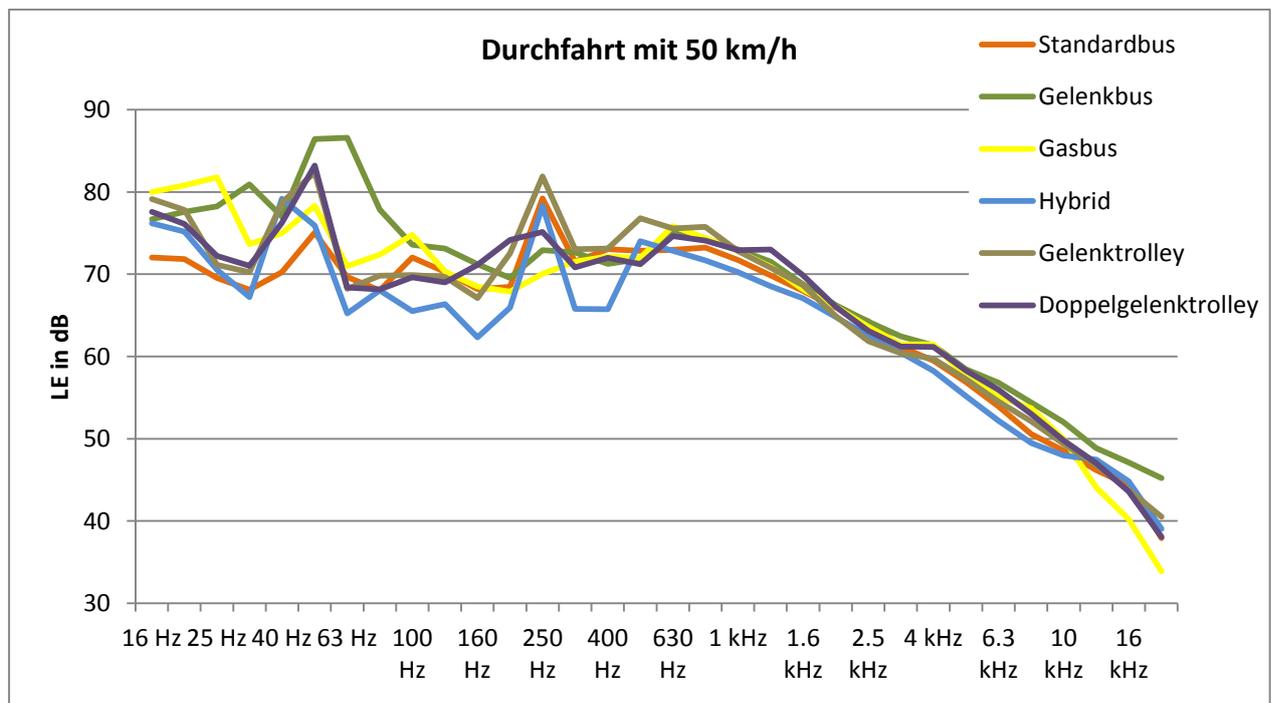


Abb. 5: Frequenzspektren der verschiedenen Kategorien bei einer Durchfahrt mit 50 km/h (ohne Belagsberücksichtigung)

Antriebsart

Das energetische Mittel der Schalldruckpegel im Frequenzspektrum aller der entsprechenden Antriebsart zugeordneten Busse wurde ohne Berücksichtigung des Belags vorgenommen. Auch hier ist im für das menschliche Ohr relevanten Bereich ein gewisser typischer Verlauf pro Antriebsart feststellbar.

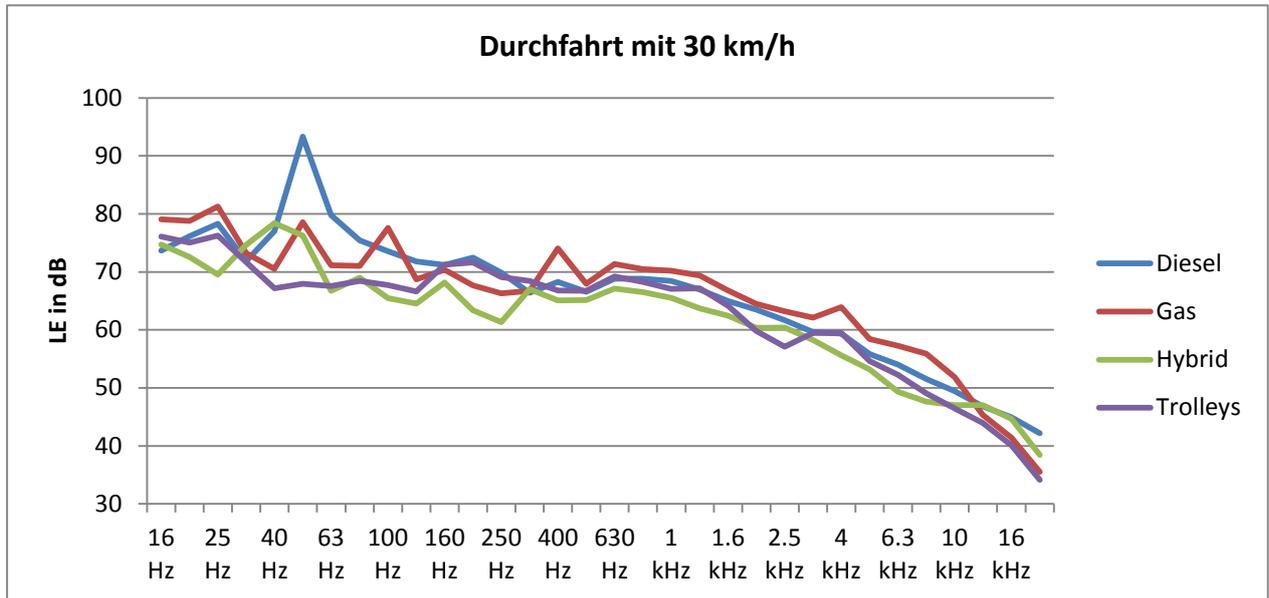


Abb. 6: Frequenzspektrum nach Antriebsart bei 30 km/h (ohne Belagsberücksichtigung)

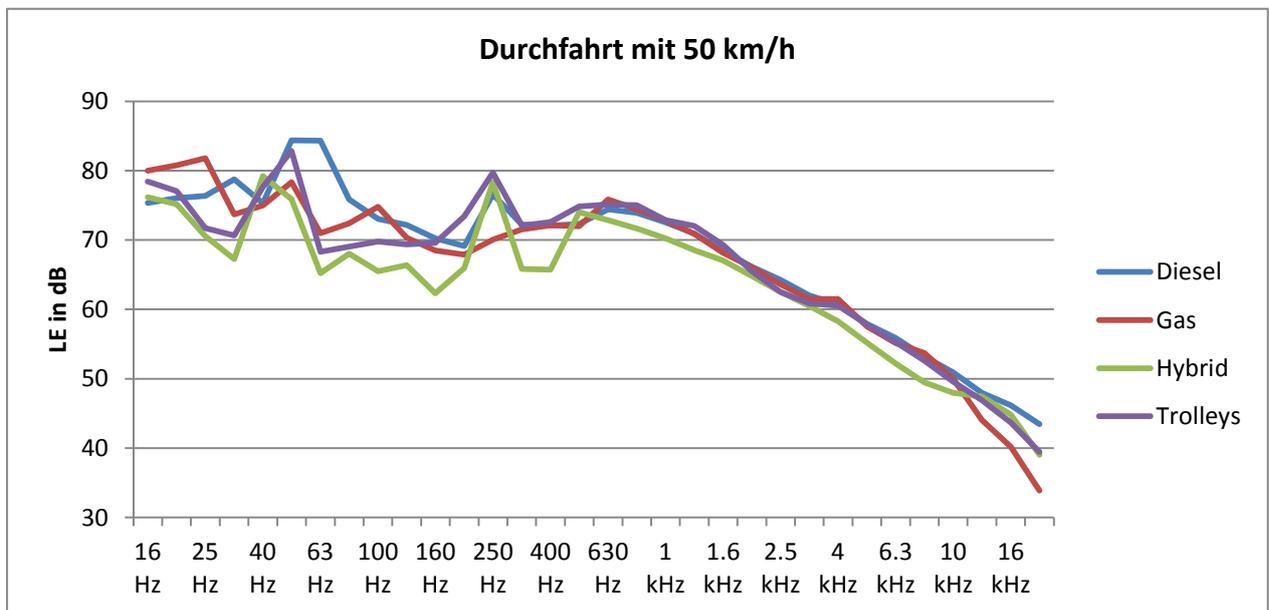


Abb. 7: Frequenzspektrum nach Antriebsart bei 50 km/h (ohne Belagsberücksichtigung)

Besonderheiten Spektrum RBUS im Vergleich zu den anderen gemessenen Doppelgelenktrolleys

Der HESS RBUS weist einen etwas flacheren Frequenzverlauf auf als die anderen Doppelgelenktrolleys, wie dies in der folgenden beiden Abb. ersichtlich ist.

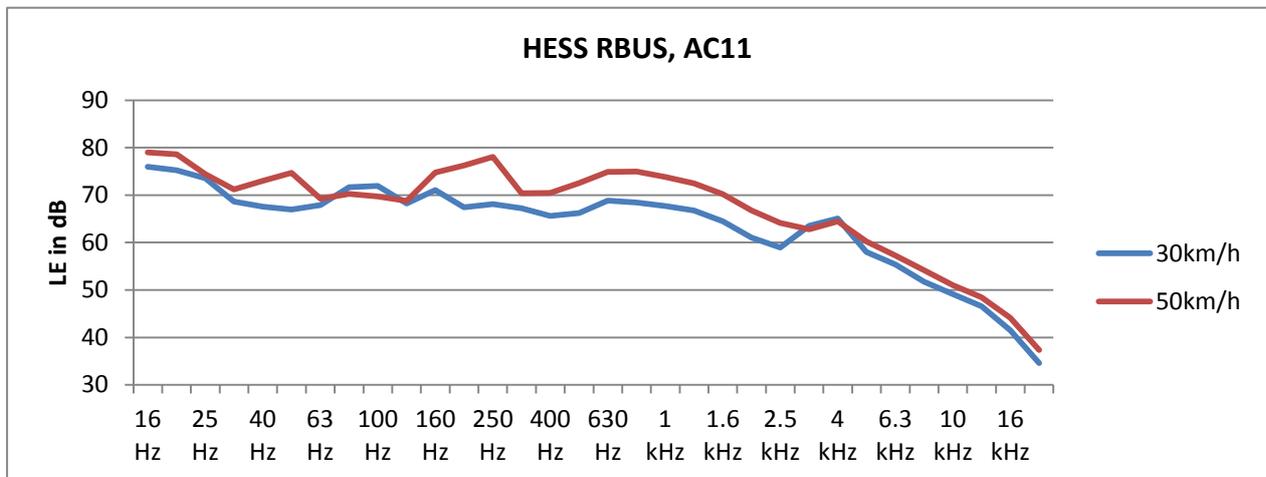


Abb. 8: Frequenzspektrum des Luzerner HESS RBUS

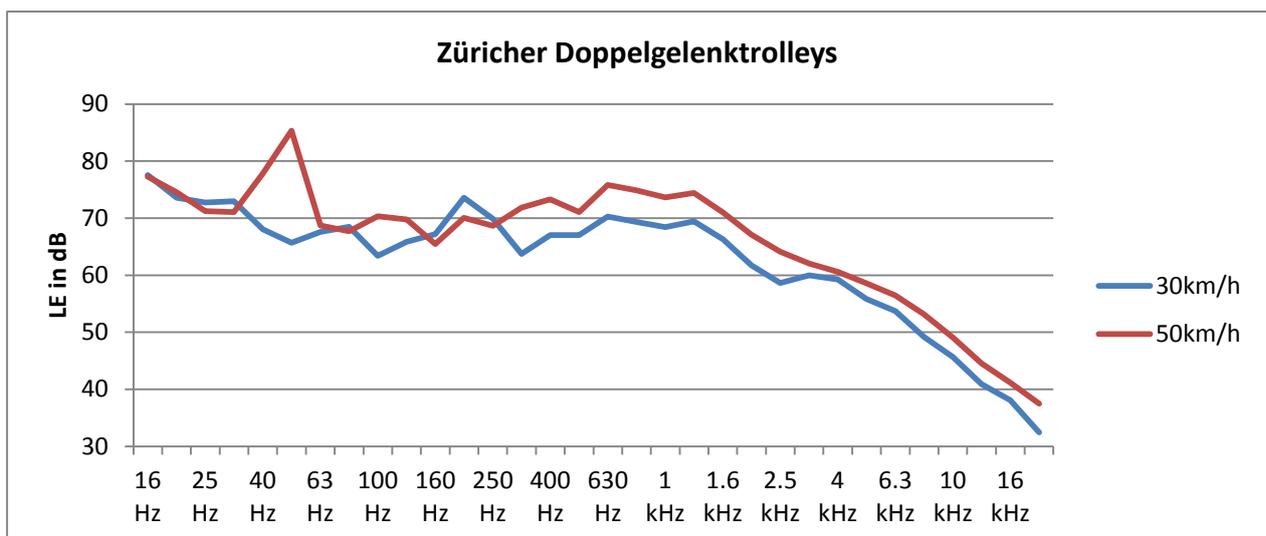


Abb. 9: Frequenzspektrum der Züricher Doppelgelenktrolleys

Kommentar

Basierend auf der spektralen Auswertung der Messungen resultieren folgende wesentliche Ergebnisse:

- Auffallend ist das Maximum im tieffrequenten Bereich bei 40–60 Hz bei den Trolleybussen (braun und violett in Abb. 5) bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h, welches bei Tempo 30 inexistent ist (Abb. 4). Bei den Dieselbussen sowie den anderen ist dieses Verhalten nicht sichtbar.
- Im akustischen und für das menschliche Ohr relevanten Bereich (400 Hz bis 4'000 Hz) ist der spektrale Verlauf bei unterschiedlichen Tempi sowie unterschiedlichen Belagstypen ähnlich.
- Das Frequenzspektrum ist „Bus abhängig“ und hängt nicht mit dem Belag zusammen.

5.3 Einfluss Belag

5.3.1 Ausgangslage

Im Rahmen der Messkampagne in Luzern wurden 3 in der Schweiz häufig verwendete Belagstypen (siehe hierzu auch Erläuterungen in Kap. 4.4) befahren:

- AC 11
- SDA 8
- SDA 4

5.3.2 Messergebnisse

Die Resultate (Quellenwert; eine Busdurchfahrt pro Stunde in 1 m Abstand) pro Kategorie sind in der nachfolgenden Tabelle und den Diagrammen dargestellt. Diese zeigen die nicht korrigierten Quellenwerte, d.h. der Belagskennwert (kB) des jeweiligen Asphaltbelags wurde nicht berücksichtigt. Dadurch ist der Einfluss des Belags erkennbar.

Belagstyp	Diesel 2-Achser (Citaro C2)		Hybrid (Volvo 7900 H)		Trolley 3-Achser (Gelenktrolley HESS)		Trolley 4-Achser (RBUS) (Gelenktrolley HESS)	
	30 km/h	50 km/h	30 km/h	50 km/h	30 km/h	50 km/h	30 km/h	50 km/h
AC 11	49.7	54.4	48	53.3	48.8	55.7	49.6	54.9
SDA 8	48	53.2	45.9	51.5	46.3	53.8	46.8	52.4
SDA 4	47.1	52.7	44.8	51.1	45.5	53.8	45.2	50.6

Tab. 6: Übersicht der nicht korrigierten Quellenwerte in dB(A)

5.3.3 Schallabstrahlung und Quellenwerte (in Abhängigkeit von Belag und Geschwindigkeit)

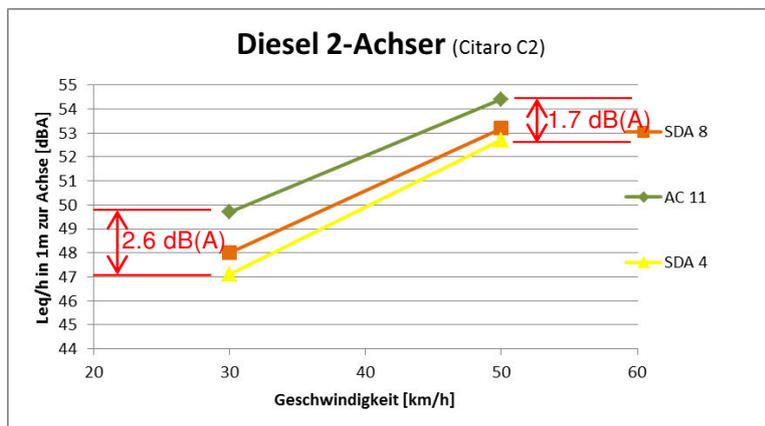


Abb. 10: Quellenwert (L_q) Diesel 2-Achser

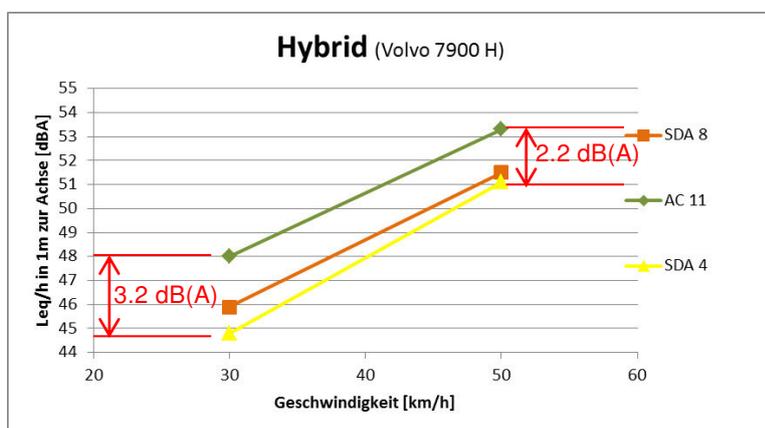


Abb. 11: Quellenwert (L_q) Hybrid

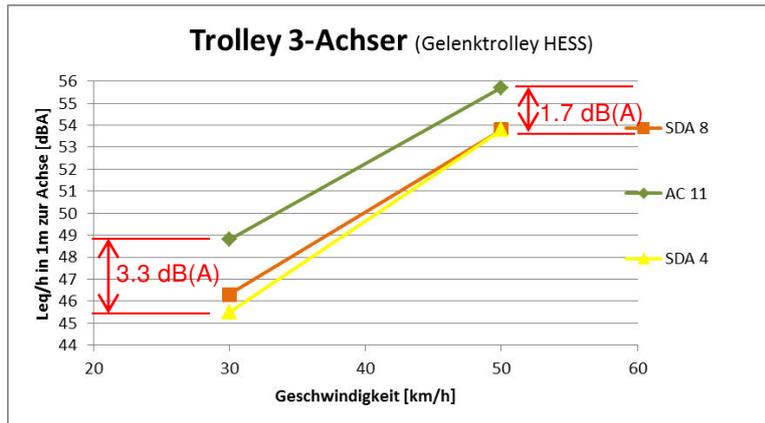


Abb. 12: Quellenwert (Lqr) Trolley 3-Achser

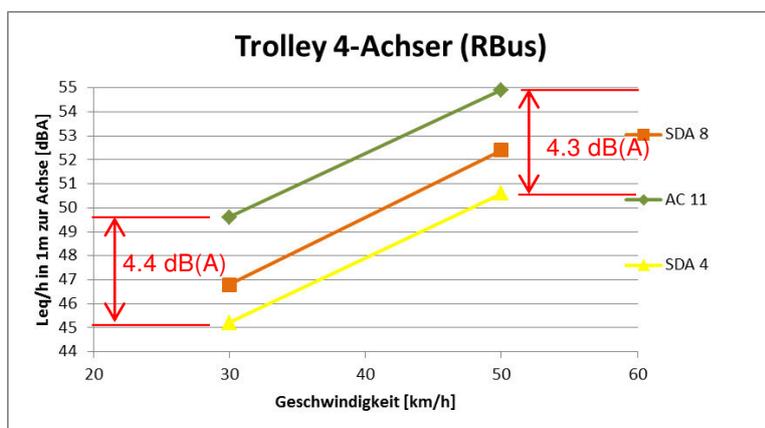


Abb. 13: Quellenwert (Lqr) Trolley 4-Achser

Folgende **Erkenntnisse** können festgehalten werden:

- Die Pegeldifferenzen bei Tempo 30 zwischen einem „normalen“ Belag (Typ AC 11) und einem lärmarmen Belag (Typ SDA 4) betragen zwischen 3–4 dB(A).
- Die Pegeldifferenzen zwischen einem „normalen“ Belag (Typ AC 11) und einem lärmarmen Belag (Typ SDA 8) sind bei Tempo 30 und Tempo 50 in etwa gleich.
- Bei Tempo 30 sind i.d.R. die Pegeldifferenzen zwischen einem „normalen“ Belag (Typ AC 11) und einem lärmarmen Belag (SDA 4) um ca. 1 dB(A) höher als bei Tempo 50.
- Beim sog. RBus ist kein signifikanter Unterschied bez. Belagswirkung zwischen Tempo 30 und Tempo 50 feststellbar.

Kommentar

Lärmarme Beläge zeigen auch bei Bussen eine lärmmindernde Wirkung sowohl bei Tempo 50 als auch bei Tempo 30. Somit sind sowohl Tempo 30 als auch lärmarme Beläge auch bei vom öffentlichen Verkehr stark befahrenen Strassen eine effektive Lärmsanierung an der Quelle.

6 Auswertung der Messergebnisse

6.1 Boxplot

Die Verteilung der korrigierten Quellenwerte L_{eqh} wird mithilfe von Boxplots diskutiert, welche die Unterschiede der verschiedenen Geschwindigkeitsregimes innerhalb einer Kategorie aufzeigen.

6.1.1 Definition

Der Boxplot (auch Box-Whisker-Plot oder Kastengrafik) wird zur graphischen Darstellung einer Verteilung von Daten eingesetzt. Die Werte werden in einer sog. 5-Punkte-Zusammenfassung dargestellt:

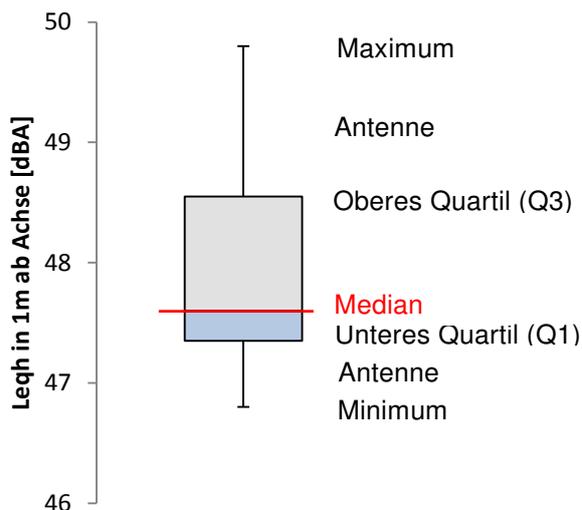


Abb. 14: Definitionen Boxplot

Ein Boxplot besteht aus einem Rechteck (Box) und 2 Linien als Verlängerung zu diesem Rechteck (Antennen oder auch Whisker genannt). Die Box entspricht dem Bereich, in dem 50 % der Daten liegen (Interquartilsabstand IQR) und wird somit durch das obere und das untere Quartil begrenzt. Der Median teilt das gesamte Diagramm in zwei Hälften in denen jeweils 50 % der Daten liegen. Mit Hilfe der Antennen werden die ausserhalb der Box liegenden Werte dargestellt. Im Gegensatz zur Definition der Box ist die Definition der Antennen nicht einheitlich. Bei der einen Variante wird die Länge auf das max. 1.5 fache des IQR (nach John W. Turkey) beschränkt. Oder es ist auch möglich, dass die Antennen bis zum grössten bzw. kleinsten Wert aus den Daten reichen (vgl. Boxplot, Wikipedia).

Bemerkung: Bei den nachfolgenden Boxplots ist die Länge der Antennen nicht beschränkt, d.h. sie reichen bis zum grössten bzw. kleinsten Wert.

6.1.2 Boxplots je Kategorie

Die Boxplots wurden mit dem korrigierten Quellenwert erstellt, um innerhalb einer Kategorie vergleichbare Werte zu haben. Unter der Grafik angegeben sind orientierungshalber das energetische Mittel L_m des korrigierten Quellenwertes sowie die entsprechende Standardabweichung s aufgeführt. Zudem ist jeweils die Anzahl der Messungen als Anz. M. angegeben.

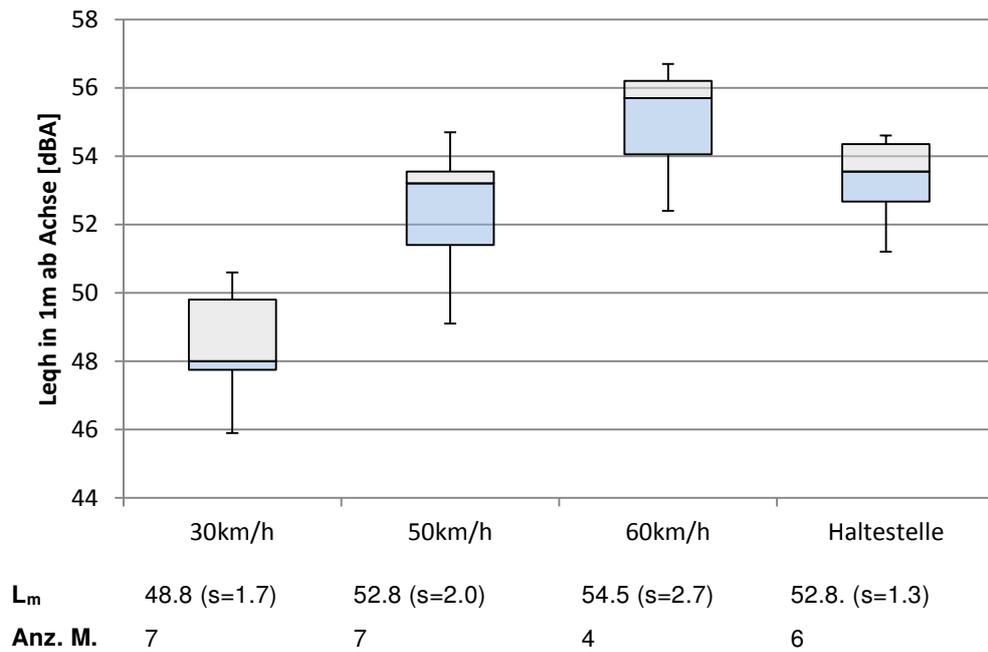


Abb. 15: Boxplots Kategorie Diesel, 2-Achser, Standardbus

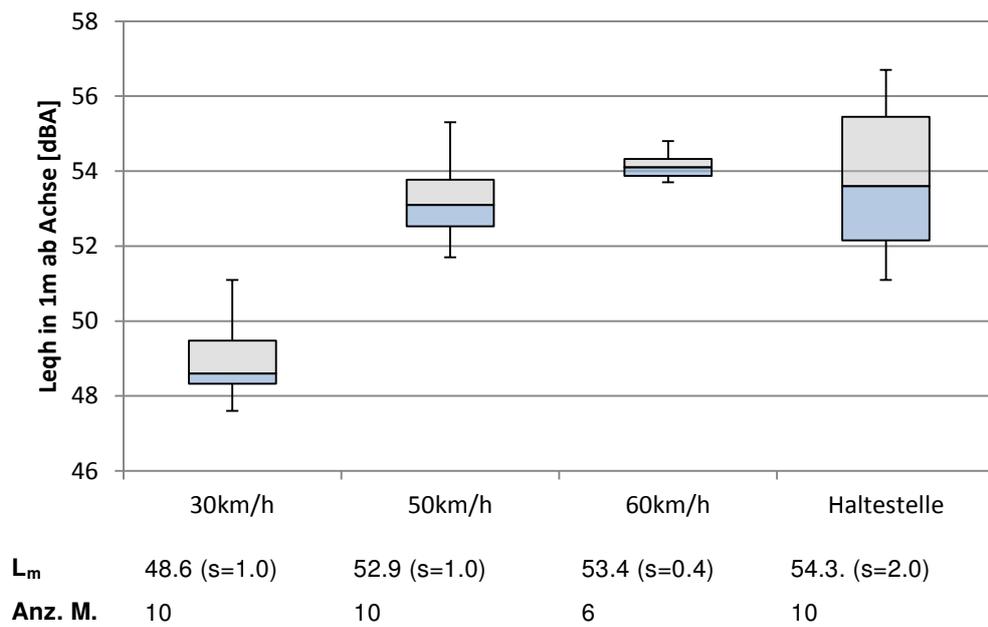


Abb. 16: Boxplots Kategorie Diesel, 3-Achser, Gelenkbus

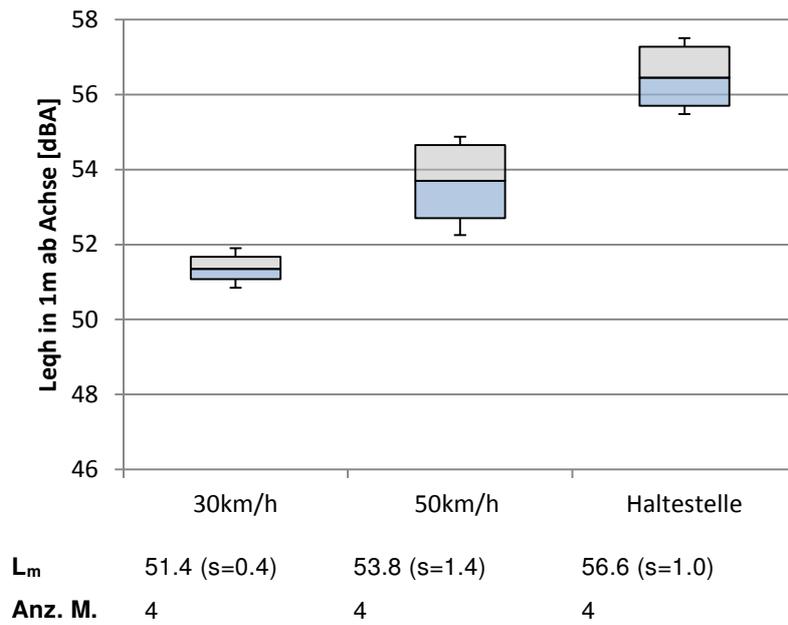


Abb. 17: Boxplots Kategorie Gasbus

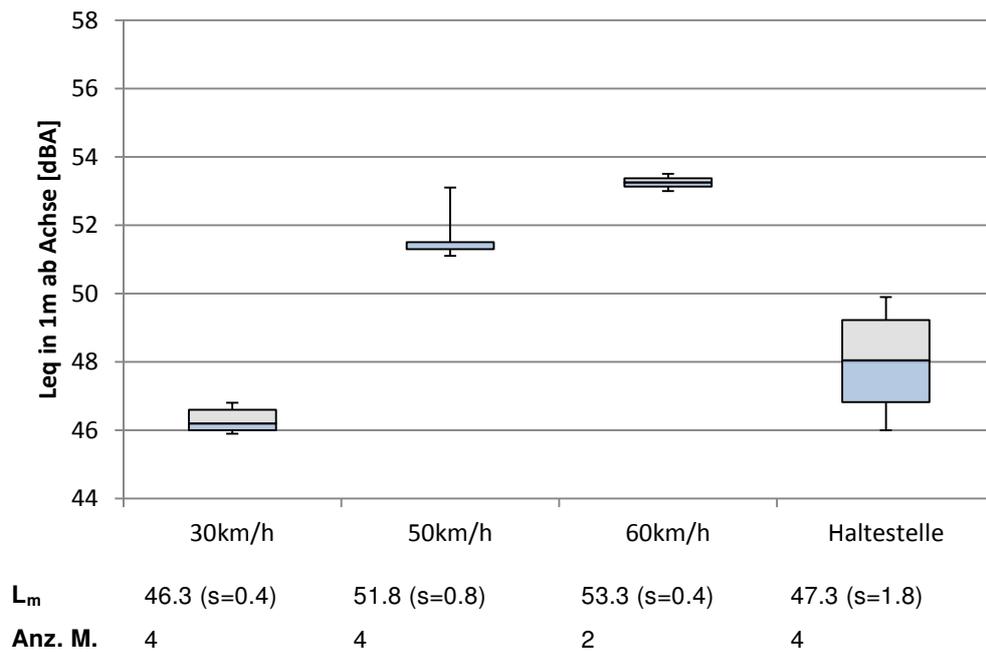


Abb. 18: Boxplots Kategorie Hybrid

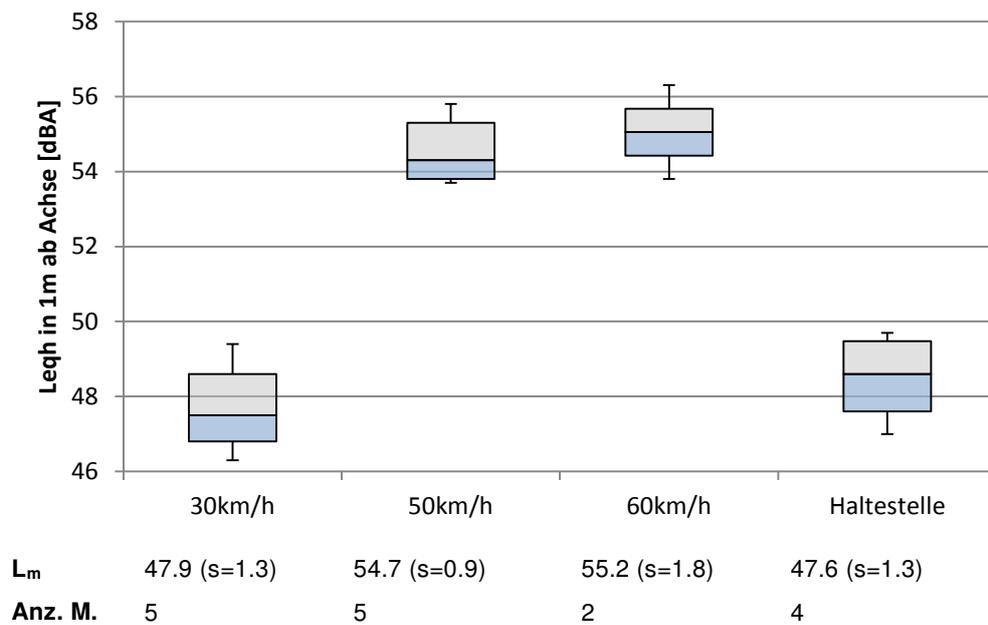


Abb. 19: Boxplots Kategorie Trolley, 3-Achser, Gelenktrolleybus

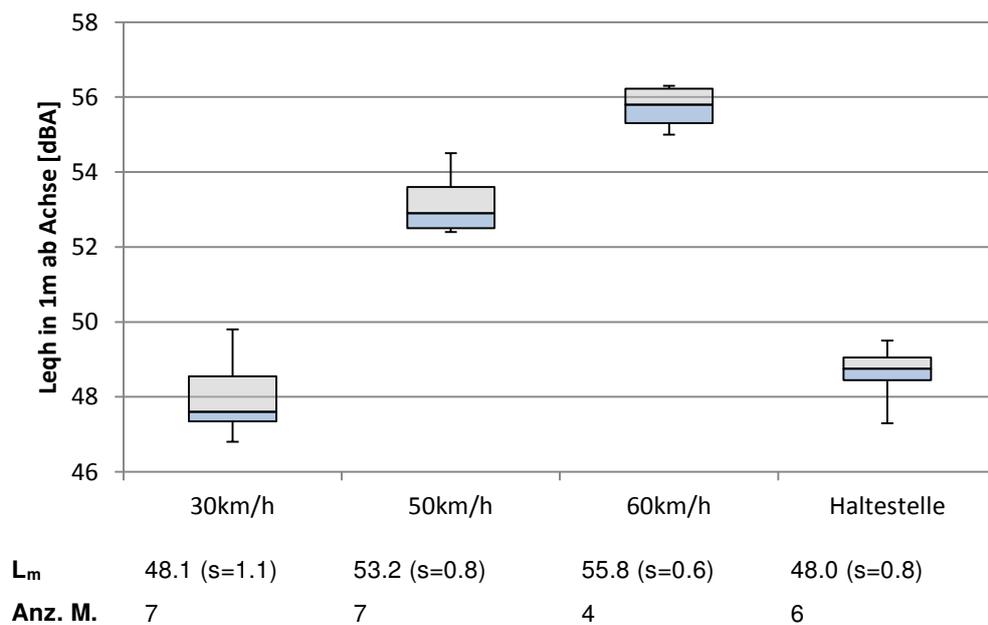


Abb. 20: Boxplots Kategorie Trolley, 4-Achser, Doppelgelenktrolleybus

Kommentar

- Die Grösse der Box ist in der Regel etwas weniger als 2 dB(A) und korreliert mit der Standardabweichung: Je grösser die Standardabweichung desto grösser die Box.
- Bei den Messungen der Haltestellen fällt die Box i. d. R. grösser aus, das heisst die Variabilität der gemessenen Pegel ist deutlich grösser.
- Beim Hybrid fällt auf, dass die Messungen sehr einheitlich sind und die Box daher extrem klein ist.

