

Empa
Überlandstrasse 129
CH-8600 Dübendorf
T +41 58 765 11 11
F +41 58 765 11 22
www.empa.ch

Schlussbericht zum Forschungsprojekt MineTrack

(Data Mining on Railway Track Noise Measurements)

Untersuchungsbericht: Empa-Nr. 5211.01856

Anzahl Seiten: 103

Mitarbeit:

Jonas Jäggi, Reto Pieren, Axel Heußer, Kurt Heutschi, Jean Marc Wunderli

Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt – Empa
Dübendorf, 13. Februar 2023

Projektleiter

Abteilungsleiter

Dr. Reto Pieren
Abteilung Akustik / Lärminderung

Dr. Jean Marc Wunderli
Leiter Abteilung Akustik / Lärminderung

Impressum

- Auftraggeber:** Schweizerische Eidgenossenschaft
Bundesämter für Umwelt (BAFU) und Verkehr (BAV)
CH-3003 Bern.
Das BAFU und das BAV sind Ämter des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK)
- Auftragnehmer:** Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung
- Autoren:** Reto Pieren, Jonas Jäggi, Axel Heußner
- Begleitung BAFU / BAV:** Dominik Aeby,
Robert Attinger, Christoph Dürig
- Hinweis:** Dieser Bericht wurde im Auftrag der Bundesämter für Umwelt (BAFU) und Verkehr (BAV) verfasst. Für den Inhalt ist alleine der Auftragnehmer verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	4
2	Auftrag	6
3	Einleitung	7
3.1	Ausgangslage	7
3.2	Problemstellung.....	8
3.3	Lösungsansätze.....	10
4	Datengrundlagen.....	11
4.1	Messdaten der BAV-Monitoringstationen	11
4.2	Daten zum Oberbau.....	12
4.3	Fahrzeugdaten.....	13
5	Analysestrategie	15
5.1	Überblick.....	15
5.2	Aufbereitung der Verkehrsdaten	16
5.3	Aufbereitung der Messdaten (Achsdetektion)	18
5.4	Matching der Datensätze.....	20
5.5	Akustische Analysen.....	25
6	Ergebnisse.....	36
6.1	Untersuchungen von zeitlichen Veränderungen am Oberbau	36
6.2	Untersuchungen an bestimmten Fahrzeugtypen.....	42
6.3	Untersuchungen von zeitlichen Veränderungen an einzelnen Fahrzeugen	52
6.4	Schotterbettiefen	54
6.5	Charakterisierung des Oberbaus	56
7	Schlussfolgerungen.....	77
8	Literaturverzeichnis.....	79
Anhang A	Bezeichnung der Gleise	80
Anhang B	Geschwindigkeitsverteilungen bei direkten Vergleichen von Vorbeifahrtspegeln	82
Anhang C	Spektrale Geräuschemissionen von Lokomotiven	84
Anhang D	Histogramme zur Bestimmung der lokalen Schotterbettiefe.....	86
Anhang E	Akustischer Schottereffekt	92

1 Zusammenfassung

Bahnverkehrslärm ist in der Schweiz nach Strassenverkehrslärm die zweitwichtigste technische Umweltlärmquelle. Die Lärmemissionen hängen primär vom Eisenbahnoberbau, dem Fahrzeug und dessen Betrieb ab. Das Ziel des Forschungsprojekts MineTrack ist es, mehr über die verschiedenen Einflussfaktoren zu erfahren. Dafür wurden die über mehrere Jahre gesammelten Messdaten der BAV-Lärmmonitoringstationen mit Betriebsdaten kombiniert und mittels Data Mining-Methoden analysiert und ausgewertet.

Die Datengrundlage in MineTrack bilden grosse unabhängig erhobene Datensätze aus den Jahren 2016 bis 2020 mit einerseits 2.7 Millionen gemessenen Zugsvorbeifahrten des BAV und andererseits mit 26.6 Millionen Fahrzeug-Signalbefahrungen der SBB. Für diese Daten wurde eine Analysestrategie entwickelt und umgesetzt. Daraus resultierte eine Datenbank, welche die Vorbeifahrtspegel von 3.3 Millionen einzelnen Fahrzeugen und 2.1 Millionen Zügen enthält. Die Hauptherausforderungen bestanden im zuverlässigen und recheneffizienten Matching der Datensätze und in der Datenbereinigung zur Erhöhung der Datenqualität. Dieser Bericht dokumentiert die Datenverarbeitung und präsentiert die Ergebnisse aus den Analysen.

Die Ergebnisse der Untersuchungen betreffen sowohl das Verhalten des Oberbaus als auch der Fahrzeuge. Das Verhalten des Oberbaus wurde über mehrere Jahre akustisch verfolgt. Zwischen den Standorten bestehen Unterschiede, die sich zusätzlich über die Zeit verändern. Als eine Ursache dafür wurde der akustische Effekt des Schienenschleifens an mehreren Stellen nachgewiesen und quantitativ beschrieben. Analysen zum akustischen Schottereffekt, welcher sich als Interferenzmuster in den Messspektren manifestiert, zeigten, dass gewisse Unterschiede zwischen den Standorten durch unterschiedliche Schotterbettstiefen erklärt werden können. Die akustisch wirksamen Schotterbettstiefen konnten modellgestützt aus den Mikrofonsignalen geschätzt werden.

Durch Abgleich mit der Silent Wagon Database wurde der Einfluss von unterschiedlichen Bremssohlen bei Güterwagen untersucht. Im Geschwindigkeitsbereich 90-100 km/h lagen die Ereignispegel pro Achse der LL-gebremsten Wagen rund 3 dB oberhalb der K-gebremsten, und 10 dB unterhalb der GG-gebremsten Wagen. Güterwagen mit Scheibenbremsen weisen gegenüber Wagen mit K-Bremsen eine Reduktion von 2 dB auf. Der Ereignispegel pro Achse von RoLa-Wagen und regulären Güterwagen mit Scheibenbremsen liegt in dieser Geschwindigkeitsklasse sehr nahe beisammen.

Die Vorbeifahrtspegel der vier häufigsten Lokomotivfamilien wurden in Abhängigkeit der Geschwindigkeit verglichen. Es wurden Geschwindigkeitskoeffizienten im Bereich 20-29 dB gefunden, also unterhalb der in der Praxis gängigen 30 dB für Rollgeräusche. Dies ist vermutlich auf zusätzlich bei tiefen Geschwindigkeiten relevante Geräuschquellen von Antrieb und Aggregaten zurückzuführen. Durch eine Geschwindigkeitsnormierung mit 30 dB werden die Emissionen von Lokomotiven, die bei Geschwindigkeiten unterhalb 80 km/h gemessen wurden, daher systematisch überschätzt. Die Unterschiede zwischen den Mittelungspegeln der vier Lokomotivfamilien betragen bis zu 7 dB. Im Mittel konnten die Emissionen des Re420-Lokomotivtyps mit dem sonRAIL-Modell gut reproduziert werden.

Um die Streuung der Messdaten besser zu verstehen, wurden zehn Individuen des Typs Re420 über einen längeren Zeitraum beobachtet. Es wurde ein zeitliches wiederkehrendes Muster in der Emission gefunden mit Variationen um 10 dB, welches vermutlich auf das Wartungsintervall zurückgeführt werden kann. Diese fahrzeugspezifischen zeitlichen Variationen könnten die grosse Streuung zwischen den Fahrzeugen gleichen Typs erklären. Diese Analysen von einzelnen Lokomotiven lassen auf ein bedeutendes Lärminderungspotential bei der Fahrzeugwartung schliessen.

Sowohl der Oberbau als auch die Fahrzeuge ändern ihr akustisches Verhalten über die Zeit. Die Beobachtung, Analyse und Quantifizierung dieser Phänomene lassen sich nicht durch punktuelle Messkampagnen erzielen, sondern erfordern langjährige, detaillierte Messungen an mehreren Standorten, wie dies in den letzten Jahren durch die sechs BAV-Monitoringstationen geschehen ist. Der Betrieb dieser Stationen sollte darum für die kommenden Jahre unbedingt aufrecht erhalten werden, um auch künftige Änderungen insbesondere bei den Fahrzeugen verfolgen zu können. Ausserdem wären Erweiterungen der Sensorik für künftige Analysen nützlich.

2 Auftrag

Ziel des Projektes ist es, anhand von jahrelang gesammelten Daten ein besseres Verständnis der verschiedenen Faktoren, welche die Bahnlärmemissionen beeinflussen, zu erhalten. Das Bundesamt für Umwelt BAFU erteilte der Empa im Juni 2020 folgenden Auftrag: Die existierenden Messdatensätze der BAV-Monitoringstationen sollen mit alternativen Methoden ausgewertet werden. Mittels Data Mining, also der systematischen Anwendung statistischer Methoden auf grosse Datenbestände, sollen neue Querverbindungen zwischen Einflussgrössen erkennbar werden. Die Analyse mehrjähriger Zeitreihen soll es erlauben, Trends in den Oberbaueigenschaften, beispielsweise Veränderungen der Schienenrauigkeiten oder der Steifigkeiten aufzuzeigen und ursächliche Zusammenhänge zu identifizieren. Solche neuen Erkenntnisse sind nach einhelliger Meinung der Arbeitsgruppe sonRAIL wertvoll für die Behörden (BAV und BAFU), für die Bahnbetreiber (SBB) und für die Wissenschaft.

Unter Berücksichtigung genannter Einflussfaktoren soll eine geeignete Auswertestrategie der Rohdaten der BAV-Monitoringstationen erarbeitet und angewendet werden. Die gewonnenen Daten sollen in Bezug zum sonRAIL-Emissionsmodell und den sonRAIL-Messdaten gesetzt und interpretiert werden.

3 Einleitung

3.1 Ausgangslage

Bahnverkehrslärm ist in der Schweiz nach Strassenverkehrslärm die zweitwichtigste technische Umweltlärmquelle. In vielen Situationen wird Bahnlärm durch das Rollgeräusch dominiert. Dieses entsteht durch die dynamische Interaktion von Rad und Schiene und ist darum stark fahrgeschwindigkeitsabhängig. Die dynamischen Kräfte in den Rad-Schiene-Kontaktflächen induzieren Vibrationen in den Strukturen, deren Oberflächen diesen Körperschall als Luftschall abstrahlen. Die dynamischen Kräfte werden durch feine Unebenheiten im Mikrometerbereich auf den Rad- und Schienenlaufflächen hervorgerufen, welche durch die Rad-, respektive Schienenrauheit quantitativ beschrieben werden. Sowohl das Fahrzeug als auch der Eisenbahnoberbau tragen dabei zur Schallabstrahlung massgeblich bei. Auf Seiten des Fahrzeugs sind vor allem die Radsätze und beim Oberbau die Schienen und Schwellen für die Abstrahlung von Körperschall verantwortlich. Die Anteile an der Gesamtemission dieser Komponenten variieren je nach Frequenzbereich, Fahrgeschwindigkeit, Gesamtrauheit, Komponententyp und weiterer Faktoren wie Zwischenlagen.

Um die zeitliche Entwicklung der Lärmemissionen des Bahnverkehrs zu überwachen, betreibt das Bundesamt für Verkehr (BAV) seit dem Jahr 2003 auf dem Schweizer Schienennetz stationäre Lärm-Monitoringstationen [1] und berichtet regelmässig über die Messdaten in Form von öffentlich publizierten Jahresberichten [2][12]. Die Standorte der sechs stationären Monitoringstationen sind in Abbildung 1 dargestellt. An diesen Messstationen werden seit dem Jahr 2016 Zeitverläufe von Schalldruckpegeln und von auf den Schienen angebrachten Achssensoren permanent aufgezeichnet und in einer Datenbank abgelegt. Zusätzlich werden an allen Standorten jährlich seit 2003 Messungen der Oberflächenrauheit und seit 2016 der räumlichen Abklingraten der Schienen (Track Decay Rate, TDR) durchgeführt.

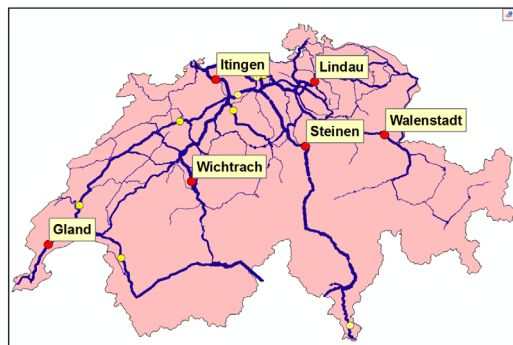


Abbildung 1: Standorte der stationären Monitoringstationen (rote Punkte) (aus [2]).

In den Jahren 2007-2009 wurde im Rahmen des von der Empa geleiteten Projekts sonRAIL ein neues Eisenbahnlärberechnungsmodell für die Schweiz entwickelt [3]. Das resultierende sonRAIL-Emissionsmodell beschreibt den spektralen Einfluss von unterschiedlichen Eisenbahnoberbautypen auf die Schallleistung [4]. Die akustischen Eigenschaften der Oberbautypen wurden innerhalb des sonRAIL-Projekts in drei Messkampagnen ermittelt.

In der Arbeitsgruppe sonRAIL mit Mitgliedern von BAFU, BAV, SBB und der Empa wurde festgestellt, dass es noch immer an Wissen zum akustischen Verhalten von Gleisoberbauten mangelt. Dabei entstand in der Arbeitsgruppe die Idee, die Rohdaten der BAV-Monitoringstationen mit alternativen Methoden auszuwerten und so zur Wissensgewinnung in der Schallquellencharakterisierung zu verwerten.

Mit einer ähnlichen Strategie hat die Empa im Jahr 2018 im EU-Forschungsprojekt DESTINATE einen Auszug dieser Rohdaten ausgewertet [5], jedoch mit dem Ziel einer Bestimmung der Quellstärkenstreuungen von Güterwagen.

3.2 Problemstellung

Das akustische Verhalten des Oberbaus ergibt sich durch die geometrischen und strukturdynamischen Eigenschaften des ganzen Fahrbahnsystems bei der Interaktion mit dem Fahrzeug. Es hängt von vielen Einflussgrößen ab, wovon bislang womöglich gar nicht alle bekannt sind. Das sonRAIL-Emissionsmodell [4] enthält oberbauseitig die Eingabeparameter Schienenrauheit, Schwellen- und Schientyp, wobei letztere als Transferfunktionen einfließen, welche einen Zusammenhang zwischen der effektiven Gesamtraugigkeit und dem Schalleistungspegel herstellen (siehe Abbildung 2).

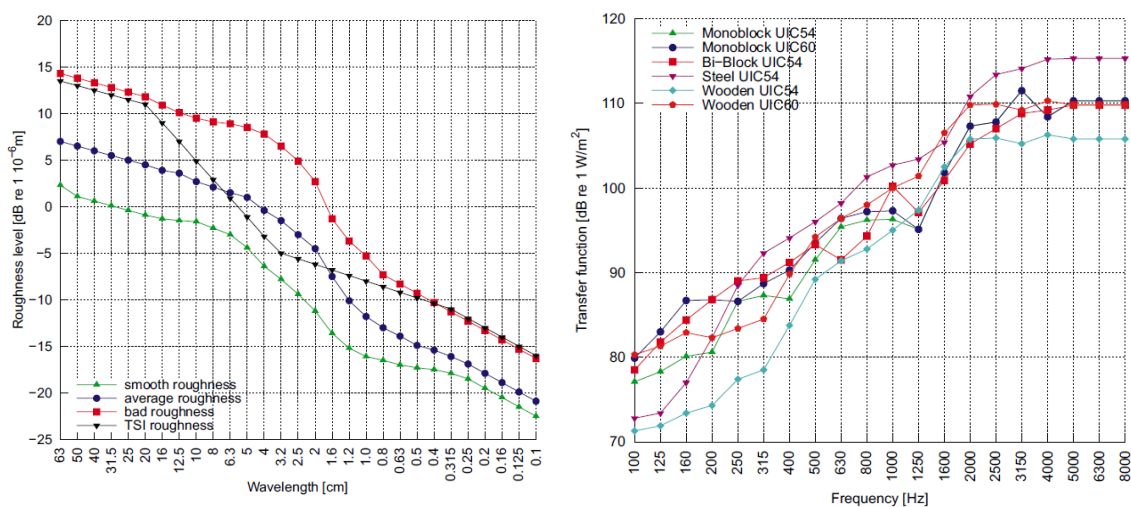


Abbildung 2: Spektrale Setzungen der oberbaubezogenen Standard-Eingabeparameter des sonRAIL-Emissionsmodells (aus [4]).

Im Eisenbahnlärm Monitoring Jahresbericht des BAV für das Jahr 2018 [2] sind exemplarisch Vergleiche von Messungen und sonRAIL-Berechnungen von Personenzug-Vorbeifahrtspegeln gezeigt (siehe Auszug in Abbildung 3). Im Mittel zeigen sich ansprechende Übereinstimmungen, dies jedoch bei markanten Streuungen zwischen den einzelnen Gleisen der Monitoringstationen. Im Bericht wird resümiert, dass auf günstigem Oberbau die A-bewerteten Schalldruckpegel einige Dezibel unterhalb der Modellwerte liegen und dass auf einem akustisch schlechten Oberbau bis zu 10 dB höhere Emissionen gemessen wurden. Die Gründe dafür sind bisher unbekannt. Es stellt sich die Frage, inwiefern die bisherigen Modelleingabeparameter und deren numerische Setzungen das beobachtete akustischen Verhalten zu beschreiben vermögen.

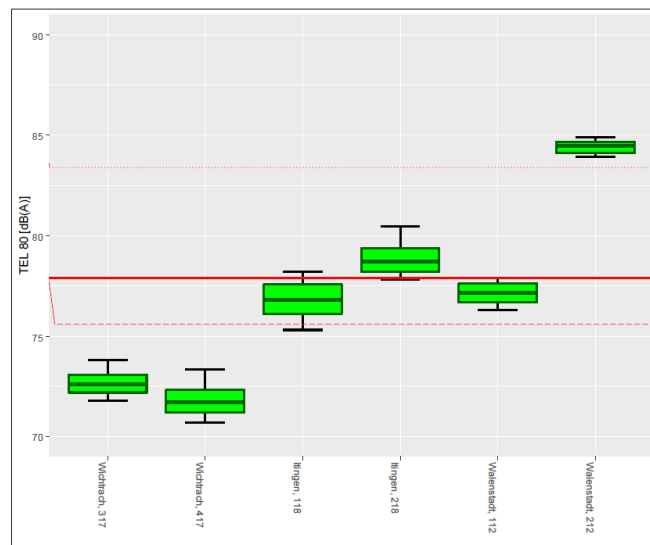


Abbildung 3: Vergleichsbeispiel von Monitoring-Messwerten (Box-Plot) und sonRAIL-Modellrechnungen (rote Linien für drei Schienenrauheitsklassen von sonRAIL) von ICE1-Vorbeifahrtspegeln an beiden Gleisen von drei Monitoringstationen (aus [2]).

Wie in Abbildung 4 zu erkennen ist, führt im Gegensatz zur Messanordnung während des sonRAIL-Projekts der Ausbreitungspfad zum Mikrofon in Normdistanz (7.5 m) jeweils über das Nachbargleis. Es ist davon auszugehen, dass das Schotterbett einen Einfluss auf die gemessenen Schalldruckpegel hat [6][3]. Der akustische Schottereffekt beschreibt das Interferenzmuster zwischen Direktschall und der sich im Schotter ausbreitenden, am Untergrund reflektierten Welle. Wie Abbildung 5 exemplarisch zeigt, ist dieser Effekt von der Schottertiefe abhängig und frequenzabhängig. Der akustische Schottereffekt wurde bisher für die BAV-Monitoringstationen nicht gezielt untersucht.

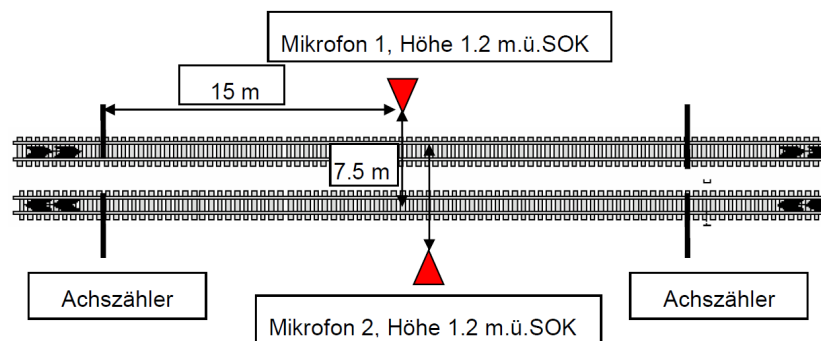


Abbildung 4: Messanordnung bei den fest installierten Monitoringstationen (aus [2]).

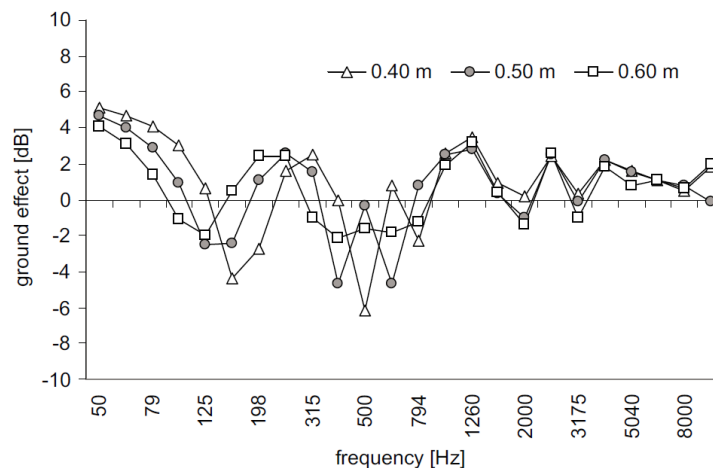


Abbildung 5: Berechnete Bodeneffekt-Spektren für unterschiedliche Schotterbettiefen für einen Standard-Messpunkt in 7.5 m Abstand von der Mitte des nahen Gleises (aus [6]).

Der kombinierte Einfluss des Fahrzeugs und des Oberbaus macht es schwierig, alleine aus beobachteten Schalldruckpegelmessungen Aussagen zum akustischen Verhalten des Oberbaus zu treffen. Folgende Faktoren sind diesbezüglich relevant und sollen darum bei der Entwicklung einer Analysestrategie berücksichtigt werden:

- Das Rauheitsspektrum der Räder als eine der beiden Ursachen der Rollgeräuschenstehung.
- Das mögliche Auftreten von Rad-Flachstellen.
- Der Raddurchmesser und die Achslast.
- Die Fahrgeschwindigkeit, die sich über die Zugsvorbeifahrt am Messpunkt ändern kann.
- Sekundäre Lärmquellen z.B. vom Antriebssystem und Lüftungsaggregaten.
- Abgestrahlter Körperschall der Wagen, primär der Radsätze.

Diese fahrzeugseitigen Einflussfaktoren liegen in den bestehenden Datensätzen nicht direkt zugänglich vor und sind a priori unbekannt.

3.3 Lösungsansätze

Pro Jahr werden von den sechs stationären BAV-Monitoringstationen insgesamt über 500'000 Zugsvorbeifahrten aufgezeichnet und gespeichert. Diese grossen Datensätze erlauben eine rigorose Filterung und ermöglichen statistische Analysen.

Bei den Datenanalysen sollen folgende Lösungsansätze verfolgt werden:

1. Verknüpfung der Vorbeifahrtsdaten mit Fahrzeug- und Infrastrukturdaten
2. Anwendung von Methoden des Data Mining
3. Quantifizierung des akustischen Schottereffekts
4. Nutzung beider Mikrofonsignale pro Standort
5. Spektrale Auswertungen und Vergleiche (im Gegensatz zu A-Pegel-Betrachtungen)
6. Berücksichtigung der dynamischen Zugsvorbeifahrtsgeschwindigkeit
7. Analyse von mehrjährigen Zeitreihen am gleichen Standort
8. sonRAIL-Berechnungen mit und ausserhalb der Modell-Standardwerte

4 Datengrundlagen

4.1 Messdaten der BAV-Monitoringstationen

4.1.1 Rohdaten der Vorbeifahrten

Die Hauptdatenquelle für die Analysen besteht in den über mehrere Jahre hinweg aufgezeichneten Rohdaten der sechs stationären BAV-Lärmmonitoringstationen in Wichtrach, Gland, Itingen, Steinen, Walenstadt und Lindau (siehe Karte in Abbildung 1). Diese Messsysteme zeichnen seit 2016 für jede detektierte Zugsvorbeifahrt spektrale Schalldruckpegel-Zeitschriebe auf. Jeder dieser Standorte weist zwei Gleise und Mikrofone auf. Das Gleis und das Mikrofon auf derselben Seite (siehe Abbildung 4) tragen jeweils die gleiche Nummer, was bedeutet, dass das Mikrofon 1 in Normdistanz zu Gleis 2 steht und umgekehrt. Die A-bewerteten Schalldruckpegel beider Mikrofone werden pro Vorbeifahrt in 1/8-Sekunden-Auflösung in Terzbändern in einer HDF5-Containerdatei abgespeichert. Jede HDF5-Datei enthält zudem die zeitsynchronen Rohsignale der vier Achssensoren pro Standort mit einer zeitlichen Auflösung von 50 kHz.

