



Empa

Materials Science and Technology

Technische
Universität
Berlin



Abteilung Akustik / Lärminderung

Dr. Jean-Marc Wunderli

Jonas Jäggi

TEL.: +41 58 765 42 04

E-MAIL: Jean-Marc.Wunderli@empa.ch

WEBSITE: <https://www.empa.ch/>



Fachgebiet Schienenfahrzeuge

Prof. Dr.-Ing. Markus Hecht

Sören Franz Thilo Hanisch, M.Sc.

TEL.: +49 (0)30 314 25150

E-MAIL: Markus.Hecht@tu-berlin.de

WEBSITE: <https://www.tu.berlin/schienenfz>

TUB-Bericht Nr. 19/2022

TUB-Projekt-Nr.: 2022-D013-HAN

Empa-Auftragsnummer 5211.02191.100.01

Empa-Vertragsnummer: 1337000631

Version 1.2

Literaturstudie und Datenanalyse zum Lärm von Güterzuglokomotiven

Bearbeitet von

Prof. Dr.-Ing. Markus Hecht (TUB)

Dr. Jean-Marc Wunderli (Empa)

Jonas Jäggi (Empa)

Sören Franz Thilo Hanisch (TUB)

Anastasia Ullrich (TUB)

Berlin und Dübendorf, 29.03.2023

Kurzfassung

Die Grenzwerte der TSI „Fahrzeuge – Lärm“ für Lokomotiven sind seit ihrer Einführung 2006 für die Betriebszustände Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit sowie Anfahrt aus dem Stillstand nahezu gleichgeblieben (Änderung um -1 dB im Jahr 2014) und auch die im Frühjahr 2023 vorgesehene Neuauflage zeigt keine Verschärfung auf. Dadurch ist die Umsetzung von Lärminderungsmaßnahmen in den letzten 20 Jahren weitgehend zum Stillstand gekommen. Insbesondere in den letzten 10 Jahren wurde keine Forschungsvorhaben zur Reduzierung des Außengeräuschs von Elektrolokomotiven durchgeführt, so dass die Erkenntnisse einer Studie von LUTZENBERGER ET AL aus dem Jahr 2013 zum Stand der Technik der Geräuschemission u. a. der Elektrolokomotiven weiterhin Gültigkeit haben.

Die Auswertung der Pegelschriebe der Bahnlärm-Monitoringstationen des Bundesamts für Verkehr zeigen, dass die Lokomotiven im Mittel 5 – 10 dB(A) tiefere Ereignispegel aufweisen als Güterwagen mit GG-Sohlen. Von den untersuchten Lokomotivtypen waren dabei Re 460/465 und TRAXX F160 in etwa gleich laut wie Güterwagen mit K-Sohlen; alle anderen Lokomotivtypen waren aber deutlich lauter. Zwischen den einzelnen Lokomotivtypen gibt es Unterschiede von 5 – 10 dB(A), wobei in der Summe namentlich der hohe Anteil an alten, vergleichsweise lauten Lokomotiven, ins Gewicht fällt. Neue Loks, insbesondere Re 476 sind zwar seltener, aber nicht leiser als die alten. Im ausgewerteten Zeitraum von März 2016 bis Juni 2020 stellten Lokomotiven im Zugverband in der Hälfte der Fälle eine bedeutende Quelle dar und waren in einem Drittel der Güterzüge für den Maximalpegel verantwortlich. Als dominante Quelle im Hinblick auf den Ereignispegel traten sie jedoch nur in rund 5 % der Fälle auf. Hochgerechnet auf einen Betrieb ohne Grauguss-Klotz gebremste Fahrzeuge liegt der Beitrag der Lokomotiven zum Gesamtpegel 10 dB(A) tiefer als derjenige des Wagenanteils. Unter der Berücksichtigung einer 2 m hohen Lärmschutzwand wurde gezeigt, dass für niedrige Fahrgeschwindigkeiten der Anteil der Güterzüge, wo die Lokomotive mit bedeutenden Sekundärquellen die dominante Quelle ist, auf rund einen Fünftel ansteigt.

Es sind zwar viele kostengünstige Lärminderungsmaßnahmen bekannt, aber diese werden nicht im vollen Umfang angewendet. Dadurch können heutige moderne Lokomotiven oftmals lauter als leise Güterwagen sein und rücken damit verstärkt in den Fokus von Lärminderungszielen.

Durch eine Literaturrecherche zeigt sich, dass eine Reduktion der Grenzwerte für Roll- und Anfahrgeräusche im Bereich von 5 dB bis 7 dB nur durch die Lokomotive derzeitig technisch möglich ist und diese teils von verschiedenen Lokomotivtypen bereits erreicht werden. Bei den Außengeräuschen im Stillstand ist noch ein größeres Minderungspotential von bis zu 13 dB vorhanden. Hieraus haben sich Empfehlungen für zukünftige Grenzwerte abgeleitet.

Die vor circa 30 Jahren entwickelte Lok 2000 (Re 460) erfüllt in fast allen relevanten Betriebszuständen bereits diese empfohlenen Grenzwerte. In wie fern bei anderen bestehenden Lokomotiven Lärminderungsmaßnahmen notwendig und nachrüstbar sind, ist von den einzelnen Lokomotivkonstruktionen abhängig. Das beste Ergebnis ist in jedem Fall mit einer tiefgreifenden akustischen Optimierung von bestehenden Lokomotivkonzepten zu erreichen. Hierfür wurden technische Mindestanforderungen definiert. Die Konstruktion und Zulassung einer zukünftigen leisen Güterzuglokomotive werden mit 7 bis 13 Mio. CHF über eine Dauer von mindestens sechs Jahren abgeschätzt. Aufgrund dieses Aufwands und der in der Zukunft zu erwartenden Minderung der Geräuschemissionen des Wagenmaterials wird empfohlen, rechtzeitig akustische Anforderungen an Güterzuglokomotiven zu definieren, um zu verhindern, dass zukünftig die Lokomotiven überwiegend als bedeutsame Lärmquellen im Schienenverkehr auftreten.

(Prof. Dr.-Ing. M. Hecht)

(Dr. Jean-Marc Wunderli)

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	II
Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	IX
Abkürzungsverzeichnis	XI
1. Hintergrund.....	1
2. Lärminderungspotential bei Güterzuglokomotiven	3
2.1 Methodik	3
2.2 Theoretische Grundlagen	4
2.3 Schalltechnische Optimierungen an Lokomotiven	7
2.4 Lok 2000 – die leise Lokomotive.....	19
3. Auswertung der Pegelschriebe der Bahnlärm-Monitoringstationen des BAV.....	21
3.1 Datengrundlagen	21
3.2 Gegenüberstellung von Lokomotiven und Wagen im selben Zug.....	22
3.3 Vergleich des Ereignispegels einzelner Fahrzeuge	28
3.4 Ausbreitung hinter Schallschutzwänden	37
4. Empfehlungen für Schallemissionsgrenzwerte.....	40
4.1 Betriebszustand Stand.....	41
4.2 Betriebszustand Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit	45
4.3 Betriebszustand Anfahrt.....	47
4.4 Betriebszustand Bremsung.....	49
4.5 Betriebszustand Kurvenfahrt.....	50
5. Überlegungen zu Realisierbarkeit und Kosten einer lärmoptimierten Güterzuglok	51
6. Fazit und Ausblick.....	53
7. Literatur.....	57
8. Anhang.....	63



8.1	Ergänzungen zu Abschnitt 3.2: Konsequenzen des Aussortierens von Zügen mit Wagen mit Graugussbremsen	63
8.2	Grundlagen zu Abschnitt 3.4: Ausbreitung hinter Lärmschutzwänden.....	66

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Vorbeifahrpegel von Güterwagen (links) und Lokomotiven (rechts) in der Schweiz – bezogen auf 80 km/h und auf ein festes Achsen- Längen-Verhältnis.....	2
Abbildung 2-1: Vom Schienenverkehr ausgehender Körper- und Luftschall	5
Abbildung 2-2: Maschinenraum-Layout einer Mehrsystem-Lokomotive (AC und DC) am Beispiel einer Vectron MS (Re 475) mit hoher Leistung des Unternehmens Siemens Mobility GmbH	6
Abbildung 2-3: Exemplarischer Verlauf des A-bewerteten energieäquivalenten Dauerschalldruckpegels der Vorbeifahrt einer Lokomotive in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit.....	7
Abbildung 2-4: Verteilung der Quellenintensität in der 1000 Hz-Terz und Angabe der Gesamtschallleistung pro Quellenhöhe an einer Lok 2000.....	7
Abbildung 2-5: Forschungsprojekt „Leise Züge und Trassen“: Skizze des modifizierten Öl/Wasser-Kühlturms	10
Abbildung 2-6: Forschungsprojekt „Leise Züge und Trassen“: Druckseitiger A- bewerteter Oktav-Schallleistungspegel als Funktion der Frequenz	10
Abbildung 2-7: Intelligent Air Control: Reduzierung der Schallleistung bei Drehzahlabsenkung.....	13
Abbildung 2-8: Zweistufiges Getriebe des Giruno	14
Abbildung 2-9: Vectron (Re 475) Treibradsatz	16
Abbildung 2-10: Shift2Rail-Projekt PIVOT: Neuartige Radgeometrie	18
Abbildung 2-11: Shift2Rail-Projekt DYNAFREIGHT: Sechssachsige Lokomotive mit Schallschürzen.....	18
Abbildung 3-1: Standorte der stationären Monitoringstationen (rote Punkte)	21
Abbildung 3-2: Schematische Darstellung des Integrationsbereichs für den Ereignispegel der Lokomotive(n) sowie den Ereignispegel der Wagen.	23
Abbildung 3-3: Histogramme der Ereignispegel von Lokomotiven (y-Achse) und Wagen (x-Achse) aller ausgewerteten Güterzüge (links) und aller ausgewerteten Güterzüge, welche keine Wagen mit Graugussbremsen enthalten (rechts).....	25

Abbildung 3-4: Histogramme der Maximalpegel von Lokomotiven (y-Achse) und Wagen (x-Achse) aller ausgewerteten Güterzüge (links) und aller ausgewerteten Güterzüge, welche keine Wagen mit Graugussbremsen enthalten (rechts).....	26
Abbildung 3-5: Verteilung der Lokomotivtypen über alle gemessenen Züge.....	29
Abbildung 3-6: Verteilung der Wagentypen über alle gemessenen Züge, inkl. jenen mit Wagen mit Graugussbremsen.....	30
Abbildung 3-7: Flussdiagramm der Filter für die Analyse von Einzelfahrzeugen.....	31
Abbildung 3-8: Zeitliche Entwicklung der Ereignispegel von Güterwagen mit Komposit-Bremssohlen und vier Achsen an den verschiedenen Monitoringstandorten.	32
Abbildung 3-9: Verteilung der Ereignispegel verschiedener Fahrzeugtypen am Monitoringstandort Itingen (beide Gleise) im Geschwindigkeitsbereich 40 km/h – 50 km/h.	34
Abbildung 3-10: Verteilung der Ereignispegel verschiedener Fahrzeugtypen am Monitoringstandort Steinen (beide Gleise) im Geschwindigkeitsbereich 70 km/h – 80 km/h.	35
Abbildung 3-11: Verteilung der Ereignispegel verschiedener Fahrzeugtypen am Monitoringstandort Wichtrach (beide Gleise) im Geschwindigkeitsbereich 90 km/h – 100 km/h.....	36
Abbildung 4-1: Ermittelte energieäquivalente A-bewertete Dauerschalldruckpegel für das Standgeräusch von Elektrolokomotiven....	42
Abbildung 4-2: Ermittelte energieäquivalente A-bewertete Dauerschalldruckpegel für das Fahrgeräusch von Elektrolokomotiven	46
Abbildung 4-3: Ermittelte maximale AF-bewertete Schalldruckpegel für das Anfahrgeräusch von Elektrolokomotiven.....	47
Abbildung 8-1: Verteilung der gefahrenen, jeweils über die ganze Länge gemittelten Geschwindigkeiten der Züge.....	63
Abbildung 8-2: Anteil der Fahrten je Lokomotivtyp, welcher nach aussortieren der Züge mit Graugussbremsen übrigbleibt.	64
Abbildung 8-3: Anteil der Fahrten je Güterwagentyp, welcher nach aussortieren der Züge mit Graugussbremsen übrigbleibt.....	65

Abbildung 8-4: Berechnung der Hinderniswirkung, nahes Gleis, Quellenhöhe 0,0 m.....	66
Abbildung 8-5: Berechnung der Hinderniswirkung, fernes Gleis, Quellenhöhe 4.0 m.....	67

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Technische Kenndaten der Lok 2000	19
Tabelle 2-2: Gemessene Schallemissionswerte (Außen) der Lok 2000 mit Ventilationsschalldämpfer	20
Tabelle 3-1: Numerische Zusammenfassung der Analyse von ganzen Zügen.....	27
Tabelle 3-2: Zuordnung der Lokomotiven zu Typenfamilien	29
Tabelle 4-1: Grenzwerte und empfohlene Pegelhöchstwerte für das Standgeräusch einer Elektrolokomotive (Einheit).	43
Tabelle 4-2: Grenzwerte und empfohlene Pegelhöchstwerte für das Standgeräusch einer Elektrolokomotive (Hauptkompressors am nächstgelegenen Messpunkt).	43
Tabelle 4-3: Grenzwerte und empfohlene Pegelhöchstwerte für das Standgeräusch einer Elektrolokomotive (Auslassventil des Lufttrockners am nächstgelegenen Messpunkt).	44
Tabelle 4-4: Grenzwerte und empfohlene Pegelhöchstwerte für das Fahrgeräusch einer Elektrolokomotive (Bezugsgeschwindigkeit 80 km/h).	46
Tabelle 4-5: Grenzwerte und empfohlene Pegelhöchstwerte für das Anfahrgeräusch einer Elektrolokomotive.	48
Tabelle 6-1: Zusammenfassung der empfohlenen Grenzwert und Vergleich mit den Werten der TSI NOI [2] sowie Angabe der Geräuschminderung	56
Tabelle 8-1: Geometrische Dämpfung, berechnet für das nahe Gleis.	67
Tabelle 8-2: Geometrische Dämpfung, berechnet für das ferne Gleis.	67
Tabelle 8-3: Spektrale Hinderniswirkung, berechnet für das nahe Gleis.	68
Tabelle 8-4: Spektrale Hinderniswirkung, berechnet für das ferne Gleis.	69
Tabelle 8-5: Exemplarische Darstellung der Schallleistung gemäss sonRAIL Webtool für die Re 420 bei 50 km/h, Oberbautyp Betonschwelle UIC60 Schiene im Schotterbett ($\Delta L = 0$ dB).	70
Tabelle 8-6: Exemplarische Darstellung des Ereignispegels für die Re 420 bei 50 km/h, nahes Gleis ohne Hinderniswirkung.	71
Tabelle 8-7: Exemplarische Darstellung des Ereignispegels für die Re 420 bei 50 km/h, nahes Gleis mit Hinderniswirkung.	72

Tabelle 8-8: Zusammenfassung der A-bewerteten Schallleistungspegel für Lokomotiven mit bedeutenden Sekundärquellen im Dachbereich und drei Geschwindigkeiten.....	73
Tabelle 8-9: Zusammenfassung der A-bewerteten Ereignispegel im unabgeschirmten Fall für Lokomotiven mit bedeutenden Sekundärquellen im Dachbereich und drei Geschwindigkeiten.	74
Tabelle 8-10: Zusammenfassung der A-bewerteten Ereignispegel im abgeschirmten Fall für Lokomotiven mit bedeutenden Sekundärquellen im Dachbereich und drei Geschwindigkeiten.	75
Tabelle 8-11: Zusammenfassung der A-bewerteten Schallleistungspegel für Lokomotiven ohne bedeutende Sekundärquellen im Dachbereich und drei Geschwindigkeiten.....	76
Tabelle 8-12: Zusammenfassung der A-bewerteten Ereignispegel im unabgeschirmten Fall für Lokomotiven ohne bedeutende Sekundärquellen im Dachbereich und drei Geschwindigkeiten.	77
Tabelle 8-13: Zusammenfassung der A-bewerteten Ereignispegel im abgeschirmten Fall für Lokomotiven ohne bedeutende Sekundärquellen im Dachbereich und drei Geschwindigkeiten.	78

Abkürzungsverzeichnis

AC	.....	Wechselstrom
BAV	.....	Bundesamt für Verkehr
BSN	.....	Bundesverband SchienenNahverkehr e. V.
DC	.....	Gleichstrom
EKLB	.....	Eidgenössischen Kommission für Lärmbekämpfung
ERA	.....	European Union Agency for Railways
EW4	.....	Einheitswagen IV
FOS	.....	Formationservice
GG	.....	Grauguss
IAC	.....	Intelligent Air Control
IGBT	.....	insulated-gate bipolar transistor
K	.....	Komposit
LL	.....	low noise, low friction
MS	.....	Mehrsystem
RoLa	.....	Rollende Landstraße
SBB	.....	Schweizerischen Bundesbahnen
TSI NOI	.....	Technische Spezifikation für Interoperabilität „Fahrzeuge – Lärm“
TUB	.....	Technische Universität Berlin

1. Hintergrund

Nicht zuletzt wegen einer sich abzeichnenden Verschärfung der Eisenbahnlärmgrenzwerte, als Folge der Umsetzung der Empfehlungen der Eidgenössischen Kommission für Lärmbekämpfung (EKLK) [1], ist im Schienenverkehr eine weitergehende Lärmmin- derung an der Quelle notwendig. Dem Güterverkehr kommt dabei eine große Bedeu- tung zu. So ist heute nächtlicher Güterverkehr für die überwiegende Mehrzahl der Grenzwertüberschreitungen verantwortlich. Seit der erfolgreichen Rollmaterialsanie- rung hat sich der Beitrag der Güterzug-Lokomotiven zum Gesamtgeräusch noch ak- zentuiert. Die Werte gängiger Güterzuglokomotiven (z. B. die Re 475, Siemens Vect- ron) liegen deutlich oberhalb der Emissionswerte der Güterwagen mit Bremsbauarten Verbundstoff-Bremssohle und Scheibenbremse (siehe Abbildung 1-1) und heben sich somit von diesen ab. Leider ist es so, dass in den vergangenen Jahrzehnten die Güter- zug-Lokomotiven nicht leiser geworden sind. Wie aus Abbildung 1-1 entnommen wer- den kann, ist die Re 460 mit Einführungsjahr 1991 bei der Vorbeifahrt auch heute noch die mit Abstand leiseste Lokomotive. Mitverantwortlich für diese mangelnde Innovation im Bereich Lärm sind die weitgehend zahnlosen Anforderungen der Technischen Spe- zifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Fahrzeuge – Lärm“ (TSI NOI) [2].

Vor diesem Hintergrund zielt der vorliegende Bericht von Technischer Universität Ber- lin (TUB), Fachgebiet Schienenfahrzeuge und Empa (kurz für Eidgenössische Materi- alprüfungs- und Forschungsanstalt), Abteilung Akustik/ Lärmmin- derung auf die Beant- wortung folgender Fragen

- a) Welcher Anteil an den gesamten Immissionen des Güterverkehrs ist auf die Lo- komotiven zurück zu führen? Wie stark müssten die Emissionen der Lokomoti- ven gesenkt werden, um nicht mehr als bedeutsame Quelle in Erscheinung zu treten?
- b) Wie hoch ist das Lärmmin- derungspotenzial bei Güterzuglokomotiven aus tech- nischer Sicht?

Der Teil a) wurde hauptverantwortlich von Empa und der Teil b) von der TUB bearbei- tet.

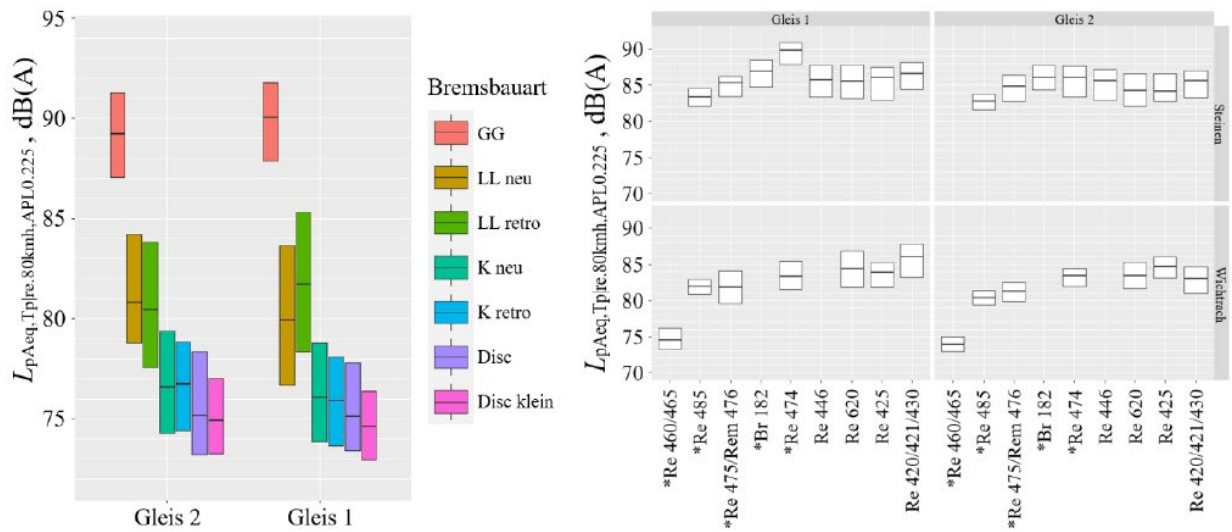


Abbildung 1-1: Vorbeifahrpegel von Güterwagen (links) und Lokomotiven (rechts) in der Schweiz – bezogen auf 80 km/h und auf ein festes Achsen-Längen-Verhältnis (aus [3, S. 18]).

2. Lärminderungspotential bei Güterzuglokomotiven

Die Ergebnisse zum Lärminderungspotential bei Güterzuglokomotiven werden nachfolgend dargestellt. Hierfür wird zunächst die Methodik erläutert (siehe Abschnitt 2.1). Dann wird eine kurze Einführung in die theoretischen Grundlagen zur Schallentstehung bei Lokomotiven gegeben (siehe Abschnitt 2.2). Es folgt eine detaillierte Betrachtung der einzelnen schalltechnisch relevanten Komponenten einer Elektrolokomotive und deren Minderungspotential (siehe Abschnitt 2.3). Zuletzt wird die Lok 2000 vorgestellt, als Beispiel für eine leise Lokomotive (siehe Abschnitt 2.4).

2.1 Methodik

Für die Untersuchung, welches Lärminderungspotential bei Güterzuglokomotiven vorliegt, wurde eine umfangreiche Recherche zu Literatur aus den vergangenen Jahrzehnten durchgeführt. Fokus war hier Literatur, die sich explizit mit Lärminderung im Anwendungsfeld Schienenfahrzeuge, idealerweise Lokomotiven, auseinandergesetzt hat. Literatur, die Lärminderung rein auf Ebene der Komponenten ohne Nennung des Anwendungsfeldes Schienenfahrzeuge thematisiert hat, wurde nicht betrachtet. Die Recherche wurde auf den folgenden Plattformen bzw. an den folgenden Orten durchgeführt:

- Google Scholar [4],
- Springer Link [5], hier insbesondere die Tagungsbücher des „International Workshop on Railway Noise“ [6–10],
- Universitätsbibliothek der Technischen Universität Berlin [11],
- Archiv der Fachzeitschrift ZEVrail [12],
- Archiv des Fachzeitschriften-Verlags DVV Media Group GmbH (Markenname: Eurailpress) [13],
- Journal of Sound and Vibration [14],
- Bibliothek des Fachgebiets Schienenfahrzeuge.

Hier wurde nach den folgenden Stichworten gesucht, je nach Plattform in Kombination oder einzeln:

- Lärm /Geräusch / Lärminderung / Noise / noise mitigation / noise reduction
- Lokomotive / Loco(motive)

- Schienenfahrzeuge / Schienenverkehr / railway / rail vehicles

Falls relevant, wurde Primärliteratur, die in der Literatur zitiert wurde und nicht über die genannten Plattformen zu finden waren, ebenfalls, sofern erhältlich, beschafft und geprüft.

Darüber hinaus wurden einige wenige informelle Fachgespräche geführt.

Es existiert bereits Literatur, die sich explizit mit den Lärminderungspotentialen an Lokomotiven beschäftigt hat. Hier ist besonders die Studie mit dem Titel „Ermittlung des Standes der Technik der Geräuschemissionen europäischer Schienenfahrzeuge und deren Lärminderungspotenzial mit Darstellung von Best-Practice-Beispielen“ von LUTZENBERGER ET AL. für das deutsche Umweltbundesamt aus dem Jahr 2013 [15] hervorzuheben. Die Ergebnisse dieser Studie werden im vorliegenden Bericht bezogen auf das Anwendungsfeld Lokomotiven wiedergegeben und um neuere Forschungs- und Entwicklungsprojekte ergänzt.

Weitere Literatur, die einen prinzipiellen Überblick zur Lärminderung an Lokomotiven gibt, sind [16–18].