6.2 Busdurchfahrten

6.2.1 Schalldruckpegel pro Kategorie

Pro Buskategorie wird das energetische Mittel aller gemessenen Durchfahrten, welche auf einen akustisch neutralen Belag normalisiert wurden, in der Grafik in Abb. 21 und in Tab. 7 dargestellt. Die Standardabweichung, welche in Tab. 7 angegeben wurde, ist im Anhang 2 detailliert beschrieben. Die 6 Buskategorien weisen unterschiedliche Emissionswerte aus. Die zwei Kategorien mit dieselbetriebenen Bussen sowie die beiden elektrisch betriebenen Trolleybusse weisen ähnliche Werte aus. Die Antriebsart des Motors ist in dem Fall bei den Emissionswerten bestimmend. Der RBUS, mit eingehausten Rädern, ist bei Tempo 30 rund 1 dB(A) leiser als die anderen Doppelgelenktrolleys, daher wurde das energetische Mittel in Tab. 7 separat dargestellt.

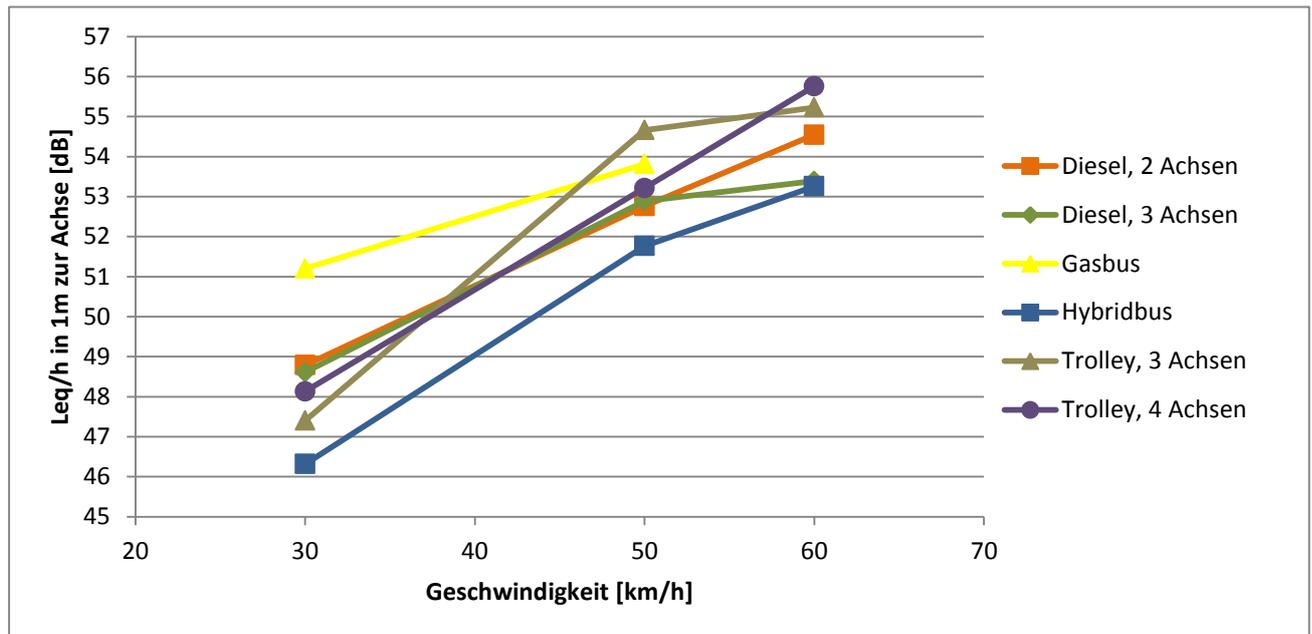


Abb. 21: Schalldruckpegel in Abhängigkeit der Geschwindigkeit pro Kategorie

Kategorie	Energetisches Mittel 30 km/h	Energetisches Mittel 50 km/h	Energetisches Mittel 60 km/h*	Unterschied 30/50 km/h
Diesel, Standardbus	48.8 (1.7)	52.8 (2.0)	54.5 (2.7)	4
Diesel, Gelenkbus	48.6 (1.0)	52.9 (1.0)	53.4 (0.4)	4.3
Gasbus	51.2 (0.7)	53.8 (1.4)	-	2.6
Hybridbus	46.3 (0.4)	51.8 (0.8)	53.3 (0.4)	5.5
Gelenktrolley	47.9 (1.3)	54.7 (0.9)	55.2 (1.8)	6.8
Doppelgelenktrolley	48.1 (1.1)	53.2 (0.8)	55.8 (0.6)	5.1
nur RBUS	47.2 (0.4)	52.6 (0.3)	-	5.4

* nur Messungen aus Zürich, siehe auch Tab. 8

Tab. 7: Energetisches Mittel der Leq_h in 1 m ab Achse pro Buskategorie bei allen Geschwindigkeitsregimes, in Klammern Standardabweichung, sowie der Unterschied 30 /50 km/h, alle Werte in dB(A)

Da nur in Zürich Messungen bei Tempo 60 durchgeführt wurden, werden die energetischen Mittel der in Zürich gemessenen Busse pro Kategorie in Tab. 8 dargestellt. Der Unterschied Tempo 50/60 dient dazu, die Emissionswerte der Buskategorien zu definieren. Bei der Kategorie Trolley, Gelenkbus wird für den Unterschied Tempo 50/60 von 1 dB(A) ausgegangen, da es sich bei der Messung um einen einzigen Bus handelt und daher auf die Messungen der Kategorie Trolley, Doppelgelenkbus zurückgegriffen wird.

Kategorie	Energetisches Mittel (Stabw) 30 km/h	Energetisches Mittel (Stabw) 50 km/h	Energetisches Mittel (Stabw) 60 km/h	Unterschied 50/60 km/h
Nur Zürcher Busse				
Diesel, Standardbus	49.1 (2.3)	52.1 (2.3)	54.5 (2.7)	2.4
Diesel, Gelenkbus	48.4 (1.3)	52.2 (0.7)	53.4 (0.4)	1.2
Hybridbus*	46.4 (0.3)	51.3 (0.3)	53.3 (0.4)	2
Gelenktrolley*	49.0 (0.6)	54.8 (0.7)	55.2 (1.8)	(0.4) 1
Doppelgelenktrolley	48.7 (1.1)	53.6 (0.9)	55.8 (0.6)	2.2

* Ein Fahrzeug, zwei Messwerte: jeweils eine Messung links und rechts

Tab. 8: Energetisches Mittel der Leq_h in 1 m ab Achse pro Buskategorie bei allen Geschwindigkeitsregimes, in Klammern Standardabweichung, sowie der Unterschied 50/60 km/h aller in Zürich gemessenen Busse, alle Werte in dB(A)

Folgende Erkenntnisse können festgehalten werden:

- Der Hybridbus ist der leiseste von allen gemessenen Bustypen.
- Die Differenzen zwischen dem lautesten und leisesten Bus betragen bei T30 ca. 5 dB(A), bei T50 ca. 3 dB(A) und bei T60 ca. 2 dB(A).
- Je tiefer die Geschwindigkeit ist, desto grösser ist der Range zwischen den einzelnen Bustypen.
- Sämtliche Bustypen weisen im Vergleich T30 zu T50 eine grosse Pegeldifferenz zwischen 4–6 dB(A) auf (Ausnahme Gasbus mit ca. 3 dB(A))

Kommentar

Trolleybusse sind bei tiefen Geschwindigkeiten deutlich leiser, bei höheren lauter als Dieselbusse. Der Hybridbus ist der leiseste. Der Gasbus ist bei tiefen Geschwindigkeiten deutlich und bei höheren etwas lauter als der Dieselbus.

Der Unterschied Tempo 30/50 ist mit Ausnahme des Gasbusses 4–7 dB(A). Dies ist deutlich höher als die gängigen Berechnungsmodelle prognostizieren.

Die Studie von Pallas et al. [7] bestätigt, dass der Hybridbus signifikant tiefere Lärmemissionen (1–6 dB(A)) bei konstant tiefer Geschwindigkeit (< 25–30 km/h) gegenüber dem Dieselbus aufweist. Die Aussage der gleichen Studie, dass der elektrisch betriebene Bus nochmals 1–2 dB(A) leiser ist, kann mit vorliegender Untersuchung nicht bestätigt werden. Die Ursache für die grossen Unterschiede der Emissionen liegt darin, dass bei steigender Geschwindigkeit das Rollgeräusch dominant wird und das leise Motorengeräusch eines Elektromotors übertönt wird und somit den „Leise-Bonus“ verliert (siehe auch [4]). Die Dominanz des Rollgeräusches erklärt ebenfalls die hohen Pegel bei den Trolleybussen bei 60 km/h; der 4-achsige Doppelgelenktrolley emittiert im Schnitt 0.6 dB(A) mehr als der 3-Achser Gelenktrolley.

Bei Geschwindigkeiten unter 25–30 km/h fährt der Hybridbus normalerweise mit Elektromotor. Die Zuschaltung des Dieselmotors erfolgt automatisch, je nach Ladezustand der Batterie und benötigter Motorleistung. Gemäss mündlicher Mitteilung von Ch. Zumsteg (Leiter Rollmaterial, vbl) erfolgten bei der Durchfahrt mit 30 km/h Messungen sowohl mit reiner Elektromotorleistung wie auch beiden Motorantrieben. Bei Tempo 50 sind mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit beide Motoren im Einsatz.

6.2.2 Vergleich Messungen links und rechts vom Bus

In Zürich wurden bei sämtlichen Busdurchfahrten Messungen auf beiden Seiten des Busses durchgeführt. Das heisst, die Durchfahrt wurde sowohl in Fahrtrichtung rechts, wie das bei allen anderen Messungen der Fall ist, wie auch in Fahrtrichtung links gemessen. Ziel dieser Messungen war, allfällige systematische Unterschiede und Abweichungen festzustellen.

Die Tab. 9 zeigt, dass in der Regel die Messungen auf der rechten Seite einen höheren Pegel aufweisen (Zahl ist negativ).

				Leq/h 1 m ab Achse			Differenz links rechts		
				v = 30	v = 50	v = 60	v = 30	v = 50	v = 60
Diesel Standard	Zürich	1.3l	Mercedes-Benz Citaro	52.1	55	57.2	0.1	-0.1	-1
	Zürich	1.3r	Mercedes-Benz Citaro	52.0	55.1	58.2			
	Zürich	1.5l	MAN A35 Midibus	49.3	51.9	53.9	1.9	1.3	1.4
	Zürich	1.5r	MAN A35 Midibus	47.4	50.6	52.5			
Diesel Gelenkbus	Zürich	1.1l	Mercedes-Benz O 530 G	52.6	54.9	55.9	1.4	0.4	0.6
	Zürich	1.1r	Mercedes-Benz O 530 G	51.2	54.5	55.3			
	Zürich	1.2l	MAN A40 Lions City	49.1	54	55.6	-0.8	-1.4	-0.7
	Zürich	1.2r	MAN A40 Lions City	49.9	55.4	56.3			
	Zürich	1.4l	Neoplan Centroliner	49.8	53.6	55.2	-0.2	-0.5	-0.4
	Zürich	1.4r	Neoplan Centroliner	50.0	54.1	55.6			
Hybrid	Zürich	2.4l	Volvo 7900 LAH	47.7	52.6	54.5	-0.4	-0.4	-0.5
	Zürich	2.4r	Volvo 7900 LAH	48.1	53.0	55.0			
Gelenk-trolley	Zürich	2.2l	HESS Swisstrolley 3	50.1	55.8	57.8	-0.8	-1	-2.5
	Zürich	2.2r	HESS Swisstrolley 3	50.9	56.8	60.3			
Doppelgelenk-trolley	Zürich	2.1l	HESS lighTram 3 Longo	49.0	54.7	56.9	-1.8	-1.3	-0.8
	Zürich	2.1r	HESS lighTram 3 Longo	50.8	56.0	57.7			
	Zürich	2.3l	HESS lighTram 3 Longo 2	49.3	53.9	56.5	-2	-1.6	-1.3
	Zürich	2.3r	HESS lighTram 3 Longo 2	51.3	55.5	57.8			

Tab. 9: Übersicht aller Messungen in Zürich, nach Kategorie und mit der Differenz der Messungen links-rechts, Werte in dB(A)

Technische Erläuterungen

Dieselbus: Die Motoren sind querliegend im Heck eingebaut. In Fahrtrichtung links liegt der eigentliche Motorenblock mit Turbolader und Auspuff, in Fahrtrichtung rechts die Zu- und Abluftöffnungen.

Trolleybus: Die beiden Fahrmotoren sind bei Achse 2 und Achse 3 alternierend links / rechts angeordnet.

Hybrid: Anordnung des Dieselmotors analog Dieselbus.

Folgende **Erkenntnisse** können festgehalten werden:

- Beim dieselbetriebenen Standardbus Midibus (Nr. 1.5) und beim Gelenkbus Citaro (Nr. 1.1) sind die Messungen auf der linken Seite (Seite Motor) höher.
- Bei den Trolleybussen ist generell die in Fahrtrichtung rechte Seite (Seite Kühler) lauter und die Unterschiede variabel (zwischen 0.8 und 2.5 dB) auch bezüglich Geschwindigkeit.
- Der Hybridbus zeigt geringe (< 1 dB) Differenzen zwischen links und rechts.

Kommentar

Aufgrund der vorliegenden Messungen mit teilweise sehr grossen Unterschieden, kann keine eindeutige Tendenz bezüglich Emissionsunterschiede links bzw. rechts des Fahrzeuges festgestellt werden. Da die städtischen Verkehrsbusse in der Regel in beide Fahrrichtungen fahren und die Pegeldifferenzen (mit einer Ausnahme) $< 2 \text{ dB(A)}$ sind, kann gefolgert werden, dass der Emissionsunterschied links-rechts im Rahmen von Immissionsprognosen nicht relevant ist.

6.3 Steigung

6.3.1 Ausgangslage

Die Auswertungen zeigen, dass auf Steigungstrecken der Diesel- und der Hybridbus bei der Bergfahrt ca. 4 dB(A) und bei der Talfahrt ca. 2 dB(A) lauter sind im Vergleich zu einer Fahrt auf einer horizontalen Strecke.

Die beiden Trolleybusse (G-Trolley und RBUS) zeigen keine signifikanten Unterschiede zwischen Berg- und Talfahrt und sind im Vergleich zu einer Fahrt auf flacher Strecke gleich laut resp. sogar leiser (RBus)!

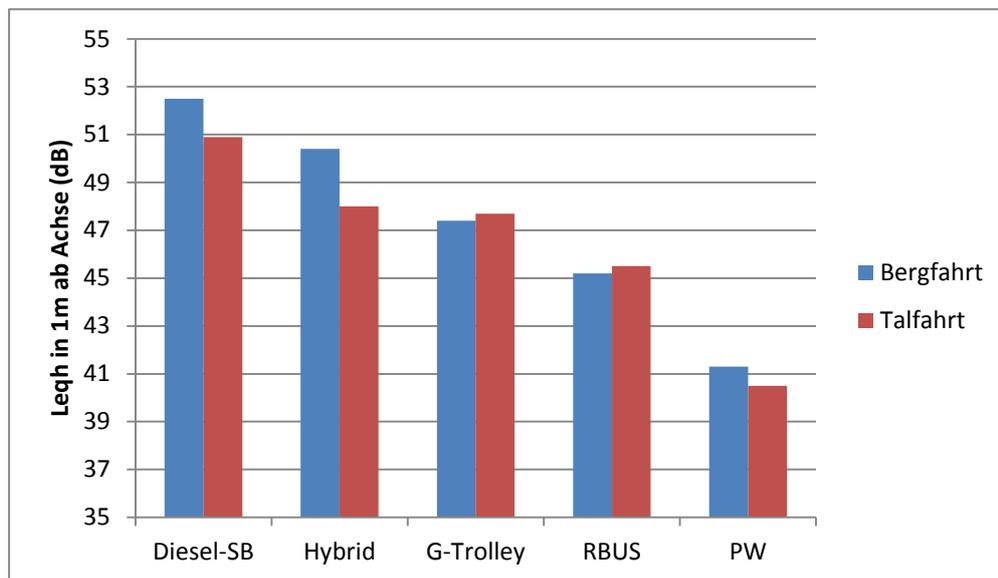


Abb. 22: Pegelunterschiede Berg- und Talfahrt der in Luzern gemessenen Busse

6.4 Simulierte Haltestelle

Die Emissionen (Quellenwerte) der simulierten Haltestelle werden mit den Quellenwerten der gemessenen Durchfahrten verglichen. Die Resultate sind in Tab. 10 aufgeführt.

Kategorie	Energetisches Mittel (Stabw)	Energetisches Mittel (Stabw)	Energetisches Mittel (Stabw)	Unterschied 30 km/h - Haltestelle	Unterschied 50 km/h - Haltestelle
	30 km/h	50 km/h	Haltestelle		
Diesel, Standardbus	48.8 (1.7)	52.8 (2.0)	53.5 (1.3)	-4.7	-0.7
Diesel, Gelenkbus	48.6 (1.0)	52.9 (1.0)	54.0 (2.0)	-5.4	-1.1
Gasbus	51.2 (0.7)	53.8 (1.4)	56.3 (1.6)	-5.1	-2.5
Hybridbus	46.3 (0.4)	51.8 (0.8)	48.3 (1.8)	-2	3.5
Gelenktrolley	47.9 (1.3)	54.7 (0.9)	48.6 (1.3)	-0.7	6.1
Doppelgelenktrolley	48.1 (1.1)	53.2 (0.8)	48.7 (0.8)	-0.6	4.5

Tab. 10: Vergleich Energetisches Mittel der Busdurchfahrten mit der simulierten Haltestelle. Alle Werte Leq_h in 1 m ab Achse, korrigiert auf einen akustisch neutralen Belag und in dB(A).

Erkenntnisse:

- Beim Diesel Standardbus emittiert eine simulierte Haltestelle knapp 1 dB(A) mehr als eine Durchfahrt 50 km/h, der Gelenkbus ist 1.1 dB(A) lauter als Tempo 50.
- Der Gasbus zeigt gemäss den Messungen bei der Haltestelle deutlich mehr (2.5 dB) Emissionen als eine Durchfahrt 50 km/h.
- Beim Hybridbus zeigt die Messung einer simulierten Haltestelle 2 dB(A) mehr als die Durchfahrt bei 30 km/h.
- Bei den Trolleybussen sind die Emissionen einer Haltestelle knapp 1 dB(A) höher als die Emissionen einer Durchfahrt 30 km/h.

6.4.1 Pegelverlauf des Haltevorganges

Der Haltevorgang zeichnet sich wie bereits in Kapitel 4.6 beschrieben, durch eine grosse Variabilität aus. In den Abb. 23 ff wird der Haltevorgang von je einem Bus der vier untersuchten Antriebsarten aufgezeigt.

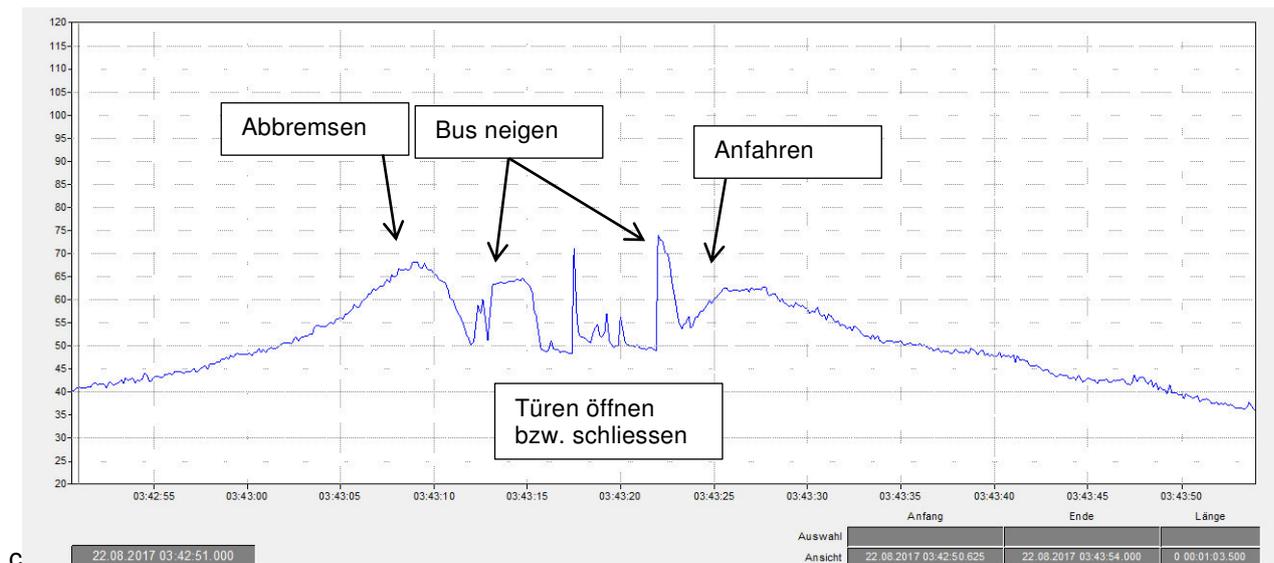


Abb. 23: Haltevorgang des Zürcher Bus Nr. 2.1, Doppelgelenktrolley, Kategorie Trolley

Der Haltevorgang ist wie in Abb. 23 beschrieben, anhand des Pegelverlaufes gut nachvollziehbar. Beim Trolleybus ist das Abbremsen deutlich lärmintensiver als das Anfahren. Beim Dieselbus, Hybridbus und Gasbus ist das Anfahren lauter (siehe folgende Abb.).

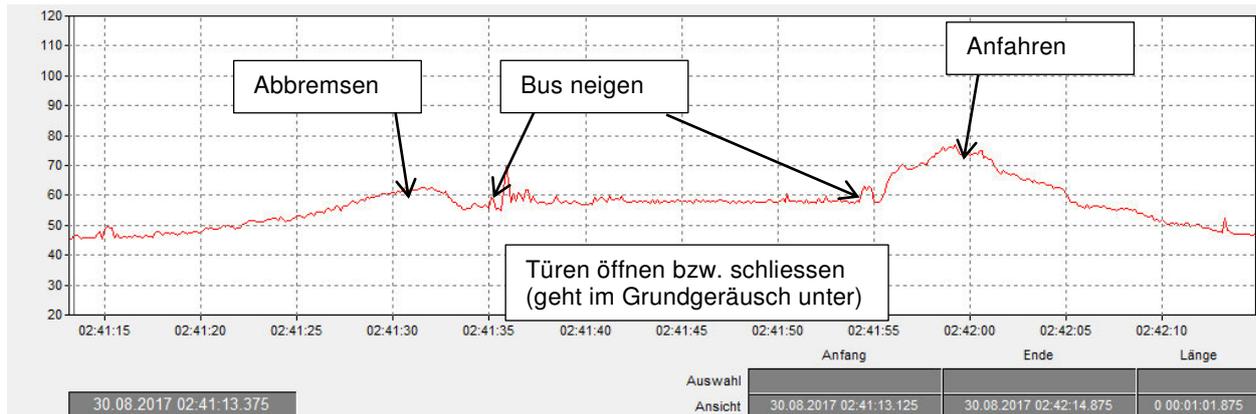


Abb. 24: Haltevorgang des Basler Gelenkbus, Kategorie Diesel

Beim Haltevorgang Diesel-Standardbus ist offensichtlich der Neigevorgang lauter als Bremsen und Anfahren. Das Türe Öffnen und Schliessen geht im Grundpegel unter und ist nicht sichtbar.

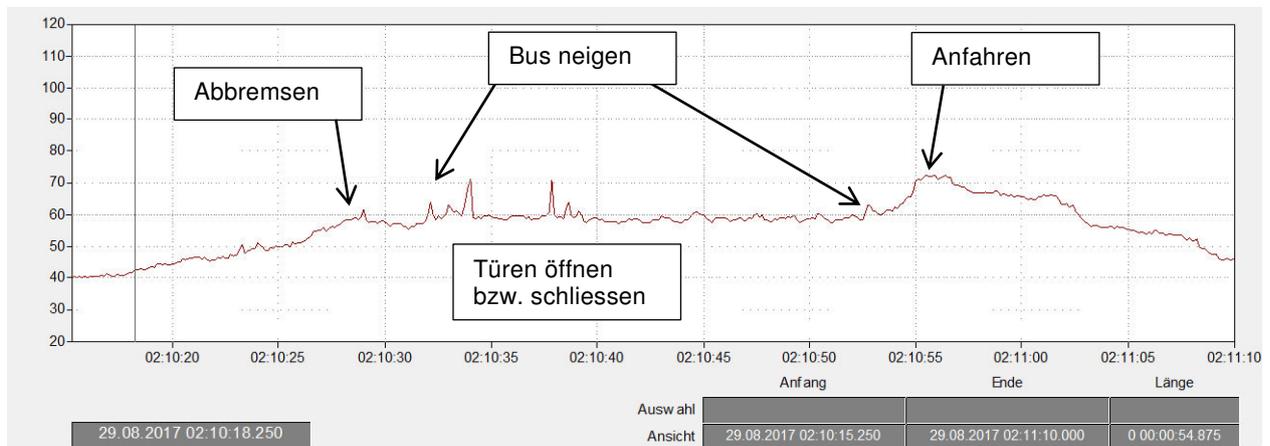


Abb. 25: Haltevorgang des Basler Bus Nr. 2, Gelenkbus, Kategorie Gas

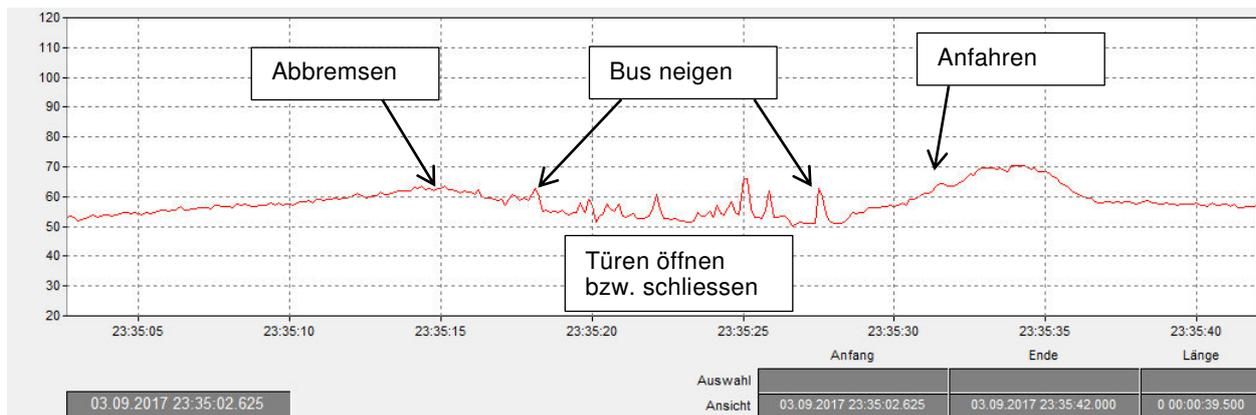


Abb. 26: Haltevorgang des Luzerner Bus Nr. 2, Hybridbus

Ähnlich wie beim Trolleybus sind beim Hybridbus die Vorgänge Neigen, Türen öffnen, schliessen, Neigen nicht sehr laut, hier überwiegt das Anfahrtsgeräusch. Dieses wird erst nach einer gewissen Zeitspanne deutlich lauter, nämlich dann, wenn der Dieselmotor zugeschaltet wird.

7 Schlussfolgerungen

7.1 Schallabstrahlung und Quellenwerte Busdurchfahrten

Zusammenfassend und aufgrund der Erkenntnisse aus vorliegender Untersuchung sind für jede Buskategorie und gemessene Geschwindigkeit die Quellenwerte in Tab. 11 als Emissionswerte angegeben. Die Emissionen der Durchfahrt 60 km/h basieren auf der Differenz Tempo 50/60 der Zürcher Busse (siehe Tab. 8).

Schalldruckpegel einer Busdurchfahrt pro Stunde in 1 m Abstand

Bustyp / -kategorie	Emission einer Durchfahrt Quellenwert Lqr (Leqh in 1 m ab Achse) in dB(A)		
	30 km/h	50 km/h	60 km/h
Diesel Standardbus (2 Achsen)	49	53	55
Gelenkbus (3 Achsen)	49	53	54
Gasbus	51	54	-
Hybridbus	46	52	53
Trolley Gelenktrolley (3 Achsen)	48	55	56
Doppelgelenktrolley (4 Achsen)*	48	53	56

* RBUS mit eingehausten Rädern: bei 30 km/h 47 dB(A) und bei 50 km/h 53 dB(A)

Tab. 11: Emissionen (Quellenwert) einer Durchfahrt pro Kategorie und Geschwindigkeit, Werte in dB(A)

7.2 Schallabstrahlung und Quellenwerte Busdurchfahrten in der Steigung

Zusammenfassend und aufgrund der Erkenntnisse aus vorliegender Untersuchung (Tab. 4) sind für jede Buskategorie die Quellenwerte der Steigung in Tab. 12 als Emissionswerte angegeben.

	Emission Flache Strecke 30 km/h	Emission Bergfahrt		Emission Talfahrt	
	Quellenwert Lqr (Leqh in 1 m ab Achse)	Quellenwert Lqr (Leqh in 1 m ab Achse)	Bemerkung	Quellenwert Lqr (Leqh in 1 m ab Achse)	Bemerkung
Diesel, Gelenkbus	49	53	+4 dB(A)	51	+ 2 dB(A)
Hybridbus	46	50	+4 dB(A)	48	+ 2 dB(A)
Gelenktrolley	48	48	+ 0 dB(A)	48	+ 0 dB(A)
RBus (Doppelgelenktrolley)	47	45	- 2 dB(A)	46	- 1 dB(A)

Tab. 12: Emissionen (Quellenwert) einer Durchfahrt 30 km/h bei flacher Strecke und Steigung pro Kategorie, Werte in dB(A)

7.3 Schallabstrahlung und Quellenwerte Busdurchfahrten bei Haltestellen

In der Praxis werden i.d.R. Haltestellen nicht berücksichtigt, sondern der (Gesamt-) Verkehr als durchgehende Linienquelle modelliert. Werden die Emissionen gemäss vorliegender Studie für MIV und öV getrennt ermittelt, kann im Bereich der Haltestellen anstelle des definierten Quellenwerts ein äquivalenter Quellenwert für die Haltestelle eingesetzt werden. Die Länge des Bereiches ist abhängig von der signalisierten Geschwindigkeit sowie der Länge der Fahrzeuge.

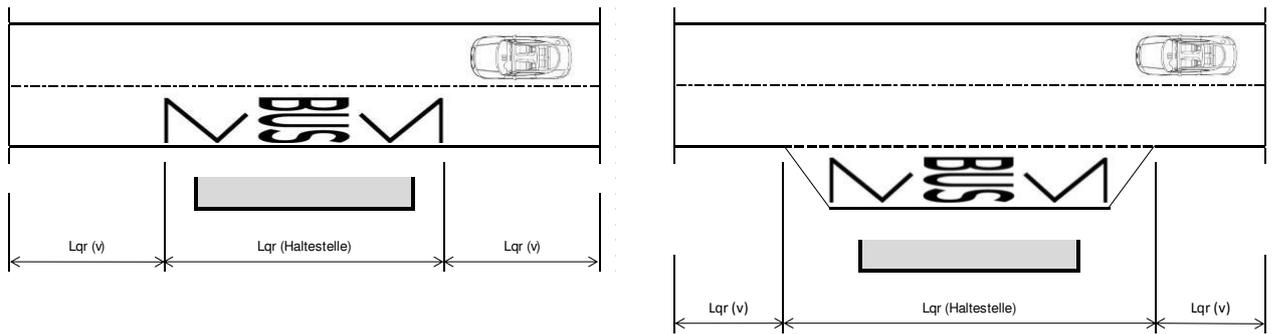


Abb. 27: Emissionsangaben im Bereich von Haltestellen

Zusammenfassend und aufgrund der Erkenntnisse aus vorliegender Untersuchung wird für jede Antriebsart (nicht Kategorie) ein Quellenwert angegeben, welcher von einer Haltestelle erwartet werden kann (Tab. 13). In der Spalte Bemerkung wird der Vergleich mit den Emissionen einer Durchfahrt angegeben.

Emission einer Haltestelle Quellenwert L_{qr} (L_{eqh} in 1 m ab Achse)		
	Quellenwert	Bemerkung
Dieselantrieb	54	Tempo 50 + 1
Gasantrieb	56	Tempo 50 + 2
Hybridantrieb	48	Tempo 30 + 2
Elektroantrieb (Trolley)	49	Tempo 30 + 1

Tab. 13: Emissionen (Quellenwert) einer Haltestelle pro Antriebsart, Werte in dB(A)

7.4 Vergleich mit bisher bekannten Werten

Gemäss Anhang 3, Ziffer 32, LSV wird der Motofahrzeugverkehr in folgende Kategorien eingeteilt:

- N1: Personenwagen, Lieferwagen, Kleinbusse, Motorfahräder und Trolleybusse
- N2: Lastwagen, Sattelschlepper, Gesellschaftswagen (Cars), Motorräder und Traktoren

Das StL-86+-Modell beinhaltet ebenfalls diese Kategorisierung. Die Erfahrungswerte der EMPA [2] hingegen stammen ausschliesslich von LKWs.

Das sonROAD18-Modell [4] unterscheidet 11 Fahrzeugkategorien (Swisscat10 mit Erweiterung, siehe Anhang 4) und hat bereits für Trolley- oder Hybridbusse eine eigene Unterkategorie gebildet. Zu dieser Unterkategorie fehlen zurzeit noch die Datengrundlagen. In Tab. 14 sind die Emissionswerte der Kategorien LKW sowie Bus enthalten.

Quelle	Einheit	30 km/h	50 km/h	Bemerkung
StL-86+	Lqr	43.8	46.0	Emissionswerte der Kategorie N1
StL-86+	Lqr	56.2	57.6	Emissionswerte der Kategorie N2 (Schwerverkehr)
EMPA Erfahrungswerte	Lqr	51.2	55.2	Emissionswerte von Lastwagen
SonRoad18	Lqr	54.0	55.8	Kategorie 8, LKW auf AC11*
SonRoad18	Lqr	50.3	51.8	Kategorie 1, Bus auf AC11*
SonRoad18	Lqr	53.0	54.9	Kategorie 1, Bus auf AC11*, Gefälle 8 %
SonRoad18	Lqr	51.7	53.7	Kategorie 1, Bus auf AC11*, Gefälle -8 %
<i>Vorliegende Studie</i>	<i>Lqr</i>	<i>48.7</i>	<i>53.3</i>	<i>Energetisches Mittel über alle Kategorien</i>

* AC11 stellt gemäss K. Heutschi (mündl. Mitteilung) einen Standardbelag dar und kann mit einem akustisch neutralen Belag verglichen werden.

Tab. 14: Quellenwerte von Lastwagen und Bussen aus unterschiedlichen Literaturangaben, Werte in dB(A)

Kommentar

Die bisher bekannten Werte aus den diversen Quellen werden mit dem energetischen Mittel der korrigierten Quellwerte verglichen. Folgende Erkenntnisse können festgehalten werden:

- Die Emissionen von Bussen sind deutlich leiser im Vergleich zu Emissionen von LKWs.
- Im Vergleich zur Kategorie N2 gemäss StL-86+ sind Busse deutlich leiser.
- Im Vergleich zur Kategorie N1 gemäss StL-86+ sind Busse deutlich lauter.
- Die beste Übereinstimmung mit den Messungen zeigt der Emissionsansatz gemäss sonROAD18 (Kategorie 1, Busse).

Fazit

Die Angaben für Busse im sonROAD18, Kategorie 1 stimmen im Schnitt einigermaßen überein mit den Messwerten. Bei Tempo 30 sind die Messungen rund 1.5 dB(A) tiefer, bei Tempo 50 1.5 dB(A) höher als die Angaben aus sonROAD18.