Das BAV hat der Empa für die Analysen 2.7 Millionen HDF5-Dateien (160 GB) des Zeitraums März 2016 bis Juni 2020 (52 Monate) übermittelt und zur Verfügung gestellt.

4.1.2 Vorbeifahrtsdatenbanken

Aggregierte Daten pro Zugsvorbeifahrt sind in einer Microsoft Access-Datenbank jahresweise abgelegt. Diese Informationen wurden von der Firma Müller-BBM aus den Sensordaten der Monitoringstationen ermittelt und beinhalten Angaben wie die Vorbeifahrtsgeschwindigkeit, die Anzahl Achsen und der A-bewertete Vorbeifahrts- und Maximalpegel. Zudem wurde von Müller-BBM für jede Vorbeifahrt durch Abgleich mit einer intern aufgebauten Datenbank der Achsabstände des Rollmaterials der Zugtyp (Güterzug, RoLa oder Personenzug), und bei Personenzügen auch der Wagen- bzw. Lokomotivtyp bestimmt. Pro Jahr liegt eine .accdb-Datei mit einer ungefähren Grösse von 200 MB vor, mit je über einer halben Million Zugsvorbeifahrten (siehe Tabelle 1). Insgesamt liegen für den berücksichtigten Zeitraum 2.7 Millionen Zugsvorbeifahrten vor.

Tabelle 1: Anzahl registrierte Zugsvorbeifahrten für den berücksichtigten Analysezeitraum.

Jahr	Anzahl Zugsvorbeifahrten gemäss Access-Datenbanken
2016	619'483
2017	662'537
2018	528'546
2019	629'104
2020	303'943

4.1.3 Betrieb der Stationen

Angaben zu Ausfällen und Fehlfunktionen der Monitoringstationen liegen in den Jahresberichten 2016 bis 2020 des Betreibers Müller-BBM vor. Es werden pro Standort Perioden und die Gründe für die Ausfälle berichtet, wie z.B. Streckenerneuerung, Wartung, Stromunterbruch, Defekt bei Eichgitterkalibrierung, defekte Mikrofonkabel (Nagetiere), Absturz der Messsoftware, Störsignale an Schienenschalter oder Demontage/Montage der Schienenschalter wegen Schienenschleifens.

4.2 Daten zum Oberbau

4.2.1 Schienenrauheit und -abklingraten

An allen Monitoringstandorten werden einmal jährlich schallrelevante Messungen am Oberbau durchgeführt. Diese Messungen bezwecken die Charakterisierung der dynamischen Eigenschaften des Oberbaus durch Schienenabklingraten (Track Decay Rates, TDR) und die Erhebung der Schienenrauheiten. Aggregierte Resultate dieser Messungen und die Messzeitpunkte sind in den Eisenbahnlärm Monitoring Jahresberichten des BAV [2][12] veröffentlicht.

Das BAV hat der Empa die spektralen TDRs und Schienenrauheiten (Terzbandauflösung) zur Analyse zur Verfügung gestellt. Die direkt gemessenen Schienenrauheitsspektren liegen für die vier Schienen pro Standort für die Jahre 2016 bis 2020 vor. Die lateralen und vertikalen TDRs liegen für die vier Schienen pro Standort für die Jahre 2016 bis 2019 vor. Die spektralen Daten sind in Kapitel 6.5 dieses Berichts zusammengestellt.

4.2.2 Angaben zu Erneuerungen und Unterhalt

Während der Analyseperiode gab es verschiedentlich Änderungen am Oberbau durch Erneuerungen und Unterhalt. Informationen zum Unterhalt sind eher unsicher und lagen im Projekt nicht in guter Qualität vor.

Die vorhandenen Gleisbaupläne der SBB zeigen Unterhaltsarbeiten am Oberbau wie Schienenschleifen, Schienenerneuerung und Stopfung. Diese Angaben sind nur jahresscharf graphisch pro Gleis und Standort abgebildet.

Einige Informationen lassen sich den Monitoring Jahresberichten des BAV und den Jahresberichten des Betreibers Müller-BBM entnehmen. In Lindau gab es von August 2017 bis Mai 2019 umfangreiche Bauarbeiten. In Walenstadt wurde im Januar 2018 der Messquerschnitt verschoben. In Wichtrach wurde im April 2019 die Fahrbahn auf einem Gleis komplett erneuert. In Gland wurde von Juni 2019 bis Juli 2020 der Oberbau erneuert. Grobe Zeitpunkte des Schienenschleifens lassen sich auch zum Teil diesen Berichten entnehmen.

4.2.3 Querschnitte der Geometrie

Aus der Planungsphase der Messstationen liegen für alle Standorte Querprofilpläne im Massstab 1:50 aus dem Jahr 2003 vor. Das Querprofil von Gland ist in Abbildung 6 beispielhaft gezeigt. Zu erkennen ist die Bezeichnung der beiden Gleise und Mikrofone, zusätzlich ist in den Plänen auch die Fahrtrichtung pro Gleis angegeben. Da die Gleisbezeichnungen zwischen den Querprofilplänen, den Monitoring-Jahresberichten und den Messberichten der Schienenrauheit voneinander abweichen, werden die Zuordnungen in Anhang A rekapituliert.

Die Standorte Lindau, Wichtrach und Walenstadt wurden nach deren Erstellung erneuert. Aus der Planungsphase der Fahrbahnumbauten in Lindau und Wichtrach sind Pläne vorhanden. Grobe Informationen zu Umbauten sind in den Monitoring Jahresberichten enthalten.

Die effektiven Geometrien des Gleisoberbaus und die Schotterbettstiefen in den Messquerschnitten über die Jahre sind nicht bekannt.

geschlossen werden kann, dass diese Fahrzeuge zum Zeitpunkt der Fahrt entweder noch nicht umgerüstet waren, oder dass die Umrüstung auf LL-Sohlen erfolgte. Das Feld Fahrzeugtyp enthält bei Personenzug und Lokomotiven die genaue Bezeichnung des Fahrzeugs. Bei Güterzug ist lediglich die Information vorhanden, wie viele Achsen und Drehgestelle der Wagen hat, und ob es sich um einen Wagen der rollenden Landstrasse (RoLa) handelt. Die EVN eines Güterzugs enthält zudem an der fünften Stelle eine Gattungskennzahl, die die Bauart näher beschreibt. Durch die Einbindung der Silent Wagon Database konnte die Typenbezeichnung noch genauer in Erfahrung gebracht werden (siehe Kapitel 4.3.2).

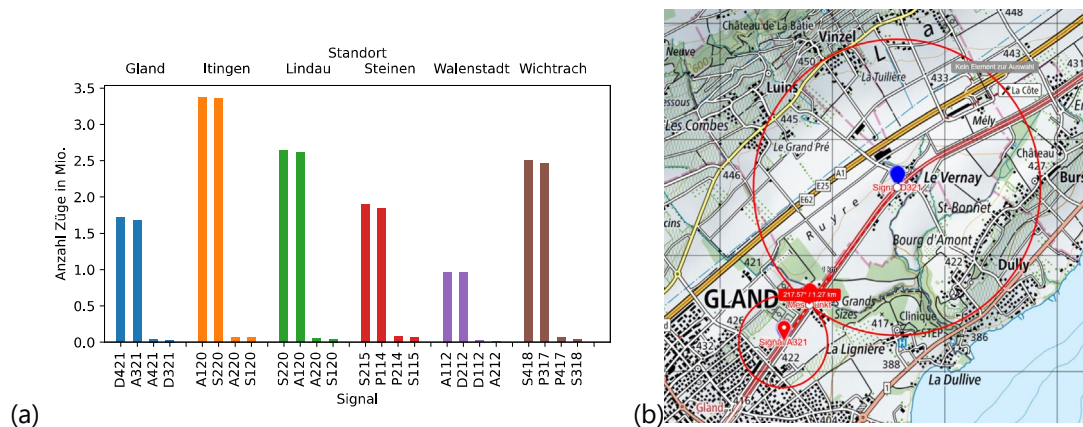


Abbildung 7: (a) Anzahl Zugfahrten pro Signal in der Nähe der Monitoringstationen. Gleiche Farben bedeuten, dass die Signale der gleichen Station zugeordnet sind. (b) Beispielhaft die Situation in Gland mit dem Messquerschnitt zwischen den Signalen A321 (rot) und D321 (blau), wo sich die Kreise berühren.

4.3.2 Silent Wagon Database

Die Silent Wagon Data Base (SWDB) dient der Vereinheitlichung der Bonusanträge für lärmarmes Rollmaterial in der Schweiz, Österreich, Deutschland und den Niederlanden. Die Datenbank enthält Daten zu Wagen, welche mit lärmarmen Bremsen umgerüstet, bzw. neu in Betrieb gesetzt wurden. Mit diesen Daten können die unvollständigen Angaben zu Bremssystemen (siehe Kapitel 4.3.1) komplementiert werden.

Für umgerüstete Güterwagen enthält die SWDB insbesondere Angaben zur Art der Bremssohle nach Umrüstung, zum Datum der Umrüstung sowie dazu, ob es sich um einen auf diese Bremssohle umgerüsteten oder um einen neu in Betrieb gesetzten Wagen handelt. Falls ein Wagen aus dem Verkehr genommen wurde, so ist das Datum der Ausserbetriebnahme vermerkt. Weiterhin enthält die SWDB Angaben zu Gewicht, Länge, Radzahl und –durchmesser. Auch die Bauart der Güterwagen ist genauer definiert als in dem in 4.3.1 beschriebenen Datensatz: Für jeden Wagen ist das Gattungszeichen gemäss UIC vorhanden, ein alphabetischer Code, welcher Aufschluss über die Bauart des Wagens gibt.

Zur Identifizierung der Fahrzeuge dient in der SWDB die EVN (European Vehicle Number). Für Fahrzeuge aus dem Datensatz zu Signalbefahrungen bei den Monitoringstationen, bei welchen die EVN bekannt ist, wurde die SWDB abgefragt und die Daten, falls vorhanden, den Fahrzeugdaten zugeordnet. Dazu wurden auf der Website der SWDB (<http://sep-silentwagon.info>) Batch-Anfragen ausgelöst. Für 85.4 % der Güterwagenfahrten an den Monitoringstationen war ein entsprechender Eintrag in der SWDB vorhanden.

5 Analysestrategie

5.1 Überblick

Die im Projekt entwickelte und nachfolgend erläuterte Analysestrategie orientiert sich am Prinzip des Data Mining und baut auf den Lösungsansätzen aus Kapitel 3.3 und den Datengrundlagen aus Kapitel 4 auf. Die Abbildung 8 illustriert das Vorgehen bei der Datenanalyse und nimmt Bezug auf die entsprechenden Kapitel in diesem Bericht. Die beiden Hauptelemente sind das Zusammenführen von zwei grossen Datensätzen mit mehreren Millionen Einträgen und die Entwicklung von robusten Analysemethoden. In Abbildung 8 sind diese Elemente blau eingefärbt. Diese Kombination erlaubt eine rigorose Filterung der Daten bei gleichzeitig möglichst hoher Datenqualität. Dank der Verarbeitung der akustischen Rohmessdaten und dem Einbezug von bestehenden Akustikmodellen (z.B. sonRAIL [4] oder dem akustischen Schottereffekt, siehe Kapitel 5.5.4) können detaillierte Erkenntnisse zur Frequenzabhängigkeit gewonnen werden.

Die folgenden Kapitel erläutern die wichtigsten Analyseschritte.

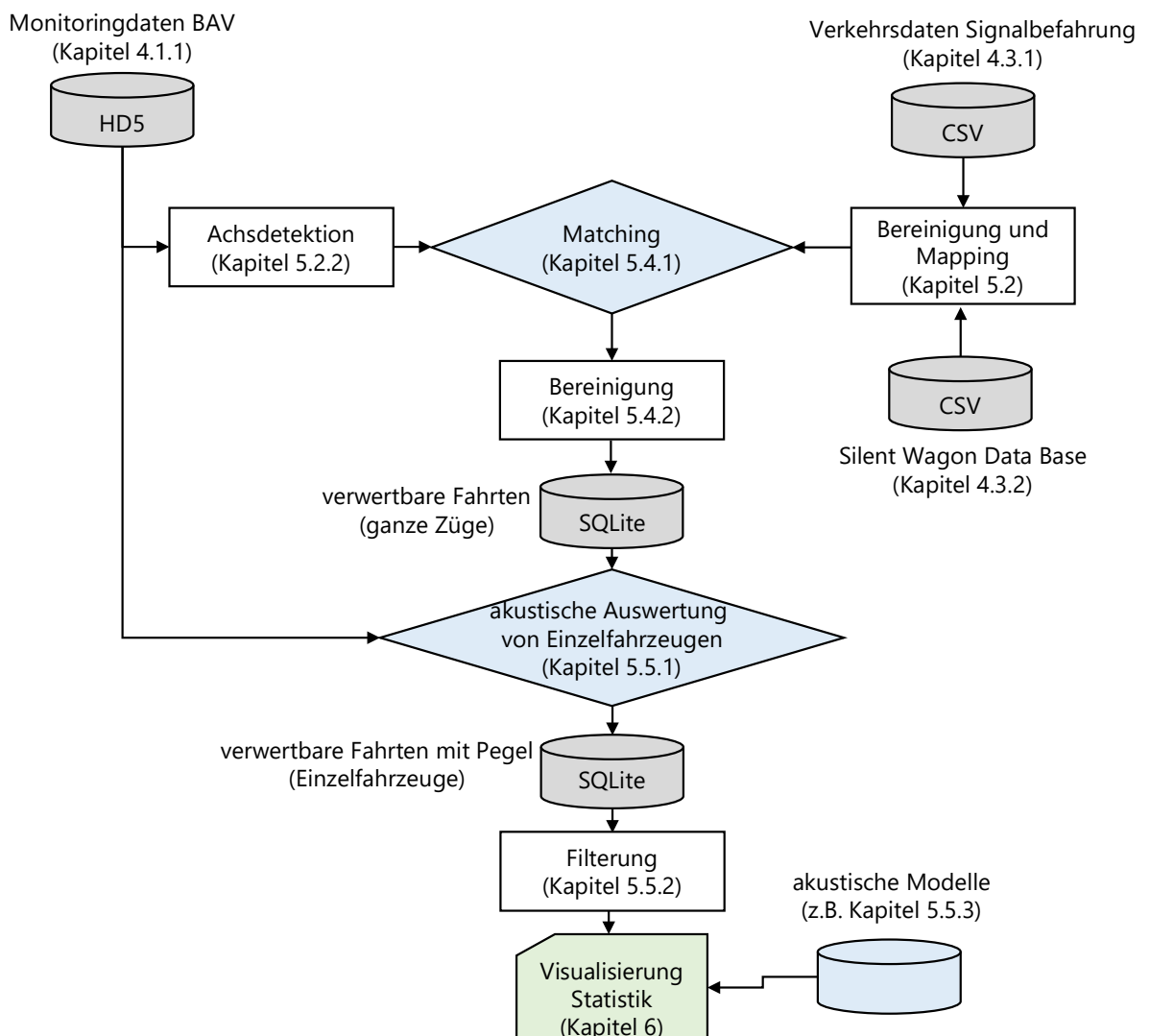


Abbildung 8: Flussdiagramm der Datenanalyse in MineTrack.

5.2 Aufbereitung der Verkehrsdaten

5.2.1 Aufbereitung der Signalbefahrungen

In einem ersten Schritt mussten die in Kapitel 4.3.1 beschriebenen Verkehrsdaten so aufbereitet werden, dass Züge gebildet werden können, welche den jeweiligen Messdaten der Monitoringstationen (siehe Kapitel 4.1.1) zugeordnet werden können. Für eine solche Zuordnung müssen mindestens der Zeitpunkt der Vorbeifahrt und die Anzahl Achsen aller Fahrzeuge im Zug bekannt sein.

Da die Tabelle der Verkehrsdaten für jedes Fahrzeug eine Zeile aufweist, müssen diese zuerst Zügen zugeordnet werden. Als eindeutiges Merkmal für diese Zuordnung erwies sich die Kombination des Zeitstempels mit der ID des Signals. Fahrzeuge im selben Zug weisen den identischen Zeitstempel auf. Alle Fahrzeuge, welche ein Signal zur gleichen Zeit befahren gelten als ein Zug.

Es ergaben sich diverse Herausforderungen bezüglich der Qualität der Verkehrsdaten. Die angetroffenen Probleme und die dazugehörige Lösungsstrategie sind nachfolgend aufgelistet.

Fahrzeuge mit fehlendem Zeitstempel: Bei manchen Einträgen fehlt ein Zeitstempel. Ein Zuordnen zu einem Zug ist dadurch nicht möglich. Diese Einträge wurden entfernt.

Duplikate: Nach dem zusammenfügen von Fahrzeugen zu Zügen kann es vorkommen, dass an derselben Position im Zug zwei Fahrzeuge vorhanden sind. In diesen Fällen sind alle Spalten bis auf "tag" und "id_formation" identisch für beide Fahrzeuge. Dass es sich um Duplikate (und nicht um Fehler in der Nummerierung der Positionen) handelt liegt nahe, denn wären alle Fahrzeuge wirklich in diesem Zug enthalten, so würden Personenzüge von über 400 m Länge entstehen. Solche duplizierten Zeilen wurden deshalb gelöscht.

Fehlende Fahrzeuge in Zug: Die Nummerierung der Fahrzeugpositionen in einem Zug kann Lücken aufweisen. In diesem Fall ist eine erfolgreiche Zuordnung dieses Zuges über die Achszahl nicht mehr möglich. Diese Züge wurden deshalb gelöscht.

Ungültige EVN: Die EVN muss 11 Ziffern aufweisen, zudem bildet die letzte davon die Luhn-Prüfsumme der 10 vorhergehenden. Im Datensatz sind EVN vorhanden, die weniger als 11 Ziffern lang sind. Zudem ist die Prüfsumme bei einigen ungültig. Ungültige EVN wurden auf "unbekannt" gesetzt, die Fahrzeuge aber beibehalten.

Fahrzeugnummer 0: Bei Fahrzeugen mit der Fahrzeugnummer 0 wurde die Fahrzeugnummer auf "unbekannt" gesetzt.

Unterschiedliche Schreibweise des Fahrzeugtyps: Für die gleiche Fahrtyp-ID können unterschiedliche Namen des Fahrzeugtyps vorkommen. Bei Konflikten wurde der Name aus dem Fahrtypenkatalog 2022 der SBB als der gültige betrachtet.

Achszahl 1: Einige Fahrzeuge haben laut Datensatz nur eine Achse. Es handelt sich jeweils um historische Fahrzeugtypen. Da ein Matching der Achsen so unmöglich ist, wurden Züge mit diesen Fahrzeugen gelöscht.

Achszahl 0: Einige Fahrzeuge haben laut Datensatz 0 Achsen. Dies ist offensichtlich falsch. Die korrekte Achszahl konnte mit vertretbarem Aufwand aus der Fahrtypbezeichnung abgeleitet werden. Ist diese nicht bekannt, so wurde das Fahrzeug und der ganze Zug gelöscht, da eine Zuordnung über die Achszahl sowieso nicht möglich wäre.

Widersprüchliche Achszahl für gleichen Fahrzeugtyp: Bei gleichem Fahrzeugtyp können z.T. unterschiedliche Angaben zur Achszahl vorkommen. Dieselben Korrekturen wie bei Fahrzeugen mit 0 Achsen (siehe oben) wurden angewandt.

Identifizierung von Individuen: Die Beziehung von Fahrzeugnummer zu EVN im Datensatz ist vom Typ many-to-many. Es genügt also nicht, Fahrzeuge nach nur einer der beiden zu gruppieren, denn es ist

nicht bekannt, welche der beiden Nummern korrekt ist. Deshalb wurden neue Fahrzeugidentifikatoren für alle Kombinationen {Fahrzeugnummer, EVN} vergeben. Fahrzeugnummer und EVN werden mutmasslich bei Stilllegung oder Besitzerwechsel neu vergeben. Die meisten Widersprüche zwischen Fahrzeugnummer und EVN dürften jedoch von Fehlern bei der Dateneingabe stammen. Um die Gewissheit zu erhöhen, bei welchen Fahrzeugen es sich um ein und dasselbe handelt, wurde jeweils ein neuer Fahrzeugidentifikator für jede Kombination {Fahrzeugnummer, EVN, Fahrzeugtyp} vergeben. Ein Nachteil dieses Vorgehens ist, dass dabei tendenziell mehr Fahrzeugindividuen geschaffen werden, als tatsächlich vorhanden sind.

Mehrfaches Vorkommen desselben Fahrzeugidentifikators im Zug: Manchmal kommt ein Fahrzeugidentifikator an mehreren Positionen im selben Zug vor. Es dürfte sich um inkorrekte Angaben der EVN oder der Fahrzeugnummer handeln. Da die Fahrzeugeigenschaften wohl anhand dieser Identifikatoren in den Datensatz gemapt wurden, verlieren diese an Aussagekraft. Deshalb werden in solchen Fällen sämtliche Angaben für das Fahrzeug bis auf die Achszahl auf "unbekannt" gesetzt.

Heterogene Angaben zu Fahrzeuggewicht und -Länge: Fahrzeuge mit demselben Fahrzeugidentifikator weisen heterogene Angaben zu Gewicht und Länge auf. In den meisten Fällen sind sie auf unterschiedliche Rundung zurückzuführen (z.B. 15 m oder 15.4 m Fahrzeuglänge). Es gibt aber auch grössere Fehler (z.B. dass für ein Fahrzeug des Typs RABe511_8/16 das Gewicht des Typs RABe511_8/24 mit 6 anstelle von 4 Wagen angegeben wird). In ganz seltenen Fällen liegen die Angaben auch um eine Grössenordnung daneben. Zur Vereinheitlichung der Angaben wurde deshalb für alle Fahrzeuge der Wert gesetzt, welcher

- Bei allen Fahrzeugen dieses Typs am häufigsten vorkommt (Lokomotiven, Triebwagenzüge, Personenzüge)
- Bei allen Fahrzeugen mit demselben Identifikator am häufigsten vorkommt (Güterwagen)

Durch die hier genannten Bearbeitungsschritte wurden insgesamt 57'000 Einträge entfernt, was 0.2 % aller Fahrzeuge entspricht.

5.2.2 Bestimmung des Bremstyps aus der SWDB

Da die Angaben zum Bremstyp von Güterwagen im Datensatz der Signalbefahrungen, wie in Kapitel 4.3.1 beschrieben, nicht vollständig sind, wurde in einem zweiten Schritt aus der Silent Wagon Database (siehe Kapitel 4.3.2) der Bremstyp abgeleitet, mit dem das Fahrzeug am Datum der Vorbeifahrt an der Monitoringstation ausgerüstet war. Dies unter Voraussetzung, dass sowohl die EVN in den Fahrzeugdaten als auch die Angaben in der SWDB korrekt sind. Im Folgenden wird der Ablauf beschrieben.

Aus dem Verkehr gezogene Wagen: Bei einer kleinen Zahl von Fahrzeugen lag das Datum der Vorbeifahrt nach dem in der SWDB angegebenen Stilllegungsdatum. Der Grund dafür könnte sein, dass die EVN zwischenzeitlich wieder vergeben wurde, und es sich um ein anderes Fahrzeug handelt. Deshalb wird in diesen Fällen der Bremstyp auf "unbekannt" gesetzt.

Noch nicht lärmsanierte Wagen: Für Wagen, bei denen als Umrüstungsvorgang "retrofitted" angegeben ist, und bei denen das Datum der Vorbeifahrt vor dem angegebenen Datum der Umrüstung liegt, wird davon ausgegangen, dass das Fahrzeug zu dem Zeitpunkt mit Grauguss-Sohlen ausgerüstet war.

Lärmsanierte Wagen: Bei Fahrzeugen, welche als Umrüstungsvorgang "retrofitted" als Eintrag haben, und bei welchen das Datum der Vorbeifahrt nach dem in der SWDB angegebenen Datum der Umrüstung liegt, wird der in der SWDB eingetragene (K, LL oder Scheibenbremse) als der bei der Vorbeifahrt aktuelle Bremstyp angesehen.

Ab Fabrik lärmarme Wagen: Bei Fahrzeugen, welche als Umrüstungsvorgang "noise reduced from new" als Eintrag haben und bei welchen das Datum der Vorbeifahrt nach dem in der SWDB angegebenen Datum der Umrüstung liegt, wird der in der SWDB eingetragene (K, LL oder Scheibenbremse) als der bei der Vorbeifahrt aktuelle Bremstyp angesehen.

Ausnahmen: Weitere mögliche Angaben zum Sanierungsvorgang sind "not noise reduced" und "exempted from noise reduction". Bei letzteren handelt sich dabei um Spezialfahrzeuge mit geringer Laufleistung, die vom BAV eine Ausnahmegewilligung für den weiteren Betrieb mit Grauguss-Sohlen erhalten haben. Für beide Fälle wird der Bremstyp für alle Fahrten dieser Fahrzeuge auf GG-Sohle korrigiert.

