

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



Fredy Fischer
Bundesamt für Umwelt BAFU
Abteilung Lärm und NIS
3003 Bern

Vollständige Beschreibung des sonRAIL-Emissionsmodells

Untersuchungsbericht: Empa 5214.024934-1

Anzahl Seiten: 44

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Berechnung des Schalleistungspegels L_W	5
3	Berechnung von abgeleiteten Emissionspegeln	11
A	Modellparameter	14
B	Referenzfälle	40
	Literatur	44

Dübendorf, 8. Februar 2022
Der Projektleiter:

Dr. Reto Pieren

Empa - Akustik/Lärmminderung
Abteilungsleiter:

Dr. Jean Marc Wunderli

Impressum

Auftraggeber

Bundesamt für Umwelt (BAFU)

Autor/Auftragnehmer

Axel Heusser, Reto Pieren

Empa | Überlandstrasse 129 | CH-8600 Dübendorf

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

1 Einleitung

Im Forschungsprojekt sonRAIL (2007–2009) wurde von der TU Berlin ein Bahnlärm-Emissionsmodell entwickelt und im Jahr 2010 in der Projektdokumentation [1] und einem wissenschaftlichen Artikel [2] beschrieben. Das Modell wurde von der TU Berlin und der Firma Prose in Microsoft Excel und von der Firma n-Sphere in einer Web-Applikation implementiert. Seither sind Änderungen an den Modelleingangsdaten vorgenommen worden. Diese Änderungen, deren Begründungen und Auswirkungen auf die Berechnungsergebnisse wurden stellenweise nicht ausreichend dokumentiert bzw. zwischen allen Projektpartnern kommuniziert. In der Folge haben nicht alle Parteien vollständige und aktuelle Kenntnis über die Versionschronik. Die Empa wurde daher fortan als zentrale Anlaufstelle in Sachen sonRAIL berufen. Unter dem Vertrag betreffend „Fragen der Lärm-ermittlung“ zwischen dem BAFU und der Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung wird die Qualitätssicherung des sonRAIL-Emissionsmodells weiterverfolgt.

Mit diesem Bericht wird der Algorithmus vollständig beschrieben und der recherchierte Datenstand Februar 2022 des sonRAIL-Emissionsmodells gegeben. Spätere Anpassungen oder Erweiterungen werden bei der Empa zur Prüfung eingereicht, in den Referenzberechnungen aufgenommen, archiviert und für alle Interessenten zugänglich veröffentlicht. Zur Verifikation einer sonRAIL-Implementierung müssen die Ergebnisse mit gleichen Eingangsparametern mit denen des Referenzsatzes [3] übereinstimmen.

Nomenklatur

β	Geschwindigkeitskoeffizient der Sekundärquellen
δ	Interpolationsparameter für Transformation Wellenlänge-Frequenz
η_{flat}	Anteil Achsen mit Radflachstelle in %
γ_c	Parameter zur Skalierung des Einflusses des Bogenradius
λ	Wellenlänge in m
λ_c	Terzbandmittenwellenlänge in m
ϕ	Aspektwinkel in rad
A_3	Rad-Schiene-Kontaktfilter in dB
A_{bew}	A-Bewertungsfilter als Korrekturpegel pro Frequenzband in dB
B	Achsenverschiebung für Transformation Wellenlänge-Frequenz
b	Interpolationsparameter für Transformation Wellenlänge-Frequenz
d_0	Horizontale Normmessdistanz in m, $d_0 = 7.5$ m
d_h	Distanz Quelle-Empfänger in m
D_{gr}	Bodeneffekt als Verstärkung in dB
f	Frequenz in Hz
f_c	Terzbandmittenfrequenz in Hz
h	Quellenhöhe in m
h_0	Normmesshöhe über Schienenoberkante in m, $h_0 = 1.2$ m
i	Frequenzbandindex
k	Index für Fahrzeug-Geschwindigkeitsgruppe
$K1$	Pegelkorrektur gemäss Anhang 4 der Lärmschutzverordnung in dB
L_W	Schalleistungspegel in dB rel. 10^{-12} W
L_A	A-bewertete Pegelgrösse in dB
$L_{\text{eq},1\text{h},\text{norm}}$	Äquivalenter Dauerschalldruckpegel über 1h an der Normmessposition
$L_{\text{eq},1\text{h}}$	Äquivalenter Dauerschalldruckpegel über 1h
$L_{\text{eq},e}$	Emissionswert für SEMIBEL im Referenzabstand 1 m in dB
$L_{r,e}$	Beurteilungspegel in dB
l_{veh}	Fahrzeuglänge in m
$L_{HW,\text{tr}}$	Transferfunktion des Oberbaus in dB rel. 1 W/m^2
$L_{HW,\text{veh}}$	Transferfunktion des Fahrzeugs in dB rel. 1 W/m^2
L_{peq,T_p}	Vorbeifahrtsschalldruckpegel in dB rel. $20 \mu\text{Pa}$

$L_{r,curve}$	Äquivalenter Kurven-Rauheitspegel in dB rel. 10^{-6} m
$L_{r,flat}$	Äquivalenter Flachstellen-Rauheitspegel in dB rel. 10^{-6} m
$L_{R,tot,curve}$	Kombinierter, effektiver Rauheitspegel für Bogenfahrt in dB rel. 10^{-6} m
$L_{R,tot,imp}$	Kombinierter, effektiver Rauheitspegel für Weichenfahrt in dB rel. 10^{-6} m
$L_{R,tot}$	Kombinierter, effektiver Rauheitspegel in dB rel. 10^{-6} m
$L_{r,tr,imp}$	Äquivalenter Schienenrauheitspegel für Weichenfahrt in dB rel. 10^{-6} m
$L_{r,tr}$	Schienenrauheitspegel in dB rel. 10^{-6} m
$L_{r,veh,curve}$	Äquivalenter Radrauheitspegel für Bogenfahrt in dB rel. 10^{-6} m
$L_{r,veh}$	Radrauheitspegel in dB rel. 10^{-6} m
L_R	Rauheitspegel in dB rel. 10^{-6} m
$L_{W'}$	Längenbezogener Schalleistungspegel in dB rel. 10^{-12} W/m
$L_{W,aero,200}$	Schalleistungspegel der aerodynamischen Quellen bei 200 km/h in dB rel. 10^{-12} W
$L_{W,aero}$	Schalleistungspegel von aerodynamischen Quellen in dB rel. 10^{-12} W
$L_{W,bridge}$	Schalleistungspegel des Brückeneinflusses in dB rel. 10^{-12} W
$L_{W,curve}$	Schalleistungspegel der Bogenfahrt in dB rel. 10^{-12} W
$L_{W,impact}$	Schalleistungspegel der Weichenfahrt in dB rel. 10^{-12} W
$L_{W,roll,tr}$	Schalleistungspegel des vom Oberbau abgestrahlten Rollgeräuschs in dB rel. 10^{-12} W
$L_{W,roll,veh}$	Schalleistungspegel des vom Fahrzeug abgestrahlten Rollgeräuschs in dB rel. 10^{-12} W
$L_{W,roll}$	Schalleistungspegel des Rollgeräuschs in dB rel. 10^{-12} W
$L_{W,sec,80}$	Schalleistungspegel der Sekundärquellen bei 80 km/h in dB rel. 10^{-12} W
$L_{W,sec}$	Schalleistungspegel der Sekundärquellen in dB rel. 10^{-12} W
$L_{W,WRI}$	Schalleistungspegel des Rad-Schiene-Interaktionsgeräuschs in dB rel. 10^{-12} W
m	Index des Wellenlängenbandes
N	Anzahl Fahrzeuge pro Stunde in h^{-1}
N_{ac}	Anzahl Achsen pro Fahrzeug
p	Quellentypindex
R	Bogenradius in m
R_0	Bezugsradius in m, $R_0 = 500$ m
S	Quelle-Empfänger-Distanz nach SEMIBEL, $S = 7.5$ m
T_p	Vorbeifahrtszeit in s
v	Geschwindigkeit in km/h
$v_{aero,ref}$	Referenzgeschwindigkeit für aerodynamische Quellen in km/h, $v_{aero,ref} = 200$ km/h
$v_{sec,ref}$	Referenzgeschwindigkeit für Sekundärquellen in km/h, $v_{sec,ref} = 80$ km/h

2 Berechnung des Schalleistungspegels L_W

Das sonRAIL-Emissionsmodell beschreibt die Quellstärken mit Schalleistungen in Form von Schalleistungspegeln L_W in dB rel. 10^{-12} W pro Fahrzeug. Nachfolgend werden basierend auf [1, 2, 4, 5] die im Hinblick auf eine Implementierung relevanten Grössen, Formeln und Eingangswerte zusammengestellt sowie Hinweise zur praktischen Umsetzung gegeben.

2.1 Überblick und Variablen

Das sonRAIL-Emissionsmodell beschreibt die akustische Quellenleistung von Eisenbahnzügen auf freier Strecke mit Fahrgeschwindigkeiten von 50 bis 200 km/h. Die meisten modellierten Quellentypen hängen stark von der gefahrenen Geschwindigkeit v in km/h ab.

$$v \in \mathbb{Q} \mid 50 \leq v \leq 200 \text{ km/h} \quad (1)$$

Für die Berechnung der Emission bei Bogenfahrt wird zur Charakterisierung der Strecke deren Bogenradius R in Meter als Eingangsparameter verwendet, für den gilt:

$$R \in \mathbb{Q} \mid R > 0 \text{ m}. \quad (2)$$

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass bei Kurvenradien $R < 300$ m Kreischgeräusche am Rad-Schiene-Kontaktpunkt entstehen können, welche vom sonRAIL-Emissionsmodell nicht behandelt werden.

Radflachstellen werden mit dem Prozentsatz η_{flat} der Achsen mit Radflachstelle innerhalb eines Fahrzeugs berücksichtigt, wobei gilt:

$$\eta_{\text{flat}} \in \mathbb{Q} \mid 0 \leq \eta_{\text{flat}} \leq 100 \%. \quad (3)$$

Das sonRAIL-Emissionsmodell unterscheidet mehrere Quellentypen, unterschiedliche Quellenhöhen und mehrere Frequenzbänder. Die Quellentypen werden in den Kapiteln 2.3 ff. behandelt. Für die 5 Quellenhöhen h gilt:

$$h \in [0, 0.5, 2, 3, 4] \text{ m} \quad (4)$$

über Schienenoberkante. Pro Quellenhöhe wird die Emission im Frequenzbereich in Terzbandauflösung berechnet.

Es werden 20 Terzbänder von 100 Hz bis 8 kHz entsprechend [6] verwendet, für die Indices i gilt:

$$i \in [1, 2, \dots, 20], \quad (5)$$

wobei $i = 1$ dem Terzband mit der Mittenfrequenz 100 Hz und $i = 20$ dem Terzband mit der Mittenfrequenz 8 kHz entspricht.

Die Fahrzeug-Gesamtemission pro Quellenhöhe h und Frequenzband i ergibt sich aus energetischer Summation der Schalleistungspegel $L_{W,phi}$ über alle Quellentypen p (Roll-, Sekundär-, Turbulenzgeräusche und Brückeneinfluss)

$$L_{W,hi} = 10 \log_{10} \left(\sum_p 10^{0.1 L_{W,phi}} \right). \quad (6)$$

In Abhängigkeit der Art des Streckensegments sind bei der Anwendung von Gleichung (6) die folgenden Schalleistungen unterschiedlicher Quellentypen p zu berücksichtigen:

- Normal: $L_{W,WRI}(= L_{W,roll}), L_{W,sec}, L_{W,aero}$
- Weiche: $L_{W,WRI}(= L_{W,impact}), L_{W,sec}, L_{W,aero}$
- Bogen: $L_{W,WRI}(= L_{W,curve}), L_{W,sec}, L_{W,aero}$
- Brücke: $L_{W,WRI}(= L_{W,roll}), L_{W,sec}, L_{W,aero}, L_{W,bridge}$

Die Berechnung dieser Schalleistungskomponenten wird in den folgenden Unterkapiteln erläutert.

Die Berechnung des Rad-Schiene-Interaktionsgeräuschs $L_{W,WRI}$ (WRI: 'Wheel-Rail Interaction') basiert auf Wellenlängenspektren, die ebenfalls in Terzbandauflösung gegeben sind. Es werden 29 Wellenlängensbänder verwendet. Für die Indices der Wellenlängensbänder m gilt

$$m \in [1, 2, \dots, 29], \quad (7)$$

wobei $m = 1$ dem Terzband mit Mittenwellenlänge 630 mm und $m = 29$ dem Terzband mit Mittenwellenlänge 1 mm entspricht.

Viele der nachfolgend beschriebenen Quellenleistungsberechnungen erfordern (De-)Logarithmierungsoperationen. Je nach dem welche Zwischenresultate zugänglich sein sollen, kann es in einer Implementierung zugunsten der Rechenperformance sinnvoll sein, mehrere Rechenschritte hintereinander im delogarithmierten Bereich auszuführen sowie Eingangsdaten im Preprocessing zu delogarithmieren (z.B. Rauheitsspektren). In diesem Fall sind die nachfolgenden Formeln entsprechend anzupassen und zu kombinieren.