Die Emissionswerte für Steigungen stimmen mit den Messungen des Diesel-Standardbusses überein, der Hybrid ist 2–3 dB(A) leiser.

Die Trolleybusse zeigen bei den Messungen ein deutlich anders Emissionsverhalten (siehe Kap. 6.2.1) und sind nicht vergleichbar mit den Werten des sonROAD18. Vorliegende Messungen bestätigen die Notwendigkeit, eine Unterkategorie für elektro- und hybridbetriebene Busse zu realisieren. Es wird empfohlen, eine Trennung dieser beiden Antriebsarten auch bei Bussen zu wählen (gemäss Anhang 4 sieht das sonROAD18 bei Personenwagen zwei und bei Bussen eine Unterkategorie vor). Die Emissionen von Hybridbussen verhalten sich ähnlich wie die der Dieselse, nur 2 dB(A) leiser. Hingegen verhalten sich die Emissionen von Bussen mit Elektromotor

- a) nicht linear zur Geschwindigkeit und
- b) nicht linear zu den Emissionen der Diesel- und Hybridbusse und sind z.B. bei Tempo 60 1–2 dB(A) höher als bei Diesel- und Hybridbussen.

8 Integration der Messresultate in das sonROAD18-Modell

8.1 Ausgangslage

Die EMPA wurde beauftragt, die quellennahen akustischen Messungen aufzubereiten für die Integration in das sonROAD18 Emissionsmodell. Der Schlussbericht ist dem Anhang 5 zu entnehmen. Nachfolgend werden die wichtigsten Erkenntnisse zusammenfassend erläutert.

8.2 SonRoad18 Emissionsmodell

Das Strassenlärmemissionsmodell sonROAD18 basiert in weiten Teilen auf dem Formalismus des Europäischen Modells CNOSSOS [3], ein einheitliches Berechnungsmodell für die Lärmermittlung und Massnahmenplanung in Europa. Verwendet werden die in der Schweiz gebräuchlichen SWISS10-Fahrzeugkategorien, ergänzt um elektrisch bzw. hybrid angetriebene Fahrzeuge.

SonROAD18 ist in Terzen formuliert und berücksichtigt eine nicht-runde vertikale Abstrahlcharakteristik⁴. Das Modell beschreibt die akustisch abgestrahlte Leistung eines die entsprechende Kategorie repräsentierenden Fahrzeugs in Abhängigkeit der Geschwindigkeit. Als weitere die Emission beeinflussende Faktoren werden der Belag, die Strassenlängsneigung und die Lufttemperatur berücksichtigt.

Als akustische Beobachtungsgrösse wurde der Ereignispegel verwendet. Die Ereignispegel sind „terzengenau“ in Antriebs- und Rollgeräusch aufgeschlüsselt, was automatisch im Parameteroptimierungsprozess erfolgte und weisen folgende Eigenschaften auf:

- Die auf das Rollgeräusch anzuwendende Belagskorrektur ist geschwindigkeits- und fahrzeugkategorienunabhängig.
- Das Antriebsgeräusch ist standortunabhängig und nur von Geschwindigkeit und Steigung beeinflusst.

Da für die neuen Fahrzeugkategorien – insbesondere hybrid oder elektrisch betriebene Fahrzeuge – erst wenige Daten vorhanden sind, werden laufend Messdaten von neuen Fahrzeugmodellen ins Modell integriert. Die für die vorliegende Studie wichtige Kategorie 1 (Busse) bezieht sich eher auf Reisebusse als Busse von städtischen Verkehrsbetrieben (siehe Anhang 4 und Schlussbericht sonROAD18 [4]).

8.3 Ergebnisse / Schlussfolgerungen

In einem ersten Schritt wurden die Messungen jedes Busses in den sonROAD18 Formalismus überführt. Die so gefundenen Modellparameter wurden mit den Werten der Kategorie 1 verglichen. Die Übereinstimmung „spezifisches Modell“ – „Modell Kat. 1“ war bei den Luzerner Bussen mässig (Stabw: 1.7–2.5 dB(A)), bei den Zürcher Bussen sehr gut (Stabw: 0.1–0.5 dB(A)), in Basel beim Gasbus (wenige Messungen) gut (Stabw: 0.8 dB(A)) und beim Dieselbus (Stabw: 1.7 dB(A)) mässig. Bei den Trolleybussen aus Zürich wurde einmal mit und einmal ohne Antriebsgeräusch gerechnet. Die graphische Übereinstimmung mit den Daten der Kategorie 1 ist ohne Antriebsgeräusch besser.

In einem nächsten Schritt wurden die Daten der Busse innerhalb einer Kategorie (Antriebssystem und Achsenzahl) zusammengefasst und als Kategorie in den sonROAD18 Formalismus überführt. Die Abweichungen bezüglich dem Terzspektrum sind beim dieselbetriebenen Gelenkbus (Stabw: 2.2 dB(A)) und beim Gasbus (Stabw: 1.7 dB(A)) am kleinsten, beim Standardbus (Stabw: 2.0 dB(A)) mit einigen Ausnahmen auch sehr ähnlich. Der Hybridbus (Stabw: 2.2 dB(A)) sowie die Trolleybusse (Stabw: 1.4 bzw. 2.1 dB(A)) weisen graphisch sehr unterschiedliche Terzspektren aus und können mit den Daten der Kategorie 1 kaum verglichen werden.

Es stellt sich die Frage, ob bei diesen Auswertungen überhaupt Kategorien gebildet werden können oder ob die Busse so spezifisch sind, dass jeder ein eigenes Modell benötigt. Anhand der Standardabweichungen wird am Beispiel von zwei Kategorien dieser Frage nachgegangen.

⁴ sonROAD18 berücksichtigt eine vertikale Abstrahlcharakteristik zur Erhöhung der Prognosegenauigkeit bei quellennahen Lärmschirmen oder bei quellennahen, hoch gelegenen Empfangspunkten. Anhand verschiedener Messungen wurde ein empirisches Modell abgeleitet, das getrennt für PW und LKW eine elevationswinkelabhängige spektrale Korrektur der Abstrahlung spezifiziert. Mehr dazu in Kap. 6 des Schlussberichts sonROAD18 [4].

Die Messungen der Fahrzeuge in Kategorie A (Diesel, Standardbus) können mit dem einheitlichen Modell mit einer Standardabweichung von 1.8 dB(A) reproduziert werden. Demgegenüber bilden die busspezifischen Modelle die Messungen mit Standardabweichung zwischen 0.2 und 1.7 dB(A) ab. Die leichte Erhöhung der Prognoseunsicherheit mit dem einheitlichen Modell kann in Kauf genommen werden. Bei der Kategorie E (Gelenktrolley) kann mit dem einheitlichen Modell mit einer Standardabweichung von 2.1 dB(A) reproduziert werden. Die busspezifischen Modelle bilden die Messungen mit Stabw zwischen 0.2 und 2.4 dB(A) ab. Auch bei den Gelenktrolley kann die leichte Erhöhung der Prognoseunsicherheit mit dem einheitlichen Modell in Kauf genommen werden. Dies trifft für alle anderen Buskategorien ebenfalls zu.

In einem letzten Schritt wurde das Rollgeräusch in Abhängigkeit der Achsenzahl vereinheitlicht und so die Kategorien nochmals neu berechnet. Die Grafiken der Kategorien sind jetzt etwas harmonischer, die Charakteristik einer Kategorie bleibt jedoch gleich.

Die Vereinheitlichung des Rollgeräusches führt nur zu einer relativ geringen weiteren Erhöhung der Standardabweichung, sodass empfohlen werden kann, diese Modellsetzung in sonROAD18 zu integrieren.

8.4 Fazit

Werden die Messdaten der verschiedenen Fahrzeugkategorien der städtischen Verkehrsbetriebe in den sonROAD18 Formalismus integriert, so korrelieren sie wenig mit jenen der Kategorie 1 (Busse). Am ehesten stimmen die Daten der dieselbetriebenen Gelenkbusse überein. Es macht Sinn, eine oder besser zwei eigene Kategorien für elektrischbetriebene und hybridbetriebene Fahrzeuge zu erstellen. Gasbusse sind – akustisch gesehen – den dieselbetriebenen Bussen ähnlich.

9 Schlussbemerkung

Mit der aktuellen Messkampagne wurden Messdaten von Bussen im öffentlichen Verkehr gewonnen. Die Studie gibt Aufschluss über die zu verwendenden Emissionswerte von Bussen und zeigt die Unterschiede auf.

Die Messungen zeigen, dass grosse Unterschiede zwischen den einzelnen Bustypen und Geschwindigkeitsmodi herrschen.

Basierend auf den durchgeführten Messungen und deren Auswertungen resultieren folgende wesentliche Ergebnisse und Erkenntnisse:

- Die Emissionen von Bussen sind deutlich leiser als die Emissionen der Kategorie N2 „lärmige Fahrzeuge“ und somit deutlich leiser als bisher angenommen (LSV, StL-86+).
- Der Hybridbus ist generell der leiseste Bus und bis zu 5 dB(A) leiser als der lauteste Bus.
- Deutliche Unterschiede und gut wahrnehmbare Schalldruckpegelunterschiede im Vergleich Tempo 30/50: Bei Tempo 30 sind die Busse im Schnitt 4–6 dB(A) leiser.
- An Steigungstrecken sind Diesel- und Hybridbusse 2–4 dB(A) lauter als auf der horizontalen Strecke. Trolleybusse zeigen kaum Pegelunterschiede zwischen Steigung und horizontaler Strecke.
- Das Frequenzspektrum des gleichen Busses auf unterschiedlichen Belägen ist praktisch identisch. Je nach Geschwindigkeit sieht das Spektrum anders aus, behält jedoch i. d. R. die Charakteristik der jeweiligen Buskategorie.
- Der Unterschied der Busemissionen zwischen den Belägen SDA4 und AC11 beträgt je nach Geschwindigkeit 2–4 dB(A).

Fazit

Die Messungen zeigen, dass grosse Unterschiede in den Emissionswerten zwischen den einzelnen Bustypen vorhanden sind. Werden Busse, wie oft üblich, den lärmigen Fahrzeugen zugeteilt, kann dies (gerade im innerstädtischen Bereich und hohen Busfrequenzen) zu einer Überschätzung der Lärmsituation führen.

Weiter kann festgehalten werden, dass eine Tempo 30 Situation im Vergleich zu einer Tempo 50 Situation eine merkbare Pegelwirkung zeigt und somit auch bei vom öffentlichen Verkehr befahrenen Strecken Tempo 30 eine probate Lärmsanierungsmassnahme ist.

Weiterer Untersuchungsbedarf

Im Bereich der Emissionen bei Steigungen besteht weiterer Untersuchungsbedarf, da nur auf einer Steigungstrecke ($i = 8\%$) Messungen durchgeführt wurden. Ebenfalls sollten durch zusätzliche Messungen die Resultate des gasbetriebenen Busses überprüft werden.

Die Zukunft der Mobilität ist elektrisch. Laufend werden neue und bessere elektrisch angetriebene Fahrzeuge entwickelt und produziert. Diverse Städte resp. Verkehrsbetriebe planen in naher Zukunft im Rahmen von Pilotprojekten den Einsatz von elektrisch angetriebenen Bussen mit Batteriepack (ohne Fahrleitungen). Solche Busse sollten deshalb untersucht und die vorliegende Studie entsprechend ergänzt werden.

Bern, 31.07.2018

B+S AG

Bernhard Kindler
Projektleiter

A. Klauser
Berichtverfasserin

Anhang

- Anhang 1 Messequipement
- Anhang 2 Messunsicherheit inkl. Standardabweichung
- Anhang 3 Messanordnung der Messstandorte
- Anhang 4 Berücksichtigte Belagskennwerte
- Anhang 5 Fahrzeugkategorien sonROAD18
- Anhang 6 EMPA, K. Heutschi: Beschreibung der akustischen Emissionen von städtischen Bussen in sonROAD18

Anhang 1: Messequipment

1 Messequipement

Messgeräte

Messgerät 1

- Sound Analyser Norsonic 140, Serie-Nr. 1402959
- Vorverstärker Norsonic 1209 (Serie-Nr. 12474), Mikrofonkapsel Norsonic 1225 (Serie-Nr. 79565)

Messgerät 2

- Sound Analyser Norsonic 140, Serie-Nr. 1404537
- Vorverstärker Norsonic 1209 (Serie-Nr. 13861), Mikrofonkapsel Norsonic 1225 (Serie-Nr. 128788)

Messgerät 3

- Sound Analyser Norsonic 140, Serie-Nr. 1407061
- Vorverstärker Norsonic 1209 (Serie-Nr. 21562), Mikrofonkapsel Norsonic 1225 (Serie-Nr. 271135)

Mesgerät ZH

- Sound Analyser Norsonic 140, Serie-Nr. 1404615
- Vorverstärker Norsonic 1209 (Serie-Nr. 14142), Mikrofonkapsel Norsonic 1225 (Serie-Nr. 271172)

Sämtliches bei den Messungen verwendetes Equipment ist amtlich geprüft. Die Messgeräte wurden vor und nach den Messungen akustisch kalibriert (akustischer Kalibrator Norsonic 1251-1kH, 114dB, Serie-Nr. 31046 und Serie-Nr. 33098).

Anhang 2: Messunsicherheiten

1 Messunsicherheiten

1.1 Definition

Zur Bewertung aller Einflussgrößen auf eine Messung, stehen zwei Kategorien von Methoden zur Verfügung, die auch kombiniert werden können:

- **Typ A** Berechnung der Messunsicherheit durch statistische Analyse (z.B. Standardabweichung) der Messungen
- **Typ B** Berechnung der Messunsicherheit mit anderen Mitteln als der statistischen Analyse (z.B. Gerätetoleranzen, Erfahrungswerte, Vergleichswerte)

Typ A: Standardabweichung

Am gebräuchlichsten ist eine Angabe der Messunsicherheit als Standardabweichung bei jeder Einzelmessung:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5)$$

Typ B: Nicht statistische Informationen

Unsicherheiten von Typ B sind alle die nicht mit statistischen Methoden ermittelt werden. Die wichtigsten, im Rahmen der vorliegenden Messkampagne ermittelten Unsicherheiten sind:

- Toleranzen des Messgerätes und der Kalibration (Erfahrungswerte)
- Unsicherheiten bzgl. Geschwindigkeit (nur Tachometerangaben Chauffeur, keine Messung vorgenommen)
- Unsicherheiten bzgl. Messdistanz (Distanz Quelle zu Mikrofon)
- Unsicherheiten bzgl. Einfluss Wind (Schallausbreitung Mitwind vs. Gegenwind)

1.2 Standardabweichung (Typ A)

Die Standardabweichung wird von allen vorgenommenen Messungen pro Bustyp, Belagstyp und Geschwindigkeitsregime berechnet. Sämtliche Messwerte sind in der Tab. 1 inkl. ihrer Standardabweichung (Stab) dargestellt.

Bus	Kat.	Belag	Messwerte LE in dBA in 7.5 m ab Achse								Messwerte Steigung LE in dBA in 7.5 m ab Achse			
			30 km/h	Stab	50 km/h	Stab	60 km/h	Stab	Halte- stelle	Stab	rauf	Stab	runte- r	Stab
LU 1	Diesel, 2-Achser	SDA 8	74.8	1.5	80.0	0.4			79.7	0.2				
LU 1		AC 11	76.5	0.3	81.2	0.3			80.0	0.5	81.3	0.8	79.7	0.4
LU 1		SDA 4	73.9	0.6	79.5	0.3								
ZH 1.3l		AC MR	79.0	0.5	81.8	0.6	84.1	0.2	82.6	0.6				
ZH 1.3r		AC MR	78.9	0.4	81.9	0.3	85.1	0.5	83.0	0.6				
ZH 1.5l		AC MR	76.1	0.9	78.7	0.8	80.8	0.7	82.7	0.1				
ZH 1.5r		AC MR	74.2	0.2	77.4	0.8	79.3	0.2	81.0	0.6				
BS 1		Diesel, 3-Achser	AC11	77.5	0.5	81.5	0.9			84.7	0.8			
BS 1	ACMR8LN		73.9	0.3	78.2	0.6			81.0	2.2				
BS 1	Beton		76.8	0.5	80.5	0.4			83.2	0.7				
BS 1	Confalt		75.1	0.8	81.6	1.8			81.8	0.9				
ZH 1.1l	AC MR		79.4	0.8	81.7	0.3	82.7	0.4	83.6	1.4				
ZH 1.1r	AC MR		78.0	0.6	81.4	0.7	82.1	0.3	80.4	1.3				
ZH 1.2l	AC MR		75.9	1.0	80.8	0.4	82.5	0.5	80.4	1.1				
ZH 1.2r	AC MR		76.7	0.6	82.2	0.4	83.1	0.3	79.4	0.7				
ZH 1.4l	AC MR		76.6	0.3	80.4	0.3	82.0	0.5	81.1	0.6				
ZH 1.4r	AC MR		76.8	0.3	81.0	0.1	82.5	0.5	80.7	1.1				
BS 2	Gas	AC11	80.0	0.4	82.8	0.4			85.8	2.0				
BS 2		ACMR8LN	76.2	0.4	79.4	0.3			80.1	1.3				
BS 2		Confalt	77.3	0.6	79.3	1.1			82.0	2.0				
BS 2		Beton	79.9	0.4	80.9	0.2			86.0	0.8				
LU 2	Hybrid	SDA 8	72.7	0.9	78.3	0.6			72.8	0.7				
LU 2		AC 11	74.8	0.4	80.1	0.3			75.9	1.4	79.2	0.8	76.8	0.6
LU 2		SDA 4	71.6	0.6	77.9	0.7								
ZH 2.4l		AC MR	74.5	0.4	79.5	0.8	81.4	0.4	77.3	1.4				
ZH 2.4r		AC MR	74.9	0.4	79.8	0.9	82.2	0.4	78.2	1.7				
LU 3	Elektro, 3-A.	SDA 8	73.1	0.2	80.6	0.4			73.8	0.4				
LU 3		AC 11	75.6	0.2	82.5	0.6			76.6	0.8	76.2	0.4	76.5	0.5
LU 3		SDA 4	72.3	0.7	80.6	0.7								
ZH 2.2l		AC MR	76.9	0.2	82.6	0.4	84.6	0.1	77.7	0.3				
ZH 2.2r		AC MR	77.7	0.2	83.6	0.3	87.1	0.1	78.0	0.6				
LU 4	Elektro, 4-Achser	SDA 8	73.7	0.3	79.2	0.4			75.2	0.2				
LU 4		AC 11	76.4	0.5	81.7	0.5			77.9	0.8	74.0	0.5	74.3	0.4
LU 4		SDA 4	72.0	0.3	77.4	0.3								
ZH 2.1l		AC MR	75.8	0.5	81.5	0.4	83.7	0.3	76.9	0.2				
ZH 2.1r		AC MR	77.6	0.7	82.8	0.5	84.5	0.1	77.8	0.4				
ZH 2.3l		AC MR	76.1	0.1	80.7	0.5	83.4	0.4	75.6	0.7				
ZH 2.3r		AC MR	78.1	0.2	82.3	0.3	84.7	0.1	77.3	0.3				

Tab. 1: Messwerte inkl. Standardabweichung geordnet nach Buskategorie

Die Messwerte weisen in der Regel eine Standardabweichung (Streuung der Messwerte) unter 1 dB(A) auf. Die Ausnahmen sind abhängig vom Geschwindigkeitsregime in Tab. 2 aufgeführt.

Geschwindigkeitsregime	Standardabweichung	Ausnahmen
30 km/h	0.2 – 1.0 dB	LU Bus 1, SDA8 (1.5)
50km/h	0.2-0.9 dB	BS Standort Erlenmatt (1.8/1.1)
60 km/h	0.1-0.7 dB	-
Haltestelle	0.2 -2.2 dB	Zu grosse Streuung aufgrund wenigen Messungen (2-8 Messungen) und unterschiedlichen Fahrstilen (Bremsweg, Haltevorgang, usw.)
Steigung	0.4 -0.8	-

Tab. 2: Standardabweichung aller Messungen pro Geschwindigkeitsregime inkl. Ausnahmen

Die Ausnahmen bei den Geschwindigkeitsregimen 30, 50, 60 sind nicht auf Ausreisser zurückzuführen, vielmehr ist die Streuung der Messwerte insgesamt grösser (siehe Boxplots Kapitel 6.1). Bei der Geschwindigkeit 60km/h ist eine deutlich geringere Standardabweichung zu verzeichnen, da weniger Messdaten zur Verfügung standen.

Bei den Messwerten der Haltestelle ist vor allem aufgrund der grossen Variabilität folgender Punkte eine grössere Standardabweichung erklärbar.

- zeitlichen Länge des gesamten Haltevorganges
- Art des Bremsvorganges
- Anzahl Türen die geöffnet werden
- Vorhandensein eines Pieptones beim Türe schliessen
- Ob der Bus fürs Einsteigen geneigt wird (hydraulischer Vorgang)

1.3 Nicht statistische Abweichungen (Typ B)

Für die nicht statistische Abweichung kommen bei den vorgenommenen Messungen die Messunsicherheiten in Tab. 3 zu tragen.

Art / Einflussgrösse	Annahme	Abweichung [dB]
Toleranzen des Messgerätes und der Kalibration ¹⁾	+/- 0.5 dB	+/- 0.5 dB
Unsicherheiten bzgl. Geschwindigkeit ²⁾	+/- 5km/h	+/- 1.0 dB
Unsicherheiten bzgl. Messdistanz: Distanz Quelle zu Mikrofon ³⁾	+/- 10cm	+/- 0.1 dB
Unsicherheiten bzgl. Wind ⁴⁾	+/- 1m/s	+/- 0.1 dB

Erläuterungen

¹⁾ Erfahrungswert (Angabe EMPA)

²⁾ Umrechnung gemäss Formel Dieselbusse und Hybrid (Kap. 6.3.1.2), Elektrobusse 1.5dB, Gasbus 0.5dB

³⁾ Abstandsgesetz: Umrechnung mit $10 \cdot \text{LOG}(D)$

⁴⁾ Berechnung nach ISO 9613

Linien-schallquelle mit Schallausbreitungssituation Mitwind versus Gegenwind. Für die meteorologische Korrektur C_{met} werden standardmässig die Korrekturen $K_g=10 \text{ dB(A)}$ für die Gegenwindsituation und $K_m=0 \text{ dB(A)}$ für Mitwindsituation angesetzt (Methode LfU Bayern).

Tab. 3: Messunsicherheiten Typ B

1.4 Messunsicherheit

Aus den gemäss Kapitel 6.2.2 und 6.2.3 ermittelten und definierten Abweichungen können die Messunsicherheiten gemäss GUM wie folgt bestimmt werden:

Standardunsicherheit (mittlere Standardabweichung) aus Typ A

$$u_1(v) = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (6)$$

Bemerkung: Die mittlere Standardabweichung wird pro Geschwindigkeitsregime angegeben. Als s wurde die höchste Standardabweichung angenommen, die Ausnahmen wurden nicht berücksichtigt. Die Resultate sind in der folgenden Tabelle angegeben.

Geschwindigkeitsregime	n	u1(v)	Geschwindigkeitsregime	n	u1(v)
30 km/h	37	0.1644	Steigung	8	0.2828
50km/h	36	0.15	Haltestelle	34	0.3773
60 km/h	18	0.165			

Tab. 4: mittlere Standardabweichung u_1 pro Geschwindigkeitsregime

Standardunsicherheit aus Typ B

$$u_{2 \dots 5} = \frac{s}{\sqrt{3}} \quad (7)$$

Die Standardunsicherheit Typ B ist für alle Geschwindigkeitsregime gleich.

Aus den einzeln ermittelten Unsicherheitskomponenten kann die gesamte Messunsicherheit wie folgt bestimmt werden:

$$u = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2} \quad (8)$$

Einflussgrösse	Ermittlungsart	Abweichung [dB]	Wert u [dB]	Formel Nr.
Standardabweichung	Statistisch		Aus Tab. 4	(6)
Toleranzen des Messgerätes / Kalibration	Erfahrungswert	+/- 0.5	0.29	(7)
Unsicherheiten bzgl. Geschwindigkeit	Modell	+/- 1.0	0.58	(7)
Unsicherheiten bzgl. Messdistanz	Modell	+/- 0.1	0.06	(7)
Unsicherheiten bzgl. Wind	Modell	+/- 0.1	0.06	(7)
Messunsicherheit 30km/h			+/- 0.67	(8)
Messunsicherheit 50km/h			+/- 0.67	(8)
Messunsicherheit 60km/h			+/- 0.67	(8)
Messunsicherheit Steigung			+/- 0.71	(8)
Messunsicherheit Haltestelle			+/- 0.75	(8)

Tab. 5: Übersicht der Messunsicherheit

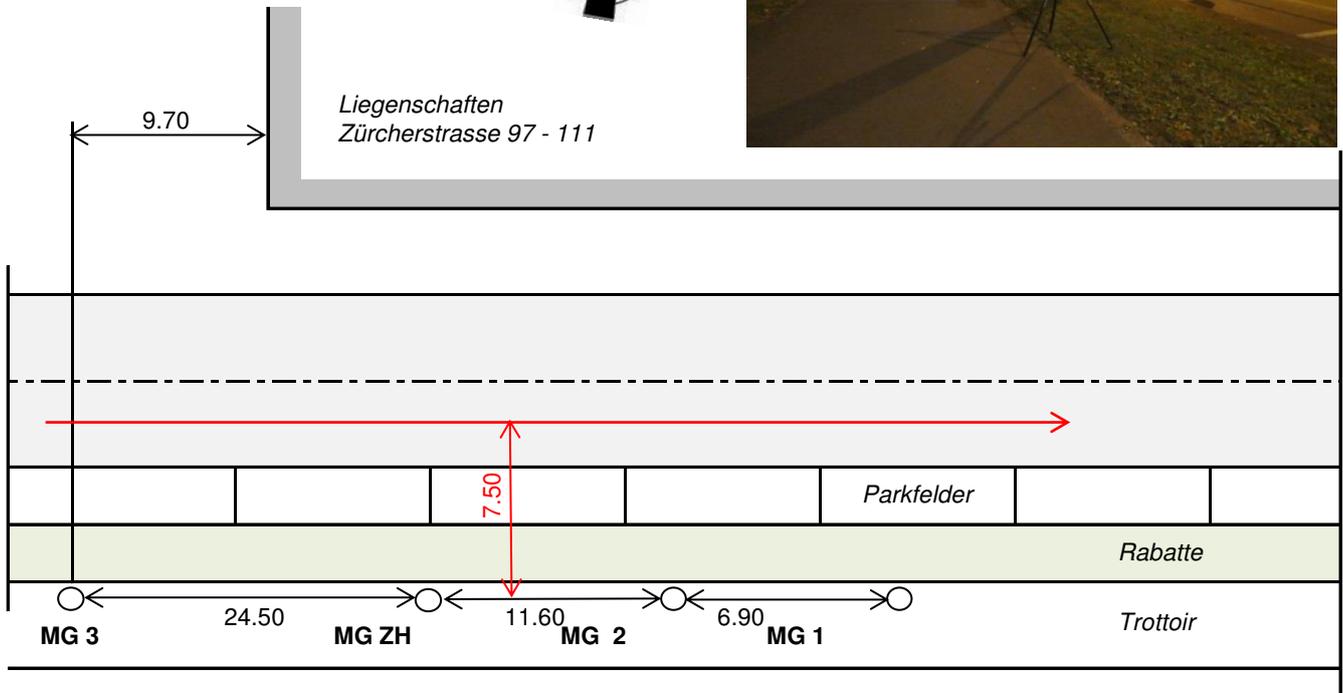
Messunsicherheit

In der (akustischen) Messpraxis geht man normalerweise von einer Messunsicherheit von +/- 2 dB(A) aus. Aufgrund der „laborhaften“ Messanordnung insbesondere bei den Busdurchfahrten ergibt sich für vorliegende Messkampagne Busdurchfahrten eine **Messunsicherheit von +/- 0.7 dB**. Bei der Steigung und der Simulation der Haltestelle ist die Messunsicherheit wie erwartet etwas grösser.

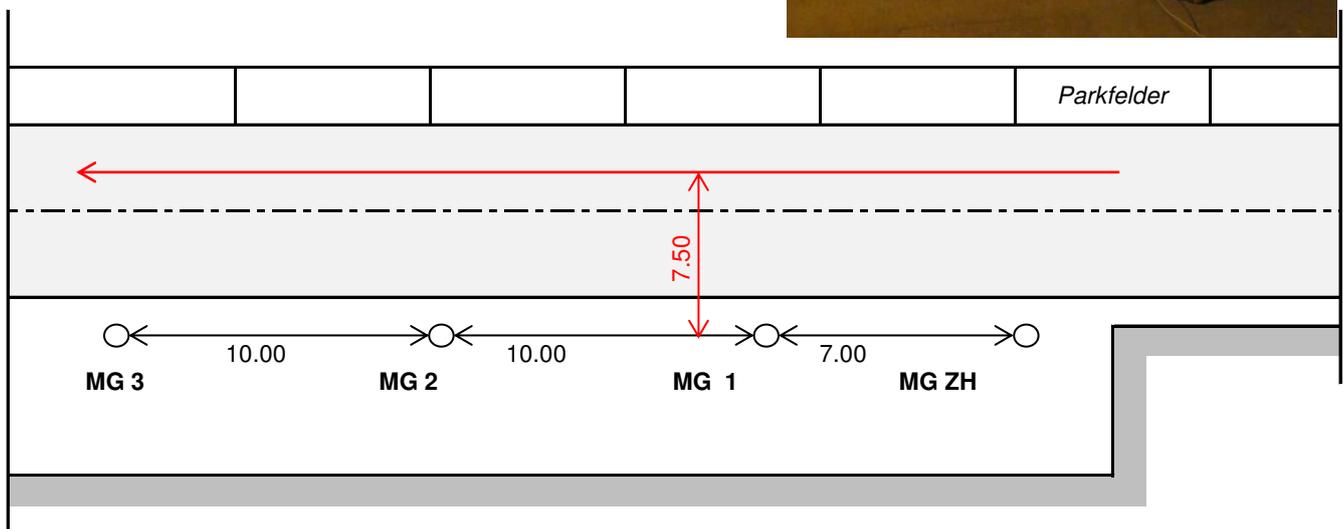
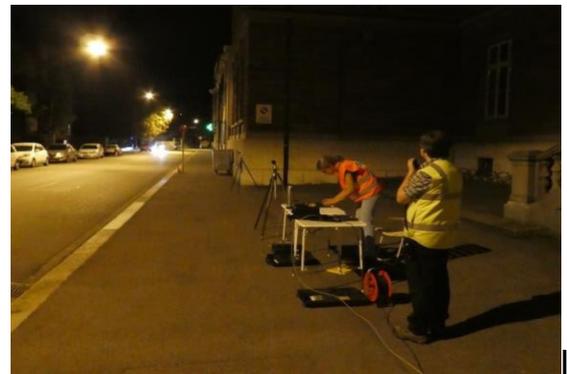
Anhang 3: Messanordnung

Messkampagne Basel

Strasse / Ort Zürcherstrasse
 Koordinate 2'613'016 / 1'267'125



Strasse / Ort Sevoegelstrasse
 Koordinate 2'612'363 / 1'266'585



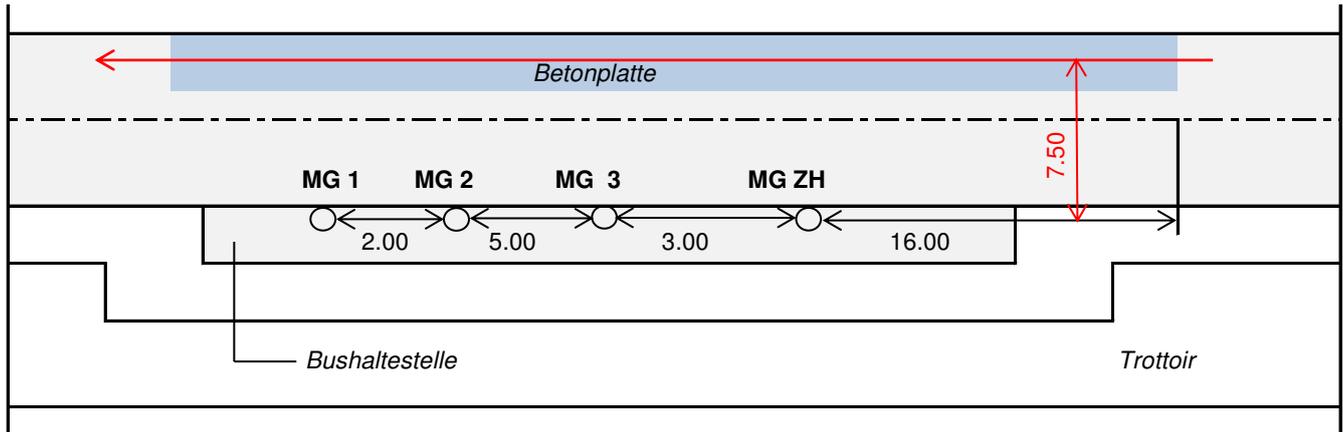
Schulhaus Sevoaelstrasse

Strasse / Ort

Allmendstrasse

Koordinate

2'614'120 / 1'267'982

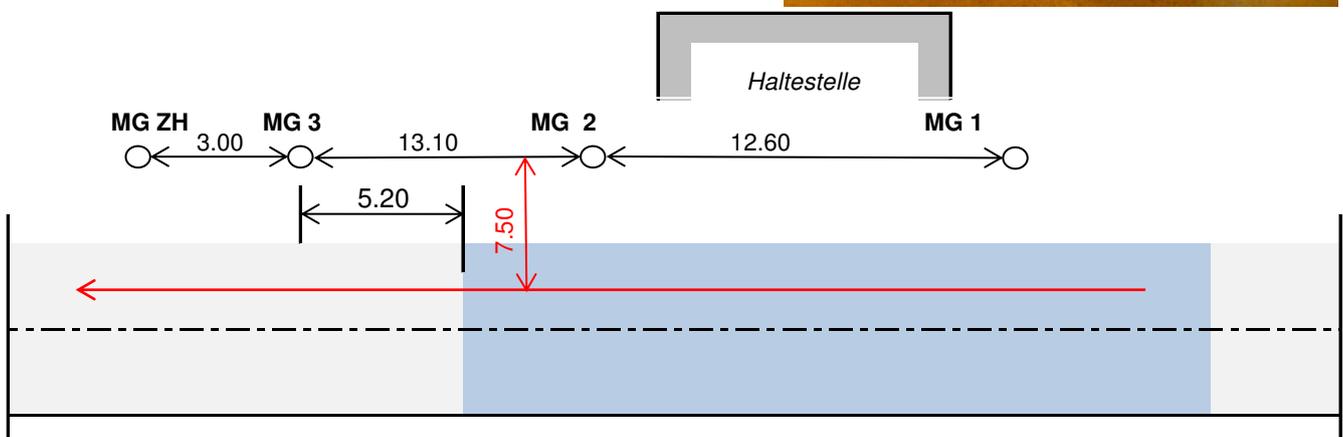


Strasse / Ort

Erlenmatt

Koordinate

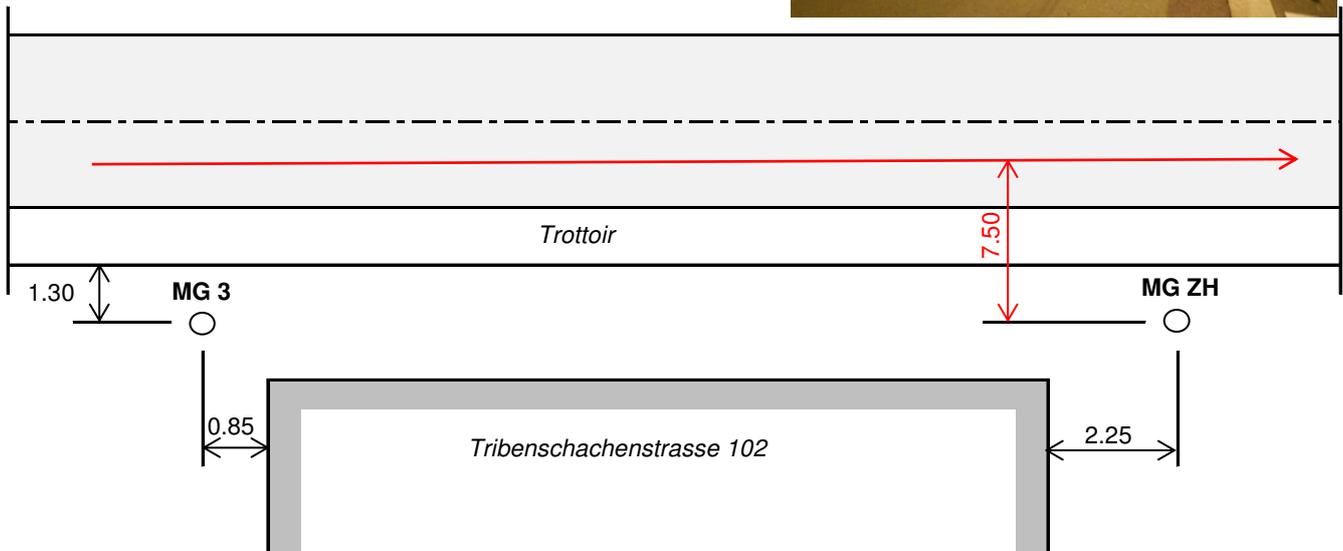
2'612'371 / 1'268'742



Messkampagne Luzern

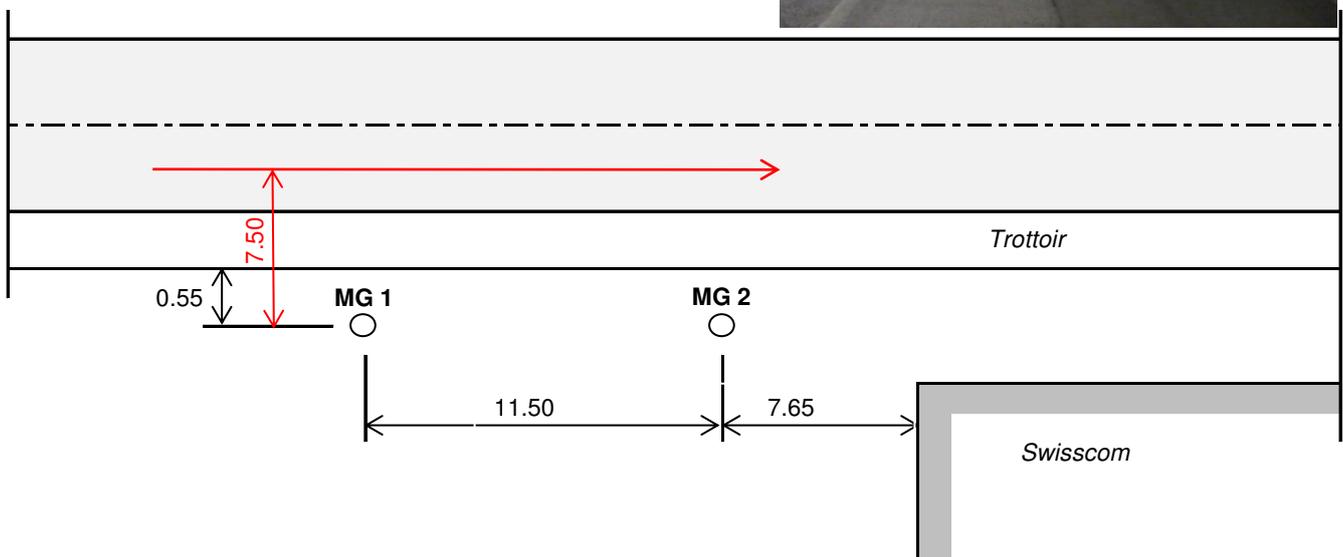
Strasse Tribschenstrasse (SDA8)