5.3 Aufbereitung der Messdaten (Achsdetektion)

Die in Kapitel 4.1.2 beschriebene Datenbank in der uns zur Verfügung gestellten Form enthält zwar Angaben zur wahrscheinlichsten Art des detektierten Zuges, nicht aber zu den Zeitpunkten, an welchen die einzelnen Achsen den Messquerschnitt passierten. Diese Zeitpunkte sind aus mehreren Gründen wichtig für weitere Analysen:

- 1) Durch die Kenntnis der Achszahl einer Zugspassage an den Monitoringstandorten lässt sich diese mit grösserer Sicherheit einem Zug aus dem Datensatz der Signalbefahrungen zuweisen.
- 2) Die Geschwindigkeit der Vorbeifahrt kann auch für einzelne Teile des Zugs bestimmt werden.
- 3) Durch die achsscharfe Bestimmung der Geschwindigkeit lässt sich die Beschleunigung abschätzen.
- 4) Die Schallpegel einzelner Fahrzeuge lassen sich berechnen.

Aus diesen Gründen wurde im Rahmen des Projekts MineTrack ein neuer Algorithmus zur robusten Achsdetektion entwickelt und implementiert. Der Algorithmus detektiert aus den rohen Achssensorsignalen der HDF5-Dateien (siehe Kapitel 4.1.1) die Achspassierzeiten und berücksichtigt explizit folgende Aspekte:

- unstetige Signalverläufe wegen Übersteuerung
- geringe Diskretisierung der Signalamplituden
- grosse Variation zwischen Signalspitzen (starke Variation der Achslasten über Dehnmessstreifen)
- Signalstörungen (fehlerhafte Spitzen)

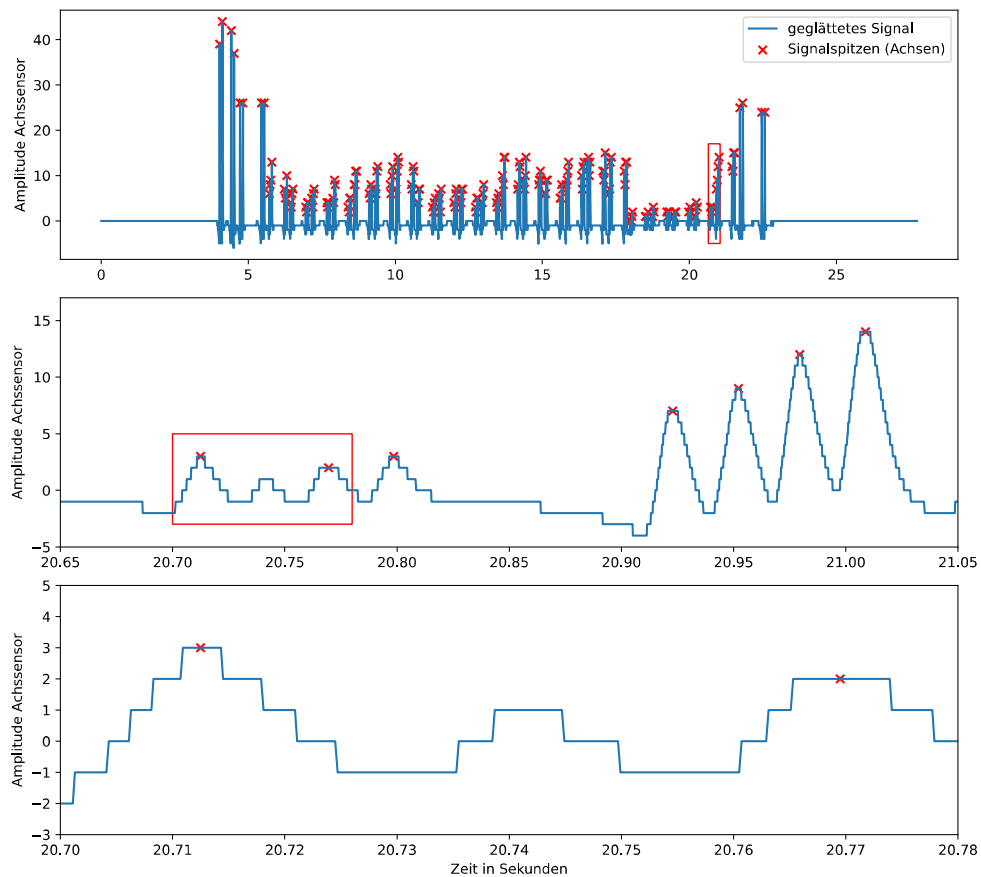


Abbildung 9: Problematik der Achsdetektion am Beispiel des geglätteten Sensorsignals der Vorbeifahrt eines RoLa-Zuges. Der oberste Plot zeigt den Zeitraum der gesamten Vorbeifahrt. Die roten Boxen zeigen jeweils den Zoom-Bereich des Plots darunter. Die roten Kreuze zeigen die lokalen Signalspitzen, welche mit einem Schwellenwert von 3 detektiert wurden. Der unterste Plot zeigt die grobe Amplitudendiskretisierung und dass beim Zeitpunkt 20.74 s bei zu geringem Schwellenwert eine Achse nicht detektiert wird.

Wegen den grossen Datenmengen musste das Verfahren recheneffizient gestaltet und implementiert werden. Es gliedert sich in drei Schritte. Als erstes werden die Signale mit einem nicht-linearen Filter geglättet und deren Abtastrate reduziert. Als zweites werden Unstetigkeiten bei Übersteuerungen detektiert und lokal behoben. Diese Unstetigkeiten führten in früheren Analysen zum Teil zu deutlichen Fehlern bei der Schätzung der Achszahl. Der dritte Schritt ist die Detektion von lokalen Signalspitzen. Über den Messzeitraum wurden die Dehnmesstreifen, die als Achssensoren dienten durch Schienenschalter ersetzt. Erstere weisen einen grossen relevanten Dynamikumfang der Signale auf. Insbesondere bei Zügen der Rollenden Landstrasse (RoLa) ergeben sich durch die Verteilung der Last auf mehrere kleine Räder und die dadurch kleineren Achslasten sehr kleine Signalspitzen pro Achse, welche nur schwer zu detektieren sind. Abbildung 9 zeigt einen solchen Fall. Unsere Analysen haben ergeben, dass nur rund 50 % der RoLa-Züge in den Access-Datenbanken die korrekte Achszahl haben. Da die später eingesetzten Schienenschalter nicht auf Gewichtsunterschiede reagieren, sondern auf die Änderung eines Magnetfelds durch den Spurkranz des Rads, besteht dieses Problem dort nicht. Der hier vorgestellte Algorithmus wurde ohne dieses Hintergrundwissen entwickelt. Durch eine unterschiedliche Behandlung der beiden Sensortypen würden sich vermutlich noch bessere Resultate erzielen lassen.

Um dem grossen Dynamikbereich der Spitzen gerecht zu werden und gleichzeitig robust gegenüber gewissen Signaleigenheiten zu sein, wurden im hier entwickelten Verfahren drei Bedingungen eingeführt:

1. Um zufällige, kurz auftretende Signalspitzen auszuschliessen wird eine Mindestbreite der Spitzen festgelegt.
2. Um vermeintliche Spitzen durch Vorschwingen auszuschliessen wird ein zeitlicher Mindestabstand zwischen lokalen Spitzen gefordert. Dieser orientiert sich am Extremfall eines 12-achsigen Niederflurwagens (UIC-Typ Sdmmrs) mit einem Achsabstand von 70 cm bei 100 km/h, was einen zeitlichen Mindestabstand von 25 ms zwischen zwei Achsen ergibt.
3. Variable Schwellenwertsetzung: Die Berechnung der Spitzen wird pro Vorbeifahrt mit mehreren Schwellenwerten parallelisiert durchgeführt. Pro Vorbeifahrt wird das Ergebnis desjenigen Schwellenwerts gewählt, bei dem die Zeitpunkte der Signalspitzen der beiden Sensoren konsistent sind (siehe folgenden Absatz).

Als zweiter Schritt zur Qualitätssicherung der Achsdetektion wurden 4 Bedingungen an die Konsistenz der Achspassierzeiten der beiden Sensoren (jeweils 15 m vor und nach dem Mikrofon) gestellt:

4. Die Zahl der detektierten Achsen muss an beiden Sensoren gleich sein.
5. Die berechnete Beschleunigung einer Achse zwischen den Sensoren darf $\pm 2.5 \text{ m/s}^2$ nicht überschreiten.
6. Die berechnete Geschwindigkeit einer Achse darf nicht über 200 km/h liegen
7. Die Fahrtrichtung darf sich über den ganzen Zug gesehen nicht invertieren. Dass bedeutet, dass der erste Sensor, der eine Achse detektiert, auch für alle andere Achsen dieses Zuges der erste sein muss.

Die Werte für Punkte 5 und 6 wurden bewusst unrealistisch hoch gesetzt, um die Messunsicherheit zu berücksichtigen. Mit dem in diesem Kapitel beschriebenen Verfahren zur Achsdetektion konnten in den insgesamt 2.72 Mio. Dateien für 2.69 Mio. Zugfahrten die Achszahl unter Berücksichtigung der Bedingungen 1. bis 7. bestimmt werden. Bei Zugskreuzungen können dabei auch zwei Fahrten in einer Datei vorhanden sein.

5.4 Matching der Datensätze

5.4.1 Matching von Monitoring- und Fahrzeugdaten

Eine prozedurale Zuordnung der Züge anhand der Zeitstempel aus den Verkehrsdaten (siehe Kapitel 4.3.1) zu den Ereignissen an den Monitoringstationen (siehe Kapitel 4.1.1) ist aus zwei Gründen nicht möglich. Zum einen gibt es in den Aufzeichnungen der Monitoringstationen Lücken wegen Fehlfunktionen, und aus den Verkehrsdaten mussten, wie in Kapitel 5.2.1 beschrieben, Zugfahrten entfernt werden. Zum anderen zeigte sich, dass die Uhrzeit der Monitoringstationen nicht synchron mit der Uhrzeit der Signale ist. Am Beispiel von Wichtrach ist die Zeitdifferenz zwischen Monitoringstation und Verkehrsdaten in Abbildung 10 gezeigt. Die Unsicherheit der rein zeitbasierten Zuordnung kann teilweise durch die Berücksichtigung der Achszahl wettgemacht werden. Die Zeitdifferenz ist mit mehreren Minuten jedoch gross genug, dass zwei Züge mit derselben Achszahl den Monitoringstandort passieren können. Dieses Risiko besteht vor allem bei Triebwagenzügen im Nahverkehr wie beispielsweise den Zügen der Zürcher S-Bahn. Die Differenzen in der Uhrzeit müssen deshalb für das Matching ebenfalls berücksichtigt werden. Um deren Betrag zu bestimmen, wurde zuerst ein grobes Matching durchgeführt mit der Bedingung, dass während 10 Minuten kein anderer Zug mit derselben Achszahl vorbeifahren darf. Durch Mittelung der Differenz der Zeitstempel dieser Zugfahrten konnte somit für jeden Tag eine Zeitkorrektur berechnet werden. Durch Vergleich der Zeitpunkte der Vorbeifahrten von Zügen, die nach Fahrplan verkehren, konnte bestätigt werden, dass die Uhrzeit im Datensatz der Signalbefahrungen korrekt ist, und dass die Uhr der Monitoringstationen nachgeht. Wie in Abbildung 10 ersichtlich, wurde die Uhrzeit der Monitoringstationen in unregelmässigen Abständen korrigiert. Bei allen Stationen hat sich gezeigt, dass nach einiger Zeit zu einer Korrektur in festen, kürzeren Abständen übergegangen wurde.

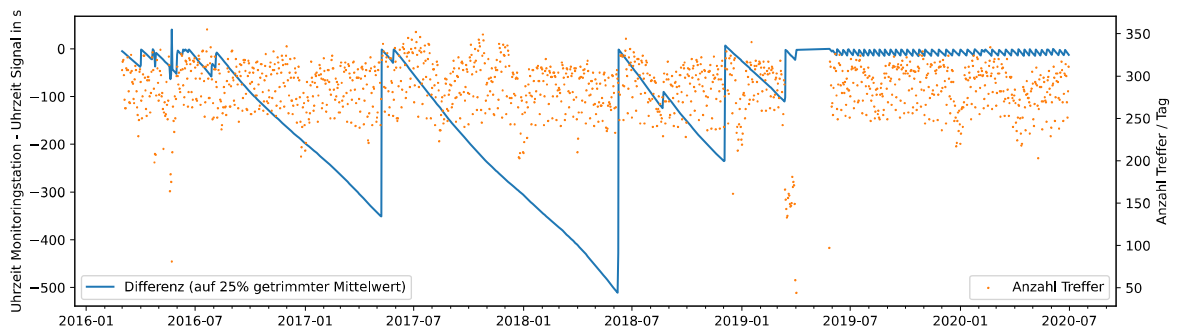


Abbildung 10: Zeitdrift der Monitoringstation in Wichtrach. Die orangen Punkte zeigen die Anzahl Zugzuordnungen (Treffer) pro Tag, welche mit einer Toleranz von ± 10 Minuten erzielt werden konnten. Die blaue Linie zeigt die mittlere tägliche Abweichung der Zeitstempel der Monitoringstation vom Zeitstempel der Signalbefahrung, welche aus diesen Zuordnungen folgt.

Das endgültige Matching verlief ähnlich wie das provisorische zur Feststellung des Zeitdrifts. Zuerst wurde anhand des Zeitstempels an der Monitoringstation, der dort aus der Achsdetektion berechneten Geschwindigkeit und der Distanz zum Signal die theoretische Ankunftszeit des Zuges berechnet. Es wurde dabei von einer konstanten Geschwindigkeit ausgegangen. Auf diese Ankunftszeit wurde die Differenz in der Uhrzeit am betroffenen Tag beaufschlagt. Befand sich, innerhalb eines zeitlichen Toleranzfensters, ein einziger Eintrag mit korrekter Achszahl in den Verkehrsdaten, so wurde dies als erfolgreicher Treffer gewertet. Abbildung 11 zeigt ein Beispiel einer erfolgreichen Zuordnung der Zuginformationen aus den Verkehrsdaten zu der Achsdetektion an der Monitoringstation. Wies kein oder mehr als ein Zug die korrekte Achszahl auf, so wurde das Ereignis nicht zugeordnet. Die Länge des Toleranzfensters wurde pro Monitoringstation manuell so festgelegt, dass möglichst viele Treffer erzielt werden konnten, aber dabei möglichst wenig uneindeutige Situationen mit mehr als einem Treffer entstanden. So war zum Beispiel für den Standort Lindau ein kürzeres Fenster von ± 60 s am erfolgreichsten, da dort eine hohe Frequenz der S-Bahn herrscht. Beim weniger stark befahrenen Standort Gland war jedoch ein Fenster von ± 120 s erfolgreicher, da dort durch die grössere Distanz zwischen Monitoringstation und Signal die Unsicherheit der Voraussage der Ankunftszeit der Züge grösser ist. Zudem wurde das Toleranzfenster um den Zeitdrift des vor- und des nachfolgenden Tages erweitert, da es sich lediglich um den Tagesmittelwert handelt, der genaue Zeitpunkt der Sprünge durch das Nachstellen, wie sie in Abbildung 10 zu erkennen sind, jedoch unbekannt war.

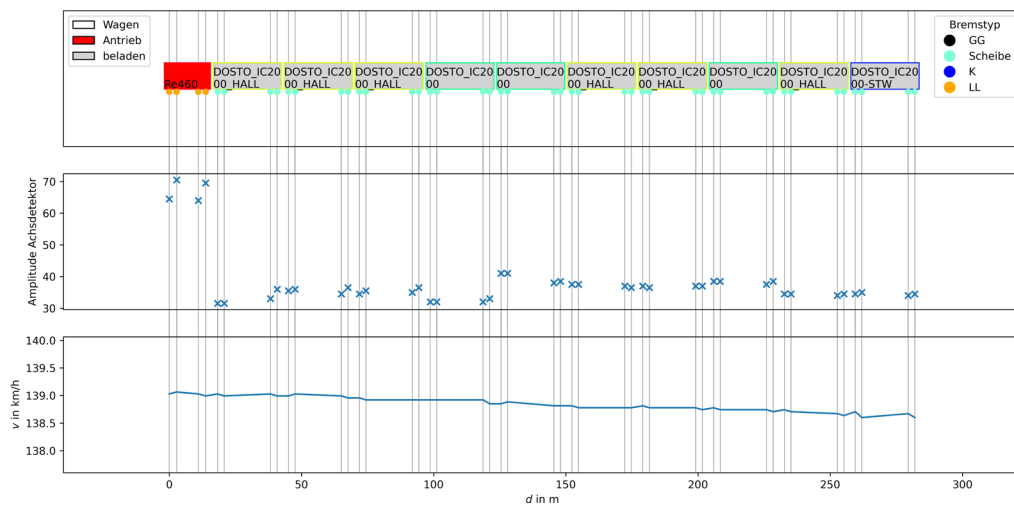


Abbildung 11: Erfolgreiche Zuordnung der Verkehrsdaten zu den Monitoringdaten am Beispiel eines IC-Zuges aus der neu erzeugten SQLite-Datenbank. Der oberste Plot zeigt die Zusammensetzung des Zuges laut Verkehrsdaten. Der mittlere Plot zeigt die Amplitude der Peaks des Signals der Achssensoren. Der unterste Plot zeigt die berechnete Geschwindigkeit jeder Achse.

Das Resultat des Matchings, die zeitliche Zuordnung der einzelnen Achsen der Fahrzeuge aus den Verkehrsdaten zu einem Zeitpunkt in den von den Monitoringstationen aufgezeichneten Ereignissen, wurde zur weiteren Analyse in einer SQLite-Datenbank gespeichert. 94.6 % der Ereignisse mit erfolgreicher Achsdetektion (siehe Kapitel 5.3) konnten auch einer Signalbefahrung aus den Verkehrsdaten zugeordnet werden.

5.4.2 Datenbereinigung

Durch das im vorherigen Kapitel 5.4.1 vorgestellte Matching konnten Züge aus den Verkehrsdaten Ereignissen an den Monitoringstationen zugeordnet werden. Bezüglich der akustischen Analysen dieser Fahrten haben sich jedoch im Verlauf des Projekts einige Hindernisse gezeigt. Eine möglichst grosse Verbesserung der Datenqualität ist anzustreben, denn neben statistischen Betrachtungen über die Gesamtzahl der Ereignisse sind auch speziell leise oder laute Fahrzeuge oder Betriebsformen von Interesse. Zur Analyse von solchen Einzelereignissen muss aber zuerst sichergestellt werden, dass es sich dabei um korrekte Messungen handelt. Es müssen Fahrten aussortiert werden, bei denen Einflüsse von aussen den Schallpegel beeinflussen. Ebenfalls muss sichergestellt werden, dass die Zuordnung der Fahrzeuge zum Pegelschrieb korrekt ist. Wie mutmasslich ungültige Durchfahrten aussortiert wurden, wird in diesem Kapitel dargelegt. Abbildung 12 zeigt die einzelnen Schritte und deren Reihenfolge. Auf die einzelnen Bedingungen (blaue Kästen) wird nachfolgend genauer eingegangen.

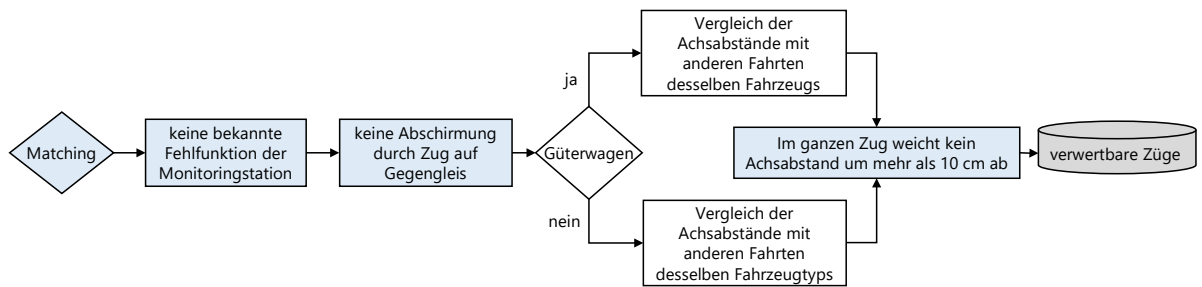


Abbildung 12: Flussdiagramm der Bereinigung der gematchten Zugfahrten.

Bekannte Fehlfunktionen der Monitoringstationen

Es konnten Zeitperioden festgestellt werden, in welchen die Schalldruckpegel viel zu tief waren, oder die Zugzuordnung weniger gut funktionierte. Nach Erhalt der von Müller-BBM verfassten Jahresberichten zum Betrieb der Stationen konnte der Grund jeweils genauer identifiziert und die betreffenden Ereignisse konnten aussortiert werden. Tabelle 2 enthält eine Auflistungen von Störungen, welche das Aussortieren von Ereignissen zur Folge hatten.

Tabelle 2: Zusammenfassung der für die Auswertungen relevanten Störungen der Monitoringstationen. Ereignisse, für welche keine HDF5-Dateien vorliegen, weil keine Aufzeichnung stattfand, sind darin nicht enthalten.

Standort	Von	Bis	Problem	Massnahme
Gland	22.03.2017	27.04.2017	Störungen am Achssensor an Gleis 121 führte zu falsch zugeordneten Zügen	Löschen aller Vorbeifahrten auf Gleis 121 für diesen Zeitraum. Für Gleis 221 sind für diesen Zeitraum keine HDF5-Dateien vorhanden.
Gland	14.08.2018	02.11.2018	Mikrofonkabelunterbruch verursacht durch Nager (nahes Mikrofon Gleis 321)	Die Pegelschriebe von Zügen auf Gleis 421 in diesem Zeitraum wurden nicht verwendet.
Itingen	07.04.2020	01.05.2020	Nahes Mikrofon Gleis 220 hatte Defekt bei Eichgitterkalibrierung	Pegelschriebe von Zügen auf Gleis 120 in diesem Zeitraum wurden nicht verwendet.

Abschirmung durch Zug auf Gegengleis

Die Präsenz eines kreuzenden Zugs ist grundsätzlich unerwünscht, da dies Störgeräusche verursacht. Pegel- und Achsschriebe der Messstationen laufen in der Regel so lange, wie auf mindestens einem Gleis ein Zug vorhanden ist. Sind also in einer Datei Ausschläge der Achssensoren beider Gleise vorhanden, so lässt sich daraus schliessen, dass sich auf beiden Gleisen ein Zug befand. Diese Messungen müssen deshalb ausgeschlossen werden. Zur Sicherheit wurden alle Dateien aussortiert, auf welchen auf beiden Gleisen mindestens ein Peak des Achssensors erkannt wurde.

Aufgrund der im Kapitel 3.2 beschriebenen Anordnung der Mikrofone führt die Anwesenheit eines Zugs auf dem Gegengleis neben Störgeräuschen zusätzlich zu einer Abschirmung. Bei ersten Analysen der Pegelschriebe ergaben sich mehrere Ausreisser mit besonders tiefen Schalldruckpegeln. Durch das manuelle

Durchschauen der vorherigen Messungen konnte erkannt werden, dass in diesen Fällen ein Zug auf dem Gegengleis parkiert war und somit den Schall des fahrenden Zugs abgeschirmt hat. Zur Erkennung von solchen Fällen wurde eine restriktive Vorgehensweise gewählt: Wenn in einer Messung nur einzelne Achsen erkannt wurden, nicht aber eine ganze Vorbeifahrt, welche den Bedingungen 4 – 7 in Kapitel 5.3 entspricht, so wird das Gegengleis als besetzt markiert. Durchfahrten auf dem Gegengleis wurden ab diesem Zeitpunkt so lange nicht akustisch analysiert, bis wieder eine Durchfahrt detektiert wurde, welche den Bedingungen entspricht. Wurde in einer Messung auf keinem der beiden Gleise eine Durchfahrt erkannt, so wurden beide Gleise als potentiell besetzt betrachtet. Dies führte dazu, dass zu Zeitpunkten, wo an einer Monitoringstation ein Achssensor nicht funktionsfähig war, alle Fahrten als ungültig erklärt wurden. Dieses Verhalten ist jedoch erwünscht, denn es lässt sich dann nicht feststellen, ob ein Zug auf dem Gegengleis ist.

Vergleich der Achsabstände mit anderen Fahrten

Nach den bisher genannten Korrekturen fiel beim Betrachten der akustischen Auswertungen (siehe Kapitel 5.5.1) immer noch eine Reihe von Ausreissern auf. Unter vergleichbaren Bedingungen (gleicher Fahrzeugtyp, gleiche Geschwindigkeit, gleiches Gleis) wichen die Pegel zum Teil mehr ab, als durch die Streuung der einzelnen Durchfahrten zu erwarten gewesen wäre. Bei genauerer Analyse der Zuordnung der Schallpegel und der Achsdetektion zu den einzelnen Fahrzeugen fiel auf, dass mehrere Fahrzeuge innerhalb der Zugreihung an der falschen Position waren. Der Grund dafür ist in den meisten Fällen, dass in den Verkehrsdaten zu den Signalbefahrungen Teile der Zugkomposition verdreht sind. Die Achszahl des gesamten Zuges bleibt so weiterhin korrekt, die Zuordnung der Pegel zu den Fahrzeugen ist jedoch falsch, da sich in Wirklichkeit ein anderes Fahrzeug an der Position befindet. Es sind jeweils nur Teile eines Zuges betroffen, während andere Fahrzeuge in der korrekten Reihung sind.

Die falsche Anordnung der Fahrzeuge lässt sich an den Achsabständen erkennen, welche dann in der Regel nicht mehr zur Fahrzeuglänge passen. Ein noch präziseres Vorgehen ist das Abgleichen aller Achsabstände eines Fahrzeugs mit anderen Fahrten desselben Fahrzeugs. Durch die hohe zeitliche Auflösung des Achssignals der Monitoringstationen kann die Position der Achsen mit hoher Präzision bestimmt werden.