2.2 Transformation Wellenlänge-Frequenz

Die Berechnung des Rad-Schiene-Interaktionsgeräuschs erfordert zunächst eine von der Fahr- geschwindigkeit v abhängige Transformation der Rauheitsspektren vom Wellenlängen- in den Frequenzbereich nach der Vorschrift $f = v/\lambda$. Diese Transformation ist physikalisch sinnvollerweise energieneutral durchzuführen, wie auch in CNOSSOS-EU [7] gefordert. Die in den Wellenlängenbereich als rationale Zahlen transformierten Frequenzbandindices \tilde{m} sind mit $\tilde{m}(v, i) = i + B(v)$ definiert, womit für jedes Terzband i die nicht-ganzzahlige Stützstelle $\tilde{m} \in \mathbb{Q}$ im Wellenlängenspektrum gegeben ist. Der geschwindigkeitsabhängige Interpolationsoffset $B(v)$ berechnet sich zu

$$\begin{aligned} B &= 10 \log_{10} \left(\frac{3.6 \lambda_{c,max} f_{c,min}}{v} \right) \\ &= 23.563025 - 10 \log_{10} v \end{aligned} \quad (8)$$

mit v in km/h, dem Faktor 3.6 für die Umrechnung in m/s, der grössten Terzbandmittenwellenlänge $\lambda_{c,max} = 10^{-0.2}$ m und der kleinsten Terzbandmittenfrequenz $f_{c,min} = 100$ Hz (beide gemäss IEC 61260-1:2014 [6]). Unter Berücksichtigung des Gültigkeitsbereichs von v gilt $0.55 < B < 6.57$, womit für die 6 Geschwindigkeiten $v = 57.1, 71.8, 90.4, 113.8, 143.3$ und 180.4 km/h ganzzahlige Stützstellen \tilde{m} resultieren. Für die anderen, nicht-ganzzahligen \tilde{m} ist eine lineare Interpolation notwendig. Der Interpolationsoffset $B = b + \delta$ wird dafür per Abrunden in seinen ganzzahligen Anteil b und den rationalen Rest δ zerlegt.

$$b = \lfloor B \rfloor, \quad b \in [0, 1, \dots, 6] \quad (9)$$

$$\delta = B - b, \quad 0 \leq \delta < 1. \quad (10)$$

Nach Erhalt von b und δ lässt sich die Interpolation effizient implementieren. Um eine energie-neutrale Transformation zu erzielen, wird das Effektivwertquadrat der Rauheit (und nicht der Rauheitspegel) interpoliert und anschliessend in Pegel zurückgerechnet.

Rauheitspegel $L_{R,m}$ im Wellenlängenbereich in dB werden per

$$L_{R,i} = 10 \log_{10} \left((1 - \delta) 10^{0.1L_{R,m}} + \delta 10^{0.1L_{R,m+1}} \right) \quad (11)$$

in Rauheitspegel $L_{R,i}$ im Frequenzbereich in dB transformiert. Im Gegensatz dazu wurde in [1, Abbildung 6.1] eine Pegel-Interpolation beschrieben, was gemäss [1, Kapitel 6.2.3.7] zu Fehlern führt. Eine solche Interpolation kann durch Anpassungen an Gleichung (11) realisiert werden¹. Da die energieneutrale gegenüber der bisher verwendeten Pegel-Interpolation zu höheren Werten führt (+0 – 0.5 dB), wurden die Oberbau- und Fahrzeug-Übertragungsfunktionen $L_{HW, \text{tr}, i}$ und $L_{HW, \text{veh}, i}$ (siehe 2.3) um das mittlere, über alle Geschwindigkeiten auftretende Differenzspektrum ΔL_{HW} (Tabelle A.8) korrigiert, sodass die Berechnungsergebnisse statistisch unverändert bleiben.

2.3 Rollgeräusch und Radflachstellen

Die Emissionen des Rollgeräuschs und stossartiger Geräusche werden für die unteren beiden Quellenhöhen $h = 0 \text{ m}$ und $h = 0.5 \text{ m}$ ermittelt und über effektive Rauheiten und Transferfunktionen berechnet. Für das Rollgeräusch unter Berücksichtigung von Radflachstellen basiert die Emissionsermittlung für beide Quellenhöhen auf dem kombinierten, effektiven Rauheitspegel-spektrum $L_{R, \text{tot}}$ gegeben durch

$$L_{R, \text{tot}} = 10 \log_{10} \left[10^{0.1L_{r, \text{tr}}} + \left(1 - \frac{\eta_{\text{flat}}}{100\%} \right) 10^{0.1L_{r, \text{veh}}} + \frac{\eta_{\text{flat}}}{100\%} 10^{0.1L_{r, \text{flat}}} \right] + A_3 \quad (12)$$

mit dem Rauheitspektrum der Schiene $L_{r, \text{tr}}$ (Tabelle A.2), dem Rauheitsspektrum des Rades $L_{r, \text{veh}}$ (Tabelle A.3), dem äquivalenten Radrauheitsspektrum für ein Rad mit Flachstelle $L_{r, \text{flat}}$ (Tabelle A.4) und dem Kontaktfilter A_3 (Tabelle A.5), das den Effekt der endlichen Kontaktfläche von Rad und Schiene beschreibt. Numerische Werte dieser vier Spektren sind für unterschiedliche Oberbau- und Wagentypen als Modelleingangsparameter in den Tabellen im Anhang A gegeben. Der Parameter η_{flat} gibt den prozentualen Anteil der Achsen mit Radflachstelle(n) des Fahrzeugs an. Eine beispielhafte Emissionsberechnung für einen 4-achsigen Wagon mit einer Flachstelle erfolgt mit $\eta_{\text{flat}} = 25\%$. Gemäss [2, Abbildung 14] wurde während der sonRAIL-Messungen unter allen aufgezeichneten Achsen ein flachstellenbehafteter Anteil von 2% festgestellt.

$L_{R, \text{tot}, i}$ wird als gemeinsame frequenzabhängige Anregung für das von Fahrzeug und Oberbau abgestrahlte Rollgeräusch betrachtet. Die von diesen beiden Komponenten abgestrahlten Leistungen werden durch die beiden separaten Transferfunktionen $L_{HW, \text{tr}, i}$ (Tabelle A.6) und $L_{HW, \text{veh}, i}$ (Tabelle A.7) beschrieben. Die Oberbautypen werden gemäss [1] durch die verschiedenen Kombinationen der Schwellenart (Mono- und Block-Beton-, Holz- und Stahlschwellen) und Schienen (UIC60 und UIC54) charakterisiert. Die Fahrzeugtypen werden anhand ihrer Raddurchmesser (920 mm und 680 mm) und der Achslast (100 kN und 50 kN) unterschieden. Die Schalleistung der beiden Rollgeräusch-Anteile

$$L_{W, \text{roll}, \text{tr}, i} = L_{R, \text{tot}, i} + L_{HW, \text{tr}, i} + 10 \log_{10} N_{\text{ac}} \quad (13)$$

$$L_{W, \text{roll}, \text{veh}, i} = L_{R, \text{tot}, i} + L_{HW, \text{veh}, i} + 10 \log_{10} N_{\text{ac}} \quad (14)$$

sind mit 'tr' (track) für den Oberbau und mit 'veh' (vehicle) für das Fahrzeug bezeichnet. Unter der Annahme gleicher Radsatzeigenschaften innerhalb eines Fahrzeugs und inkohärenter Überlagerung

¹Pegel-Interpolation als Alternative zu Gleichung (11): $L_{R,i} = (1 - \delta)L_{R,m=i+b} + \delta L_{R,m=i+b+1}$

der Anteile bezeichnet N_{ac} die Anzahl der Achsen des Fahrzeugs. Die in den Gleichungen 13 und 14 berechneten Schalleistungen sind die den unteren beiden Quellhöhen zugeschriebenen Rollgeräuschanteile:

$$L_{W,roll,h=0m,i} = L_{W,roll,tr,i} \quad (15)$$

$$L_{W,roll,h=0.5m,i} = L_{W,roll,veh,i} \quad (16)$$

Das totale Rollgeräusch ergibt sich durch energetische Addition beider Anteile:

$$L_{W,roll,i} = 10 \log_{10} \left(10^{0.1L_{W,roll,tr,i}} + 10^{0.1L_{W,roll,veh,i}} \right). \quad (17)$$

2.4 Weichen und Schienenstösse

Das Geräusch bei der Überfahrt einer Weiche oder eines Schienenstosses wird innerhalb eines speziellen Schienensegments von 1 m Referenzlänge simuliert. Für dieses Segment wird das Schienenrauheitsspektrum bei der Berechnung der totalen Rauheiten durch das vom Oberbau abhängige Stosspektrum $L_{r,tr,imp}$ (Tabelle A.2), gegeben in [1, Tabelle 6.3], ersetzt. Somit ändert sich der erste Summand in Gleichung 12 und die totale Rauheit berechnet sich zu

$$L_{R,tot,imp} = 10 \log_{10} \left[10^{0.1L_{r,tr,imp}} + \dots \left(1 - \frac{\eta_{flat}}{100\%} \right) 10^{0.1L_{r,veh}} + \frac{\eta_{flat}}{100\%} 10^{0.1L_{r,flat}} \right] + A_3. \quad (18)$$

Analog zur Rollgeräuschberechnung wird $L_{R,tot,imp}$ in m wie in Kapitel 2.2 aus dem Wellenlängen- in den Frequenzbereich zu $L_{R,tot,imp,i}$ transformiert. Die Schalleistungsberechnung ändert sich lediglich durch die Verwendung von $L_{R,tot,imp,i}$ für den Rollgeräuschanteil des Oberbaus. Das Vorgehen für den Rollgeräuschanteil des Fahrzeugs bleibt unberührt.

$$L_{W,impact,tr,i} = L_{R,tot,imp,i} + L_{H,tr,i} + 10 \log_{10} N_{ac} \quad (19)$$

$$L_{W,impact,veh,i} = L_{W,roll,veh,i} \quad (20)$$

Dieser Ansatz unterscheidet sonRAIL von anderen Modellen wie IMAGINE [8] oder CNOSSOS-EU [7].

2.5 Bogenfahrt

Für sonRAIL gilt ein Streckensegment mit Kurvenradius $R < 1000$ m als Bogen. Bei Bogenfahrt wird mehr Rollgeräusch emittiert als auf gerader Strecke. Dieser Effekt wird wie die Weichenfahrt durch eine Modifikation der totalen Rauheit modelliert. Hierfür wird ein äquivalentes Radrauheitsspektrum $L_{r,veh,curve,c}$ (Tabelle A.3) definiert, welches abhängig vom Fahrverhalten des Fahrzeugs in Kurven kategorisiert ($c \in [\text{'smooth'}, \text{'bad'}]$) wird. Die äquivalente Radrauheit in Kurven berechnet sich zu

$$L_{r,curve} = L_{r,veh,curve,c} - \gamma_c \log_{10} \left(\frac{R}{R_0} \right) \quad (21)$$

mit dem Bezugsradius $R_0 = 500$ m, dem Bogenradius R in m und dem Parameter $\gamma_c = 15$ für $c = \text{'smooth'}$ und $\gamma_c = 30$ für $c = \text{'bad'}$. $L_{r,curve}$ wird der totalen Rauheit energetisch hinzuaddiert, wodurch sich das effektive Rauheitsspektrum $L_{R,tot,curve}$ zu

$$L_{R,\text{tot},\text{curve}} = 10 \log_{10} \left[10^{0.1L_{r,\text{tr}}} + \dots \right. \\ \left. \left(1 - \frac{\eta_{\text{flat}}}{100\%} \right) 10^{0.1L_{r,\text{veh}}} + \frac{\eta_{\text{flat}}}{100\%} 10^{0.1L_{r,\text{flat}}} + \dots \right. \\ \left. 10^{0.1L_{r,\text{curve}}} \right] + A_3 \quad (22)$$

berechnet und analog zur Rollgeräuschberechnung weiterverwendet wird. $L_{R,\text{tot},\text{curve}}$ wird demnach gemäss Kapitel 2.2 in den Frequenzbereich zu $L_{R,\text{tot},\text{curve},i}$ transformiert und in den Gleichungen 13 und 14 für die Berechnung der beiden unteren Quellhöhen eingesetzt.

2.6 Antriebs- und Aggregatsgeräusche

Die Schalleistung von Antriebsgeräuschen, Aggregatsgeräuschen und anderen sogenannten Sekundärquellen berechnet sich im Frequenzbereich für jede Quellenhöhe h in Abhängigkeit der Geschwindigkeit v zu

$$L_{W,\text{sec},hi} = L_{W,\text{sec},80,hi} + \beta_{hi} \log_{10} \left(\frac{v}{v_{\text{sec,ref}}} \right) \quad (23)$$

mit dem fahrzeugtypabhängigen Spektrum $L_{W,\text{sec},80,hi}$ bei $v_{\text{sec,ref}} = 80 \text{ km/h}$ und dem spektralen Geschwindigkeitskoeffizienten β_{hi} . Die hierfür einzusetzenden Wertetabellen wurden in den Jahren 2011 und 2012 dreimal korrigiert:

- Am 12.06.2011 mit [4] aufgrund der fehlerhaften Formel in der sonRAIL-Projekt-dokumentation [1, Gleichung 4.2]
- Am 21.12.2011 mit [9] aufgrund der vertikalen Auflösung des Mikrofonarrays, die stellenweise eine Trennung des Sekundärquellengeräuschs vom Rollgeräusch nicht zulässt
- Am 16.02.2012 mit [5] aufgrund zweier falscher Werte in [9]:
Tabelle A.11, $L_{W,\text{sec},80,h=2\text{ m},800\text{ Hz}} : 91.1 \text{ dB} \rightarrow 82.7 \text{ dB}$ und
Tabelle A.19, $L_{W,\text{sec},80,h=2\text{ m},315\text{ Hz}} : 103.5 \text{ dB} \rightarrow 85.0 \text{ dB}$.

