

Empa
Überlandstrasse 129
CH-8600 Dübendorf
T +41 44 823 47 43
F +41 44 823 47 93
www.empa.ch



B+S AG
René Bayer
Muristrasse 60
Postfach
3000 Bern 31

Untersuchungsbericht Nr. 521400.4021

Tamlärm: Formulierung als SonRail-Emission

Auftraggeber: B+S AG, 3000 Bern 31

Ihr Auftrag vom: 15.11.2013

Anzahl Seiten: 17

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	2
1 Einleitung	3
2 sonRAIL-Emissionsmodell	4
3 Besonderheiten der Tramlärmquelle	6
4 Messdatenverarbeitung zur Ermittlung des Schalleistungspegels einer Tramkomposition	7
5 sonRAIL Parameterschätzung	9
6 Diskussion	16

Eidg. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
Abteilung Akustik / Lärminderung
Dübendorf, 6.6.2014

Sachbearbeiter:

Kurt Heutschi

Abteilungsleiter:

Kurt Eggenschwiler

Anmerkung: Bericht und Unterlagen werden 10 Jahre archiviert.

Zusammenfassung

Unter der Annahme, dass bei modernen Tramfahrzeugen die akustischen Emissionen in der Regel durch das Rollgeräusch dominiert werden, wurden exemplarisch die Vorbeifahrts-Ereignisenergiemessungen an vier Tramtypen bei unterschiedlichem Untergrund in den sonRAIL Quellenmodell-Formalismus übersetzt. Hierbei wurden typische Rad- und Schienenrauheitsspektren und ein analytisch beschreibbares Kontaktfilter zu Grunde gelegt. Durch Anpassung der Oberbautransferfunktion wurde schliesslich spektral beste Übereinstimmung mit den Messdaten erzielt. Es zeigte sich, dass damit die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Tramemissionen zufriedenstellend nachgebildet werden kann.

1 Einleitung

Für die Bestimmung der akustisch abgestrahlten Leistung von Eisenbahnfahrzeugen steht mit sonRAIL [1],[2] ein detailliertes, auf der TWINS-Modellvorstellung basierendes, Quellenmodell zur Verfügung. Die Rollgeräuschestehung wird nachgebildet, indem ausgehend von der Rad- und Schienenrauheit zusammen mit der Fahrzeuggeschwindigkeit eine Systemanregung ermittelt wird, die dann über eine Fahrzeug- und Oberbautransferfunktion in eine abgestrahlte Schalleistung umgerechnet werden kann. Da bei Tramfahrzeugen die Rollgeräusch-Schallentstehungsmechanismen vergleichbar sind, bietet es sich an, die akustische Emission von Tramfahrzeugen ebenfalls im sonRAIL-Formalismus auszudrücken.

Mit Nachricht vom 15.11.2013 beauftragte die B+S AG die EMPA, Abteilung Akustik / Lärminderung mit der Aufbereitung von quellennahen akustischen Messungen an Tramkompositionen in Zürich, Basel und Bern für die Integration in das sonRAIL-Emissionsmodell. Die von B+S durchgeführten Messungen umfassten folgende Fahrzeuge und Betriebszustände:

Zürich, Cobra, Asphalt, horizontal Geschwindigkeiten 18 km/h, 36 km/h und 48 km/h

Zürich, Cobra, Asphalt, 8% bergwärts Geschwindigkeiten 18 km/h, 36 km/h und 48 km/h

Zürich, Cobra, Asphalt, 8% talwärts Geschwindigkeiten 18 km/h, 24 km/h und 30 km/h

Zürich, Cobra, Rasengitter, horizontal Geschwindigkeiten 18 km/h, 36 km/h und 48 km/h

Basel, BLT Tango, Asphalt, horizontal Geschwindigkeiten 20 km/h, 35 km/h und 50 km/h

Basel BVB Combino, Asphalt, horizontal Geschwindigkeiten 20 km/h, 35 km/h und 50 km/h

Bern Combino, Asphalt, horizontal Geschwindigkeiten 20 km/h, 35 km/h, 45 km/h und 50 km/h

Bern Combino, Asphalt, 3.2% bergwärts Geschwindigkeiten 20 km/h, 35 km/h und 50 km/h

Bern Combino, Asphalt, 3.2% talwärts Geschwindigkeiten 20 km/h und 35 km/h

Für jeden Zustand wurden sieben Vorbeifahrtseignisse ausgemessen. Dazu wurde der Schalldruck in 7.5 m Abstand, 1.2 m über hartem Boden gemessen und spektral in Form eines Ereignispegels (SEL) ausgewertet. Für die hier beschriebene Weiterverarbeitung der Messdaten wurde jeweils der energetische Mittelwert der Ereignispegelspektren verwendet.

2 sonRAIL-Emissionsmodell

Das sonRAIL Emissionsmodell [1],[2] beschreibt die Abstrahlung eines Wagens oder einer Lok durch eine Reihe von Punktquellen auf fünf verschiedenen Höhen (0,0, 0,5, 2,0, 3,0, 4,0 m). Damit werden die unterschiedlichen, möglichen Schallentstehungsmechanismen repräsentiert. Die Aufschlüsselung in unterschiedliche Höhen ist insbesondere bei Hindernissen um beim Bodeneffekt von Bedeutung.