Im Fall von Fahrzeugtypen mit genau definiertem Achsmuster (Lokomotiven, Personenwagen, Triebwagenzüge) kann der Achsabstand einer Durchfahrt mit dem Medianwert aller Fahrten dieses Fahrzeugtyps verglichen werden, bei Güterwagen hingegen nur mit dem Medianwert aller Fahrten des gleichen Fahrzeugs. Beträgt die Abweichung des Achsabstandes an mindestens einem Achspaar eines Fahrzeugs in einem Zug mehr als 10 cm, so wurde die gesamte Durchfahrt als ungültig betrachtet. Als weiteres Kriterium wurde gefordert, dass bei einem Zug mit n Fahrzeugen/Fahrzeugtypen bei mindestens $n-1$ Fahrzeugen/Fahrzeugtypen der Achsabstand von mehr als einer Fahrt bekannt sein muss. Es darf sich also höchstens ein völlig unbekanntes Fahrzeug im Zug befinden. Dies ist unproblematisch, weil durch die Überprüfung des Achsabstands der anderen $n-1$ Fahrzeuge eine Vertauschung der Fahrzeuge innerhalb des Zuges ausgeschlossen werden kann.

Nach den in diesem Kapitel beschriebenen Schritten zur Datenbereinigung verbleiben insgesamt 2.08 Millionen verwertbare Zugpassagen (81.7 % der wie in Kapitel 5.4.1 beschrieben gematchten Messungen), die mit einem Pegelzeitverlauf der Monitoringstationen verknüpft sind. Davon betreffen 973'000 Fahrten von Triebwagenzügen, 757'000 Fahrten von Lok-bespannten Personenzügen, 313'000 Fahrten von Lok-bespannten Güterzügen, und 39'000 Fahrten von Lokomotiven ohne Wagen. Bei 51'000 Fahrten ist der Fahrzeugtyp unbekannt.

Tabelle 3: Anzahl verbleibender Zugfahrten nach jeder Etappe in der Bearbeitung und deren Anteil bezüglich der anhand der Achsen detektierten Züge.

Bearbeitungsstufe	Anzahl Züge	Anteil in %	Kapitel
HDF5-Dateien	2'721'898	-	4.1.1
korrekte Achsdetektionen	2'691'897	100.0	5.3
Match mit Verkehrsdaten	2'546'801	94.6	5.4.1
nach Datenbereinigung	2'080'394	77.3	5.4.2

5.5 Akustische Analysen

5.5.1 Analyse der Geräuschemissionen einzelner Züge und Fahrzeuge

Zur Analyse der Vorbeifahrten werden zuerst die passenden Fahrten nach Kriterien wie Standort, Zeitraum, Geschwindigkeit, etc. ausgewählt. Auf eine Geschwindigkeitsnormierung der Schalldruckpegel wie z.B. beim TEL80 kann so verzichtet werden, was die Aussagequalität erhöht. Durch die grosse Datenmenge ist es oft möglich, eine grosse Anzahl von Durchfahrten in einem genügend engen Geschwindigkeitsfenster zu finden, um den wichtigen Einflussfaktor Geschwindigkeit situativ ausschliessen zu können, sowie aber auch Geschwindigkeitseffekte gezielt untersuchen zu können. Ist beim Vergleich mehrerer Fahrzeuge nicht die Geschwindigkeit, sondern ein anderer Parameter (z.B. Bremstyp, Art des Nachbarfahrzeugs, ...) das zu untersuchende Element, so muss sichergestellt werden, dass eventuelle Pegelunterschiede nicht auf Unterschiede in der gefahrenen Geschwindigkeit zurückzuführen sind. Da die zu erwartende Geschwindigkeitsabhängigkeit des Schalldruckpegels selbst bei einer Spanne von nur 10 km/h zu Pegelunterschieden bis zu 1.5 dB betragen kann, sind bei solchen Vergleichen immer die Verteilungen der Geschwindigkeiten aller Gruppen in Anhang B aufgeführt.

Die Berechnung von spektralen Mittelungs- und Ereignispegeln erfolgt durch Integration der Pegelzeitverläufe. Die Integrationsgrenzen werden basierend auf den Achsmustern festgelegt, die vorher wie in Kapitel 5.4.1 beschrieben den Pegelzeitverläufen der Monitoringstationen zugeordnet wurden. Abbildung 1 zeigt ein Beispiel einer solchen Zuordnung für anhand der Vorbeifahrt eines Güterzugs. Die Berechnung des Vorbeifahrtsmittelungspegels $L_{pAeq,Tp}$ erfolgt nach ISO 3095:2013 [7]. Diese Norm zur Messung der Geräuschemissionen von Schienenfahrzeugen schreibt folgende Integrationsgrenzen vor:

- Lokomotiven: Von Puffer zu Puffer.
- Wagen mit 0 oder 2 Drehgestellen: Von Wagenmitte zu Wagenmitte (der Mittelungspegel enthält also jeweils zwei Wagenhälften unterschiedlicher Fahrzeuge).
- Wagen mit 8 Achsen und 4 Drehgestellen: Dies sind permanent gekoppelte Güterwagen mit je 4 Achsen und 2 Drehgestellen. Die Integration erfolgt von Mitte des ersten Wagenteils bis zur Mitte des zweiten Wagenteils.
- Wagen mit 3 Achsen oder 3 Drehgestellen: Vom Mittelpunkt zwischen zwei Achsen oder Drehgestelle bis zum Mittelpunkt derselben Achsen oder Drehgestelle des nächsten Wagens, wobei der

Mittelpunkt des Abschnitts mit der grössten Entfernung gewählt werden muss. (Der Mittelungspegel enthält also ungefähr ein Viertel eines Wagens und drei Viertel des anderen).

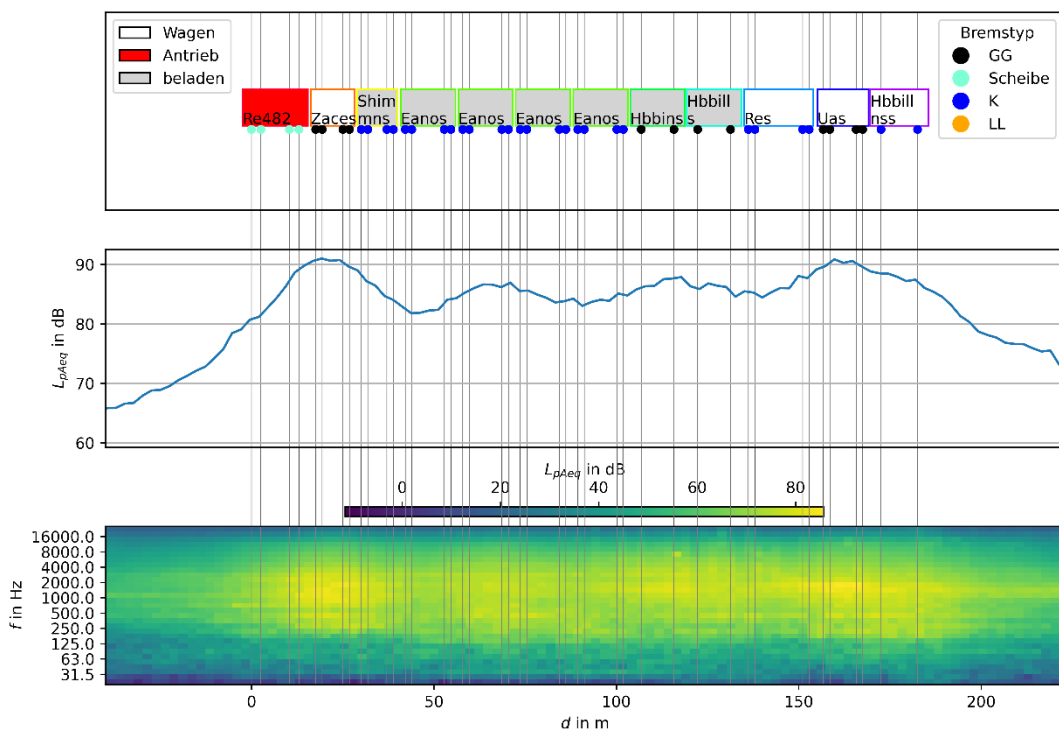


Abbildung 13: Zuordnung des (spektralen) Pegelschriebs aus den Monitoringdaten zu einem Güterzug aus den Verkehrsdaten. Der oberste Plot zeigt die Zugkomposition gemäss den mit Informationen aus der SWDB angereicherten Verkehrsdaten. Der mittlere Plot zeigt den Schalldruckpegelverlauf des Mikrophons in 7.5 m Entfernung. Der unterste Plot zeigt den Pegelverlauf spektral in Terzbändern. Je heller ein Punkt, desto höher ist der Schalldruck zu der entsprechenden Zeit im entsprechenden Terzband.

Da die Pegelschriebe nur in einer zeitlichen Auflösung von 1/8 Sekunde vorliegen, wurden Pegelwerte an den Fahrzeugenden jeweils anteilmässig zur Zeit, während der sich der zu untersuchende Fahrzeugteil vor dem Mikrophon befindet, gewichtet. Sämtliche Lokomotiven, Triebwenzüge und 8-achsige Güterwagen mit 2 Drehgestellen, sowie alle Paare von Personenwagen und Güterwagen gleicher Bauart und gleichen Bremstyps wurden ausgewertet und die spektralen Mittelungs- und Ereignispegel in der SQLite-Datenbank gespeichert.

5.5.2 Filterung der Ereignisse

Um Mittelungs- und Ereignispegel von Durchfahrten einzelner Fahrzeuge miteinander zu vergleichen, dürfen die Schalldruckpegel nicht übermässig von Nachbarfahrzeugen beeinflusst werden. Zudem können spezielle Betriebszustände (z.B. Bremsen bei Güterwagen, Beschleunigen bei Lokomotiven) auch zusätzliche Emissionen verursachen. Abbildung 14 zeigt den Ablauf zur Auswahl der gültigen Vorbeifahrten von Einzelfahrzeugen. Auf die in den blauen Kästen formulierten Bedingungen wird im Anschluss näher eingegangen.

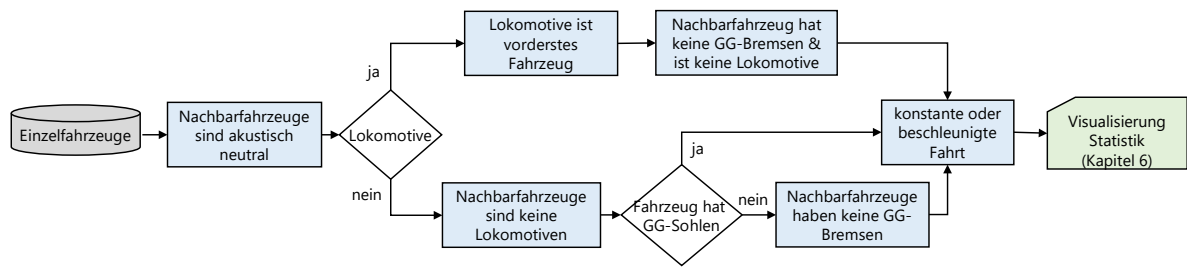


Abbildung 14: Flussdiagramm für das Ausschlussverfahren von Vorbeifahrten von den weiteren Auswertungen.

Nachbarfahrzeuge sind akustisch neutral

Hinsichtlich der akustischen Neutralität der angrenzenden Fahrzeugen stellt die Norm ISO 3095:2013 folgende Anforderungen:

1. Wenn andere Fahrzeuge an das zu untersuchende Fahrzeug (bei Wagen an die zwei zu untersuchenden Wagen) grenzen, so müssen diese vom gleichen Typ sein.
2. Zusätzlich zum $L_{pAeq, Tp}$ wird der Mittelungspegel $L_{pAeq, Tp1}$ über den/die angrenzenden Fahrzeuge und das zu untersuchende Fahrzeug gebildet. Bei Lokomotiven bedeutet dies, dass darin das vorherfahrende (falls vorhanden) und das nachfolgende (falls vorhanden) Fahrzeug enthalten sind. Bei Wagen wird das Integrationsintervall auf beide Seiten bis zur nächsten Wagenhälfte ausgedehnt. Ist die Differenz $L_{pAeq, Tp1} - L_{pAeq, Tp}$ kleiner als 2 dB, so gelten die angrenzenden Fahrzeuge als akustisch neutral.

Der Unterschied zwischen akustisch neutralen und nicht akustisch neutralen Nachbarfahrzeugen wird in Abbildung 15 anhand von Fahrten von Güterlokomotiven und Güterwagen dargestellt. Bei den Lokomotiven handelt es sich um den Typ Bombardier TRAXX F140, welcher Scheibenbremsen hat. Die Wagen haben K-Sohlen. Der Einfluss akustisch nicht neutraler Nachbarfahrzeuge ist gerade auf leise Fahrzeugtypen gross, deshalb wurde das oben genannte Kriterium 2 auch dann angewendet, wenn eigentlich Kriterium 1 erfüllt wäre.

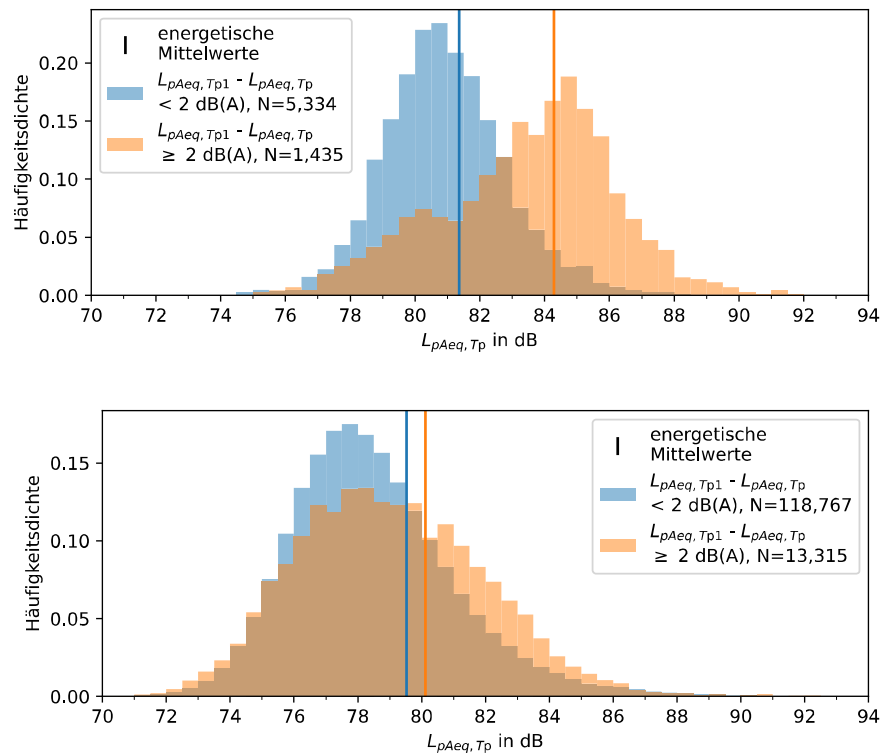


Abbildung 15: Veranschaulichung des Einflusses lauter Nachbarfahrzeuge auf die Messung des Vorbeifahrtspegels anhand von Histogrammen der Mittelungspiegel von Güterlokomotiven der Typenfamilie Bombardier TRAXX F140 (oben) und von 4-achsigen Güterwagen mit K-Sohlen (unten) in Steinen (Gleis 115) bei 70 – 80 km/h. Die blaue Kurve zeigt Durchfahrten, bei welchen die Nachbarfahrzeuge akustisch neutral sind, die orange Kurve zeigt Fahrten, bei welchen dies nicht der Fall ist.

Nachbarfahrzeug hat keine GG-Bremsen / ist keine Lokomotive

Diese Bedingung geht über die Anforderungen der Norm ISO 3095:2013 hinaus. Es hat sich jedoch gezeigt, dass besonders laute Nachbarfahrzeuge auch nach Anwendung des Kriteriums der akustischen Neutralität anhand des Mittelungspiegels über Tp1 noch einen Einfluss auf die Vorbeifahrtspegel haben. In Abbildung 16 sind die Mittelungspiegel von Fahrzeugen, kategorisiert nach Typ des Nachbarfahrzeugs dargestellt. Insbesondere Güterwagen mit GG-Sohlen führen zu einer gemittelten Erhöhung des Mittelungspiegels der Nachbarfahrzeuge von über 2 dB. Bei Güterwagen mit K-Sohle führt auch die Präsenz einer Lokomotive als Nachbarfahrzeug zu einer Erhöhung des Mittelungspiegels von im Mittel mehr als 1 dB.

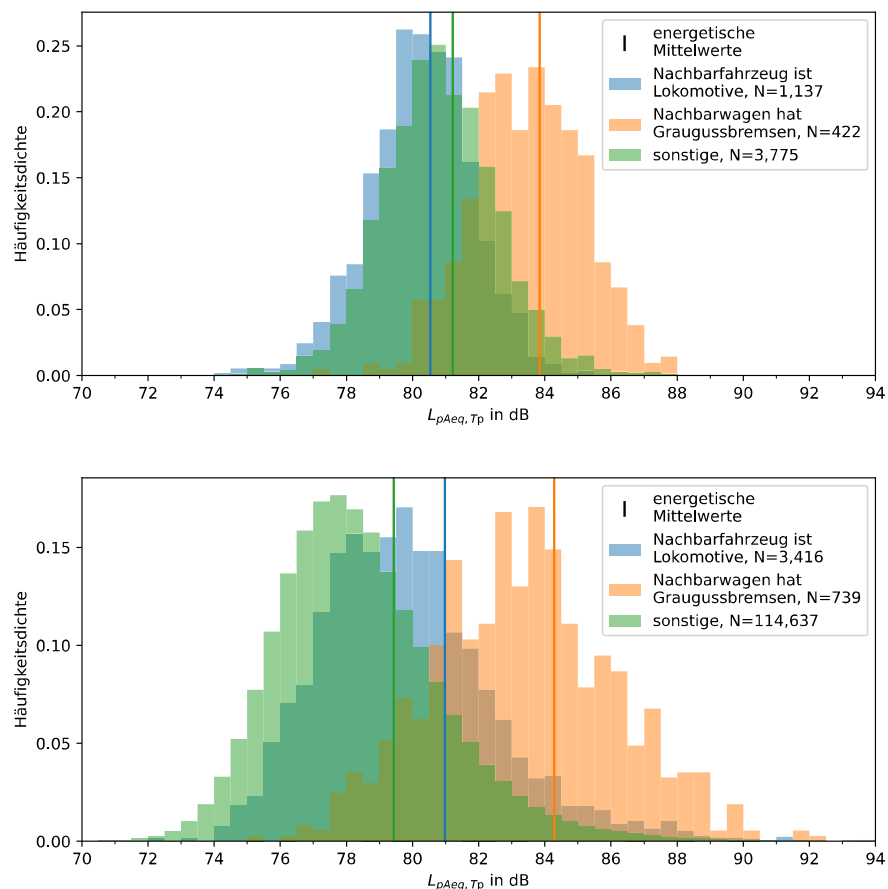


Abbildung 16: Veranschaulichung des Einflusses bestimmter Nachbarfahrzeugtypen auf die Messung des Vorbeifahrtspegels anhand von Histogrammen der Mittelungspegel von Güterlokomotiven der Familie Bombardier TRAXX F140 (oben) und von 4-Achsigen Güterwagen mit K-Sohlen (unten) in Steinen (Gleis 115) bei 70 – 80 km/h. Die Kurven unterschiedlicher Farben stehen jeweils für ein Typ von Nachbarfahrzeug, welches vor oder hinter dem vermessenen Fahrzeug vorhanden ist. Alle gezeigten Fahrten erfüllen die Bedingung der akustischen Neutralität der Nachbarfahrzeuge ($L_{pAeq,Tp1} - L_{pAeq,Tp} < 2 \text{ dB}$).

Ein Pegelkriterium wie das der akustischen Neutralität der Nachbarfahrzeuge (ISO 3095:2013) kann dazu führen, dass besonders laute Fahrzeuge in den gefilterten Vorbeifahrtspegeln übervertreten sind, weil diese das Kriterium häufiger erfüllen, dass der Mittelungspegel inklusive der Nachbarfahrzeuge um nicht mehr als 2 dB höher liegt als der Mittelungspegel über das Fahrzeug (Lokomotive) bzw. die Fahrzeuge (2 Wagen). Durch Ausschliessen von Fahrten mit Nachbarfahrzeugen eines bestimmten Typs sollte der Anteil gewisser Fahrzeuge am Gesamtergebn nicht beeinflusst werden, vorausgesetzt, die Fahrzeuge verkehren nicht immer in derselben Formation an derselben Position. Es wurden deshalb pauschal alle Fahrten von Güterwagen, Personenwagen und Lokomotiven von weiteren Analysen ausgeschlossen, bei welchen eines der Nachbarfahrzeuge eine Lokomotive oder ein Güterwagen mit GG-Sohle ist (Ausnahme: Das zu messende Fahrzeug ist ein Güterwagen mit GG-Sohlen).

Lokomotive ist vorderstes Fahrzeug

Diese Bedingung ist eine direkte Anforderung der Norm ISO 3095:2013 an die akustische Messung der konstanten Fahrt von Lokomotiven.

Konstante oder beschleunigte Fahrt

Fahrten mit negativer Beschleunigung wurden, sofern nicht anders erwähnt, von den Analysen ausgeschlossen, um Bremslärm zu vermeiden. Insbesondere bei Güterwagen zeigte sich bei negativer Beschleunigung (=Bremsen) eine Zunahme des mittleren Vorbeifahrtspegel hervorgerufen durch wenige laute Ereignisse, wie in Abbildung 17 unten ersichtlich ist. Bei spektraler Betrachtung der Mittelungspegel in Abbildung 18 fällt der Peak bei 4 kHz auf, welcher mutmasslich durch das Quietschen der Bremsen verursacht wird. Bei Lokomotiven ist die Abhängigkeit des Vorbeifahrtspegels weniger klar, tendenziell steigt der Schalldruckpegel jedoch mit zunehmender Beschleunigung.

Generell lässt sich nur anhand der Beschleunigung wenig über die Brems- bzw. Antriebsleistung aussagen. Besser wäre es, die Gesamtleistung des Zuges zu modellieren, um dann die aufgebrauchte Leistung der Lokomotive(n) zu bestimmen. Ob nämlich die Druckluftbremsen der Wagen aktiviert werden, hängt von der elektrischen Bremsleistung der Lokomotiven ab. Da das Gesamtgewicht des Zuges und die Lokomotivtypen bekannt sind, wäre eine Modellierung der Leistung prinzipiell möglich, wurde in diesem Projekt jedoch nicht durchgeführt.

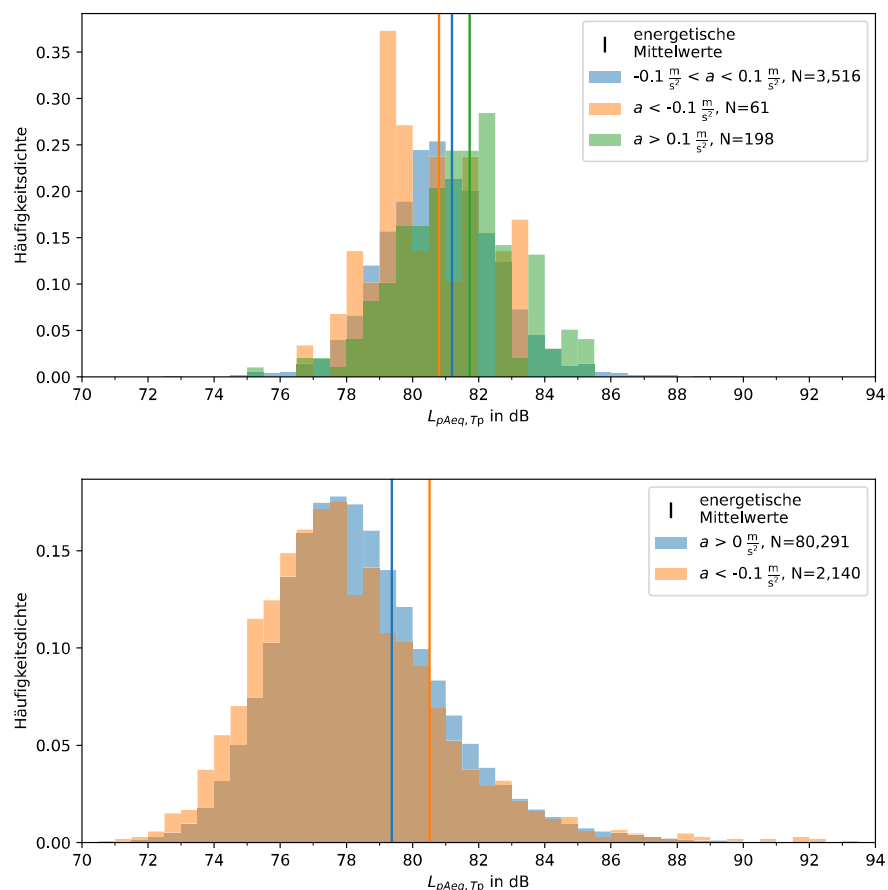


Abbildung 17: Histogramme der Mittelungspegel bei unterschiedlicher Beschleunigung für Güterlokomotiven der Familie Bombardier TRAXX F140 (oben) und für 4-achsige Güterwagen mit K-Sohlen (unten) in Steinen (Gleis 115) bei 70 – 80 km/h. Die Kurven unterschiedlicher Farben stehen jeweils für eine Beschleunigungskategorie (siehe Legende). Liegt die Beschleunigung a unter 0 m/s^2 , so bremst das Fahrzeug während der Durchfahrt. Über 0 m/s^2 beschleunigt es. Alle Fahrten erfüllen die Bedingung der akustischen Neutralität der Nachbarfahrzeuge ($L_{pAeq, Tp1} - L_{pAeq, Tp} < 2 \text{ dB}$), ausserdem sind Fahrten mit Lokomotiven und Güterwagen mit GG-Sohlen ausgeschlossen.