In [9] und [5] sind die Sekundärquellenleistungen der Kategorien 4 und 5 identisch, was ein verheerendes Duplikat vermuten lässt. Eine Untersuchung dieser Tatsache ergab, dass die Werte für Kategorie 4 plausibel sind, für Kategorie 5 hingegen nicht. Aus diesem Grund wurden die Sekundärquellenleistungen für Kategorie 5 auf den vorherigen Stand [4] vom 12.06.2011 zurückgesetzt.

Die aktuell gültigen Werte sind in den Tabellen A.9 - A.19 zu finden.

2.7 Aerodynamische Geräusche

Im Gegensatz zu den im Kapitel 2.6 genannten Sekundärgeräuschen wird die Schalleistung der aerodynamischen Quellen $L_{W,\text{aero},hi}$ mit einer festen Geschwindigkeitsabhängigkeit $\sim v^6$ und einer höheren Referenzgeschwindigkeit $v_{\text{aero,ref}} = 200 \text{ km/h}$ modelliert:

$$L_{W,\text{aero},hi} = L_{W,\text{aero},200,hi} + 60 \log_{10} \left(\frac{v}{v_{\text{aero,ref}}} \right) \quad (24)$$

mit dem fahrzeugtypabhängigen Spektrum $L_{W,\text{aero},200,hi}$ (Tabellen A.20 - A.23).

2.8 Brückeneinfluss

Der Brückeneinfluss wird als ein zusätzliches Schalleistungsspektrum $L_{W,\text{bridge},i}$ (Tabelle A.24) im Frequenzbereich der untersten Quellenhöhe $h = 0$ m hinzuaddiert:

$$L_{W,\text{bridge},i,h=0\text{m}} = L_{W,\text{bridge},i} \quad (25)$$

2.9 Richtwirkung

Das sonRAIL-Emissionsmodell berücksichtigt keine Richtwirkung. Alle Quellen strahlen omnidirektional über alle Raumwinkel gleichmässig ab.

Dieser Ansatz unterscheidet sonRAIL von anderen Modellen wie IMAGINE [8] oder CNOSSOS-EU [7].

3 Berechnung von abgeleiteten Emissionspegeln

3.1 Längenbezogener Emissionspegel $L_{W'}$

Die Anbindung des sonRAIL-Emissionsmodells an ein Ausbreitungsmodell erfolgt typischerweise über einen längenbezogenen Emissionspegel $L_{W'}$ als Schalleistungspegel auf 1 m Gleisabschnitt. Dieser wird aus den mit Gleichung (6) berechneten Schalleistungspegeln von Einzelfahrzeugen berechnet. Dabei müssen pro Fahrzeug-Geschwindigkeitsgruppe mit Index k die Fahrgeschwindigkeit v_k in km/h und die Anzahl N_k gleicher Fahrzeuge pro Stunde berücksichtigt werden:

$$L_{W',hi} = 10 \log_{10} \left(\sum_k \frac{N_k}{1000v_k} 10^{0.1L_{W,hi k}} \right) \quad (26)$$

3.2 A-Bewertung

Die A-Bewertung soll als letzter Rechenschritt auf ein Ergebnis angewendet werden. Die Terzbandpegel L_i aller Frequenzbänder i sind mit den A-Filterdämpfungen $A_{\text{bew},i}$ in dB zu addieren. Der A-bewertete Gesamtpegel ergibt sich durch die energetische Summe aller Bänder i :

$$L_A = 10 \log_{10} \left(\sum_i 10^{0.1(L_i + A_{\text{bew},i})} \right) \quad (27)$$

Die Werte von $A_{\text{bew},i}$ (Tabelle A.26) sind sonROAD18 [10, Tabelle 10.8] entnommen. Sie wurden über eine Mittelung der Dämpfungswerte geometrisch verteilter Frequenzen innerhalb der Terzbandgrenzen berechnet. Zu beachten ist, dass bei diesem Vorgehen geringe Abweichungen (bis zu 0.2 dB) gegenüber den nach [6] berechneten Dämpfungswerten der Bandmittelfrequenzen auftreten.

3.3 Vorbeifahrtspegel in 7.5 m Abstand

Die Emissionen von Einzelfahrzeugen werden typischerweise in der Normposition als Vorbeifahrtsmittelungspegel nach ISO 3095:2013 [11] gemessen. Die Position 'A' befindet sich entsprechend dieser Norm seitlich in $d_0 = 7.5$ m Abstand von der Fahrbahnmitte und $h_0 = 1.2$ m über Schienenoberkante.

Der Vorbeifahrtspegel als äquivalenter Schalldruckpegel L_{peq,T_p} während der Vorbeifahrtsdauer T_p kann aus den Schalleistungspegeln L_W berechnet werden, wobei die Schallausbreitung zum Normmesspunkt zu berücksichtigen ist. Die Distanzen d_h der fünf Quellenpositionen in m betragen mit

$$d_h = \sqrt{(h - h_0)^2 + d_0^2} = \sqrt{(h - 1.2)^2 + 7.5^2} \quad (28)$$

zwischen 7.53 m und 8.01 m. Der Aspektwinkel des Fahrzeugs ϕ_h im Bogenmass ist somit

$$\phi_h = 2 \arctan \left(\frac{l_{\text{veh}}}{2d_h} \right), \quad 0 \leq \phi_h \leq \pi \quad (29)$$

mit der Fahrzeuglänge l_{veh} . Der Aspektwinkel einer beispielhaften Fahrzeuglänge von $l_{\text{veh}} = 20$ m beträgt $\phi_h \approx 1.85$ rad = 106°. Die Vorbeifahrtdauer in Sekunden ist gegeben durch $T_p = 3.6 \frac{l_{\text{veh}}}{v}$. Die Schalleistung pro Fahrzeug $L_{W,hi}$ auf eine längenbezogene Schalleistung pro Meter und pro Vorbeifahrtsdauer wird so durch Einbezug der Fahrzeuglänge l_{veh} umgerechnet. Unter Annahme

einer endlichen, inkohärenten Linienquelle und unter Berücksichtigung geometrischer Verdünnung und des Bodeneffekts ergibt sich

$$L_{peq,T_p,hi} = L_{W,hi} - 10 \log_{10} \left(\frac{4\pi d_h l_{veh}}{\phi_h} \right) + D_{gr,hi} \quad (30)$$

mit dem spektralen, quellenhöhenabhängigen Bodeneffekt $D_{gr,hi}$. Die spektralen Verstärkungen $D_{gr,hi}$ werden für die fünf Quellenhöhen berechnet.

Falls die lokale Oberbau-Geometrie und Schotterbetttiefe nicht bekannt sind, ist das Bodeneffektspektrum (Tabelle A.25) der 'Schiene 2' am 'Messpunkt 03' der sonRAIL-Messkampagne [1, Tabelle 7.4] zu verwenden. Die Werte hierfür wurden mit einer Empa-Software [12, 13] berechnet.

Die energetische Summe der Anteile aller fünf Quellenhöhen ergibt den Vorbeifahrtspegel:

$$L_{peq,T_p,i} = 10 \log_{10} \left(\sum_h 10^{0.1 L_{peq,T_p,hi}} \right) \quad (31)$$

3.4 Emissionspegel für SEMIBEL

Im SEMIBEL-Modell [14] von 1990 werden die Schallquellen anders als im sonRAIL-Modell beschrieben. Im Gegensatz zu sonRAIL wird in SEMIBEL die Quellstärke auf Basis eines einstündigen, äquivalenten Dauerschalldruckpegels $L_{eq,e} = L_{eq,1h}$ in einem theoretischen Referenzabstand von 1 m von der Anlagenachse definiert. SEMIBEL hat nur eine Quellenhöhe von $h_{SB} = 0.5$ m über Schienenoberkante und enthält eine Quellenrichtwirkung. sonRAIL-Emissionswerte können somit nicht direkt in SEMIBEL-Emissionswerte umgerechnet werden.

Eine Umrechnung der sonRAIL-Schalleistungspegel in Emissionswerte für das SEMIBEL-Modell muss darum über den Umweg einer Immissionsberechnung erfolgen. Dabei werden die unterschiedlichen Verfahren bei der jeweiligen Modellentwicklung berücksichtigt. Als Immissionspunkt wird die Normposition 'A' nach [11] gewählt. Die Umrechnung erfolgt in zwei Schritten: Zuerst wird die Immission als Schalldruckpegel mit sonRAIL berechnet. Danach wird der gefundene Schalldruckpegel am Normmesspunkt mit SEMIBEL auf den SEMIBEL-Emissionswert zurückgerechnet, d.h. Schallausbreitungseffekte werden invertiert.

Der 1h-äquivalente Dauerschalldruckpegel $L_{eq,1h,norm}$ der gesamten Vorbeifahrt am Normmesspunkt unter Berücksichtigung von geometrischer Verdünnung und Bodeneffekt ist

$$\begin{aligned} L_{eq,1h,norm,hik} &= L_{W,hik} - 10 \log_{10} \left(4 d_h \frac{v_k}{3.6} \right) - 10 \log_{10} \left(\frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ s}} \right) + D_{gr,hi} \\ &= L_{W,hik} - 10 \log_{10} (4000 d_h v_k) + D_{gr,hi} \end{aligned} \quad (32)$$

mit v_k in km/h, den Distanzen d_h (Gleichung (28)) und dem Bodeneffekt $D_{gr,hi}$. Durch energetische Summation über die Quellenhöhen und die Frequenzbänder wird der A-bewertete Immissionspegel (siehe Kapitel 3.2 gebildet:

$$L_{Aeq,1h,norm,k} = 10 \log_{10} \left(\sum_i \sum_h 10^{0.1(L_{eq,1h,norm,hik} + A_{bew,i})} \right) \quad (33)$$

Vom Immissionspunkt aus wird nun mit dem SEMIBEL-Modell [14] auf den Emissionswert pro Fahrzeugklasse k zurückgerechnet:

$$L_{\text{eq},e,k} = L_{\text{Aeq},1\text{h},\text{norm},k} + 10 \log_{10}(N_k S) = L_{\text{Aeq},1\text{h},\text{norm}} + 10 \log_{10}(N_k) + 8.75 \text{ dB} \quad (34)$$

mit der jahresdurchschnittlichen Fahrzeugmenge N_k pro Stunde und der Quelle-Empfänger-Distanz nach SEMIBEL $S = 7.5 \text{ m}$.

Der gesamte Emissionswert ergibt sich durch energetische Summation über die Fahrzeuge

$$L_{\text{eq},e} = 10 \log_{10} \left(\sum_k 10^{0.1 L_{\text{eq},e,k}} \right) \quad (35)$$

und damit der Beurteilungsemissionspegel

$$L_{r,e} = L_{\text{eq},e} + K1 \quad (36)$$

mit der Pegelkorrektur $K1$ gemäss Anhang 4 der Lärmschutzverordnung (LSV).

A Modellparameter

A.1 Fahrzeugkategorien und spezielle Modelle

Die Fahrzeugkategorien und -modelle sind der sonRAIL-Projektdokumentation [1, Tabelle 6.1] entnommen.

Tabelle A.1: Fahrzeugtypen und ihre Eigenschaften

Bezeichnung	Radrauhheit	äquiv. Radrauhheit (Kurven)	Transferfunktion (Fzg.)	Kontaktfilter	sek. Quellen	aerodyn. Quellen
f01	D	smooth	tv01	c01	ss01	ae01
f02	Ci	bad	tv01	c01	ss02	-
f03	D	smooth	tv01	c01	ss03	ae03
f04	D	smooth	tv02	c02	ss04	-
f05	D	smooth	tv01	c02	ss05	ae05
f06	K	bad	tv01	c02	ss06	-
f07	D	smooth	tv01	c02	ss07	-
f08	D	bad	tv01	c02	ss08	ae08
f09	Ci	smooth	tv01	c02	ss09	-
f10	K	smooth	tv01	c02	ss10	-
f11	D	bad	tv02	c02	ss11	-
Re460	Re460	smooth	tv01	c01	ss01	ae01
Ae610	Re420	bad	tv01	c01	ss02	-
Re420	Re420	bad	tv01	c01	ss02	-
Re620	Re420	bad	tv01	c01	ss02	-
NiNa_wagon	NiNa	smooth	tv02	c02	ss04	-
NPZ_RBDe	Re460	smooth	tv01	c02	ss07	-

A.2 Schienenrauhheit & Stossstellen $L_{r, \text{tr}}$

Die Schienenrauhheitsspektren sind der sonRAIL-Projektdokumentation [1, Tabelle 6.3] entnommen.