Die Punktquellen werden je durch ein Schalleistungsspektrum in Terzen von 100 Hz bis 8 kHz spezifiziert. Die Schalleistungen sind abhängig von der Geschwindigkeit, dem Fahrzeugtyp, dem Bremssystem, der Schienenrauheit und dem Oberbautyp.

Die Emission eines Schienenfahrzeuges setzt sich aus dem Rollgeräusch einerseits sowie Antriebs- und Aggregatgeräuschen andererseits zusammen. Diese beiden Anteile werden je durch einen separaten Modellansatz beschrieben.

2.1 Rollgeräuschmodell

2.1.1 Rechenvorschrift

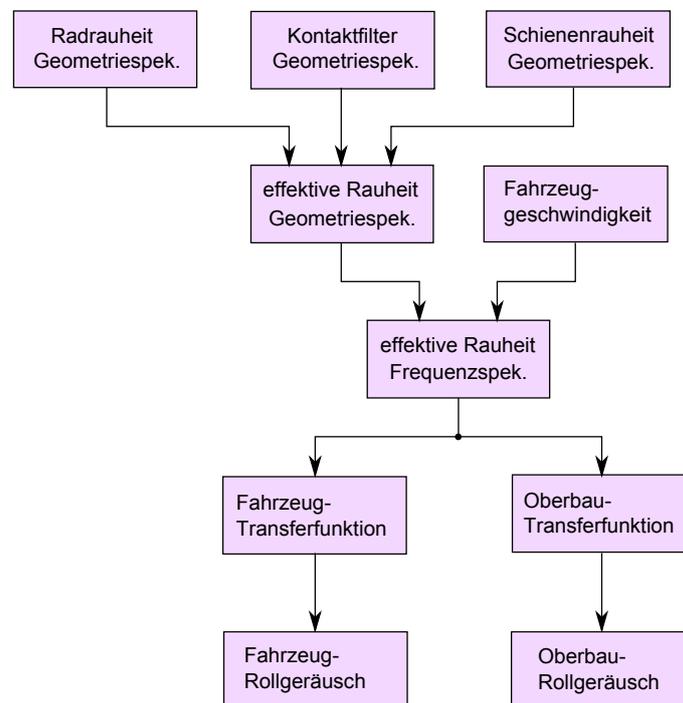


Abbildung 1: In sonRAIL verwendetes Rollgeräuschmodell.

Die Rollgeräuschberechnung in sonRAIL folgt der IMAGINE- bzw. TWINS-Modellvorstellung gemäss Abbildung 1 und umfasst vier Schritte:

1. Terzbandweise Ermittlung der beim Rollen entstehenden effektiven Rauheit (ausgedrückt als Geometrie-Wellenlängenspektrum) anhand der Rauheiten der Räder und der Schiene und des Kontaktfilters. Dieses Filter berücksichtigt die Grösse der Kontaktfläche von Rad und Schiene.
2. Übersetzung des Geometrie-Wellenlängenspektrums der effektiven Rauheit in das entsprechende Frequenzterzbandspektrum (mechanische Anregung). Diese Zuordnung ist abhängig von der Fahrzeuggeschwindigkeit v und verwendet den Zusammenhang: $f = v/\lambda$ mit f : Frequenz, λ : Geometrie-Wellenlänge.
3. Übersetzung der mechanischen Anregung in die Schwingungen der beteiligten Strukturen (Räder einerseits und Oberbau andererseits, welcher sich aus den Schwellen und den Schienen zusammensetzt)

mittels Transferfunktionen. Die Transferfunktionen sind vom Fahrzeugtyp und dem Oberbau abhängig und werden ebenfalls als Terzspektren ausgedrückt.

4. Berechnung der akustisch abgestrahlten Leistung pro Terzband für das spezifische Fahrzeug und den spezifischen Oberbau.

Die das Oberbaurollgeräusch darstellende Quelle wird auf 0.0 m angenommen, die das Fahrzeugrollgeräusch repräsentierende Quelle wird auf 0.5 m angesetzt. Neben der Fahrt auf freier, gerader Strecke sind zusätzlich spezielle Ansätze für Weichen, verschiedene Brückentypen sowie Kurvenfahrten integriert.

Das Rollgeräusch insgesamt wird durch die terzbandweise abgestrahlte Schalleistung des Fahrzeuges $L_{W,veh,i}$ und des Oberbaus $L_{W,tr,i}$ dargestellt:

$$L_{W,veh,i} = L_{r,tot,i} + L_{HW,veh,i} + 10 \log(N_{ac}) \quad (1)$$

$$L_{W,tr,i} = L_{r,tot,i} + L_{HW,tr,i} + 10 \log(N_{ac}) \quad (2)$$

wobei $L_{r,tot,i}$ der effektiven Gesamtrauheit im Terzband i , $L_{HW,veh,i}$ der Fahrzeugtransferfunktion im Terzband i , $L_{HW,tr,i}$ der Oberbautransferfunktion im Terzband i und N_{ac} der Anzahl Achsen entspricht.

Die effektive Gesamtrauheit $L_{r,tot,i}$ im Terzband i entspricht der effektiven Gesamtrauheit L_{r,tot,λ_i} im Geometrie-Wellenlängenband λ_i gemäss

$$\lambda_i = \frac{v}{f_i} \quad (3)$$

wobei f_i der Mittenfrequenz des Terzbandes i und v der Fahrzeuggeschwindigkeit entspricht.