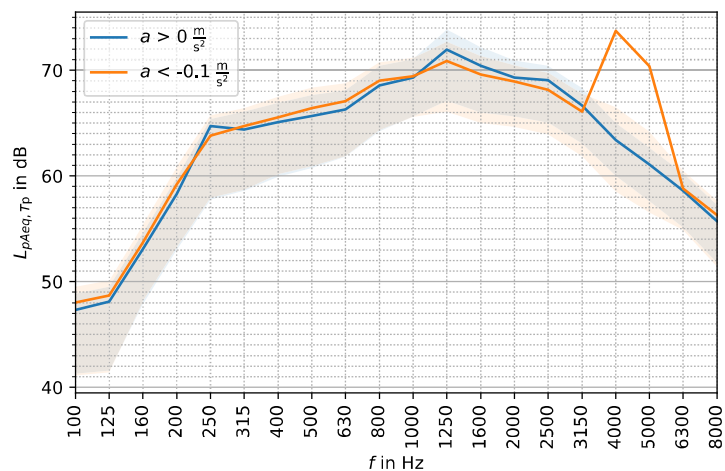


Abbildung 18: Energetische Mittelwerte pro Terzband der in Abbildung 17 (unten) dargestellten Mittelungspegel der Fahrten von 4-achsigen Güterwagen mit K-Sohlen. Die durchgezogenen Linien zeigen den energetischen Mittelwert des $L_{pAeq, Tp}$ pro Terzband. Die schattierte Fläche der jeweils gleichen Farbe markiert den arithmetischen Mittelwert plus und minus eine Standardabweichung.

Die Konsequenzen der Anwendung der in diesem Kapitel beschriebenen Filterkriterien sind in Tabelle 4 aufgeführt. Fälle, in denen das Pegelkriterium der akustischen Neutralität nicht erfüllt ist, treten vor allem bei leiseren Fahrzeugkategorien auf. Triebwenzüge sind weniger betroffen, da durch die grosse Länge der Fahrzeuge Nachbarfahrzeuge weniger ins Gewicht fallen (bei Triebwenzügen wurde der Mittelungspegel $L_{pAeq, Tp1}$ jeweils nur bis und mit einem Wagen des Nachbartriebwenzugs berechnet). Das Kriterium, dass Nachbarfahrzeuge weder GG-Sohlen haben noch eine Lokomotive sein dürfen, fällt bei Güterwagen mit GG-Sohlen und bei Personenwagen weniger ins Gewicht, da bei beiden nur die zweite Bedingung (keine Lokomotive als Nachbarfahrzeug) entscheidend ist. In Personenzügen kommen keine Güterwagen vor, und wenn das zu untersuchende Fahrzeug selbst ein Güterwagen mit GG-Sohlen ist, so darf auch das Nachbarfahrzeug GG-Sohlen aufweisen. Güterwagen mit LL-Sohlen wurden übermässig oft aufgrund des Nachbarfahrzeugs aussortiert. Da es sich um umgerüstete Güterwagen mit GG-Sohlen handelt, waren diese wohl oft gemeinsam mit GG-gebremsten Fahrzeugen in einem Zug unterwegs. Rund 40 % der Lokomotiven verkehren nicht als vorderstes Fahrzeug eines Zuges. Dies ist bei Lokomotiven in Mehrfachtraktion und bei Reisezügen mit schiebender Lokomotive der Fall. Das Kriterium der negativen Beschleunigung trifft erwartungsgemäss bei rund der Hälfte aller Fahrzeuge zu.

Der Gesamtanteil der aussortierten Fahrten bewegt sich je nach Fahrzeugkategorie zwischen rund 50 % und 80 % (siehe Tabelle 4). Insgesamt verbleiben 3'302'606 Vorbeifahrten von Einzelfahrzeugen, welche allen Kriterien genügen.

Tabelle 4: Anteil zutreffender Filterkriterien pro Fahrzeugkategorie in Prozent und Anzahl verbleibender Fahrten für akustische Analysen.

Kriterium zutreffend in %	Loko- motiven	Triebwa- genzüge	Personen- wagen	Güterwagen			
				K-Sohle	LL-Sohle	GG-Sohle	Scheibe
Nachbarfahrzeug nicht akustisch neutral	2.9	0.5	12.6	14.1	15.4	0.8	11.2
Nachbarfahrzeug hat GG-Sohlen oder ist Lok	22.8	-	5.0	20.9	37.0	5.3	9.9
Lok ist nicht vorderstes Fahrzeug	41.4	-	-	-	-	-	-
Beschleunigung $a < 0 \text{ m/s}^2$	53.4	51.9	49.4	47.9	49.3	49.6	54.6
Total aussortiert	82.1	52.1	57.4	61.3	70.9	52.8	63.1
Verbleibende Fahrten	237'073	600'266	1'308'373	707'510	122'090	140'550	186'744

5.5.3 sonRAIL-Emissionsmodell

Eine Teilaufgabe dieses Projektes ist der Vergleich der gemessenen Schalldruckpegel mit den Werten des sonRAIL-Emissionsmodells. Die Eingangsparameter für die Berechnungen mit dem Modell werden in diesem Kapitel dargelegt.

Fahrzeugabhängige Parameter sind die sonRAIL-Kategorie des Fahrzeugs, die Fahrzeuglänge, die Anzahl Achsen und der Prozentsatz der Räder, die Flachstellen aufweisen. Fahrzeuglänge und Achszahl können aus den Verkehrsdaten abgelesen werden. Die Zuordnung der sonRAIL-Kategorie eines Fahrzeugs ist für viele in der Schweiz verkehrende Schienenfahrzeuge in Tabelle 6.1 der Projektdokumentation definiert. Für dort nicht enthaltene Fahrzeuge muss die Kategorie anhand der technischen Charakteristiken oder der Ähnlichkeit im Emissionsverhalten definiert werden. Vereinfachend wird angenommen, dass die Räder keine Flachstellen aufweisen.

Die Parameter, welche die Fahrbahn betreffen, sind zum grössten Teil für alle Standorte gleich. Die Monitoringstationen befinden sich alle an geraden Strecken, welche nicht über Brücken führen und auch keine Weichen enthalten. Die im Modell enthaltenen Korrekturen für Kurvenfahrt, Weichen und Brücken entfallen deshalb. Die Schienen sind alle vom Typ UIC 60 und die Schwellen sind Monoblock-Betonschwellen. Unterschiede bestehen bei den Schienenrauheiten und in der Schotterbetttiefe. Der akustische Schottereffekt wird wie in Kapitel 5.5.4 gesondert behandelt. Die Schienenrauheit ist durch die jährlichen Messungen (siehe Kapitel 4.2.1) für jeden Standort bekannt. Die Schienenrauheit der meisten Standorte entspricht zu allen Zeitpunkten dem Rauheitsspektrum 'smooth' oder 'average' (siehe Kapitel 6.5.1). Es wurde jedoch wenn möglich auf die ortsspezifische Schienenrauheit und den für den jeweiligen Monitoringstandort berechneten akustischen Schottereffekt zurückgegriffen.

Als Geschwindigkeit wurde der arithmetische Mittelwert des betreffenden Geschwindigkeitsbereichs verwendet. Da die gewählten Geschwindigkeitsbereiche mit 10 km/h relativ schmal sind, repräsentiert der arithmetische Mittelwert trotz des nicht-linearen Geschwindigkeitseinflusses die Stichprobe gut. Der theoretisch korrektere, kubische Mittelwert führt zu Erhöhungen der berechneten Emissionen von weniger als 0.1 dB.

5.5.4 Quantifizierung des akustischen Schottereffekts

Schalldruckmessungen in der Nähe von Bahnlinien werden durch die lokalen Bodeneigenschaften und die Schotterbettgeometrie beeinflusst. Diese Einflüsse auf die Schallausbreitung sind spektral und liegen in der Grössenordnung mehrerer dB. Dieses Kapitel erläutert die Methodik, die zur Quantifizierung des spektralen Schottereffekts auf die Schallausbreitung entwickelt wurde.

Für die Schätzung des standortspezifischen Schottereffekts wurden zwei unterschiedliche Verfahren erwogen. Das erste Verfahren basiert auf in-situ-Lautsprecher-Messungen beim Gleis ähnlich wie sie im sonRAIL-Projekt durchgeführt wurden [3]. So können vor Ort akustische Übertragungsfunktionen der Luftschallausbreitung experimentell ermittelt werden. Praktische Schwierigkeiten dabei sind die dafür erforderliche Zugänglichkeit zum Gleis, die Grösse und Charakteristik des Lautsprechers und dass nur punktuell Informationen vorliegen, sowie dass man den Lautsprecher nur oberhalb der Schiene positionieren kann. Das zweite, alternative Verfahren basiert auf einer modellgestützten Schätzung aus bestehenden Messdatensätzen. Die Idee beinhaltet drei Komponenten: eine simultane Auswertung beider Mikrofonsignale pro Standort und Vorbeifahrt, eine spektrale Analyse in Terzbändern und die Kombination mit Modellrechnungen [6]. Dieses neuartige Verfahren hat sich als vielversprechend erwiesen und fand daher Anwendung.

Unter der Annahme, dass Güterwagen hauptsächlich Rollgeräusch erzeugen, lässt sich deren Schallentstehungszentrum auf den Rad-Schiene-Kontaktpunkt mit Quellhöhe 0 m einschränken. Sekundäre (Antrieb) und aerodynamische (ab 120 km/h) Schallentstehungsmechanismen mit Quellhöhen 0.5 – 4 m gemäss sonRAIL Modell können bei Güterwagen ausgeschlossen werden. Aufgrund der vergleichsweise starken Rauheit der Räder an Güterzügen, nimmt die Rauheit der Schiene wenig Einfluss auf den Rollgeräuschpegel. Davon ausgehend, dass sich weder die Schienen- noch die Radrauheiten links und rechts signifikant unterscheiden, können vorbeifahrende Güterzüge die Rolle des Lautsprechers bei der o.g. in-situ-Messung übernehmen.

Im Unterschied zum künstlichen Rauschsignal bei einer in-situ-Messung [6], ist der spektrale Energiegehalt der Quelle bei einer Zugvorbeifahrt nicht genau bekannt. Somit sind Übertragungsfunktionen nicht direkt zu messen. Unter den genannten Annahmen (gleiche Rauheiten links/rechts, nur Rollgeräusch) lässt sich jedoch die spektrale Charakteristik der Quelle (Rollgeräusch) mittels Differenzbildung der Mikrofonpegel eliminieren. Es ergibt sich die Differenz beider Übertragungsfunktionen $H_{c-f} = H_{h_0 \rightarrow c} - H_{h_0 \rightarrow f}$ von Rad-Schiene-Kontaktpunkt zu den Mikrofonen nah und fern (**c**lose & **f**ar).

Mit Hilfe eines Fitting-Algorithmus wurden aus diesen Differenzen an allen Standorten die jährlichen (2016–2020) akustisch wirksamen Schotterbettiefen (d_s) unter beiden Gleisen ermittelt. Hierzu wurden alle Pegel-Zeitverläufe von Güterzügen (nur Güterwaggons ohne Loks) analysiert.

Der Fitting-Algorithmus sucht unter allen berechneten H_{c-f} mit d_s im Wertebereich 30 bis 70 cm jene, welche die geringste Abweichung (Pegeldifferenz \times Anstiegsdifferenz) vom Median des Differenzpegels $L_c(t, f) - L_f(t, f)$ der Vorbeifahrt aufweist. Da bei der Berechnung der Differenzspektren die d_s beider Gleise einfließen, resultiert die kombinierte Schätzung unter dem befahrenen *und* unter dem gegenüberliegenden Gleis.

Beispielhaft sind die Bodeneffekte auf das Geräusch der Rad-Schiene-Interaktion über verschiedenen tiefen Schotterbetten in Abbildung 19 gegeben. Laut Plan ist das Schotterbett in Gland 40 cm tief, jedoch ergibt der Fitting-Algorithmus für das Berechnungsmodell [6] eine akustisch wirksame Schotterbetttiefe von $d_s = 55$ cm. Zum Vergleich ist ausserdem das Bodeneffekt-Spektrum für Quellhöhe h_0 von sonRAIL eingetragen, das standardmässig bei unbekannter Bahndammgeometrie zu verwenden ist.

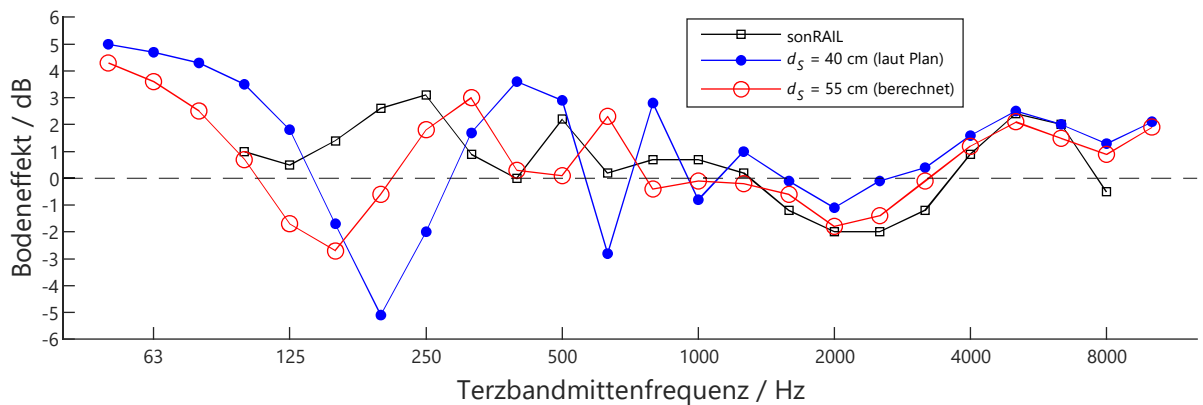


Abbildung 19: Vergleich des Bodeneffekts auf Quellhöhe h_0 in Gland auf Gleis 2 (321) gemäss Berechnung aus Querschnittsplan (blau) und mit dem vorgestellten Verfahren (rot), sowie das sonRAIL-Standardspektrum (schwarz).

Von allen Fits eines Standorts und Jahres wurde nur die Hälfte berücksichtigt, deren Fehlersummen im Frequenzbereich 50 – 500 Hz unterhalb des Medians aller Fehlersummen liegen. Die d_s -Werte wurden schliesslich aus den Maxima der Histogramme wie beispielhaft in Abbildung 20 für Steinen im Jahr 2020 bestimmt: 42.5 cm unter Gleis 1 (215) und 52.5 cm unter Gleis 2 (115). Anschliessend können die Übertragungsfunktionen H für beliebige Quellhöhen zu beliebigen Empfängerpositionen berechnet werden. Abbildung 21 zeigt die Übertragungsfunktionen von Gleis 215 zum fernen Mikrofon (in Standardposition 7.5 m lateral, 1.2 m vertikal) für die auch in sonRAIL verwendeten Quellhöhen 0, 0.5, 2, 3 und 4 m.

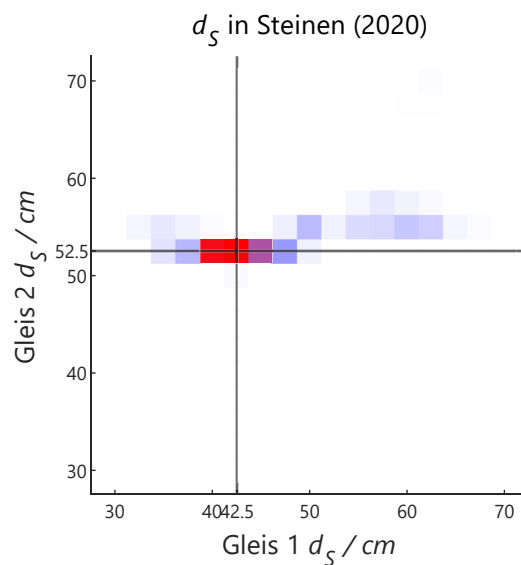


Abbildung 20: Schätzung der akustisch wirksamen Schotterbetrieufe d_s in Steinen 2020.

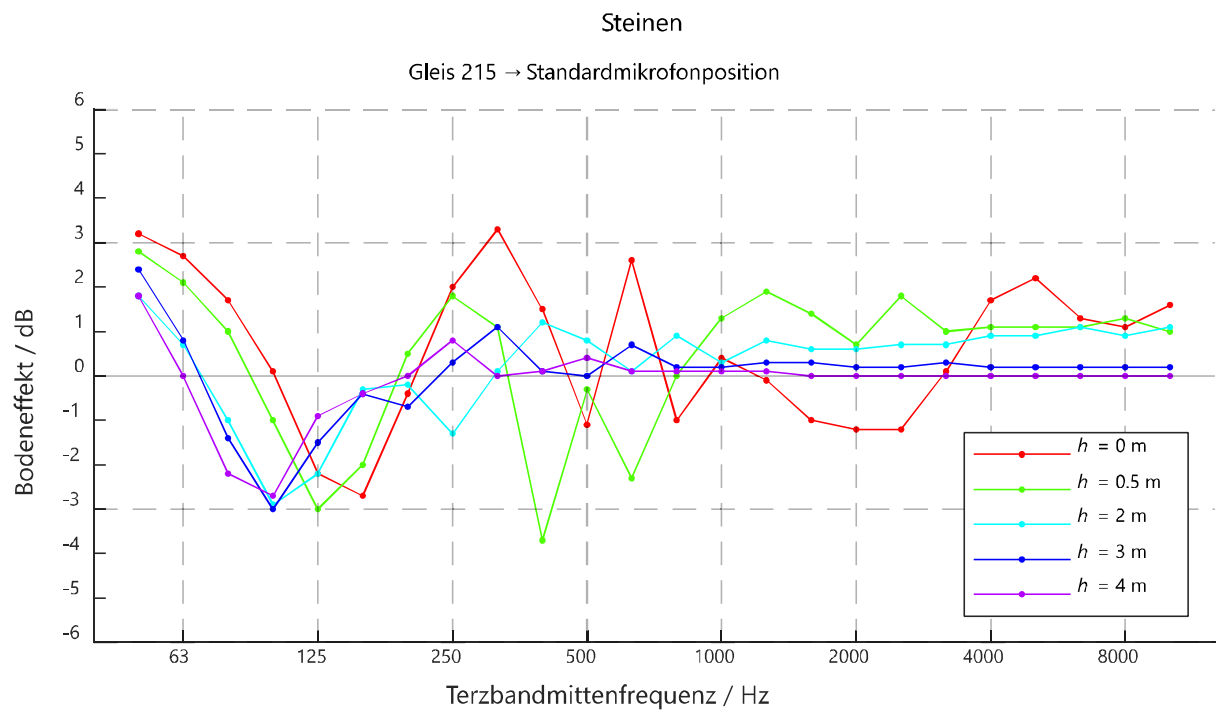


Abbildung 21: Bodeneffekt für die Quellhöhen h auf den Schallausbreitungspfad in Steinen:
Gleis 215 → Mikrofon in Standardposition.

6 Ergebnisse

Dieses Kapitel zeigt die Ergebnisse der durchgeführten Analysen nach der entwickelten Methodik aus Kapitel 5. Zuerst werden in Kapitel 6.1 zeitliche Veränderungen am Oberbau akustisch untersucht. In den folgenden zwei Unterkapiteln liegt der Fokus auf den Fahrzeugen. In Kapitel 6.2 werden ausgewählte Fahrzeugtypen ausgewertet und in Kapitel 6.3 werden die Schallemissionen einzelner Fahrzeugindividuen über die Zeit verfolgt. Kapitel 6.4 und 6.5 widmen sich der Charakterisierung des Oberbaus an den verschiedenen Standorten.

6.1 Untersuchungen von zeitlichen Veränderungen am Oberbau

6.1.1 Vergleich der Standorte und der zeitlichen Entwicklung

Bereits frühere Untersuchungen deuten auf akustische Unterschiede zwischen den Messstandorten hin (siehe z.B. Abbildung 3). Zum Vergleich der Standorte wurden Güterwagen mit vier Achsen und zwei Drehgestellen ausgewählt, da diese über den ganzen Analysezeitraum an allen Standorten in genügend grosser Zahl und bei ähnlicher Geschwindigkeit verkehren. Die in Abbildung 22 untersuchten Güterwagen mit K-Sohlen weisen im Vergleich zu den in Abbildung 23 untersuchten Güterwagen mit Grauguss-Klotzbremsen dank der geringeren Radrauheit einen grösseren Einfluss der Schienenrauheit auf die Emission auf. Die Ereignispegel der Vorbeifahrten wurden jeweils mit $N \cdot \log_{10}(v/v_0)$ mit $v_0 = 80$ km/h normiert, da nicht bei allen Standorten mit gleicher Geschwindigkeit gefahren wird. Dabei wurde $N = 30$ verwendet, da dies ein typischer Wert für Rollgeräusch ist [8]. Diese Korrektur wurde auf ± 3 dB beschränkt, was einen Geschwindigkeitsbereich von 64 bis 101 km/h abdeckt. Fahrten ausserhalb dieses Geschwindigkeitsbereichs wurden ausgeschlossen.

Trotz des starken Mittelungseffekts dank der vielen Einzelmessungen und des eingeschränkten Geschwindigkeitsbereichs streuen die Werte zwischen den Standorten beträchtlich. Differenzen zwischen den Standorten betragen bis zu 9 dB. Auffällig ist das Gleis 212 in Walenstadt als Ausreisser gegen oben.

Abbildung 22 und Abbildung 23 zeigen für alle Standorte die zeitliche Entwicklung durch quartalsweise gemittelte Vorbeifahrtspegel. Einige Standorte wie Steinen verhalten sich stabil und verzeichnen nur geringe Schwankungen von 2 dB über den Zeitraum der Untersuchungen. Die Standorte Gland und Walenstadt verhalten sich am auffälligsten und verzeichnen die grössten zeitlichen Veränderungen von bis zu 5 dB. Die Entwicklung der relativ hohen Emissionen beim Gleis 212 in Walenstadt lassen sich nicht einfach durch die im jährlichen Zyklus gemessenen Schienenrauheiten erklären (siehe Kapitel 6.5.1). Ein Teil der zeitlichen Variabilität scheint mit dem Unterhalt und insbesondere dem Schienenschleifen zusammenzuhängen. Im folgenden Kapitel werden darum zeitlich feiner aufgelöste Analysen vorgenommen.

Der Pegelabfall in Itingen zwischen dem zweiten und dritten Quartal des Jahres 2019 von rund 2 dB ist auf die beidseitige Gleiserneuerung zurückzuführen, welche sich offensichtlich positiv auf die Emissionen auswirkte. Jedoch verbleibt in Itingen auch nach dem Umbau ein Unterschied zwischen den beiden Gleisen von 2 dB (siehe Abbildung 23). Diese Differenz sowie der Unterschied zum Standort Steinen konnte statistisch auf das Schwingungsverhalten des Oberbaus zurückgeführt werden. Abbildung 24 vergleicht die Vorbeifahrtspegel der vier Gleise mit den vertikalen TDRs im relevanten 1 kHz-Terzband. Die Daten zeigen, dass die Vorbeifahrtspegel mit zunehmender TDR abnehmen. Die Emissionen in Steinen lagen stets tiefer als in Itingen, da die vertikalen TDRs bei 1 kHz in Steinen rund 10 dB/m betragen, also beide Gleise über ganzen Zeitraum eine hohe Dämpfung aufweisen. In Itingen sind die TDRs hingegen deutlich geringer und lagen vor dem Umbau um 1 dB/m. Dank des Umbaus in Itingen verdoppelten sich die vertikalen TDRs bei 1 kHz (gekennzeichnet mit 2019), was zu einer Pegelreduktion von 2 dB führte. Die TDRs in Itingen unterscheiden sich zwischen den beiden Gleisen, was wohl die Ursache für die Differenz in den

Emissionen ist. Diese Analyse zeigt, dass ein Teil der Pegelunterschiede zwischen den Messstandorten auf Unterschiede in der Dämpfung der Wellenausbreitung im Gleis zurückgeführt werden kann.