Koordinate 2'666'968 / 1'210'376



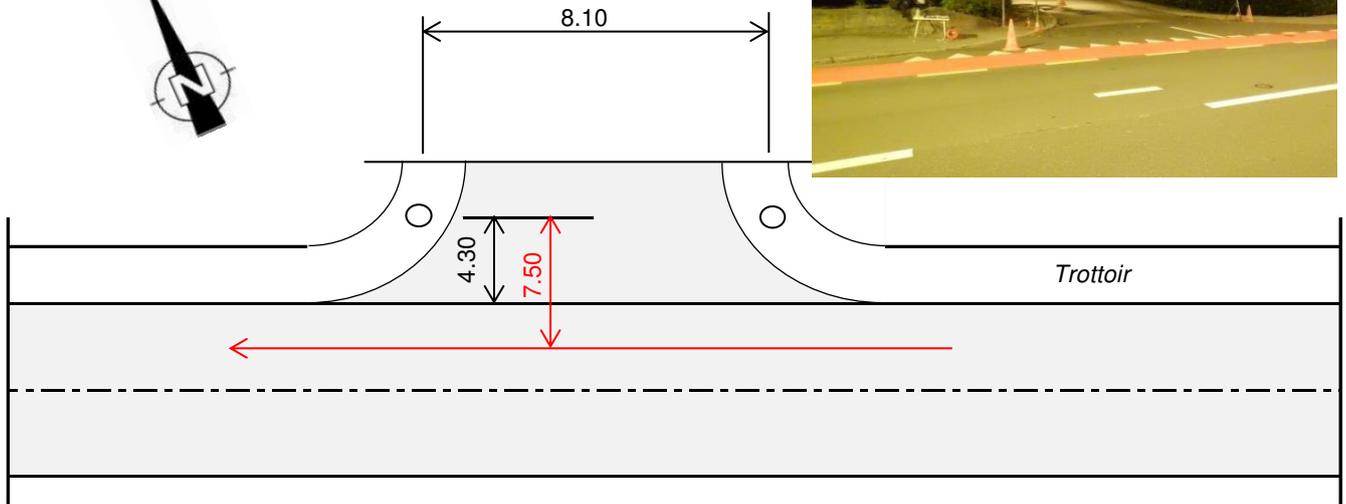
Strasse Tribschenstrasse (AC11)

Koordinate 2' 666'654 / 1'210'569



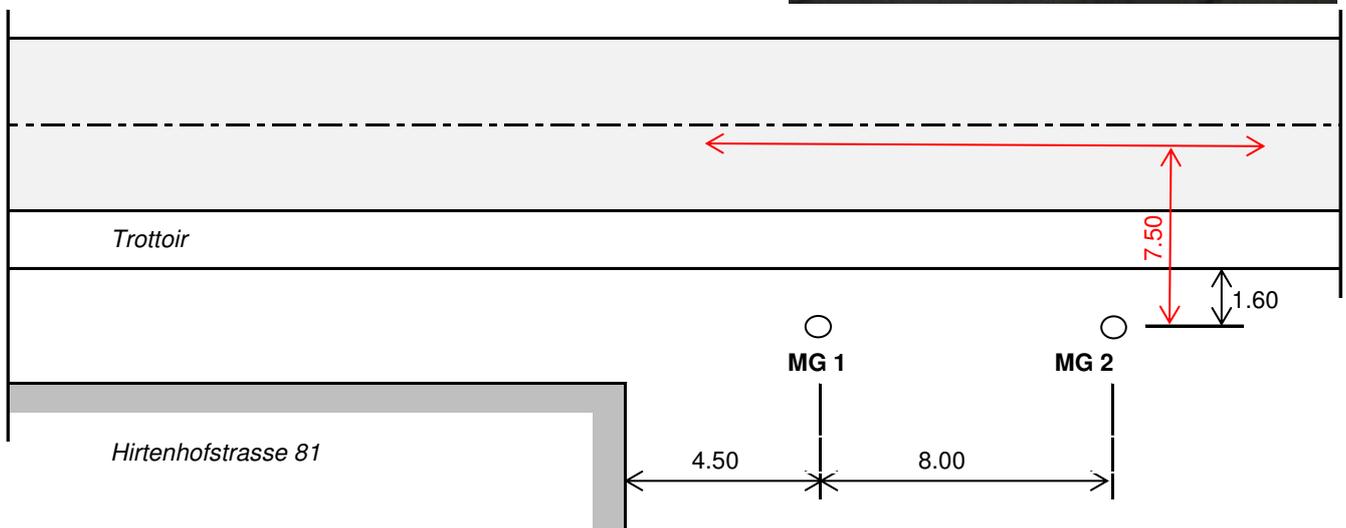
Strasse / Ort Langensandstrasse (SDA4)

Koordinate 2'667'431 / 1'210'040



Strasse / Ort Hirtenhofstrasse (AC11)

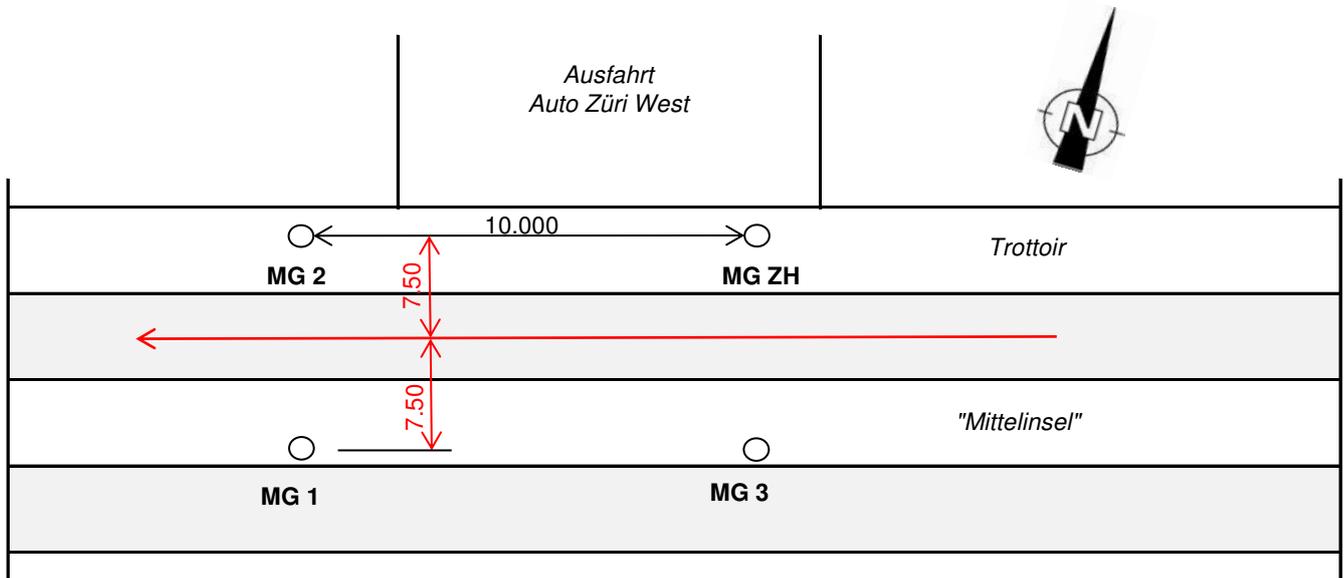
Koordinate 2'667'569 / 1'209'785



Messkampagne Zürich

Strasse Zürcherstrasse, Schliern

Koordinate 2'677'542 / 1'250'024



Anhang 4: Berücksichtigte Belagskennwerte

Anhang 4: Berücksichtigte Belagskennwerte

Bus-Nr.	Bustyp	Kat.	Belag	kB	Quellenwert Leq/h, 1m ab Achse			Korrigierter Quellenwert Leq/h, 1m ab Achse		
					30 km/h	50 km/h	60 km/h	30km/h	50km/h	60km/h
LU 1	Mercedes-Benz Citaro	Diesel, 2-Achser	SDA 8	0	48	53.2		48	53.2	
LU 1	Mercedes-Benz Citaro		AC 11	2	49.7	54.4		47.7	52.4	
LU 1	Mercedes-Benz Citaro		SDA 4	-2	47.1	52.7		49.1	54.7	
ZH 1.3l	Mercedes-Benz Citaro		AC MR	1.5	52.1	55	57.2	50.6	53.5	55.7
ZH 1.3r	Mercedes-Benz Citaro		AC MR	1.5	52	55.1	58.2	50.5	53.6	56.7
ZH 1.5l	MAN A 35 Midibus		AC MR	1.5	49.3	51.9	53.9	47.8	50.4	52.4
ZH 1.5r	MAN A 35 Midibus		AC MR	1.5	47.4	50.6	52.5	45.9	49.1	51
BS 1	Mercedes-Benz O 530 G	Diesel, 3-Achser	AC11	1.5	50.6	54.7		49.1	53.2	
BS 1	Mercedes-Benz O 530 G		ACMR8LN	-2.5	47.1	51.4		49.6	53.9	
BS 1	Mercedes-Benz O 530 G		Beton	2	50	53.7		48	51.7	
BS 1	Mercedes-Benz O 530 G		Confalt	0.5	48.9	55.8		48.4	55.3	
ZH 1.1l	Mercedes-Benz O 530 G		AC MR	1.5	52.6	54.9	55.9	51.1	53.4	54.4
ZH 1.1r	Mercedes-Benz O 530 G		AC MR	1.5	51.2	54.5	55.3	49.7	53	53.8
ZH 1.2l	Man A40 wel.Com1 Lions City		AC MR	1.5	49.1	54	55.6	47.6	52.5	54.1
ZH 1.2r	Man A40 Lions City		AC MR	1.5	49.9	55.4	56.3	48.4	53.9	54.8
ZH 1.4l	Neoplan Centroliner		AC MR	1.5	49.8	53.6	55.2	48.3	52.1	53.7
ZH 1.4r	Neoplan Centroliner		AC MR	1.5	50	54.1	55.6	48.5	52.6	54.1
BS 2	Citaro Gelenkbus CNG	Gas	AC11	1.5	53.1	56		51.6	54.5	
BS 2	Citaro Gelenkbus CNG		ACMR8LN	-2.5	49.4	52.6		51.9	55.1	
BS 2	Citaro Gelenkbus CNG		Confalt	0.5	50.7	53.3		50.2	52.8	
BS 2	Citaro Gelenkbus CNG		Beton	2	53.1	54.1		51.1	52.1	
LU 2	Volvo 7900H	Hybrid	SDA 8	0	45.9	51.5		45.9	51.5	
LU 2	Volvo 7900H		AC 11	2	48	53.3		46	51.3	
LU 2	Volvo 7900H		SDA 4	-2	44.8	51.1		46.8	53.1	
ZH 2.4l	Volvo 7900 LAH		AC MR	1.5	47.7	52.6	54.5	46.2	51.1	53
ZH 2.4r	Volvo 7900 LAH		AC MR	1.5	48.1	53	55	46.6	51.5	53.5
LU 3	HESS Gelenktrolley	Trolley, 3-A.	SDA 8	0	46.3	53.8		46.3	53.8	
LU 3	HESS Gelenktrolley		AC 11	2	48.8	55.7		46.8	53.7	
LU 3	HESS Gelenktrolley		SDA 4	-2	45.5	53.8		47.5	55.8	
ZH 2.2l	HESS Swisstrolley 3		AC MR	1.5	50.1	55.8	57.8	48.6	54.3	56.3
ZH 2.2r	HESS Swisstrolley 3		AC MR	1.5	50.9	56.8	60.3	49.4	55.3	53.8
LU 4	HESS RBUS	Trolley, 4-Achser	SDA 8	0	46.8	52.4		46.8	52.4	
LU 4	HESS RBUS		AC 11	2	49.6	54.9		47.6	52.9	
LU 4	HESS RBUS		SDA 4	-2	45.2	50.6		47.2	52.6	
ZH 2.1l	HESS lighTram 3 Longo		AC MR	1.5	49	54.7	56.9	47.5	53.2	55.4
ZH 2.1r	HESS lighTram 3 Longo		AC MR	1.5	50.8	56	57.7	49.3	54.5	56.2
ZH 2.3l	HESS lighTram 3 Longo 2		AC MR	1.5	49.3	53.9	56.5	47.8	52.4	55
ZH 2.3r	HESS lighTram 3 Longo 2		AC MR	1.5	51.3	55.5	57.8	49.8	54	56.3

Tab. 1: Berücksichtigte Belagskennwerte (kB), Belagstyp, Quellenwerte, Bustypen, projektinterne Busnummern und Einteilung in Kategorien, alle Werte in dB(A).

Anhang 5: Fahrzeugkategorien Swiss10

Anhang 5

Fahrzeugkategorien Swiss10, inkl. Erweiterung, welche im sonROAD18 verwendet werden.

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

Abb. 1: Kategorien des sonROAD18-Modelles

Bemerkung: zu den Unterkategorien 1b, 3b, 3c sind zurzeit keine Datengrundlagen vorhanden, sie sollten laufend ergänzt werden. Die Idee von sonROAD18 ist, dass stetig neue Messdaten von neuen Fahrzeugtypen ins Model integriert werden und das Model somit immer detaillierter wird.

Anhang 6: Beschreibung der akustischen Emissionen von städtischen Bussen in sonROAD18 EMPA, K. Heutschi:

Kurt Heutschi / 509

2018-07-11

Vermessung der akustischen Emissionen von städtischen Bussen

1. Konvertierung der Messdaten in den sonROAD18 Formalismus

Umrechnung auf Schalleistung

sonROAD18 verwendet die in den Halbraum (Quelle über reflektierender Oberfläche) abgestrahlte Schalleistung L_W als Beschreibungsgrösse der akustischen Emission von Fahrzeugen. Ausgehend von Ereignisenergiemessungen L_E in der Referenzgeometrie $d = 7.5$ m, $h = 1.2$ m kann für eine Fahrzeuggeschwindigkeit v wie folgt auf L_W geschlossen werden:

$$L_W = L_E + 10 \lg(v) + 10 \lg(2) - 10 \lg(3.6) + 10 \lg(d) - K$$

K beschreibt die Luftdämpfung in Abhängigkeit der Frequenz f für das Vorbeifahrereignis und kann für die Referenzgeometrie gemäss Tabelle 1 angenommen werden.

f	< 1000	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10k
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 1: Luftdämpfungsterm K [dB] in Funktion der Frequenz f [Hz].

Modellparameterertuning

Die sonROAD18-Emissionsmodellformel benötigt pro Fahrzeugtyp und Terzband vier Parameter:

A_p : konstanter Anteil des Antriebsgeräuschs

B_p : geschwindigkeitsabhängiger Anteil des Antriebsgeräuschs

A_R : konstanter Anteil des Rollgeräuschs

B_R : geschwindigkeitsabhängiger Anteil des Rollgeräuschs

Diese vier Parameter werden für jedes Terzband mit einem *brute-force* Ansatz für beste Übereinstimmung zwischen Messung und Modell angepasst. In einen Datensatz werden alle Messungen des gleichen Fahrzeugtyps bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten, unterschiedlichen Belägen und allenfalls unterschiedlichen Steigungen aufgenommen.

Da die akustische Emission eines Fahrzeugs vom Belag abhängig ist, wird im Parameteranpassprozess eine Schätzung der auf das Reifengeräusch anzuwendenden Belagskorrektur benötigt. Dazu standen für die Messkampagnen Luzern und Basel Ereignispegelmessungen des Personenwagens des Messteams zur Verfügung.

2. Ergebnisse Basel

Bei den Messungen in Basel wurde gestützt auf die Messpegel im oberen Frequenzbereich am Personenwagen folgende Belagszuordnung in sonROAD18 festgelegt:

Standort	Belag gemäss Messprotokoll	Belag in sonROAD18
Allmendstrasse	Beton	Beton
Erlenmatt	Confalt	ACMR8
Seevogelstrasse	AC11	Beton
Zürcherstrasse	ACMR8LN	ACMR8

Für den Bus 1 ergibt sich ein optimales Parametersetting gemäss Abbildung 1 und damit eine Reproduktion der Messung durch das Modell entsprechend Abbildung 2 mit einem mittleren Fehler von -0.5 dB(A) und einer Standardunsicherheit von 1.7 dB(A).

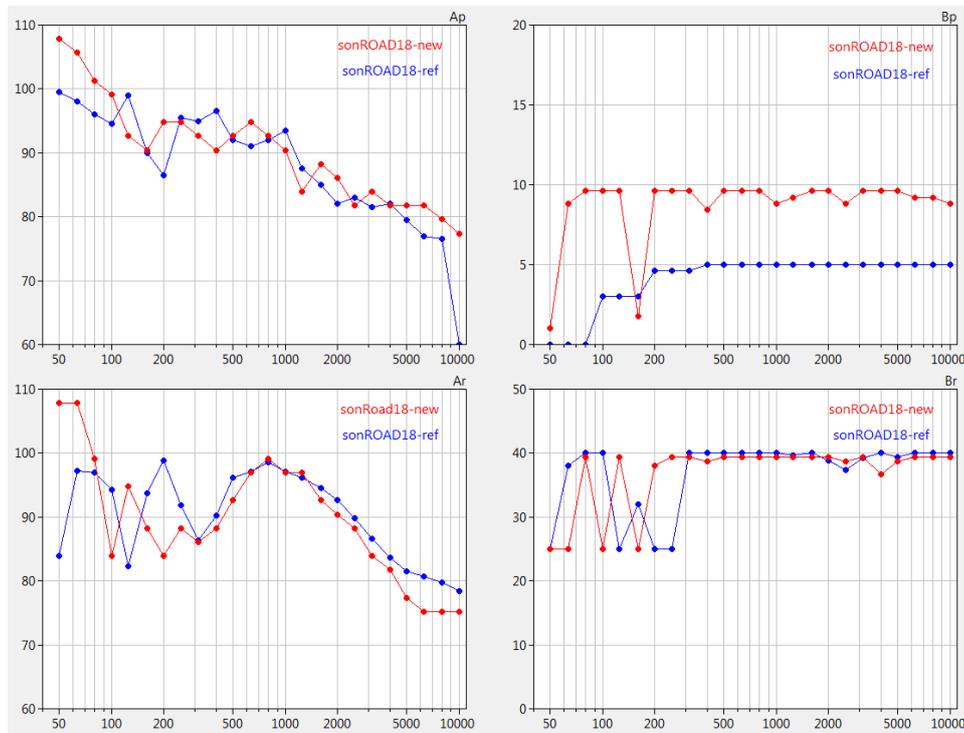


Abbildung 1: Spektrale Modellparameter in rot im Vergleich zu den Standardwerten SWISS10 cat 1 (blau).

freq	Ap	Bp	Ar	Br
50	107.8	1.0	107.8	25.0
63	105.7	8.8	107.8	25.0
80	101.3	9.6	99.1	39.3
100	99.1	9.6	83.9	25.0
125	92.6	9.6	94.8	39.3
160	90.4	1.8	88.3	25.0
200	94.8	9.6	83.9	38.0
250	94.8	9.6	88.3	39.3
315	92.6	9.6	86.1	39.3
400	90.4	8.4	88.3	38.7
500	92.6	9.6	92.6	39.3
630	94.8	9.6	97.0	39.3
800	92.6	9.6	99.1	39.3
1000	90.4	8.8	97.0	39.3
1250	83.9	9.2	97.0	39.3
1600	88.3	9.6	92.6	39.3
2000	86.1	9.6	90.4	39.3
2500	81.7	8.8	88.3	38.7
3150	83.9	9.6	83.9	39.3
4000	81.7	9.6	81.7	36.7
5000	81.7	9.6	77.4	38.7
6300	81.7	9.2	75.2	39.3
8000	79.6	9.2	75.2	39.3
10000	77.4	8.8	75.2	39.3

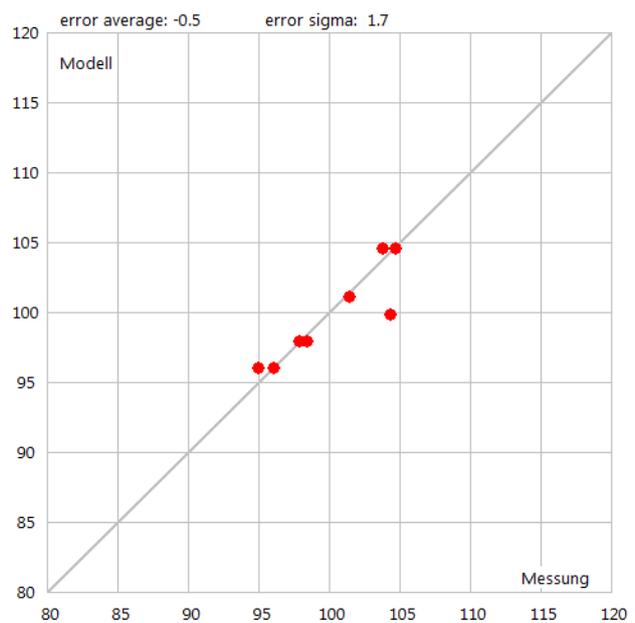


Abbildung 2: X-Y Plot der gemessenen und modellierten A-Summenpegel.

Für den Bus 2 ergibt sich ein optimales Parametersetting gemäss Abbildung 3 und damit eine Reproduktion der Messung durch das Modell entsprechend Abbildung 4 mit einem mittleren Fehler von -0.1 dB(A) und einer Standardunsicherheit von 0.8 dB(A).

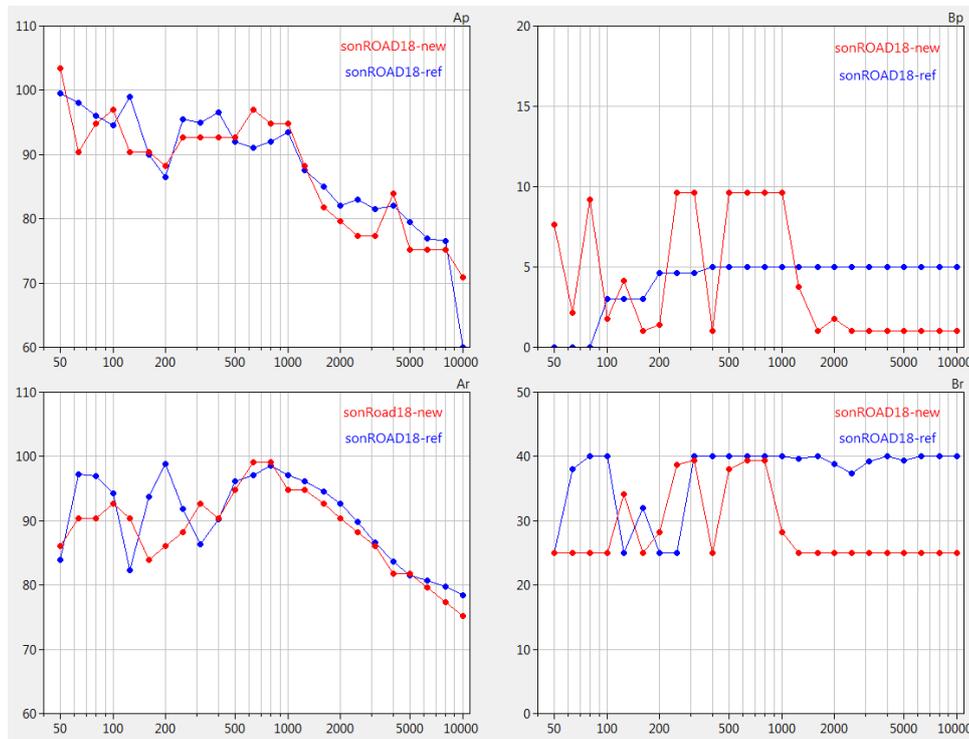


Abbildung 3: Spektrale Modellparameter in rot im Vergleich zu den Standardwerten SWISS10 cat 1 (blau).

freq	Ap	Bp	Ar	Br
50	103.5	7.7	86.1	25.0
63	90.4	2.2	90.4	25.0
80	94.8	9.2	90.4	25.0
100	97.0	1.8	92.6	25.0
125	90.4	4.1	90.4	34.1
160	90.4	1.0	83.9	25.0
200	88.3	1.4	86.1	28.3
250	92.6	9.6	88.3	38.7
315	92.6	9.6	92.6	39.3
400	92.6	1.0	90.4	25.0
500	92.6	9.6	94.8	38.0
630	97.0	9.6	99.1	39.3
800	94.8	9.6	99.1	39.3
1000	94.8	9.6	94.8	28.3
1250	88.3	3.7	94.8	25.0
1600	81.7	1.0	92.6	25.0
2000	79.6	1.8	90.4	25.0
2500	77.4	1.0	88.3	25.0
3150	77.4	1.0	86.1	25.0
4000	83.9	1.0	81.7	25.0
5000	75.2	1.0	81.7	25.0
6300	75.2	1.0	79.6	25.0
8000	75.2	1.0	77.4	25.0
10000	70.9	1.0	75.2	25.0

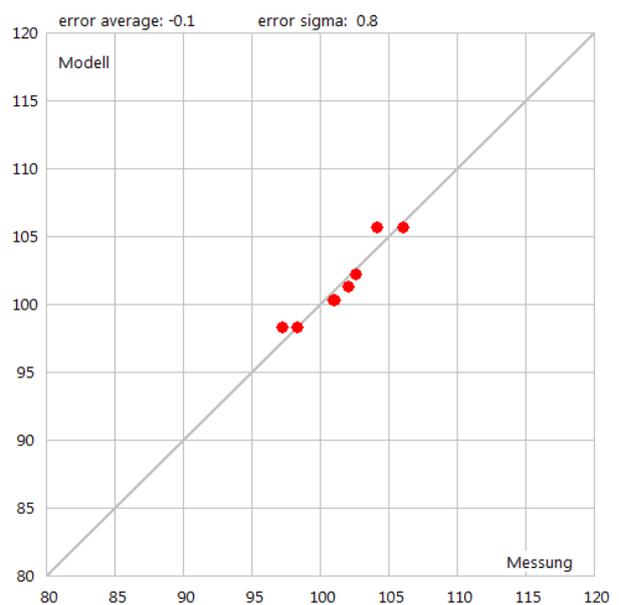


Abbildung 4: X-Y Plot der gemessenen und modellierten A-Summenpegel.

3. Ergebnisse Luzern

Bei den Messungen in Luzern wurde gestützt auf die Messpegel im oberen Frequenzbereich am Personewagen folgende Belagszuordnung in sonROAD18 festgelegt:

Standort	Belag gemäss Messprotokoll	Belag in sonROAD18
Hirtenhof	AC11	AC11
Langensand	SDA4	SDA4
Tribschen	AC11	AC11
Tribschen2	SDA8	SDA8

In der Optimierung der Modellparameter wurde bei allen Bustypen - d.h. auch bei den elektrisch angetriebenen - sowohl eine Antriebs- als auch eine Motorgeräuschkomponente zugelassen. Bei den Elektrofahrzeugen hat das Weglassen des Antriebsgeräusches keine befriedigende Übereinstimmung mit den Messungen ergeben.

Für den Bus 1 ergibt sich ein optimales Parametersetting gemäss Abbildung 5 und damit eine Reproduktion der Messung durch das Modell entsprechend Abbildung 6 mit einem mittleren Fehler von -0.4 dB(A) und einer Standardunsicherheit von 2.2 dB(A). Der Parameter Ar wurde von 63 bis 160 Hz manuell gesetzt.

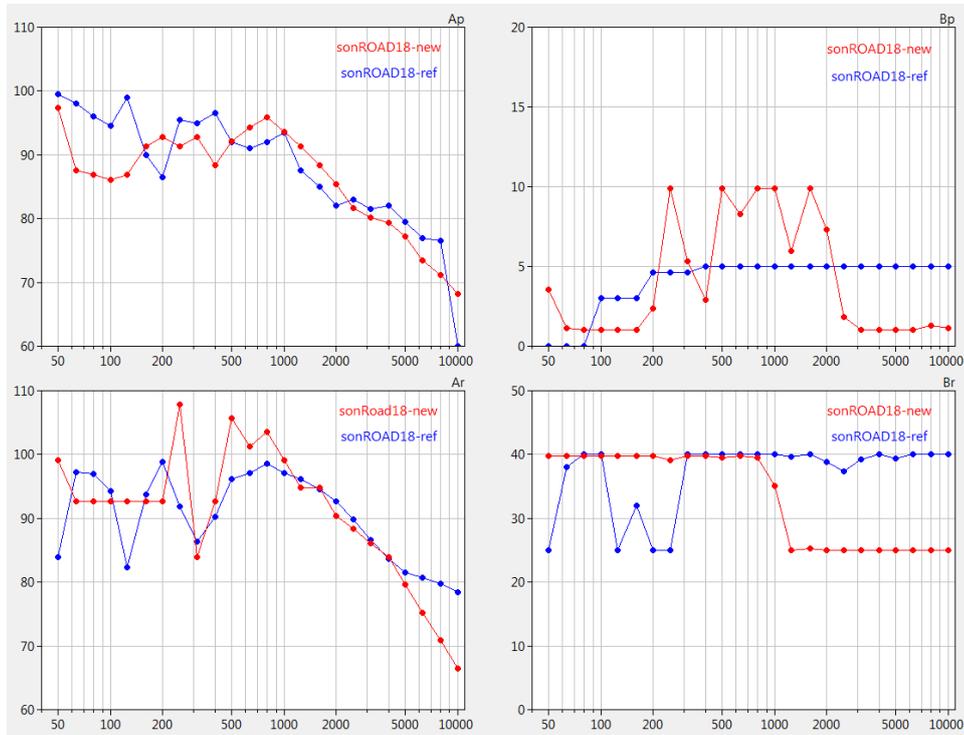


Abbildung 5: Spektrale Modellparameter in rot im Vergleich zu den Standardwerten SWISS10 cat 1 (blau).

freq	Ap	Bp	Ar	Br
50	97.3	3.6	99.1	39.8
63	87.6	1.1	92.6	39.8
80	86.9	1.0	92.6	39.8
100	86.1	1.0	92.6	39.8
125	86.9	1.0	92.6	39.8
160	91.3	1.0	92.6	39.8
200	92.8	2.3	92.6	39.8
250	91.3	9.9	107.8	39.1
315	92.8	5.3	83.9	39.8
400	88.4	2.9	92.6	39.8
500	92.1	9.9	105.7	39.6
630	94.3	8.3	101.3	39.8
800	95.8	9.9	103.5	39.6
1000	93.6	9.9	99.1	35.1
1250	91.3	6.0	94.8	25.0
1600	88.4	9.9	94.8	25.2
2000	85.4	7.3	90.4	25.0
2500	81.6	1.8	88.3	25.0
3150	80.1	1.0	86.1	25.0
4000	79.4	1.0	83.9	25.0
5000	77.2	1.0	79.6	25.0
6300	73.4	1.0	75.2	25.0
8000	71.2	1.3	70.9	25.0
10000	68.2	1.1	66.5	25.0

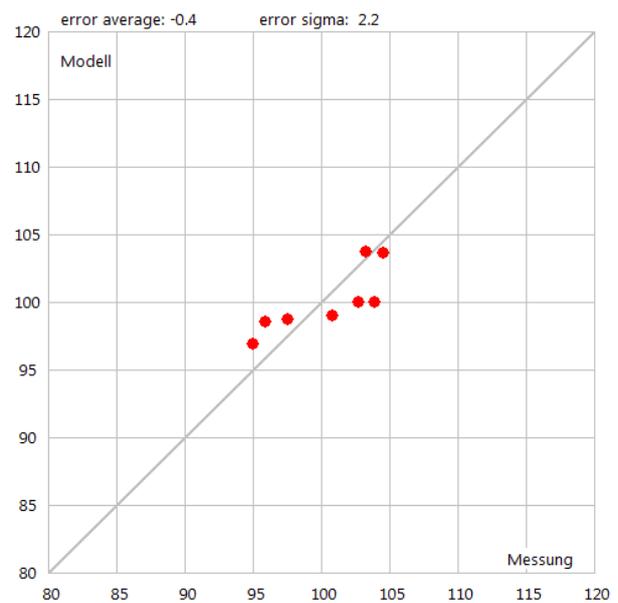


Abbildung 6: X-Y Plot der gemessenen und modellierten A-Summenpegel.

Für den Bus 2 ergibt sich ein optimales Parametersetting gemäss Abbildung 7 und damit eine Reproduktion der Messung durch das Modell entsprechend Abbildung 8 mit einem mittleren Fehler von -0.5 dB(A) und einer Standardunsicherheit von 2.5 dB(A). Der Parameter Ar wurde von 63 bis 315 Hz manuell gesetzt.