2.2 Theoretische Grundlagen

Im Eisenbahnverkehr ist der Luftschall in Primär- und in Sekundärluftschall zu unterscheiden. Der Primärluftschall bezeichnet den Luftschall, der direkt vom Schienenfahrzeug bzw. von der Strecke abgestrahlt wird. Auf diesen Primärluftschall und dessen Lärminderungsmaßnahmen an Lokomotiven liegt im Folgenden der Fokus. Der Sekundärluftschall in Gebäuden als Folge von Erschütterungen durch die Zugvorbeifahrt wird nicht betrachtet (vgl. Abbildung 2-1).¹

¹ Lokomotiven können allerdings durchaus einen wesentlichen Beitrag zu den Erschütterungen haben. Untersuchungen an der auffälligen Lokomotivbaureihe Re 420 sind in [19] zu finden.

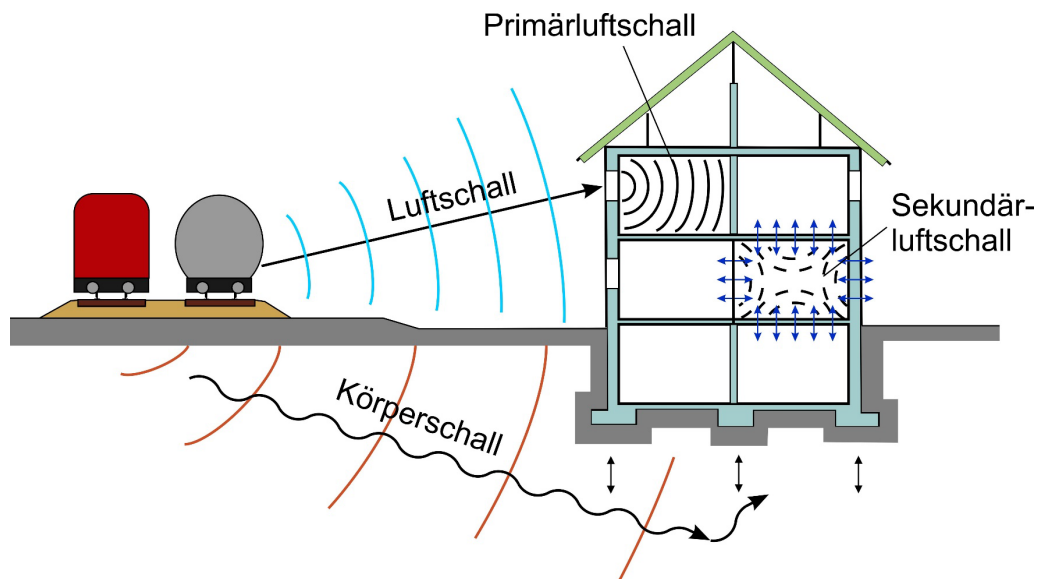


Abbildung 2-1: Vom Schienenverkehr ausgehender Körper- und Luftschall [20, S. 154].

Bei Lokomotiven wird das Gesamtgeräusch in Abhängigkeit vom Fahrzeugtyp, der Fahrzeuggeschwindigkeit und des Betriebszustandes (Stillstand, Anfahrt, Beharrung, Bremsen, Bogenfahrt, Rangieren) von verschiedenen Geräuscharten dominiert. Im Stillstand emittieren die im Betrieb befindlichen Aggregate (z. B. Lüfter, Klimaanlage, Kompressor, Transformator, Fahrmotoren im Leerlauf) Schall. Bei der Anfahrt und der Fahrt kommen die Schallquellen Fahrmotor, Getriebe und die Räder (Rollgeräusch) hinzu. Mit steigender Geschwindigkeit wird das Rollgeräusch in der Regel dominanter oder überdeckt ab circa 60 km/h die Geräusche der anderen Schallquellen. Beim Bremsen der Lokomotive kann es zudem zu einer Geräuscentstehung an den (Rad)Scheibenbremsen und, im Falle eines Betriebs im Gleichstromnetz, durch die Lüfter an den Bremswiderständen kommen. In der Abbildung 2-2 sind diese wesentlichen Schallquellen einer beispielhaften Mehrsystem-Lokomotive hervorgehoben. Auf die einzelnen Mechanismen der Geräuscentstehungen sowie Lärminderungsmöglichkeiten wird in den folgenden Abschnitten näher eingegangen.



Abbildung 2-2: Maschinenraum-Layout einer Mehrsystem-Lokomotive (AC und DC) am Beispiel einer Vectron MS (Re 475) mit hoher Leistung des Unternehmens Siemens Mobility GmbH (modifiziert aus [21, S. 8]). In der Legende des Bildes sind wesentliche Schallquellen rot umrandet und Schallquellen außerhalb des Maschinenraums ergänzt (Strichlinie: Komponenten verdeckt oder nicht dargestellt).

Die Geschwindigkeitsabhängigkeit des A-bewerteten energieäquivalenten Schalldruckpegels der Aggregate (mit Fahrmotor und Getriebe) $L_{p,Aeq,Agg.}$ wird im Allgemeinen über folgenden Zusammenhang abgeschätzt [18, 20]:

$$L_{p,Aeq,Agg.} = K_{Agg.} + 10 \cdot \lg \left(\frac{v}{v_0} \right) \text{ dB} \quad (1)$$

mit v als Fahrgeschwindigkeit, v_0 als Bezugsgeschwindigkeit (oft: 80 km/h) und $K_{Agg.}$ als fahrzeugspezifischen Kennwert für das Aggregategeräusch. Für das Rollgeräusch wird in der Regel folgende Gleichung verwendet [18, 20]:

$$L_{p,Aeq,Roll} = K_{Roll.} + 30 \cdot \lg \left(\frac{v}{v_0} \right) \text{ dB} \quad (2)$$

mit $K_{Roll.}$ als fahrzeugspezifischen Kennwert für das Rollgeräusch.

Unter Annahme der derzeit gültigen Grenzwerte gemäß TSI NOI [2] für das Standgeräusch von Lokomotiven (70 dB(A)) und für das Rollgeräusch (84 dB(A)) kann damit der in Abbildung 2-3 dargestellte Zusammenhang zwischen dem A-bewerteten energieäquivalenten Dauerschalldruckpegel der Vorbeifahrt einer Lokomotive $L_{p,Aeq}$ und deren Fahrgeschwindigkeit erhalten werden. Allerdings können auch für Geschwindigkeit, wo das Rollgeräusch dominant ist, die Geräuschemissionen der Aggregate bedeutsam sein (siehe Abbildung 2-4). Hier wird die Schallquellenintensität für die Terz

mit der Mittenfrequenz 1000 Hz einer Zugvorbeifahrt einer Lok 2000 mit einer Fahrgeschwindigkeit von 100 km/h dargestellt. Es wird deutlich, dass auch im Dachbereich auf Höhe der Lüftungsauslässe verhältnismäßig hohe Geräuschemissionen festgestellt werden können. Dies ist von besonderer Bedeutung, wenn Schallschutzwände an der Strecke vorhanden sind. Diese können zwar das Rollgeräusch erheblich reduzieren, aber je nach Höhe der Wand kann die Minderung der Geräusche von Aggregaten, deren Lüftungsauslässen am Dach sind oder die auf dem Dach positioniert sind, gering sein.

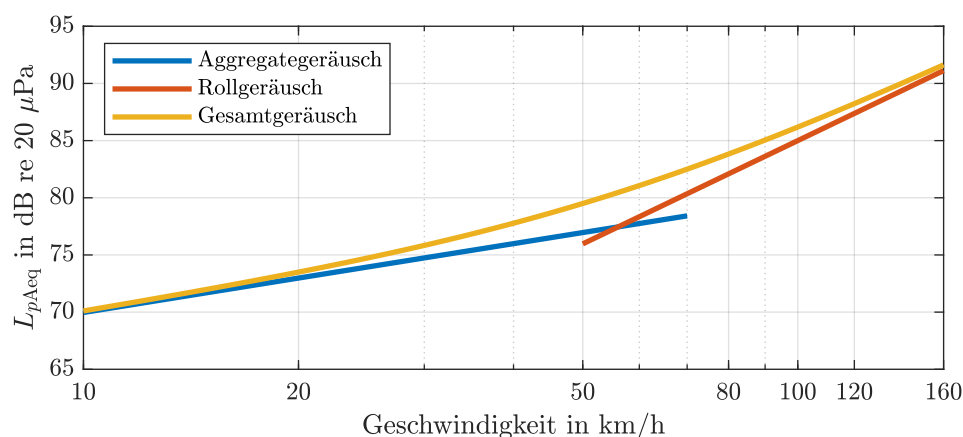


Abbildung 2-3: Exemplarischer Verlauf des A-bewerteten energieäquivalenten Dauerschall-druckpegels der Vorbeifahrt einer Lokomotive in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit.

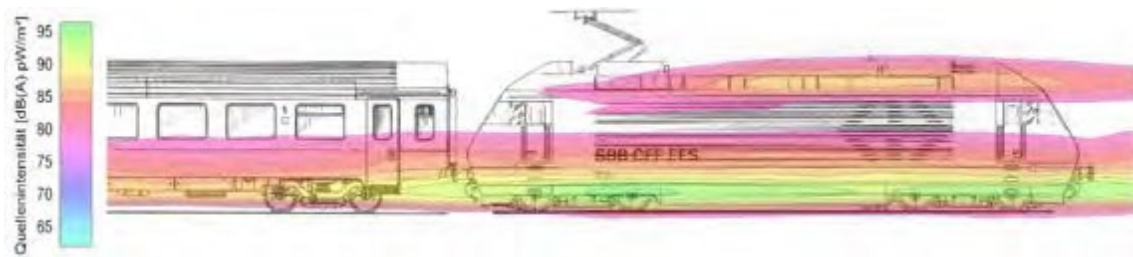


Abbildung 2-4: Verteilung der Quellenintensität in der 1000 Hz-Terz und Angabe der Gesamtschalleistung pro Quellenhöhe an einer Lok 2000 mit EWIV Wagen mit Fahrgeschwindigkeit 100 km/h (aus [22, S. 127]).

2.3 Schalltechnische Optimierungen an Lokomotiven

Im Folgenden werden für die einzelnen Komponenten, die von akustischer Relevanz für das Außengeräusch einer Lokomotive sind, betrachtet und deren Lärminderungspotential erörtert. Diese sind:

- Lüfter,

- Kompressor,
- Umrichter,
- Motor,
- Getriebe,
- Bremssystem,
- Räder.

Bei Komponenten, die nach aktuellem Stand der Technik und aus wirtschaftlicher Sicht bereits akustisch optimiert sind und dennoch eine relevante Schallquelle darstellen, können prinzipiell sekundäre Maßnahmen in Form von Schalldämmung und -absorption auf dem Ausbreitungsweg die Geräuschemissionen reduzieren. Soweit funktional möglich, kann auch eine Kapselung der Komponenten in Frage kommen. [15]

Pauschale quantitative Abschätzungen, wie viel Schalldruckpegelminderung bei den einzelnen Maßnahmen bzw. Technologien erreichbar wären, sind im Allgemeinen aufgrund der Abhängigkeit von der Fahrzeugkonstruktion nicht möglich (vgl. [15]).

2.3.1 Lüfter

Um eine Regelung der Temperatur und eine ausreichende Kühlung zu ermöglichen, werden beispielsweise an Motor und Getriebe Lüfter eingebaut.

Durch die Schaufelform der Kühlerlüfter und deren hohe Drehzahl entstehen Strömungsgeräusche, welche auch tonale Anteile enthalten können. Diese liegen vor allem im sensitiven Hörbereich von 1000 Hz bis 4000 Hz und erzeugen die am höchsten Abwerteten Intensitätspegel. [23–25]

In den Betriebszuständen Stillstand und Anfahrt/Beschleunigung sind Lüftergeräusche eine der Hauptlärmquellen der Lokomotive. Durch die hohe Einbaulage sind niedrige Schallschutzwände kein Mittel, um der Ausbreitung des Lärms entgegenzuwirken. Weiterhin ist der große Energieverbrauch ein Problem des Kühlungssystems. Um den genannten Problemen entgegenzuwirken, werden ein Diffusor integriert und eine schall- und energietechnische Optimierung der Lüftungsblätter durchgeführt. Mit diesen Maßnahmen konnte eine Pegelminderung von 6 dB und 20 % Energieeinsparung gegenüber dem konventionellen Lüfter erzielt werden. Ein erster Prototyp wurde in der Gravita 15L BB in Kombination mit einem Schalldämpfer am Kühlgitter eingebaut. [17, 26]

Als Teil des Forschungsprojektes „Leise Züge und Trassen“ von Forschungsverbund „Leiser Verkehr“ wurden 2004 vom Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP) Untersuchungen zur Minderung der Lüftungsgeräusche einer E-Lok BR-182 (EuroSprinter (ES)64U2) durchgeführt. Um einen optimalen Wirkungsgrad und somit eine erfolgreiche Geräuschreduzierung zu ermöglichen, müssen verschiedene physikalische Variablen aufeinander abgestimmt sein.

Durch den Gesamtdruckverlust und den Volumenstrom wird der Arbeitspunkt des Ventilators bestimmt. Dieser sollte dem erforderlichen Massenstrom des Lüftungssystems entsprechen, um einen optimalen Wirkungsgrad zu erzielen. Teil der Untersuchung war der Umbau eines Öl/Wasser-Kühlturms, an dem Messungen mit konstanter Ansteuerfrequenz des Ventilatormotors von 60 Hz durchgeführt wurden.

In Abbildung 2-5 ist der Aufbau und in Abbildung 2-6 das Ergebnis des A-bewerteten Oktav-Schallleistungspegels des modifizierten Kühlturms zu sehen. Es wurden folgende Maßnahmen umgesetzt:

- „Einbau von saug- und druckseitigen Schalldämpferkulissen (2 und 5 [in Abbildung 2-5]),
- Bedämpfung des Ventilatorgehäuses durch absorbierende Auskleidung (4),
- optimale Anpassung des Ventilatorarbeitspunktes an die Randbedingungen und das Lüftungssystem.
- Zusätzlich wurde saugseitig ein bedämpfter Dachaufbau (1) angebracht.“ [27]

Im eingebauten Zustand an der E-Lok BR-182 konnte eine Reduktion der A-bewerteten Schallleistung von 15 dB erreicht werden. [28]



Abbildung 2-5: Forschungsprojekt „Leise Züge und Trassen“: Skizze des modifizierten Öl/Wasser-Kühlturms (aus [27]).

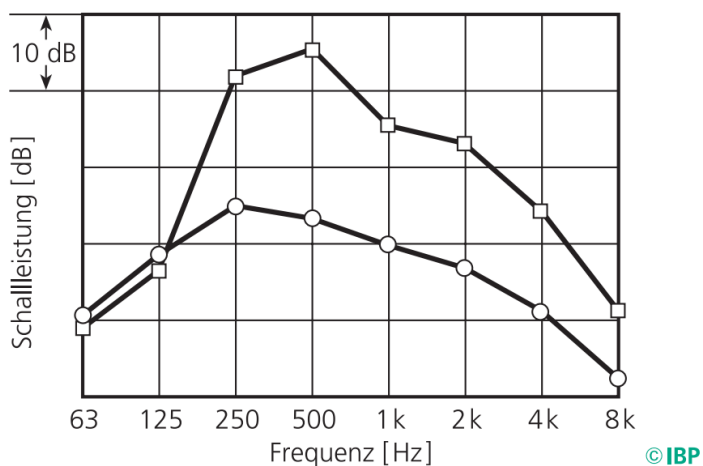


Abbildung 2-6: Forschungsprojekt „Leise Züge und Trassen“: Druckseitiger A-bewerteter Oktav-Schallleistungspegel als Funktion der Frequenz . Symbole: □ Original-Kühlturm, o modifizierter Kühlturm (aus [27]).

Bei dem Umbau der Diesellokomotive BlueTiger, wurde eine akustische Abschirmung von Lüftungsgittern durch Trichter oder Absorberjalousien erzielt, um auch hochfrequente Lüfteranteile abzuschirmen. (Nachteil der Jalousien: Erhöhung des Strömungswiderstandes durch Verringerung der effektiven Strömungsfläche um ca. 50 %) [23, S. 85]

Die Verwendung eines Eigenlüfters ist nicht zu empfehlen. Hier sind die Drehzahl und -richtung abhängig vom zu belüfteten System, wie z. B. dem Fahrmotor. Dadurch können Optimierungen an den Lüftungsblättern oder der Drehzahlregelung nicht realisiert werden. Eine Alternative stellt die Fremdbelüftung dar. Dies ist bereits Standard bei modernen Streckenlokomotiven. [29]

2.3.2 Kompressor

Für die Versorgung der Druckluftverbraucher, wie die Bremsanlage oder Stromabnehmer, stehen verschiedene Kompressoren für die Druckluftherzeugung zur Verfügung. Im Stand und bei niedrigen Fahrgeschwindigkeiten gehören Kompressor-Geräusche zu den dominierenden Schallquellen.

Im Jahr 2007 wurde die Diesellokomotive BlueTiger mit unterschiedlichen Maßnahmen lärmtechnisch optimiert. Aus dem Projekt geht hervor, dass eine beidseitige Abschirmung des Kühlerraums oder Schalldämpfer am Ansaugstutzen verwendet wurden, um die Kompressor-Geräusche zu mindern. [23, S. 84]

In Lokomotiven werden vor allem Kolbenkompressoren verbaut, die durch den Kolbenhieb Druckluft erzeugen und somit schlagende Geräusche emittieren. Dieses Problem kann durch die Verwendung von Schraubenkompressoren gelöst werden, da hier eine kontinuierliche Druckluftförderung erfolgt. Das Reduktionspotential liegt hier im Vergleich bei ca. 5 dB(A). Bei einzelnen Frequenzen sind sogar bis zu 10 dB(A) möglich. [17, S. 100]

Allerdings ist ein wesentlicher Vorteil der Kolbenkompressoren, dass diese oftmals ölfrei ausgeführt werden können, während Schraubenkompressoren in der Regel öleingespritzt sind. Damit ist der Wartungsaufwand für Kolbenkompressoren niedriger.

Eine weitere Technologie, um Geräusche von Kompressoren zu reduzieren, ist die Technologie „Intelligent Air Control (IAC)“. Ohne dieser Technologie ist nur ein situatives Ansteuern des Kolbenkompressors möglich. Es gibt in dieser Konfiguration nur zwei Betriebsmodi. „An“ und „Aus“. Die Fahrzeugsteuerung schaltet den Kompressor an, sobald der Druck im Hauptluftbehälter unter ein festgelegtes Minimum fällt. [30]

Unter Nennlast fördert er so lange Luft, bis der nötige Fülldruck wieder erreicht ist. Dadurch kommt es zu vermehrten Starts in der Stunde (30-120), die zur Lärmbelastung beitragen. Das Grundprinzip des IAC ist die Reduzierung der erforderlichen Nennleistung der verwendeten Aggregate (Downsizing) und ein Verzicht von Hilfsluftkompressoren. Dies ist nur möglich, da das System den Leistungsbedarf um ein Drittel Nennleistung reduzieren kann und die 110-V-Zugbatterie nun für die Versorgung bei einer Aufrüstung der Lok ausreicht. Bei dieser ölfreien Technologie wird die Möglichkeit der flexiblen Aktivierung der Verdichtungsstufen eines Kolbenkompressors genutzt. Die Verwendung eines Schraubenkompressors ist aus diesem Grund mit IAC nicht kompatibel. Anwohner sollen besonders in dem Betriebszustand Stillstand wie beispielsweise im Abstellbetrieb oder bei Warten vor einem Signal von der geringeren Lärmbelastung profitieren. Der Kompressor soll durch die intelligente Kompressor-Technologie möglichst nur in unbewohnten Gebieten aktiviert werden. Falls dies nicht möglich ist, sorgt IAC zusätzlich für eine geringere Geräuschemission, im Vergleich zur situativen Ansteuerung. Dies ist durch die Verringerung der Versorgungsfrequenz von beispielsweise 50 Hz auf 25 Hz möglich. Der Kompressor würde in einem sogenannten „station/night-modus“ länger laufen, aber somit die Lärmemissionen reduzieren. Zusätzlich senkt der Betreiber seine Energiekosten und die Aufrüstzeit der Fahrzeuge. Durch die genannten Punkte kann an Bauraum gespart und in bestimmten Fällen eine Pegelminderung von 9 dB(A), wie in Abbildung 2-7, realisiert werden. [30]

Der Kolbenkompressor lässt sich durch sekundäre Maßnahmen, insbesondere belüftete Kapsel und gute Körperschallisolierung auch sehr gut lärmmindern.

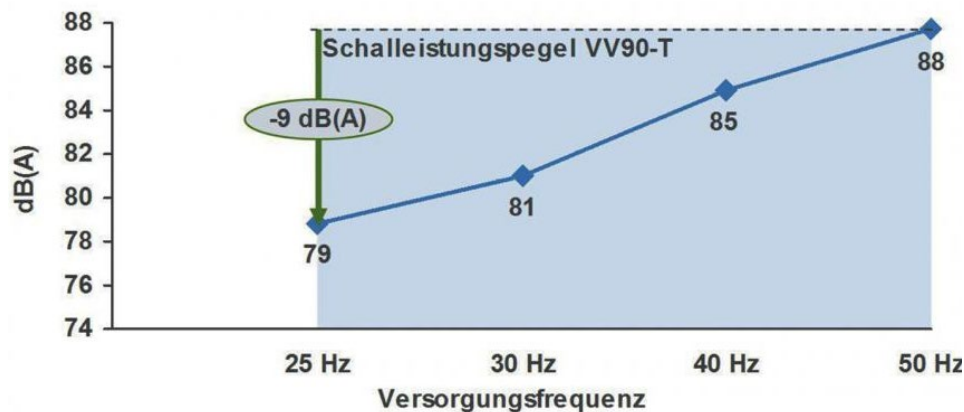


Abbildung 2-7: Intelligent Air Control: Reduzierung der Schalleistung bei Drehzahlabenkung am Beispiel des VV90-T (gemessen nach ISO 9614-2:1996 [31]) (aus [30])

2.3.3 Umrichter

Umrichter sind insbesondere im Stillstand sowie bei der Anfahrt und Bremsung sowie bei Fahrten mit geringeren Geschwindigkeiten akustisch wahrnehmbar. Die elektrische Optimierung der Pulsmuster ist eine gute Möglichkeit zur Verminderung der Tonhaltigkeit [15]. Sekundäre Schallminderungsmaßnahmen greifen besonders gut, da die heutigen Umrichter mit Bipolartransistor mit isolierter Gate-Elektrode (insulated-gate bipolar transistor (IGBT)) eher hochfrequent sind, oberhalb 800 Hz.

2.3.4 Motor

Motoren können insbesondere bei der Anfahrt und Bremsung eine dominante Schallquelle darstellen, aber auch im Stillstand sowie bei Fahrten mit geringeren Geschwindigkeiten. Hier konnten keine Forschungs- und Entwicklungsprojekte zur Lärmminde- rung bei Motoren mit Bezug zu Schienenfahrzeugen gefunden werden. LUTZENBERGER ET AL. [15] sieht als Möglichkeit die akustische Optimierung der Ansteuerung des Motors sowie die Reduzierung der Abstrahlung des Motorgehäuses.

2.3.5 Getriebe (Lagerung)

Lärmrelevante Betriebszustände sind beim Getriebe Fahrt und Beschleunigung. Grundsätzlich lassen sich die Geräuschemissionen durch Schrägverzahnung (ca. 7° Schrägverzahnungswinkel bei Bahngetriebe) und eine Verringerung des Moduls (Zahngröße der Zahnräder), sowie eine hohe Fertigungsgüte reduzieren. Ziel ist eine

hohe Eingriffsüberdeckung der Zähne, um eine möglichst geringe Schwingungsanregung zu verursachen. Im Vergleich zu einem konventionellen Getriebe können mit solchen Maßnahmen in den genannten Betriebszuständen 5 dB(A) Lärm reduziert werden. [17]

Weiterhin werden zweistufige Getriebe empfohlen (siehe Abbildung 2-8), die vor allem durch ihren geringen Bauraum vermehrt in Triebwagen verbaut sind. Dadurch stellt ein verringerter Raddurchmesser kein Problem dar. Im Vergleich zum einstufigen Getriebe liegt eine bessere Überdeckung der Zähne vor und verringert somit die tonhaltigen Zahneingriffsfrequenzen. Temperatursensoren sorgen für eine frühzeitige Erkennung von Lagerschäden und Mangelschmierung. Für eine weitere Verschleißprävention sorgen Magnetstäbe im Getriebe, die den metallischen Abrieb binden und somit ein Schmirgeln verhindern. Hohe Anforderungen an die Öldichtheit machen das Getriebe umweltfreundlicher und wartungsarm, da eine Ölnachfüllung erst nach mindestens 1 Mio. km erforderlich ist. Auch wenn die Anschaffungskosten höher als beim einstufigen Getriebe sind, kann durch die genannten Eigenschaften die Lebensdauer auf 10 Mio. km – 20 Mio. km verlängert werden.