Tabelle A.2: Schienenrauhheiten und Ersatzrauhheiten auf Weichen und Stossstellen

m	$\lambda_{c,m}$ in m	smooth in dB	average in dB	bad in dB	concrete in dB	wooden in dB
1	0.63000	2.3	7.0	14.3	23.8	35.6
2	0.50000	1.1	6.5	13.8	22.8	35.1
3	0.40000	0.6	6.0	13.3	21.8	34.1
4	0.31000	0.1	5.5	12.8	20.8	33.1
5	0.25000	-0.4	5.0	12.3	19.8	32.1
6	0.20000	-0.9	4.5	11.8	18.8	31.1
7	0.16000	-1.3	3.9	10.9	13.5	32.1
8	0.12000	-1.5	3.6	10.1	8.9	31.4
9	0.10000	-1.6	2.7	9.5	10.6	26.8
10	0.08000	-2.3	2.1	9.1	13.5	24.3
11	0.06300	-3.0	1.5	8.9	11.0	21.9
12	0.05000	-4.4	1.0	8.5	8.1	17.6
13	0.04000	-6.4	-0.4	7.8	4.9	12.6
14	0.03150	-7.8	-1.5	6.5	2.1	7.3
15	0.02500	-9.4	-3.0	4.9	2.7	5.6
16	0.02000	-11.2	-4.5	2.7	4.5	4.4
17	0.01600	-13.6	-7.5	-1.3	4.0	3.0
18	0.01200	-15.2	-10.1	-3.7	3.6	1.0
19	0.01000	-16.1	-11.8	-5.3	1.7	0.3
20	0.00800	-16.5	-13.0	-7.3	-1.0	0.2
21	0.00630	-17.0	-13.9	-8.3	-2.1	-0.6
22	0.00500	-17.3	-14.9	-9.3	-2.7	-3.0
23	0.00400	-17.5	-15.4	-10.3	-5.7	-4.7
24	0.00315	-17.9	-16.1	-11.3	-7.6	-5.7
25	0.00250	-18.5	-16.9	-12.3	-9.4	-7.7
26	0.00200	-19.5	-17.9	-13.3	-11.3	-9.7
27	0.00160	-20.5	-18.9	-14.3	-13.1	-11.7
28	0.00125	-21.5	-19.9	-15.3	-14.9	-13.7
29	0.00100	-22.5	-20.9	-16.3	-16.7	-15.7

A.3 Radrauheit & Kurven $L_{r,veh}$

Die Radrauhheitsspektren sind der sonRAIL-Projektdokumentation [1, Tabelle 6.3] entnommen.

Tabelle A.3: Radrauhheiten und äquivalente Radrauhheiten bei Bogenfahrt

m	$\lambda_{c,m}$ in m	D in dB	K in dB	Ci in dB	Re460 in dB	Re420 in dB	NiNa in dB	smooth in dB	bad in dB
1	0.63000	6.1	11.2	14.4	9.2	13.2	11.3	1.8	1.8
2	0.50000	5.1	10.2	13.8	8.2	12.2	10.4	0.8	0.8
3	0.40000	4.1	9.2	13.4	7.2	11.2	9.5	-0.2	-0.2
4	0.31000	3.1	8.2	12.9	6.2	10.2	8.6	-1.2	-1.2
5	0.25000	2.1	7.2	12.4	5.2	9.2	7.8	-2.0	-2.0
6	0.20000	1.1	6.2	12.7	4.2	8.2	7.1	-2.6	-2.6
7	0.16000	0.1	5.2	12.7	3.2	7.2	6.3	-2.1	-2.1
8	0.12000	-0.8	4.6	12.9	2.6	6.6	5.9	-1.8	-1.8
9	0.10000	-2.9	4.8	13.5	2.8	6.8	6.2	-0.7	-0.7
10	0.08000	-5.1	3.9	13.4	1.9	7.9	5.5	-0.2	-0.2
11	0.06300	-5.8	3.6	13.3	1.0	7.6	5.3	-0.2	-0.2
12	0.05000	-5.4	3.0	13.3	-4.1	7.0	4.8	-1.6	-0.6
13	0.04000	-6.1	2.1	13.1	-6.2	6.1	4.1	-3.1	0.2
14	0.03150	-6.6	1.8	12.8	-5.4	5.8	3.8	-5.4	0.6
15	0.02500	-7.2	1.2	12.4	-3.1	4.3	3.3	-4.8	0.7
16	0.02000	-8.8	-1.4	12.0	-7.9	1.4	1.2	-8.2	0.4
17	0.01600	-10.7	-2.8	8.3	-9.1	-1.8	-0.8	-10.7	-2.7
18	0.01200	-13.2	-6.7	5.9	-8.9	-3.6	-4.3	-13.3	-3.9
19	0.01000	-15.5	-8.1	1.4	-10.0	-8.0	-6.5	-16.2	-6.2
20	0.00800	-17.3	-9.9	-2.4	-13.2	-8.7	-8.8	-16.2	-7.0
21	0.00630	-19.9	-12.6	-5.3	-15.9	-7.7	-11.5	-15.9	-5.4
22	0.00500	-21.9	-14.6	-6.3	-16.6	-13.9	-13.3	-14.8	-5.7
23	0.00400	-23.9	-16.6	-7.3	-18.6	-14.6	-15.0	-15.0	-6.0
24	0.00315	-25.9	-18.6	-8.3	-20.6	-16.6	-16.8	-16.0	-6.3
25	0.00250	-27.9	-20.6	-9.8	-22.6	-18.6	-18.7	-17.0	-6.6
26	0.00200	-29.9	-22.6	-11.3	-24.6	-20.6	-20.5	-18.0	-6.9
27	0.00160	-31.9	-24.6	-12.8	-26.6	-22.6	-22.4	-19.0	-7.2
28	0.00125	-33.9	-26.6	-14.3	-28.6	-24.6	-24.3	-20.0	-7.5
29	0.00100	-35.9	-28.6	-15.8	-30.6	-26.6	-26.2	-21.0	-7.8

A.4 Flachstellen $L_{r, \text{flat}}$

Die äquivalenten Radrauhheitsspektren bei Flachstellen sind der VBA/Excel-Implementierung [15] entnommen.

Tabelle A.4: Ersatzradrauhheiten für Achsen mit Flachstelle

m	$\lambda_{c,m}$ in m	D in dB	K in dB	Ci in dB	Re460 in dB	Re420 in dB	NiNa in dB
1	0.63000	26.3	26.3	26.3	26.3	26.3	26.3
2	0.50000	24.3	24.3	24.3	24.3	24.3	24.3
3	0.40000	22.3	22.3	22.3	22.3	22.3	22.3
4	0.31000	20.3	20.3	20.3	20.3	20.3	20.3
5	0.25000	18.3	18.3	18.3	18.3	18.3	18.3
6	0.20000	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6
7	0.16000	16.4	16.4	16.4	16.4	16.4	16.4
8	0.12000	16.3	16.3	16.3	16.3	16.3	16.3
9	0.10000	16.9	16.9	16.9	16.9	16.9	16.9
10	0.08000	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0
11	0.06300	12.8	12.8	13.3	12.8	13.3	12.8
12	0.05000	10.0	10.0	13.3	10.0	13.3	10.0
13	0.04000	8.2	8.2	13.1	8.2	13.1	8.2
14	0.03150	8.9	8.9	12.8	8.9	12.8	8.9
15	0.02500	6.2	6.2	12.4	6.2	12.4	6.2
16	0.02000	6.4	6.4	12.0	6.4	12.0	6.4
17	0.01600	1.9	1.9	8.3	1.9	8.3	1.9
18	0.01200	-1.9	-1.9	5.9	-1.9	5.9	-1.9
19	0.01000	-4.6	-4.6	1.4	-4.6	1.4	-4.6
20	0.00800	-8.9	-8.9	-2.4	-8.9	-2.4	-8.9
21	0.00630	-9.0	-9.0	-5.3	-9.0	-5.3	-9.0
22	0.00500	-15.0	-15.0	-6.3	-15.0	-6.3	-15.0
23	0.00400	-17.2	-17.2	-7.3	-17.2	-7.3	-17.2
24	0.00315	-19.2	-19.2	-8.3	-19.2	-8.3	-19.2
25	0.00250	-21.2	-21.2	-9.8	-21.2	-9.8	-21.2
26	0.00200	-23.2	-23.2	-11.3	-23.2	-11.3	-23.2
27	0.00160	-25.2	-25.2	-12.8	-25.2	-12.8	-25.2
28	0.00125	-27.2	-27.2	-14.3	-27.2	-14.3	-27.2
29	0.00100	-29.2	-29.2	-15.8	-29.2	-15.8	-29.2

A.5 Übertragungsfunktionen

A.5.1 A₃

Die Kontaktfilter A₃ sind der sonRAIL-Projektdokumentation [1, Tabelle 6.8] entnommen.

Tabelle A.5: Kontaktfilter A₃

m	$\lambda_{c,m}$ in m	920 mm, 100 kN tv01, c01 in dB	920 mm, 50 kN tv01, c02 in dB	920 mm, 25 kN tv01, c03 in dB	680 mm, 50 kN tv02, c02 in dB
1	0.63000	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.50000	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.40000	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.31000	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.25000	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.20000	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.16000	0.0	0.0	0.0	0.0
8	0.12000	0.0	0.0	0.0	0.0
9	0.10000	0.0	0.0	0.0	0.0
10	0.08000	-0.2	-0.2	0.0	0.0
11	0.06300	-0.6	-0.5	-0.2	-0.2
12	0.05000	-1.3	-1.1	-0.5	-0.4
13	0.04000	-2.2	-1.9	-0.9	-0.7
14	0.03150	-3.7	-3.3	-1.6	-1.5
15	0.02500	-5.8	-5.0	-2.5	-2.8
16	0.02000	-9.0	-7.3	-3.8	-4.5
17	0.01600	-12.5	-9.8	-5.8	-7.0
18	0.01200	-13.5	-12.5	-8.5	-10.3
19	0.01000	-13.5	-13.8	-11.4	-12.9
20	0.00800	-15.3	-13.7	-12.6	-13.6
21	0.00630	-16.4	-15.1	-13.5	-14.5
22	0.00500	-17.5	-16.5	-14.5	-15.5
23	0.00400	-18.4	-16.4	-16.0	-16.0
24	0.00315	-19.5	-17.5	-16.5	-16.5
25	0.00250	-20.5	-17.8	-17.7	-17.0
26	0.00200	-21.5	-18.3	-18.6	-17.5
27	0.00160	-22.4	-18.8	-19.6	-18.0
28	0.00125	-23.5	-19.4	-20.6	-18.5
29	0.00100	-24.5	-19.8	-21.6	-19.0

A.6 $L_{HW, tr}$

Die Oberbau-Transferfunktionen sind der sonRAIL-Projektdokumentation [1, Tabelle 6.9] entnommen und mit ΔL_{HW} korrigiert.

Tabelle A.6: Übertragungsfunktion Rauheit \rightarrow Schallleistung des Oberbaus

i	$f_{c,i}$ in Hz	monoblock UIC54 in dB	monoblock UIC60 in dB	biblock UIC54 in dB	steel UIC54 in dB	wooden UIC54 in dB	wooden UIC60 in dB
1	100	77.1	79.9	78.5	72.8	71.3	80.3
2	125	78.3	83.0	81.8	73.4	71.9	81.3
3	160	80.1	86.7	84.4	77.0	73.4	82.9
4	200	80.6	86.8	86.8	82.3	74.3	82.3
5	250	86.6	86.6	89.0	88.5	77.4	83.4
6	315	87.3	88.7	89.4	92.3	78.5	84.5
7	400	86.9	90.3	91.2	94.1	83.8	89.8
8	500	91.5	93.5	93.3	96.0	89.2	94.2
9	630	95.3	96.3	91.4	98.1	91.3	96.3
10	800	96.1	97.1	94.2	101.2	92.7	97.9
11	1000	96.1	97.1	100.0	102.5	94.8	99.8
12	1250	94.9	94.9	96.9	103.2	97.2	101.2
13	1600	101.5	101.5	100.6	105.1	102.2	106.2
14	2000	107.0	107.0	104.9	110.5	105.5	109.5
15	2500	107.5	107.5	106.7	113.1	105.6	109.6
16	3150	111.3	111.3	108.6	113.9	105.0	109.0
17	4000	108.3	108.3	109.1	115.1	106.2	110.2
18	5000	110.2	110.2	109.7	115.2	105.7	109.7
19	6300	110.2	110.2	109.7	115.2	105.7	109.7
20	8000	110.3	110.3	109.8	115.3	105.8	109.8

A.7 $L_{HW,veh}$

Die Fahrzeug-Transferfunktionen sind der sonRAIL-Projektdokumentation [1, Tabelle 6.9] entnommen und mit ΔL_{HW} korrigiert.

Tabelle A.7: Übertragungsfunktion Rauheit \rightarrow Schalleistung des Fahrzeugs

i	$f_{e,i}$ in Hz	tv01 in dB	tv02 in dB
1	100	78.8	80.9
2	125	79.8	82.6
3	160	81.1	84.5
4	200	81.1	83.2
5	250	82.3	82.7
6	315	83.1	82.8
7	400	84.9	84.2
8	500	87.1	87.2
9	630	89.3	88.6
10	800	91.2	91.2
11	1000	93.6	92.4
12	1250	96.8	94.0
13	1600	104.2	98.2
14	2000	111.8	102.8
15	2500	111.1	107.7
16	3150	112.8	110.1
17	4000	113.9	113.4
18	5000	114.9	113.9
19	6300	115.9	114.9
20	8000	117.0	116.0

A.8 ΔL_{HW}

Bei energieerhaltender $\lambda \rightarrow f$ -Transformation (Kapitel 2.2) ergeben sich gegenüber der bisherigen Methode mit linearer Pegelinterpolation höhere Werte. Zur Kompensation wurden die Transferfunktionen $L_{HW, \text{tr}}$ und $L_{HW, \text{veh}}$ um die mittlere, über alle Geschwindigkeiten auftretende Differenz ΔL_{HW} korrigiert.