Die effektive Gesamtrauheit L_{r,tot,λ_i} ergibt sich aus der energetischen Summe der Radrauheit L_{r,veh,λ_i} und der Schienenrauheit L_{r,tr,λ_i} unter Berücksichtigung des Kontaktfilters A_{3,λ_i} zu

$$L_{r,tot,\lambda_i} = 10 \log (10^{0.1L_{r,veh,\lambda_i}} + 10^{0.1L_{r,tr,\lambda_i}}) + A_{3,\lambda_i} \quad (4)$$

2.2 Antriebs- und Aggregatsgeräusche

Für Antriebs- und Aggregatsgeräusche (Sekundärgeräuschquellen) werden basierend auf Messdaten für verschiedene Zustände Terzband-Emissions-Schalleistungsspektren L_W ermittelt. Diese setzen sich aus einem Grundwert und einer Geschwindigkeitsabhängigkeit wie folgt zusammen:

$$L_{W,h,i} = L_{W,80,h,i} + \beta_{h,i} \log \left(\frac{v}{v_0} \right) \quad (5)$$

mit i : Terzbandnummer, h : Index der Quellenhöhe, β Parameter zur Beschreibung der Geschwindigkeitsabhängigkeit und v_0 : Referenzgeschwindigkeit = 80 km/h.

3 Besonderheiten der Tramlärmquelle

Bei der Interpretation der Tramlärmquelle als Eisenbahnfahrzeug verdienen die Aspekte *Quellenhöhe* und *Untergrund* besondere Beachtung:

Quellenhöhe Die repräsentative Höhe der Tramlärmquelle liegt nur knapp über Boden. Basierend auf ausländischen Untersuchungen wurde sie in [3] zu 10 cm angenommen. Da in sonRAIL nur die Quellhöhen 0.0 und 0.5 m zur Verfügung stehen, wird die Tramlärmquelle vollständig der Höhe 0.0 m zugeordnet. Dies bedeutet, dass für Tramlärm im sonRAIL Formalismus ausschliesslich ein (fiktiver) Oberbau-Rollgeräuschanteil angenommen wird.

Untergrund Im Gegensatz zu Eisenbahnlinien sind Tramschienen meist auf Asphaltflächen verlegt. Dementsprechend muss eine Ausbreitungsberechnung einen akustisch harten Boden annehmen. Als sonRAIL-Quellenkonfiguration wird daher *Feste Fahrbahn* verwendet.

In dieser Phase wird die Tramlärmquelle ohne Aggregatsgeräusche modelliert, d.h. die ganze Emission dem Rollgeräusch zugerechnet.

4 Messdatenverarbeitung zur Ermittlung des Schalleistungspegels einer Tramkomposition

4.1 Umrechnung auf Freifeld

In einem ersten Schritt wird der in der Messgeometrie (7.5 m / 1.2 m) erwartete bzw. von sonRAIL berechnete Bodeneffekt für eine Vorbeifahrt bestimmt, wobei die in sonRAIL angenommene Quellenhöhe von 0.0 m eingesetzt wird. Hierbei ist zu beachten, dass sich die Quellenhöhe 0.0 m auf das Niveau der Schienenoberkante bezieht. Mit der Default-Geometrie der in sonRAIL verwendeten Quellenkonfiguration *Feste Fahrbahn* (Höhe 0.05 m) ergibt sich dadurch insgesamt eine Höhe von 0.20 m über Boden. Dieser in Abbildung 2 gezeigte Bodeneffekt wird spektral von den gemessenen Terzbandspektren $L_{E,i}$ abgezogen um auf Freifeld-Schalldruckspektren $L_{E_f,i}$ zu schliessen, mit i : Terzbandnummer.

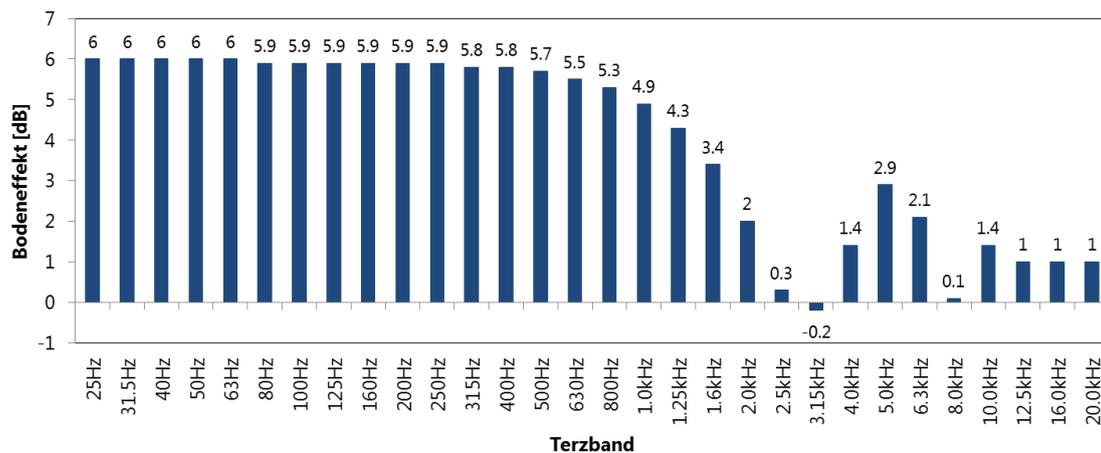


Abbildung 2: Angenommener und invers auf die Messspektren angewendeter Bodeneffekt zur Umrechnung auf Freifeld (Integration über eine Linienquelle, 0.2 m über hartem Boden, Empfänger 1.2 m über Boden in 7.5-0.75=6.75 m Distanz).