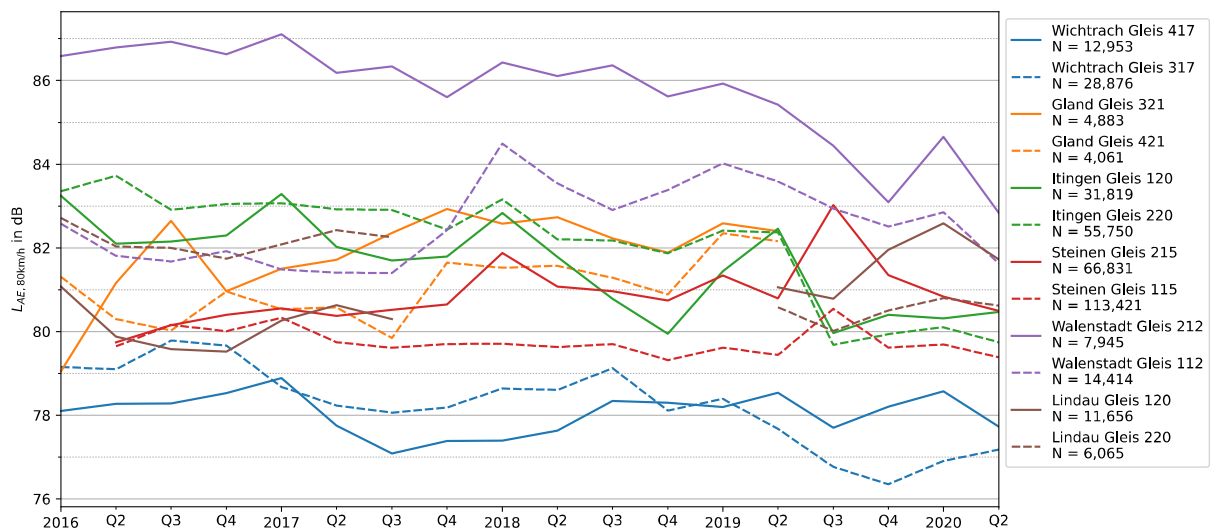


Abbildung 22: Zeitliche Entwicklung der Ereignispegel von 4-achsigen Güterwagen mit K-Sohlen an den verschiedenen Monitoringstandorten. Nur Durchfahrten mit einer Geschwindigkeit von 64 bis 101 km/h wurden berücksichtigt und die Pegel auf 80 km/h normiert. Die durch Linien verbundenen Punkte zeigen den energetischer Mittelwert des Ereignispegels L_{AE} pro Quartal und Gleis und Standort. Die Zahl N gibt die Gesamtzahl von Fahrten an, welche pro Standort und Gleis über den gesamten Zeitraum vorhanden sind.

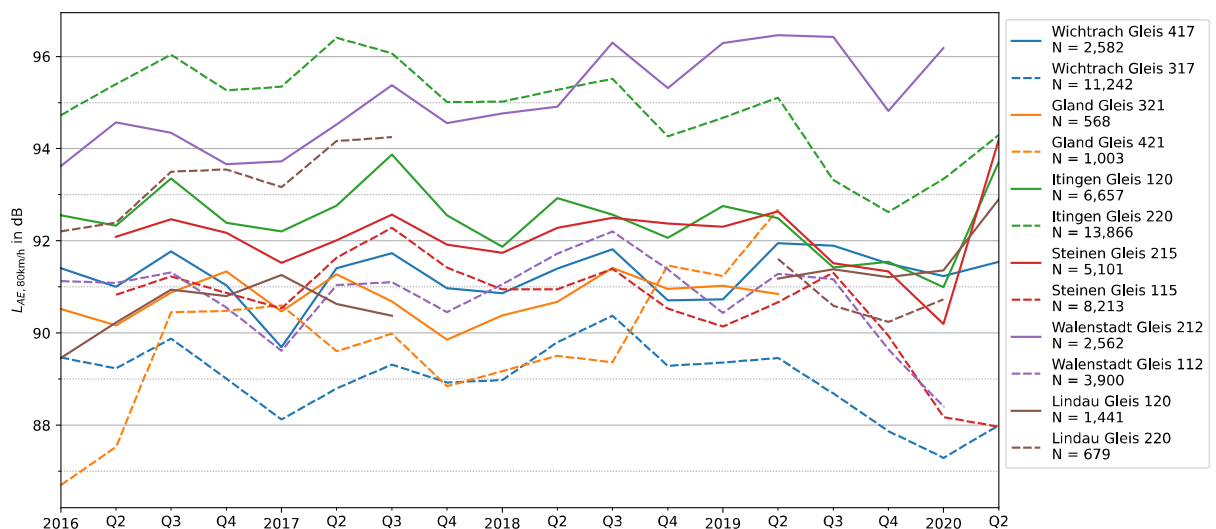


Abbildung 23: Zeitliche Entwicklung der Ereignispegel von 4-achsigen Güterwagen mit GG-Bremssohlen an den verschiedenen Standorten. Nur Durchfahrten mit einer Geschwindigkeit von 64 bis 101 km/h wurden berücksichtigt und die Pegel auf 80 km/h normiert. Die durch Linien verbundenen Punkte zeigen den energetischer Mittelwert des Ereignispegels L_{AE} pro Quartal und Gleis und Standort. Die Zahl N gibt die Gesamtzahl von Fahrten an, welche pro Standort und Gleis über den gesamten Zeitraum vorhanden sind.

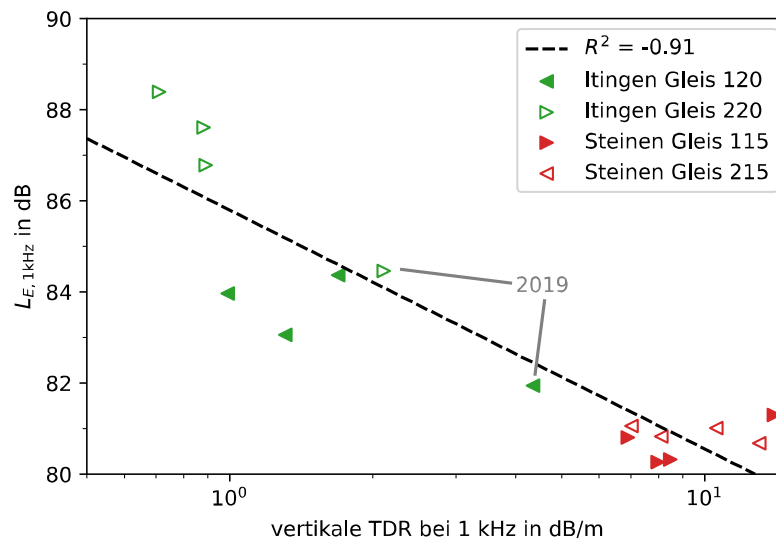


Abbildung 24: Zusammenhang von Ereignispegel von 4-achsigen Grauguss-gebremsten Güterwagen mit 70-80 km/h und der vertikalen Track Decay Rate (TDR) jeweils im 1 kHz-Terzband für beide Gleise in Itingen und Steinen und alle vier Jahre. Die Ereignispegel sind über sechs Monate (drei Monate vor bis drei Monate nach der TDR-Messung) energetisch gemittelt. Die schwarze Linie zeigt die lineare Regression.

6.1.2 Einfluss des Schienenschleifens

Zur Untersuchung des Einflusses des Schienenschleifens auf die Schallemission wurden Fahrzeuge des Personenverkehrs gewählt, da diese eine geringe Radrauheit aufweisen und einen hohen Wartungszyklus haben. Um die Anzahl von Datenpunkten zu erhöhen, wurde für diese Untersuchung auf das Begrenzen auf positive Beschleunigungen (siehe Kapitel 5.5.2) verzichtet.

In Gland wurden die Schienen am 20.02.2019 mit dem HSG-Verfahren (High Speed Grinding) geschliffen. Abbildung 25 zeigt, dass die Mittelungspegel der untersuchten Fahrzeuge an diesem Zeitpunkt dadurch um rund 5-6 dB sprunghaft angestiegen sind und sich danach nach rund einer Woche für IC2000-Doppelstockwagen bei ca. 86 dB stabilisiert haben. Am 24.09.2019 wurden die Schienen in Walenstadt geschliffen, siehe Abbildung 26. Der beobachtet Zeitraum konnte hier länger gewählt werden, da im Gegensatz zu Gland durchgehend Daten vorhanden waren. Die Mittelungspegel fielen dabei abrupt um ca. 4 dB auf ca. 88 dB für IC2000-Doppelstockwagen, lagen aber immer noch um 2 dB höher als in Gland. In Walenstadt führte das Schleifen im Gegensatz zu Gland zu einer Reduktion des Rollgeräuschs von Personenwagen. Ein Grund für das unterschiedliche relative Verhalten der beiden Standorte ist, dass die Schienenrauheit in Walenstadt vor dem Schleifen im relevanten Wellenlängenbereich höher war als in Gland (siehe Kapitel 6.5.1). Die im Jahr 2018 (vor dem Schleifen) gemessene Schienenrauheit in Gland entsprach auf beiden Gleisen der sonRAIL-Schienenrauheit "smooth", lag aber 2019 dann nur noch bei "average". In Walenstadt entsprach die gemessene Schienenrauheit für beide Jahre "average" (Gleis 112) und "bad" (Gleis 212).

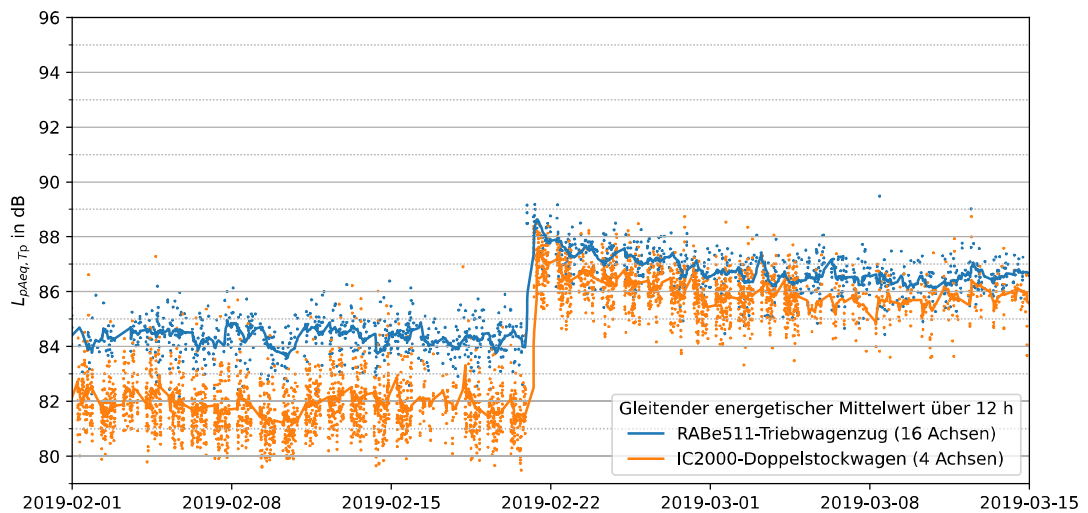


Abbildung 25: Veränderung der Schallemissionen von scheinbremsen Personenzügen bei 130 bis 140 km/h am Monitoringstandort Gland (Gleis 421) durch Schienenschleifen mit dem HSG-Verfahren am 20.02.2019. Die Punkte zeigen einzelne Vorbeifahrten, und die Linien deren gleitender energetischer Mittelwert über ein 12 Stunden-Fenster

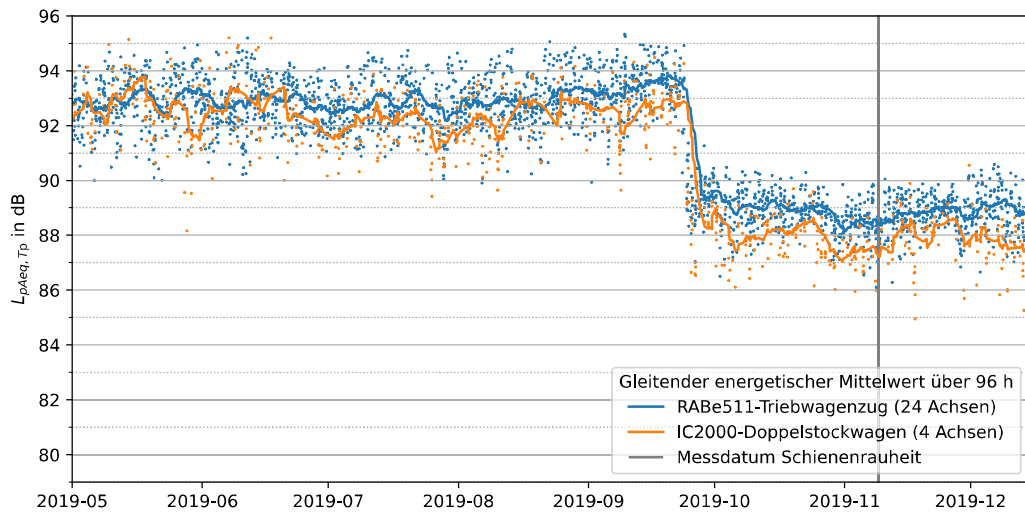


Abbildung 26: Veränderung der Geräuschemissionen von scheinbremsen Personenzügen bei 130 bis 140 km/h am Monitoringstandort Walenstadt (Gleis 212) durch Schienenschleifen am 24.09.2019. Die Punkte zeigen einzelne Vorbeifahrten und die Linien deren gleitender energetischer Mittelwert über ein 96 Stunden-Fenster.

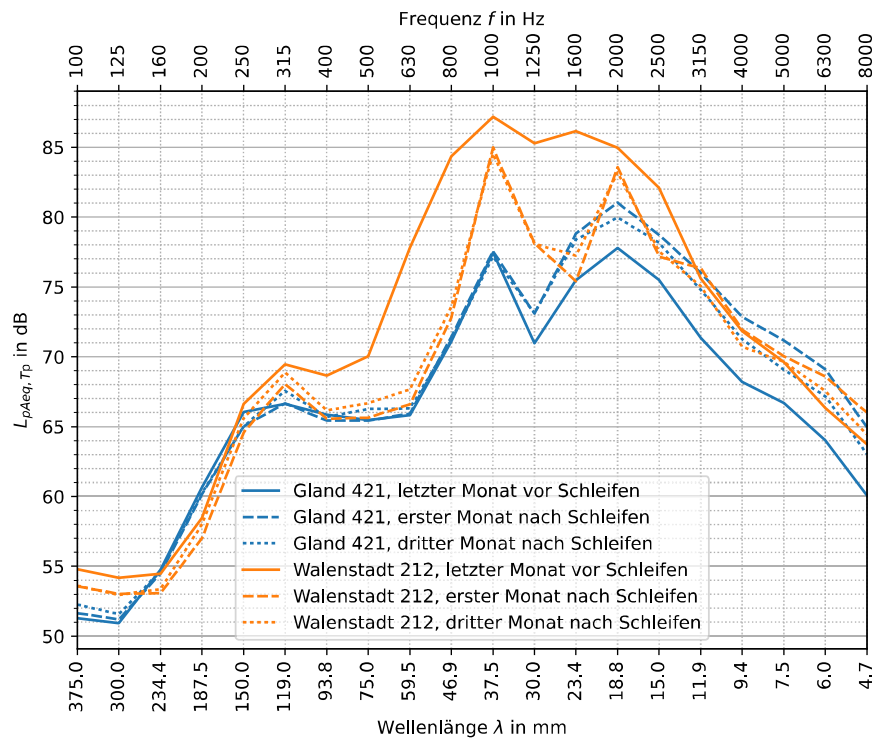


Abbildung 27: Spektrale Betrachtung der Veränderung der Geräuschemissionen über die Zeit durch Schienenschleifen und anschliessendes Einfahren der Schienen in Gland und Walenstadt anhand von Vorbeifahrten von Zügen des Typs RABe511 bei 130 bis 140 km/h. Pro Terzband ist der $L_{pAeq, Tp}$ jeweils über einen Monat energetisch gemittelt. Die untere Abszisse zeigt die Wellenlänge umgerechnet aus der Frequenz bei einer Geschwindigkeit von 135 km/h.

In den Spektren in Abbildung 27 ist das zeitliche Verhalten der Schienenrauheit vor und nach dem Schleifen dokumentiert. Die Peaks um die Wellenlängen $\lambda = 40$ und 20 mm deuten auf periodische Schleifmuster hin. Diese akustisch gewonnene Erkenntnis korrespondiert mit dem direkt gemessenen Rauheitsspektrum des entsprechenden Gleises aus dem Jahr 2020 (siehe Kapitel 6.5.1). Das Schleifmuster bleibt zwischen dem ersten und dritten Monat nach dem Schleifen bestehen.

Bei der Berechnung der Vorbeifahrtspegel von Einheitswagen IV am Monitoringstandort Steinen mit son-RAIL (siehe Kapitel 6.2.1) zeigte sich, wenn die lokal gemessene Schienenrauheit als Eingabe verwendet wurde, eine massive Zunahme von fast 7 dB zwischen den Jahren 2018 und 2019. Die gemessene Schienenrauheit auf Gleis 115 in Steinen entsprach im Jahr 2018 dem sonRAIL-Standardspektrum "smooth", im Jahr 2019 jedoch "bad". Die Schienenrauheit auf diesem Gleis weist im Jahr 2019 einen hohen Wert im Terzband um $\lambda = 40$ mm auf (siehe Abbildung 48). Dies legt nahe, dass die Veränderung ebenfalls durch Schienenschleifen hervorgerufen worden sein könnte, wie es am Anfang dieses Kapitels für Gland und Walenstadt gezeigt werden konnte. Um die vermutete zeitliche Veränderung der Schienenrauheit auch anhand von Messwerten zeigen zu können, wurden deshalb auch die Vorbeifahrtspegel von Fahrzeugen des Personenverkehrs in Steinen untersucht. Leider verkehrten im Jahr 2019 praktisch keine Einheitswagen IV in Steinen, deshalb wurde als Alternative auf den Triebwagenzug RABe503 (ETR 610) zurückgegriffen. Abbildung 28 zeigt die Evolution der Vorbeifahrtspegel dieser Züge auf Gleis 115. Aufgrund der Gleisunterhaltspläne der SBB ist bekannt, dass in Steinen 2019 die Schienen geschliffen wurden. Der genaue Zeitpunkt ist unbekannt, kann aber anhand der Veränderung der Vorbeifahrtspegel in Abbildung 28 gut abgeschätzt werden und fällt auf den 7. Juli 2019. Der Zeitverlauf zeigt dann einen steilen Anstieg des Pegels um 4 dB gefolgt von einem langsamen Rückgang über mehrere Monate. Dies zeigt, dass die

jährlich direkt gemessenen Schienenrauheitsdaten nur eine Momentaufnahme darstellen und nicht zwingend repräsentativ für ein ganzes Jahr sind. In der spektralen Betrachtung der Vorbeifahrtspegel vor und nach dem mutmasslichen Schienenschleifen (Abbildung 29) zeigen sich auch hier wieder zwei charakteristische Peaks im Spektrum bei 500 Hz und 1 kHz, welche Wellenlängen im Bereich von 20 bis 50 mm im Schleifmuster entsprechen.

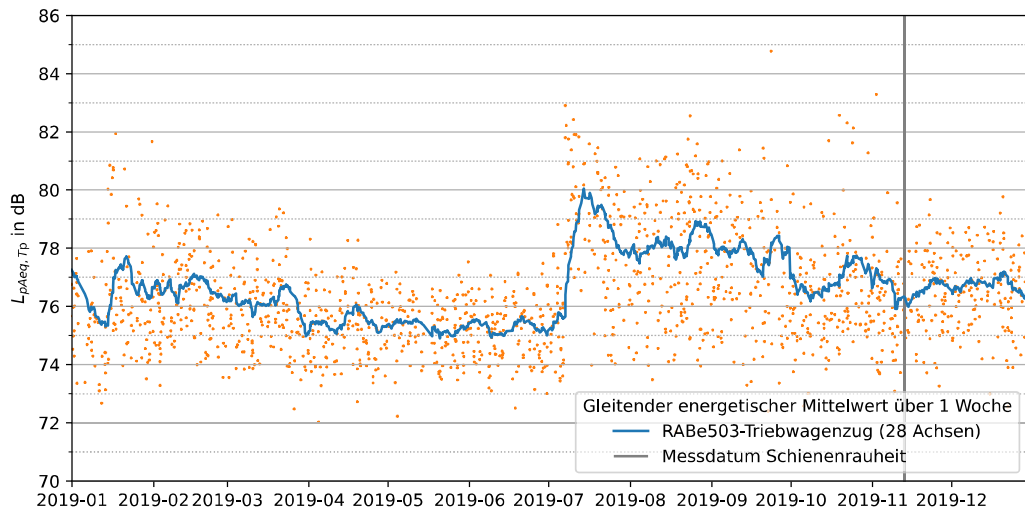


Abbildung 28: Veränderung der Geräuschemissionen von Triebwenzügen des Typs RABe503 (ETR 610) bei 90 bis 100 km/h am Monitoringstandort Steinen (Gleis 115) durch vermutetes Schienenschleifen am 07.07.2019. Die Punkte zeigen einzelne Vorbeifahrten, und die Linien deren gleitender energetischer Mittelwert über ein 1-Wochen-Fenster.

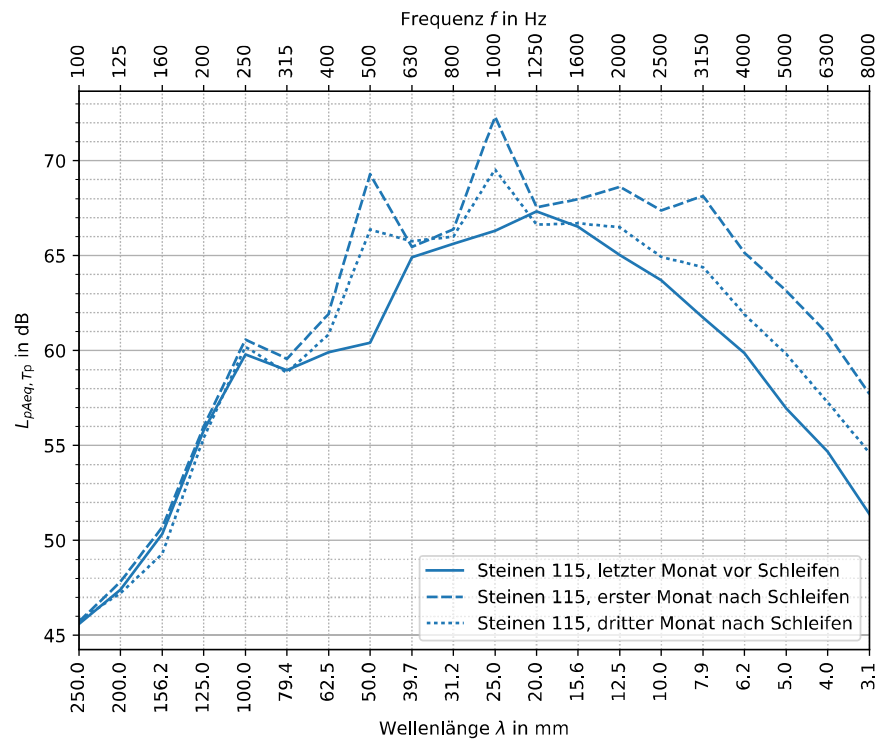


Abbildung 29: Spektrale Betrachtung der Veränderung der Geräuschemissionen über die Zeit durch mutmassliches Schienenschleifen und anschliessendes Einfahren der Schienen in Steinen (Gleis 115) anhand von Vorbeifahrten von Zügen des Typs RABe503 bei 90 bis 100 km/h. Pro Terzband ist der $L_{pAeq,TP}$ jeweils über einen Monat energetisch gemittelt. Die untere Abszisse zeigt die Wellenlänge umgerechnet aus der Frequenz bei einer Geschwindigkeit von 95 km/h.

6.2 Untersuchungen an bestimmten Fahrzeugtypen

6.2.1 Güterwagen mit unterschiedlichen Bremssohlen

Zur Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Bremssohlen wurden über 150'000 Güterwagen analysiert, deren Bremstyp anhand der SWDB bestimmt wurde (siehe Kapitel 4.3.2). Zusätzlich wurden Einheitswagen IV (EW4) mit Scheibenbremsen in die Untersuchung miteinbezogen, um einen Referenzwert für gut unterhaltene Wagen mit leisem Bremssystem zu erhalten. Bei 99.8 % der Güterwagen mit LL-Sohlen handelt es sich um lärmsanierte Wagen, die zuvor GG-Sohlen hatten. Bei den Güterwagen mit K-Sohlen handelt es sich in 27.5 % der Fälle ebenfalls um lärmsanierte Wagen, die restlichen wurden schon ab Fabrik mit diesen Sohlen versehen. Güterwagen mit Scheibenbremse sind generell nicht als nachträglich umgerüstet deklariert, sondern als lärmarm ab Produktion. Rund drei Viertel aller Güterwagen mit Scheibenbremsen sind Güterwagen der Rollenden Landstrasse (RoLa).

In Abbildung 30 wird die Verteilung der Ereignispegel pro Achse von Güterwagen mit GG-, K- und LL-Sohlen sowie mit Scheibenbremsen bei Geschwindigkeiten von 70 km/h bis 80 km/h am Standort Steinen (Gleis 115) verglichen. Tabelle 5 zeigt die energetischen Mittelwerte dieser Verteilungen. Zusätzlich werden die Mittelungspegel der Wagen mit sonRAIL-Modellberechnungen unter Annahme von Standard-Parametern verglichen. Tabelle 6 zeigt die Differenzen der mit sonRAIL berechneten Mittelungspegel, wenn die lokal gemessene Schienenrauheit und der lokale Schottereffekt als Eingangsparameter verwendet werden.