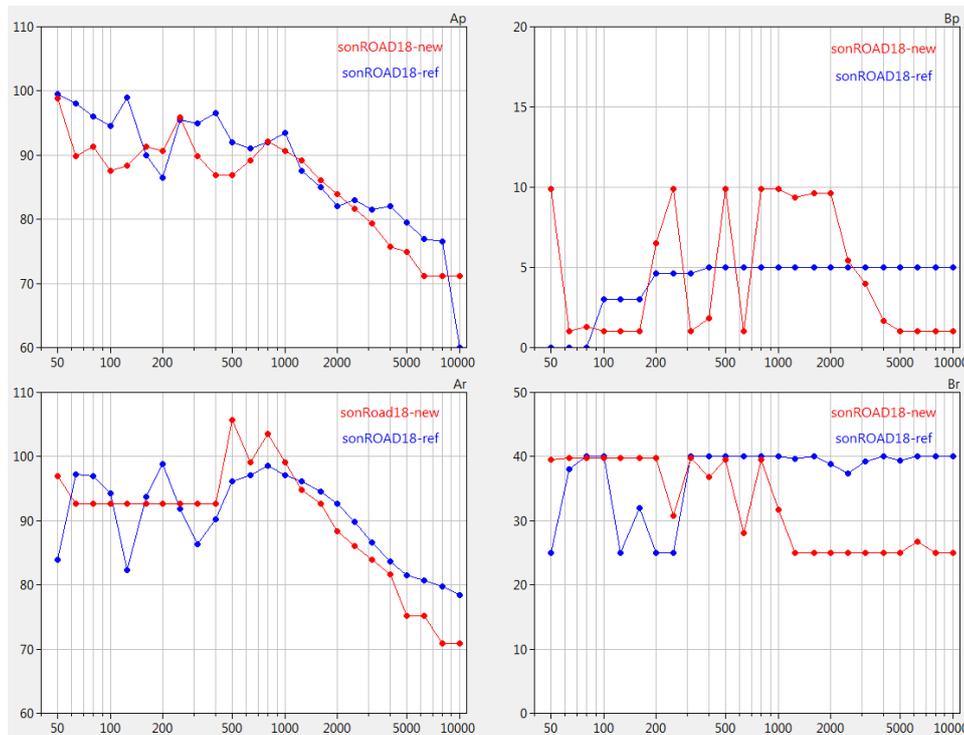


Abbildung 7: Spektrale Modellparameter in rot im Vergleich zu den Standardwerten SWISS10 cat 1 (blau).

freq	Ap	Bp	Ar	Br
50	98.8	9.9	97.0	39.6
63	89.9	1.0	92.6	39.8
80	91.3	1.3	92.6	39.8
100	87.6	1.0	92.6	39.8
125	88.4	1.0	92.6	39.8
160	91.3	1.0	92.6	39.8
200	90.6	6.5	92.6	39.8
250	95.8	9.9	92.6	30.8
315	89.9	1.0	92.6	39.8
400	86.9	1.8	92.6	36.9
500	86.9	9.9	105.7	39.6
630	89.1	1.0	99.1	28.1
800	92.1	9.9	103.5	39.6
1000	90.6	9.9	99.1	31.7
1250	89.1	9.3	94.8	25.0
1600	86.1	9.6	92.6	25.0
2000	83.9	9.6	88.3	25.0
2500	81.6	5.4	86.1	25.0
3150	79.4	4.0	83.9	25.0
4000	75.7	1.7	81.7	25.0
5000	74.9	1.0	75.2	25.0
6300	71.2	1.0	75.2	26.8
8000	71.2	1.0	70.9	25.0
10000	71.2	1.0	70.9	25.0

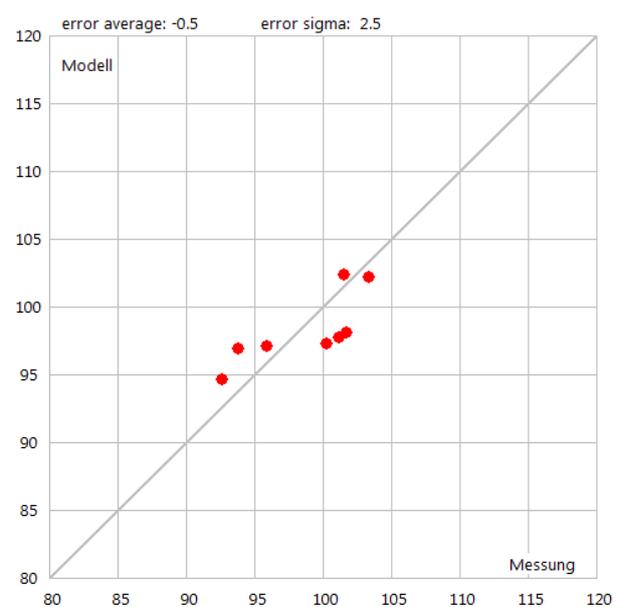


Abbildung 8: X-Y Plot der gemessenen und modellierten A-Summenpegel.

Für den Bus 3 ergibt sich ein optimales Parametersetting gemäss Abbildung 9 und damit eine Reproduktion der Messung durch das Modell entsprechend Abbildung 10 mit einem mittleren Fehler von -0.4 dB(A) und einer Standardunsicherheit von 2.4 dB(A). Der Parameter Ar wurde von 160 bis 315 Hz manuell gesetzt.

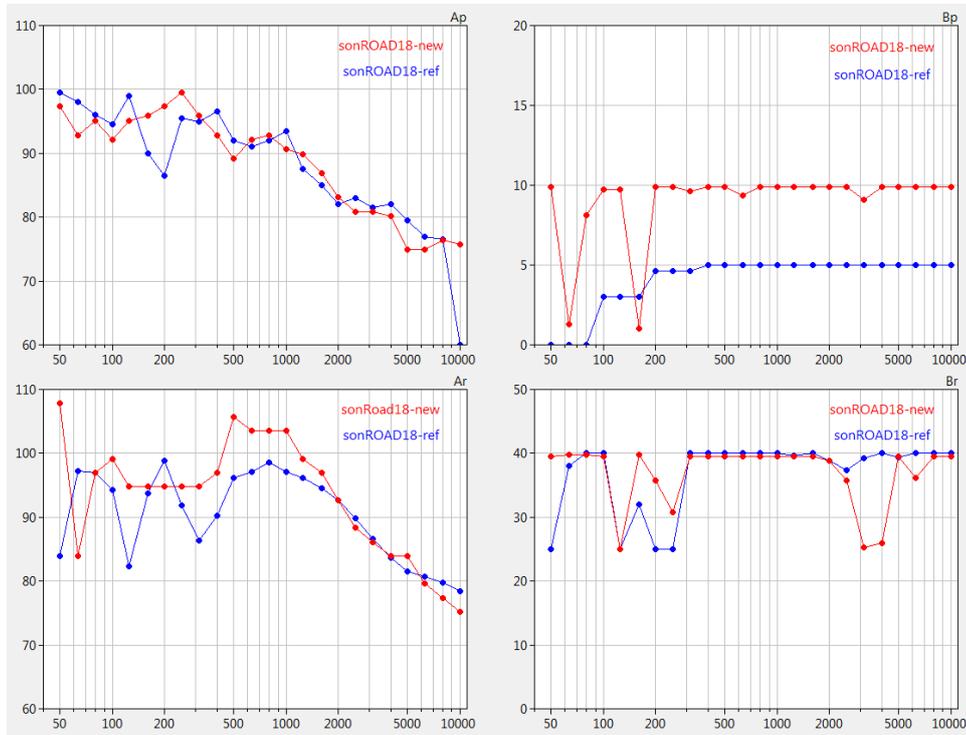


Abbildung 9: Spektrale Modellparameter in rot im Vergleich zu den Standardwerten SWISS10 cat 1 (blau).

freq	Ap	Bp	Ar	Br
50	97.3	9.9	107.8	39.6
63	92.8	1.3	83.9	39.8
80	95.1	8.1	97.0	39.8
100	92.1	9.7	99.1	39.6
125	95.1	9.7	94.8	25.0
160	95.8	1.0	94.8	39.8
200	97.3	9.9	94.8	35.7
250	99.6	9.9	94.8	30.8
315	95.8	9.6	94.8	39.6
400	92.8	9.9	97.0	39.6
500	89.1	9.9	105.7	39.6
630	92.1	9.3	103.5	39.6
800	92.8	9.9	103.5	39.6
1000	90.6	9.9	103.5	39.6
1250	89.9	9.9	99.1	39.6
1600	86.9	9.9	97.0	39.6
2000	83.1	9.9	92.6	38.9
2500	80.9	9.9	88.3	35.7
3150	80.9	9.1	86.1	25.2
4000	80.1	9.9	83.9	25.9
5000	74.9	9.9	83.9	39.6
6300	74.9	9.9	79.6	36.2
8000	76.4	9.9	77.4	39.6
10000	75.7	9.9	75.2	39.6

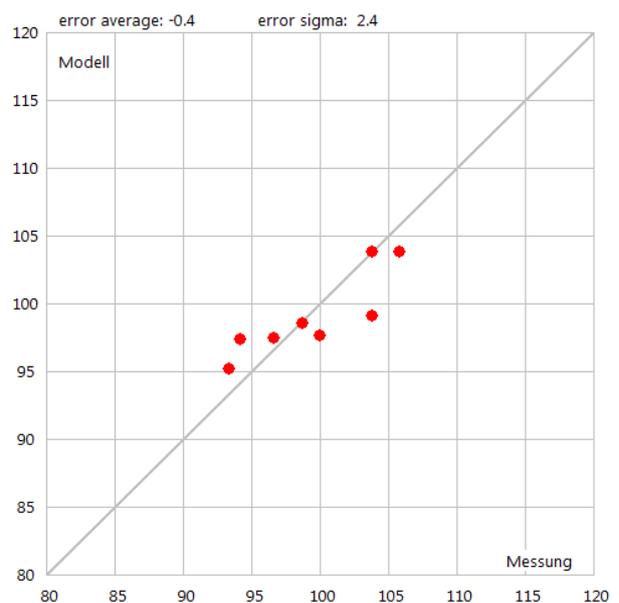


Abbildung 10: X-Y Plot der gemessenen und modellierten A-Summenpegel.

Für den Bus 4 ergibt sich ein optimales Parametersetting gemäss Abbildung 11 und damit eine Reproduktion der Messung durch das Modell entsprechend Abbildung 12 mit einem mittleren Fehler von -0.3 dB(A) und einer Standardunsicherheit von 1.7 dB(A).

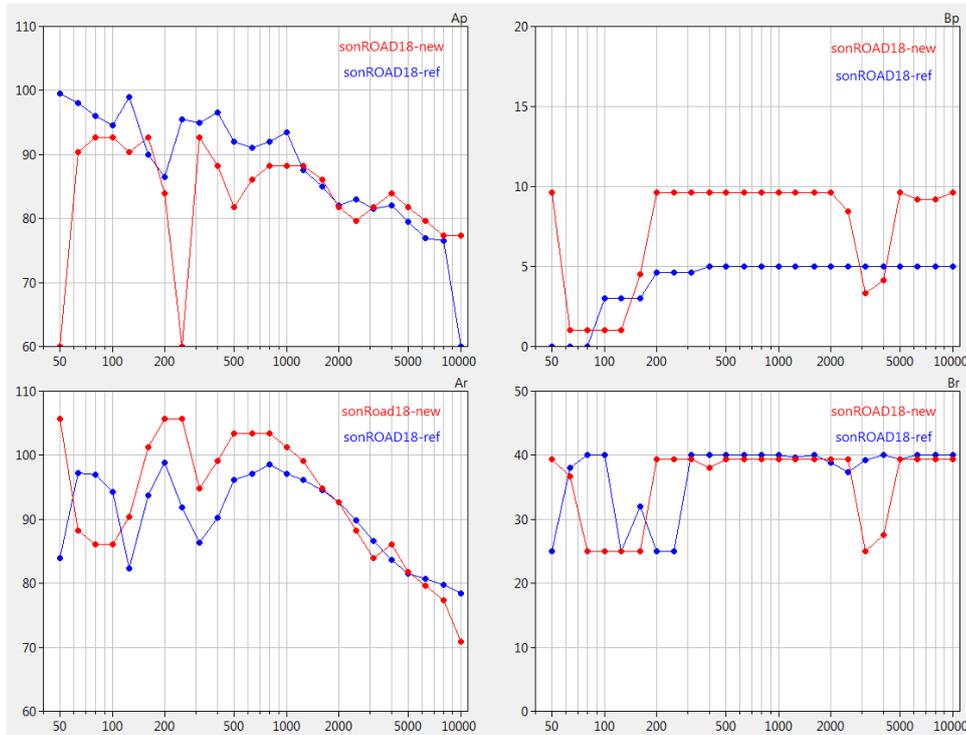


Abbildung 11: Spektrale Modellparameter in rot im Vergleich zu den Standardwerten SWISS10 cat 1 (blau).

freq	Ap	Bp	Ar	Br
50	60.0	9.6	105.7	39.3
63	90.4	1.0	88.3	36.7
80	92.6	1.0	86.1	25.0
100	92.6	1.0	86.1	25.0
125	90.4	1.0	90.4	25.0
160	92.6	4.5	101.3	25.0
200	83.9	9.6	105.7	39.3
250	60.0	9.6	105.7	39.3
315	92.6	9.6	94.8	39.3
400	88.3	9.6	99.1	38.0
500	81.7	9.6	103.5	39.3
630	86.1	9.6	103.5	39.3
800	88.3	9.6	103.5	39.3
1000	88.3	9.6	101.3	39.3
1250	88.3	9.6	99.1	39.3
1600	86.1	9.6	94.8	39.3
2000	81.7	9.6	92.6	39.3
2500	79.6	8.4	88.3	39.3
3150	81.7	3.3	83.9	25.0
4000	83.9	4.1	86.1	27.6
5000	81.7	9.6	81.7	39.3
6300	79.6	9.2	79.6	39.3
8000	77.4	9.2	77.4	39.3
10000	77.4	9.6	70.9	39.3

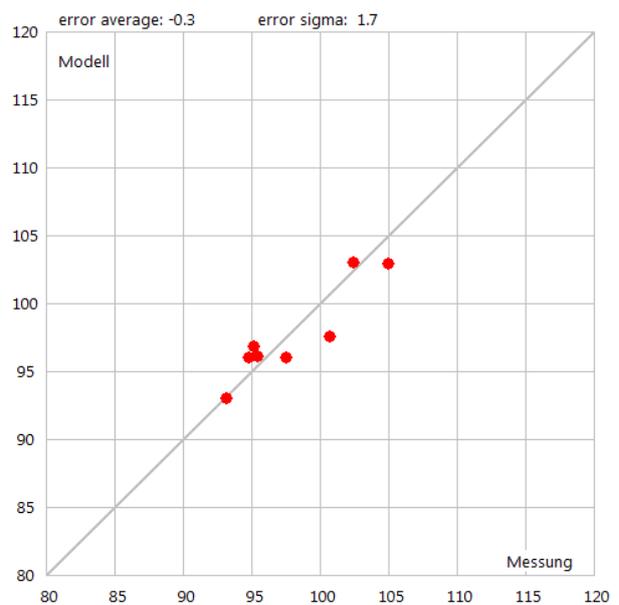


Abbildung 12: X-Y Plot der gemessenen und modellierten A-Summenpegel.

4. Ergebnisse Zürich

Die Messungen in Zürich wurden alle am gleichen Standort auf einem ACMR (2009) Belag durchgeführt. Für das Parametertuning mit sonROAD18 wurde der ACMR8 Referenzbelag angenommen. Für die elektrisch angetriebenen Busse 2.1 bis 2.4 wurde die Optimierung einmal mit und einmal ohne Antriebsgeräusch durchgeführt.

Für den Bus 1.1 ergibt sich ein optimales Parametersetting gemäss Abbildung 13 und damit eine Reproduktion der Messung durch das Modell entsprechend Abbildung 14 mit einem mittleren Fehler von 0.0 dB(A) und einer Standardunsicherheit von 0.2 dB(A). Der Parameter Ar wurde von 100 bis 315 Hz manuell gesetzt.

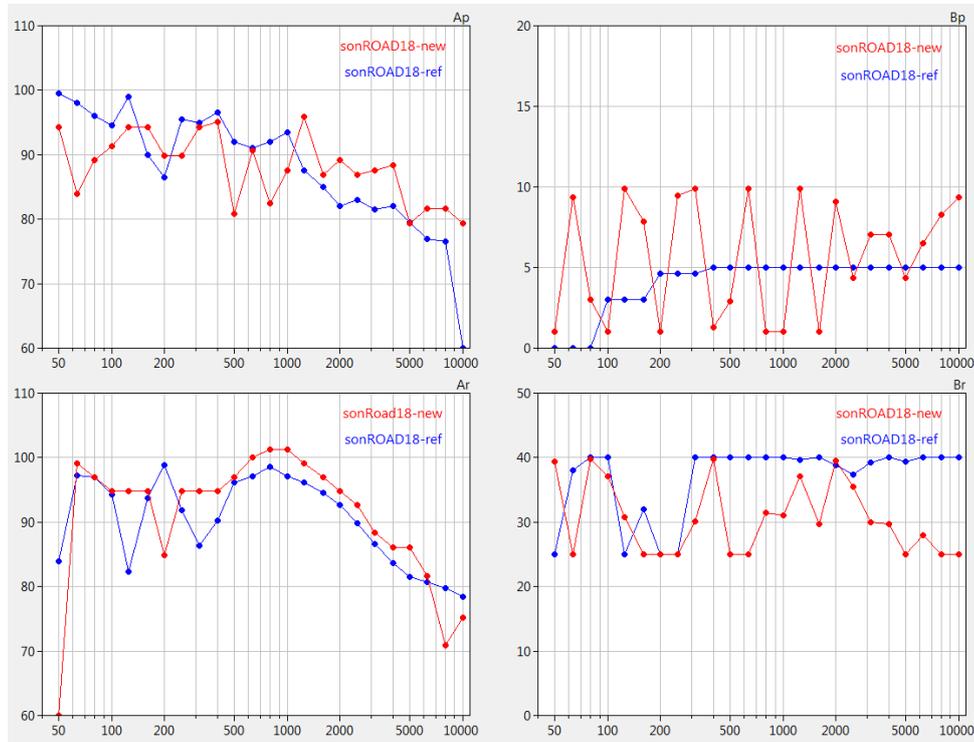


Abbildung 13: Spektrale Modellparameter in rot im Vergleich zu den Standardwerten SWISS10 cat 1 (blau).

freq	Ap	Bp	Ar	Br
50	94.3	1.0	60.0	39.3
63	83.9	9.3	99.1	25.0
80	89.1	3.0	97.0	39.8
100	91.3	1.0	94.8	37.1
125	94.3	9.9	94.8	30.8
160	94.3	7.9	94.8	25.0
200	89.9	1.0	84.8	25.0
250	89.9	9.5	94.8	25.0
315	94.3	9.9	94.8	30.1
400	95.1	1.3	94.8	39.8
500	80.9	2.9	97.0	25.0
630	90.6	9.9	100.0	25.0
800	82.4	1.0	101.3	31.5
1000	87.6	1.0	101.3	31.0
1250	95.8	9.9	99.1	37.1
1600	86.9	1.0	97.0	29.7
2000	89.1	9.1	94.8	39.6
2500	86.9	4.4	92.6	35.5
3150	87.6	7.0	88.3	29.9
4000	88.4	7.0	86.1	29.7
5000	79.4	4.4	86.1	25.0
6300	81.6	6.5	81.7	27.9
8000	81.6	8.3	70.9	25.0
10000	79.4	9.3	75.2	25.0

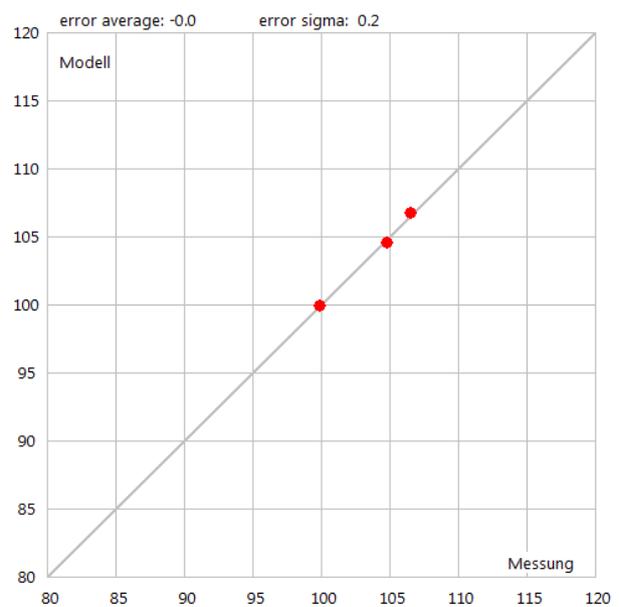


Abbildung 14: X-Y Plot der gemessenen und modellierten A-Summenpegel.

Für den Bus 1.2 ergibt sich ein optimales Parametersetting gemäss Abbildung 15 und damit eine Reproduktion der Messung durch das Modell entsprechend Abbildung 16 mit einem mittleren Fehler von -0.3 dB(A) und einer Standardunsicherheit von 0.5 dB(A). Der Parameter Ar wurde von 50 bis 400 Hz manuell gesetzt.

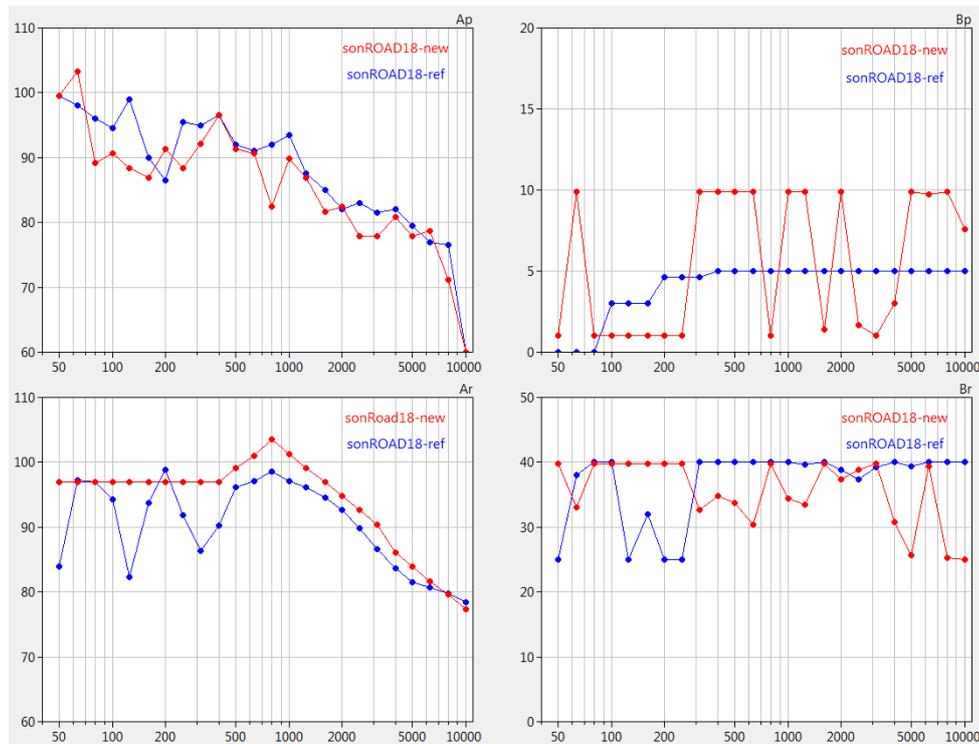


Abbildung 15: Spektrale Modellparameter in rot im Vergleich zu den Standardwerten SWISS10 cat 1 (blau).

freq	Ap	Bp	Ar	Br
50	99.6	1.0	97.0	39.8
63	103.3	9.9	97.0	33.1
80	89.1	1.0	97.0	39.8
100	90.6	1.0	97.0	39.8
125	88.4	1.0	97.0	39.8
160	86.9	1.0	97.0	39.8
200	91.3	1.0	97.0	39.8
250	88.4	1.0	97.0	39.8
315	92.1	9.9	97.0	32.6
400	96.6	9.9	97.0	34.9
500	91.3	9.9	99.1	33.7
630	90.6	9.9	101.0	30.4
800	82.4	1.0	103.5	39.8
1000	89.9	9.9	101.3	34.4
1250	86.9	9.9	99.1	33.5
1600	81.6	1.4	97.0	39.8
2000	82.4	9.9	94.8	37.3
2500	77.9	1.7	92.6	38.9
3150	77.9	1.0	90.4	39.8
4000	80.9	3.0	86.1	30.8
5000	77.9	9.9	83.9	25.7
6300	78.7	9.7	81.7	39.3
8000	71.2	9.9	79.6	25.2
10000	60.0	7.6	77.4	25.0

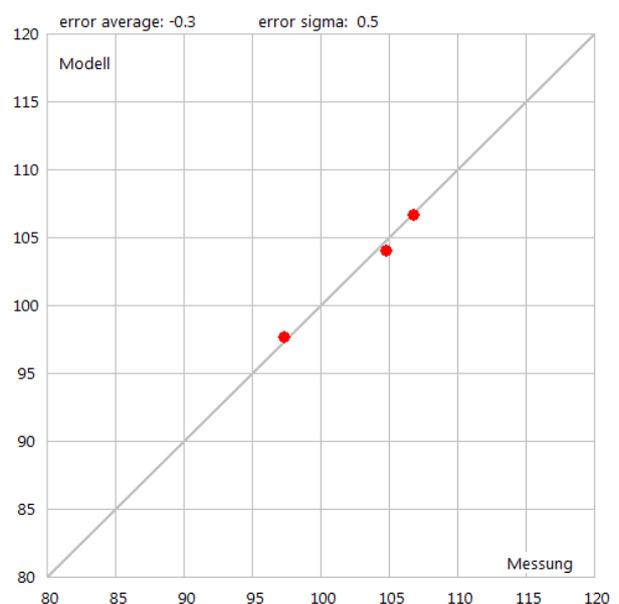


Abbildung 16: X-Y Plot der gemessenen und modellierten A-Summenpegel.

Für den Bus 1.3 ergibt sich ein optimales Parametersetting gemäss Abbildung 17 und damit eine Reproduktion der Messung durch das Modell entsprechend Abbildung 18 mit einem mittleren Fehler von -0.4 dB(A) und einer Standardunsicherheit von 0.6 dB(A). Der Parameter Ar wurde von 200 bis 500 Hz manuell gesetzt.

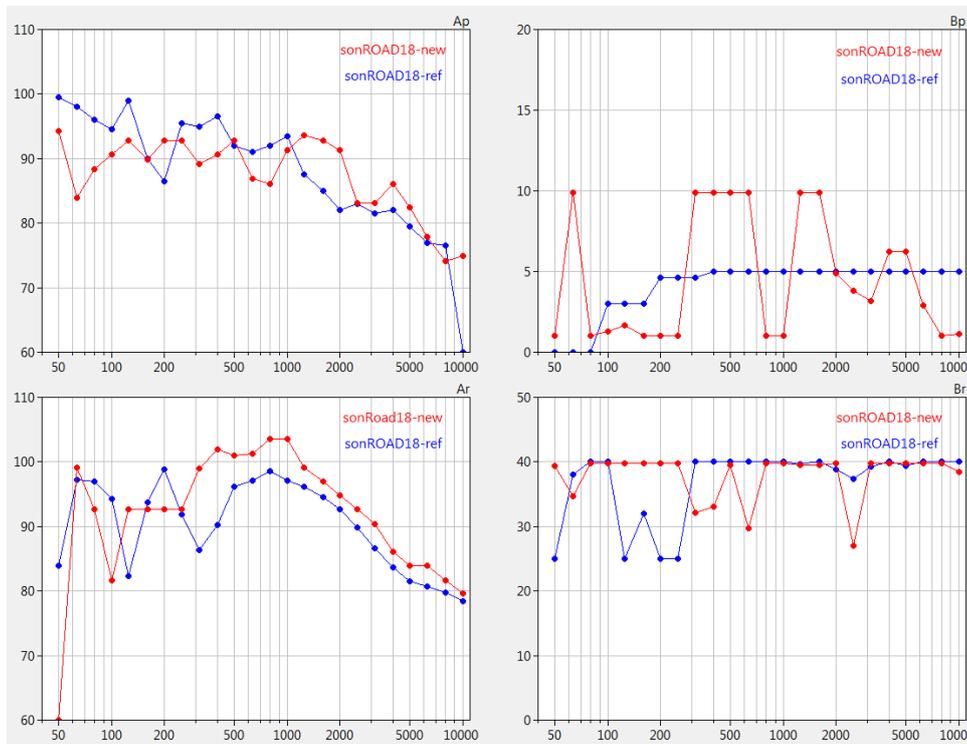


Abbildung 17: Spektrale Modellparameter in rot im Vergleich zu den Standardwerten SWISS10 cat 1 (blau).

freq	Ap	Bp	Ar	Br
50	94.3	1.0	60.0	39.3
63	83.9	9.9	99.1	34.6
80	88.4	1.0	92.6	39.8
100	90.6	1.3	81.7	39.8
125	92.8	1.7	92.6	39.8
160	89.9	1.0	92.6	39.8
200	92.8	1.0	92.6	39.8
250	92.8	1.0	92.6	39.8
315	89.1	9.9	99.0	32.2
400	90.6	9.9	102.0	33.1
500	92.8	9.9	101.0	39.6
630	86.9	9.9	101.3	29.7
800	86.1	1.0	103.5	39.8
1000	91.3	1.0	103.5	39.8
1250	93.6	9.9	99.1	39.6
1600	92.8	9.9	97.0	39.6
2000	91.3	4.9	94.8	39.8
2500	83.1	3.8	92.6	27.0
3150	83.1	3.1	90.4	39.8
4000	86.1	6.2	86.1	39.8
5000	82.4	6.2	83.9	39.8
6300	77.9	2.9	83.9	39.8
8000	74.2	1.0	81.7	39.8
10000	74.9	1.1	79.6	38.4

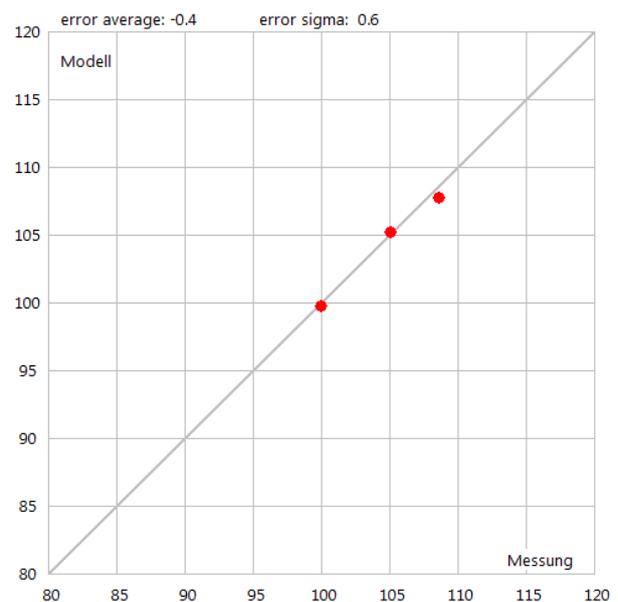


Abbildung 18: X-Y Plot der gemessenen und modellierten A-Summenpegel.

Für den Bus 1.4 ergibt sich ein optimales Parametersetting gemäss Abbildung 19 und damit eine Reproduktion der Messung durch das Modell entsprechend Abbildung 20 mit einem mittleren Fehler von -0.2 dB(A) und einer Standardunsicherheit von 0.3 dB(A). Der Parameter Ar wurde von 250 bis 315 Hz manuell gesetzt.

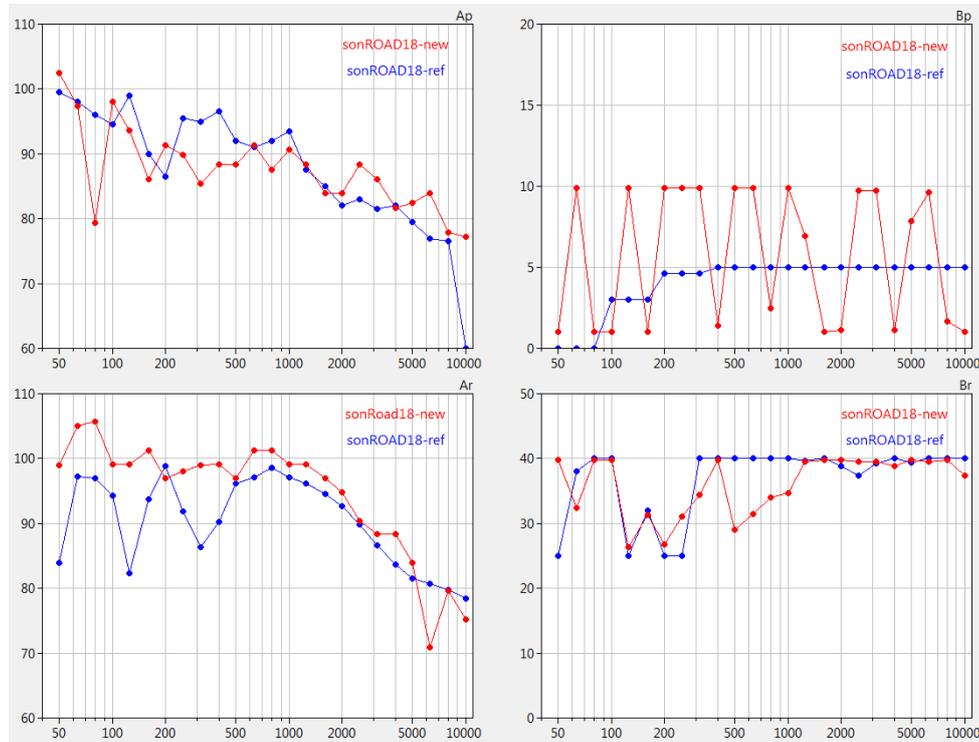


Abbildung 19: Spektrale Modellparameter in rot im Vergleich zu den Standardwerten SWISS10 cat 1 (blau).

freq	Ap	Bp	Ar	Br
50	102.5	1.0	99.0	39.8
63	97.3	9.9	105.0	32.4
80	79.4	1.0	105.7	39.8
100	98.1	1.0	99.1	39.8
125	93.6	9.9	99.1	26.3
160	86.1	1.0	101.3	31.3
200	91.3	9.9	97.0	26.8
250	89.9	9.9	98.0	31.0
315	85.4	9.9	99.0	34.4
400	88.4	1.4	99.1	39.8
500	88.4	9.9	97.0	29.0
630	91.3	9.9	101.3	31.5
800	87.6	2.5	101.3	34.0
1000	90.6	9.9	99.1	34.6
1250	88.4	6.9	99.1	39.6
1600	83.9	1.0	97.0	39.8
2000	83.9	1.1	94.8	39.8
2500	88.4	9.7	90.4	39.6
3150	86.1	9.7	88.3	39.6
4000	81.6	1.1	88.3	38.9
5000	82.4	7.9	83.9	39.8
6300	83.9	9.6	70.9	39.6
8000	77.9	1.7	79.6	39.8
10000	77.2	1.0	75.2	37.3

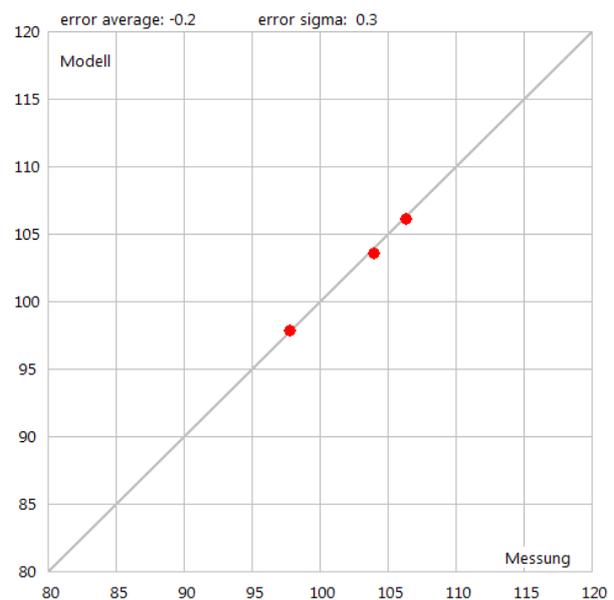


Abbildung 20: X-Y Plot der gemessenen und modellierten A-Summenpegel.

Für den Bus 1.5 ergibt sich ein optimales Parametersetting gemäss Abbildung 21 und damit eine Reproduktion der Messung durch das Modell entsprechend Abbildung 22 mit einem mittleren Fehler von -0.1 dB(A) und einer Standardunsicherheit von 0.2 dB(A). Der Parameter Ar wurde von 63 bis 80 Hz manuell gesetzt.