4.2 Bestimmung des Schalleistungspegels

Im zweiten Schritt wird aus der Freifeldereignisenergie $L_{E_f,i}$ in jedem Terzband i auf die Schalleistung $L_{W,i}$ einer Punktquelle geschlossen, die sich mit der Fahrzeuggeschwindigkeit bewegt [3]. Unter Vernachlässigung der Luftdämpfung kann für das Vorbeifahrtseignis folgende Beziehung aufgestellt werden:

$$L_{E_f,i} = 10 \log \left(\frac{1}{1s} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\rho c W_i}{4\pi(d^2 + (v't)^2)p_0^2} dt \right) \quad (6)$$

wobei ρ der Luftdichte, c der Schallgeschwindigkeit, W_i der Quellenleistung im Terzband i , d dem kürzesten Abstand, v' der Geschwindigkeit in m/s, t der Zeit und p_0 dem Referenzschalldruck = 2E-5 Pa entspricht. Mit Substitution von $dt = dx/v'$ wird Gl. 6 zu

$$L_{E_f,i} = 10 \log \left(\frac{\rho c W_i}{4\pi v' p_0^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{d^2 + x^2} dx \right) \quad (7)$$

und daraus schliesslich für $d = 7.5$ m

$$L_{W,i} = L_{E_f,i} + 9.2 + 10 \log(v) \quad (8)$$

wobei in Gl. 8 v der Geschwindigkeit in km/h entspricht. Die Abbildung 3 zeigt die so gewonnenen A-bewerteten Summen-Schalleistungspegel der vermessenen Tramkompositionen. Die Tramkompositionen werden hier integral betrachtet und nicht in einzelne Achsen aufgelöst.

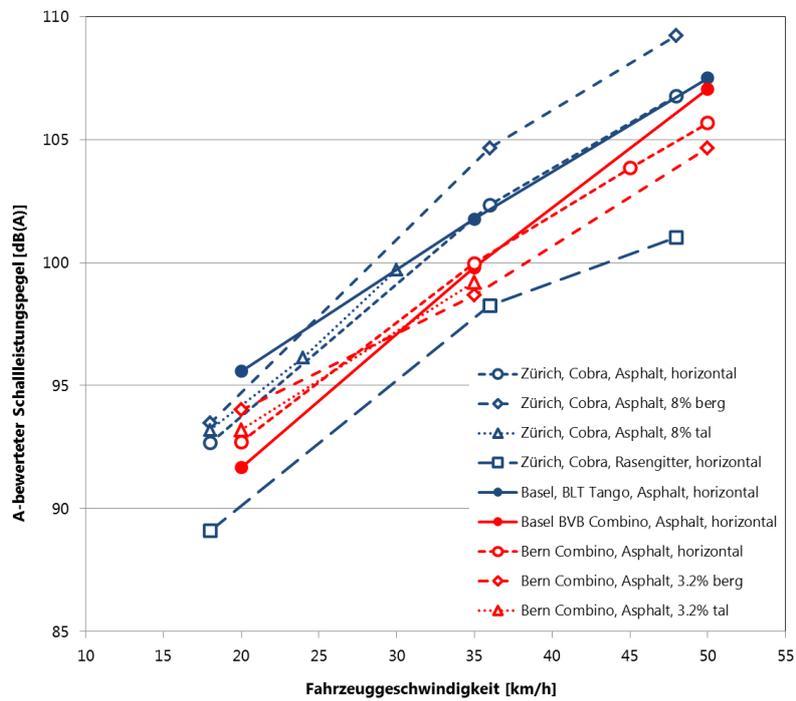


Abbildung 3: Übersicht der Punktquellen-Schallleistungspegel der untersuchten Tramkompositionen in Abhängigkeit der Geschwindigkeit.

5 sonRAIL Parameterschätzung

5.1 a priori Annahmen für horizontale Fahrt

Für die sonRAIL Quellencharakterisierung sind folgende Wellenlängen- bzw. Terzbandspektren zu spezifizieren:

- Radrauheit
- Schienenrauheit
- Kontaktfilter
- Oberbautransferfunktion

Für die vorliegenden akustischen Messungen stehen keine expliziten Daten zu diesen Parametern zur Verfügung. Um die grosse Parametervielfalt etwas einzuschränken wird vorgeschlagen, *a priori* Annahmen zu den Rad- und Schienenrauheiten sowie dem Kontaktfilter zu treffen und lediglich die Oberbautransferfunktion für die Anpassung an die Messwerte zu verwenden. Man beachte, dass die Geschwindigkeitsabhängigkeit der akustisch abgestrahlten Leistung ausschliesslich durch die Wahl der Rauheitsspektren und des Kontaktfilters festgelegt wird.