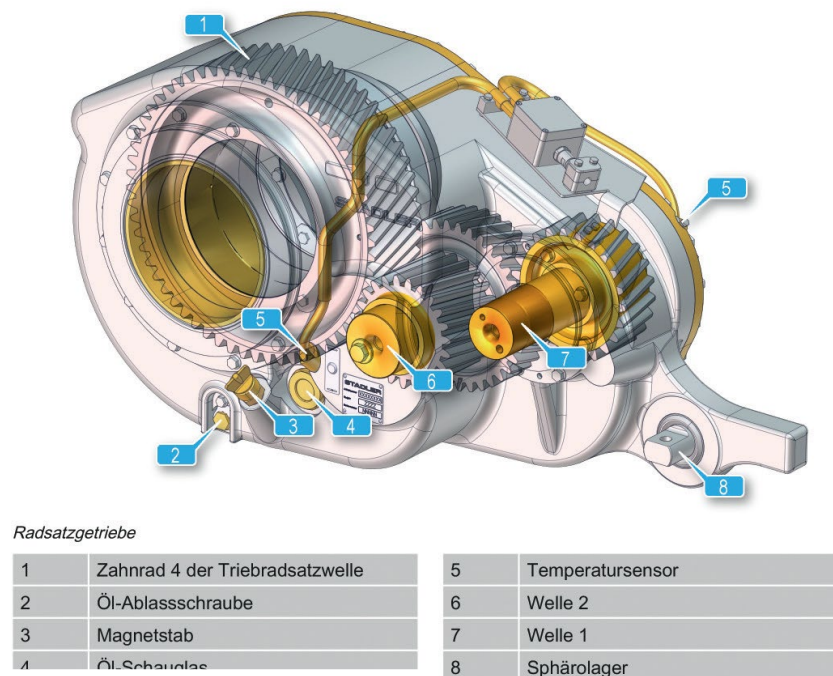


Abbildung 2-8: Zweistufiges Getriebe des Giruno (aus [29, S. 538], Quelle: Stadler)

Die heute zu beobachtende Tendenz zum achsreitenden Getriebe (siehe Abbildung 2-9) führt zu einer direkten Körperschallkopplung zum Radsatz und zum Gleis. Das bedeutet, dass der Motor im Drehgestellrahmen gelagert wird und das Ritzel des Getriebes über eine Kupplung, die nur Drehmoment überträgt, aber alle anderen Freiheitsgrade frei gibt, angetrieben wird. Sie ist durch die viele Jahre stabile Grenzwertsetzung für Anfahr- und Rollgeräusche der TSI NOI [2] bedingt.

Deutliche Reduktionen im Antriebs- und Rollgeräusch von Lokomotiven werden nur mit einer Änderung dieses sehr kostengünstigen Antriebs möglich sein.

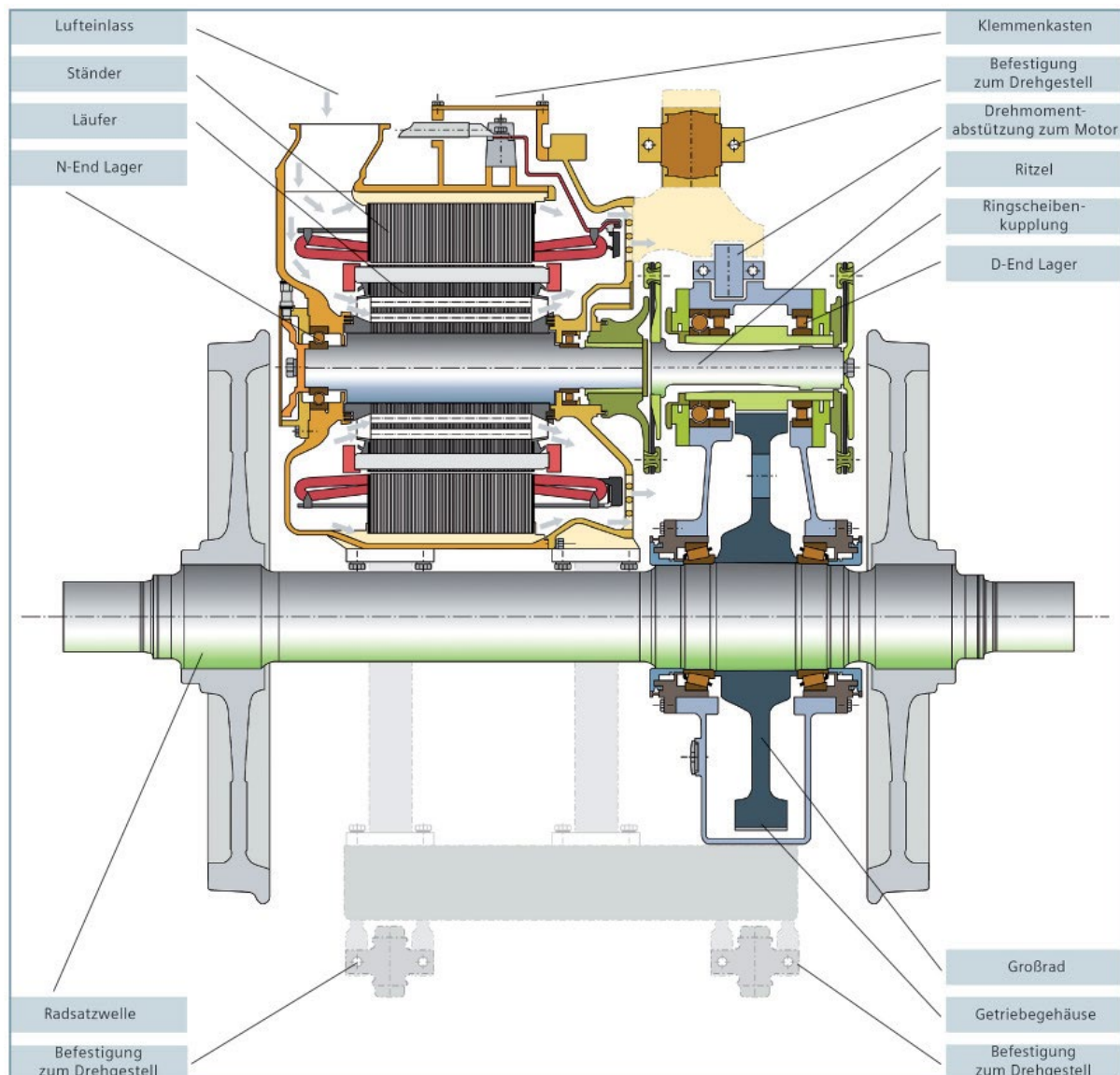


Abbildung 2-9: Vectron (Re 475) Treibradsatz, Schnittbild; Raddurchmesser neu 1250 mm, Anfahrzugkraft je Treibradsatz 75 kN, Achsabstand 3000 mm (aus [29, S. 536], Quelle Siemens Transportation)

2.3.6 Bremssystem

Das Bremssystem sollte in (Rad)Scheibenbremsen ausgeführt werden. Zudem sollte ein Gleitschutz vorhanden sein. Dies ist bereits Standard bei modernen Streckenlokomotiven. Weiteres Optimierungspotential ist nicht bekannt.

2.3.7 Rad

Ein wesentlicher Eingriffspunkt ist die Verringerung des Raddurchmessers. Der Einsatz kleinere Räder resultiert im Allgemeinen in geringeren Schallemissionen, da die abstrahlende Fläche reduziert ist. Vierachsige Lokomotiven haben heute im Allgemeinen Raddurchmesser von 1250 mm, wodurch viel Raum für den Antrieb freigelassen wird. Leise und sechsachsige Loks mit Co'Co'-Drehgestellen benötigen hingegen kleinere Räder und sind mit Rädern mit einem Durchmesser von 1100 mm ausgestattet. Auch die Lok 2000 mit ihrem verhältnismäßigem niedrigen Rollgeräusch hat mit einem Raddurchmesser von 1100 mm kleinere Räder als Lokomotiven neuerer Bauart (siehe Abschnitt 2.4). Zusätzlich ist aber auch zu erwägen, die bei Triebwagenachsen üblichen 920 mm-Räder zur Lärminderung zu verwenden.

Neben der Reduzierung des Raddurchmessers ist die Nutzung von akustisch optimierten Radgeometrien denkbar. Die Räder sollten mit einem geraden, ebenen Steg gestaltet sein. Im Shift2Rail-Projekt PIVOT wurden zudem neuartige Radgeometrien bestehend aus 26 Speichen verteilt auf zwei Radstege untersucht, die bei einem Metrofahrzeug zum Einsatz kommen könnten (siehe Abbildung 2-10) [32]. Es ist davon auszugehen, dass diese Radgeometrie weniger Schall emittiert, da die strahlende Fläche erheblich reduziert ist. Diese Technologie ist allerdings noch nicht im praktischen Test bei Lokomotiven.

Neben den Möglichkeiten die Radgeometrie bzw. den Raddurchmesser zu verändern, könnte auch das Einbringen von Dämpfung beispielsweise durch Radschallabsorber eine wirksame Lärminderungsmaßnahme sein. Diese kommen derzeit bei Lokomotiven kaum zum Einsatz, da bereits mit dem Einsatz von Radscheibenbremsen die Abstrahlung des Rades reduziert wird [17]. Bei der Lok 2000 sind Radschallabsorber verbaut, diese verfügt jedoch über Klotzbremsen als mechanisches Bremssystem [33].

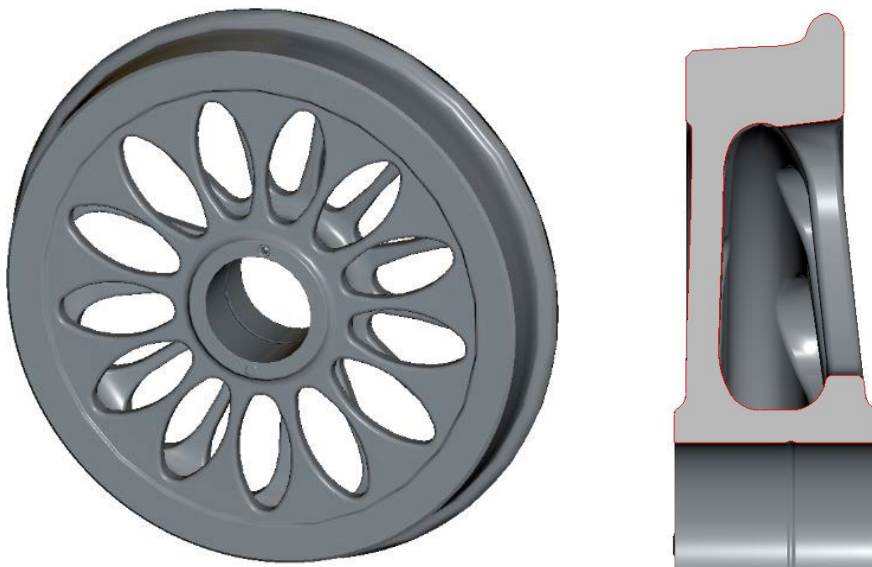


Abbildung 2-10: Shift2Rail-Projekt PIVOT: Neuartige Radgeometrie (aus [32, S. 23])

Eine weitere Maßnahme gegen die Ausbreitung von Geräuschen aus dem Bereich des Drehgestells ist der Einbau von Schallschürzen. Diese gelten insbesondere in Kombination mit niedrigen Schallschutzwänden als besonders effektiv [17]. Im Shift2Rail-Projekt DYNAREIGHT wurden an der sechsachsigen Lokomotive EURODUAL Schallschürzen angebracht (siehe Abbildung 2-11), die eine Reduktion des Rollgeräuschs zwischen 1 dB bis 4 dB erzielten. [34]



Abbildung 2-11: Shift2Rail-Projekt DYNAREIGHT: Sechssachsige Lokomotive mit Schallschürzen. (aus [34, S. 19])

LUTZENBERGER ET AL. empfehlen in ihrer Studie zu Lärminderungsmaßnahmen an Schienenfahrzeugen aus dem Jahr 2013, dass für das Fahrgeräusch von Elektrolokomotiven „schallmindernde Maßnahmen systematisch untersucht werden [sollten], um die Basis für in Zukunft leisere Fahrzeuge zu schaffen.“ [15, S. 112] Seitdem ist solch eine systematische Untersuchung jedoch nicht erfolgt.

2.4 Lok 2000 – die leise Lokomotive

Die zwischen 1985 bis 1991 von der Schweizerische Lokomotiv- und Maschinenfabrik (SLM) und Asea Brown Boveri (ABB) entwickelte Lok 2000 (Re 460) (Kenndaten in Tabelle 2-1) hat mit ihrem Lärmdesign eine Vorreiterrolle inne und weist von den in der Schweiz verkehrenden Streckenlokomotiven weiterhin die niedrigsten Schallemissionen in der Vorbeifahrt auf (vgl. Abbildung 1-1 in Kapitel 1). Aber nicht nur im Betriebszustand Vorbeifahrt sondern auch in den weiteren für die Zulassung relevanten Betriebszuständen Stand und Anfahrt liegen die gemessenen Schallemissionen deutlich unterhalb der derzeitig gültigen TSI NOI Grenzwerte (siehe Kapitel 4). In der Tabelle 2-2 sind die gemessenen Schallemissionswerte der Lok 2000 für verschiedene Betriebszustände zusammengefasst. Je nach Betriebszustand erfolgte die Auswertung des maximalen AF-bewerteten Schalldruckpegel L_{pAFmax} oder des energieäquivalenten A-bewerteten Dauerschalldruckpegel L_{pAeq} . Ein ausführlicher Vergleich mit den derzeitig gültigen Grenzwerten erfolgt in Kapitel Empfehlungen für Schallemissionsgrenzwerte.

Tabelle 2-1: Technische Kenndaten der Lok 2000

Max. Leistung am Rad	5.88 MW bis 7 MW
Max. Geschwindigkeit	200 km/h bis 230 km/h
Max. Zugkraft	275 kN bis 300 kN
Lokmasse	82 t bis 84 t
Stromsystem	15 kV, 16 2/3 Hz 25 kV, 50 Hz
Spurweiten	1435 mm und 1524 mm
Raddurchmesser	1100 mm bis 1125 mm
Radsätze	Radial einstellend

Tabelle 2-2: Gemessene Schallemissionswerte (Außen) der Lok 2000 mit Ventilationsschalldämpfer (aus [33]). Messort ist 7,5 m quer zur Gleismitte in 1,2 m Höhe über Schienenoberkante.

Betriebszustand	Schalldruckpegel
Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit (80 km/h)	$L_{pAFmax} = 79 \text{ dB(A)}$
Anfahrt	$L_{pAFmax} = 75 \text{ bis } 78 \text{ dB(A)}$
Stillstand	
Maximale Ventilation	$L_{pAeq} = 74 \text{ dB(A)}$
Minimale Ventilation	$L_{pAeq} = 56 \text{ dB(A)}$
Minimale Ventilation und Kompressor	$L_{pAeq} = 62 \text{ dB(A)}$

Die Besonderheit der Lok 2000 ist die tiefgehende Entwicklung lärmindernder Technologien. Durch den Einsatz eines Absorptionsschalldämpfer in der Ventilationsanlage konnte eine erheblich Schallreduzierung von 10 dB(A) im Stillstand für die maximale Ventilation erzielt werden (siehe auch [35]). Des Weiteren wurde beim Getriebe sowohl der Zahneingriff als auch das Gehäuse so optimiert, dass die Schallemissionen deutlich reduziert werden konnten. Durch die radialeinstellenden Radsätze mit schalloptimierten Rädern in Form eines ebenen geraden Stegs sowie teils eingesetzte Rad-schallabsorber konnte neben einem niedrigen Rollgeräusch auch ein niedriges Kurvengeräusch erzielt werden. [33]

3. Auswertung der Pegelschriebe der Bahnlärm-Monitoringstationen des BAV

Für die Auswertung der Pegelschriebe der Bahnlärm-Monitoringstationen des Bundesamts für Verkehr (BAV) wird zunächst die Datengrundlage dargelegt (Abschnitt 3.1). Dann erfolgt die Gegenüberstellung der Schallemissionen von Lokomotiven und Wagen im selben Zug (Abschnitt 3.2) sowie ein Vergleich der Ereignispegel einzelner Fahrzeuge (Abschnitt 3.3). Zuletzt wird die Ausbreitung hinter Schallschutzwänden betrachtet (Abschnitt 3.4).

3.1 Datengrundlagen

Die in diesem Kapitel 3 gezeigten Analysen basieren auf der Auswertung der Bahnlärm-Monitoringstationen des BAV, welche im Rahmen des Projekts MineTrack durchgeführt wurde. Als Grundlagen dienten im Projekt MineTrack die Pegelschriebe der sechs Monitoringstationen des BAV (siehe Abbildung 3-1), welche für einen Zeitraum von 52 Monaten zwischen März 2016 und Juni 2020 zur Verfügung standen. Diese Pegelschriebe wurden mit Daten zu den Zugkompositionen verknüpft, welche von den Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) auf Basis der Rollmaterial-Datenbank Formationsservice (FOS) im Auftrag der Empa zusammengestellt worden waren. Zusätzlich wurde durch Abrufen der Silent Wagon Database [36] der zum Zeitpunkt der Durchfahrt aktuelle Bremstyp der Güterwagen bestimmt.

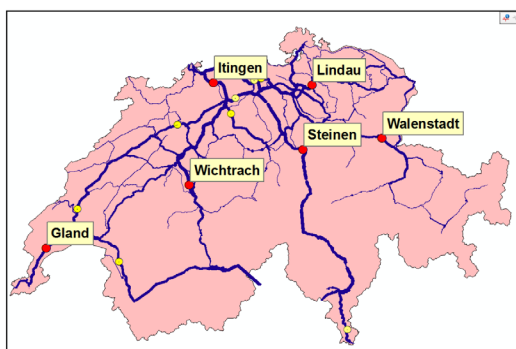


Abbildung 3-1: Standorte der stationären Monitoringstationen (rote Punkte) (aus [37, S. 6])

Die Zuordnung der Fahrzeuge zu den Pegelschrieben der Stationen erfolgte anhand der Signale der dort vorhandenen Achssensoren. Basierend auf der so erhaltenen

fahrzeugscharfen Zuordnung der Pegelschriebe zur jeweiligen Zugkomposition können sowohl Aussagen zu Einzelfahrzeugen sowie zu ganzen Zugvorbeifahrten gemacht werden. In den folgenden Kapiteln sind die zusätzlichen Auswertungen dokumentiert, welche für das vorliegende Projekt basierend auf den Daten von MineTrack durchgeführt wurden.

3.2 Gegenüberstellung von Lokomotiven und Wagen im selben Zug

Eine Herausforderung für die Vergleichbarkeit der Messungen besteht in den Standorten, welche unterschiedliche Schienenrauheiten, Ausbreitungscharakteristiken und Verteilungen der gefahrenen Geschwindigkeiten aufweisen. Dies erschwert eine Angabe absoluter Schallpegel für Lokomotiven und Wagen, welche dann für unterschiedliche Zugformationen hochgerechnet werden könnten. Stattdessen wurde deshalb auf eine Analyse der Pegelschriebe realer Durchfahrten von Güterzügen zurückgegriffen, wobei die Emissionen von Lokomotiven und Wagen im selben Zug gegenübergestellt wurden. Vorgehen und Resultate werden in den nächsten Abschnitten beschrieben.

3.2.1 Analysestrategie

Um eine Aussage zur Bedeutung der Lokomotiven für den Gesamtereignispegel einer Zugfahrt zu treffen, wurden die Pegelschriebe von Güterzügen neu ausgewertet. Dabei wurde der Ereignispegel und der Maximalpegel (mit der Zeitkonstante FAST) für den Lokomotivteil sowie für den Wagenteil des Zuges bestimmt. Die Integrationsgrenzen sind in Abbildung 3-2 dargestellt. Die Pegelschriebe liegen in einer zeitlichen Auflösung von 0.125 s vor. Datenpunkte, welche nicht eindeutig der Lokomotive oder dem Wagenteil zugeordnet werden können, da der Übergang zwischen Lokomotive und Wagen innerhalb des entsprechenden Zeitfensters liegt, wurden für die Auswertung der Mittelungspegel anteilmäßig zur Vorbeifahrtszeit auf die beiden Anteile aufgeteilt. Befand sich der Maximalpegel im Datenpunkt beim Übergang von Lokomotiv- zu Wagenteil, so wurden beiden Anteilen der gleiche Maximalpegel zugeordnet.

Als Güterzug wurden sämtliche Züge gezählt, in welchen mindestens ein Güterwagen vorhanden ist. Es wurden nur Züge gewählt, bei welchen die Lokomotive(n) in einer geschlossenen Gruppe an vorderster Stelle stehen. Damit eine Aussage zum realen

Güterverkehr getroffen werden kann, wurden alle Monitoringstandorte und alle Geschwindigkeiten berücksichtigt. Als einziges Ausschlusskriterium sind die im Bericht zum Projekt MineTrack beschriebenen Filter zur Verbesserung der Datenqualität zu nennen.

Die Verteilung der Geschwindigkeiten ist in Anhang 8.1 genauer dargelegt. Der größte Teil der Fahrten fand zwischen 70 km/h und 80 km/h, sowie zwischen 90 km/h und 100 km/h statt, was für Güterzüge üblich ist. Die Höchstgeschwindigkeit beträgt 120 km/h, wobei Postzüge mit bis zu 140 km/h eine Ausnahme bilden.

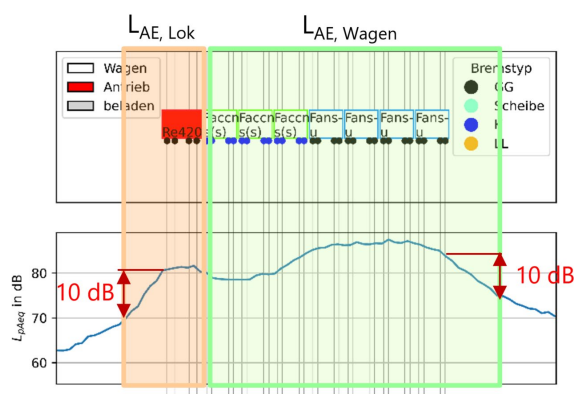


Abbildung 3-2: Schematische Darstellung des Integrationsbereichs für den Ereignispegel der Lokomotive(n) sowie den Ereignispegel der Wagen.

3.2.2 Güterwagen mit Graugussbremsen

Güterwagen mit Graugussbremsen erzeugen aufgrund der hohen Rauheit der Radlauflächen im Vergleich zu anderen Bremsbauarten besonders hohe Schallemissionen [22, 38]. Seit 2020 sind solche Wagen in Güterzügen, welche in der Schweiz verkehren, verboten. Die diesem Bericht zugrundeliegenden Pegelschriebe der Monitoringstationen stammen jedoch aus den Jahren 2016 bis 2020 und enthalten deshalb noch Wagen mit Graugussbremsen. Um eine Aussage über den Emissionsanteil der Lokomotiven zum jetzigen Zeitpunkt zu treffen, sollten solche Wagen nicht berücksichtigt werden.

Den Untersuchungen in diesem Abschnitt 3.2 liegen nach Berücksichtigung des in Abschnitt 3.2.1 beschriebenen Auswahlverfahrens rund 169'000 Fahrten von Güterzügen zugrunde. Diese werden in zwei Kategorien unterteilt: Die erste enthält alle Züge, die zweite nur solche, in denen kein Wagen mit Graugussbremsen vorhanden war. Der

Bremstyp der Wagen zur Zeit der Vorbeifahrt wurde im Rahmen des Projekts MineTrack anhand der Angaben in der Silent Wagon Database bestimmt. Bei fehlenden Angaben zum Bremstyp wurde von Graugussbremsen ausgegangen. Durch dieses restriktive Kriterium verkleinert sich die Gruppe von Zügen, welche keine Wagen mit Graugussbremsen enthalten, auf rund 56'000.

Das Ausschließen von Wagen mit Graugussbremsen führt zu einer veränderten Geschwindigkeitsverteilung und Zusammensetzung der Züge. Zum einen enthielten gewisse Zuggattungen häufiger Wagen mit Graugussbremsen. Zum andern ist die Wahrscheinlichkeit, dass Angaben zum Bremstyp fehlen, nicht bei allen Wagenarten gleich hoch. Trotzdem ist die Gruppe von Zügen ohne Graugussbremsen nach wie vor repräsentativ für den Güterverkehr, wie eine nähere Betrachtung (siehe Anhang 8.1) ergeben hat.

3.2.3 Verteilung der Ereignis- und Maximalpegel

Abbildung 3-3 zeigt die Gegenüberstellung des Ereignispegels des Lokomotivteils eines Zuges zum Wagenteil desselben Zuges. Der Schwerpunkt der Verteilung der Ereignispegel liegt bei Lokomotiven um ungefähr 10 dB(A) tiefer als bei Wagen im selben Zug. Dies ist auch bei Zügen der Fall, welche keine Wagen mit Graugussbremsen enthalten. Die Verteilung verschiebt sich durch das Ausschlusskriterium jedoch zuungunsten des Lokomotivteils der Züge. Die Ereignispegel des Wagenteils streuen im Allgemeinen weiter als die des Lokomotivteils, was daran liegt, dass generell die Anzahl der Wagen in einem Zug variabler als die Anzahl der Lokomotiven ist.

Die Ausreißer nach oben beim Ereignispegel der Lokomotive (Ordinatenachse) sind vermutlich auf Schlupf zurückzuführen, denn sie stammen alle von beschleunigenden Zügen und weisen einen spektralen Schwerpunkt um 4 kHz auf, wie weitere Untersuchungen ergeben haben.