Tabelle A.8: Korrekturspektrum für $L_{HW, \text{tr}}$ und $L_{HW, \text{veh}}$

i	$f_{c,i}$ in Hz	ΔL_{HW} in dB
1	100	0.0
2	125	0.0
3	160	0.0
4	200	0.0
5	250	0.0
6	315	0.0
7	400	0.0
8	500	0.0
9	630	-0.1
10	800	-0.1
11	1000	-0.2
12	1250	-0.2
13	1600	-0.3
14	2000	-0.3
15	2500	-0.3
16	3150	-0.2
17	4000	-0.1
18	5000	-0.1
19	6300	-0.1
20	8000	0.0

A.9 Sekundärquellen $L_{W,sec,80}$

A.9.1 ss01

Die Schalleistungsspektren aus Sekundärquellen sind der dritten Korrektur [5, Seite 16] entnommen.

Tabelle A.9: Sekundärquellen-ID ss01

i	$f_{c,i}$ in Hz	$L_{W,sec,80,h=0.5m}$ in dB	$\beta_{h=0.5m}$	$L_{W,sec,80,h=2m}$ in dB	$\beta_{h=2m}$	$L_{W,sec,80,h=3m}$ in dB	$\beta_{h=3m}$	$L_{W,sec,80,h=4m}$ in dB	$\beta_{h=4m}$
1	100	83.5	54.4	81.7	42.5	81.3	38.6	82.4	35.0
2	125	85.3	46.5	83.1	27.7	82.5	26.8	83.5	24.0
3	160	85.0	35.0	85.7	18.7	84.7	18.4	84.6	19.1
4	200	85.0	24.2	86.0	16.0	85.9	16.4	85.6	16.9
5	250	87.7	20.5	83.9	19.0	82.3	23.9	81.0	28.2
6	315	96.1	24.2	84.2	17.2	83.4	21.3	82.2	24.6
7	400	100.5	12.0	84.2	14.3	84.1	18.8	81.2	25.6
8	500	100.5	16.2	83.8	12.0	78.3	32.0	78.6	32.2
9	630	100.2	16.8	79.5	21.6	78.7	30.9	79.3	31.7
10	800	100.9	24.4	78.7	18.6	78.9	30.0	79.3	32.4
11	1000	100.1	28.6	-99.0	0.0	80.1	26.6	82.1	28.4
12	1250	101.5	34.5	-99.0	0.0	79.5	25.0	83.0	29.2
13	1600	99.6	35.4	-99.0	0.0	76.7	35.0	78.5	35.2
14	2000	98.7	36.4	-99.0	0.0	75.7	38.9	76.7	40.5
15	2500	93.6	34.8	-99.0	0.0	76.4	36.5	77.2	33.8
16	3150	89.1	34.5	-99.0	0.0	77.8	34.0	78.5	33.3
17	4000	86.7	34.6	-99.0	0.0	78.2	34.0	78.3	33.3
18	5000	86.8	30.2	-99.0	0.0	77.6	34.0	77.4	33.3
19	6300	82.3	36.9	-99.0	0.0	77.4	34.0	75.5	33.3
20	8000	80.3	36.9	-99.0	0.0	77.4	34.0	77.4	33.3

A.9.2 ss02

Die Schalleistungsspektren aus Sekundärquellen sind der dritten Korrektur [5, Seite 17] entnommen.

Tabelle A.10: Sekundärquellen-ID ss02

i	$f_{c,i}$ in Hz	$L_{W,sec,80,h=0.5m}$ in dB	$\beta_{h=0.5m}$ in dB	$L_{W,sec,80,h=2m}$ in dB	$\beta_{h=2m}$ in dB	$L_{W,sec,80,h=3m}$ in dB	$\beta_{h=3m}$ in dB	$L_{W,sec,80,h=4m}$ in dB	$\beta_{h=4m}$ in dB
1	100	101.2	13.4	92.7	-35.4	87.9	-23.7	87.2	-19.5
2	125	102.2	27.9	90.4	-38.6	85.7	-17.3	85.8	-13.1
3	160	104.7	25.8	91.1	-28.7	87.9	-25.3	85.6	-5.9
4	200	106.9	23.0	89.4	-12.9	87.1	-10.3	87.0	-10.2
5	250	102.5	17.4	90.8	-9.3	86.1	-5.0	85.0	-8.6
6	315	102.3	17.8	91.2	-18.3	85.9	-13.2	84.6	-8.3
7	400	102.3	18.2	92.6	-24.5	89.1	-17.1	86.0	-9.2
8	500	106.5	18.2	93.9	-20.0	85.3	-18.2	83.8	-5.4
9	630	111.0	17.7	90.0	-30.5	83.3	-30.3	86.8	-5.9
10	800	108.6	13.2	86.4	-10.2	84.3	-30.3	84.2	4.0
11	1000	106.5	33.0	88.9	-26.4	79.9	3.7	85.8	4.7
12	1250	105.9	21.4	-99.0	0.0	79.9	-11.4	89.1	12.7
13	1600	104.5	39.9	90.1	-44.9	83.0	-8.9	83.1	0.7
14	2000	106.0	23.6	-99.0	0.0	83.1	-20.9	82.5	-2.7
15	2500	102.0	23.5	-99.0	0.0	83.0	-2.7	83.3	-0.7
16	3150	100.4	12.0	-99.0	0.0	84.5	-7.7	85.5	-10.1
17	4000	97.3	7.5	-99.0	0.0	85.4	-7.7	85.5	-10.1
18	5000	96.5	8.0	-99.0	0.0	85.2	-7.7	83.5	-10.1
19	6300	95.2	8.7	-99.0	0.0	83.6	-7.7	77.6	-10.1
20	8000	93.2	8.7	-99.0	0.0	83.5	-7.7	81.8	-10.1

A.9.3 ss03

Die Schalleistungsspektren aus Sekundärquellen sind der dritten Korrektur [5, Seite 18] entnommen.

Tabelle A.11: Sekundärquellen-ID ss03

i	$f_{c,i}$ in Hz	$L_{W,sec,80,h=0.5m}$ in dB	$\beta_{h=0.5m}$ in dB	$L_{W,sec,80,h=2m}$ in dB	$\beta_{h=2m}$ in dB	$L_{W,sec,80,h=3m}$ in dB	$\beta_{h=3m}$ in dB	$L_{W,sec,80,h=4m}$ in dB	$\beta_{h=4m}$ in dB
1	100	92.6	30.5	76.6	62.9	74.1	64.3	75.3	59.5
2	125	94.3	32.2	76.7	52.2	74.0	55.5	73.7	55.2
3	160	92.8	29.4	74.8	54.8	71.9	58.5	70.3	61.1
4	200	92.1	28.9	74.8	55.7	73.4	54.6	69.8	62.4
5	250	91.9	23.1	76.2	52.8	72.0	58.4	68.5	65.0
6	315	92.4	20.2	74.6	54.5	69.9	63.2	68.5	64.2
7	400	95.8	12.3	74.8	54.6	67.6	70.7	64.4	76.4
8	500	96.3	16.2	76.3	46.2	69.5	63.4	67.2	66.9
9	630	97.3	16.9	79.0	35.2	72.1	50.9	69.4	59.4
10	800	100.4	25.9	82.7	41.3	70.0	52.7	64.6	72.4
11	1000	99.9	30.2	-99.0	0.0	63.9	62.8	70.0	58.3
12	1250	92.0	35.5	-99.0	0.0	65.8	55.5	77.3	40.4
13	1600	87.6	40.2	-99.0	0.0	70.2	47.8	69.5	52.5
14	2000	88.4	45.6	-99.0	0.0	67.4	46.6	69.9	54.4
15	2500	87.1	44.0	-99.0	0.0	62.1	63.0	63.4	67.6
16	3150	84.5	38.4	-99.0	0.0	59.5	72.5	64.1	72.3
17	4000	84.7	35.7	-99.0	0.0	61.6	72.5	63.6	72.3
18	5000	84.8	30.7	-99.0	0.0	60.3	72.5	60.1	72.3
19	6300	80.3	36.4	-99.0	0.0	58.5	72.5	-99.0	0.0
20	8000	78.3	36.4	-99.0	0.0	56.8	72.5	58.2	72.3

A.9.4 ss04

Die Schalleistungsspektren aus Sekundärquellen sind der dritten Korrektur [5, Seite 19] entnommen.

Tabelle A.12: Sekundärquellen-ID ss04

i	$f_{c,i}$ in Hz	$L_{W,sec,80,h=0.5m}$ in dB	$\beta_{h=0.5m}$ in dB	$L_{W,sec,80,h=2m}$ in dB	$\beta_{h=2m}$ in dB	$L_{W,sec,80,h=3m}$ in dB	$\beta_{h=3m}$ in dB	$L_{W,sec,80,h=4m}$ in dB	$\beta_{h=4m}$ in dB
1	100	-99.0	0.0	81.5	-11.0	79.4	-8.9	79.9	-7.1
2	125	-99.0	0.0	80.8	5.7	76.1	26.1	76.8	18.1
3	160	-99.0	0.0	84.2	-2.8	80.2	10.6	77.1	18.6
4	200	-99.0	0.0	85.8	3.2	81.2	11.6	77.2	26.0
5	250	-99.0	0.0	84.2	2.3	76.8	29.3	73.5	39.7
6	315	-99.0	0.0	82.7	19.3	75.5	5.3	75.8	22.5
7	400	-99.0	0.0	85.2	24.6	79.5	25.1	73.3	39.2
8	500	-99.0	0.0	80.4	37.7	66.5	30.6	76.5	40.5
9	630	-99.0	0.0	80.1	4.6	-99.0	0.0	72.6	30.2
10	800	-99.0	0.0	-99.0	0.0	-99.0	0.0	71.7	35.3
11	1000	-99.0	0.0	-99.0	0.0	-99.0	0.0	73.9	19.9
12	1250	-99.0	0.0	-99.0	0.0	-99.0	0.0	76.5	52.8
13	1600	-99.0	0.0	-99.0	0.0	64.0	34.3	70.4	33.8
14	2000	-99.0	0.0	-99.0	0.0	64.3	48.7	70.7	23.1
15	2500	-99.0	0.0	-99.0	0.0	65.8	44.2	69.4	36.5
16	3150	-99.0	0.0	-99.0	0.0	69.7	36.0	71.1	19.9
17	4000	-99.0	0.0	-99.0	0.0	69.7	36.0	69.3	19.9
18	5000	-99.0	0.0	-99.0	0.0	70.1	36.0	65.4	19.9
19	6300	-99.0	0.0	-99.0	0.0	66.0	36.0	-99.0	0.0
20	8000	-99.0	0.0	-99.0	0.0	-99.0	0.0	-99.0	0.0

A.9.5 ss05

Die Schalleistungsspektren aus Sekundärquellen sind der ersten Korrektur [4, Seiten 25-28] entnommen.

Tabelle A.13: Sekundärquellen-ID ss05

i	$f_{c,i}$ in Hz	$L_{W,sec,80,h=0.5m}$ in dB	$\beta_{h=0.5m}$ in dB	$L_{W,sec,80,h=2m}$ in dB	$\beta_{h=2m}$ in dB	$L_{W,sec,80,h=3m}$ in dB	$\beta_{h=3m}$ in dB	$L_{W,sec,80,h=4m}$ in dB	$\beta_{h=4m}$ in dB
1	100	-99.0	0.0	79.4	51.7	78.0	51.1	77.9	49.0
2	125	-99.0	0.0	79.9	40.9	78.2	40.2	77.5	38.2
3	160	-99.0	0.0	82.6	29.6	79.5	30.0	77.1	30.5
4	200	-99.0	0.0	83.8	28.0	79.7	27.6	75.9	29.0
5	250	-99.0	0.0	85.4	25.8	80.0	26.2	74.9	28.1
6	315	-99.0	0.0	84.8	23.6	79.1	24.7	74.1	26.2
7	400	-99.0	0.0	88.3	11.2	80.7	17.9	75.3	21.4
8	500	-99.0	0.0	88.6	11.4	79.6	22.3	74.3	24.8
9	630	-99.0	0.0	85.4	21.6	77.9	28.4	74.0	27.4
10	800	-99.0	0.0	84.1	30.1	78.0	31.3	74.2	31.1
11	1000	-99.0	0.0	85.9	28.0	80.4	25.9	78.0	24.3
12	1250	-99.0	0.0	85.1	22.1	80.6	19.8	80.4	19.8
13	1600	-99.0	0.0	83.7	33.6	75.3	35.9	73.3	33.8
14	2000	-99.0	0.0	80.9	45.9	73.8	46.6	72.8	45.3
15	2500	-99.0	0.0	77.5	45.2	72.1	41.8	72.1	40.4
16	3150	-99.0	0.0	76.5	38.4	72.2	37.0	72.5	37.2
17	4000	-99.0	0.0	78.2	28.8	72.2	37.0	72.5	37.2
18	5000	-99.0	0.0	77.8	31.4	72.2	37.0	72.5	37.2
19	6300	-99.0	0.0	75.2	37.6	72.2	37.0	72.5	37.2
20	8000	-99.0	0.0	75.0	35.0	72.2	37.0	72.5	37.2

A.9.6 ss06

Die Schalleistungsspektren aus Sekundärquellen sind der dritten Korrektur [5, Seite 21] entnommen.