Im Geschwindigkeitsbereich von 70 bis 80 km/h liegt die Emission pro Achse der LL-gebremsten Wagen rund 5 dB oberhalb der K-gebremsten Wagen und 7 dB unterhalb der GG-gebremsten Wagen. Wagen mit Scheibenbremsen weisen gegenüber Wagen mit K-Bremssohlen nochmal eine Reduktion von 1 dB auf. RoLa-Wagen verursachen denselben Ereignispegel pro Achse wie 4-achsige Güterwagen mit Scheibenbremsen. Einheitswagen IV weisen mit einem L_{AE} von rund 70 dB pro Achse einen um 2 dB tieferen Wert auf als Güterwagen mit Scheibenbremsen. Die Vorbeifahrtspegel von Güterwagen mit K-Sohlen werden mit sonRAIL um 1.5 dB überschätzt, während die Emissionen von Güterwagen mit LL und GG-Sohlen um 3.4, resp. um 1.2 dB unterschätzt werden. Bei Betrachtung der sonRAIL-Berechnungen mit standortspezifischen Modelleingabedaten fällt insbesondere der sprunghafte Anstieg der Vorbeifahrtspegel des Einheitswagen IV um 6.9 dB zwischen den Jahren 2018 und 2019 auf. Dies dürfte auf eine Veränderung der Schienenrauheit durch Schienenschleifen zurückzuführen sein (siehe Analyse zu Steinen in Kapitel 6.1.2). Dies zeigt, dass Zeitpunkt und Häufigkeit der Messung der Schienenrauheit einen kritischen Einfluss auf die Emissionsberechnungen haben, denn durch das Schienenschleifen entstehen kurzfristig abrupte Änderungen des Emissionsverhaltens.

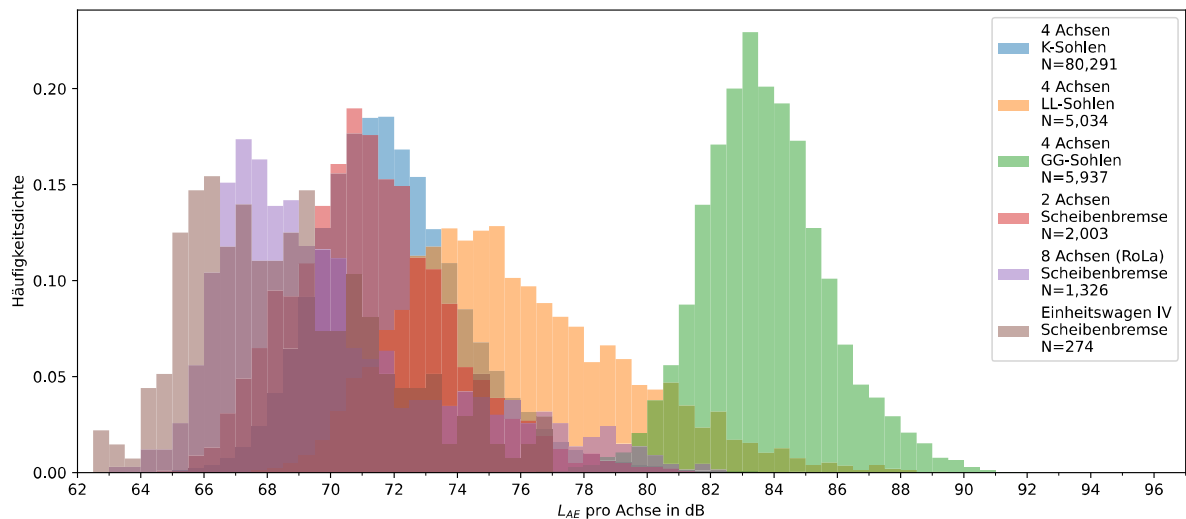


Abbildung 30: Histogramme der Ereignispegel pro Achse von ausgewählten Güter- und Personenwagen am Monitoringstandort Steinen (Gleis 115) über die gesamte vorliegende Messdauer bei einer Geschwindigkeit von 70 bis 80 km/h. Die Zahl N gibt die Gesamtzahl der ausgewerteten Fahrten eines Wagentyps an.

Tabelle 5: Energetische Mittelwerte des Ereignispegels pro Achse, des Mittelungspegels über den gesamten Wagen und des mit sonRAIL berechneten Mittelungspegels der Wagen gemäss Abbildung 30. Den Berechnungen mit sonRAIL liegt eine Geschwindigkeit von 75 km/h, die durchschnittliche Länge der Wagen einer Kategorie, sowie die Schienenrauheit "average" und der Standard-Schottereffekt zugrunde. Für Güterwagen mit LL- und Scheibenbremsen wurde mangels Alternative die Kategorie 10 (Güterwagen mit K-Bremse) genutzt.

Energetische Mittelwerte und Modellrechnungen	L_{AE} pro Achse in dB	$L_{Aeq, Tp}$ in dB	$L_{Aeq, Tp}$ sonRAIL, default in dB	Ø Länge in m
4-Achs-Güterwagen, K-Sohle	72.9	79.4	80.9	18.6
4-Achs-Güterwagen LL-Sohle	77.5	84.5	81.1	17.3
4-Achs-Güterwagen, GG-Sohle	84.2	91.1	89.9	16.4
2-Achs-Güterwagen, Scheibenbremse	72.1	76.1	78.5	17.0
8-Achs-RoLa, Scheibenbremse	72.1	81.4	80.7	19.0
4-Achs-Einheitswagen IV	70.1	75.2	76.6	26.4

Tabelle 6: Differenzen zwischen den sonRAIL-Mittelungspegeln mit Standard-Werten aus Tabelle 5 und den berechneten Werten unter Berücksichtigung des lokalen Schottereffekts in Steinen sowie der dort gemessenen Schienenrauheiten mit ansonsten gleichen Eingangsparametern.

Modellrechnungen	$L_{Aeq, Tp, default}$ in dB	$L_{Aeq, Tp, lokal} - L_{Aeq, Tp, default}$ in dB			
		2016	2017	2018	2019
4-Achs-Güterwagen, K-Sohle	80.9	-0.9	-0.1	-0.5	2.8
4-Achs-Güterwagen LL-Sohle	81.1	-0.9	-0.1	-0.5	2.8
4-Achs-Güterwagen, GG-Sohle	89.9	0.3	0.4	0.3	0.9
2-Achs-Güterwagen, Scheibenbremse	78.5	-0.8	-0.1	-0.5	2.6
8-Achs-RoLa, Scheibenbremse	80.7	-4.5	-1.9	-3.1	3.7
4-Achs-Einheitswagen IV	76.6	-3.7	-1.1	-2.3	4.6

In Abbildung 31 wird die Verteilung der Ereignispegel pro Achse von Güterwagen mit GG-, K- und LL-Sohlen sowie mit Scheibenbremsen bei Geschwindigkeiten von 90 km/h bis 100 km/h am Monitoringstandort Itingen (Gleis 220) verglichen. Tabelle 7 zeigt die energetischen Mittelwerte dieser Verteilungen. Zusätzlich werden die Mittelungspegel der Wagen mit sonRAIL-Modellberechnungen unter Annahme von Standard-Parametern verglichen. Tabelle 8 zeigt die Differenz der mit sonRAIL berechneten Mittelungspegel, wenn die lokal gemessene Schienenrauheit und der lokale Schottereffekt als Eingangsparameter verwendet werden.

Im Geschwindigkeitsbereich von 90 bis 100 km/h liegt die Emission pro Achse der LL-gebremsten Wagen rund 3 dB oberhalb der K-gebremsten Wagen und 10 dB unterhalb der GG-gebremsten Wagen. Wagen mit Scheibenbremsen weisen gegenüber Wagen mit K-Bremssohlen nochmal eine Reduktion von 2 dB auf. RoLa-Wagen verursachen ungefähr denselben Ereignispegel pro Achse wie 4-achsige Güterwagen mit Scheibenbremsen. Einheitswagen IV weisen mit einem L_{AE} von rund 75 dB pro Achse einen um 1 dB

tieferen Wert auf als Güterwagen mit Scheibenbremsen. Die Emissionen von Güterwagen mit K-, LL- sowie GG-Sohlen werden mit sonRAIL für diesen Standort um 2.4 – 6.6 dB unterschätzt. Auch standortspezifische Modelleingabedaten der Schienenrauheit und des Schottereffekt erklären die hohen Emissionswerte nicht.

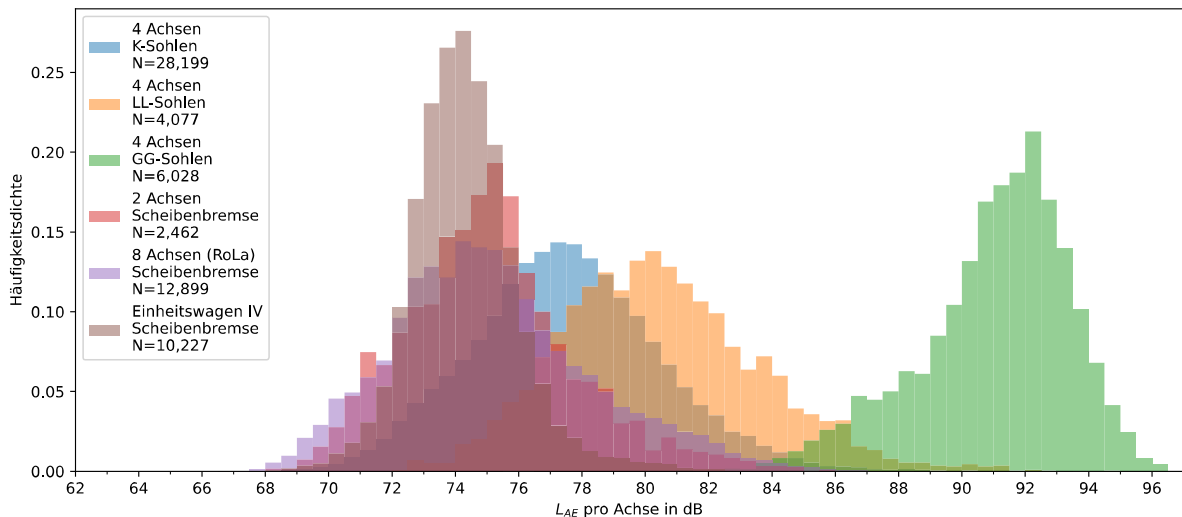


Abbildung 31: Histogramme der Ereignispegel pro Achse von ausgewählten Güter- und Personenwagen am Monitoringstandort Itingen (Gleis 220) über die gesamte vorliegende Messdauer bei einer Geschwindigkeit von 90 bis 100 km/h. Die Zahl N gibt die Gesamtzahl der ausgewerteten Fahrten eines Wagentyps an.

Tabelle 7: Energetische Mittelwerte des Ereignispegels pro Achse, des Mittelungspegels über den gesamten Wagen und des mit sonRAIL berechneten Mittelungspegels der Wagen in Abbildung 31. Den Berechnungen mit sonRAIL liegt eine Geschwindigkeit von 95 km/h, die durchschnittliche Länge der Wagen einer Kategorie, sowie die Schienenrauheit "average" und der Standard-Schottereffekt zugrunde. Für Güterwagen mit LL- und Scheibenbremsen wurde mangels Alternative die Kategorie 10 (Güterwagen mit K-Bremse) genutzt.

Energetische Mittelwerte und Modellrechnungen	L_{AE} pro Achse in dB	$L_{Aeq, Tp}$ in dB	$L_{Aeq, Tp}$ sonRAIL, default in dB	Ø Länge in m
4-Achs-Güterwagen, K-Sohle	78.6	86.3	83.9	18.6
4-Achs-Güterwagen LL-Sohle	81.8	89.6	84.0	17.3
4-Achs-Güterwagen, GG-Sohle	91.6	99.7	93.1	16.4
2-Achs-Güterwagen, Scheibenbremse	76.0	80.9	81.4	17.0
8-Achs-RoLa, Scheibenbremse	76.4	86.8	83.2	19.0
4-Achs-Einheitswagen IV	74.6	80.8	79.5	26.4

Tabelle 8: *Differenzen zwischen den sonRAIL-Mittelungspegeln mit default-Werten aus Tabelle 7 und den berechneten Werten unter Berücksichtigung des lokalen Schottereffekts in Itingen sowie der dort gemessenen Schienenrauheiten mit ansonsten gleichen Eingangsparametern.*

Modellrechnungen	$L_{Aeq, Tp, default}$ in dB	$L_{Aeq, Tp, lokal} - L_{Aeq, Tp, default}$ in dB			
		2016	2017	2018	2019
4-Achs-Güterwagen, K-Sohle	83.9	-0.6	0.0	0.8	-0.2
4-Achs-Güterwagen LL-Sohle	84.0	-0.6	0.0	0.8	-0.2
4-Achs-Güterwagen, GG-Sohle	93.1	0.4	0.5	0.6	0.5
2-Achs-Güterwagen, Scheibenbremse	81.4	-0.5	0.0	0.8	-0.1
8-Achs-RoLa, Scheibenbremse	83.2	-3.3	-1.6	0.7	-2.0
4-Achs-Einheitswagen IV	79.5	-2.8	-0.9	1.1	-1.3

6.2.2 Einfluss der Beladung bei Güterwagen

In den Verkehrsdaten zum Güterverkehr ist das Bruttogewicht und das Ladegewicht jedes Güterwagens vorhanden. Anhand dieser Daten konnte der Einfluss des Ladegewichts auf die Emissionen eines Güterwagens abgeschätzt werden. Da eine zu messende Einheit jeweils aus zwei Güterwagen besteht (siehe Kapitel 5.5.1), wurden nur folgende Fälle unterschieden:

- Beide Wagen sind nicht beladen ($m_{Ladung} = 0$ t).
- Beide Wagen sind beladen ($m_{Ladung} > 0$ t).

Zusätzlich kann aus den UIC-Gattungszeichen in der SWDB die Bauart der Güterwagen eruiert werden. Es wurden nur 4-achsige Güterwagen mit K-Sohle untersucht, da diese den allergrössten Anteil an Fahrten ausmachen. Folgende zwei Fälle wurden näher untersucht:

- Beide Wagen sind Containerwagen (Gattungszeichen "S...g...").
- Beide Wagen sind Kesselwagen (Gattungszeichen "Z...").

Bei beiden Wagentypen zeigt sich in Abbildung 32 für den Geschwindigkeitsbereich von 90 bis 100 km/h, dass der Mittelungspegel bei leeren Wagen um rund 2 dB höher liegt als bei beladenen Wagen. Dies deckt sich mit den Modellberechnungen in [9], wo mit dem TWINS-Modell eine Reduktion um 2 dB vorausgesagt wird, wenn die Achslast von 64 kN auf 23.5 kN reduziert wird.

Spektral betrachtet ist bei Containerwagen in Terzbändern ab 500 Hz eine durchgehende Reduktion des Mittelungspegels bei zunehmender Ladung zu beobachten. Bei Kesselwagen nehmen die Mittelungspegel jedoch in Terzbändern bis 500 Hz mit zunehmender Ladung zu, sinken aber in den Terzbändern von 500 Hz bis 2.5 kHz (siehe Abbildung 32).

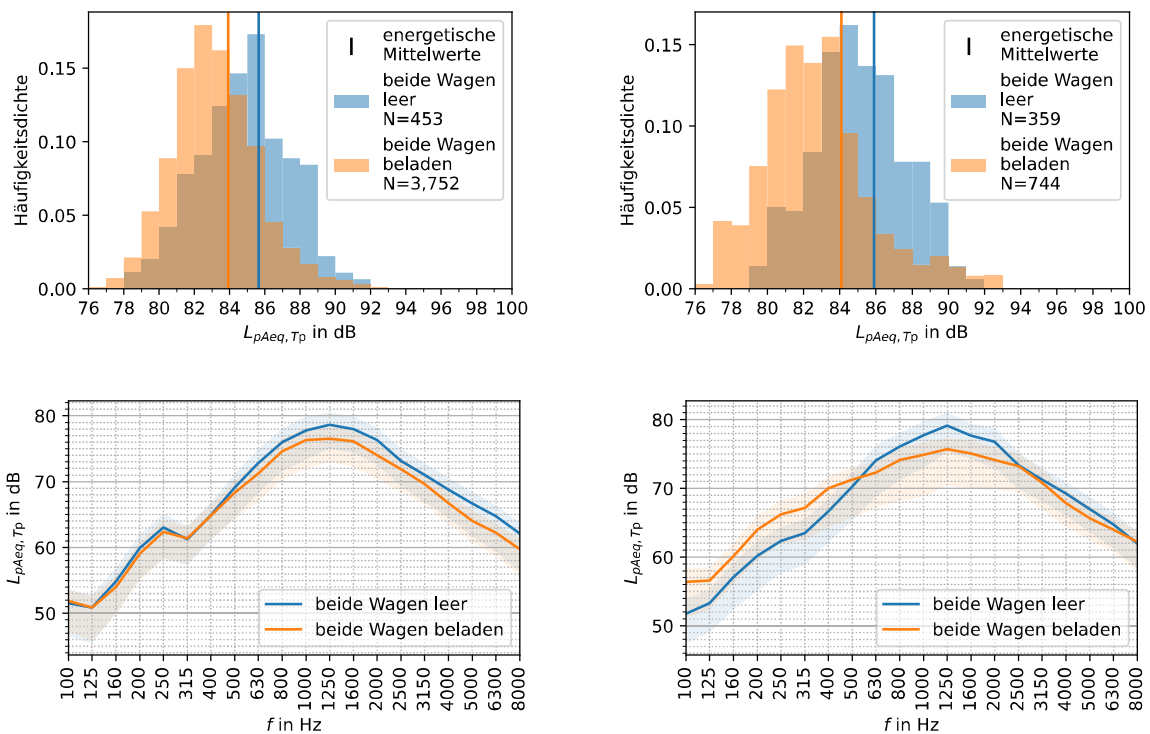


Abbildung 32: Gegenüberstellung von 4-achsigen Güterwagen mit K-Sohlen unterschiedlicher Bauart (links: Containerwagen, rechts: Kesselwagen) und Beladungszustand am Monitoringstandort Itingen (Gleis 120) bei einer Geschwindigkeit von 90 – 100 km/h. Jeweils zwei Wagen bilden eine Einheit, deren Vorbeifahrtspegel gemessen werden kann. Ein Wagen gilt als beladen, wenn die in den Verkehrsdaten angegebene Beladung grösser als Null ist. Die oberen Plots zeigen die Histogramme der Mittelungspegel. Die unteren Grafiken zeigen das Spektrum mit der Linie als energetischer Mittelwert pro Terzband und dem schattierten Bereich als den arithmetischen Mittelwert plus und minus eine Standardabweichung.

6.2.3 Geschwindigkeitsabhängigkeit der Schallemissionen bei Lokomotiven

Die Schallemissionen von unterschiedlichen Lokomotivtypen wurden in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit untersucht. Dazu wurden alle Durchfahrten nach den vier häufigsten Lokomotivfamilien gefiltert. Es wurden die folgenden Lokomotivtypen analysiert:

- Lok 2000 (Re460, Re465): Universallokomotiven mit Drehstrommotoren und Sintermetall-Bremssohlen.
- Re420, Re430: Universallokomotiven mit Wechselstrommotoren und GG-Sohlen.
- Bombardier TRAXX F140 (Re482, Re484, Re485, Re486): Güterlokomotiven mit Drehstrommotoren und Scheibenbremsen.
- Re620: Wie Re420, aber mit sechs statt vier Achsen und nur noch im Güterverkehr eingesetzt.

Alle Gleise und Standorte bis auf Gleis 212 in Walenstadt wurden für diese Analyse genutzt. Dieses Gleis wurde vermieden, da es ein auffälliges Emissionsverhalten aufweist (siehe Kapitel 6.1.1).

Abbildung 33 zeigt zweidimensionale Histogramme der Vorbeifahrtspegel separat für die vier Lokomotivfamilien. Die Ursache der Ausreisser nach oben ist gemäss Zusatzanalysen mutmasslich Schlupf. Aus den Histogrammen wurden lineare Regressionen über die logarithmierte Geschwindigkeit erstellt. Dabei

wurde jeweils für Klassen von 1 km/h Breite der energetische Mittelwert bestimmt. Die Geschwindigkeitskoeffizienten liegen gemäss Abbildung 33 zwischen 20 und 29 dB und somit für alle vier Lokomotivtypen unterhalb der in der Praxis zum Beispiel bei der Berechnung des Indikators TEL80 oft eingesetzten 30 dB. Abbildung 34 zeigt die vier Regressionsgeraden zum direkten Vergleich der Lokomotivtypen. Die Emissionen der beiden Lokomotivtypen mit GG-Sohlen liegen generell höher als die der anderen beiden. Die Re420 liegt im gesamten Geschwindigkeitsbereich mehr als 5 dB über der Re460. Die Re460 mit Sintermetallbremsen weist ähnlich hohe Pegel auf als die Re482 mit Scheibenbremsen. Der Lokomotivtyp Re420 / Re430 weist ein Emissionsverhalten in Abhängigkeit von der gefahrenen Geschwindigkeit auf, welches demjenigen von Güterwagen (Geschwindigkeitskoeffizienten von 30 dB) mit 28.5 dB am nächsten kommt.

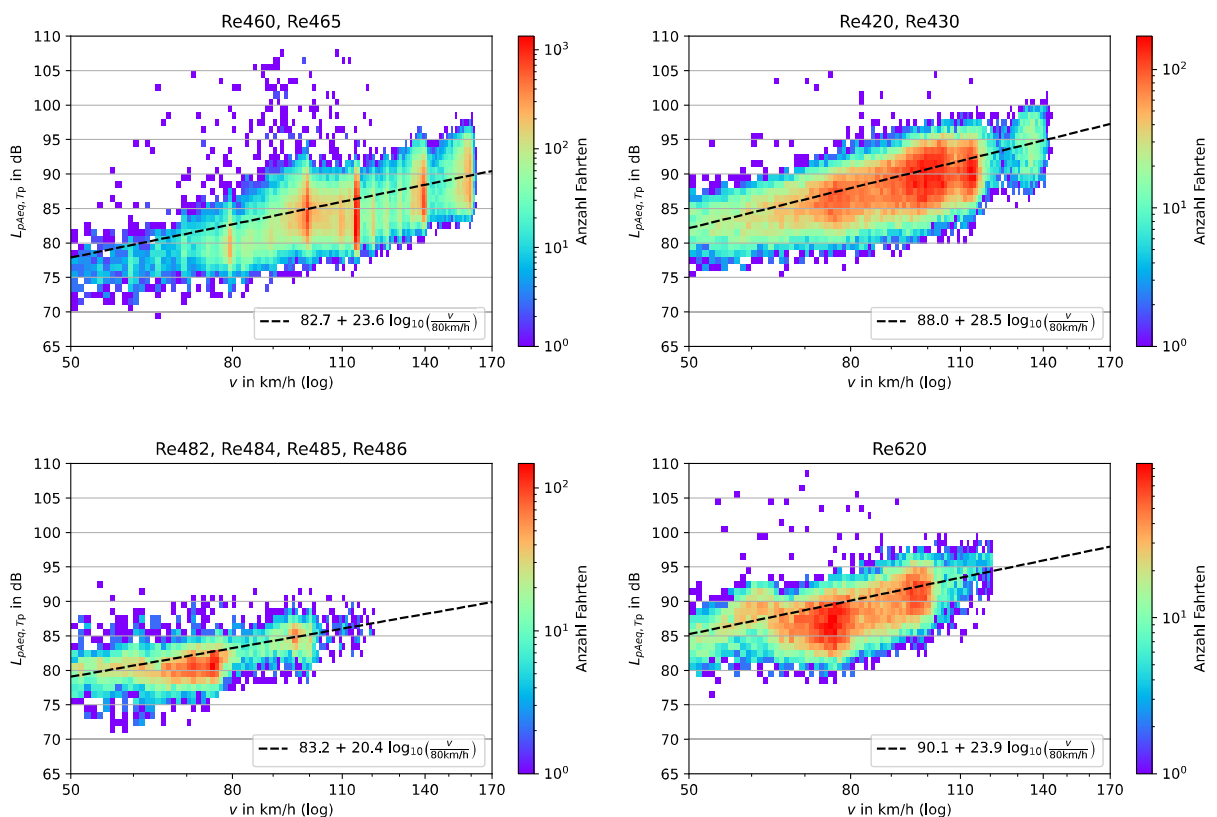


Abbildung 33: Zweidimensionale Histogramme der Mittelungspegel bezüglich der gefahrenen Geschwindigkeit von vier Lokomotivfamilien. Je höher ein Wert auf der Farbskala liegt, desto mehr Fahrten liegen im entsprechenden Bereich von Geschwindigkeit und Vorbeifahrtspegel. Die Regressionsgerade wurde durch die energetischen Mittelwerte der Pegel für Klassen von 1 km/h Breite gelegt.