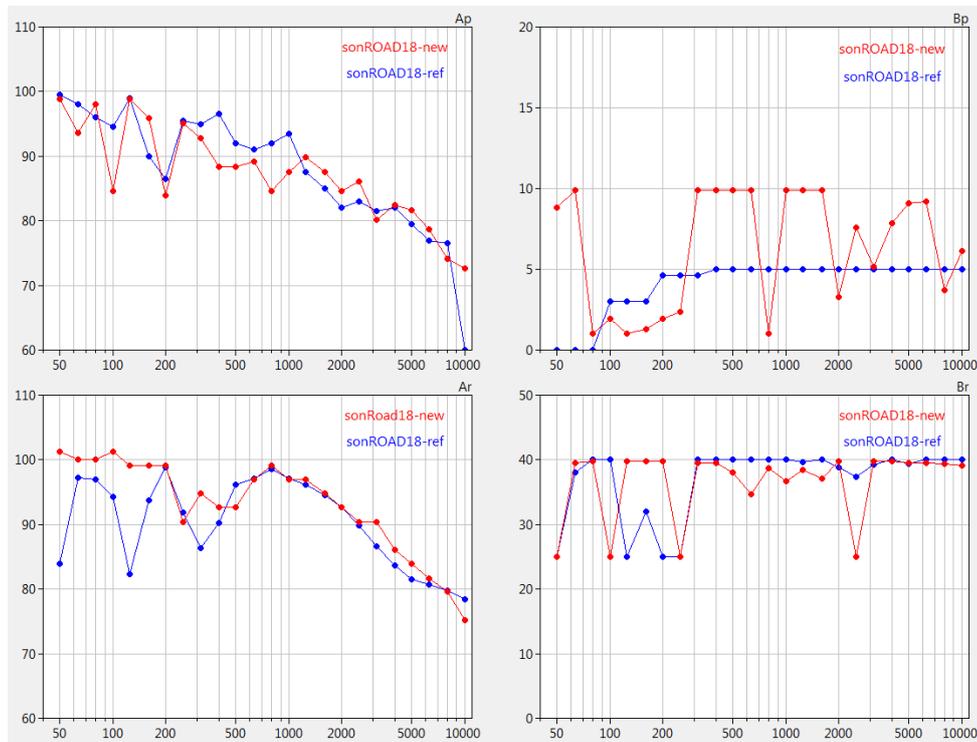


Abbildung 21: Spektrale Modellparameter in rot im Vergleich zu den Standardwerten SWISS10 cat 1 (blau).

freq	Ap	Bp	Ar	Br
50	98.8	8.8	101.3	25.0
63	93.6	9.9	100.0	39.6
80	98.1	1.0	100.0	39.8
100	84.6	1.9	101.3	25.0
125	98.8	1.0	99.1	39.8
160	95.8	1.3	99.1	39.8
200	83.9	1.9	99.1	39.8
250	95.1	2.3	90.4	25.0
315	92.8	9.9	94.8	39.6
400	88.4	9.9	92.6	39.6
500	88.4	9.9	92.6	38.0
630	89.1	9.9	97.0	34.6
800	84.6	1.0	99.1	38.7
1000	87.6	9.9	97.0	36.6
1250	89.9	9.9	97.0	38.4
1600	87.6	9.9	94.8	37.1
2000	84.6	3.3	92.6	39.8
2500	86.1	7.6	90.4	25.0
3150	80.1	5.2	90.4	39.8
4000	82.4	7.9	86.1	39.8
5000	81.6	9.1	83.9	39.6
6300	78.7	9.2	81.7	39.6
8000	74.2	3.7	79.6	39.3
10000	72.7	6.1	75.2	39.1

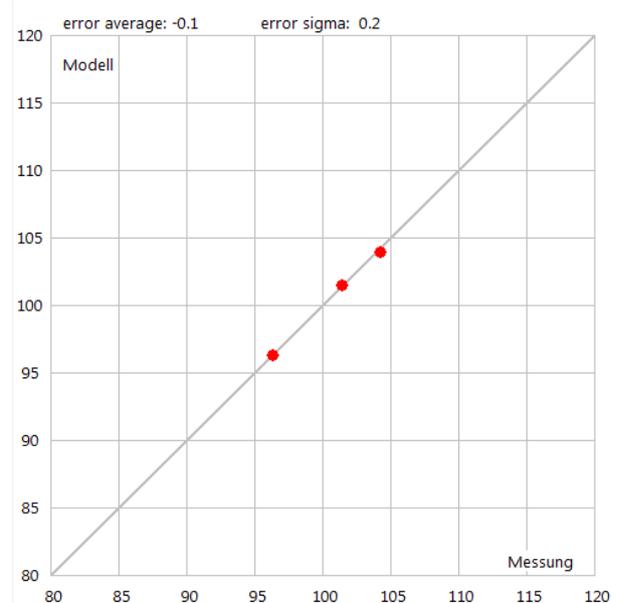


Abbildung 22: X-Y Plot der gemessenen und modellierten A-Summenpegel.

Für den Bus 2.1 ergibt sich **ohne** Antriebsgeräusch ein optimales Parametersetting gemäss Abbildung 23 und damit eine Reproduktion der Messung durch das Modell entsprechend Abbildung 24 mit einem mittleren Fehler von -0.2 dB(A) und einer Standardunsicherheit von 0.2 dB(A).

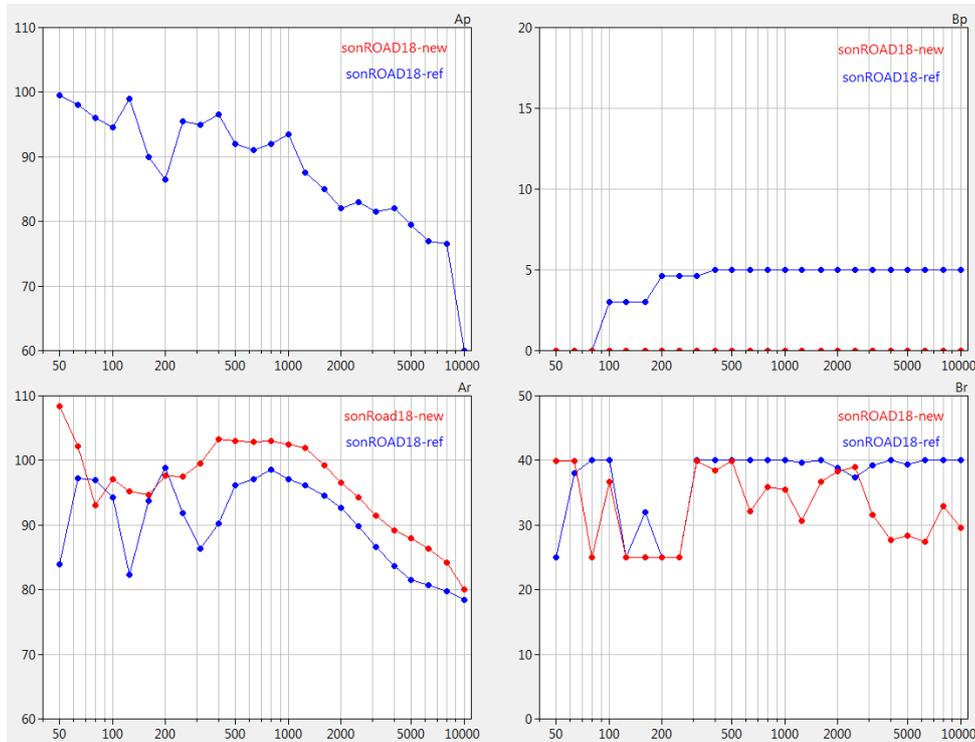


Abbildung 23: Spektrale Modellparameter in rot im Vergleich zu den Standardwerten SWISS10 cat 1 (blau).

freq	Ap	Bp	Ar	Br
50	0.0	0.0	108.4	39.9
63	0.0	0.0	102.2	39.9
80	0.0	0.0	93.1	25.0
100	0.0	0.0	97.0	36.7
125	0.0	0.0	95.2	25.0
160	0.0	0.0	94.7	25.0
200	0.0	0.0	97.6	25.0
250	0.0	0.0	97.5	25.0
315	0.0	0.0	99.5	39.9
400	0.0	0.0	103.2	38.4
500	0.0	0.0	103.0	39.9
630	0.0	0.0	102.9	32.1
800	0.0	0.0	103.1	35.9
1000	0.0	0.0	102.5	35.5
1250	0.0	0.0	102.0	30.6
1600	0.0	0.0	99.2	36.6
2000	0.0	0.0	96.5	38.4
2500	0.0	0.0	94.3	39.0
3150	0.0	0.0	91.4	31.6
4000	0.0	0.0	89.1	27.7
5000	0.0	0.0	88.0	28.3
6300	0.0	0.0	86.3	27.4
8000	0.0	0.0	84.2	32.9
10000	0.0	0.0	80.0	29.5

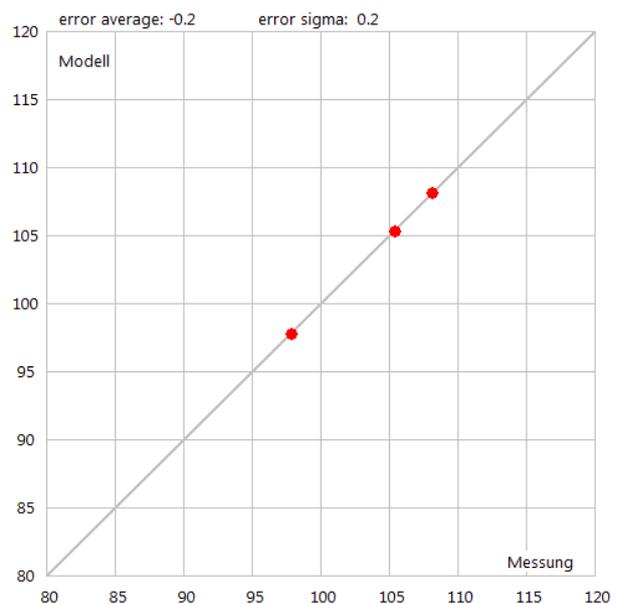


Abbildung 24: X-Y Plot der gemessenen und modellierten A-Summenpegel.

Für den Bus 2.1 ergibt sich **mit** Antriebsgeräusch ein optimales Parametersetting gemäss Abbildung 25 und damit eine Reproduktion der Messung durch das Modell entsprechend Abbildung 25 mit einem mittleren Fehler von 0.0 dB(A) und einer Standardunsicherheit von 0.1 dB(A).

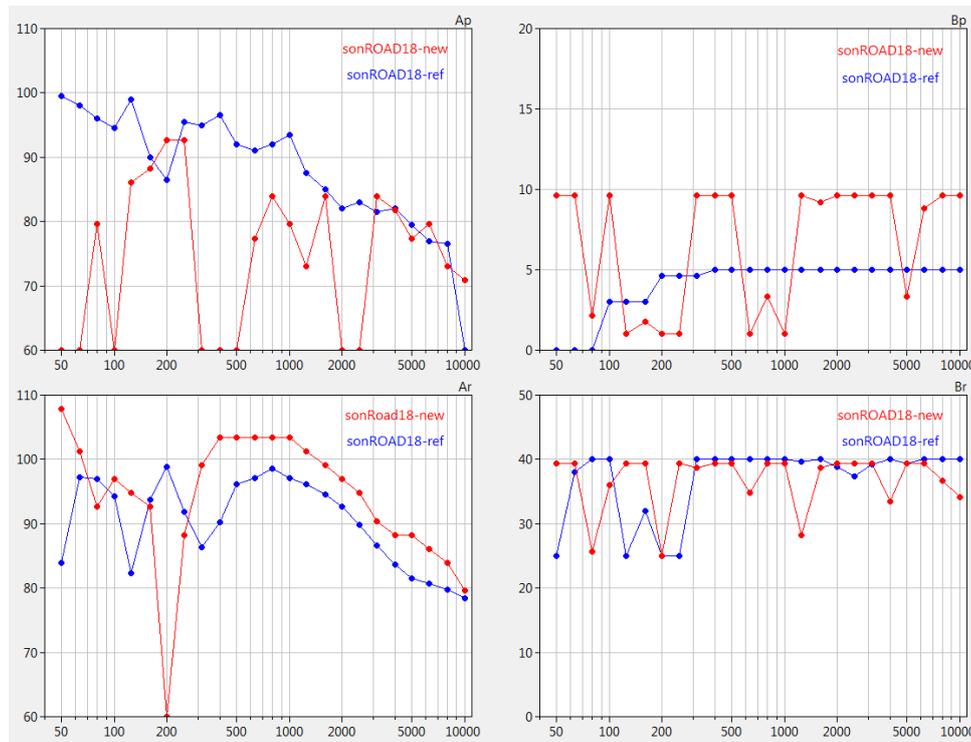


Abbildung 25: Spektrale Modellparameter in rot im Vergleich zu den Standardwerten SWISS10 cat 1 (blau).

freq	Ap	Bp	Ar	Br
50	60.0	9.6	107.8	39.3
63	60.0	9.6	101.3	39.3
80	79.6	2.2	92.6	25.7
100	60.0	9.6	97.0	36.1
125	86.1	1.0	94.8	39.3
160	88.3	1.8	92.6	39.3
200	92.6	1.0	60.0	25.0
250	92.6	1.0	88.3	39.3
315	60.0	9.6	99.1	38.7
400	60.0	9.6	103.5	39.3
500	60.0	9.6	103.5	39.3
630	77.4	1.0	103.5	34.8
800	83.9	3.3	103.5	39.3
1000	79.6	1.0	103.5	39.3
1250	73.0	9.6	101.3	28.3
1600	83.9	9.2	99.1	38.7
2000	60.0	9.6	97.0	39.3
2500	60.0	9.6	94.8	39.3
3150	83.9	9.6	90.4	39.3
4000	81.7	9.6	88.3	33.5
5000	77.4	3.3	88.3	39.3
6300	79.6	8.8	86.1	39.3
8000	73.0	9.6	83.9	36.7
10000	70.9	9.6	79.6	34.1

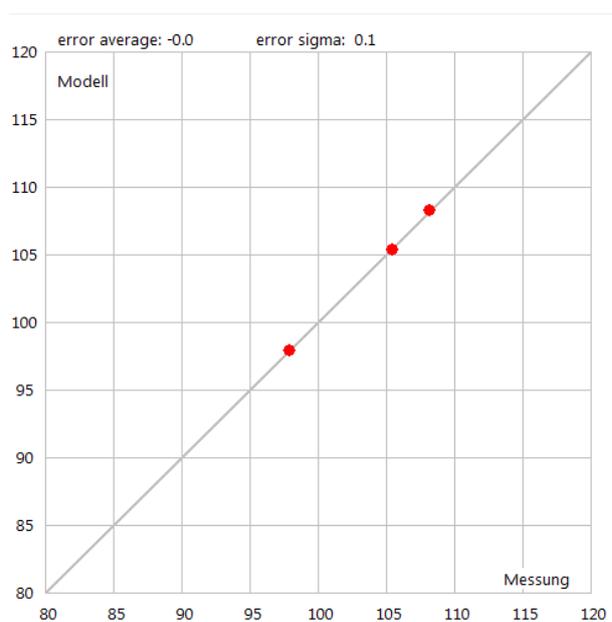


Abbildung 26: X-Y Plot der gemessenen und modellierten A-Summenpegel.

Für den Bus 2.2 ergibt sich **ohne** Antriebsgeräusch ein optimales Parametersetting gemäss Abbildung 27 und damit eine Reproduktion der Messung durch das Modell entsprechend Abbildung 28 mit einem mittleren Fehler von -0.3 dB(A) und einer Standardunsicherheit von 0.5 dB(A).

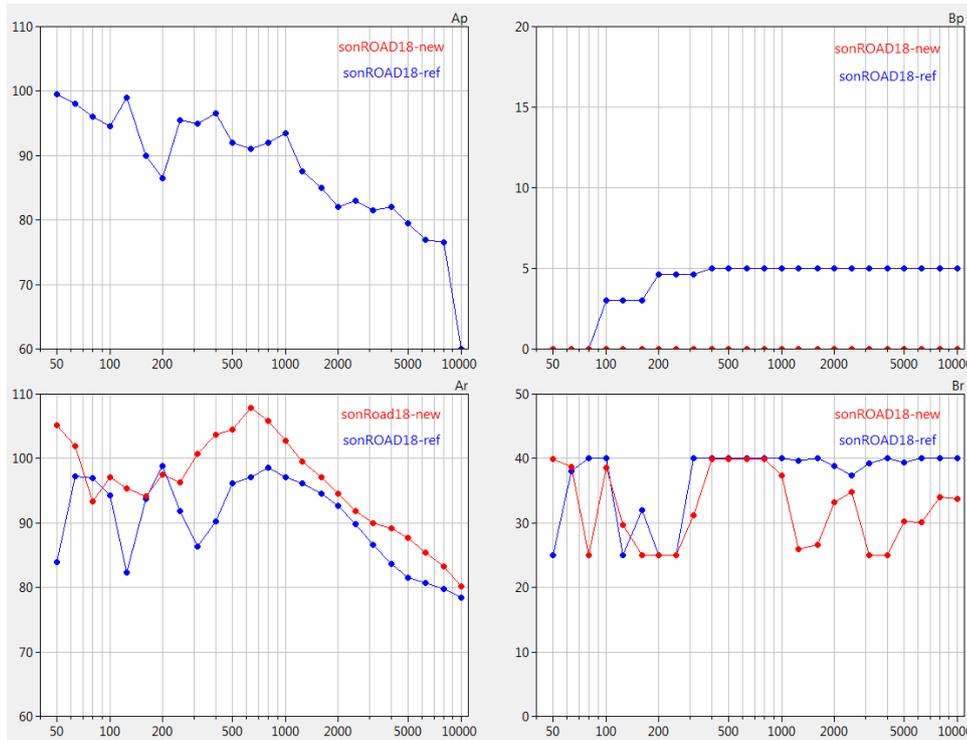


Abbildung 27: Spektrale Modellparameter in rot im Vergleich zu den Standardwerten SWISS10 cat 1 (blau).

freq	Ap	Bp	Ar	Br
50	0.0	0.0	105.2	39.9
63	0.0	0.0	101.9	38.8
80	0.0	0.0	93.3	25.0
100	0.0	0.0	97.1	38.5
125	0.0	0.0	95.3	29.7
160	0.0	0.0	94.1	25.0
200	0.0	0.0	97.5	25.0
250	0.0	0.0	96.3	25.0
315	0.0	0.0	100.7	31.2
400	0.0	0.0	103.7	39.9
500	0.0	0.0	104.5	39.9
630	0.0	0.0	107.8	39.9
800	0.0	0.0	105.9	39.9
1000	0.0	0.0	102.8	37.4
1250	0.0	0.0	99.5	25.9
1600	0.0	0.0	97.0	26.6
2000	0.0	0.0	94.5	33.2
2500	0.0	0.0	91.8	34.8
3150	0.0	0.0	90.0	25.0
4000	0.0	0.0	89.1	25.0
5000	0.0	0.0	87.6	30.2
6300	0.0	0.0	85.5	30.1
8000	0.0	0.0	83.3	34.0
10000	0.0	0.0	80.2	33.8

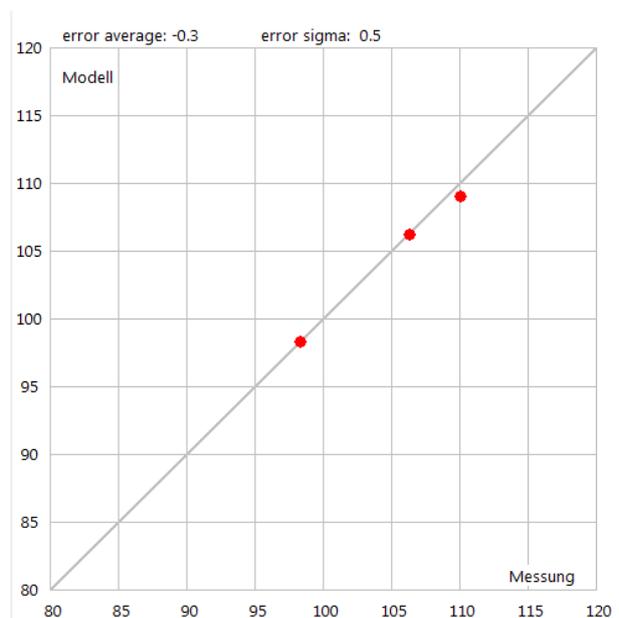


Abbildung 28: X-Y Plot der gemessenen und modellierten A-Summenpegel.

Für den Bus 2.2 ergibt sich **mit** Antriebsgeräusch ein optimales Parametersetting gemäss Abbildung 29 und damit eine Reproduktion der Messung durch das Modell entsprechend Abbildung 30 mit einem mittleren Fehler von -0.3 dB(A) und einer Standardunsicherheit von 0.5 dB(A).

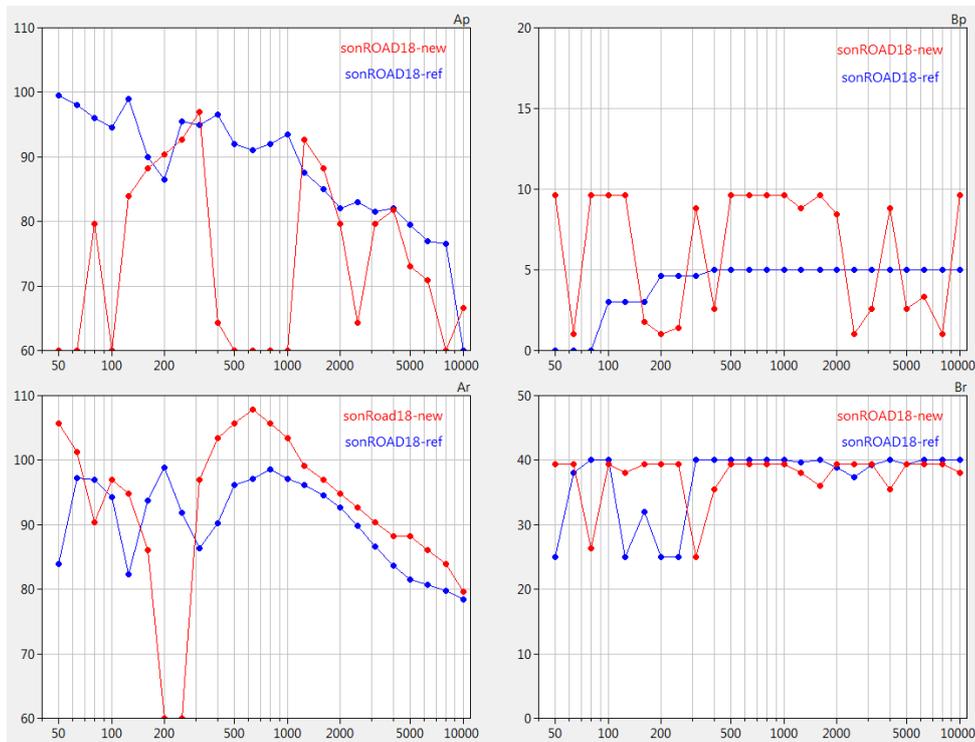


Abbildung 29: Spektrale Modellparameter in rot im Vergleich zu den Standardwerten SWISS10 cat 1 (blau).

freq	Ap	Bp	Ar	Br
50	60.0	9.6	105.7	39.3
63	60.0	1.0	101.3	39.3
80	79.6	9.6	90.4	26.3
100	60.0	9.6	97.0	39.3
125	83.9	9.6	94.8	38.0
160	88.3	1.8	86.1	39.3
200	90.4	1.0	60.0	39.3
250	92.6	1.4	60.0	39.3
315	97.0	8.8	97.0	25.0
400	64.3	2.6	103.5	35.4
500	60.0	9.6	105.7	39.3
630	60.0	9.6	107.8	39.3
800	60.0	9.6	105.7	39.3
1000	60.0	9.6	103.5	39.3
1250	92.6	8.8	99.1	38.0
1600	88.3	9.6	97.0	36.1
2000	79.6	8.4	94.8	39.3
2500	64.3	1.0	92.6	39.3
3150	79.6	2.6	90.4	39.3
4000	81.7	8.8	88.3	35.4
5000	73.0	2.6	88.3	39.3
6300	70.9	3.3	86.1	39.3
8000	60.0	1.0	83.9	39.3
10000	66.5	9.6	79.6	38.0

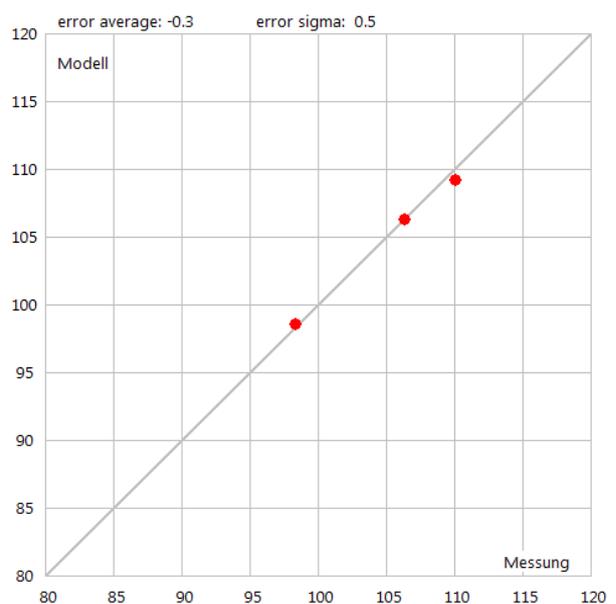


Abbildung 30: X-Y Plot der gemessenen und modellierten A-Summenpegel.

Für den Bus 2.3 ergibt sich **ohne** Antriebsgeräusch ein optimales Parametersetting gemäss Abbildung 31 und damit eine Reproduktion der Messung durch das Modell entsprechend Abbildung 32 mit einem mittleren Fehler von -0.1 dB(A) und einer Standardunsicherheit von 0.3 dB(A).

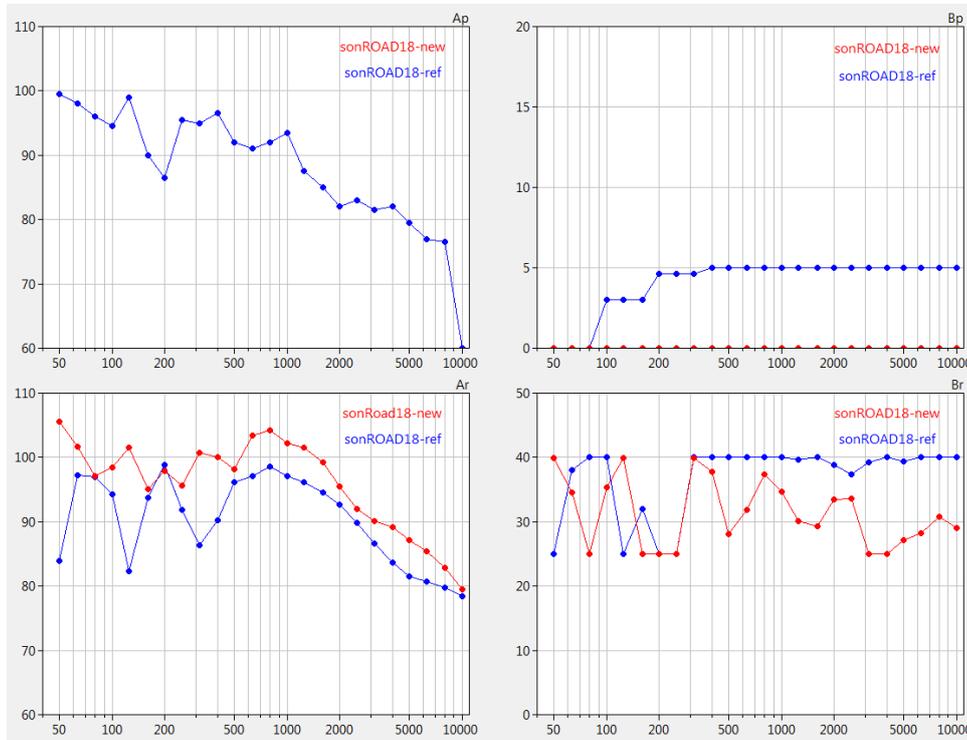


Abbildung 31: Spektrale Modellparameter in rot im Vergleich zu den Standardwerten SWISS10 cat 1 (blau).

freq	Ap	Bp	Ar	Br
50	0.0	0.0	105.5	39.9
63	0.0	0.0	101.6	34.5
80	0.0	0.0	97.0	25.0
100	0.0	0.0	98.4	35.3
125	0.0	0.0	101.5	39.9
160	0.0	0.0	95.1	25.0
200	0.0	0.0	97.9	25.0
250	0.0	0.0	95.7	25.0
315	0.0	0.0	100.7	39.9
400	0.0	0.0	100.1	37.8
500	0.0	0.0	98.1	28.0
630	0.0	0.0	103.4	31.8
800	0.0	0.0	104.3	37.3
1000	0.0	0.0	102.2	34.7
1250	0.0	0.0	101.5	30.2
1600	0.0	0.0	99.2	29.3
2000	0.0	0.0	95.5	33.5
2500	0.0	0.0	92.0	33.6
3150	0.0	0.0	90.1	25.0
4000	0.0	0.0	89.1	25.0
5000	0.0	0.0	87.1	27.1
6300	0.0	0.0	85.5	28.3
8000	0.0	0.0	82.8	30.8
10000	0.0	0.0	79.4	29.1

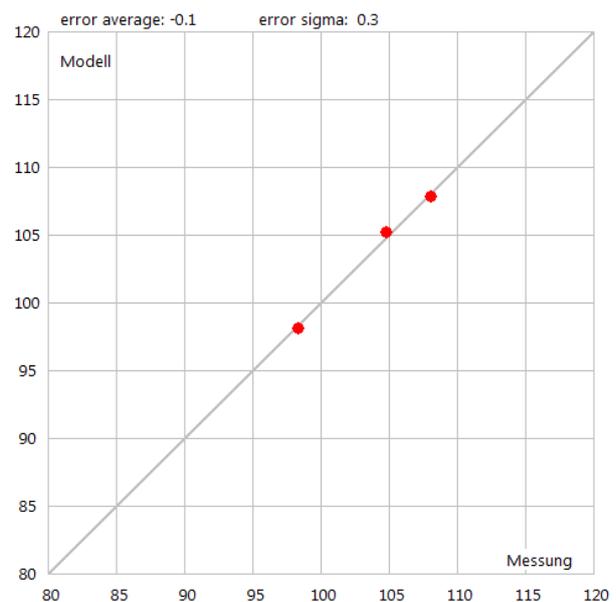


Abbildung 32: X-Y Plot der gemessenen und modellierten A-Summenpegel.

Für den Bus 2.3 ergibt sich **mit** Antriebsgeräusch ein optimales Parametersetting gemäss Abbildung 33 und damit eine Reproduktion der Messung durch das Modell entsprechend Abbildung 34 mit einem mittleren Fehler von -0.2 dB(A) und einer Standardunsicherheit von 0.3 dB(A).

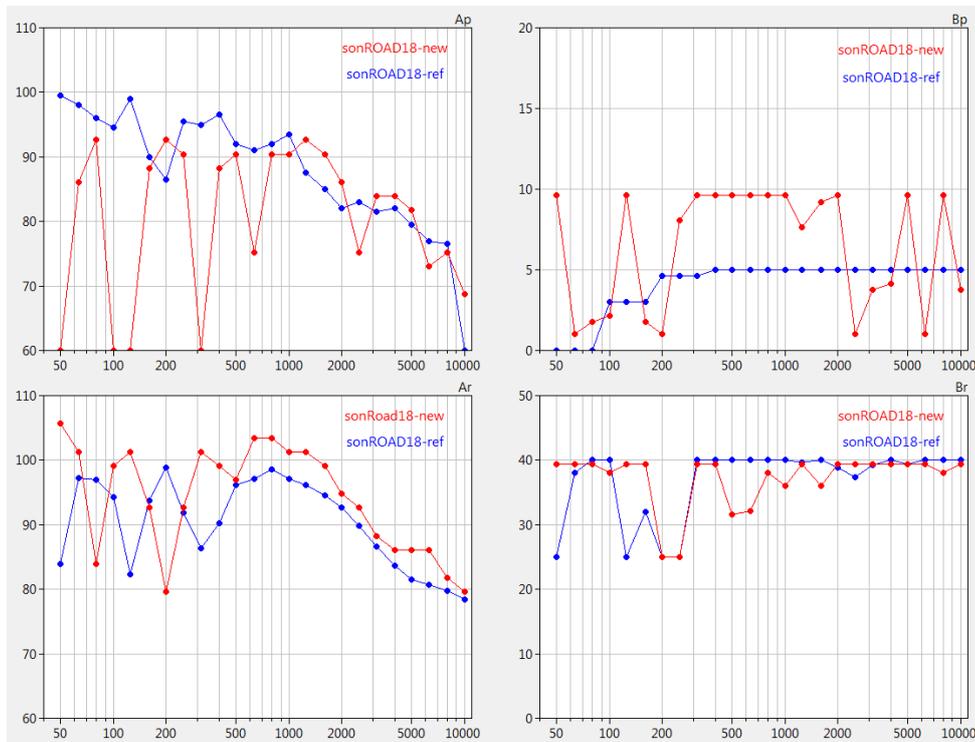


Abbildung 33: Spektrale Modellparameter in rot im Vergleich zu den Standardwerten SWISS10 cat 1 (blau).

freq	Ap	Bp	Ar	Br
50	60.0	9.6	105.7	39.3
63	86.1	1.0	101.3	39.3
80	92.6	1.8	83.9	39.3
100	60.0	2.2	99.1	38.0
125	60.0	9.6	101.3	39.3
160	88.3	1.8	92.6	39.3
200	92.6	1.0	79.6	25.0
250	90.4	8.0	92.6	25.0
315	60.0	9.6	101.3	39.3
400	88.3	9.6	99.1	39.3
500	90.4	9.6	97.0	31.5
630	75.2	9.6	103.5	32.2
800	90.4	9.6	103.5	38.0
1000	90.4	9.6	101.3	36.1
1250	92.6	7.7	101.3	39.3
1600	90.4	9.2	99.1	36.1
2000	86.1	9.6	94.8	39.3
2500	75.2	1.0	92.6	39.3
3150	83.9	3.7	88.3	39.3
4000	83.9	4.1	86.1	39.3
5000	81.7	9.6	86.1	39.3
6300	73.0	1.0	86.1	39.3
8000	75.2	9.6	81.7	38.0
10000	68.7	3.7	79.6	39.3

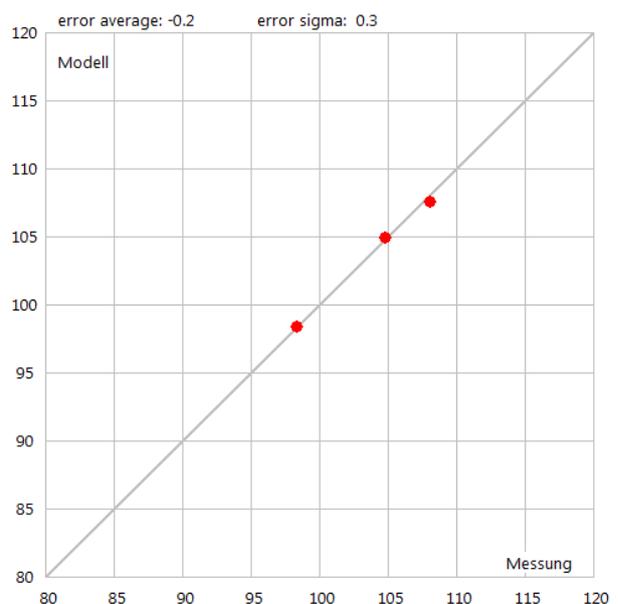


Abbildung 34: X-Y Plot der gemessenen und modellierten A-Summenpegel.

Für den Bus 2.4 ergibt sich **ohne** Antriebsgeräusch ein optimales Parametersetting gemäss Abbildung 35 und damit eine Reproduktion der Messung durch das Modell entsprechend Abbildung 36 mit einem mittleren Fehler von -0.1 dB(A) und einer Standardunsicherheit von 0.2 dB(A).