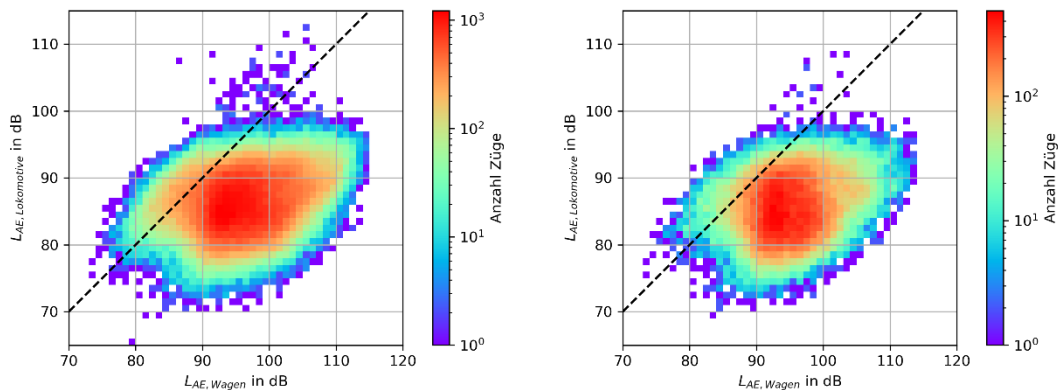


Abbildung 3-3: Histogramme der Ereignispegel von Lokomotiven (y-Achse) und Wagen (x-Achse) aller ausgewerteten Güterzüge (links) und aller ausgewerteten Güterzüge, welche keine Wagen mit Graugussbremsen enthalten (rechts). Je höher die Farbe eines Quadrats auf der logarithmischen Farbskala liegt, desto mehr Fahrten wurden in diesem Bereich registriert. Bei Fahrten oberhalb der Diagonale liegt der Ereignispegel der Lokomotive höher als der Ereignispegel der Wagen.

Neben dem Ereignispegel, welcher für die Einhaltung der Lärmschutzvorschriften ausschlaggebend ist, ist auch der Maximalpegel ein wichtiges Maß, da er insbesondere in der Nacht in einem starken Zusammenhang mit den Aufwachreaktionen steht und deshalb als Indikator für die Störung des Schlafes verwendet werden kann. Entsprechend sind in Abbildung 3-4 Maximalpegel des Lokomotivteils dem Maximalpegel des Wagenteils gegenübergestellt.

Die Verteilung der Maximalpegel richtet sich stark an der Diagonalen aus, was bedeutet, dass der Unterschied zwischen Maximalpegel des Wagen- und Lokomotivteils oft gering ist. Im Vergleich zu den Ereignispegeln liegt der Anteil der Züge, bei welchen der Maximalpegel des Lokomotivteils höher als der des Wagenteils liegt, bedeutend höher.

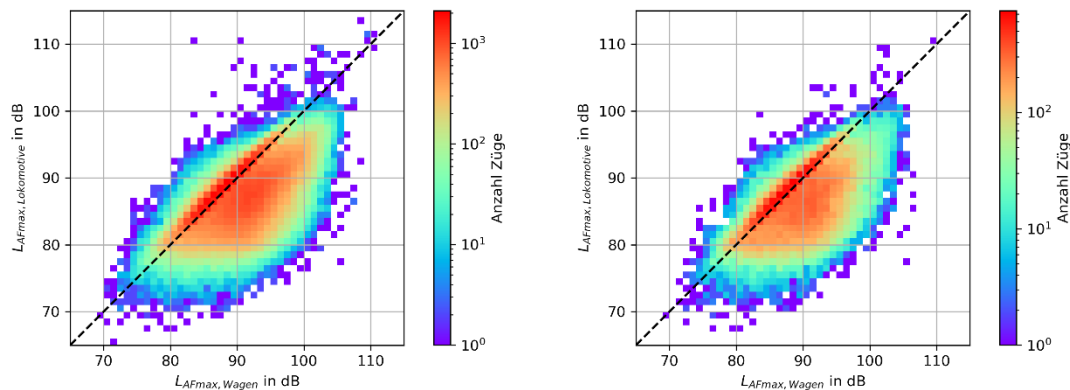


Abbildung 3-4: Histogramme der Maximalpegel von Lokomotiven (y-Achse) und Wagen (x-Achse) aller ausgewerteten Güterzüge (links) und aller ausgewerteten Güterzüge, welche keine Wagen mit Graugussbremsen enthalten (rechts). Je höher die Farbe eines Quadrats auf der logarithmischen Farbskala liegt, desto mehr Fahrten wurden in diesem Bereich registriert. Bei Fahrten oberhalb der Diagonale liegt der Maximalpegel der Lokomotive höher als der Maximalpegel der Wagen.

Tabelle 3-1 zeigt die mittleren Ereignispegel aus den vorhergehenden Verteilungen in Abschnitt 3.2.3. Wie zu erwarten ist, sinkt der mittlere Ereignispegel der Güterwagen durch das Aussortieren von Zügen mit Graugussbremsen. Der Unterschied fällt mit 1,5 dB(A) aber gering aus, denn Güterwagen mit Kompositbremsen erzeugen in der Regel um 10 dB(A) tiefere Schallimmissionen auf als solche, die Graugussbremsen haben [22, 37, 38]. Dies liegt daran, dass auch in der ersten Gruppe von Güterzügen eine Mehrheit der Wagen nicht mit Graugussbremsen ausgestattet waren, denn Züge wurden in der zweiten Gruppe auch dann aussortiert, wenn nur ein Wagen im Zug Graugussbremsen haben könnte. Der Rückgang des mittleren Ereignispegels der Lokomotiven ist wohl auf kleine Unterschiede in der Zusammensetzung der Züge zurückzuführen, welche durch das Aussortieren der Züge mit Wagen mit Graugussbremsen entstanden (siehe dazu Anhang 8.1).

Der Anteil der Züge, bei welchen der Lokomotivteil eine bedeutende Quelle ist, liegt bei Zügen ohne Graugussbremsen bei 51,4 % bzw. rund der Hälfte. Bedeutend drückt dabei aus, dass die Differenz zwischen dem Ereignispegel des Lokomotivteils und dem des gesamten Zuges unter 10 dB(A) liegt. Diese Grenze wurde gewählt, da eine um 10 dB leisere Lokomotive weniger als 0,5 dB zum Gesamtpegel beiträgt und deshalb

weitgehend vernachlässigt werden kann. Der Anteil der Züge, bei welchen der Lokomotivteil die dominante Quelle ist, liegt bei den selben Zügen bei 5,5 %. Eine dominante Quelle steuert mehr als die Hälfte der Schallenergie eines Ereignisses bei, was bedeutet, dass die Differenz des Ereignispegels des Lokomotivteils weniger als 3 dB(A) unter dem Ereignispegel des gesamten Zuges liegt. Bei 33,4 % bzw. rund einem Drittel aller Züge ohne Graugussbremsen erzeugt die Lokomotive zudem den Maximalpegel.

Tabelle 3-1: Numerische Zusammenfassung der Analyse von ganzen Zügen. Schalldruckpegel sind energetisch gemittelt.

¹ Der Ereignispegel der Lokomotive liegt weniger als 10 dB(A) unter dem des Gesamtzuges

² Der Ereignispegel der Lokomotive liegt weniger als 3 dB(A) unter dem des Gesamtzuges

	Alle Güterzüge	Güterzüge ohne Graugussbremsen
Durchschnittlicher Ereignispegel pro Lokomotive	87,0 dB(A)	86,7 dB(A)
Durchschnittlicher Ereignispegel pro Wagen	87,3 dB(A)	85,8 dB(A)
Lokomotiven sind bedeutende Quelle ¹	48,0 %	51,4 %
Lokomotiven sind dominante Quelle ²	6,5 %	5,5 %
Lokomotiven erzeugen Maximalpegel	30,5 %	33,4 %

3.2.4 Hochrechnung auf durchschnittlichen Güterzug

Der durchschnittliche Zug ohne Wagen mit Graugussbremsen besteht aus 16,69 Wagen und 1,25 Lokomotiven. Durch die verschiedenen Auswahlverfahren, insbesondere der Bedingung, dass die Bremsarten aller Wagen des Zuges bekannt sein müssen, entspricht dieser jedoch über alle Monitoringstandorte gesehen nicht mehr unbedingt dem durchschnittlichen Güterzug. Des Weiteren gibt es Züge, welche nur aus Lokomotiven bestehen. Die Einschätzung der Bedeutung der Lokomotive auf den Gesamtereignispegel sollte solche Fahrten auch miteinbeziehen, da diese auch dem Güterverkehr dienen. Betrachtet man die gesamten Betriebsdaten, ohne auf deren akustische Auswertbarkeit Rücksicht zu nehmen, sowie unter Miteinbezug von reinen Lokomotivzügen, so besteht der durchschnittliche Güterzug aus 16,22 Wagen und 1,33 Lokomotiven. Dieser Durchschnitt basiert auf insgesamt rund 665'000 Fahrten in den Verkehrsdaten der SBB und beinhaltet auch Zeiträume, für welche keine Pegel-

schriebe vorliegen und Züge, welche keinem Pegelschrieb zugeordnet werden konnten. Unter Verwendung der in Tabelle 3-1 dargestellten Durchschnittsereignispegel für Lokomotiven und Wagen, sowie unter der Annahme, dass in Zukunft nur noch Wagen ohne Graugussbremsen zum Einsatz kommen, beträgt der durchschnittliche Ereignispegel eines Zuges 98,3 dB(A), wobei 97,9 dB(A) auf die Wagen und 87,9 dB(A) auf die Lokomotiven zurückzuführen sind. Der Ereignispegel des Lokomotivanteils eines durchschnittlichen Güterzugs würde also um 10,0 dB(A) unter dem Ereignispegel des Wagenanteils liegen, und damit an der Grenze zur Einordnung als bedeutende Quelle der Schallemissionen liegen.

3.3 Vergleich des Ereignispegels einzelner Fahrzeuge

Aus dem Projekt MineTrack ist eine Datenbank mit Vorbeifahrtspegeln einzelner Fahrzeuge vorhanden. Ziel dieses Abschnittes ist es, diese Daten zu nutzen, um Aussagen bezüglich des Emissionsverhaltens verschiedener Loktypen sowie zum Vergleich zwischen Lokomotiven und Güterwagen zu treffen.

3.3.1 Häufigkeit der Fahrzeugtypen

Um die relevanten Fahrzeugtypen einzugrenzen wurden die in Abschnitt 3.2 analysierten Züge auf ihre Zusammensetzung hin untersucht. Dabei wurden auch Züge berücksichtigt, welche Wagen mit Graugussbremsen beinhalten. Diese Wagen sind zwar inzwischen lärmsaniert oder durch neue ersetzt worden, aber die Häufigkeit der Wagentypen dürfte sich dadurch nicht verändert haben. Die in diesem Abschnitt gezeigten Häufigkeiten der Fahrzeugtypen sind natürlich nur für den Bahnbetrieb an den Monitoringstationen repräsentativ.

Abbildung 3-5 zeigt die Verteilung der Lokomotivtypen. Diese können weiter zu Typenfamilien zusammengefasst werden, welche in Tabelle 3-2 aufgelistet sind. Die Aufteilung wurde nach Herstellerbezeichnung vorgenommen, oder auf technische Gemeinsamkeiten abgestützt (Die Re430 ist baugleich mit der Re420, aber weist ein anderes Übersetzungsverhältnis auf). Die Lokomotivtypen Re420, Re425, Re430 und Re620 machen zusammen 56 % aller Fahrten von Lokomotiven aus. Es handelt sich dabei um Lokomotiven mit vier bzw. sechs (Re620) Achsen, welche teilweise schon über 50 Jahre in Betrieb sind. Sie verfügen über graugussgebremste Speichenräder und Wechselstrommotoren. Lokomotiven des Typs Re465 sind zwar mit unter 5 % unter

den Güterlokomotiven wenig vertreten, gehören aber zur selben Typenfamilie wie die Re460 ("Lok 2000"), welche oft vor Personenzügen eingesetzt werden. Diese Lokomotiven verfügen über Drehstrommotoren und Bremsen mit Sintermetallsohlen. Die restlichen Lokomotivtypen verfügen über Drehstrommotoren und Scheibenbremsen. Von ihnen ist die Typenfamilie Bombardier TRAXX F140 mit 25 % am häufigsten vertreten.

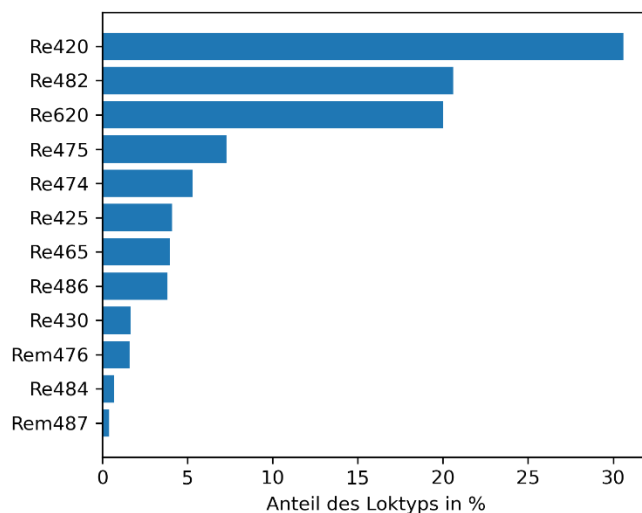


Abbildung 3-5: Verteilung der Lokomotivtypen über alle gemessenen Züge.

Tabelle 3-2: Zuordnung der Lokomotiven zu Typenfamilien

Typenfamilie	Lokomotiven
Re425	Re425
Re620	Re630
Re420 / Re430	Re420, Re430
Lok 2000	Re460, Re465
TRAXX F140	Re482, Re484, Re485, Re486
TRAXX F160	Rem487
EuroSprinter	Re474
Vectron	Re475, Rem476

Abbildung 3-6 zeigt die Verteilung der Güterwagen. In den Betriebsdaten sind diese nach Anzahl Achsen und Drehgestellen gruppiert. Wagen mit vier Achsen und zwei Drehgestellen machen rund 51 % aller Fahrten aus. Danach folgen zweiachsige Güterwagen ohne Drehgestelle mit 21 % und Güterwagen mit sechs Achsen und drei

Drehgestellen (davon ist eines ein Jakobsdrehgestell) mit 16 % der Fahrten. Des Weiteren machen Wagen der Rollenden Landstraße mit zwei Drehgestellen, welche jeweils vier Achsen aufweisen 6 % aller Fahrten aus. Die übrigen Wagentypen sind seltenere Bauformen, und machen zusammen unter 7 % der Fahrten aus.

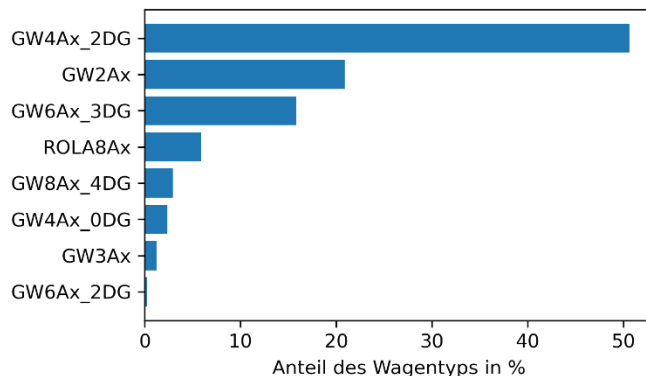


Abbildung 3-6: Verteilung der Wagentypen über alle gemessenen Züge, inkl. jenen mit Wagen mit Graugussbremsen. GW = Güterwagen, Ax = Achsen, DG = Drehgestelle, ROLA = Rollende Landstraße.

3.3.2 Analysestrategie

Die Ereignispegel für die Vorbeifahrten einzelner Fahrzeuge wurden aus der Datenbank des Projekts MineTrack übernommen. Die Auswertung folgte dort den Vorgaben der Norm ISO 3095:2013 [39]. Ereignispegel für Lokomotiven wurden also über die Länge eines Fahrzeugs integriert, während Ereignispegel für Güterwagen von Wagenmitte zu Wagenmitte zweier Wagen des gleichen Typs integriert wurden.

Abbildung 3-7 zeigt das Auswahlverfahren gültiger Vorbeifahrten, welches zum Einsatz kam. Die Bedingung der akustischen Neutralität ist ein Pegelkriterium zum einschätzen des Einflusses der Nachbarfahrzeuge und wurde aus ISO 3095:2013 übernommen. Eine Bedingung, die ebenfalls aus ISO 3095:2013 folgt ist die, dass die Lokomotive an vorderster Stelle des Zuges stehen muss. Über die Norm hinausgehend wurden zudem folgende Bedingungen gestellt:

- Nachbarfahrzeuge dürfen keine Lokomotiven sein
- Nachbarfahrzeuge dürfen keine Graugussbremsen haben. Ausnahme: Es handelt sich beim zu messenden Fahrzeug um einen Güterwagen mit Graugussbremsen.

- Die Beschleunigung (berechnet vom Passieren der ersten Achse bis zur letzten Achse eines Fahrzeugs) muss grösser als 0 m/s^2 sein. Dies soll Bremslärm verhindern.

Diese Zusatzbedingungen dienen dazu, den akustischen Einfluss der Nachbarfahrzeuge besser unter Kontrolle zu haben. Da sie unabhängig von den gemessenen Pegeln sind, sollten sie nicht zu einer negativen Beeinflussung der Resultate führen.

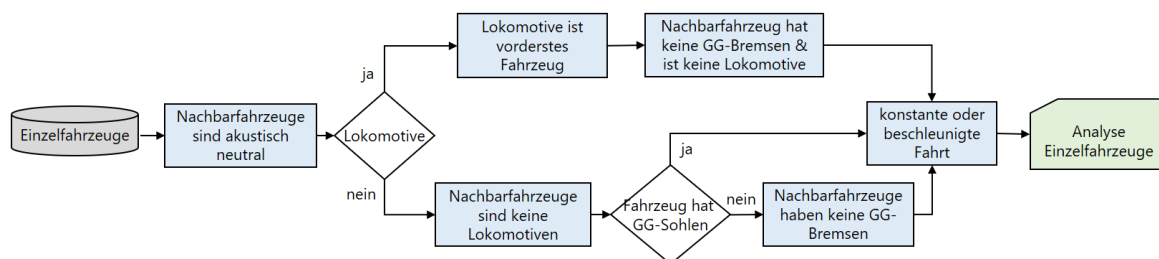


Abbildung 3-7: Flussdiagramm der Filter für die Analyse von Einzelfahrzeugen. Die Bedingungen in den blauen Kästen müssen erfüllt sein, damit der Ereignispegel einer Fahrt gültig ist. (übernommen von [40])

Die akustischen Eigenschaften von Schiene, Schwelle und Schotter unterscheiden sich zum Teil stark zwischen den Standorten. Ebenfalls ist eine Änderung dieser Eigenschaften über die Zeit zu erkennen. Anschaulich dafür ist Abbildung 3-8, welche aus dem Bericht zu MineTrack übernommen wurde, und die auf 80 km/h normierten Ereignispegel von Güterwagen mit vier Achsen und Komposit-Bremssohlen pro Standort, Gleis und Quartal darstellt. Am bedeutendsten sind die Unterschiede zwischen den einzelnen Gleisen verschiedener Standorte, welche bis zu 8 dB(A) betragen können. Zwischen den zwei Gleisen eines Standorts unterscheiden sich die Ereignispegel wesentlich weniger, und mit Ausnahme von Wichtrach unterscheiden sie sich um nicht mehr als 2 dB(A). Die Differenzen des Ereignispegels pro Gleis und Standort bewegen sich, wieder mit der Ausnahme Wichtrachs, im selben Rahmen.

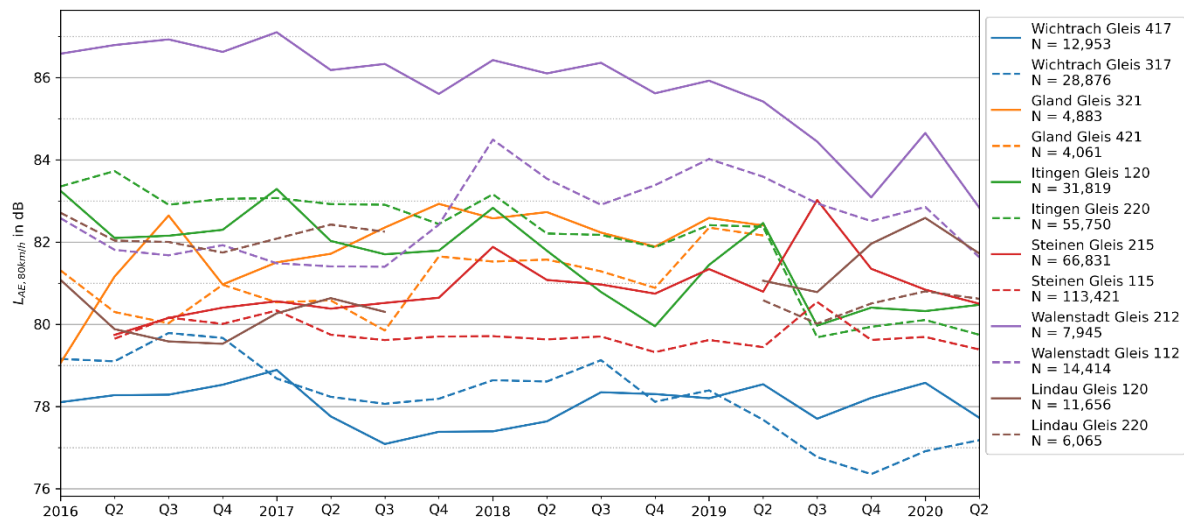


Abbildung 3-8: Zeitliche Entwicklung der Ereignispegel von Güterwagen mit Komposit-Bremssohlen und vier Achsen an den verschiedenen Monitoringstandorten. Nur Durchfahrten mit einer Geschwindigkeit von 64 km/h bis 101 km/h wurden berücksichtigt und die Pegel auf 80 km/h normiert. Jede Linie zeigt den energetischen Mittelwert des Ereignispegels LAE pro Quartal, Gleis und Standort. Die Zahl N gibt die Gesamtzahl von Fahrten an, welche pro Standort und Gleis über den gesamten Zeitraum vorhanden sind. (übernommen von [40])

Aufgrund der großen Differenzen zwischen den Standorten wurden die Untersuchungen von Einzelfahrzeuge in diesem Abschnitt jeweils auf einen Standort beschränkt. Zudem wurde auf die Normierung der Pegel nach der Geschwindigkeit verzichtet, die Fahrten jedoch im Gegenzug auf ein kleines Geschwindigkeitsfenster von 10 km/h Breite eingeschränkt. Für drei Geschwindigkeitsfenster wurde jeweils der Standort gewählt, bei welchem die meisten Fahrten vorhanden waren.

Von den Lokomotiven wurden alle in Tabelle 3-2 genannten Typenfamilien in die Untersuchung miteinbezogen. Von den Güterwagen wurden solche mit vier Achsen und zwei Drehgestellen miteinbezogen. Zum einen stellt dies die häufigste Bauform dar, zum anderen sind diese wegen der identischen Achszahl am besten mit Lokomotiven vergleichbar. Zusätzlich muss bei Güterwagen nach Bremsart unterschieden werden, da diese einen signifikanten Einfluss auf die Schallemissionen hat. Die vierachsigen Güterwagen deshalb nach Bremssohle aufgetrennt. Diese können vom Typ Komposit (K), "low noise, low friction" (LL) oder Grauguss (GG) sein. Da kaum vierachsige Güterwagen mit Scheibenbremsen vorhanden waren, wurden zudem wurden zudem zweiachsige Güterwagen ohne Drehgestell aber mit Scheibenbremsen und Wagen der

Rollenden Landstraße hinzugefügt. Bei Letzteren ist anzumerken, dass diese über acht Achsen an zwei Drehgestellen verfügen, die Räder jedoch einen wesentlich kleineren Durchmesser als die typischen 920 mm der anderen Güterwagentypen aufweisen.

Um einen Bezug zu besonders leisen Wagen zu erhalten, wurden zudem Reisezugwagen des Typs Einheitswagen IV (EW4) hinzugefügt. Diese Reisezugwagen haben Scheibenbremsen und werden in der Regel häufiger gewartet als Güterwagen.

3.3.3 Resultate des Vergleichs der Einzelfahrzeuge

Die Abbildungen 3-9, 3-10 und 3-11 zeigen jeweils die Verteilung der Ereignispegel der untersuchten Fahrzeugtypen. Die in den Boxplots gezeigten Fahrten sind auf einen Standort (beide Gleise) und eine Geschwindigkeitsklasse mit 10 km/h Breite eingeschränkt. Bedingt durch die Gegebenheiten der Standorte und der Anordnung der Mikrofone der Monitoringstationen entsprechen die Werte nicht der Messung der konstanten Vorbeifahrt nach Norm ISO 3095:2013 und können deshalb nicht direkt mit Grenzwerten wie jenen der TSI NOI verglichen werden. Auch das Emissionsverhalten bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten ist nur begrenzt vergleichbar, da es sich um bei den unterschiedlichen Geschwindigkeiten auch um unterschiedliche Standorte handelt. Die Wahl unterschiedlicher Standorte war aber notwendig, um genügend Fahrten der Fahrzeuge im jeweiligen Geschwindigkeitsfenster zu haben. Hauptzweck der Abbildungen ist der Vergleich von Lokomotiven untereinander sowie von Lokomotiven zu Wagen unter gleichen Bedingungen.