Basierend auf Messungen an einem Niederflurtram T3000 [4] wird als Radrauheit das in Tabelle 1 gezeigte Spektrum angenommen. Als Schienenrauheit wird das Spektrum *bad* aus sonRAIL verwendet.

Für Tramräder mit einem Durchmesser von etwa 600 mm wird als Kontaktfilter eine Tiefpassfilterfunktion gemäss Gleichung 9 angenommen, wobei der Parameter λ_0 für horizontale Fahrt zu 3 cm festgelegt wurde. Die Abbildung 4 zeigt die Kontaktfilterkurve im Vergleich zu Angaben aus Cnossos [5] und sonRAIL [2].

$$A_{3,\lambda_i} = -10 \log \left(1 + \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_i} \right)^2 \right) \quad (9)$$

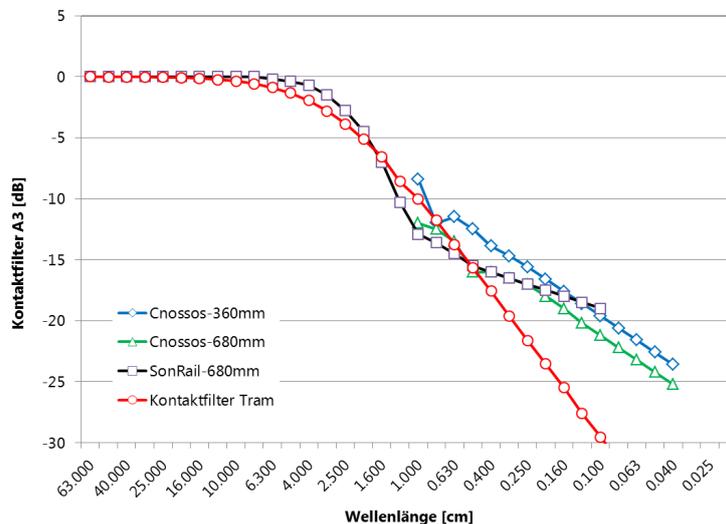


Abbildung 4: Kontaktfilterkurven für 360 bzw. 680 mm Räder gemäss Cnossos und für 680 mm Räder gemäss sonRAIL sowie die gemäss Gl. 9 hier angenommene Kurve für Tramräder.

λ [cm]	Radrauheit [dB re. 1 μm]	Schienenrauheit [dB re. 1 μm]	Kontaktfilter A_{3,λ_i} [dB]
63.000	15.0	14.3	0.0
50.000	14.0	13.8	0.0
40.000	13.0	13.3	0.0
31.500	12.0	12.8	0.0
25.000	11.0	12.3	-0.1
20.000	10.0	11.8	-0.1
16.000	9.0	10.9	-0.2
12.500	8.0	10.1	-0.2
10.000	7.0	9.5	-0.4
8.000	6.0	9.1	-0.6
6.300	5.0	8.9	-0.9
5.000	4.0	8.5	-1.3
4.000	3.0	7.8	-1.9
3.150	2.0	6.5	-2.8
2.500	1.0	4.9	-3.9
2.000	0.0	2.7	-5.1
1.600	-1.0	-1.3	-6.5
1.200	-2.0	-3.7	-8.6
1.000	-3.0	-5.3	-10.0
0.800	-4.0	-7.3	-11.8
0.630	-5.0	-8.3	-13.7
0.500	-6.0	-9.3	-15.7
0.400	-7.0	-10.3	-17.6
0.315	-8.0	-11.3	-19.6
0.250	-9.0	-12.3	-21.6
0.200	-10.0	-13.3	-23.5
0.160	-11.0	-14.3	-25.5
0.125	-12.0	-15.3	-27.6
0.100	-13.0	-16.3	-29.5
0.079	-14.0	-17.3	-31.6
0.063	-15.0	-18.3	-33.6
0.050	-16.0	-19.3	-35.6
0.040	-17.0	-20.3	-37.6
0.032	-18.0	-21.3	-39.6
0.025	-19.0	-22.3	-41.6
0.020	-20.0	-23.3	-43.6

Tabelle 1: Angenommene Spektren der Radrauheit L_{r,veh,λ_i} , der Schienenrauheit L_{r,tr,λ_i} und Kontaktfilter A_{3,λ_i} in Abhängigkeit der Wellenlänge λ .

5.2 Angepasste Transferfunktionen für horizontale Fahrt

Die Tabelle 2 zeigt die für beste Übereinstimmung mit den Messwerten für horizontale Fahrt angepassten Oberbau-Transferfunktionen $L_{HW,tr,i}$.

Im A-bewerteten Schalleistungspegel ergeben sich als Differenzen Berechnung - Messung die in Tabelle 3 gezeigten Werte. Mit Ausnahme des Basler Combino Trams liegen die nach dem sonRAIL Formalismus bestimmten Schalleistungspegel innerhalb eines Intervalls von ± 1 dB(A) bezogen auf die Messwerte.

Die Abbildungen 5 bis 9 zeigen den terzbandweisen Vergleich der berechneten und gemessenen Schalleistungspegel.