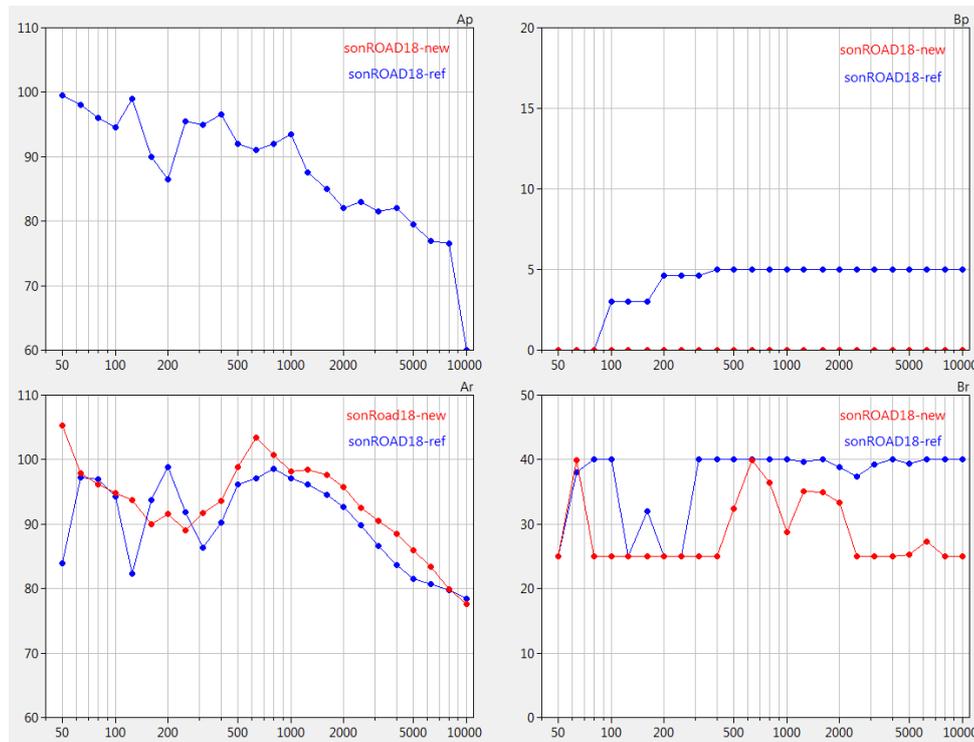


Abbildung 35: Spektrale Modellparameter in rot im Vergleich zu den Standardwerten SWISS10 cat 1 (blau).

freq	Ap	Bp	Ar	Br
50	0.0	0.0	105.3	25.0
63	0.0	0.0	97.9	39.9
80	0.0	0.0	96.2	25.0
100	0.0	0.0	94.8	25.0
125	0.0	0.0	93.8	25.0
160	0.0	0.0	90.0	25.0
200	0.0	0.0	91.6	25.0
250	0.0	0.0	89.0	25.0
315	0.0	0.0	91.7	25.0
400	0.0	0.0	93.6	25.0
500	0.0	0.0	98.8	32.4
630	0.0	0.0	103.4	39.9
800	0.0	0.0	100.7	36.4
1000	0.0	0.0	98.1	28.8
1250	0.0	0.0	98.5	35.1
1600	0.0	0.0	97.7	34.9
2000	0.0	0.0	95.8	33.3
2500	0.0	0.0	92.6	25.0
3150	0.0	0.0	90.6	25.0
4000	0.0	0.0	88.5	25.0
5000	0.0	0.0	85.9	25.2
6300	0.0	0.0	83.4	27.2
8000	0.0	0.0	79.9	25.0
10000	0.0	0.0	77.6	25.0

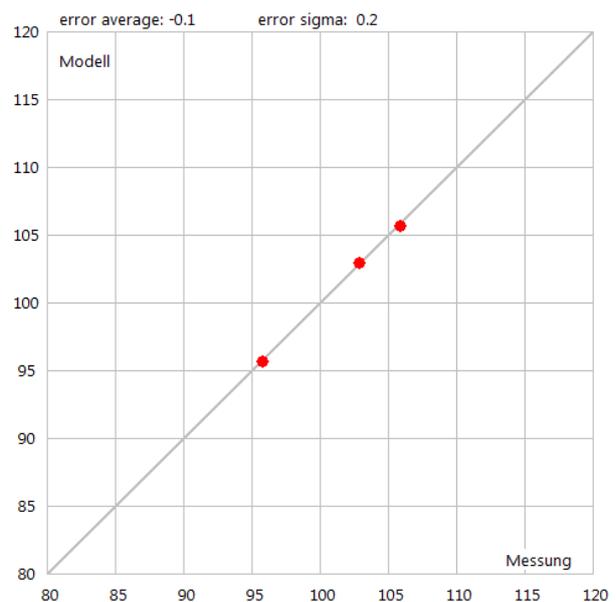


Abbildung 36: X-Y Plot der gemessenen und modellierten A-Summenpegel.

Für den Bus 2.4 ergibt sich **mit** Antriebsgeräusch ein optimales Parametersetting gemäss Abbildung 37 und damit eine Reproduktion der Messung durch das Modell entsprechend Abbildung 38 mit einem mittleren Fehler von -0.1 dB(A) und einer Standardunsicherheit von 0.2 dB(A).

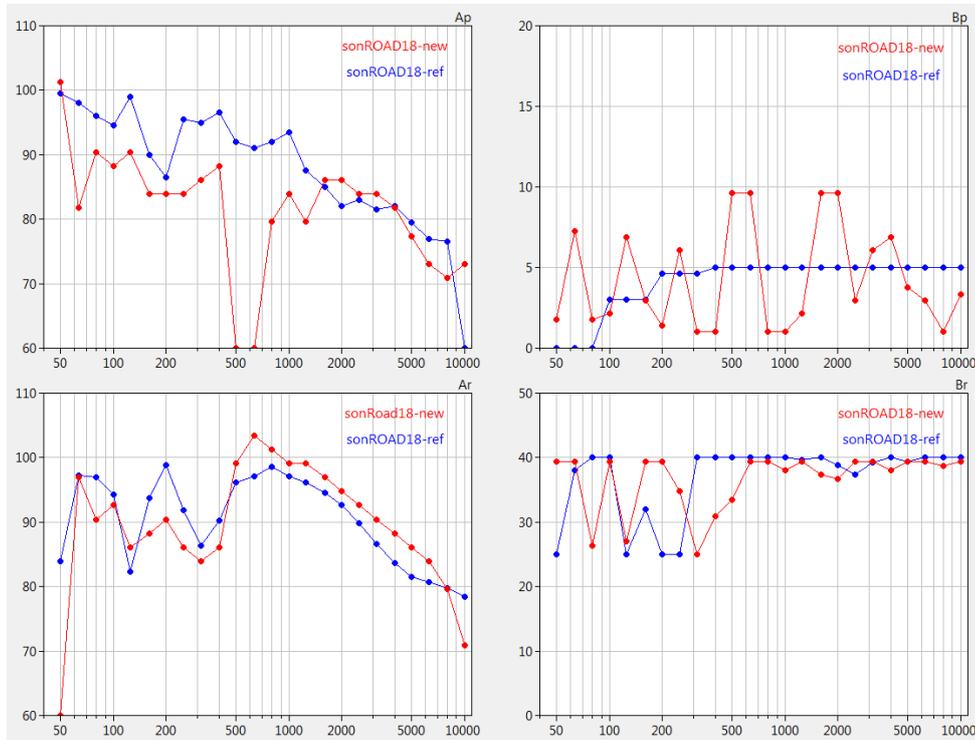


Abbildung 37: Spektrale Modellparameter in rot im Vergleich zu den Standardwerten SWISS10 cat 1 (blau).

freq	Ap	Bp	Ar	Br
50	101.3	1.8	60.0	39.3
63	81.7	7.3	97.0	39.3
80	90.4	1.8	90.4	26.3
100	88.3	2.2	92.6	39.3
125	90.4	6.9	86.1	27.0
160	83.9	3.0	88.3	39.3
200	83.9	1.4	90.4	39.3
250	83.9	6.1	86.1	34.8
315	86.1	1.0	83.9	25.0
400	88.3	1.0	86.1	30.9
500	60.0	9.6	99.1	33.5
630	60.0	9.6	103.5	39.3
800	79.6	1.0	101.3	39.3
1000	83.9	1.0	99.1	38.0
1250	79.6	2.2	99.1	39.3
1600	86.1	9.6	97.0	37.4
2000	86.1	9.6	94.8	36.7
2500	83.9	3.0	92.6	39.3
3150	83.9	6.1	90.4	39.3
4000	81.7	6.9	88.3	38.0
5000	77.4	3.7	86.1	39.3
6300	73.0	3.0	83.9	39.3
8000	70.9	1.0	79.6	38.7
10000	73.0	3.3	70.9	39.3

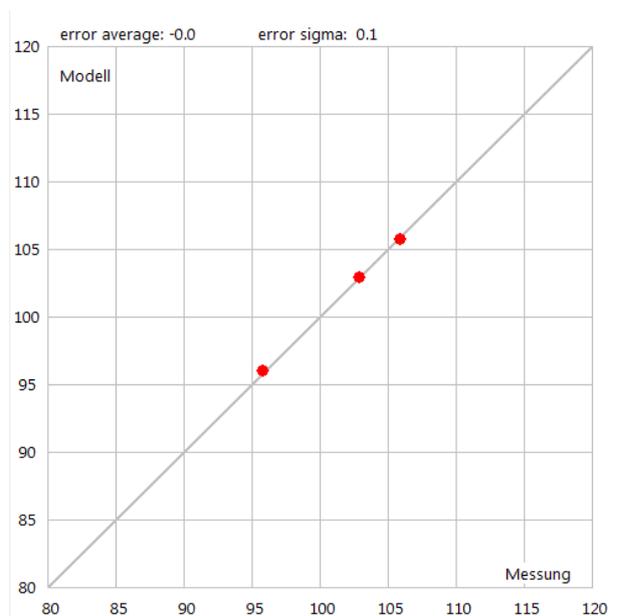


Abbildung 38: X-Y Plot der gemessenen und modellierten A-Summenpegel.

5. Fahrzeugzusammenfassende Parameteranpassungen

In einem weiteren Auswerteschritt wurden die 15 vermessenen Fahrzeuge nach Angaben von Anne Klauer von B+S wie in Tabelle 2 gezeigt in die sechs Kategorien A bis F zusammengefasst. Für die fünf Kategorien A,B,D,E,F wurde ein erneutes Parametertuning durchgeführt, Kategorie C entspricht Basel Nr. 2.

Kategorie	Stadt	Nr.	Model	Bustyp	Bemerkung	Achsen
A	Basel	1	Mercedes-Benz O 530 G	Diesel, Gelenkbus	L = 18 m	3
	Zürich	1.1	Mercedes-Benz O 530 G	Diesel, Gelenkbus	L = 18 m	3
	Zürich	1.2	MAN A40 Lions City	Diesel, Gelenkbus	L = 19 m	3
	Zürich	1.4	Neoplan Centroliner	Diesel, Gelenkbus	L = 19 m	3
B	Luzern	1	Mercedes-Benz Citaro	Diesel, Standardbus	L = 12 m	2
	Zürich	1.3	MercedesBenz Citaro	Diesel, Standardbus	L = 12 m	2
	Zürich	1.5	MAN A35 Midibus	Diesel, Standardbus	L = 10 m	2
C	Basel	2	Citaro Gelenkbus CNG	Gasbus	L = 18 m	3
D	Luzern	2	Volvo 7900H, Standardbus	Hybridbus	L = 12 m	2
	Zürich	2.4	Volvo 7900 LAH, Gelenkbus	Hybridbus	L = 18 m	3
E	Luzern	3	HESS Gelenktrolley	Elektro, Gelenktrolley	L = 19m	3
	Zürich	2.2	HESS Swisstrolley 3	Elektro, Gelenktrolley	L = 19m	3
F	Luzern	4	HESS RBUS*	Elektro, Doppelgelenktrolley	L = 25m	4
	Zürich	2.1	HESS lighTram 3 Longo	Elektro, Doppelgelenktrolley	L = 25m	4
	Zürich	2.3	HESS lighTram 3 Longo 2	Elektro, Doppelgelenktrolley	L = 25m	4

Tabelle 2: Zusammenfassung der einzelnen Fahrzeuge zu Kategorien A bis F.

Für die Busse der Kategorie A ergibt sich ein optimales Parametersetting gemäss Abbildung 39 und damit eine Reproduktion der Messung durch das Modell entsprechend Abbildung 40 mit einem mittleren Fehler von -0.4 dB(A) und einer Standardunsicherheit von 1.8 dB(A). In der Terz 63 Hz wurde A_p manuell gesetzt.

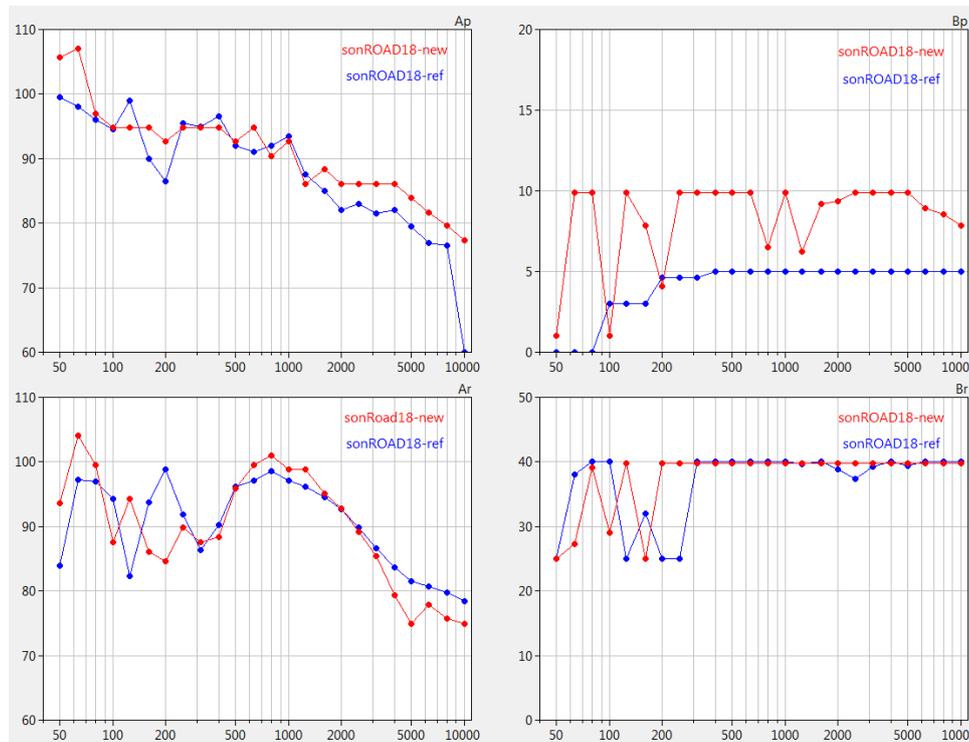


Abbildung 39: Spektrale Modellparameter in rot im Vergleich zu den Standardwerten SWISS10 cat 1 (blau).

freq	A_p	B_p	A_r	B_r
50	105.7	1.0	93.6	25.0
63	107.0	9.9	104.0	27.2
80	97.0	9.9	99.6	39.1
100	94.8	1.0	87.6	29.0
125	94.8	9.9	94.3	39.8
160	94.8	7.9	86.1	25.0
200	92.6	4.1	84.6	39.8
250	94.8	9.9	89.9	39.8
315	94.8	9.9	87.6	39.8
400	94.8	9.9	88.4	39.8
500	92.6	9.9	95.8	39.8
630	94.8	9.9	99.6	39.8
800	90.4	6.5	101.0	39.8
1000	92.6	9.9	98.8	39.8
1250	86.1	6.2	98.8	39.8
1600	88.3	9.2	95.1	39.8
2000	86.1	9.3	92.8	39.8
2500	86.1	9.9	89.1	39.8
3150	86.1	9.9	85.4	39.8
4000	86.1	9.9	79.4	39.8
5000	83.9	9.9	74.9	39.8
6300	81.7	8.9	77.9	39.8
8000	79.6	8.5	75.7	39.8
10000	77.4	7.9	74.9	39.8

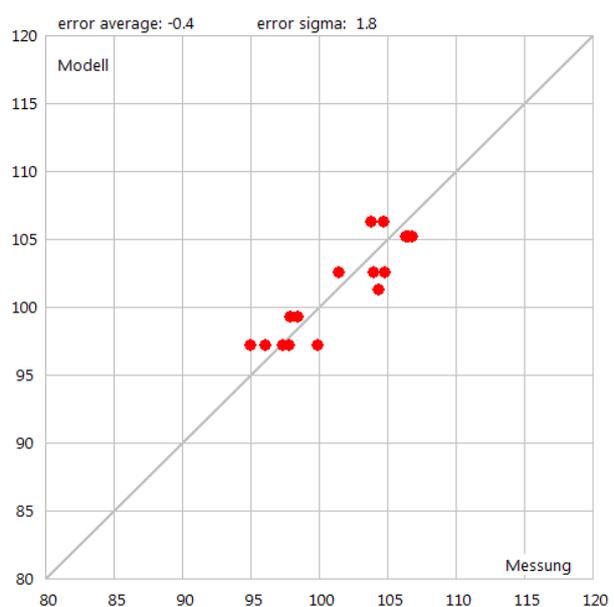


Abbildung 40: X-Y Plot der gemessenen und modellierten A-Summenpegel.

Für die Busse der Kategorie B ergibt sich ein optimales Parametersetting gemäss Abbildung 41 und damit eine Reproduktion der Messung durch das Modell entsprechend Abbildung 42 mit einem mittleren Fehler von -0.5 dB(A) und einer Standardunsicherheit von 2.2 dB(A). In der Terz 250 Hz wurde Ar manuell gesetzt.

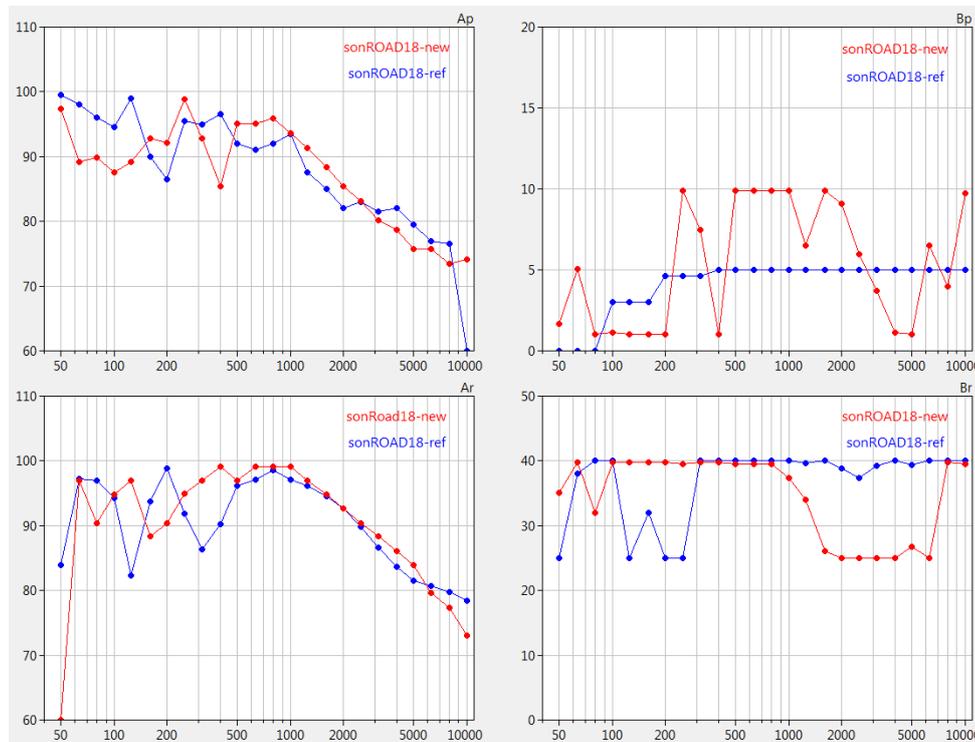


Abbildung 41: Spektrale Modellparameter in rot im Vergleich zu den Standardwerten SWISS10 cat 1 (blau).

freq	Ap	Bp	Ar	Br
50	97.3	1.7	60.0	35.1
63	89.1	5.0	97.0	39.8
80	89.9	1.0	90.4	31.9
100	87.6	1.1	94.8	39.8
125	89.1	1.0	97.0	39.8
160	92.8	1.0	88.3	39.8
200	92.1	1.0	90.4	39.8
250	98.8	9.9	95.0	39.6
315	92.8	7.4	97.0	39.8
400	85.4	1.0	99.1	39.8
500	95.1	9.9	97.0	39.6
630	95.1	9.9	99.1	39.6
800	95.8	9.9	99.1	39.6
1000	93.6	9.9	99.1	37.3
1250	91.3	6.5	97.0	34.0
1600	88.4	9.9	94.8	26.1
2000	85.4	9.1	92.6	25.0
2500	83.1	6.0	90.4	25.0
3150	80.1	3.7	88.3	25.0
4000	78.7	1.1	86.1	25.0
5000	75.7	1.0	83.9	26.8
6300	75.7	6.5	79.6	25.0
8000	73.4	4.0	77.4	39.8
10000	74.2	9.7	73.0	39.6

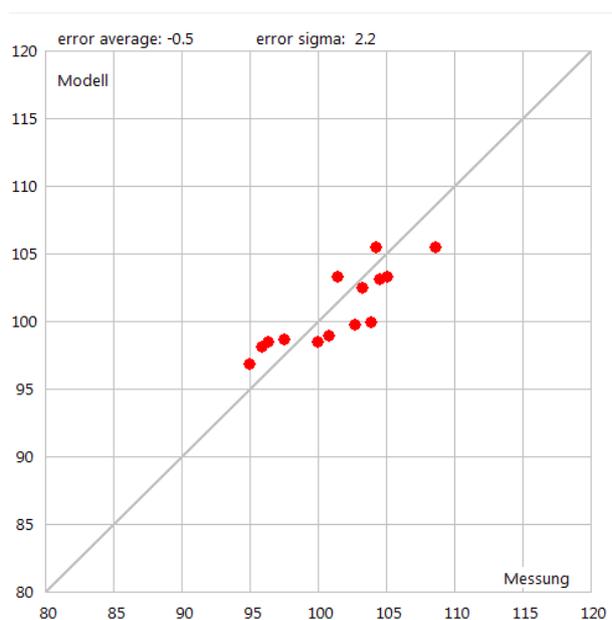


Abbildung 42: X-Y Plot der gemessenen und modellierten A-Summenpegel.

Für die Busse der Kategorie D ergibt sich ein optimales Parametersetting gemäss Abbildung 43 und damit eine Reproduktion der Messung durch das Modell entsprechend Abbildung 44 mit einem mittleren Fehler von -0.5 dB(A) und einer Standardunsicherheit von 2.2 dB(A). Von 80 bis 315 Hz wurde Ar manuell gesetzt.

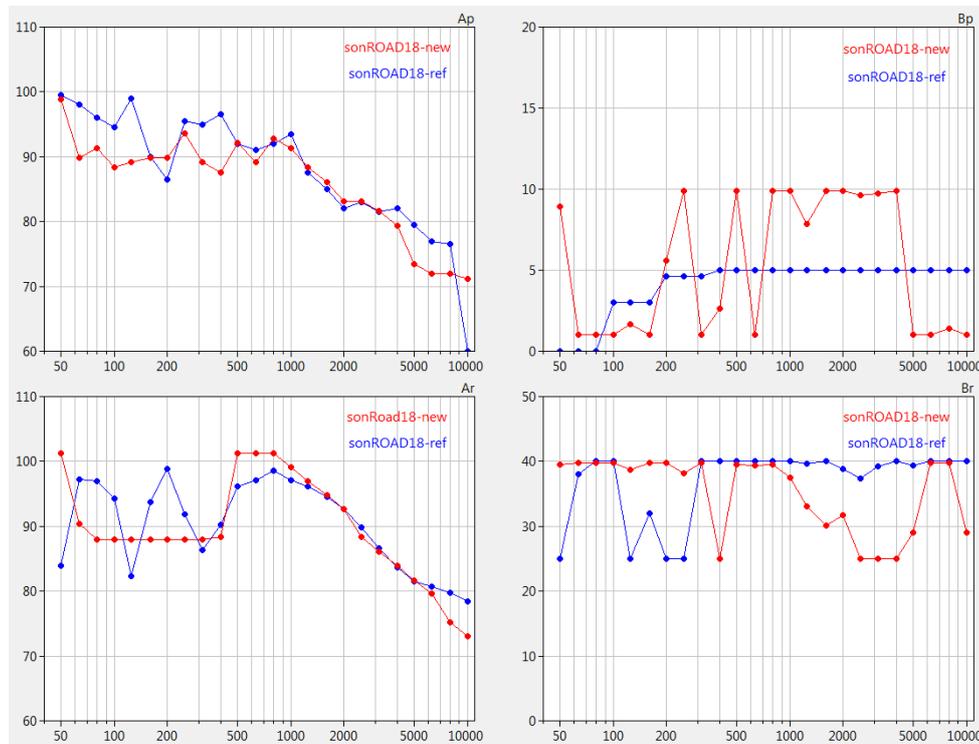


Abbildung 43: Spektrale Modellparameter in rot im Vergleich zu den Standardwerten SWISS10 cat 1 (blau).

freq	Ap	Bp	Ar	Br
50	98.8	8.9	101.3	39.6
63	89.9	1.0	90.4	39.8
80	91.3	1.0	88.0	39.8
100	88.4	1.0	88.0	39.8
125	89.1	1.7	88.0	38.7
160	89.9	1.0	88.0	39.8
200	89.9	5.6	88.0	39.8
250	93.6	9.9	88.0	38.2
315	89.1	1.0	88.0	39.8
400	87.6	2.6	88.3	25.0
500	92.1	9.9	101.3	39.6
630	89.1	1.0	101.3	39.3
800	92.8	9.9	101.3	39.6
1000	91.3	9.9	99.1	37.5
1250	88.4	7.9	97.0	33.1
1600	86.1	9.9	94.8	30.1
2000	83.1	9.9	92.6	31.7
2500	83.1	9.6	88.3	25.0
3150	81.6	9.7	86.1	25.0
4000	79.4	9.9	83.9	25.0
5000	73.4	1.0	81.7	29.0
6300	71.9	1.0	79.6	39.8
8000	71.9	1.4	75.2	39.8
10000	71.2	1.0	73.0	29.0

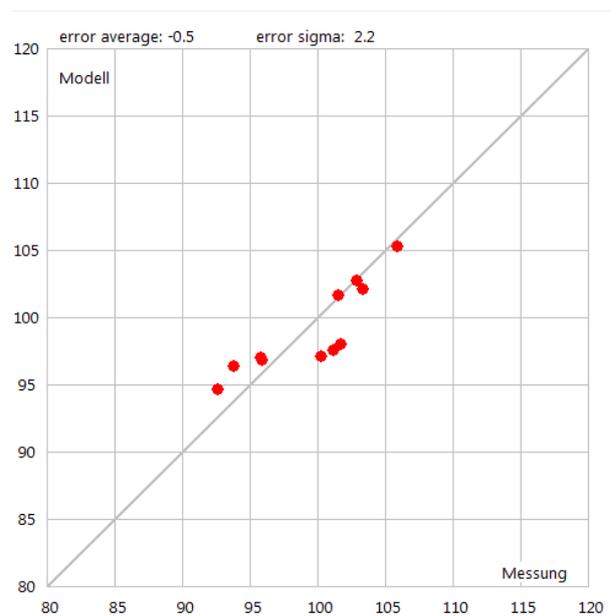


Abbildung 44: X-Y Plot der gemessenen und modellierten A-Summenpegel.

Für die Busse der Kategorie E ergibt sich ein optimales Parametersetting gemäss Abbildung 45 und damit eine Reproduktion der Messung durch das Modell entsprechend Abbildung 46 mit einem mittleren Fehler von -0.6 dB(A) und einer Standardunsicherheit von 2.1 dB(A). In den Terzen 80, 160 und 200 Hz wurde Ar manuell gesetzt.

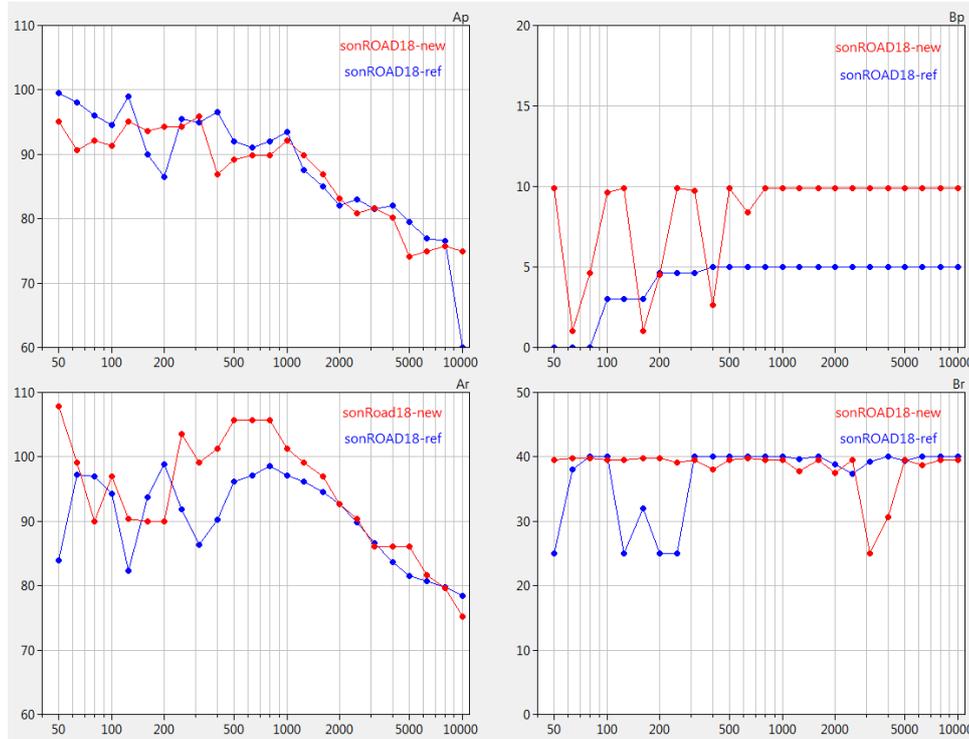


Abbildung 45: Spektrale Modellparameter in rot im Vergleich zu den Standardwerten SWISS10 cat 1 (blau).

freq	Ap	Bp	Ar	Br
50	95.1	9.9	107.8	39.6
63	90.6	1.0	99.1	39.8
80	92.1	4.6	90.0	39.8
100	91.3	9.6	97.0	39.6
125	95.1	9.9	90.4	39.6
160	93.6	1.0	90.0	39.8
200	94.3	4.5	90.0	39.8
250	94.3	9.9	103.5	39.1
315	95.8	9.7	99.1	39.6
400	86.9	2.6	101.3	38.0
500	89.1	9.9	105.7	39.6
630	89.9	8.4	105.7	39.8
800	89.9	9.9	105.7	39.6
1000	92.1	9.9	101.3	39.6
1250	89.9	9.9	99.1	37.8
1600	86.9	9.9	97.0	39.6
2000	83.1	9.9	92.6	37.5
2500	80.9	9.9	90.4	39.6
3150	81.6	9.9	86.1	25.0
4000	80.1	9.9	86.1	30.6
5000	74.2	9.9	86.1	39.6
6300	74.9	9.9	81.7	38.7
8000	75.7	9.9	79.6	39.6
10000	74.9	9.9	75.2	39.6

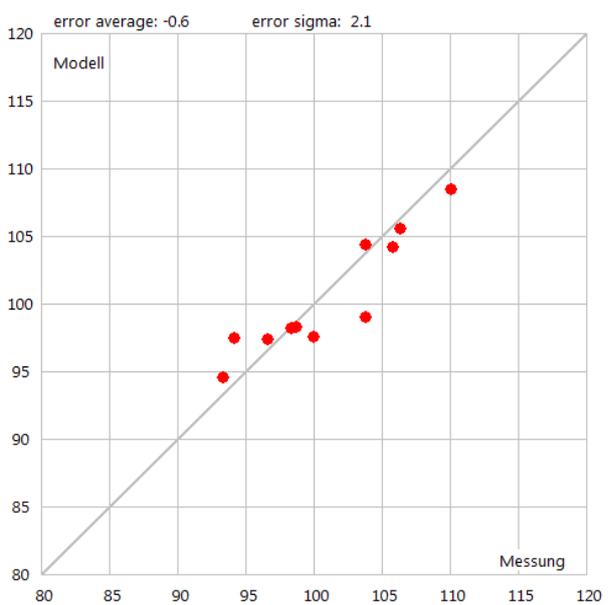


Abbildung 46: X-Y Plot der gemessenen und modellierten A-Summenpegel.

Für die Busse der Kategorie F ergibt sich ein optimales Parametersetting gemäss Abbildung 47 und damit eine Reproduktion der Messung durch das Modell entsprechend Abbildung 48 mit einem mittleren Fehler von -0.3 dB(A) und einer Standardunsicherheit von 1.4 dB(A). In den Terzen 50...200 Hz wurde Ar manuell gesetzt.

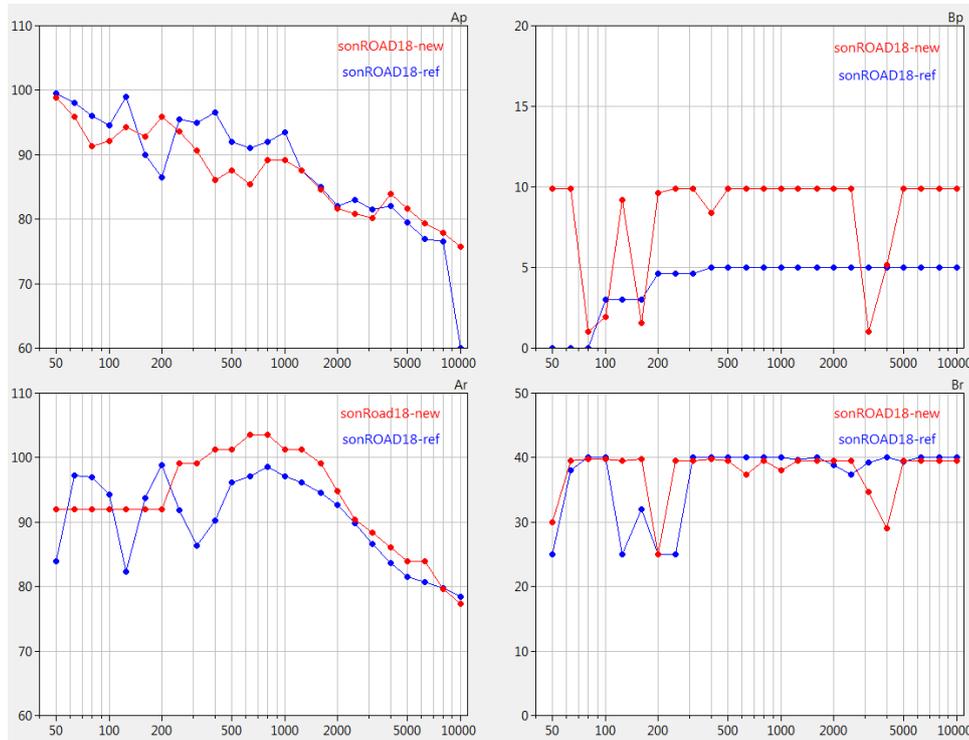


Abbildung 47: Spektrale Modellparameter in rot im Vergleich zu den Standardwerten SWISS10 cat 1 (blau).

freq	Ap	Bp	Ar	Br
50	98.8	9.9	92.0	29.9
63	95.8	9.9	92.0	39.6
80	91.3	1.0	92.0	39.8
100	92.1	1.9	92.0	39.8
125	94.3	9.2	92.0	39.6
160	92.8	1.5	92.0	39.8
200	95.8	9.6	92.0	25.0
250	93.6	9.9	99.1	39.6
315	90.6	9.9	99.1	39.6
400	86.1	8.4	101.3	39.8
500	87.6	9.9	101.3	39.6
630	85.4	9.9	103.5	37.3
800	89.1	9.9	103.5	39.6
1000	89.1	9.9	101.3	38.0
1250	87.6	9.9	101.3	39.6
1600	84.6	9.9	99.1	39.6
2000	81.6	9.9	94.8	39.6
2500	80.9	9.9	90.4	39.6
3150	80.1	1.0	88.3	34.6
4000	83.9	5.2	86.1	29.0
5000	81.6	9.9	83.9	39.6
6300	79.4	9.9	83.9	39.6
8000	77.9	9.9	79.6	39.6
10000	75.7	9.9	77.4	39.6

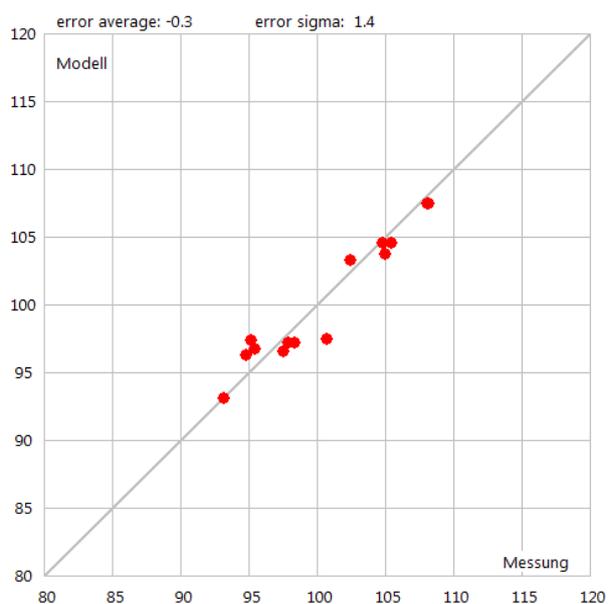


Abbildung 48: X-Y Plot der gemessenen und modellierten A-Summenpegel.