Die tiefe Geschwindigkeit von unter 50 km/h wurde gewählt, da dort das Rollgeräusch noch vergleichsweise gering ist, und sich entsprechend Unterschiede bei den Antriebs- und Aggregatgeräuschen der Lokomotiven eher zeigen. Die Ausreißer der Ereignispegel der Re620 sind gemäß zusätzlicher Analysen mit Schlupf zu erklären. Da es sich nicht um die Regelgeschwindigkeit am gewählten Standort handelt, sind relativ wenig Fahrten vorhanden.

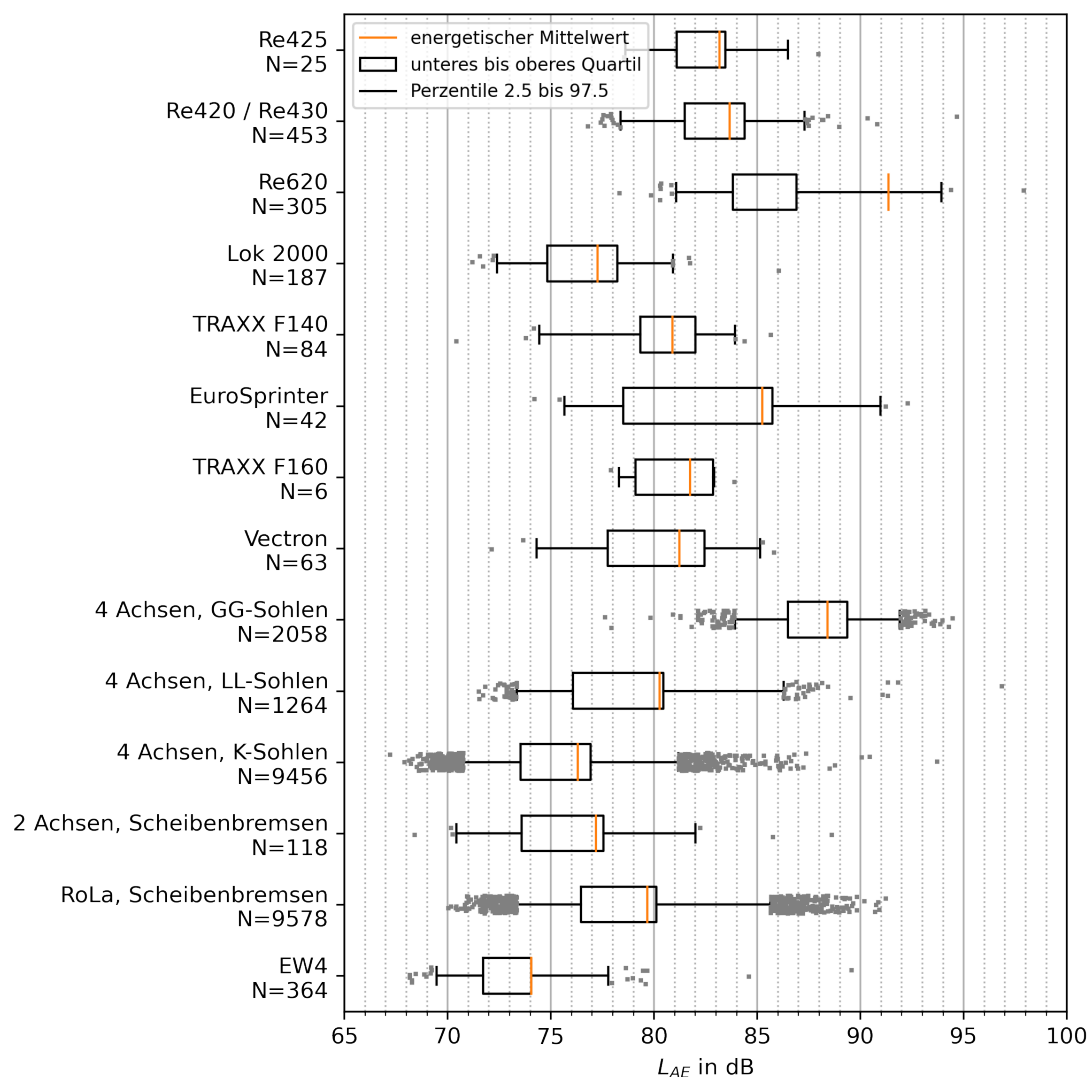


Abbildung 3-9: Verteilung der Ereignispegel verschiedener Fahrzeugtypen am Monitoringstandort Itingen (beide Gleise) im Geschwindigkeitsbereich 40 km/h – 50 km/h. Die Darstellung der Ausreißer mit einer vertikalen Streuung dient der besseren Lesbarkeit. Anstelle des sonst bei Boxplots üblichen Medianwerts wird der energetische Mittelwert gezeigt. Die Variable N gibt an, wie viele Fahrten eines Fahrzeugtyps in die Auswertung eingeflossen sind.

In Steinen liegen die gefahrenen Geschwindigkeiten für Güterzüge in der Regel unterhalb von 80 km/h. Wiesen die Wagen der Rollenden Landstraße (RoLa) bei tieferen Geschwindigkeiten noch höhere Ereignispegel auf als andere Scheibengebremsste Wagen, so hat sich dieser Abstand bei Geschwindigkeiten zwischen 70 km/h und 80 km/h verkleinert. Ein Grund dafür könnte das unterschiedliche Abstrahlverhalten der Räder sein, welche bei RoLa-Wagen kleiner sind.

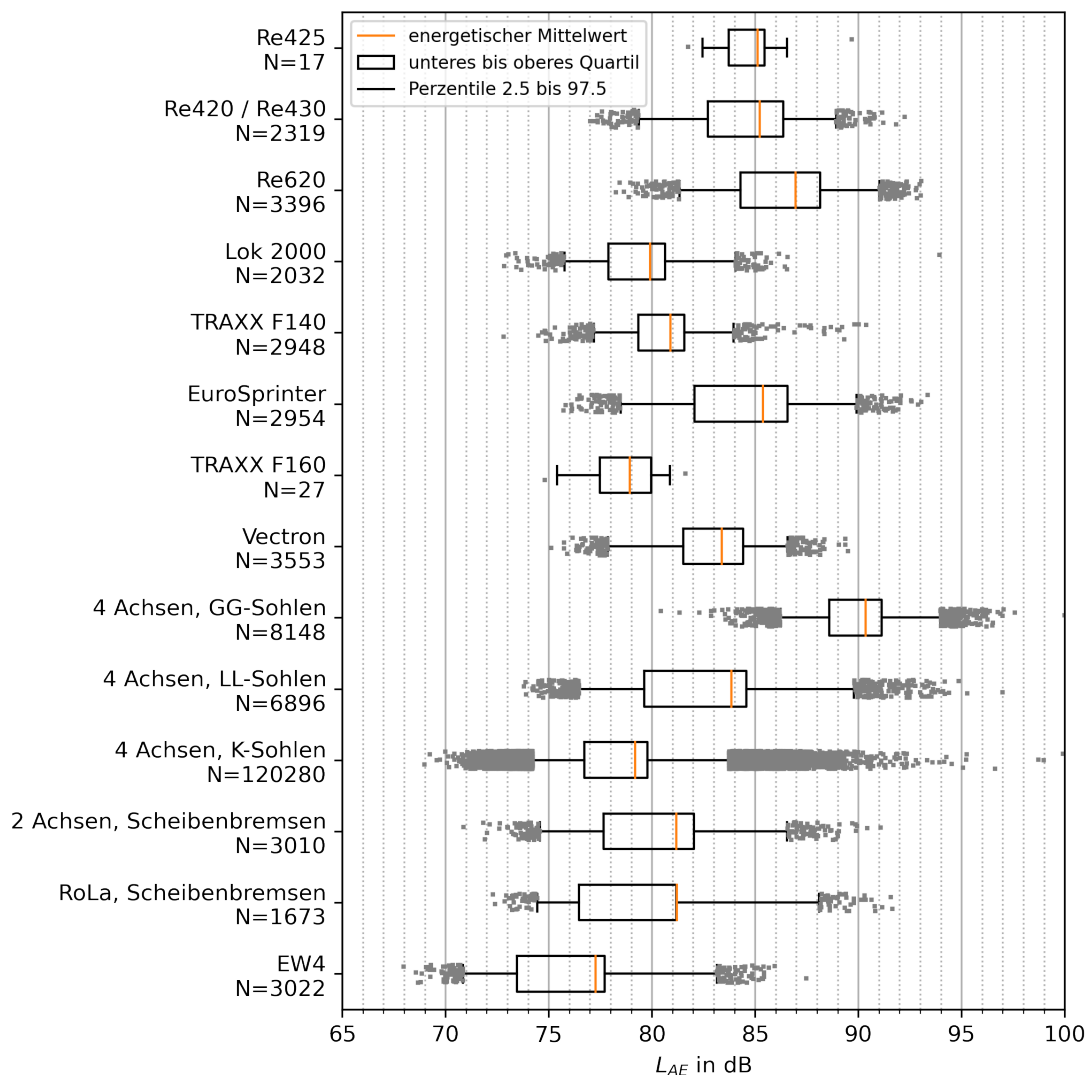


Abbildung 3-10: Verteilung der Ereignispegel verschiedener Fahrzeugtypen am Monitoringstandort Steinen (beide Gleise) im Geschwindigkeitsbereich 70 km/h – 80 km/h. Die Darstellung der Ausreißer mit einer vertikalen Streuung dient der besseren Lesbarkeit. Anstelle des sonst bei Boxplots üblichen Medianwerts wird der energetische Mittelwert gezeigt. Die Variable N gibt an, wie viele Fahrten eines Fahrzeugtyps in die Auswertung eingeflossen sind.

In Wichtrach fahren Güterzüge in der Regel mit bis zu 100 km/h. Dieser Standort fällt im Vergleich zu den andern als sehr leise auf (siehe Abbildung 3-8). Der Unterschied zwischen Fahrzeugen mit rauen und solchen mit glatten Laufflächen fällt darum mehr ins Gewicht. Dies könnte auch eine Erklärung sein dafür, warum der Ereignispegel des EW4 im Vergleich zu den anderen Fahrzeugen besonders tief ausfällt.

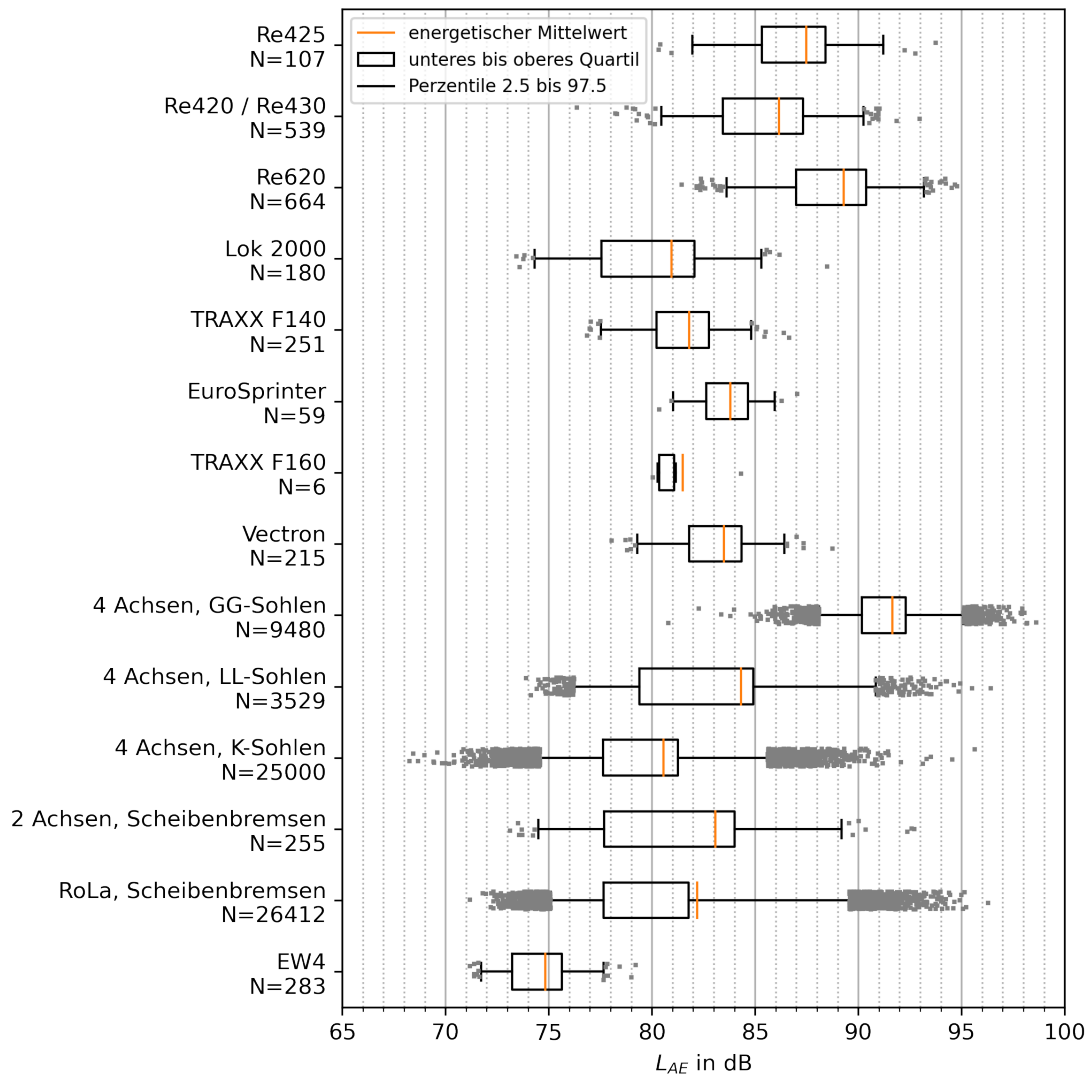


Abbildung 3-11: Verteilung der Ereignispegel verschiedener Fahrzeugtypen am Monitoringstandort Wichtrach (beide Gleise) im Geschwindigkeitsbereich 90 km/h – 100 km/h. Die Darstellung der Ausreißer mit einer vertikalen Streuung dient der besseren Lesbarkeit. Anstelle des sonst bei Boxplots üblichen Medianwerts wird der energetische Mittelwert gezeigt. Die Variable N gibt an, wie viele Fahrten eines Fahrzeugtyps in die Auswertung eingeflossen sind.

Wie zu erwarten war, weisen die älteren Generationen von Lokomotiven (Re420, Re425, Re430 und Re620) die höchsten Ereignispegel auf. Eine Ausnahme bilden dabei Lokomotiven der Typenfamilie EuroSprinter, welche bei 40 – 50 km/h höhere, und bei 70 – 80 km/h gleich hohe Werte erreichen. Diese beiden Fälle weisen jeweils auch eine sehr hohe Streuung auf. Die Werte der Re620 bei 40 – 50 km/h sind als ungünstig zu betrachten, da durch Schlupf viele Ausreißer nach oben entstanden.

Grundsätzlich weisen alle Lokomotiven im Mittel tiefere Ereignispegel auf als Güterwagen mit GG-Sohlen. Die Differenz beträgt bei der Re420 ca. 5 dB(A), und bei der Lok 2000 sogar über 10 dB(A), dies bei allen drei untersuchten Situationen. Alle Lokomotivtypen sind in den untersuchten Situationen lauter als Güterwagen mit K-Sohlen. Insgesamt ist die Lok 2000 bei 70 – 80 km/h und bei 90 – 100 km/h um ca. 1 dB(A) leiser als die TRAXX F140. Die TRAXX F160 stellt sich als ähnlich leise heraus, durch die geringe Anzahl an Fahrten von Lokomotiven dieser Typenfamilie ist diese Aussage jedoch nicht sehr belastbar. Bei Geschwindigkeiten zwischen 40 km/h und 50 km/h ist die Lok 2000 sogar um 3 dB(A) leiser als Lokomotiven anderer Typenfamilien. Dies ist ein Hinweis auf ein tieferes Antriebs- bzw. Aggregatsgeräusch.

Güterwagen mit K-Sohlen weisen im Mittel in allen untersuchten Situationen um rund 11 dB(A) tiefere Ereignispegel auf also solche mit GG-Sohlen. Die Ereignispegel von Güterwagen mit LL-Sohlen liegen jedoch um 4 dB(A) höher als jene von Güterwagen mit K-Sohlen und weisen eine größere Streuung auf. Ereignispegel von Güterwagen mit Scheibenbremsen, auch wenn die untersuchten Exemplare nur zwei Achsen haben, weisen höhere Ereignispegel auf als solche von Güterwagen mit K-Bremsen. Die Ereignispegel der EW4 liegen jedoch deutlich unter den Werten der Güterwagen mit K-Sohlen, was zeigt, dass Räder mit Scheibenbremsen grundsätzlich leiser sein können als Räder mit K-Sohlen. Bei den RoLa-Wagen fällt auf, dass die Verteilung der Ereignispegel nach unten schief ist, es also viel Ausreißer nach oben gibt.

3.4 Ausbreitung hinter Schallschutzwänden

Die Analyse zur Bedeutung der Lokomotiven im Zugverband gemäß Abschnitt 3.2 wurde basierend auf Messdaten der BAV Monitoringstationen, also an geraden Strecken mit unabgeschirmten Ausbreitungssituationen, vorgenommen. Es stellt sich die

Frage, ob die daraus abgeleiteten Aussagen zur Bedeutung der Lokomotiven auch in anderen Situationen Gültigkeit haben. Da Lokomotiven im Gegensatz zu Güterwagen zusätzlich zum Rollgeräusch auch Antriebsgeräusche verursachen, sind in diesem Zusammenhang Situationen von Interesse, in welchen der Anteil des Antriebsgeräusches am Gesamtgeräusch höher ausfällt. Dies ist zum einen in Situationen mit tiefer Fahrgeschwindigkeit der Fall. Da sich diese Sekundärquellen häufig im Dachbereich befinden, sind zum anderen Situationen hinter Lärmschutzwänden potentiell relevant.

Zur Untersuchung dieser Fragestellung wurde folgendermaßen vorgegangen:

- 1) Mittels des sonRAIL Webtools wurden für zwei Lokomotiven, welche gemäß sonRAIL bedeutende Sekundärquellen aufweisen (Re 420/425 und Re 620) die Schallleistungen des Rollgeräusches und der Sekundärquellen bei 50 km/h, und zum Vergleich zusätzlich bei 80 km/h und 100 km/h, berechnet. Ebenfalls zum Vergleich wurden entsprechende Emissionen auch für zwei Lokomotiven mit vergleichsweise wenig Antriebsgeräusch (Re 460 und Re 474/482) dazu genommen.
- 2) Für einen Empfänger in 4 m Höhe über Schienenoberkante und horizontalen Abständen von 15,4 m resp. 19,8 m vom nahen bzw. fernen Gleis wurde ein mittlerer Ereignispegel, als energetischer Mittelwert einer Vorbeifahrt auf dem nahen und fernen Gleis, abgeschätzt. Bei der Ausbreitungsrechnung wurde dabei nur die geometrische Dämpfung berücksichtigt. Die Berechnung wurde für die fünf Quellenhöhen gemäß sonRAIL Modell durchgeführt (0,0 m, 0,5 m, 2,0 m, 3,0 m und 4,0 m).
- 3) Diese Berechnung wurde ein zweites Mal für eine Situation mit einer 2 m hohen Lärmschutzwand in 3,4 m Abstand vom nahen Gleis wiederholt. (Die Geometrie wurde von einer real existierenden Situation abgeleitet.) Die Hinderniswirkung für die fünf Quellenhöhen und zwei Gleise wurde nach einem Algorithmus von A.D. PIERCE berechnet, welcher auch im sonRAIL Ausbreitungsmodell verwendet wird.
- 4) Als Ergebnis wird betrachtet, welchen Anteil die Sekundärquellen am Gesamtgeräusch aufweisen und wie sich dieser Beitrag durch die Anwesenheit der Lärmschutzwand verändert.

Im Anhang zu diesem Bericht sind die Berechnungen dokumentiert. Wie aus Tabelle 8-10 entnommen werden kann wird das Rollgeräusch durch die Anwesenheit der Lärmschutzwand im Falle der Lokomotiven mit bedeutenden Sekundärquellen und bei 50 km/h um 10,2 dB reduziert, während die Antriebsgeräusche durch die Anwesenheit der Wand praktisch nicht beeinflusst werden. In der Folge nimmt die Bedeutung des Antriebsgeräusches zu. Während dieses in der Situation ohne Wand rund 8 dB leiser als das Gesamtgeräusch war, beträgt die Differenz hinter der Wand nur noch 1,8 dB(A). Entsprechend nimmt das Gesamtgeräusch hinter der Lärmschutzwand mit 6,3 dB(A) weniger stark ab als das Rollgeräusch, mit den erwähnten 10,2 dB(A).

Da die Güterwagen wie erwähnt nur Rollgeräusch verursachen, reduziert sich ihr Pegel durch die Anwesenheit der Wand um 10,2 dB(A) und damit um rund 4 dB(A) stärker als bei den Lokomotiven. In Abschnitt 3.2 wurde aufgezeigt, dass die Lokomotiven lediglich in 5,4 % der Fälle das Gesamtgeräusch des Güterzuges dominieren. Unter Berücksichtigung dieser Differenz von 4 dB(A) erhöht sich dieser Wert auf 18,6 %. Es kann somit gefolgert werden, dass bei tiefen Fahrgeschwindigkeiten und Situationen mit Lärmschutzwänden bedeutende Antriebsgeräusche dazu führen können, dass die Lokomotiven bei rund einem Fünftel der Züge zur dominanten Quelle werden.

Die Beispielrechnungen mit höheren Geschwindigkeiten in Tabelle 8-10 und Lokomotiven mit wenig Antriebsgeräusch gemäß Tabelle 8-13 zeigen allerdings auch, dass es in solchen Situationen trotz Hindernissen nicht zu einer deutlichen Zunahme der Bedeutung der Lokomotiven kommt und dass die Bedeutung der Lokomotiven im Vergleich zu den Güterwagen lediglich um ≤ 1 dB(A) zunimmt. Das aufgezeigte Verhalten ist somit auf Situationen beschränkt, bei welchen die Ausbreitung durch Lärmschutzwände abgeschirmt ist und gleichzeitig tiefe Fahrgeschwindigkeiten auftreten.

4. Empfehlungen für Schallemissionsgrenzwerte

Die Empfehlungen für Schallemissionsgrenzwerte bei Lokomotiven mit einer Leistung von 4500 kW und mehr basieren auf

- den in Kapitel 2 dargelegten Lärminderungspotentialen,
- den in Kapitel 3 ermittelten typischen Vorbeifahrtpegeln verschiedener Baureihen im Vergleich zu denen verschiedener Güterwagenbauarten,
- den derzeit gültigen Grenzwerten der TSI NOI [2],
- auf den Untersuchungen von LUTZENBERGER ET AL. [15] für das deutsche Umweltbundesamt im Jahr 2013 und
- der 4. Ausgabe der „Empfehlungen für Anforderungen an Fahrzeuge in Vergabeverfahren“ des deutschen Bundesverbands SchienenNahverkehr e. V. (BSN) [41].

Die derzeit gültigen Grenzwerte der TSI NOI [2] sind seit 2014 gültig² und eine Anpassung der Grenzwerte ist gemäß den Empfehlungen der Europäischen Eisenbahnagentur (engl. European Union Agency for Railways (ERA)) in der nächsten Revision der TSI NOI nicht zu erwarten [43, Annex 5].

Die Studie von LUTZENBERGER ET AL. [15] weist neben den Empfehlungen für kurzfristig und mittelfristig anwendbare Grenzwerte auch die tatsächlich erreichten Ergebnisse der jeweiligen Betriebszustände der Typprüfung verschiedener Schienenfahrzeuge (ohne Lok 2000 (Re 460)) aus. Diese werden im Folgenden ebenfalls dargelegt. Es ist aufgrund sich nur unwesentlich geänderten Anforderungen an Elektrolokomotiven und weniger Forschungs- bzw. Entwicklungsprojekte (siehe Kapitel 2) in den letzten 10 Jahren davon auszugehen, dass die mit der Studie erhaltenden Werte weiterhin repräsentativ sind.

Die Empfehlungen des BSN sollen als Grundlage für die Mitglieder des BSNs (Aufgabenträger des Schienenpersonennahverkehrs)³ dienen, wenn diese Vergabeverfahren durchführen wollen. Hier sind verbindliche und anzustrebende Pegelhöchstwerte u. a. für gebrauchte und neue Lokomotiven genannt. Nach Angaben des BSN befindet

² Eine Verschärfung der Grenzwerte erfolgte mit der Änderung der TSI NOI im Jahr 2019 nicht [42].

³ Siehe auch <https://www.schienenahverkehr.de/> (letzter Zugriff: 29.03.2023).

man sich zu diesen Pegelhöchstwerte im Austausch mit dem Verband der Bahnindustrie und den Herstellern. Die Veröffentlichung dieser Pegelhöchstwerte ist im Januar 2023 erfolgt. Die Pegelhöchstwerte wurden bereits im Nahverkehrsplan von Berlin 2019-2023 angegeben [44].