	ZüCobAs-h	ZüComRa-h	BaTanAs-h	BaComAs-h	BeComAs-h
100	78.9	78.6	83.8	84.7	79.7
125	81.0	78.4	83.6	88.2	80.5
160	80.8	78.4	80.9	85.8	82.7
200	79.8	76.9	79.9	87.3	87.3
250	79.1	79.1	82.7	88.8	86.6
315	80.5	82.1	86.1	87.5	85.6
400	87.3	84.8	90.9	90.9	91.5
500	91.2	89.1	91.3	94.4	93.4
630	94.6	93.5	96.5	95.3	94.6
800	99.0	96.6	101.7	100.1	99.8
1000	100.1	97.8	105.4	103.9	105.0
1250	106.7	103.9	105.5	104.6	102.5
1600	110.3	105.4	107.4	105.0	105.9
2000	113.2	105.5	110.8	107.9	105.7
2500	114.3	104.5	112.9	110.1	109.8
3150	116.2	108.0	114.5	111.1	112.5
4000	117.7	111.0	122.4	111.8	112.8
5000	117.6	111.2	112.7	109.4	110.8
6300	115.7	109.2	114.3	110.8	111.5
8000	118.1	111.8	117.8	113.8	113.4

Tabelle 2: Angepasste Oberbau-Transferfunktionen $L_{HW,tr,i}$ mit ZüCobAs-h: Zürich Cobra Asphalt horizontal, ZüCobRa-h: Zürich Cobra Rasengitter horizontal, BaTanAs-h: Basel BLT Tango Asphalt horizontal, BaComAs-h: Basel BVB Combino Asphalt horizontal, BeComAs-h: Bern Combino Asphalt horizontal.

	Geschw. 1	Geschw. 2	Geschw. 3
Zürich Cobra Asphalt horizontal	0.4	-0.3	-1.0
Zürich Cobra Rasengitter horizontal	-0.6	-0.9	0.2
Basel BLT Tango Asphalt horizontal	-0.8	0.2	-0.8
Basel BVB Combino Asphalt horizontal	1.7	0.6	-2.2
Bern Combino Asphalt horizontal	0.1	0.1	-0.5

Tabelle 3: Differenzen im A-bewerteten Schallleistungspegel: Berechnung minus Messung.

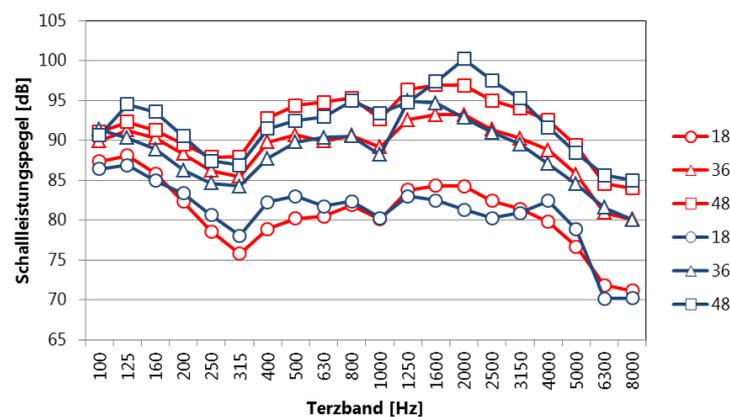


Abbildung 5: Vergleich der gemessenen (blau) und berechneten (rot) Terzband-Schallleistungspegel für die verschiedenen Geschwindigkeiten für das Zürcher Cobra auf Asphalt horizontal.

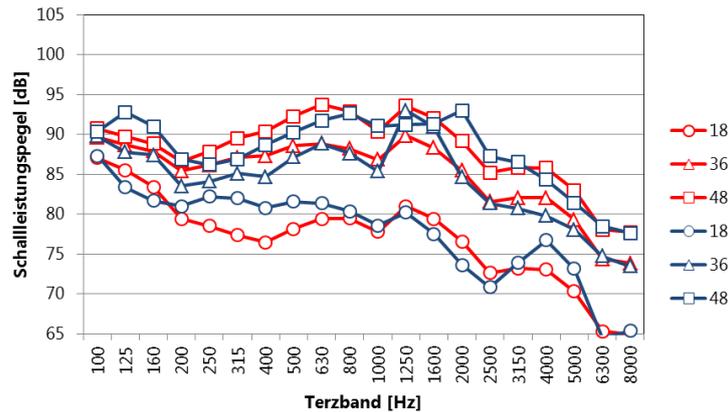


Abbildung 6: Vergleich der gemessenen (blau) und berechneten (rot) Terzband-Schalleistungspegel für die verschiedenen Geschwindigkeiten für das Zürcher Cobra auf Rasengitter horizontal.

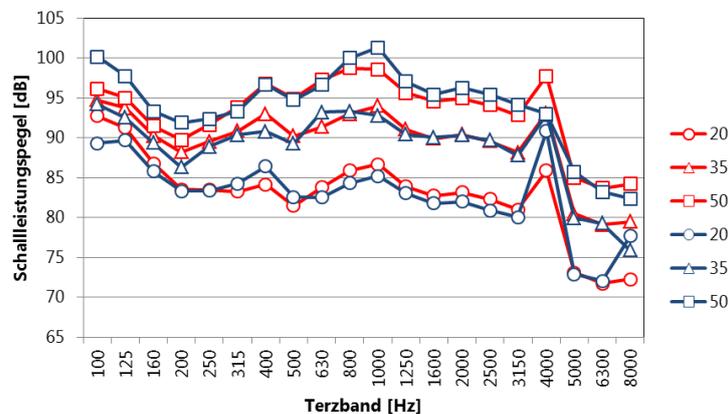


Abbildung 7: Vergleich der gemessenen (blau) und berechneten (rot) Terzband-Schalleistungspegel für die verschiedenen Geschwindigkeiten für das Basler Tango auf Asphalt horizontal.