Tabelle A.14: Sekundärquellen-ID ss06

i	$f_{c,i}$ in Hz	$L_{W,sec,80,h=0.5m}$ in dB	$\beta_{h=0.5m}$ in dB	$L_{W,sec,80,h=2m}$ in dB	$\beta_{h=2m}$ in dB	$L_{W,sec,80,h=3m}$ in dB	$\beta_{h=3m}$ in dB	$L_{W,sec,80,h=4m}$ in dB	$\beta_{h=4m}$ in dB
1	100	-99.0	0.0	80.0	15.0	79.1	17.3	79.3	19.5
2	125	-99.0	0.0	82.0	13.7	79.6	17.0	79.1	19.8
3	160	-99.0	0.0	82.9	17.9	79.9	23.7	77.4	27.0
4	200	-99.0	0.0	88.6	-6.2	85.2	-5.9	78.1	13.2
5	250	-99.0	0.0	88.5	12.3	84.4	9.2	79.3	1.3
6	315	-99.0	0.0	88.4	8.3	84.9	1.3	80.9	-10.0
7	400	-99.0	0.0	91.4	14.5	86.8	4.5	81.1	-0.5
8	500	-99.0	0.0	91.2	20.4	85.0	10.4	80.0	5.2
9	630	-99.0	0.0	86.9	16.2	81.3	9.9	77.4	0.7
10	800	-99.0	0.0	88.2	-16.3	83.3	0.5	77.1	3.8
11	1000	-99.0	0.0	86.0	36.0	81.8	34.5	79.5	16.7
12	1250	-99.0	0.0	-99.0	0.0	77.4	50.7	82.8	45.3
13	1600	-99.0	0.0	83.9	44.0	77.3	33.4	78.0	39.1
14	2000	-99.0	0.0	80.2	42.1	74.4	38.1	76.4	33.6
15	2500	-99.0	0.0	-99.0	0.0	72.4	27.7	77.2	33.3
16	3150	-99.0	0.0	-99.0	0.0	72.2	12.2	77.9	13.8
17	4000	-99.0	0.0	-99.0	0.0	76.4	12.2	76.2	13.8
18	5000	-99.0	0.0	-99.0	0.0	75.5	12.2	70.7	13.8
19	6300	-99.0	0.0	-99.0	0.0	73.1	12.2	-99.0	0.0
20	8000	-99.0	0.0	-99.0	0.0	71.4	12.2	70.7	13.8

A.9.7 ss07

Die Schalleistungsspektren aus Sekundärquellen sind der dritten Korrektur [5, Seite 22] entnommen.

Tabelle A.15: Sekundärquellen-ID ss07

i	$f_{c,i}$ in Hz	$L_{W,sec,80,h=0.5m}$ in dB	$\beta_{h=0.5m}$ in dB	$L_{W,sec,80,h=2m}$ in dB	$\beta_{h=2m}$ in dB	$L_{W,sec,80,h=3m}$ in dB	$\beta_{h=3m}$ in dB	$L_{W,sec,80,h=4m}$ in dB	$\beta_{h=4m}$
1	100	99.1	28.6	89.0	-11.9	87.9	-8.4	87.9	-2.2
2	125	100.8	29.4	88.8	-7.0	86.6	5.7	86.5	18.0
3	160	99.3	26.3	89.7	2.7	85.8	18.7	85.1	24.8
4	200	98.6	29.0	92.0	4.4	88.6	7.6	84.3	22.6
5	250	101.4	23.4	95.0	4.2	86.4	6.3	81.4	22.8
6	315	101.6	23.8	93.3	10.2	85.0	1.8	81.3	41.9
7	400	106.0	24.2	89.6	7.6	89.0	13.8	83.0	44.8
8	500	106.0	24.2	94.3	-9.5	-99.0	0.0	82.1	25.2
9	630	105.7	23.7	-99.0	0.0	-99.0	0.0	75.9	55.2
10	800	106.4	19.2	-99.0	0.0	-99.0	0.0	66.5	70.8
11	1000	104.6	27.0	-99.0	0.0	-99.0	0.0	80.1	13.7
12	1250	106.0	29.6	-99.0	0.0	-99.0	0.0	85.5	21.3
13	1600	104.1	33.9	-99.0	0.0	-99.0	0.0	75.9	55.9
14	2000	103.2	31.6	-99.0	0.0	71.4	44.2	75.0	48.4
15	2500	98.1	32.4	-99.0	0.0	75.7	34.4	75.6	40.0
16	3150	93.6	27.6	-99.0	0.0	77.5	30.8	77.4	32.5
17	4000	91.2	25.4	-99.0	0.0	77.7	30.8	77.0	31.4
18	5000	91.3	22.4	-99.0	0.0	76.6	30.8	73.1	33.5
19	6300	86.8	30.5	-99.0	0.0	74.8	30.8	-99.0	0.0
20	8000	84.8	28.9	-99.0	0.0	73.5	30.8	-99.0	0.0

A.9.8 ss08

Die Schalleistungsspektren aus Sekundärquellen sind der dritten Korrektur [5, Seite 23] entnommen.

Tabelle A.16: Sekundärquellen-ID ss08

i	$f_{c,i}$ in Hz	$L_{W,sec,80,h=0.5m}$ in dB	$\beta_{h=0.5m}$ in dB	$L_{W,sec,80,h=2m}$ in dB	$\beta_{h=2m}$ in dB	$L_{W,sec,80,h=3m}$ in dB	$\beta_{h=3m}$ in dB	$L_{W,sec,80,h=4m}$ in dB	$\beta_{h=4m}$ in dB
1	100	-99.0	0.0	80.2	52.2	79.3	51.4	79.8	50.3
2	125	-99.0	0.0	81.0	41.8	79.9	41.9	79.5	42.4
3	160	-99.0	0.0	83.6	28.4	80.8	31.2	78.5	34.7
4	200	-99.0	0.0	85.2	22.3	81.2	26.4	77.5	30.1
5	250	-99.0	0.0	86.2	19.0	81.4	21.9	76.1	28.7
6	315	-99.0	0.0	84.9	18.3	80.0	21.9	75.7	25.4
7	400	-99.0	0.0	91.1	-1.7	84.1	9.1	80.1	11.3
8	500	-99.0	0.0	90.5	-0.8	83.6	7.0	79.5	10.2
9	630	-99.0	0.0	85.8	11.1	80.3	13.3	76.9	16.5
10	800	-99.0	0.0	83.5	10.5	79.5	10.6	77.3	19.0
11	1000	-99.0	0.0	-99.0	0.0	77.8	8.5	79.7	16.9
12	1250	-99.0	0.0	80.6	12.8	75.7	15.9	82.3	11.9
13	1600	-99.0	0.0	81.8	15.6	76.4	25.1	75.6	25.8
14	2000	-99.0	0.0	-99.0	0.0	73.4	34.9	76.1	36.0
15	2500	-99.0	0.0	-99.0	0.0	74.0	33.9	74.4	37.5
16	3150	-99.0	0.0	-99.0	0.0	73.3	29.8	74.5	33.5
17	4000	-99.0	0.0	-99.0	0.0	74.2	29.8	73.3	33.5
18	5000	-99.0	0.0	-99.0	0.0	72.2	29.8	67.8	33.5
19	6300	-99.0	0.0	-99.0	0.0	70.5	29.8	-99.0	0.0
20	8000	-99.0	0.0	74.9	19.5	67.2	29.8	-99.0	0.0

A.9.9 ss09

Die Schalleistungsspektren aus Sekundärquellen sind der dritten Korrektur [5, Seite 24] entnommen.

Tabelle A.17: Sekundärquellen-ID ss09

i	$f_{c,i}$ in Hz	$L_{W,sec,80,h=0.5m}$ in dB	$\beta_{h=0.5m}$ in dB	$L_{W,sec,80,h=2m}$ in dB	$\beta_{h=2m}$ in dB	$L_{W,sec,80,h=3m}$ in dB	$\beta_{h=3m}$ in dB	$L_{W,sec,80,h=4m}$ in dB	$\beta_{h=4m}$ in dB
1	100	-99.0	0.0	89.4	39.5	87.5	37.3	86.9	37.0
2	125	-99.0	0.0	89.7	30.0	87.6	30.6	86.0	31.9
3	160	-99.0	0.0	90.7	21.0	87.3	25.2	84.5	34.0
4	200	-99.0	0.0	89.5	23.7	85.4	20.4	83.6	22.5
5	250	-99.0	0.0	89.3	9.9	84.6	15.9	82.8	15.0
6	315	-99.0	0.0	89.9	-24.1	85.9	8.2	84.0	10.4
7	400	-99.0	0.0	93.5	-8.5	92.4	-0.9	85.4	6.0
8	500	-99.0	0.0	94.7	3.7	85.0	9.1	85.8	7.7
9	630	-99.0	0.0	92.1	49.0	85.2	42.9	87.8	28.4
10	800	-99.0	0.0	-99.0	0.0	-99.0	0.0	86.8	39.6
11	1000	-99.0	0.0	-99.0	0.0	-99.0	0.0	91.1	39.5
12	1250	-99.0	0.0	-99.0	0.0	89.9	43.8	94.9	69.0
13	1600	-99.0	0.0	-99.0	0.0	83.9	64.3	85.0	52.9
14	2000	-99.0	0.0	-99.0	0.0	84.4	64.0	84.7	48.5
15	2500	-99.0	0.0	-99.0	0.0	84.2	55.1	85.6	42.6
16	3150	-99.0	0.0	-99.0	0.0	85.9	49.0	88.6	40.5
17	4000	-99.0	0.0	-99.0	0.0	87.1	49.0	88.6	43.0
18	5000	-99.0	0.0	-99.0	0.0	87.2	49.0	88.2	43.4
19	6300	-99.0	0.0	-99.0	0.0	86.7	49.0	84.7	59.0
20	8000	-99.0	0.0	82.3	49.3	86.7	49.0	88.3	41.7

A.9.10 ss10

Die Schalleistungsspektren aus Sekundärquellen sind der dritten Korrektur [5, Seite 25] entnommen.

Tabelle A.18: Sekundärquellen-ID ss10

i	$f_{c,i}$ in Hz	$L_{W,sec,80,h=0.5m}$ in dB	$\beta_{h=0.5m}$ in dB	$L_{W,sec,80,h=2m}$ in dB	$\beta_{h=2m}$ in dB	$L_{W,sec,80,h=3m}$ in dB	$\beta_{h=3m}$ in dB	$L_{W,sec,80,h=4m}$ in dB	$\beta_{h=4m}$ in dB
1	100	-99.0	0.0	88.9	8.3	87.8	6.4	87.3	6.6
2	125	-99.0	0.0	88.5	-2.5	86.9	-0.4	85.5	3.0
3	160	-99.0	0.0	89.6	-6.3	87.1	-2.6	85.0	-1.7
4	200	-99.0	0.0	89.0	-3.7	86.1	1.2	83.5	-0.8
5	250	-99.0	0.0	88.2	-3.3	85.6	3.5	81.8	4.5
6	315	-99.0	0.0	88.0	-3.2	84.8	1.0	81.4	-1.9
7	400	-99.0	0.0	89.2	-1.6	88.0	-4.9	82.1	0.9
8	500	-99.0	0.0	90.1	6.6	86.5	15.4	82.1	13.6
9	630	-99.0	0.0	90.0	31.3	85.9	33.2	81.0	37.2
10	800	-99.0	0.0	90.3	43.4	86.5	33.7	81.6	36.4
11	1000	-99.0	0.0	90.2	35.6	86.0	29.6	85.2	27.4
12	1250	-99.0	0.0	86.4	54.6	85.5	49.8	86.8	50.4
13	1600	-99.0	0.0	91.3	48.6	82.8	47.8	78.4	39.7
14	2000	-99.0	0.0	88.1	33.8	81.7	31.7	77.7	27.5
15	2500	-99.0	0.0	84.5	28.4	79.9	24.9	78.2	25.5
16	3150	-99.0	0.0	71.3	0.3	80.1	29.5	81.1	27.0
17	4000	-99.0	0.0	82.6	23.7	80.1	29.5	80.9	27.0
18	5000	-99.0	0.0	82.3	16.0	80.2	29.5	80.1	27.0
19	6300	-99.0	0.0	80.5	-1.3	79.3	29.5	71.9	27.0
20	8000	-99.0	0.0	79.2	21.2	79.1	29.5	79.7	27.0

A.9.11 ss11

Die Schalleistungsspektren aus Sekundärquellen sind der dritten Korrektur [5, Seite 26] entnommen.