Im Folgenden werden für die einzelnen Betriebszustände Empfehlungen für Grenzwerte gegeben und diese jeweils mit den gültigen Grenzwerten der TSI NOI, der Studie von Lutzenberger et al. und den Fahrzeugempfehlungen des BSN verglichen. Die zur Ermittlung der Fahrzeugemissionen heranzuziehende Norm ist die ISO 3095:2013 [39]. Es werden die folgenden Betriebszustände betrachtet:

- Stand (Abschnitt 4.1),
- Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit (Abschnitt 4.2),
- Anfahrt (Abschnitt 4.3),
- Bremsung (Abschnitt 4.4).

Zusätzlich wird der Betriebszustand Kurvenfahrt (Abschnitt 4.5) betrachtet. Dieser ist derzeit allerdings nur informativ Teil der Norm ISO 3095:2013 [39].

4.1 Betriebszustand Stand

Die Schallemissionen des Betriebszustand Stillstand bei Elektrolokomotiven wird maßgeblich dominiert von den Aggregaten, insbesondere den Lüftern, den Kompressoren und den Transformatoren.

In der Abbildung 4-1 sind die in [15] ermittelten energieäquivalente A-bewertete Dauerschalldruckpegel für das Standgeräusch von Elektrolokomotiven dargestellt. Der TSI NOI Grenzwert liegt derzeit bei 70 dB(A) [2]. Es wird deutlich, dass beim Standgeräusch der derzeit gültige Grenzwert teils deutlich unterschritten wird. Der Median (61 dB(A)) liegt 9 dB unterhalb des Grenzwertes. Der niedrigste Wert liegt bei 57 dB(A) und damit 13 dB unterhalb des Grenzwertes, allerdings sind hier die Betriebszustände nicht bekannt. [15]

Die Lärminderungsmöglichkeiten für das Standgeräusch sind im Allgemeinen einfach umsetzbar und bereits Stand der Technik in verschiedenen Lokomotiven, wie im Kapitel 2 gezeigt wurde. LUTZENBERGER ET AL. fasst zusammen, dass insbesondere die Verwendung von Technologien wie

- „drehzahlgeregelten Lüftern,

- Kapselungen oder
- Schalldämpfern“ [15, S. 90]

sinnvoll sind, um niedrige Geräuschemissionen im Stillstand zu ermöglichen.

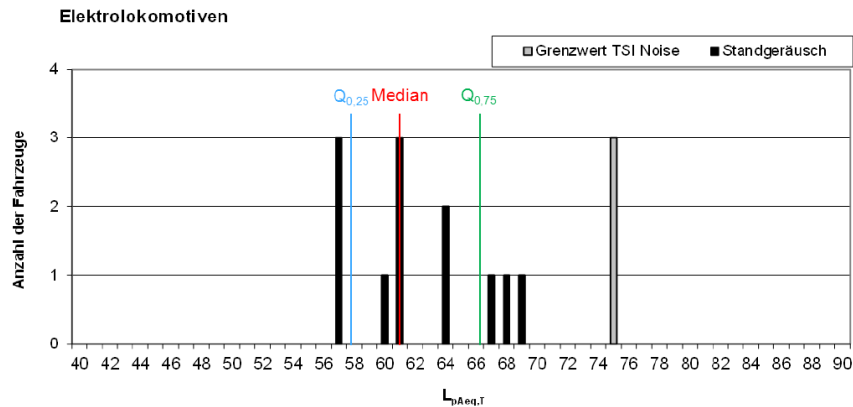


Abbildung 4-1: Ermittelte energieäquivalente A-bewertete Dauerschalldruckpegel für das Standgeräusch von Elektrolokomotiven (Einheit) als Histogramm unter Angabe des Medians sowie des unteren und oberen Quantils ($Q_{0,25}$ bzw. $Q_{0,75}$). Außerdem Nennung des Grenzwerts gemäß TSI NOI (Stand 2011, derzeit 70 dB(A)). Abbildung aus [15, S. 89].

In den Tabellen 4-1 bis 4-3 sind die Grenzwerte bzw. Pegelhöchstwerte für das Standgeräusch aus der Literatur zusammengetragen sowie die daraus abgeleiteten Empfehlungen für die Grenzwerte angegeben. Es werden in Anlehnung an die TSI NOI [2] die folgenden Fälle betrachtet:

- bewerteter, äquivalenter Dauerschallpegel der Einheit,
- A-bewerteter, äquivalenter Dauerschallpegel des Hauptkompressors am nächstgelegenen Messpunkt,
- AF-bewerteter Schalldruckpegel impulsförmiger Geräusche des Auslassventils des Lufttrockners am nächstgelegenen Messpunkt.

Tabelle 4-1: Grenzwerte und empfohlene Pegelhöchstwerte für das Standgeräusch einer Elektrolokomotive (Einheit).

Grenzwerte	$L_{pAeq,T}$	Geräuschminderung
TSI Noise 2014 [2] mit Änderung aus 2019	70 dB	
TSI Noise Revision (2022) [43]	70 dB	0 dB
Kurzfristiger anwendbar nach LUTZENBERGER ET AL. [15, S. 90]	63 dB	7 dB
Mittelfristig anwendbar nach LUTZENBERGER ET AL. [15, S. 90]	59 dB	11 dB
Verbindliche Pegelhöchstwerte (BSN) [41] und [44, S. 178]	68 dB	2 dB
Anzustrebende Pegelhöchstwerte (BSN) [41] und [44, S. 178]	61 dB	9 dB
Lok 2000 (Re 460) [33]	62 dB	8 dB
Empfehlungen für Grenzwert	61 dB	9 dB

Tabelle 4-2: Grenzwerte und empfohlene Pegelhöchstwerte für das Standgeräusch einer Elektrolokomotive (Hauptkompressors am nächstgelegenen Messpunkt).

Grenzwerte	$L_{pAeq,T}$	Geräuschminderung
TSI Noise 2014 [2] mit Änderung aus 2019 [42]	75 dB	
TSI Noise Revision (2022) [43]	75 dB	0 dB
Kurzfristiger anwendbar nach LUTZENBERGER ET AL. [15, S. 90]	k. A.	
Mittelfristig anwendbar nach LUTZENBERGER ET AL. [15, S. 90]	k. A.	
Verbindliche Pegelhöchstwerte (BSN) [41] und [44, S. 178]	75 dB	0 dB
Anzustrebende Pegelhöchstwerte (BSN) [41] und [44, S. 178]	65 dB	10 dB
Lok 2000 (Re 460) [33]	62 dB	13 dB
Empfehlungen für Grenzwert	62 dB	13 dB

Tabelle 4-3: Grenzwerte und empfohlene Pegelhöchstwerte für das Standgeräusch einer Elektrolokomotive (Auslassventil des Lufttrockners am nächstgelegenen Messpunkt).

Grenzwerte	L_{pAFmax}	Geräuschminderung
TSI Noise 2014 [2] mit Änderung aus 2019 [42]	85 dB	
TSI Noise Revision (2022) [43]	85 dB	0 dB
Kurzfristiger anwendbar nach LUTZENBERGER ET AL. [15, S. 90]	k. A.	
Mittelfristig anwendbar nach LUTZENBERGER ET AL. [15, S. 90]	k. A.	
Verbindliche Pegelhöchstwerte (BSN) [41] und [44, S. 178]	85 dB	0 dB
Anzustrebende Pegelhöchstwerte (BSN) [41] und [44, S. 178]	70 dB	15 dB
Lok 2000 (Re 460) [33]	k. A.	
Empfehlungen für Grenzwert	70 dB	15 dB

4.2 Betriebszustand Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit

Die dominanten Schallquellen beim Betriebszustand Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit sind die Räder und das Gleis (Schienen und Schwellen).

In der Abbildung 4-2 sind die in [15] ermittelten energieäquivalente A-bewertete Dauerschalldruckpegel für das Fahrgeräusch von Elektrolokomotiven für die Bezugsgeschwindigkeit 80 km/h dargestellt. Die messtechnische Typprüfung hat sowohl bei 80 km/h als auch bei der maximal zulässigen Fahrgeschwindigkeit des Fahrzeugs zu erfolgen. Im letztgenannten Fall ist der erhaltende Wert $L_{p,Aeq,Tp,v_{max}}$ über (vgl. Gleichung (2)) [2]

$$L_{p,Aeq,Tp,80\text{ km/h}} = L_{p,Aeq,Tp,v_{max}} - 30 \cdot \lg \left(\frac{v}{80\text{ km/h}} \right) \text{ dB} \quad (3)$$

auf den $L_{p,Aeq,Tp,80\text{ km/h}}$ für die Bezugsgeschwindigkeit 80 km/h umzurechnen.⁴ In der Abbildung ist der höhere von so erhaltenden beiden Werten dargestellt [15]. Der TSI NOI Grenzwert liegt derzeit bei 84 dB(A) [2]. Es zeigt sich, dass beim Fahrgeräusch der derzeit gültige Grenzwert nur gering unterschritten wird. Der Median (83 dB(A)) liegt 1 dB unterhalb des Grenzwertes. Der niedrigste Wert liegt bei 81 dB(A) und damit 3 dB unterhalb des Grenzwertes. [15]

Die Lärminderungsmöglichkeiten sind Radschallabsorber und schalltechnisch optimierte Radbauformen (gerader Steg und kleiner Raddurchmesser). Außerdem könnten Schallschürzen das Rollgeräusch mindern, besonders effektiv allerdings nur in Verbindung mit einer niedrigen Schallschutzwand (siehe Abschnitt 2.3.7).

In der Tabelle 4-4 sind die Grenzwerte bzw. Pegelhöchstwerte für das Fahrgeräusch aus der Literatur zusammengetragen sowie die daraus abgeleitete Empfehlung für einen Grenzwert angegeben. Den von LUTZENBERGER ET AL. [15] als mittelfristig anwendbarer Grenzwert von 84 dB(A) entspricht dem derzeit gültigen TSI NOI Grenzwert. Der BSN empfiehlt für Neufahrzeuge einen anzustrebenden Pegelhöchstwert von 79 dB(A). Dieser Wert wurde für die Lok 2000 bereits erreicht und kann aus diesem

⁴ Unter Annahme, dass die Lokomotive eine maximale zulässige Fahrgeschwindigkeit von weniger als 250 km/h hat.

Grund nach derzeitigem Stand der Technik als realisierbar betrachtet werden. Der empfohlene Grenzwert ist damit 79 dB(A).

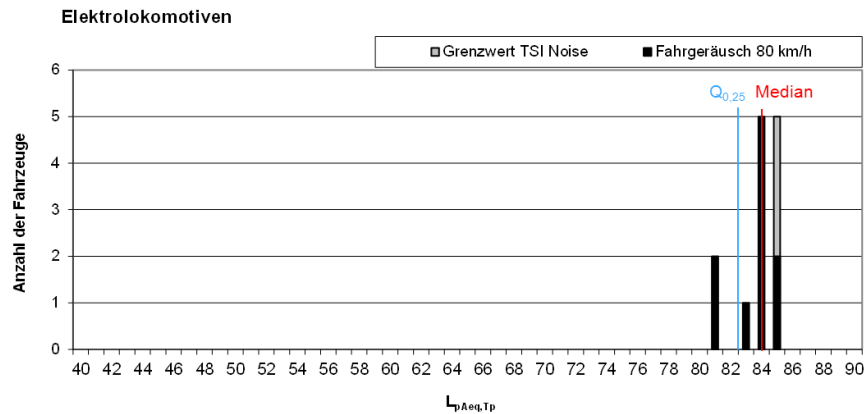


Abbildung 4-2: Ermittelte energieäquivalente A-bewertete Dauerschalldruckpegel für das Fahrgeräusch von Elektrolokomotiven als Histogramm unter Angabe des Medians sowie des unteren und oberen Quantils ($Q_{0,25}$ bzw. $Q_{0,75}$). Außerdem Nennung des Grenzwerts gemäß TSI NOI (Stand 2011, derzeitig 84 dB(A)). Abbildung aus [15, S. 110].

Tabelle 4-4: Grenzwerte und empfohlene Pegelhöchstwerte für das Fahrgeräusch einer Elektrolokomotive (Bezugsgeschwindigkeit 80 km/h).

Grenzwerte	$L_{pAeq,T}$	Geräuschminderung
TSI Noise 2014 [2] mit Änderung aus 2019 [42]	84 dB	
TSI Noise Revision (2022) [43]	84 dB	0 dB
Kurzfristiger anwendbar nach LUTZENBERGER ET AL. [15, S. 111]	85 dB	-1 dB
Mittelfristig anwendbar nach LUTZENBERGER ET AL. [15, S. 111]	83 dB	1 dB
Verbindliche Pegelhöchstwerte (BSN) [41] und [44, S. 178]	84 dB	0 dB
Anzustrebende Pegelhöchstwerte (BSN) [41] und [44, S. 178]	79 dB	5 dB
Lok 2000 (Re 460) [33]	79 dB	5 dB
Empfehlungen für Grenzwert	79 dB	5 dB

4.3 Betriebszustand Anfahrt

Die Fahrmotoren, deren Lüfter sowie das Getriebe sind die wesentlichen Schallquellen bei der Anfahrt einer Lokomotive.

In der Abbildung 4-3 sind die in [15] ermittelten maximalen AF-bewerteten Schalldruckpegel für das Anfahrgeräusch von Elektrolokomotiven mit einer Leistung von 4500 kW oder höher dargestellt. Hierbei muss die Lokomotive mit maximaler Zugkraft (ohne Durchdrehen der Räder) aus dem Stillstand auf 30 km/h beschleunigen und dann die Geschwindigkeit halten. [2, 39] Der TSI NOI Grenzwert liegt derzeit bei 84 dB(A) [2]. Es zeigt sich, dass beim Anfahrgeräusch der derzeit gültige Grenzwert nur gering unterschritten wird. Der Median (82 dB(A)) liegt 2 dB unterhalb des Grenzwertes. Der niedrigste Wert liegt bei 80 dB(A) und damit 4 dB unterhalb des Grenzwertes. [15]

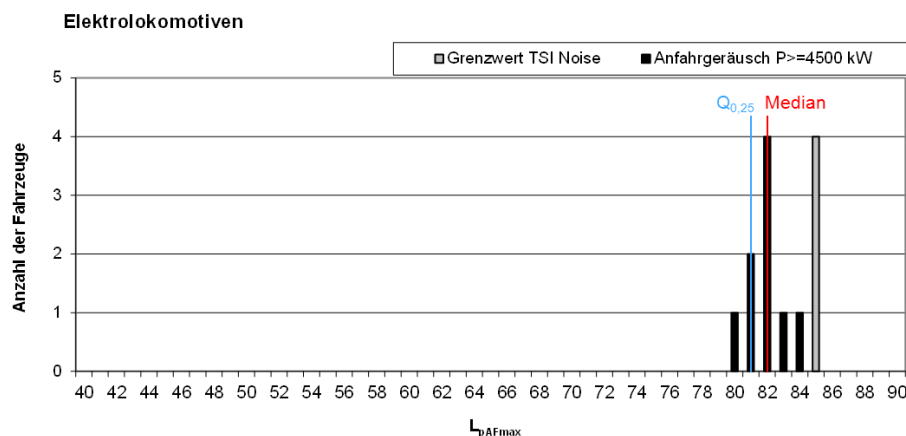


Abbildung 4-3: Ermittelte maximale AF-bewertete Schalldruckpegel für das Anfahrgeräusch von Elektrolokomotiven mit einer Leistung gleich 4500 kW oder mehr als Histogramm unter Angabe des Medians sowie des unteren und oberen Quantils ($Q_{0,25}$ bzw. $Q_{0,75}$ ⁵). Außerdem Nennung des Grenzwerts gemäß TSI NOI (Stand 2011, derzeit 84 dB(A)). Abbildung aus [15, S. 101].

Die Lärminderungsmöglichkeiten sind akustisch optimierte Zahnformen im Getriebe und ein nicht-achsreitendes zweistufiges Getriebe. Das Getriebegehäuse, der Fahrmotor und die Fahrmotorenlüfter sollten so umgesetzt sein, dass die Schallabstrahlung

⁵ Hier ist das obere Quantil gerundet gleich mit dem Median [15].

gemindert ist. Eine Schalldämmung und -absorption bzw. Kapselung schallemittierender Schallquellen sollte umgesetzt werden (siehe Abschnitte 2.3.5 und 2.3.6 sowie [15]).

In der Tabelle 4-5 sind die Grenzwerte bzw. Pegelhöchstwerte als maximalen AF-bewerteten Schalldruckpegel für das Anfahrgeräusch aus der Literatur zusammengetragen sowie die daraus abgeleitete Empfehlung für einen Grenzwert angegeben. Den von LUTZENBERGER ET AL. [15] als mittelfristig anwendbarer Grenzwert von 82 dB(A) ist 2 dB niedriger als der derzeitig gültigen TSI NOI Grenzwert. Der BSN empfiehlt für Neufahrzeuge einen anzustrebenden Pegelhöchstwert von 80 dB(A). Dieser Wert wurde mit der Lok 2000 bereits unterschritten (75 dB(A) bis 78 dB(A)). Das heißt, auch niedrigere Werte als der von BSN anzustrebende Pegelhöchstwert sind nach dem derzeitigen Stand der Technik realisierbar. Der empfohlene Grenzwert ist 78 dB(A).

Tabelle 4-5: Grenzwerte und empfohlene Pegelhöchstwerte für das Anfahrgeräusch einer Elektrolokomotive.

Grenzwerte	L_{pAFmax}	Geräuschminderung
TSI Noise 2014 [2] mit Änderung aus 2019 [42]	84 dB	
TSI Noise Revision (2022) [43]	84 dB	0 dB
Kurzfristiger anwendbar nach LUTZENBERGER ET AL. [15, S. 103]	83 dB	1 dB
Mittelfristig anwendbar nach LUTZENBERGER ET AL. [15, S. 103]	82 dB	2 dB
Verbindliche Pegelhöchstwerte (BSN) [41] und [44, S. 178]	81 dB	3 dB
Anzustrebende Pegelhöchstwerte (BSN) [41] und [44, S. 178]	80 dB	4 dB
Lok 2000 (Re 460) [33]	75 - 78 dB	6 - 9 dB
Empfehlungen für Grenzwert	78 dB	6 dB

4.4 Betriebszustand Bremsung

Beim mechanischen Bremsen kann es bei (Rad)Scheibenbremsen zum Bremsenquietschen kommen. Wird elektrisch gebremst, so sind Geräuscentstehungen bei Fahrmotor und Getriebe sowie im Bremswiderstand (Gleichstrom) zu erwarten. Es können die gleichen Lärminderungsmaßnahmen wie beim Betriebszustand Anfahrt angewendet werden.

Gemäß TSI NOI sind keine Grenzwerte für den Betriebszustand Bremsung vorgegeben. LUTZENBERGER ET AL. [15] haben hierzu ebenfalls keine Untersuchungen durchgeführt. Allerdings sind vom BSN anzustrebende Pegelhöchstwerte in [41] angegeben (siehe auch [44, S. 178]). Dieser beträgt 79 dB(A). Die Messung sind nach ISO 3095:2013 [39] genormt. Hierbei ist das zu untersuchende Fahrzeug mit einer betriebsüblichen Bremsung mit maximaler Verzögerung von 30 km/h bis zum Stillstand abzubremsen [39]. Es wird der vom BSN genannte anzustrebende Pegelhöchstwert als Grenzwert empfohlen.

4.5 Betriebszustand Kurvenfahrt

Bei der Fahrt einer Lokomotive in einer (engen) Kurve kann neben dem Rollgeräusch auch Kurvenquietschen (hochfrequent) bzw. Kurvengrummeln (tieffrequent) mit tonalen Komponenten auftreten. Dies kann infolge des Quergleitens der Räder (insbesondere bogeninnen) geschehen, welches sich einstellt, weil „die Rollrichtung der beiden Achsen eines Wagens bzw. eines Drehgestells beim Durchlaufen eines Gleisbogens nicht mit der Richtung des Gleises übereinstimmt“ [18, S. 53]. Hierbei ist zu beachten, dass es verschiedene Einflussgrößen auf das Kurvengeräusch, z. B. „Oberflächenbeschaffenheit von Rad und Schiene, Luftfeuchtigkeit, Temperatur“ [20, S. 162] gibt. Des Weiteren handelt es sich um ein stochastisches Auftreten, weswegen Messungen des Kurvengeräuschs über einen längeren Zeitraum erfolgen sollten [18, S. 53]. Ein Messverfahren ist in ISO 3095:2013 [39] vorgeschlagen.

Durch akustisch-günstige Drehgestellkonstruktionen beispielsweise kleine Achs- und Drehgestellabstände sowie vor allem radial einstellende Fahrwerke kann das Auftreten von Kurvengeräuschen vermindert werden. Radschallabsorber führen ebenfalls zu einer Minderung der Geräusche in der Kurve. Eine weitere effektive Minderungsmaßnahme gegen Kurvengeräusche ist die fahrzeugseitige Schmierung der Laufflächen. Eine Schmierung kann hier aber auch infrastrukturseitig durch ortsfeste Konditionieranlagen erfolgen.

Für das Kurvengeräusch sind keine Grenzwerte oder Pegelhöchstwerte in der Literatur vorgegeben. Es werden jedoch folgende maximale Zuschläge auf das Rollgeräusch empfohlen:

- Kurvenfahrt im Bogen mit Radius ≥ 270 m und ≤ 350 m: Zuschlag maximal 4 dB,
- Kurvenfahrt im Bogen mit Radius > 350 m und ≤ 500 m: Zuschlag maximal 2 dB.

5. Überlegungen zu Realisierbarkeit und Kosten einer lärmoptimierten Güterzuglok

Bei der Realisierung einer leisen Lok (Anfahrzugkraft 300 kN, Leistung 6 MW, maximale zulässige Fahrgeschwindigkeit 120 km/h) sind zwei grundsätzliche Methoden zu unterscheiden,

1. Modifizierung einer bestehenden Lokomotive und
2. Konzeption einer neuen leisen Maschine.

Die aktuell, in den vergangenen und nächsten Jahren mit großem Abstand am häufigsten verkaufte elektrisch ab Fahrdraht betriebene Güterzuglok ist die Siemens Vectron Lokomotive. Diese Lok hält nach internen Informationen die TSI Noise gerade eben ein. Zur signifikanten Lärminderung der Vectron Lokomotive ist eine Kombination der oben genannten zwei Prinzipie möglich. Seitens des Kastens mit verschiedenen Aggregaten (diverse Lüfter, Kompressor, Umrichter, Kühlölpumpen) als Lärmquellen wird eine Modifikation (Prinzip 1) in Richtung -5 dB bis -10 dB als machbar angesehen, im Bereich Fahrwerke jedoch nicht. Die Fahrwerke müssen neu konzipiert werden (Prinzip 2). Um auch dort deutlich leiser (-5 dB bis -7 dB) zu werden, müssen die Räder deutlich kleiner werden: 1100 mm oder gar 920 mm Durchmesser. Das Getriebe muss in Hinblick auf den Körperschall vom Radsatz entkoppelt werden, um Radsatz und Gleis nicht stark anzuregen.

Das Getriebe selbst muss aufgrund des kleineren Raddurchmessers ebenfalls im Durchmesser kleiner werden. Allenfalls muss es aus Lärmgründen und wegen des kleineren Großrades zweistufig statt einstufig und leiser ausgeführt werden. Um die Pegelerhöhung in mittleren und kleine Bogenradien moderat ausfallen zu lassen, ist eine Radialeinstellung der Radsätze nötig, um das Quergleiten der Räder stark zu minimieren. Für den Aufwand werden auf Basis eigener Überlegungen für die genannte Vorgehensweise folgende Kosten abgeschätzt:

- Einmalkosten für Konstruktion: 4-7 Mio. CHF
- Einmalkosten für Zulassung: 3-6 Mio. CHF
- Stückmehrkosten je Lok ca. 4 %, also ungefähr 160.000 CHF
bei Serienfertigung (Lokkosten ca. 4 Mio. CHF bei Stückzahlen über 100)

Die Betriebskosten werden kleiner ausfallen, da die Radialeinstellung der Radsätze zu weniger Rad- und Schienenverschleiß und so auch zu kleineren Trassenpreisen in der Schweiz führt.

Als Zeitaufwand werden ca. vier Jahre für die Konstruktion und den Bau angesetzt sowie zwei Jahre für die Zulassung und die Nacharbeiten. Aufgrund des damit mindestens sechs Jahre dauernden Entwicklungs- und Zulassungsprozesses ist es zu empfehlen, rechtzeitig diese Prozesse durch bspw. schärfere Vorgaben an Schallemissionsgrenzwerte anzustoßen. Beispielsweise sollte mit dem Prozess spätestens dann begonnen werden, wenn zu erwarten ist, dass aufgrund des leiser werdenden Wagenmaterials die Bedeutung der Lokomotiven in der Lärmbelastung zunimmt.

6. Fazit und Ausblick

Mit der fortschreitenden Lärminderung bei Güterwagen beispielsweise durch die Umrüstung aus Scheibenbremsen, rücken die Güterzuglokomotiven in den Fokus, da diese höhere Geräuschemissionen als die Güterwagen aufweisen können.