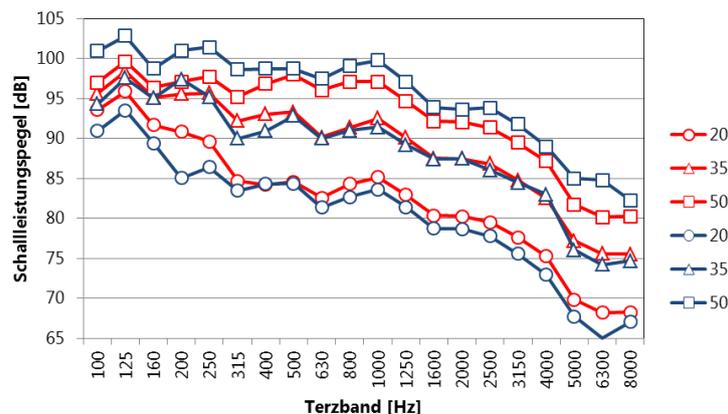


Abbildung 8: Vergleich der gemessenen (blau) und berechneten (rot) Terzband-Schalleistungspegel für die verschiedenen Geschwindigkeiten für das Basler Combino auf Asphalt horizontal.

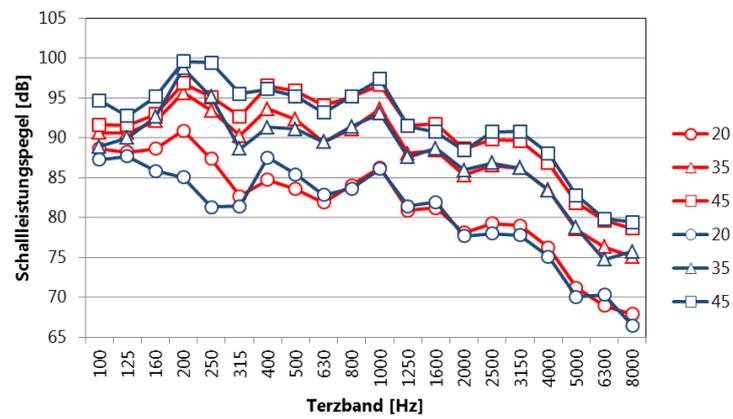


Abbildung 9: Vergleich der gemessenen (blau) und berechneten (rot) Terzband-Schalleistungspegel für die verschiedenen Geschwindigkeiten für das Berner Combino auf Asphalt horizontal.

5.3 Bergfahrt

Anhand der Messungen lässt sich lediglich für die Bergfahrt mit 8% Steigung im Falle des Zürcher Cobra Trams eine systematische Pegelzunahme erkennen. Es wird hier die Strategie verfolgt, diesen Zuschlag für die Bergfahrt durch ein modifiziertes Kontaktfilter abzubilden und die Rauheiten und Transferfunktion wie in der Situation *horizontal* anzunehmen. Beste Anpassung an die Messungen ergibt sich durch Wahl des Parameters $\lambda_0 = 2.3$ cm in Gl. 9. Die Tabelle 4 zeigt die sich ergebenden Werte, die Abbildung 10 zeigt den Vergleich zur Kontaktfilterkurve für ebene Fahrt. Im A-Pegel ergeben sich Differenzen zwischen Berechnung und Messung von 1.8 dB(A) bei 18 km/h, -0.5 dB(A) bei 36 km/h und -1.4 dB(A) bei 48 km/h.

λ [cm]	Kontaktfilter A_{3,λ_i} [dB]
63.000	0.0
50.000	0.0
40.000	0.0
31.500	0.0
25.000	0.0
20.000	-0.1
16.000	-0.1
12.500	-0.1
10.000	-0.2
8.000	-0.3
6.300	-0.5
5.000	-0.8
4.000	-1.2
3.150	-1.9
2.500	-2.7
2.000	-3.7
1.600	-4.9
1.200	-6.7
1.000	-8.0
0.800	-9.7
0.630	-11.6
0.500	-13.5
0.400	-15.3
0.315	-17.3
0.250	-19.3
0.200	-21.2
0.160	-23.2
0.125	-25.3
0.100	-27.2
0.079	-29.2
0.063	-31.2
0.050	-33.3
0.040	-35.3
0.032	-37.3
0.025	-39.3
0.020	-41.3

Tabelle 4: Kontaktfilter A_{3,λ_i} für die 8%ige Bergfahrt des Zürcher Cobra Trams in Abhängigkeit der Wellenlänge λ .

Die Abbildung 11 zeigt den terzbandweisen Vergleich der berechneten und gemessenen Schallleistungspegel.