Tabelle A.19: Sekundärquellen-ID ss11

i	$f_{c,i}$ in Hz	$L_{W,sec,80,h=0.5m}$ in dB	$\beta_{h=0.5m}$ in dB	$L_{W,sec,80,h=2m}$ in dB	$\beta_{h=2m}$ in dB	$L_{W,sec,80,h=3m}$ in dB	$\beta_{h=3m}$ in dB	$L_{W,sec,80,h=4m}$ in dB	$\beta_{h=4m}$ in dB
1	100	-99.0	0.0	80.1	54.4	77.9	61.4	76.1	73.9
2	125	-99.0	0.0	88.9	18.5	83.8	43.6	77.9	77.7
3	160	-99.0	0.0	86.6	75.5	79.7	104.2	72.8	140.0
4	200	-99.0	0.0	84.2	40.6	73.5	102.0	65.2	150.0
5	250	-99.0	0.0	75.9	92.5	-99.0	0.0	74.4	4.8
6	315	-99.0	0.0	85.0	30.0	-99.0	0.0	71.0	15.5
7	400	-99.0	0.0	84.2	14.8	77.4	41.4	70.5	46.0
8	500	-99.0	0.0	87.4	-11.6	-99.0	0.0	73.0	35.3
9	630	-99.0	0.0	84.7	34.3	-99.0	0.0	75.1	31.2
10	800	-99.0	0.0	83.7	35.1	-99.0	0.0	76.9	37.2
11	1000	-99.0	0.0	-99.0	0.0	-99.0	0.0	80.8	11.3
12	1250	-99.0	0.0	-99.0	0.0	-99.0	0.0	82.0	51.3
13	1600	-99.0	0.0	-99.0	0.0	75.8	38.0	76.5	28.8
14	2000	-99.0	0.0	-99.0	0.0	76.7	41.0	74.3	41.0
15	2500	-99.0	0.0	-99.0	0.0	72.7	63.2	71.9	77.5
16	3150	-99.0	0.0	-99.0	0.0	75.1	41.6	74.7	74.7
17	4000	-99.0	0.0	-99.0	0.0	75.0	41.6	74.7	73.0
18	5000	-99.0	0.0	-99.0	0.0	72.3	41.6	-99.0	0.0
19	6300	-99.0	0.0	-99.0	0.0	-99.0	0.0	-99.0	0.0
20	8000	-99.0	0.0	-99.0	0.0	-99.0	0.0	-99.0	0.0

A.10 Aerodynamische Quellen $L_{W,aero,200}$

A.10.1 ae01

Die Schallleistungsspektren aus aerodynamischen Quellen sind der sonRAIL-Projektdokumentation [1, Tabelle 6.7] entnommen.

Tabelle A.20: Aerodynamische Quellen-ID ae01

i	$f_{c,i}$ in Hz	$L_{W,aero,200,h=0.5m}$ in dB	$L_{W,aero,200,h=2m}$ in dB	$L_{W,aero,200,h=3m}$ in dB	$L_{W,aero,200,h=4m}$ in dB
1	100	109.5	107.8	104.5	101.7
2	125	107.0	102.2	101.4	100.4
3	160	103.5	99.6	100.8	101.4
4	200	104.4	102.2	101.2	101.8
5	250	104.6	105.7	99.7	100.7
6	315	105.1	99.9	98.0	100.4
7	400	106.9	99.7	97.7	100.1
8	500	103.9	96.7	98.5	99.4
9	630	106.9	99.1	97.3	99.9
10	800	101.5	96.9	97.4	99.3
11	1000	99.2	95.8	96.9	98.3
12	1250	99.1	94.8	97.6	99.4
13	1600	99.3	97.3	96.4	98.2
14	2000	101.1	94.5	95.5	98.1
15	2500	99.9	93.8	95.0	96.8
16	3150	101.8	93.2	95.7	98.2
17	4000	98.6	92.1	93.7	96.2
18	5000	97.4	92.4	91.7	94.2
19	6300	99.8	92.6	89.7	92.2
20	8000	97.7	92.6	87.7	90.2

A.10.2 ae03

Die Schallleistungsspektren aus aerodynamischen Quellen sind der sonRAIL-Projektdokumentation [1, Tabelle 6.7] entnommen.

Tabelle A.21: Aerodynamische Quellen-ID ae03

i	$f_{c,i}$ in Hz	$L_{W,aero,200,h=0.5m}$ in dB	$L_{W,aero,200,h=2m}$ in dB	$L_{W,aero,200,h=3m}$ in dB	$L_{W,aero,200,h=4m}$ in dB
1	100	100.7	97.8	98.0	99.0
2	125	100.1	99.1	97.4	99.8
3	160	99.1	99.1	98.9	100.8
4	200	99.7	99.9	100.2	101.2
5	250	100.1	103.0	98.0	98.0
6	315	100.9	97.7	95.7	99.5
7	400	102.1	97.8	99.4	101.9
8	500	99.1	97.1	99.1	100.1
9	630	96.3	98.1	96.5	99.9
10	800	95.6	97.6	96.9	100.8
11	1000	94.5	97.3	95.5	100.9
12	1250	94.2	97.2	96.4	100.7
13	1600	93.4	96.1	94.0	96.9
14	2000	95.5	96.9	92.8	95.4
15	2500	93.6	94.5	92.5	96.1
16	3150	90.9	93.3	93.0	98.3
17	4000	91.4	92.4	91.0	96.3
18	5000	89.4	90.5	89.0	94.3
19	6300	88.4	90.9	87.0	92.3
20	8000	87.4	91.4	85.0	90.3

A.10.3 ae05

Die Schalleistungsspektren aus aerodynamischen Quellen sind der sonRAIL-Projektdokumentation [1, Tabelle 6.7] entnommen.

Tabelle A.22: Aerodynamische Quellen-ID ae05

i	$f_{c,i}$ in Hz	$L_{W,aero,200,h=0.5m}$ in dB	$L_{W,aero,200,h=2m}$ in dB	$L_{W,aero,200,h=3m}$ in dB	$L_{W,aero,200,h=4m}$ in dB
1	100	100.2	102.5	100.1	100.2
2	125	107.5	102.2	96.2	99.1
3	160	101.2	96.1	95.3	97.4
4	200	101.3	97.0	94.4	96.6
5	250	102.1	102.5	94.8	93.9
6	315	104.5	98.3	95.0	97.6
7	400	106.4	97.5	97.3	99.1
8	500	104.9	97.1	98.1	99.1
9	630	106.6	98.4	94.9	96.5
10	800	107.0	95.9	94.3	94.0
11	1000	103.1	95.2	93.4	91.8
12	1250	99.7	94.8	93.2	92.7
13	1600	99.3	90.0	89.3	93.4
14	2000	98.2	89.2	91.2	94.4
15	2500	96.4	90.2	89.1	92.3
16	3150	90.8	90.0	89.3	90.9
17	4000	89.7	89.7	87.3	88.9
18	5000	88.7	88.6	85.3	86.9
19	6300	89.3	85.4	83.3	84.9
20	8000	85.1	86.2	81.3	82.9

A.10.4 ae08

Die Schallleistungsspektren aus aerodynamischen Quellen sind der sonRAIL-Projektdokumentation [1, Tabelle 6.7] entnommen.

Tabelle A.23: Aerodynamische Quellen-ID ae08

i	$f_{c,i}$ in Hz	$L_{W,aero,200,h=0.5m}$ in dB	$L_{W,aero,200,h=2m}$ in dB	$L_{W,aero,200,h=3m}$ in dB	$L_{W,aero,200,h=4m}$ in dB
1	100	104.9	102.8	104.9	102.8
2	125	99.6	101.9	97.3	96.4
3	160	100.5	101.7	107.0	110.1
4	200	99.7	100.6	106.3	107.6
5	250	98.8	98.3	96.0	93.1
6	315	100.7	94.9	95.5	97.4
7	400	102.0	93.4	96.5	97.0
8	500	99.1	93.9	98.7	96.7
9	630	100.0	95.6	96.3	93.8
10	800	96.6	92.3	95.6	93.2
11	1000	94.6	91.6	95.1	93.4
12	1250	95.0	91.4	95.3	95.1
13	1600	91.5	91.3	93.0	91.1
14	2000	91.9	92.0	93.9	93.9
15	2500	90.4	90.7	92.7	91.5
16	3150	87.7	87.7	89.7	89.7
17	4000	87.1	87.1	87.7	87.7
18	5000	86.4	86.0	85.7	85.7
19	6300	86.5	86.5	83.7	83.7
20	8000	86.5	85.4	81.7	81.7

A.11 Brücken $L_{W,bridge}$

Die Schalleistungsspektren für Brückenüberfahrten sind der sonRAIL-Projektdokumentation [1, Tabelle 6.10] entnommen.

Tabelle A.24: zusätzliche Schalleistung zu Quellenhöhe $h = 0m$ bei Brückenüberfahrten

i	$f_{c,i}$ in Hz	Concrete in dB			Steel in dB			T (b)	T (d)			
		P (b)	B (b)	C (b)	P (d)	F (d)	B (b)					
	63	119.9	109.9	111.5	123.9	122.9	129.0	117.6	118.2	114.1	115.9	
	80	114.7	104.9	109.0	119.7	124.2	124.0	123.5	115.1	119.2	114.1	116.2
1	100	109.8	103.4	107.5	115.8	124.8	120.5	124.5	112.6	117.2	108.6	116.8
2	125	110.8	101.9	106.0	110.8	122.8	113.0	125.0	114.6	116.2	102.1	119.3
3	160	110.6	100.9	103.5	109.6	121.6	109.0	124.0	114.1	115.7	101.6	116.6
4	200	107.6	101.4	104.5	108.6	121.6	109.5	123.0	111.6	115.2	100.6	114.6
5	250	106.3	102.4	105.0	107.3	121.3	110.5	123.5	110.6	116.7	102.6	112.8
6	315	106.3	101.9	104.0	108.3	121.8	111.0	129.5	108.6	117.6	102.6	116.3
7	400	106.5	100.9	105.0	110.5	121.5	113.5	128.0	108.1	118.2	105.1	121.0
8	500	106.9	101.4	106.0	110.4	121.4	115.0	130.5	108.7	119.6	107.6	123.9
9	630	105.6	102.9	108.0	111.6	118.6	114.0	129.0	109.7	117.5	106.1	122.6
10	800	104.0	104.9	108.5	111.5	116.0	111.5	126.0	109.0	118.2	104.6	122.0
11	1000	103.2	106.4	108.0	111.2	114.7	110.0	122.0	108.9	117.2	103.6	121.2
12	1250	108.6	107.9	107.5	111.1	113.1	105.0	119.0	110.4	115.2	101.6	118.1
13	1600	109.2	109.9	109.0	111.2	112.2	106.0	115.0	110.1	110.7	102.6	115.7
14	2000	109.5	109.9	107.0	111.5	111.5	105.0	111.0	109.6	109.7	103.1	113.5
15	2500	104.4	109.4	104.5	112.4	106.4	104.0	108.0	109.1	107.2	100.6	109.4
16	3150	99.5	108.9	103.5	108.5	102.5	102.0	106.0	107.6	105.7	98.6	104.5
17	4000	95.7	107.9	99.0	106.7	99.7	101.0	104.0	104.6	103.7	96.6	100.7
18	5000	93.2	102.9	96.5	104.2	96.2	99.0	102.0	102.6	98.2	93.6	97.2
19	6300	90.8	96.9	93.0	101.8	92.8	97.0	99.0	98.6	94.2	90.6	93.8
20	8000	88.8	92.9	90.0	100.8	90.3	95.0	97.5	93.6	91.2	87.6	90.3

P	...	Plate Girder
B	...	Box Girder
C	...	Composite Girder
F	...	Full Wall Girder
T	...	Truss

(b)	...	Ballast
(d)	...	Direct

A.12 Bodeneffekt D_{gr}

Die Korrekturspektren für den Bodeneffekt sind mit einer für diesen Zweck programmierten Empa-Software [12, 13] mit den Parametern der Schiene 2 an Messpunkt 03 [1, Tabelle 7.4] berechnet worden.

Tabelle A.25: Berechneter Bodeneffekt $D_{gr,hi}$ für die Quellenhöhen h (Empfänger auf Standardposition)

i	$f_{c,i}$ in Hz	$D_{gr,h=0m}$ in dB	$D_{gr,h=0.5m}$ in dB	$D_{gr,h=2m}$ in dB	$D_{gr,h=3m}$ in dB	$D_{gr,h=4m}$ in dB
1	100	1.0	0.7	-0.8	-2.2	-3.7
2	125	0.5	0.6	-0.5	-2.6	-4.2
3	160	1.4	1.5	-1.1	-4.6	-2.4
4	200	2.6	2.0	-4.5	-1.9	2.3
5	250	3.1	1.0	-3.1	2.7	3.6
6	315	0.9	-3.4	1.3	2.5	-0.1
7	400	0.0	-0.8	1.7	0.5	-0.7
8	500	2.2	-3.7	1.7	-0.4	1.8
9	630	0.2	-1.3	-0.9	1.1	0.3
10	800	0.7	-0.7	0.6	0.0	0.4
11	1000	0.7	0.8	0.3	0.2	0.4
12	1250	0.2	2.2	0.5	0.1	0.4
13	1600	-1.2	1.8	0.3	0.0	0.1
14	2000	-2.0	-0.7	0.4	0.2	0.1
15	2500	-2.0	1.1	0.3	0.1	0.1
16	3150	-1.2	0.8	0.5	0.1	0.2
17	4000	0.9	1.1	0.3	0.0	0.2
18	5000	2.4	0.8	0.5	0.0	0.2
19	6300	2.0	0.9	0.9	0.0	0.2
20	8000	-0.5	0.5	0.4	0.0	0.2

A.13 A-Bewertung

Das A-Bewertungsfilter ist dem sonROAD18-Berechnungsmodell für Strassenlärm [10, Tabelle 10.8] entnommen.