Die Auswertung der Pegelschriebe der Bahnlärm-Monitoringstationen des Bundesamts für Verkehr zeigen, dass die Lokomotiven im Mittel 5 – 10 dB(A) tiefere Ereignispegel aufweisen als Güterwagen mit GG-Sohlen. Alle Lokomotivtypen sind in den untersuchten Situationen aber lauter als Güterwagen mit K-Sohlen. Zwischen den einzelnen Lokomotivtypen gibt es Unterschiede von 5 – 10 dB(A), wobei in der Summe namentlich der hohe Anteil an alten, vergleichsweise lauten Lokomotiven, ins Gewicht fällt. Im ausgewerteten Zeitraum von März 2016 bis Juni 2020 stellten Lokomotiven im Zugverband in der Hälfte der Fälle eine bedeutende Quelle dar und waren in einem Drittel der Güterzüge für den Maximalpegel verantwortlich. Als dominante Quelle im Hinblick auf den Ereignispegel traten sie jedoch nur in rund 5 % der Fälle auf. Hochgerechnet auf einen Betrieb ohne Grauguss-Klotz gebremste Fahrzeuge liegt der Beitrag der Lokomotiven zum Gesamtpegel 10 dB(A) tiefer als derjenige des Wagenanteils. Unter der Berücksichtigung einer 2 m hohen Lärmschutzwand wurde gezeigt, dass für niedrige Fahrgeschwindigkeiten der Anteil der Güterzüge, wo die Lokomotive mit bedeutenden Sekundärquellen die dominante Quelle ist, auf rund einen Fünftel ansteigt. In der Zukunft ist zu erwarten, dass der Anteil der Wagen mit LL-Bremssohlen sinken wird. Diese Wagen weisen in der Regel höhere Schallemissionen auf als die mit anderen Bremssystemen (K-Bremssohlen bzw. Scheibenbremsen), deren Anteil zunehmen wird. Aufgrund dessen und der zu erwartenden Reduktion des Auftretens von Flachstellen an Güterwagen durch deren frühzeitige Erkennung und den vorgesehenen Einsatz der digitalen automatischen Kupplung (DAK) sowie der ep-Bremse, ist zu erwarten, dass die Lokomotive in der Zukunft stärker in den Fokus der Lärminderung rückt. In Anbetracht der aufgezeigten langen Entwicklungszeit einer leiseren Güterzuglokomotive ist es aus diesem Grund zu empfehlen, frühzeitig Vorgaben für zukünftige akustische Anforderungen an diese Lokomotiven festzulegen.

In der Vergangenheit wurden verschiedene Forschungsvorhaben zur Lärminderung von Lokomotiven durchgeführt. Aus denen abgeleitet wurde, welche Mindestanforderungen an Lokomotiven aus akustischer Sicht gestellt werden sollten. Diese sind wie folgt für die einzelnen Komponenten:

- Lüfter:
 - Einsatz von Schalldämpfer bzw. Absorberjalousien,
 - akustisch optimierte Lüfterblätter,
 - akustisch optimierte Betriebszustände.
- Kompressor:
 - Einsatz von Schalldämpfer,
 - situative Ansteuerung,
 - belüftete Kapselung,
 - gute Körperschallisolierung.
- Umrichter:
 - Elektrische Optimierung der Pulsmuster,
 - sekundäre Schallminderungsmaßnahmen.
- Motor:
 - Akustische Optimierung der Ansteuerung,
 - Reduzierung der Abstrahlung des Motorgehäuses.
- Getriebe:
 - Hohe Zahnüberdeckung durch Schrägverzahnung, verringertes Modul und hohe Fertigungsgüte,
 - Reduzierung der Abstrahlung des Getriebegehäuses,
 - Idealerweise: zweistufiges, nicht-achsreitendes Getriebe.
- Bremssystem:
 - (Rad)scheibenbremsen.
- Räder
 - Gerader, ebener Radsteg,
 - Erhöhung der Dämpfung in den Rädern durch bspw. Radschallabsorber,
 - Kleiner Raddurchmesser (z. B. maximal 1100 mm),
 - Radial einstellendes Fahrwerk,
 - Optional: Schallschürzen.

In den letzten 10 Jahren wurde kein Vorhaben gefunden, bei dem Minderungsmaßnahmen an Lokomotiven tiefergehend untersucht wurden. Des Weiteren wurden die Grenzwerte der TSI NOI [2] seit Einführung im Jahr 2006 für die Betriebszustände Anfahr und Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit nur marginal reduziert. Das heißt, die Erkenntnisse der Studie von LUTZENBERGER ET AL [15] aus dem Jahr 2013 zum Stand der Technik u. a. von Elektrolokomotiven gelten weiterhin. Die von LUTZENBERGER ET AL [15] empfohlene systematische Untersuchung von Lärminderungsmaßnahmen an Lokomotiven wurde bisher nicht durchgeführt. Dies erscheint als geboten, da die leiseste Streckenlokomotive, die in der Schweiz verkehrt, weiterhin die vor circa 30 Jahren entwickelte Lok 2000 (Re 460) ist.

Im Wesentlichen anhand der Studie von LUTZENBERGER ET AL [15] sowie der 4. Ausgabe der „Empfehlungen für Anforderungen an Fahrzeuge in Vergabeverfahren“ des deutschen Bundesverbands Schienennahverkehr (BSN) [41] wurden Empfehlungen für zukünftige Grenzwerte abgeleitet. Diese sind in der Tabelle 6-1 zusammengetragen. Es sind nach dem derzeitigen Stand der Technik deutliche Reduzierungen um mindestens 5 dB gegenüber den gültigen TSI NOI Grenzwerte möglich. In vielen Fällen sind die Lärminderungsmaßnahmen kostengünstig umsetzbar. Die größte Reduktion des Außengeräuschs ist jedoch mit einer tiefgreifenden akustischen Optimierung von bestehenden Lokomotivkonzepten unter Beachtung der genannten Mindestanforderungen zu erwarten.

Tabelle 6-1: Zusammenfassung der empfohlenen Grenzwert und Vergleich mit den Werten der TSI NOI [2] sowie Angabe der Geräuscheminderung

Betriebszustand	Messgröße	TSI NOI [2]	Empfehlung	Minderung
Stand				
- bewerteter, äquivalenter Dauerschallpegel der Einheit	$L_{pAeq,T}$	70 dB	61 dB	9 dB
- A-bewerteter, äquivalenter Dauerschallpegel des Hauptkompressors am nächstgelegenen Messpunkt	$L_{pAeq,T}$	75 dB	62 dB	13 dB
- AF-bewerteter Schalldruckpegel impulsförmiger Geräusche des Auslassventils des Lufttrockners am nächstgelegenen Messpunkt	$L_{pAeq,T}$	85 dB	70 dB	15 dB
Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit (Bezugsgeschwindigkeit 80 km/)	$L_{pAeq,Tp}$	84 dB	79 dB	5 dB
Anfahrt	L_{pAFmax}	84 dB	78 dB	6 dB
Bremung	L_{pAFmax}	-	79 dB	

7. Literatur

- [1] Eidgenössische Kommission für Lärmbekämpfung, Hg., Artho, J. *et al.*, „Grenzwerte für Strassen-, Eisenbahn- und Fluglärm: Empfehlungen der Eidgenössischen Kommission für Lärmbekämpfung EKLK“, Bern, 2021.
- [2] *Verordnung (EU) Nr. 1304/2014 der Kommission vom 26. November 2014 über die technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems "Fahrzeuge - Lärm" sowie zur Änderung der Entscheidung 2008/232/EG und Aufhebung des Beschlusses 2011/229/EU: TSI "Fahrzeuge - Lärm"*, 2014.
- [3] Beckenbauer, T. und Attinger, R., „Erfolg und Perspektiven der Lärminderung bei Güterzügen in der Schweiz“ in *Bahnakustik, Infrastruktur, Fahrzeuge, Betrieb*, 6. Fachtagung, München, 2021, S. 10–20.
- [4] Google LLC, *Google Scholar*. [Online]. Verfügbar unter: <https://scholar.google.de/> (Zugriff am: 14. Dezember 2022).
- [5] Springer Nature Switzerland AG, *Springer Link*. [Online]. Verfügbar unter: <https://link.springer.com/> (Zugriff am: 14. Dezember 2022).
- [6] Schulte-Werning, B. *et al.*, Hg., *Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems. Proceedings of the 9th International Workshop on Railway Noise, Munich, Germany, 4-8 September 2007*, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design, Band 99, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.
- [7] Maeda, T. *et al.*, Hg., *Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems. Proceedings of the 10th International Workshop on Railway Noise, Nagahama, Japan, 18-22 October 2010*, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design, Band 118, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2011.
- [8] Nielsen, J. *et al.*, Hg., *Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems. Proceedings of the 11th International Workshop on Railway Noise, Udevalla, Sweden, 9-13 September 2013*, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design, Band 126, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2015.
- [9] Anderson, D. *et al.*, Hg., *Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems: Proceedings of the 12th International Workshop on Railway Noise, 12-16 September 2016, Terrigal, Australia*, Notes on Numerical Fluid Mechanics

- and Multidisciplinary Design, Band 139, Cham, Switzerland: Springer International Publishing AG, 2018.
- [10] Degrande, G. *et al.*, Hg., *Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems: Proceedings of the 13th International Workshop on Railway Noise, 16–20 September 2019, Ghent, Belgium*, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design, Band 150, Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2021.
- [11] Technischen Universität Berlin, *Universitätsbibliothek der Technischen Universität Berlin*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.tu.berlin/ub/> (Zugriff am: 14. Dezember 2022).
- [12] Georg Siemens Verlag GmbH & Co. KG, *ZEVRail Archiv*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.zevrail.de/archiv> (Zugriff am: 14. Dezember 2022).
- [13] DVV Media Group GmbH, *Eurailpress Archiv*. [Online]. Verfügbar unter: <https://eurailpress-archiv.de/> (Zugriff am: 14. Dezember 2022).
- [14] Elsevier B.V., *Journal of Sound and Vibration*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/journal/journal-of-sound-and-vibration> (Zugriff am: 14. Dezember 2022).
- [15] Umweltbundesamt, Hg., Lutzenberger, S. und Gutmann, C., „Ermittlung des Standes der Technik der Geräuschemissionen europäischer Schienenfahrzeuge und deren Lärminderungspotenzial mit Darstellung von Best-Practice-Beispielen“, Müller-BBM GmbH, 2013. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4441.pdf> (Zugriff am: 14. Dezember 2022).
- [16] Weidmann, U., Hecht, M. und Maibach, M., „Stand der Forschung und Forschungsbedarf im Bereich Eisenbahnlärm“, ETH Zürich, 2015. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.aramis.admin.ch/Dokument.aspx?DocumentID=35230> (Zugriff am: 14. Dezember 2022).
- [17] Umweltbundesamt, Hg., Mitusch, K. *et al.*, „Strategien zur effektiven Minderung des Schienengüterverkehrslärms: Endbericht“, Dessau-Roßlau, TEXTE 19/2017, März 2017. [Online]. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-03-08_texte_19-2017_minderung-schienengueterverkehrs-laerm.pdf.

- [18] Lutzenberger, S., Stiebel, D., Gerbig, C. und Wettschureck, R. G., „Luftschall aus dem Schienenverkehr“ in Müller, G. und Möser, M., Hg., *Luftschall aus dem Schienenverkehr. Fachwissen Technische Akustik*, Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2017.
- [19] Müller, R., Leibundgut, D., Stallaert, B., Pesqueux, L. und Ekblad, A., „RIVAS (Railway Induced Vibration Abatement Solutions) Collaborative project Deliverable D2.9: Validation of wheel maintenance measures on the rolling stock for reduced excitation of ground vibration“, 2013.
- [20] Hecht, M., „Grundlagen der Fahrzeugtechnik: Akustik“ in Schindler, C., Hg., *Handbuch Schienenfahrzeuge: Entwicklung, Produktion, Instandhaltung*, 1 Aufl., Hamburg: DVV Media Group, 2014, S. 154–182.
- [21] Hammer, W. und Thoma, C., „Vectron – Die neue Lokomotivengeneration für den europäischen Schienenverkehr“, 40. Tagung "Moderne Schienenfahrzeuge", Graz, 2011. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.schienenfahrzeugtagung.at/download/PDF2011/4-Thoma.pdf> (Zugriff am: 14. Dezember 2022).
- [22] Sehu, D. et al., „sonRAIL - Projektdokumentation“, Empa et al., 7. Okt. 2010. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.empa.ch/documents/56129/160826/son-Rail-projektdokumentation.pdf/f036553f-80c8-4b87-bc74-ead535ea29ab> (Zugriff am: 16. Dezember 2022).
- [23] Czolbe, C., „Schallminderungsmaßnahmen an Schienenfahrzeugen: Analyse unterschiedlicher Strategien zur Geräuschminderung an Schienenfahrzeugen im Innenraum und Außenbereich für Neukonstruktion und Modernisierung“. Dissertation, Fachgebiet Schienenfahrzeuge, Technische Universität Berlin, Berlin, 2010.
- [24] Hecht, M. und Czolbe, C., „Lärminderungsmaßnahmen an drei Großdieselloks vom Typ BlueTiger“, 2008. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltinnovationsprogramm.de/projekte/laermminderungs-massnahmen-drei-grossdieselloks-vom-typ-blue-tiger> (Zugriff am: 14. Dezember 2022).
- [25] Czolbe, C. und Hecht, M., „Noise Reduction Measures at Freight Train locomotives „Blue Tiger““ in *10th International Workshop on Railway Noise*, München, Deutschland, 2008, S. 412–418.

- [26] Bamberger, K., Carolus, T., Mauch, U. und Knirsch, S., „Aerodynamic and acoustic optimization of axial fans for locomotive cooling systems: Proceedings of ASME Turbo Expo 2013, GT2013, June 3-7, 2013, San Antonio, Texas, USA“, Bericht GT2013 - 94157, 2013. [Online]. Verfügbar unter: <https://asmedigitalcollection.asme.org/GT/proceedings-abstract/GT2013/55188/V004T10A002/247324> (Zugriff am: 14. Dezember 2022).
- [27] Bay, K., Brandstät, P. und Rambausek, N., „Minderung der Lüftungsgeräusche einer E-Lok BR-182“, *IBP-Mitteilung 448*, Band 31, 2004.
- [28] Müller, F., „Forschungsverbund Leiser Verkehr, Verbundprojekt 4000 Leise Züge und Trassen, Teilprojekt 4200 Antriebsgeräusche: AP 4220: Minderung der Lüftungsgeräusche angetriebener Schienenfahrzeuge: Schlussbericht gemäß NKBF 98“, 2004.
- [29] Hecht, M., „Schienenfahrzeuge: Kennzeichen moderner Schienenfahrzeuge und Komponenten“ in Jänsch, E., Lang, H. P. und Nießen, N., Hg., *Das System Bahn: Handbuch*, 3 Aufl. Leverkusen, Deutschland: PMC Media House GmbH, 2021, S. 528–564.
- [30] Assmann, G., Kipp, T., Linner, M. und Mikolcic, J., „Intelligent Air Control - Effektive Lärmreduzierung mit variabler Kompressorsteuerung“, *ZEVrail*, Band 141, 11/12, 2017.
- [31] *ISO 9614-2:1996, Acoustics - Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity - Part 2: Measurement by scanning (ISO 9614-2:1996)*.
- [32] Baschanov, D. und Böttcher, P., „Performance Improvement for Vehicles On Track (PIVOT): D4.3 New Materials, Methods and Manufacturing Processes of Wheel“, Bericht PIVOT-WP4.3 -D-SIE-035, 2019.
- [33] Hecht, M. und Zogg, H., „Lärmdesign moderner Triebfahrzeuge am Beispiel der Lok 2000-Familie: Anwendung von Telemetrie, Intensitäts- und Arraymeßtechnik“, *ZEV + DET GLASERS ANNALEN*, Band 119, 9/10, S. 463–472, 1995.
- [34] Baumgärtel, Y. *et al.*, „Innovative technical solutions for improved train DYNAMics and operation of longer FREIGHT Trains (DYNAFREIGHT): D2.2 Noise reduction on freight locomotive bogies“, Bericht DYF-WP02-D-UNI-007-01, 2018.

- [Online]. Verfügbar unter: <https://projects.shift2rail.org/download.aspx?id=ea989dc6-c9ba-472a-b6e2-0720797274c4> (Zugriff am: 29. März 2023).
- [35] Hecht, M. und Kühn, B., „Lärmarme Umrichter- und Fahrmotorventilation der SBB Re 460“, *Schweizer Eisenbahn-Revue*, Nr. 9, S. 396–399, 1993.
- [36] ProRail, DB Netz AG, BAV Bundesamt für Verkehr und ÖBB-Infrastruktur AG, *Single-Entry-Point - SEP: Lärmschutz für den europäischen Güterverkehr*. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.sep-silentwagon.info/> (Zugriff am: 14. Dezember 2022).
- [37] Bundesamt für Verkehr, Hg., „Monitoring Eisenbahnlärm: Jahresbericht 2021, 1. Januar - 31. Dezember 2021“, Bern, 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bav.admin.ch/dam/bav/de/dokumente/verkehrstraeger/eisenbahn/laermsanierung/monitoring-jahresbericht-2021.pdf.download.pdf/Monitoring%20Jahresbericht_2021.pdf (Zugriff am: 29. März 2023).
- [38] Thron, T. und Hecht, M., Hg., *The sonRAIL emission model for railway noise in Switzerland*, Band 96, 2010.
- [39] *ISO 3095:2013, Acoustics - Railway applications - Measurement of noise emitted by railbound vehicles*, 2013.
- [40] MineTrack, „Data Mining on Railway Track Noise Measurements (Vertragsnummer BAFU 1337000489)“.
- [41] Bundesverband SchienenNahverkehr e. V., Hg., „Fahrzeugempfehlungen des BSN: Empfehlungen für Anforderungen an Fahrzeuge in Vergabeverfahren für Mitglieder des Bundesverbands Schienen- Nahverkehr e.V. (BSN), 4. Ausgabe“, Berlin, 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.schienenahverkehr.de/wp-content/uploads/2023/02/2023-01-31-4.-Ausgabe-BSN-Fahrzeugempfehlungen.pdf> (Zugriff am: 29. März 2023).
- [42] *Durchführungsverordnung (EU) 2019/774 der Kommission vom 16. Mai zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 1304/2014 in Bezug auf die Anwendung der technischen Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Fahrzeuge — Lärm“ auf Bestandsgüterwagen: Änderung der TSI "Fahrzeuge - Lärm" (NOI)*, 2019.

-
- [43] European Union Agency for Railways, Hg., „Recommendation ERA 1175-1218 of the European Union Agency for Railways: The TSI revision package 2022 - Digital Rail and Green Freight“, Valenciennes Cedex, Frankreich, 30. Juni 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.era.europa.eu/content/recommendation-era1175-1218-european-union-agency-railways-tsi-package-2022-relating_en (Zugriff am: 14. Dezember 2022).
- [44] Berliner Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz, Hg., „Nahverkehrsplan Berlin 2019–2023“, Berlin, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.berlin.de/sen/uvk/verkehr/verkehrsplanung/oeffentlicher-personen-nahverkehr/nahverkehrsplan/> (Zugriff am: 14. Dezember 2022).

8. Anhang

8.1 Ergänzungen zu Abschnitt 3.2: Konsequenzen des Aussortierens von Zügen mit Wagen mit Graugussbremsen

Dieser Anhang dient dem Vergleich von den zwei in Abschnitt 3.2 gebildeten Gruppen von Zügen. Die erste Gruppe beinhaltet alle Güterzüge, bei der zweiten wurden alle Züge aussortiert, welche mindestens einen Wagen mit Graugussbremsen oder unbekannter Bremsart beinhalten.

8.1.1 Geschwindigkeit

Die Geschwindigkeit hat einen direkten Einfluss auf die Schallemissionen, deshalb ist es für einen akustischen Vergleich beider Gruppen wichtig, dass die gefahrenen Geschwindigkeiten ähnlich verteilt sind. Wie sich Abbildung 8-1 entnehmen lässt, ist dies der Fall. Auffällig ist, dass Güterwagen aussortiert werden, welche mit über 120 km/h fahren. Durch auslesen der Zugnummer konnte bestätigt werden, dass es sich dabei um Postzüge handelt. Vermutlich sind diese Züge, da sie nur national verkehren, nicht in der Silent Wagon Database vertreten, und ihr Bremstyp war deshalb zum Zeitpunkt der Untersuchung unbekannt.

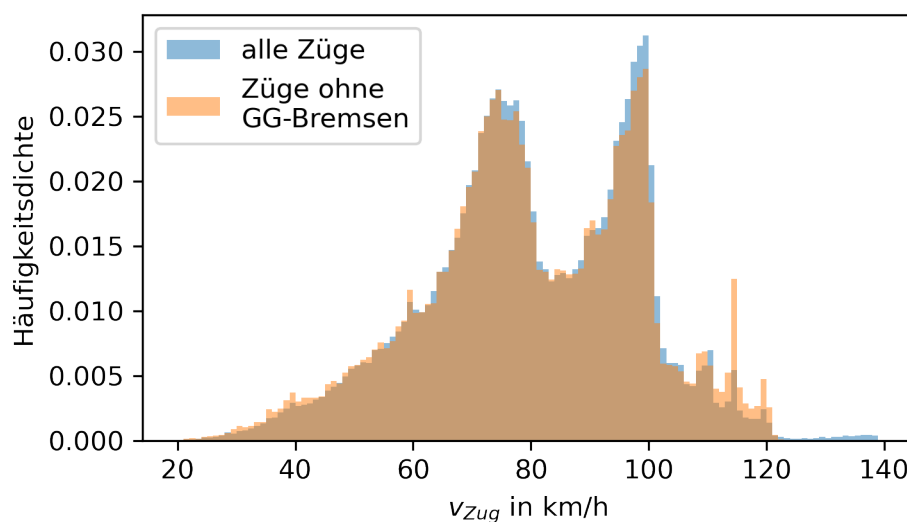


Abbildung 8-1: Verteilung der gefahrenen, jeweils über die ganze Länge gemittelten Geschwindigkeiten der Züge.

8.1.2 Zusammensetzung der Züge

Weitere Einseitigkeiten bei der Betrachtung der Ereignispegel beider Gruppen könne durch eine Veränderung der Zusammensetzung der Züge entstehen. In Abbildung 8-2 ist der Anteil der verbleibenden Fahrten pro Lokomotivtyp aufgelistet. Abbildung 8-3 zeigt dasselbe für die Wagentypen. Bei den Lokomotiven verändert sich die Verteilung vor allem zugunsten der Rem476 und zuungunsten der Re486. Beide Lokomotivtypen zusammen kommen aber nur einen Anteil von rund 5 % an allen Fahrten von Lokomotiven. Bei den Wagen fällt auf, dass der Anteil von RoLa-Wagen im Gegensatz zu anderen Wagentypen unverändert bleibt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass für RoLa-Wagen nur eine Bremsart möglich ist (Scheibenbremse), diese also gar nie das Ausschlusskriterium (Graugussbremsen oder unbekannter Bremstyp) erfüllen können. Zudem sind RoLa-Züge homogen, es werden also keine Fahrten ausgeschlossen, weil ein anderer Wagen im Zug das Ausschlusskriterium erfüllt. RoLa-Wagen haben einen Anteil von 6 % an allen Fahrten von Güterwagen. Sie sind also in der zweiten Gruppe von Zügen übervertreten, stellen aber immer noch einen relativ kleinen Anteil an allen Wagen dar.