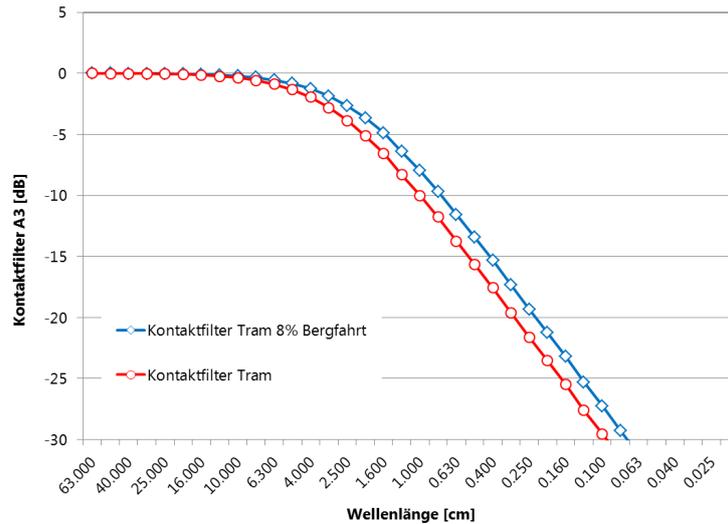


Abbildung 10: Kontaktfilterkurve für die 8% ige Bergfahrt im Vergleich zur Referenzkurve für flache Fahrt.

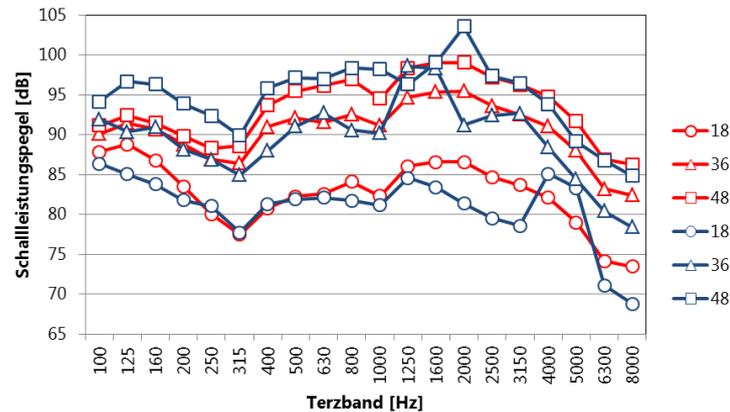


Abbildung 11: Vergleich der gemessenen (blau) und berechneten (rot) Terzband-Schalleistungspegel für die verschiedenen Geschwindigkeiten für das Zürcher Cobra auf Asphalt in der 8%igen Bergfahrt.

5.4 Beispielrechnung

Es soll der 1kHz-Terzband-Schalleistungspegel des Berner Combino Trams bei einer Geschwindigkeit von 36 km/h bestimmt werden.

Mit dem oben dargestellten Modell berechnet sich der Schalleistungspegel $L_{W,tr,i}$ einer Tramkomposition im Terzband i zu:

$$L_{W,tr,i} = 10 \log (10^{0.1L_{r,veh,\lambda_i}} + 10^{0.1L_{r,tr,\lambda_i}}) + A_{3,\lambda_i} + L_{HW,tr,i} \quad (10)$$

Die Geschwindigkeit von 36 km/h (v) bzw. 10 m/s (v') übersetzt sich mit

$$\lambda_i = \frac{v'}{f_i} \quad (11)$$

in eine Wellenlänge λ_i von 1.0 cm. Aus Tabelle 1 folgt:

$$\begin{aligned} L_{r,veh,1.0cm} &= -3.0 \\ L_{r,tr,1.0cm} &= -5.3 \end{aligned}$$

$$A_{3,1.0cm} = -10.0$$

Der Wert der Oberbautransferfunktion für 1 kHz ergibt sich aus Tabelle 2 zu:

$$L_{HW,tr,1kHz} = 105.0$$

und damit $L_{W,tr,1kHz} = 94.0$ dB

6 Diskussion

Die Übersetzung in den sonRAIL Formalismus zeigt mit plausiblen Annahmen zu den Rad- und Schienenrauheiten und zum Kontaktfilter sowie geeignet gesetzter Transferfunktion eine zuverlässige rechnerische Nachbildung der Messdaten. Als Vergleichsgrösse Messung/Berechnung wurde hier die akustisch abgestrahlte Schalleistung herangezogen.

Für eine Integration in das sonRAIL Webtool müssten im Webtool zusätzliche Anpassungen am Bodeneffekt, d.h. bei der Ausbreitungsrechnung zum 7.5 m Mikrofonpunkt, vorgenommen werden, da bei Tramlärsituationen in der Regel von harten Bodenflächen auszugehen ist.

Literatur

- [1] T. Thron, M. Hecht, The sonRAIL emission model for rail way noise in Switzerland, Acta Acustica united with Acustica, vol. 96, 873-883, 2010.
- [2] D. Sehu et al., sonRAIL Projektdokumentation, 7. Oktober 2010.
- [3] B+S AG, Bern: Ermittlung der Tramlärmemissionen, Definition von Emissionswerten, Aktualisierung 2011.
- [4] Ander Frid, Martin Ognar, Eva Lundberg, Noise from trams - source identification and effects of noise mitigation measures, Thirteenth International Congress on Sound and Vibration, Vienna, Austria 2006.
- [5] Stylianos Kephelopoulos, Marco Paviotti, Fabienne Anfosso-Lédée (2012) Common Noise Assessment Methods in Europe (CNOSSOS-EU).