Tabelle A.26: A-Bewertung

i	$f_{c,i}$ in Hz	A_{bew} in dB
1	100	-19.2
2	125	-16.1
3	160	-13.4
4	200	-10.9
5	250	-8.6
6	315	-6.6
7	400	-4.8
8	500	-3.2
9	630	-1.9
10	800	-0.8
11	1000	0.0
12	1250	0.6
13	1600	1.0
14	2000	1.2
15	2500	1.3
16	3150	1.2
17	4000	1.0
18	5000	0.5
19	6300	-0.2
20	8000	-1.2

B Referenzfälle

Zur fallibilistischen Prüfung einer programmatischen sonRAIL-Implementation liegen 71 Referenzfälle mit ihren Ergebnissen vor (Anhang). Die 11 Modelleingangsparameter in ihrer Reihenfolge, in der sie in den Dateien namens `InputData.csv` gegeben werden:

Fahrzeugkategorie		VehicleCategory
Fahrzeuglänge	l_{veh}	Length
Fahrgeschwindigkeit	v	Speed
Anzahl der Achsen	N_{ac}	Axles
Schienenrauheit	$L_{r,tr}$	Rail
Oberbau		Track
Kurvenradius	R	CurveRadius
Brückentyp		BridgeType
Anteil der Achsen mit Flachstellen	η_{flat}	FlatPrc
Weiche / Schienenstoss		SwitchFlag
Anzahl Fahrzeuge pro Stunde	N	VehiclesPerHour

wurden über ihren jeweiligen Wertebereich variiert (Tabelle B.1). Fälle mit Eingangswerten ausserhalb ihres gültigen Bereichs dürfen keine extrapolierten Ergebnisse liefern. Auch nicht dann, wenn sie mit einem Hinweis versehen werden. Mit dieser Massnahme ist der Berechnung und Verwendung falscher Ergebnisse vorgebeugt. Die Referenzfälle decken ungeachtet ihrer Realitätstreue alle Fahrzeugkategorien und dedizierte Zugmodelle, den gesamten Geschwindigkeitsbereich, alle Schienenrauheiten, Oberbautypen und Streckenverläufe mit Kurven, Weichen/Schienenstösse und Brücken ab.

Alle Ergebnisspektren liegen A-bewertet als 1s-äquivalente Schalldruckpegel in Standardempfängerposition (`LpA_eq_Tp_`) und als Schalleistungspegel (`LWA_`) von Rollgeräusch (`_WRI.csv`), Totalgeräusch je Höhe (`_tot_h.csv`) und Totalgeräusch (`_tot.csv`) bis auf 1/1000dB gerundet vor. Die Werte in den `csv`-Dateien sind mit Semikola getrennt und zugunsten der Lesbarkeit spaltenweise mit Leerzeichen am Dezimalpunkt ausgerichtet. Die erste Zeile ist als Tabellenkopf zu verstehen. Die Zahlen hinter den Formelzeichen in den auf `_tot_h.csv` endenden Dateien zeigen die Quellhöhen an:

Lp0	→	$L_{pAeq,T_p,0 m,i}$	LW0	→	$L_{WA,0 m,i}$
Lp05	→	$L_{pAeq,T_p,0.5 m,i}$	LW05	→	$L_{WA,0.5 m,i}$
Lp2	→	$L_{pAeq,T_p,2 m,i}$	LW2	→	$L_{WA,2 m,i}$
Lp3	→	$L_{pAeq,T_p,3 m,i}$	LW3	→	$L_{WA,3 m,i}$
Lp4	→	$L_{pAeq,T_p,4 m,i}$	LW4	→	$L_{WA,4 m,i}$

Die Variation der Eingangswerte erfolgt in 10 Schritten:

1. Fahrzeugkategorie
2. Schienenrauheit
3. Oberbau
4. Weiche / Schienenstoss
5. spezielle Fahrzeugmodelle
6. Brückentyp
7. Kurvenradius & Fahrgeschwindigkeit
8. Achsen mit Flachstellen
9. sämtliche Parameter
10. fehlerhafte Parameter

Tabelle B.1: Variation der Eingangsparameter

#	Fzg.-Kategorie	Länge in m	Geschw. in km/h	N_{ac}	$L_{r, tr}$	$L_{HW, tr, i}$	Radius in m	Brückentyp	η_{flat} in %	Weiche	N
01	1	20.0	70.0	4	average	monoUIC60	1000	-	0	nein	10
02	2	20.0	70.0	4	average	monoUIC60	1000	-	0	nein	10
03	3	20.0	70.0	4	average	monoUIC60	1000	-	0	nein	10
04	4	20.0	70.0	4	average	monoUIC60	1000	-	0	nein	10
05	5	20.0	70.0	4	average	monoUIC60	1000	-	0	nein	10
06	6	20.0	70.0	4	average	monoUIC60	1000	-	0	nein	10
07	7	20.0	70.0	4	average	monoUIC60	1000	-	0	nein	10
08	8	20.0	70.0	4	average	monoUIC60	1000	-	0	nein	10
09	9	20.0	70.0	4	average	monoUIC60	1000	-	0	nein	10
10	10	20.0	70.0	4	average	monoUIC60	1000	-	0	nein	10
11	11	20.0	70.0	4	average	monoUIC60	1000	-	0	nein	10
12	1	20.0	70.0	4	smooth	monoUIC60	1000	-	0	nein	10
13	1	20.0	70.0	4	bad	monoUIC60	1000	-	0	nein	10
14	9	20.0	70.0	4	average	monoUIC54	1000	-	0	nein	10
15	9	20.0	70.0	4	average	biUIC54	1000	-	0	nein	10
16	9	20.0	70.0	4	average	steelUIC54	1000	-	0	nein	10
17	9	20.0	70.0	4	average	woodUIC60	1000	-	0	nein	10
18	9	20.0	70.0	4	average	woodUIC54	1000	-	0	nein	10
19	1	20.0	70.0	4	smooth	monoUIC60	1000	-	0	ja	10
20	1	20.0	70.0	4	average	monoUIC60	1000	-	0	ja	10
21	1	20.0	70.0	4	bad	monoUIC60	1000	-	0	ja	10
22	Re460	18.5	70.0	4	average	monoUIC60	1000	-	0	nein	10
23	Re420	14.9	70.0	4	average	monoUIC60	1000	-	0	nein	10
24	Re620	19.3	70.0	6	average	monoUIC60	1000	-	0	nein	10
25	Ae610	18.4	70.0	6	average	monoUIC60	1000	-	0	nein	10
26	NiNa MW	16.3	70.0	3	average	monoUIC60	1000	-	0	nein	10
27	NPZ RBDe	25.0	70.0	4	average	monoUIC60	1000	-	0	nein	10

#	Fzg.-Kategorie	Länge in m	Geschw. in km/h	N_{ac}	$L_{r, tr}$	$L_{HW, tr, i}$	Radius in m	Brückentyp	η_{flat} in %	Weiche	N
28	1	20.0	70.0	4	average	monoUIC60	1000	Concrete P (b)	0	nein	10
29	1	20.0	70.0	4	average	monoUIC60	1000	Concrete B (b)	0	nein	10
30	1	20.0	70.0	4	average	monoUIC60	1000	Concrete C (b)	0	nein	10
31	1	20.0	70.0	4	average	monoUIC60	1000	Steel P (b)	0	nein	10
32	1	20.0	70.0	4	average	monoUIC60	1000	Steel P (d)	0	nein	10
33	1	20.0	70.0	4	average	monoUIC60	1000	Steel F (b)	0	nein	10
34	1	20.0	70.0	4	average	monoUIC60	1000	Steel F (d)	0	nein	10
35	1	20.0	70.0	4	average	monoUIC60	1000	Steel B (b)	0	nein	10
36	1	20.0	70.0	4	average	monoUIC60	1000	Steel B (d)	0	nein	10
37	1	20.0	70.0	4	average	monoUIC60	1000	Steel T (b)	0	nein	10
38	1	20.0	70.0	4	average	monoUIC60	1000	Steel T (d)	0	nein	10
39	1	20.0	156.7	4	smooth	monoUIC60	1000	-	0	nein	10
40	1	20.0	156.7	4	smooth	monoUIC60	999	-	0	nein	10
41	2	20.0	143.3	4	smooth	monoUIC60	930	-	0	nein	10
42	3	20.0	124.4	4	smooth	monoUIC60	860	-	0	nein	10
43	4	20.0	113.8	4	smooth	monoUIC60	790	-	0	nein	10
44	5	20.0	98.8	4	smooth	monoUIC60	720	-	0	nein	10
45	6	20.0	90.4	4	smooth	monoUIC60	650	-	0	nein	10
46	7	20.0	78.5	4	smooth	monoUIC60	580	-	0	nein	10
47	8	20.0	71.8	4	smooth	monoUIC60	510	-	0	nein	10
48	9	20.0	62.4	4	smooth	monoUIC60	440	-	0	nein	10
49	10	20.0	57.1	4	smooth	monoUIC60	370	-	0	nein	10
50	11	20.0	50.0	4	smooth	monoUIC60	300	-	0	nein	10

#	Fzg.-Kategorie	Länge in m	Geschw. in km/h	N_{ac}	$L_{r, tr}$	$L_{HW, tr, i}$	Radius in m	Brückentyp	η_{flat} in %	Weiche	N
51	1	20.0	70.0	4	smooth	monoUIC60	1000	-	25	nein	10
52	2	20.0	70.0	4	smooth	monoUIC60	1000	-	25	nein	10
53	3	20.0	70.0	4	smooth	monoUIC60	1000	-	25	nein	10
54	4	20.0	70.0	4	smooth	monoUIC60	1000	-	25	nein	10
55	5	20.0	70.0	4	smooth	monoUIC60	1000	-	25	nein	10
56	6	20.0	70.0	4	smooth	monoUIC60	1000	-	25	nein	10
57	7	20.0	70.0	4	smooth	monoUIC60	1000	-	25	nein	10
58	8	20.0	70.0	4	smooth	monoUIC60	1000	-	25	nein	10
59	9	20.0	70.0	4	smooth	monoUIC60	1000	-	25	nein	10
60	10	20.0	70.0	4	smooth	monoUIC60	1000	-	25	nein	10
61	11	20.0	70.0	4	smooth	monoUIC60	1000	-	25	nein	10
62	8	26.4	197.3	4	bad	monoUIC54	900	Concrete P (b)	25	ja	7
63	1	1	70.0	4	average	monoUIC60	1000	-	0	nein	10
64	1	20.0	28.0	4	average	monoUIC60	1000	-	0	nein	10
65	1	20.0	201.0	4	average	monoUIC60	1000	-	0	nein	10
66	1	20.0	70.0	1	average	monoUIC60	1000	-	0	nein	10
67	1	20.0	70.0	4	average	monoUIC60	299	-	0	nein	10
68	1	20.0	70.0	4	average	monoUIC60	1000	-	-1	nein	10
69	1	20.0	70.0	4	average	monoUIC60	1000	-	101	nein	10
70	1	20.0	70.0	4	average	monoUIC60	1000	-	0	nein	-1
71	1	20.0	70.0	4	average	steelUIC54	1000	-	0	ja	10

Literatur

- [1] D. Sehu, J.-M. Wunderli, K. Heutschi, T. Thron, M. Hecht, A. Rohrbeck, and T. Ledermann, “sonRAIL-Projektdokumentation,” July 2010.
- [2] T. Thron and M. Hecht, “The sonRAIL emission model for railway noise in Switzerland,” *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 96, pp. 873–883, Jan. 2010.
- [3] A. Heusser, “Referenzergebnisse von Berechnungen mit dem sonRAIL-Emissionsmodell,” Apr. 2022.
- [4] T. Thron, “Nachauswertung Arraymessungen,” memo, PROSE, Berlin, Dec. 2011.
- [5] T. Thron, “Aktualisierung sonRAIL Emissionsmodell,” Tech. Rep. 8-059 Rev. A, PROSE, Berlin, Feb. 2012.
- [6] I. E. Commission, “Electroacoustics - Octave-band and fractional-octave-band filters - Part 1: Specifications,” June 2014.
- [7] E. Commission, “Commission Directive (EU) 2015/996 of 19 May 2015 establishing common noise assessment methods according to Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council,” May 2015.
- [8] M. Dittrich, “The IMAGINE Source Model for Railway Noise Prediction,” *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 93, pp. 185–200, Jan. 2007.
- [9] T. Thron, “Aktualisierung sonRAIL Emissionsmodell,” Tech. Rep. 8-059 Rev. 0, PROSE, Berlin, Dec. 2011.
- [10] K. Heutschi and B. Locher, “sonROAD18 - Berechnungsmodell für Strassenlärm,” Sept. 2018.
- [11] I. O. for Standardization, “Acoustics - Railway applications - Measurement of noise emitted by railbound vehicles,” Jan. 2013.
- [12] K. Heutschi, “Sound Propagation over Ballast Surfaces,” *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 95, pp. 1006–1012, Jan. 2009.
- [13] K. Heutschi, “sonrailE.exe,” May 2009.
- [14] Bundesamt für Verkehr and Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, *SEMIBEL - Schweizerisches Emissions- und Immissionsmodell für die Berechnung von Eisenbahnlärm - Programmdokumentation*. Bern: Bundesamt für Umwelt, Wald & Landschaft, version 1 ed., 1990.
- [15] T. Thron, “sonRAIL_e_modell.xls,” Oct. 2010.