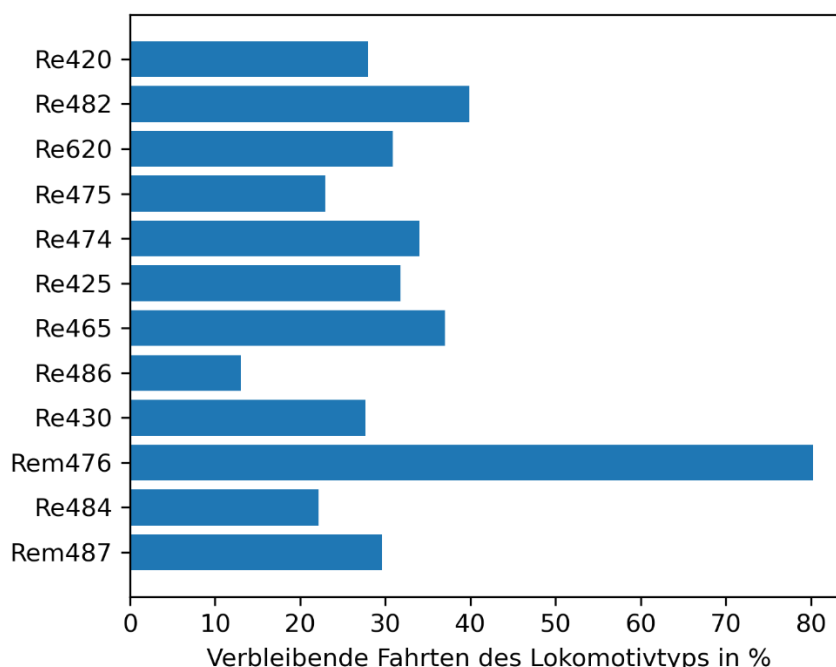


Abbildung 8-2: Anteil der Fahrten je Lokomotivtyp, welcher nach aussortieren der Züge mit Graugussbremsen übrigbleibt. Sortiert nach Häufigkeit des Typs vor dem Aussortieren (von oben nach unten absteigend)

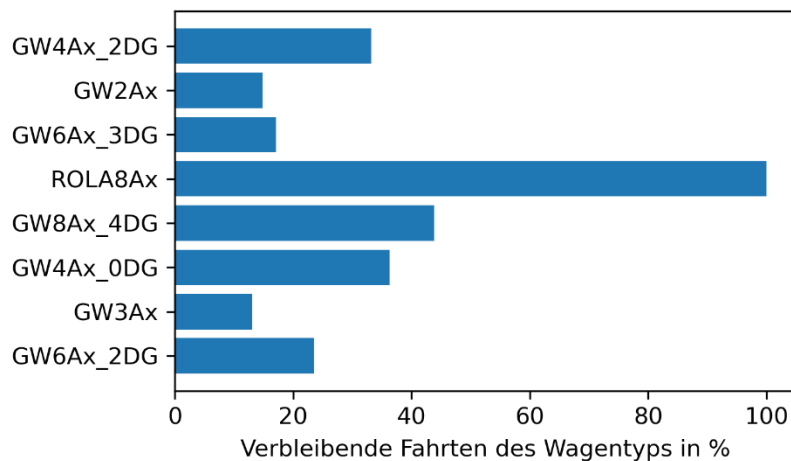


Abbildung 8-3: Anteil der Fahrten je Güterwagentyp, welcher nach aussortieren der Züge mit Graugussbremsen übrigbleibt. Sortiert nach Häufigkeit des Typs vor dem Aussortieren (von oben nach unten absteigend)

Das Aussortieren von Zügen mit Wagen mit Graugussbremsen führt tatsächlich zu einer Veränderung der Häufigkeiten einzelner Lok- und Wagentypen. Diese Veränderung ist jedoch moderat und sollte einen Vergleich der beiden Gruppen nicht verunmöglichen.

8.2 Grundlagen zu Abschnitt 3.4: Ausbreitung hinter Lärmschutzwänden

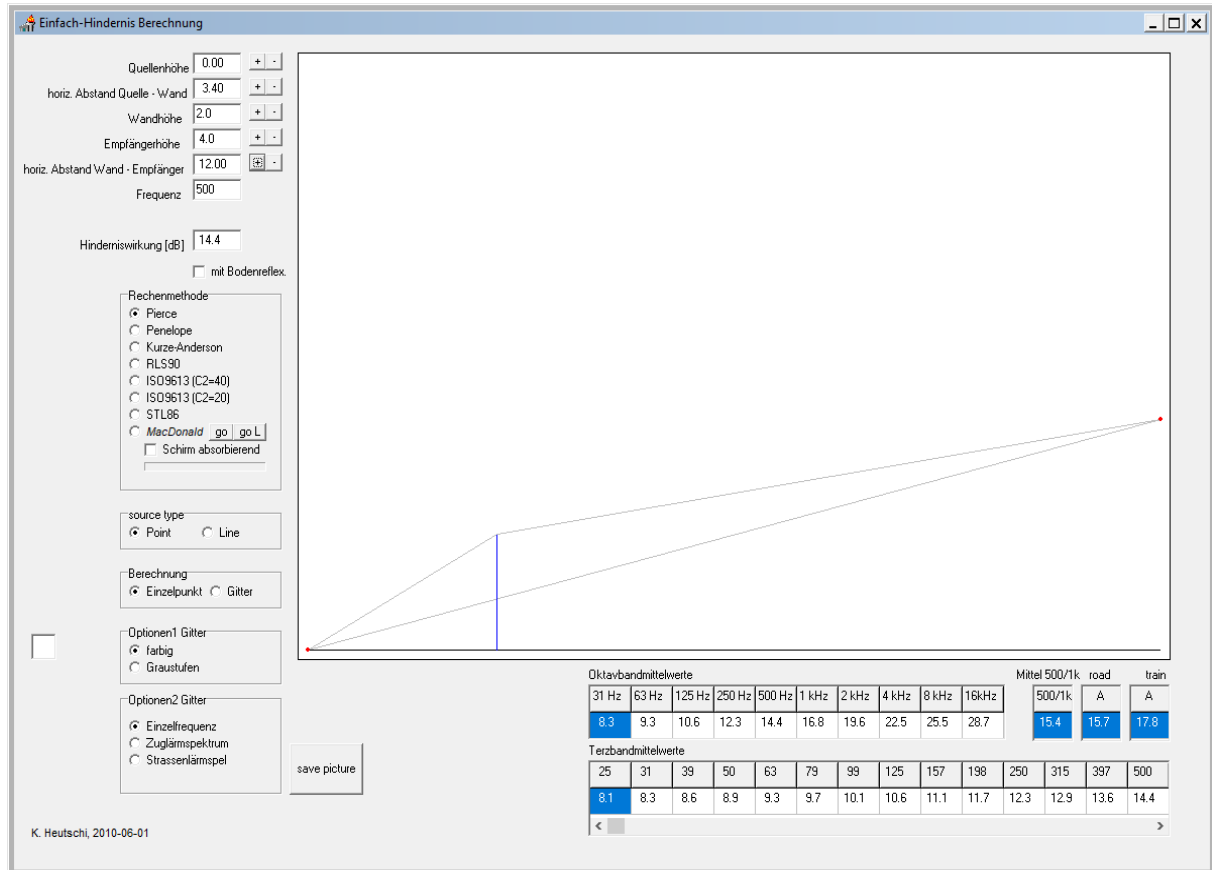


Abbildung 8-4: Berechnung der Hinderniswirkung, nahes Gleis, Quellenhöhe 0,0 m.

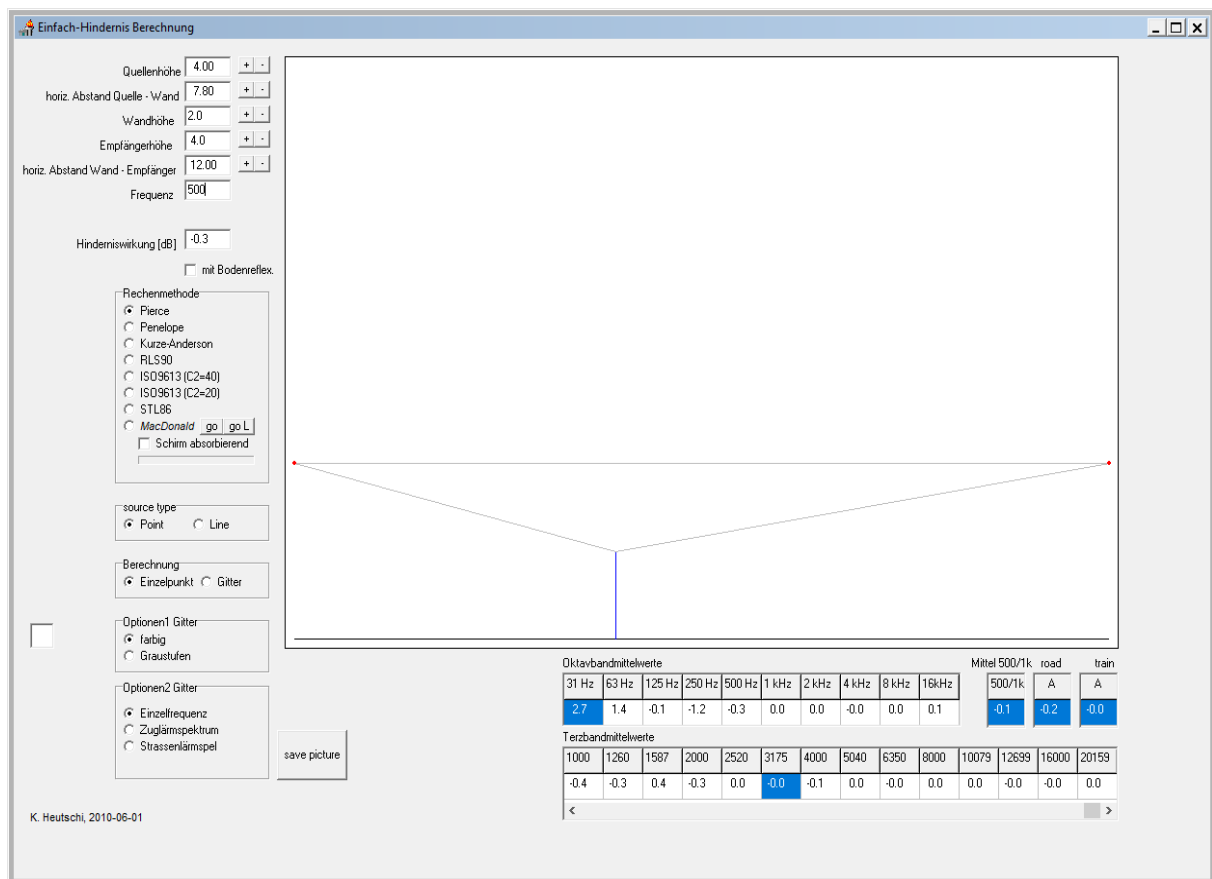


Abbildung 8-5: Berechnung der Hinderniswirkung, fernes Gleis, Quellenhöhe 4.0 m.

Tabelle 8-1: Geometrische Dämpfung, berechnet für das nahe Gleis.

	Q1a	Q2a	Q3a	Q4a	Q5a
X	15.4	15.4	15.4	15.4	15.4
Z	0.0	0.5	2.0	3.0	4.0
Dist-3D	15.9	15.8	15.5	15.4	15.4
Dgeo	15.0	15.0	14.9	14.9	14.9

Tabelle 8-2: Geometrische Dämpfung, berechnet für das ferne Gleis.

	Q1b	Q2b	Q3b	Q4b	Q5b
X	19.8	19.8	19.8	19.8	19.8
Z	0.0	0.5	2.0	3.0	4.0
Dist-3D	20.2	20.1	19.9	19.8	19.8
Dgeo	16.1	16.0	16.0	16.0	16.0

**Tabelle 8-3: Spektrale Hinderniswirkung, berechnet für das nahe Gleis.**

Frequenz	LwA 0m	LwA 0.5m	LwA 2m	LwA 3m	LwA 4m
100	10.1	8.8	4.3	1.3	-0.7
125	10.6	9.1	4	0.9	-1.1
160	11.1	9.5	3.8	0.4	-1.3
200	11.7	9.9	3.5	-0.1	-1.3
250	12.3	10.3	3.2	-0.6	-0.9
315	12.9	10.8	2.9	-1	0
400	13.6	11.4	2.5	-1.3	0.9
500	14.4	12	2.1	-1.3	0.4
630	15.2	12.6	1.7	-0.9	-0.6
800	16	13.3	1.3	-0.1	0
1000	16.9	14	0.8	0.9	0.1
1250	17.8	14.8	0.3	0.5	0
1600	18.7	15.6	-0.2	-0.6	-0.1
2000	19.6	16.4	-0.7	-0.1	0
2500	20.6	17.3	-1.1	0.2	0.1
3150	21.6	18.2	-1.3	-0.1	0
4000	22.6	19.2	-1.3	-0.1	0
5000	23.6	20.1	-0.8	0	0
6300	24.6	21.1	0.2	0	0
8000	25.6	22.1	1	0	0

**Tabelle 8-4: Spektrale Hinderniswirkung, berechnet für das ferne Gleis.**

Frequenz	LwA 0m	LwA 0.5m	LwA 2m	LwA 3m	LwA 4m
100	7.3	6.4	3.7	1.9	0.5
125	7.4	6.4	3.4	1.5	0
160	7.6	6.5	3.1	1	-0.5
200	7.8	6.5	2.7	0.5	-1
250	8	6.6	2.3	0	-1.3
315	8.2	6.7	1.9	-0.5	-1.3
400	8.5	6.7	1.5	-0.9	-1.1
500	8.8	6.8	1	-1.2	-0.3
630	9.1	6.9	0.5	-1.4	0.8
800	9.5	7	0	-1.1	0.8
1000	9.9	7.2	-0.5	-0.4	-0.4
1250	10.4	7.3	-0.9	0.7	-0.3
1600	10.9	7.4	-1.2	0.9	0.4
2000	11.4	7.6	-1.4	-0.3	-0.3
2500	12	7.8	-1.1	-0.4	0
3150	12.7	8	-0.4	0.5	0
4000	13.3	8.3	0.7	-0.3	-0.1
5000	14.1	8.6	0.8	0.1	0
6300	14.8	8.9	-0.4	0	0
8000	15.6	9.2	-0.4	-0.1	0



Tabelle 8-5: Exemplarische Darstellung der Schalleistung gemäss sonRAIL Webtool für die Re 420 bei 50 km/h, Oberbautyp Betonschwelle UIC60 Schiene im Schotterbett ($\Delta L = 0$ dB).

Frequenz	LwA 0m	LwA 0.5m	LwA 2m	LwA 3m	LwA 4m	LwA Roll	LwA Tot
100	75.4	80.5	80.8	73.6	72.1	81.7	84.9
125	81.2	82.4	82.2	73.1	72.4	84.8	87.1
160	87.8	87.5	83.6	79.7	73.4	90.7	91.8
200	90.2	92.1	81.1	78.3	78.2	94.3	94.7
250	91.3	92	84.1	78.5	78.2	94.7	95.2
315	93.8	93.6	88.3	82	79.7	96.7	97.5
400	95.2	95.2	92.8	87.8	83.1	98.2	99.7
500	97.3	100.1	94.8	85.8	81.7	102	102.8
630	96.6	105.6	94.3	87.6	86.1	106.1	106.5
800	91.8	105.2	87.7	89.7	82.6	105.4	105.6
1000	88.7	99.9	94.3	79.1	84.8	100.2	101.3
1250	84	102.2	0.6	82.8	87.1	102.3	102.5
1600	87.2	98.1	100.3	85.8	84	98.4	102.6
2000	91.6	103.4	1.2	88.6	84.3	103.6	103.8
2500	89	99.5	1.3	84.9	84.7	99.9	100.1
3150	89.1	99.7	1.2	87.3	88.8	100.1	100.6
4000	83.7	97.5	1	88	88.6	97.7	98.6
5000	82.8	96	0.5	87.3	86.1	96.2	97.1
6300	79.8	94	-0.1	85.1	79.6	94.1	94.8
8000	76.3	91.1	-1.1	84	82.8	91.2	92.5
LwA	101.8	112.1	103.2	98.0	97.1	112.5	113.2
% an Gesamtpegel	10.8	74.4	9.8	2.9	2.1	85.2	100



Tabelle 8-6: Exemplarische Darstellung des Ereignispegels für die Re 420 bei 50 km/h, nahes Gleis ohne Hinderniswirkung.

LAE 0m	LAE 0.5m	LAE 2m	LAE 3m	LAE 4m	LAE Roll	LAE Tot
60.4	65.5	65.9	58.7	57.2	66.7	69.9
66.2	67.4	67.3	58.2	57.5	69.8	72.1
72.8	72.5	68.7	64.8	58.5	75.7	76.8
75.2	77.1	66.2	63.4	63.3	79.3	79.7
76.3	77.0	69.2	63.6	63.3	79.7	80.2
78.8	78.6	73.4	67.1	64.8	81.7	82.5
80.2	80.2	77.9	72.9	68.2	83.2	84.7
82.3	85.1	79.9	70.9	66.8	86.9	87.8
81.6	90.6	79.4	72.7	71.2	91.1	91.5
76.8	90.2	72.8	74.8	67.7	90.4	90.6
73.7	84.9	79.4	64.2	69.9	85.2	86.4
69.0	87.2	-14.3	67.9	72.2	87.3	87.5
72.2	83.1	85.4	70.9	69.1	83.4	87.7
76.6	88.4	-13.7	73.7	69.4	88.7	88.9
74.0	84.5	-13.6	70.0	69.8	84.9	85.1
74.1	84.7	-13.7	72.4	73.9	85.1	85.6
68.7	82.5	-13.9	73.1	73.7	82.7	83.6
67.8	81.0	-14.4	72.4	71.2	81.2	82.1
64.8	79.0	-15.0	70.2	64.7	79.2	79.8
61.3	76.1	-16.0	69.1	67.9	76.2	77.5
86.8	97.1	88.2	83.1	82.2	97.5	98.2



Tabelle 8-7: Exemplarische Darstellung des Ereignispegels für die Re 420 bei 50 km/h, nahes Gleis mit Hinderniswirkung.

LAE 0m	LAE 0.5m	LAE 2m	LAE 3m	LAE 4m	LAE Roll	LAE Tot
50.3	56.7	61.6	57.4	57.9	57.6	65.0
55.6	58.3	63.3	57.3	58.6	60.2	66.5
61.7	63.0	64.9	64.4	59.8	65.4	70.1
63.5	67.2	62.7	63.5	64.6	68.7	71.6
64.0	66.7	66.0	64.2	64.2	68.6	72.2
65.9	67.8	70.5	68.1	64.8	70.0	74.9
66.6	68.8	75.4	74.2	67.3	70.8	78.9
67.9	73.1	77.8	72.2	66.4	74.2	80.3
66.4	78.0	77.7	73.6	71.8	78.3	82.2
60.8	76.9	71.5	74.9	67.7	77.0	80.0
56.8	70.9	78.6	63.3	69.8	71.1	79.8
51.2	72.4	-14.6	67.4	72.2	72.4	76.0
53.5	67.5	85.6	71.5	69.2	67.7	85.9
57.0	72.0	-13.0	73.8	69.4	72.1	76.9
53.4	67.2	-12.5	69.8	69.7	67.4	73.9
52.5	66.5	-12.4	72.5	73.9	66.7	76.7
46.1	63.3	-12.6	73.2	73.7	63.4	76.7
44.2	60.9	-13.6	72.4	71.2	61.0	75.0
40.2	57.9	-15.2	70.2	64.7	58.0	71.5
35.7	54.0	-17.0	69.1	67.9	54.1	71.6
70.7	82.4	87.9	83.3	82.3	82.7	90.8

Tabelle 8-8: Zusammenfassung der A-bewerteten Schalleistungspegel für Lokomotiven mit bedeutenden Sekundärquellen im Dachbereich und drei Geschwindigkeiten.

1) Schallleistung

Geschwindigkeit: 50 km/h

Baureihe	LwA Tot	LwA Roll	LwA Sek	Δ
Re 420/425	113.2	112.5	105.1	8.2
Re 620	113.5	112.9	105.1	8.5
	113.4	112.7	105.1	8.3

Geschwindigkeit: 80 km/h

Baureihe	LwA Tot	LwA Roll	LwA Sek	Δ
Re 420/425	117.4	117.3	101.1	16.3
Re 620	117.9	117.8	101.1	16.8
	117.7	117.6	101.1	16.6

Geschwindigkeit: 100 km/h

Baureihe	LwA Tot	LwA Roll	LwA Sek	Δ
Re 420/425	119.8	119.8	99.4	20.5
Re 620	113.9	113.8	96.1	17.7
	116.9	116.8	97.8	19.1

Tabelle 8-9: Zusammenfassung der A-bewerteten Ereignispegel im unabgeschirmten Fall für Lokomotiven mit bedeutenden Sekundärquellen im Dachbereich und drei Geschwindigkeiten.

2) Ereignispegel unabgeschirmt, Mittel nahes und fernes Gleis

Geschwindigkeit: 50 km/h

Baureihe	LAE Tot	LAE Roll	LAE Sek	Δ
Re 420/425	97.7	97.0	89.7	8.1
Re 620	98.1	97.4	89.7	8.4
	97.9	97.2	89.7	8.2

Geschwindigkeit: 80 km/h

Baureihe	LAE Tot	LAE Roll	LAE Sek	Δ
Re 420/425	101.9	101.8	85.4	16.5
Re 620	102.4	102.3	85.4	17.0
	102.2	102.1	85.4	16.7

Geschwindigkeit: 100 km/h

Baureihe	LAE Tot	LAE Roll	LAE Sek	Δ
Re 420/425	104.3	104.3	84.3	20.0
Re 620	98.4	98.3	81.3	17.1
	101.4	101.3	82.8	18.5

Tabelle 8-10: Zusammenfassung der A-bewerteten Ereignispegel im abgeschirmten Fall für Lokomotiven mit bedeutenden Sekundärquellen im Dachbereich und drei Geschwindigkeiten. Zusätzlich dargestellt sind die Pegeldifferenzen mit und ohne Wand, getrennt für Roll- und Antriebsgeräusch.

3) Ereignispegel abgeschirmt, Mittel nahes und fernes Gleis

4) Repräsentative Zusatzdämpfung

Geschwindigkeit: 50 km/h

Baureihe	LAE Tot	LAE Roll	LAE Sek	Δ	LAE Tot	LAE Roll	LAE Sek
Re 420/425	91.6	86.8	89.8	1.8			
Re 620	91.7	87.1	89.8	1.9			
	91.6	87.0	89.8	1.8	6.3	10.2	-0.2
					4.0		

Geschwindigkeit: 80 km/h

Baureihe	LAE Tot	LAE Roll	LAE Sek	Δ	LAE Tot	LAE Roll	LAE Sek
Re 420/425	92.5	91.5	85.4	7.1			
Re 620	92.8	91.9	85.4	7.4			
	92.6	91.7	85.4	7.2	9.5	10.4	0.0
					0.8		

Geschwindigkeit: 100 km/h

Baureihe	LAE Tot	LAE Roll	LAE Sek	Δ	LAE Tot	LAE Roll	LAE Sek
Re 420/425	94.4	93.9	84.3	10.1			
Re 620	88.8	87.9	81.3	7.4			
	91.6	90.9	82.8	8.7	9.8	10.4	0.0
					0.6		

Tabelle 8-11: Zusammenfassung der A-bewerteten Schalleistungspegel für Lokomotiven ohne bedeutende Sekundärquellen im Dachbereich und drei Geschwindigkeiten.

1) Schalleistung

Geschwindigkeit: 50 km/h

Baureihe	LwA Tot	LwA Roll	LwA Sek	Δ
Re 460	105.3	105.2	86.9	18.4
Re 474/482	104.8	104.7	88.3	16.5
	105.1	105.0	87.6	17.5

Geschwindigkeit: 80 km/h

Baureihe	LwA Tot	LwA Roll	LwA Sek	Δ
Re 460	111.4	111.3	96.0	15.5
Re 474/482	110.9	110.8	94.2	16.7
	111.2	111.1	95.1	16.1

Geschwindigkeit: 100 km/h

Baureihe	LwA Tot	LwA Roll	LwA Sek	Δ
Re 460	114.4	114.2	99.1	15.2
Re 474/482	113.9	113.8	96.1	17.7
	114.1	114.0	97.6	16.5

Tabelle 8-12: Zusammenfassung der A-bewerteten Ereignispegel im unabgeschirmten Fall für Lokomotiven ohne bedeutende Sekundärquellen im Dachbereich und drei Geschwindigkeiten.

2) Ereignispegel unabgeschirmt, Mittel nahes und fernes Gleis

Geschwindigkeit: 50 km/h

Baureihe	LAE Tot	LAE Roll	LAE Sek	Δ
Re 460	89.8	89.7	72.6	17.2
Re 474/482	89.4	89.3	72.3	17.1
	89.6	89.5	72.4	17.1

Geschwindigkeit: 80 km/h

Baureihe	LAE Tot	LAE Roll	LAE Sek	Δ
Re 460	95.9	95.8	79.7	16.2
Re 474/482	95.4	95.3	78.3	17.1
	95.7	95.6	79.0	16.7

Geschwindigkeit: 100 km/h

Baureihe	LAE Tot	LAE Roll	LAE Sek	Δ
Re 460	98.9	98.8	83.7	15.2
Re 474/482	98.4	98.3	81.3	17.1
	98.6	98.5	82.5	16.2

Tabelle 8-13: Zusammenfassung der A-bewerteten Ereignispegel im abgeschirmten Fall für Lokomotiven ohne bedeutende Sekundärquellen im Dachbereich und drei Geschwindigkeiten. Zusätzlich dargestellt sind die Pegeldifferenzen mit und ohne Wand, getrennt für Roll- und Antriebsgeräusch.

3) Ereignispegel abgeschirmt, Mittel nahes und fernes Gleis

4) Repräsentative Zusatzdämpfung

Geschwindigkeit: 50 km/h

Baureihe	LAE Tot	LAE Roll	LAE Sek	Δ	LAE Tot	LAE Roll	LAE Sek
Re 460	80.1	79.3	72.5	7.6			
Re 474/482	79.8	79.0	72.1	7.7			
	80.0	79.1	72.3	7.6	9.6	10.4	0.1
					0.7		

Geschwindigkeit: 80 km/h

Baureihe	LAE Tot	LAE Roll	LAE Sek	Δ	LAE Tot	LAE Roll	LAE Sek
Re 460	86.4	85.3	79.7	6.7			
Re 474/482	85.8	84.9	78.3	7.5			
	86.1	85.1	79.0	7.1	9.6	10.4	0.0
					0.9		

Geschwindigkeit: 100 km/h

Baureihe	LAE Tot	LAE Roll	LAE Sek	Δ	LAE Tot	LAE Roll	LAE Sek
Re 460	89.6	88.3	83.7	5.9			
Re 474/482	88.8	87.9	81.3	7.4			
	89.2	88.1	82.5	6.7	9.5	10.5	0.0
					1.0		