6. Fahrzeugzusammenfassende Parameteranpassungen mit vereinheitlichtem Rollgeräusch

In obiger Auswertung wurden die Kategorien A...F unabhängig voneinander betrachtet. Damit bleibt unberücksichtigt, dass ein Zusammenhang der Rollgeräuschkomponenten in den einzelnen Kategorien plausibel wäre. Dazu wird hier eine zur Anzahl Achsen proportionale Schalleistung des Rollgeräusches angenommen. Mit dieser Vorgabe lassen sich aus obigen Ergebnissen mittlere Ar und Br Spektren wie folgt bestimmen:

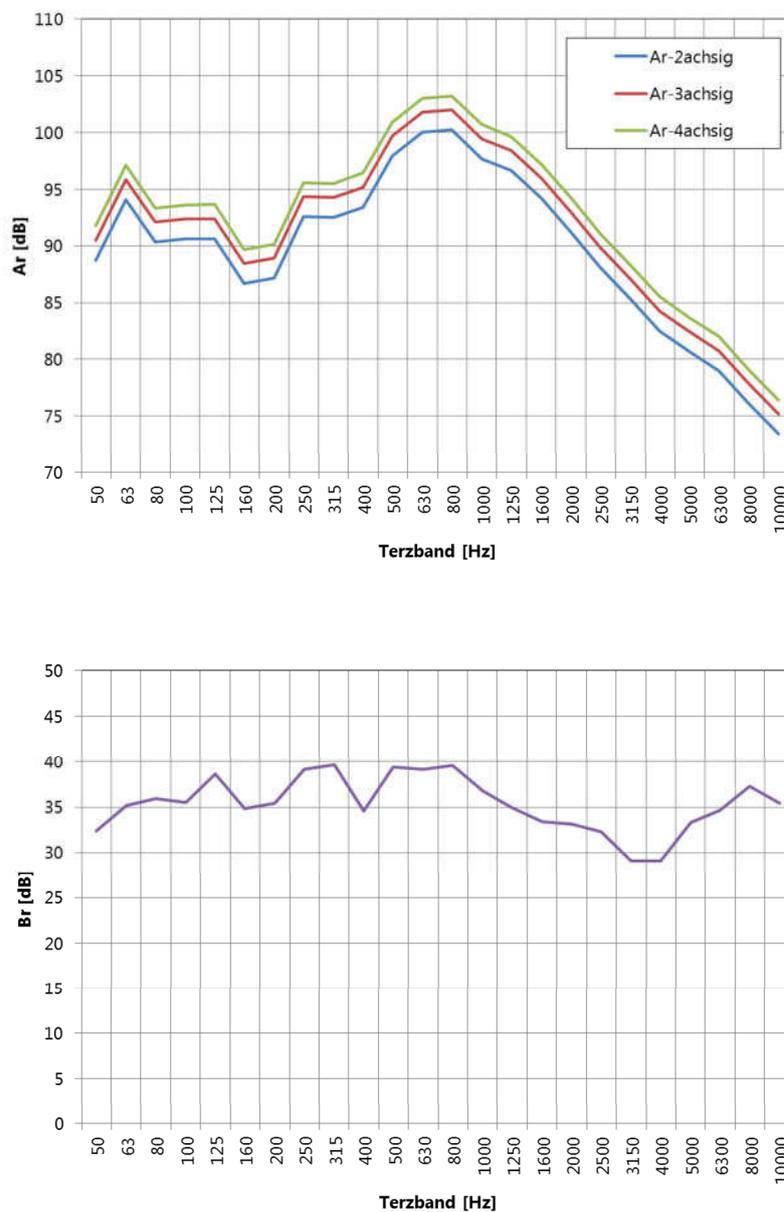


Abbildung 49: Mittlere achszahlabhängige Ar Spektren (oben) und mittleres Br Spektrum (unten).

Für die Busse der Kategorie A ergibt sich bei vereinheitlichtem Rollgeräusch ein optimales Parametersetting gemäss Abbildung 50 und damit eine Reproduktion der Messung durch das Modell entsprechend Abbildung 51 mit einem mittleren Fehler von 0.0 dB(A) und einer Standardunsicherheit von 1.9 dB(A).

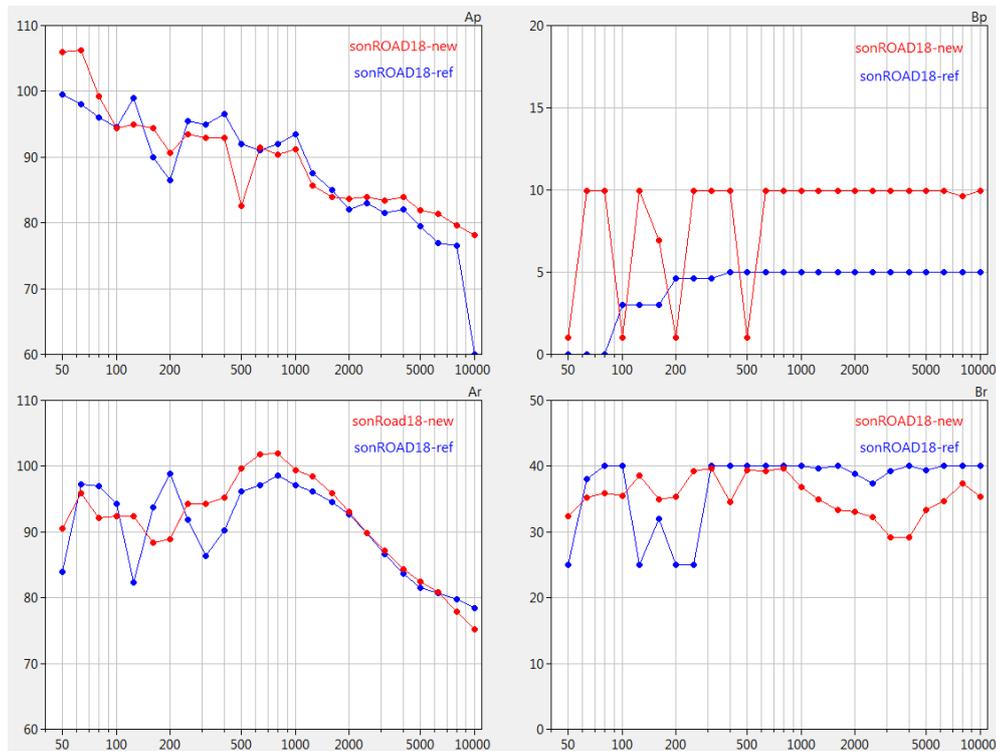


Abbildung 50: Spektrale Modellparameter in rot im Vergleich zu den Standardwerten SWISS10 cat 1 (blau).

freq	Ap	Bp	Ar	Br
50	106.0	1.0	90.5	32.4
63	106.2	9.9	95.9	35.2
80	99.3	9.9	92.1	35.9
100	94.4	1.0	92.4	35.5
125	95.0	9.9	92.4	38.6
160	94.4	6.9	88.4	34.9
200	90.6	1.0	88.9	35.4
250	93.5	9.9	94.3	39.2
315	92.9	9.9	94.3	39.7
400	92.9	9.9	95.2	34.6
500	82.5	1.0	99.7	39.4
630	91.5	9.9	101.8	39.2
800	90.3	9.9	102.0	39.6
1000	91.2	9.9	99.4	36.8
1250	85.7	9.9	98.4	34.9
1600	84.0	9.9	95.9	33.4
2000	83.7	9.9	93.0	33.1
2500	84.0	9.9	89.9	32.3
3150	83.4	9.9	87.1	29.1
4000	84.0	9.9	84.3	29.1
5000	82.0	9.9	82.4	33.3
6300	81.4	9.9	80.8	34.7
8000	79.7	9.6	77.9	37.3
10000	78.2	9.9	75.2	35.4

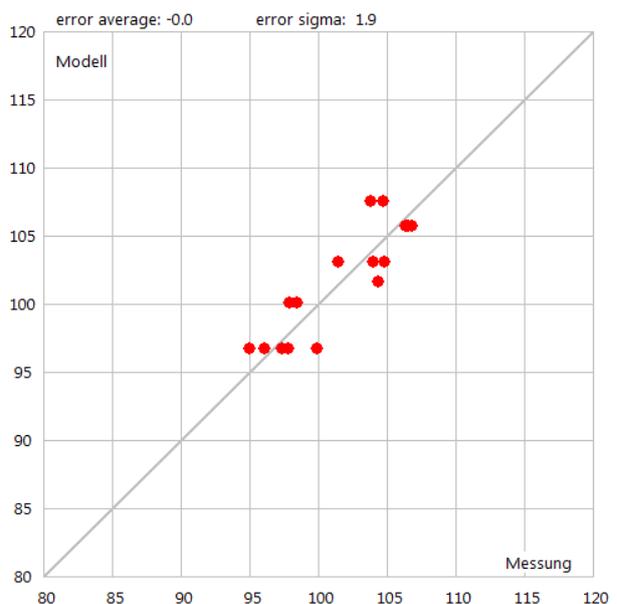


Abbildung 51: X-Y Plot der gemessenen und modellierten A-Summenpegel.

Für die Busse der Kategorie B ergibt sich bei vereinheitlichtem Rollgeräusch ein optimales Parametersetting gemäss Abbildung 52 und damit eine Reproduktion der Messung durch das Modell entsprechend Abbildung 53 mit einem mittleren Fehler von -0.6 dB(A) und einer Standardunsicherheit von 2.2 dB(A).

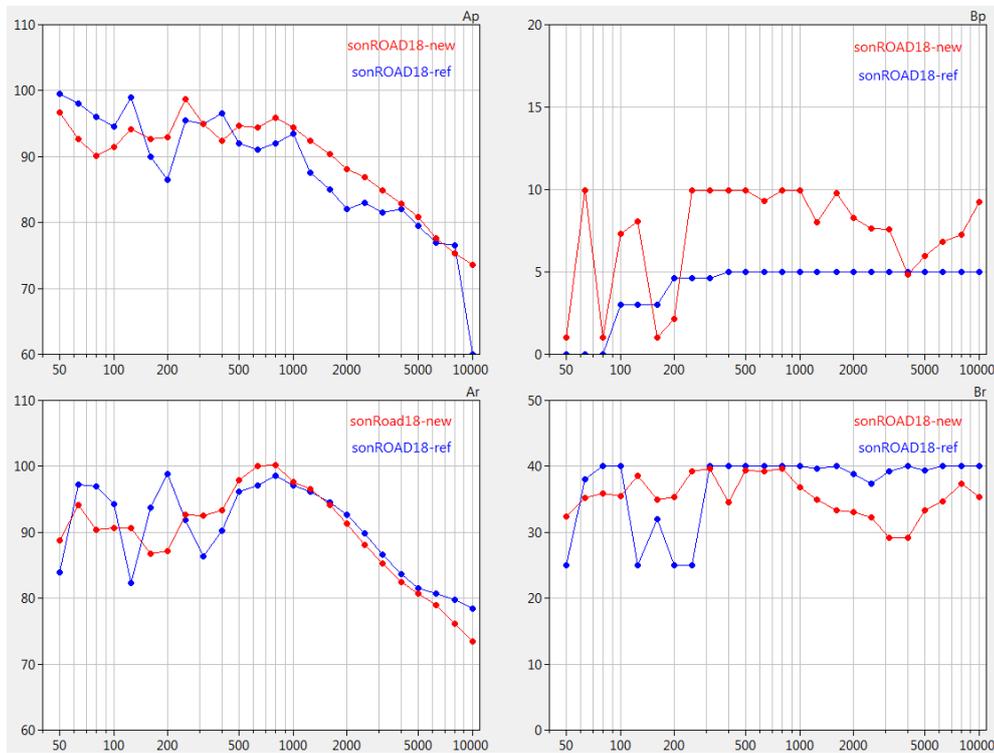


Abbildung 52: Spektrale Modellparameter in rot im Vergleich zu den Standardwerten SWISS10 cat 1 (blau).

freq	Ap	Bp	Ar	Br
50.0	96.7	1.0	88.8	32.4
63.0	92.7	9.9	94.1	35.2
80.0	90.1	1.0	90.4	35.9
100.0	91.5	7.3	90.6	35.5
125.0	94.1	8.1	90.6	38.6
160.0	92.7	1.0	86.7	34.9
200.0	92.9	2.1	87.1	35.4
250.0	98.7	9.9	92.6	39.2
315.0	95.0	9.9	92.5	39.7
400.0	92.4	9.9	93.4	34.6
500.0	94.7	9.9	97.9	39.4
630.0	94.4	9.3	100.0	39.2
800.0	95.8	9.9	100.2	39.6
1000.0	94.4	9.9	97.7	36.8
1250.0	92.4	8.0	96.6	34.9
1600.0	90.3	9.8	94.2	33.4
2000.0	88.0	8.3	91.3	33.1
2500.0	86.9	7.7	88.1	32.3
3150.0	84.9	7.6	85.3	29.1
4000.0	82.8	4.8	82.5	29.1
5000.0	80.8	5.9	80.7	33.3
6300.0	77.6	6.8	79.0	34.7
8000.0	75.3	7.2	76.1	37.3
10000.0	73.6	9.3	73.4	35.4

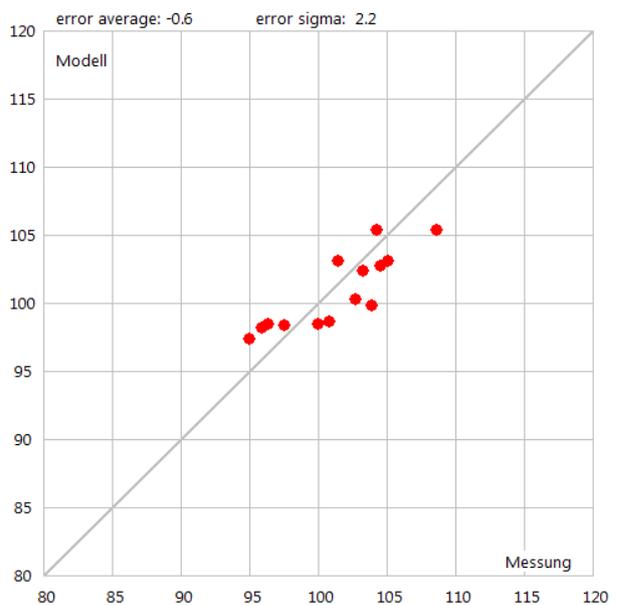


Abbildung 53: X-Y Plot der gemessenen und modellierten A-Summenpegel.

Für die Busse der Kategorie C ergibt sich bei vereinheitlichtem Rollgeräusch ein optimales Parametersetting gemäss Abbildung 54 und damit eine Reproduktion der Messung durch das Modell entsprechend Abbildung 55 mit einem mittleren Fehler von 0.4 dB(A) und einer Standardunsicherheit von 1.4 dB(A).

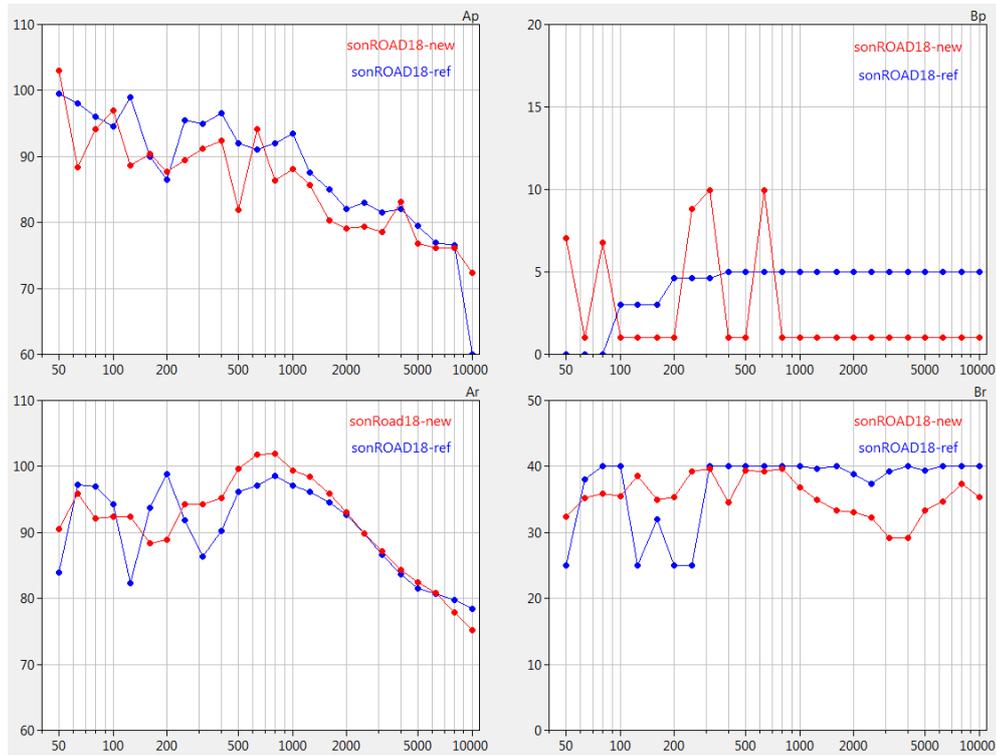


Abbildung 54: Spektrale Modellparameter in rot im Vergleich zu den Standardwerten SWISS10 cat 1 (blau).

freq	Ap	Bp	Ar	Br
50	106.1	1.0	90.5	32.4
63	106.3	10.0	95.9	35.2
80	99.2	10.0	92.1	35.9
100	94.3	1.0	92.4	35.5
125	95.0	10.0	92.4	38.6
160	94.2	6.6	88.4	34.9
200	90.6	1.0	88.9	35.4
250	93.4	10.0	94.3	39.2
315	92.8	10.0	94.3	39.7
400	92.8	10.0	95.2	34.6
500	81.7	1.0	99.7	39.4
630	90.7	10.0	101.8	39.2
800	87.2	5.8	102.0	39.6
1000	90.5	10.0	99.4	36.8
1250	83.7	10.0	98.4	34.9
1600	82.0	10.0	95.9	33.4
2000	82.9	10.0	93.0	33.1
2500	83.4	10.0	89.9	32.3
3150	83.1	10.0	87.1	29.1
4000	83.8	10.0	84.3	29.1
5000	81.7	10.0	82.4	33.3
6300	81.4	10.0	80.8	34.7
8000	79.7	9.9	77.9	37.3
10000	78.1	10.0	75.2	35.4

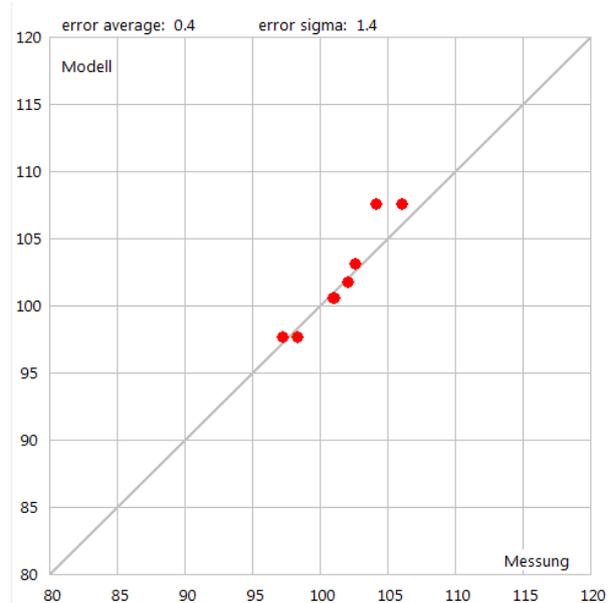


Abbildung 55: X-Y Plot der gemessenen und modellierten A-Summenpegel.

Für die Busse der Kategorie D ergibt sich bei vereinheitlichtem Rollgeräusch ein optimales Parametersetting gemäss Abbildung 56 und damit eine Reproduktion der Messung durch das Modell entsprechend Abbildung 57 mit einem mittleren Fehler von -0.7 dB(A) und einer Standardunsicherheit von 2.2 dB(A).

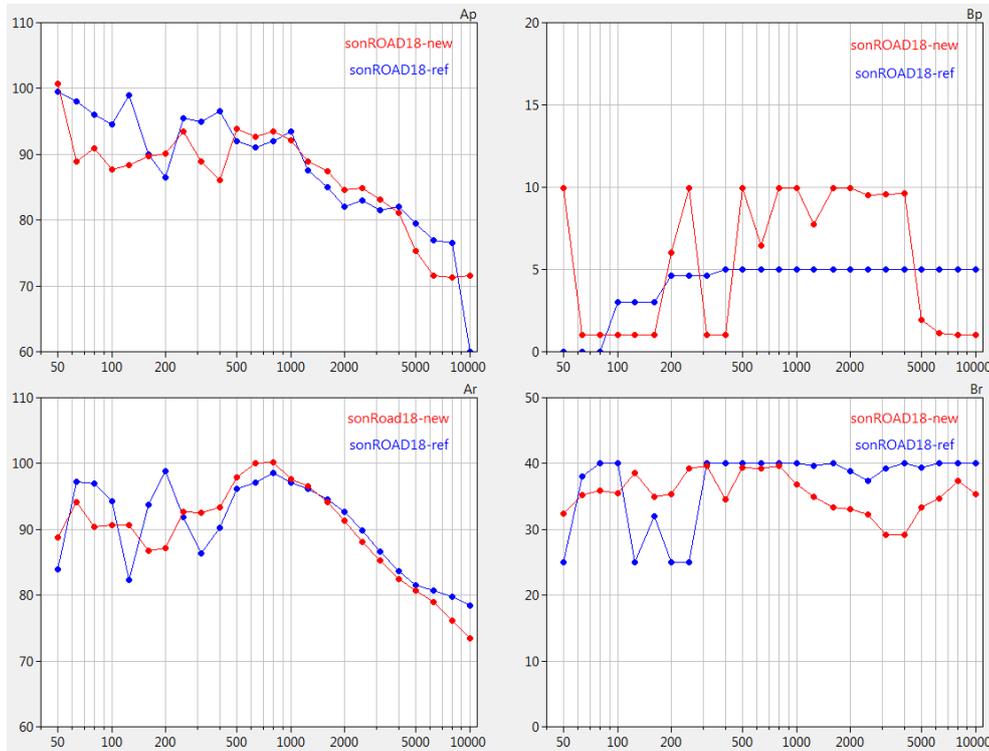


Abbildung 56: Spektrale Modellparameter in rot im Vergleich zu den Standardwerten SWISS10 cat 1 (blau).

freq	Ap	Bp	Ar	Br
50.0	100.8	9.9	88.8	32.4
63.0	88.9	1.0	94.1	35.2
80.0	90.9	1.0	90.4	35.9
100.0	87.7	1.0	90.6	35.5
125.0	88.3	1.0	90.6	38.6
160.0	89.8	1.0	86.7	34.9
200.0	90.1	6.0	87.1	35.4
250.0	93.5	9.9	92.6	39.2
315.0	88.9	1.0	92.5	39.7
400.0	86.0	1.0	93.4	34.6
500.0	93.8	9.9	97.9	39.4
630.0	92.7	6.5	100.0	39.2
800.0	93.5	9.9	100.2	39.6
1000.0	92.1	9.9	97.7	36.8
1250.0	88.9	7.8	96.6	34.9
1600.0	87.5	9.9	94.2	33.4
2000.0	84.6	9.9	91.3	33.1
2500.0	84.9	9.5	88.1	32.3
3150.0	83.1	9.6	85.3	29.1
4000.0	81.1	9.6	82.5	29.1
5000.0	75.3	1.9	80.7	33.3
6300.0	71.6	1.1	79.0	34.7
8000.0	71.3	1.0	76.1	37.3
10000.0	71.6	1.0	73.4	35.4

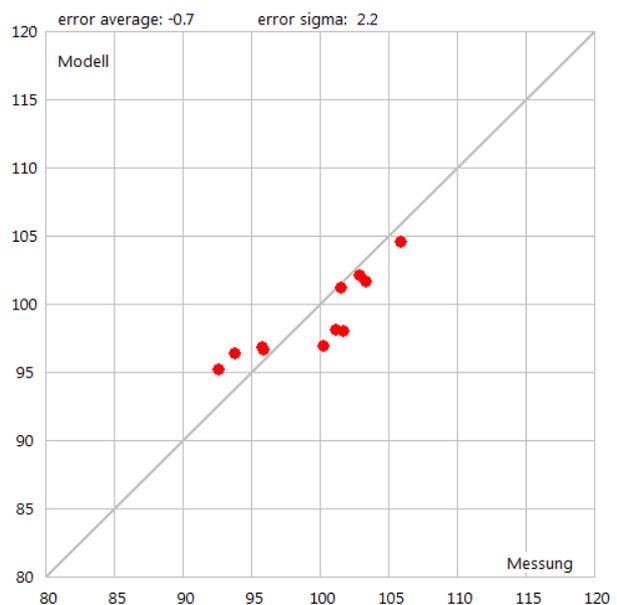


Abbildung 57: X-Y Plot der gemessenen und modellierten A-Summenpegel.

Für die Busse der Kategorie E ergibt sich bei vereinheitlichtem Rollgeräusch ein optimales Parametersetting gemäss Abbildung 58 und damit eine Reproduktion der Messung durch das Modell entsprechend Abbildung 59 mit einem mittleren Fehler von -1.0 dB(A) und einer Standardunsicherheit von 2.6 dB(A).

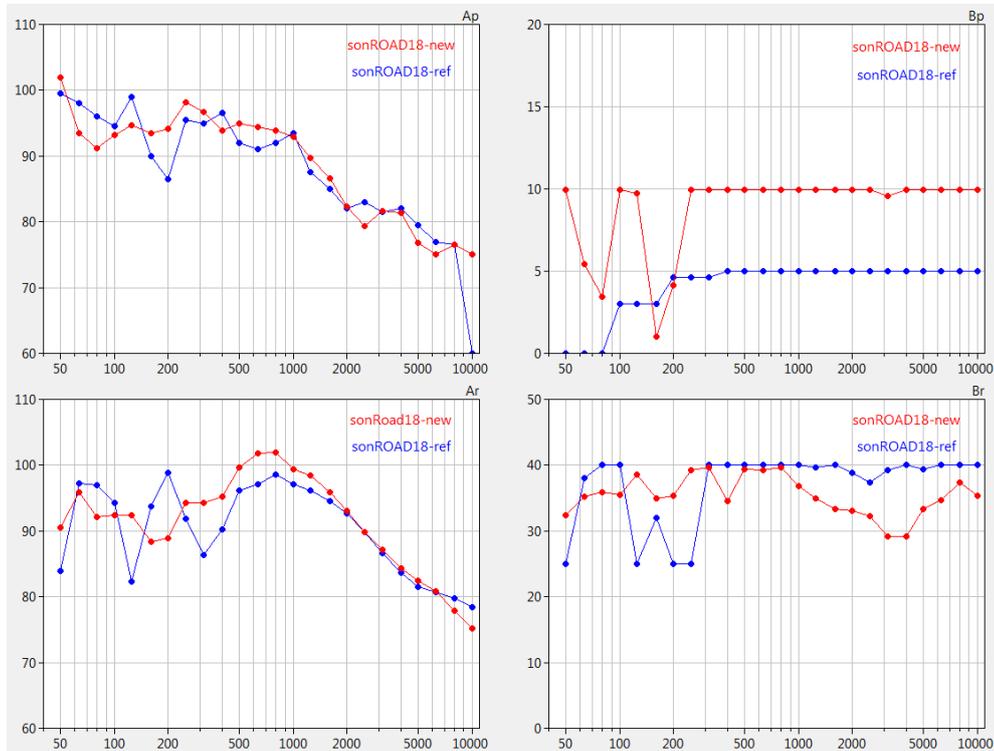


Abbildung 58: Spektrale Modellparameter in rot im Vergleich zu den Standardwerten SWISS10 cat 1 (blau).

freq	Ap	Bp	Ar	Br
50.0	101.9	9.9	90.5	32.4
63.0	93.5	5.4	95.9	35.2
80.0	91.2	3.4	92.1	35.9
100.0	93.2	9.9	92.4	35.5
125.0	94.7	9.7	92.4	38.6
160.0	93.5	1.0	88.4	34.9
200.0	94.1	4.1	88.9	35.4
250.0	98.2	9.9	94.3	39.2
315.0	96.7	9.9	94.3	39.7
400.0	93.8	9.9	95.2	34.6
500.0	95.0	9.9	99.7	39.4
630.0	94.4	9.9	101.8	39.2
800.0	93.8	9.9	102.0	39.6
1000.0	92.9	9.9	99.4	36.8
1250.0	89.8	9.9	98.4	34.9
1600.0	86.6	9.9	95.9	33.4
2000.0	82.3	9.9	93.0	33.1
2500.0	79.4	9.9	89.9	32.3
3150.0	81.7	9.6	87.1	29.1
4000.0	81.4	9.9	84.3	29.1
5000.0	76.8	9.9	82.4	33.3
6300.0	75.0	9.9	80.8	34.7
8000.0	76.5	9.9	77.9	37.3
10000.0	75.0	9.9	75.2	35.4

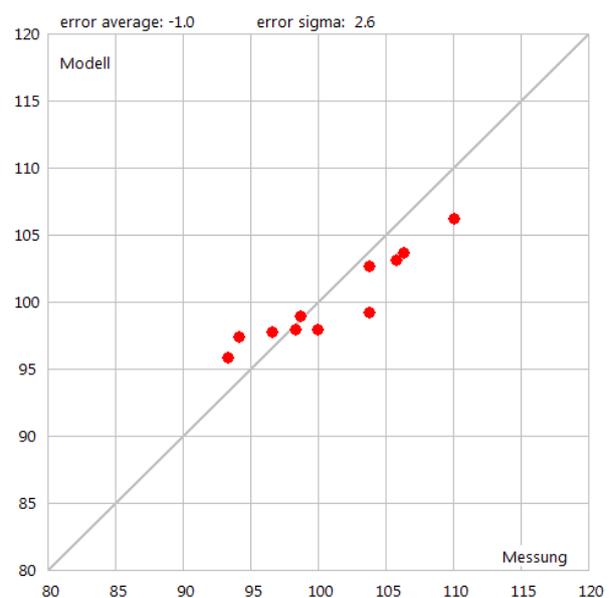


Abbildung 59: X-Y Plot der gemessenen und modellierten A-Summenpegel.

Für die Busse der Kategorie F ergibt sich bei vereinheitlichtem Rollgeräusch ein optimales Parametersetting gemäss Abbildung 60 und damit eine Reproduktion der Messung durch das Modell entsprechend Abbildung 61 mit einem mittleren Fehler von -0.4 dB(A) und einer Standardunsicherheit von 1.6 dB(A).

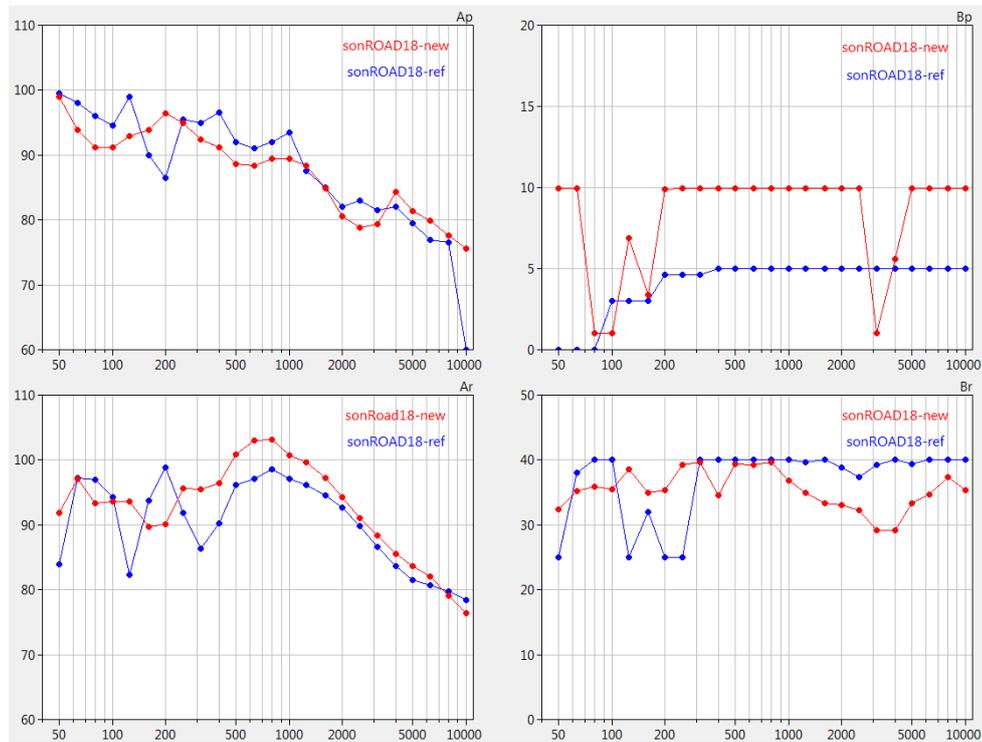


Abbildung 60: Spektrale Modellparameter in rot im Vergleich zu den Standardwerten SWISS10 cat 1 (blau).

freq	Ap	Bp	Ar	Br
50.0	99.0	9.9	91.8	32.4
63.0	93.8	9.9	97.1	35.2
80.0	91.2	1.0	93.4	35.9
100.0	91.2	1.0	93.6	35.5
125.0	92.9	6.9	93.6	38.6
160.0	93.8	3.4	89.7	34.9
200.0	96.4	9.9	90.1	35.4
250.0	95.0	9.9	95.6	39.2
315.0	92.4	9.9	95.5	39.7
400.0	91.2	9.9	96.4	34.6
500.0	88.6	9.9	100.9	39.4
630.0	88.3	9.9	103.0	39.2
800.0	89.5	9.9	103.2	39.6
1000.0	89.5	9.9	100.7	36.8
1250.0	88.3	9.9	99.6	34.9
1600.0	84.9	9.9	97.2	33.4
2000.0	80.5	9.9	94.3	33.1
2500.0	78.8	9.9	91.1	32.3
3150.0	79.4	1.0	88.3	29.1
4000.0	84.3	5.6	85.5	29.1
5000.0	81.4	9.9	83.7	33.3
6300.0	79.9	9.9	82.0	34.7
8000.0	77.6	9.9	79.1	37.3
10000.0	75.6	9.9	76.4	35.4

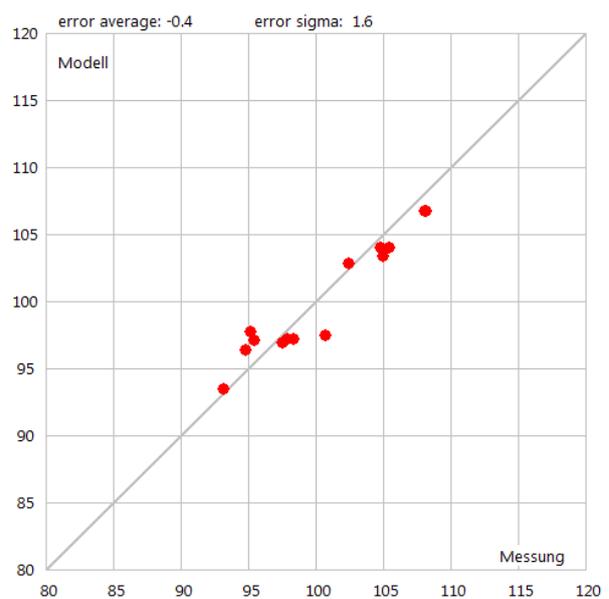


Abbildung 61: X-Y Plot der gemessenen und modellierten A-Summenpegel.