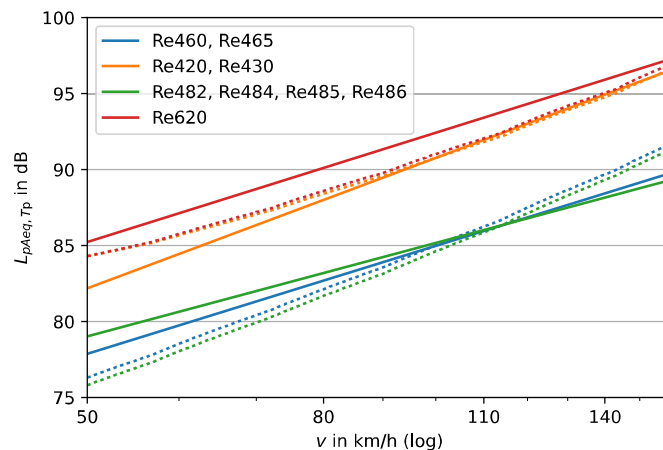


Abbildung 34: Zusammenstellung der Regressionsgeraden des $L_{pAeq,Tp}$ für vier Lokomotivfamilien. Die gestrichelte Linie der gleichen Farbe zeigt jeweils den mit sonRAIL berechnete Mittelungspegel. Dabei wurde der Standardschottereffekt des Modells sowie die Schienenrauheit "average" verwendet.

Abbildung 34 zeigt zudem sonRAIL-Berechnungen für die drei im Modell existierenden Lokomotivgruppen. sonRAIL bildet die Unterschiede zwischen den älteren und neueren Lokomotivtypen sowie das Geschwindigkeitsverhalten grundsätzlich gut ab. Die Re620 wird vom Modell unterschätzt, wobei die Re420 und Re430 unterhalb von 80 km/h leicht überschätzt werden (weitere Analysen siehe Kapitel 6.2.4). Bei 60 km/h beträgt die Differenz 1.2 dB. Bei modernen Lokomotiven (TRAXX F140, Re460, Re465) zeigt sonRAIL eine höhere Geschwindigkeitsabhängigkeit als die Messungen, was dazu führt, dass unterhalb von 110 km/h die Emissionen mit der Berechnung eher unterschätzt und oberhalb von 110 km/h überschätzt werden.

Abbildung 35 zeigt Spektren der Re460 / Re465 für unterschiedliche Geschwindigkeiten. Die Spektren der weiteren in Abbildung 33 gezeigten Lokomotivtypen befinden sich in Anhang A. Die Geschwindigkeit hat nicht nur einen Einfluss auf den Gesamtpegel, sondern auch auf die Form des Spektrums. In Abbildung 35 verschiebt sich der spektrale Schwerpunkt mit der Geschwindigkeit, was gut am Peak bei 630 Hz und 60 km/h zu sehen ist. Die Peaks bei 4 kHz und tiefen Geschwindigkeiten sind möglicherweise auf Schlupf der Räder zurückzuführen, wie Analysen von Beschleunigung und Zuggewicht ergeben haben und zeigen deshalb keine Abhängigkeit von der Geschwindigkeit.

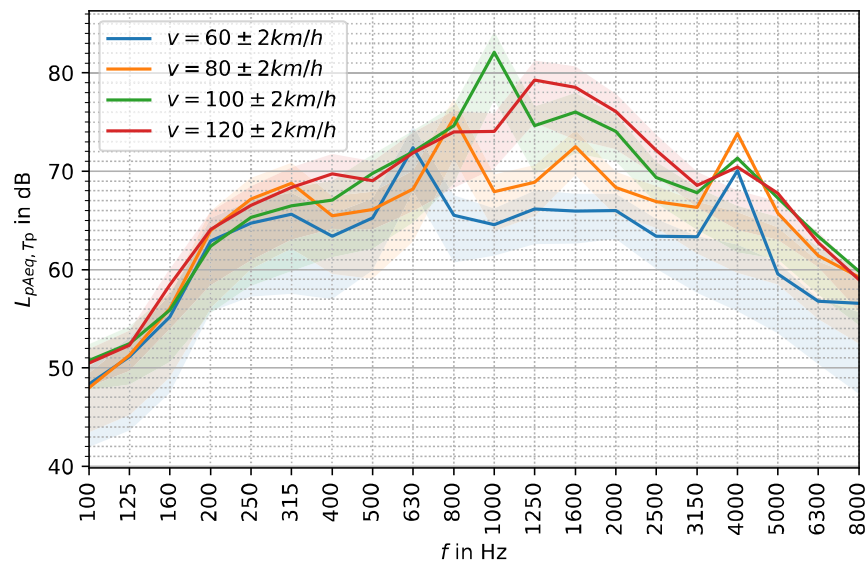


Abbildung 35: Spektrale Mittelungspegel des Lokomotivtyps Re460 / Re465 in vier Geschwindigkeitsklassen von jeweils 4 km/h Breite. Die durchgezogenen Linien zeigen den energetischen Mittelwert des $L_{pAeq, Tp}$ pro Terzband. Die schattierte Fläche der jeweils gleichen Farbe markiert den arithmetischen Mittelwert plus und minus eine Standardabweichung.

6.2.4 Vergleich der Lokomotive Re420 mit dem sonRAIL-Emissionsmodell

Angeregt durch Anfragen der SBB werden Vergleiche mit dem sonRAIL-Emissionsmodell für die Re420 gezeigt. Dafür wurde in einem ersten Schritt die Geschwindigkeit auf einen 10 km/h breiten Bereich eingegrenzt. Da sonRAIL die Emissionen bei konstanter Fahrt beschreibt, wurde anstelle der in Kapitel 5.5.2 beschriebenen Begrenzung auf positive Beschleunigung die Beschleunigung auf $\pm 0.1 \text{ m/s}^2$ eingegrenzt. Trotz der dadurch grossen Anzahl analysierter Durchfahrten ist die Streuung im Pegel relativ gross, wie Abbildung 36 zeigt. Die 95%-Quantilbereiche pro Standort und Gleis sind rund 10 dB breit. Zwischen den Standorten variieren die Vorbeifahrtspegel im Mittel um 0-4 dB. Bei den meisten Standorten liegt die Schienenrauheit über den Messzeitraum gesehen bei 'average' (siehe Kapitel 6.5.1).

Abbildung 36 und Abbildung 37 vergleichen die Messwerte an allen Standorten für zwei Geschwindigkeitsbereiche. Die energetischen Mittelwerte der Vorbeifahrtspegel über alle Standorte können mit dem sonRAIL-Emissionsmodell mit den Standardeinstellungen gut reproduziert werden. Standortspezifische Parametersetzungen von Schienenrauheit und Schottereffect verbessern die Genauigkeit kaum. Trotzdem liegen die Messwerte bei einigen Standorten (z.B. Gleis 417 in Wichtrach) 2 dB unterhalb der Modellwerte. Im Mittel über alle Standorte liegen die Messwerte bei 70-80 km/h um 1.3 dB und bei 90-100 km/h um 0.9 dB unterhalb der sonRAIL-Berechnungen.

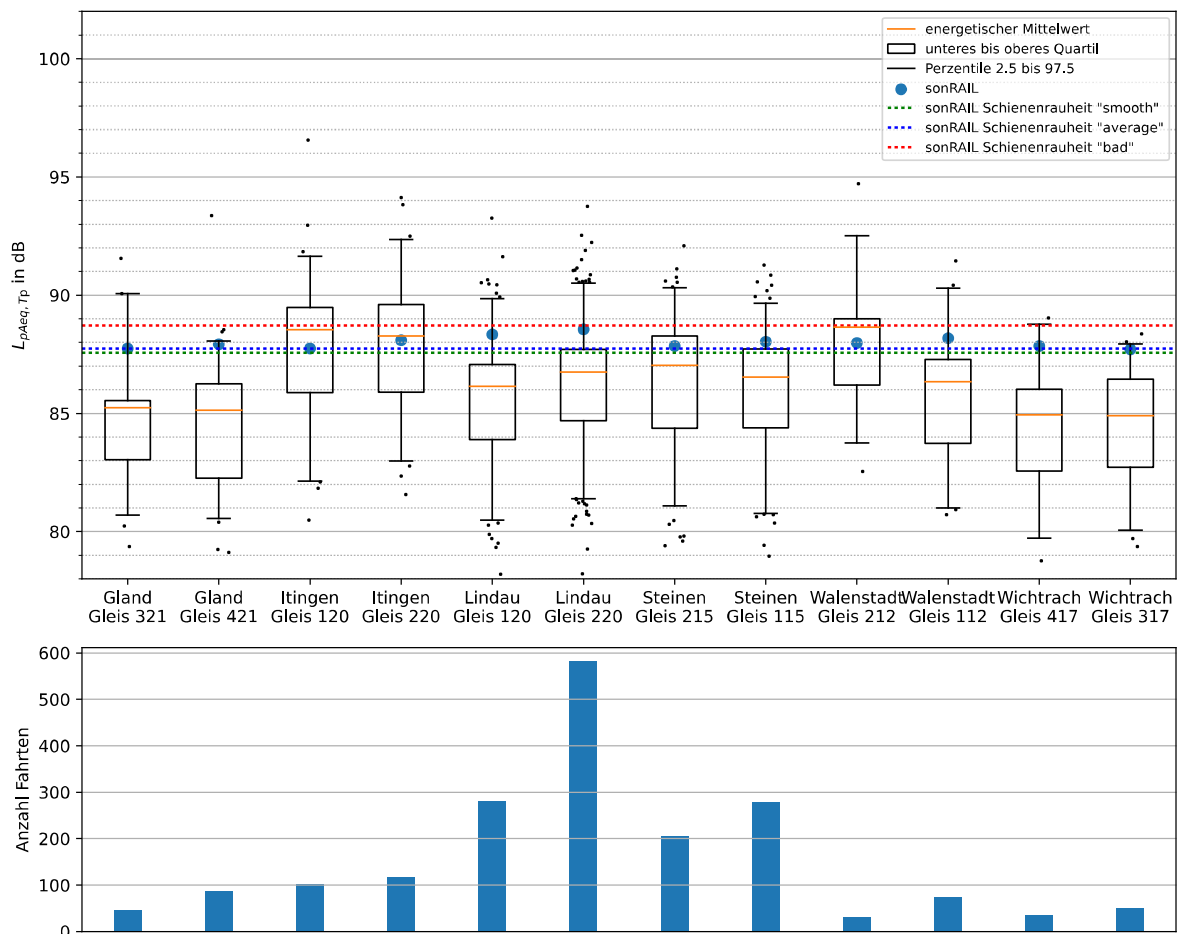


Abbildung 36: Vergleich der Vorbeifahrtspegel des Lokomotivtyps Re420 im Jahr 2016 mit dem sonRAIL-Emissionsmodell. Die Boxplots zeigen jeweils die Werte des Mittelungspegels bei Vorbeifahrten mit 70 bis 80 km/h pro Standort und Gleis. Die Darstellung der Ausreisser mit einer horizontalen Streuung dient nur der besseren Lesbarkeit. Anstelle des sonst bei Boxplots üblichen Medianwerts wird der energetische Mittelwert gezeigt. Die blauen Punkte zeigen die mit sonRAIL berechneten Mittelungspegel unter Berücksichtigung des lokalen Schottereffekts, der im Jahr 2016 gemessenen Schienenrauheit und einer Geschwindigkeit von 75 km/h.

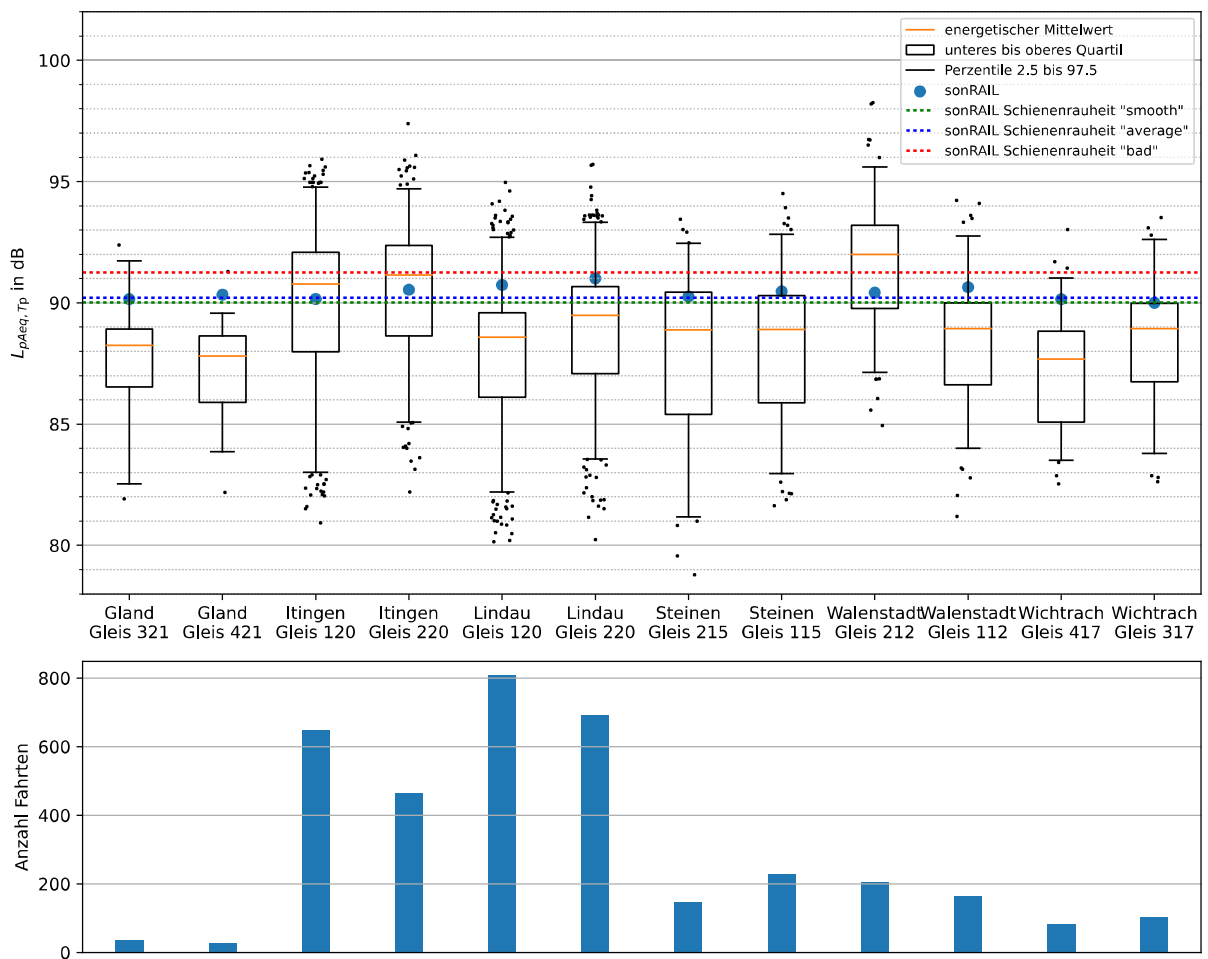


Abbildung 37: Vergleich der Vorbeifahrtspegel des Lokomotivtyps Re420 im Jahr 2016 mit dem sonRAIL-Emissionsmodell. Die Boxplots zeigen jeweils die Werte des $L_{pAeq, Tp}$ bei Vorbeifahrten mit 90 bis 100 km/h konstanter Fahrt pro Standort und Gleis. Die Darstellung der Ausreisser mit einer horizontalen Streuung dient der besseren Lesbarkeit. Anstelle des sonst bei Boxplots üblichen Medianwerts wird der energetische Mittelwert gezeigt. Die blauen Punkte zeigen die mit sonRAIL berechneten Mittelungspegel unter Berücksichtigung des lokalen Schottereffekts sowie der im Jahr 2016 gemessenen Schienenrauheit bei einer Geschwindigkeit von 95 km/h.

6.3 Untersuchungen von zeitlichen Veränderungen an einzelnen Fahrzeugen

Motiviert durch die grossen gefundenen Streuungen in Kapitel 6.2.4 wurden einzelne Lokomotiven (Individuen) des Typs Re420 über einen Zeitraum von sechs Monaten verfolgt. Die Analysen wurden auf den Standort Itingen und den Geschwindigkeitsbereich 100 bis 110 km/h eingegrenzt. Es wurden zehn Lokomotiven anhand deren Fahrzeugidentifikators gewählt, die gemäss Filterung die Messstelle am häufigsten passiert haben.

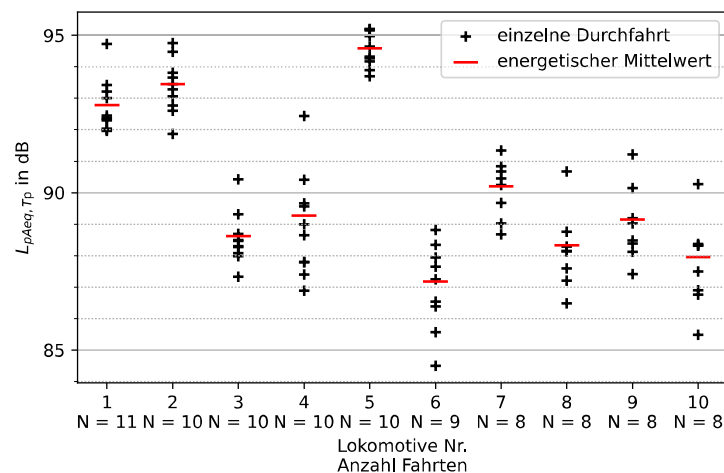


Abbildung 38: Mittelungspegel der Durchfahrten zehn verschiedener Individuen des Lokomotivtyps Re420 am Standort Itingen im Zeitraum Januar 2020 bis Juni 2020 und in einem Geschwindigkeitsbereich von 100 bis 110 km/h. Die roten Balken zeigen jeweils den energetischen Mittelwert aller Vorbeifahrtspegel.

Abbildung 38 zeigt die Vorbeifahrtspegel jeder Vorbeifahrt der zehn ausgewählten Lokomotiven und deren Mittelwert. Die Mittelwerte zwischen zwei Lokomotiven des gleichen Typs variieren teilweise mehr als 7 dB. Gemäss den Analysen in Kapitel 6.2.2 liegt der maximal zu erwartende Einfluss der Geschwindigkeit in diesem Bereich bei ungefähr 2 dB. Das heisst, dass grössere Unterschiede nicht damit erklärt werden können, dass eine Lokomotive häufiger am tieferen Rand des Geschwindigkeitsbereichs fährt, während eine andere häufiger am oberen Bereich fährt. Störeinflüsse von angehängten Güterwagen sind unwahrscheinlich, da die Re420 selbst eher hohe Schallemissionen erzeugt, und zudem Güterwagen mit GG-Sohlen als Nachbarfahrzeuge ausgeschlossen wurden (siehe Kapitel 5.5.2). Aus Abbildung 38 lässt sich folgern, dass unterschiedliche Individuen des gleichen Lokomotivtyps über eine Dauer von 6 Monaten akustisch in unterschiedlich guten Zuständen waren.

Für Abbildung 39 wurden die Durchfahrten einer einzelnen Lokomotive (ein Individuum) über den gesamten Messzeitraum analysiert. Bedingt durch die Betriebsbedingungen in Itingen wird auf einem Gleis häufig beschleunigt, auf dem anderen häufig gebremst. Um dennoch genügend Fahrten auf beiden Gleisen zu erhalten, wurde auf das Aussortieren bremsender Fahrzeuge (siehe Kapitel 5.5.2) verzichtet. In Abbildung 39 ist ein zeitliches Muster erkennbar, in dem die Vorbeifahrtspegel über die Zeit steigen und dann plötzlich fallen und danach erneut ansteigen. Es kann vermutet werden, dass sich in diesem akustischen Muster die Wartungsintervalle zeigen. Bei der betroffenen Lokomotive ergeben sich Unterschiede von bis zu 10 dB. Diese zeitliche Variation erklärt wohl auch die Unterschiede zwischen den Lokomotiven in Abbildung 38, denn es kann davon ausgegangen werden, dass sich die Lokomotiven in einem unterschiedlichen Stadium der Wartung befinden. Diese Vermutungen könnten ggf. mit Wartungsplänen der SBB abgeglichen werden. Dass die Variation auf eine Veränderung des Oberbaus zurückzuführen sind, ist unwahrscheinlich, da sich, wie in Abbildung 22 ersichtlich, die Emissionen am Standort Itingen selbst für Güterwagen mit K-Sohlen nur um maximal 3 dB verändern.

Diese Analysen von einzelnen Lokomotiven scheinen das Lärminderungspotential bei der Fahrzeugwartung aufzuzeigen.

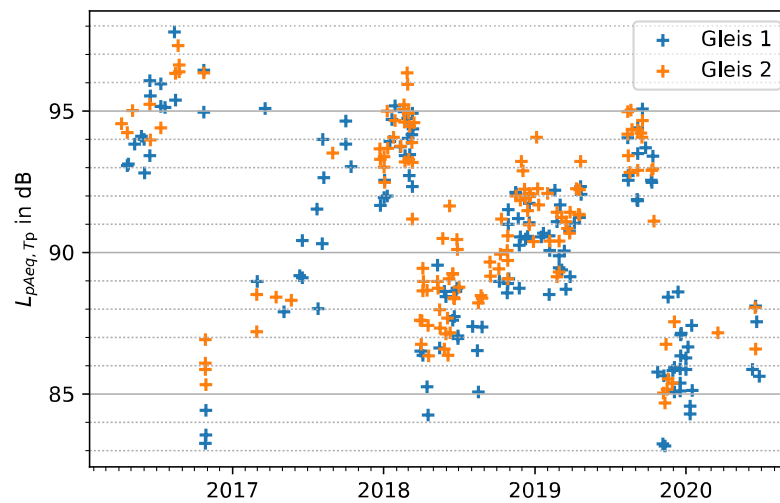


Abbildung 39: Mittelungspegel einzelner Durchfahrten eines einzelnen Exemplars einer Re420 am Monitoringstandort Itingen während der gesamten vorliegende Messdauer. Die Durchfahrten sind auf einen Geschwindigkeitsbereich von 90 bis 110 km/h beschränkt, auf das Aussortieren von Durchfahrten mit negativer Beschleunigung wurde verzichtet, um eine genügen hohe Anzahl von Fahrten auf beiden Gleisen zu erzielen.

6.4 Schotterbettiefen

Tabelle 9 listet die per Fitting-Algorithmus (Kapitel 5.5.4) berechneten akustisch wirksamen Schotterbettiefen d_s unter den beiden Gleisen aller Standorte auf. Die mit diesen d_s berechneten Bodeneffekte für alle Quellhöhen sind in Anhang E aufgeführt. Die d_s nehmen Werte zwischen 37.5 cm in Walenstadt und 55 cm in Gland an. Sie unterscheiden sich somit standortabhängig um bis zu 18 cm. Um den Einfluss von d_s , besonders im Frequenzbereich < 1 kHz zu verdeutlichen, sind die Transferfunktionen von Quellhöhe $h = 0$ m zur Standardmikrofonposition bei diesen beiden Standorten dem sonRAIL-Standardspektrum in Abbildung 40 gegenübergestellt. Unterhalb von 500 Hz resultieren für die Transferfunktionen der für den Oberbau repräsentativen Quellhöhe von $h = 0$ m Differenzen bis 5 dB im gleichen Terzband. Die grösste Differenz der d_s am selben Standort im gleichen Jahr ist mit 15 cm in Walenstadt zu finden. Über die Jahre hinweg variiert d_s um bis zu 5 cm in Gland (Gleis 1) und Itingen (Gleis 2). In Steinen und Wichtrach dagegen bleiben sie konstant.

Insbesondere in den Terzbändern unter 1 kHz werden die Schottereffektspektren besonders stark von der Schotterbetttiefe beeinflusst. Das sonRAIL-Modell verwendet bei unbekannter Bahndammgeometrie ein Standard-Spektrum, um den Schottereffekt zu berücksichtigen. Jedoch wurde dazu eine Situation in 7.5 m Abstand zum nahen Gleis zugrunde gelegt, bei welcher ein bedeutender Anteil der Bodenreflexion über natürlichem Boden geschieht. Bei den BAV-Monitoringstationen ist dies jedoch nicht der Fall: Hier sind die Mikrofone zwar auch in normgemäsem Lateralabstand von 7.5 m positioniert, allerdings breitet sich der Schall über das dazwischenliegende Gleis und damit ausschliesslich über Schotter aus. Dieser Unterschied stellt sich auch in Abbildung 40 beim Vergleich der tieffrequenten Schottereffekte zwischen dem sonRAIL-Standard- und den berechneten Spektren für Gland und Walenstadt offensichtlich dar.

Im Anhang E sind die berechneten Schottereffektspektren in Quellhöhe $h_0 = 0$ m für alle Standorte im Vergleich zum sonRAIL-default aufgeführt.

Tabelle 9: Berechnete Schotterbettiefen unter beiden Gleisen aller Standorte. Am Standort Wichtrach fanden im Frühjahr 2019 umfangreiche Umbauarbeiten statt, wodurch sich die akustisch wirksamen Schotterbettiefen jedoch nur unwesentlich geändert haben.

Standort	dreistelliger Code (Gleis 1)	dreistelliger Code (Gleis 2)
	d_s (Gleis 1) in cm, jüngster Wert	d_s (Gleis 2) in cm, jüngster Wert
Gland	321	421
	47.5 – 52.5, 47.5	52.5 – 55.0, 55.0
Itingen	120	220
	40.0 – 42.5, 42.5	47.5 – 52.5, 52.5
Lindau	120	220
	40.0 – 42.5, 40.0	52.5
Steinen	215	115
	42.5	52.5
Walenstadt	212	112
	37.5 – 40.0, 40.0	52.5
Wichtrach (bis 2018)	417	317
	40.0	52.5
Wichtrach (ab 04/2019)	417	317
	42.5	52.5

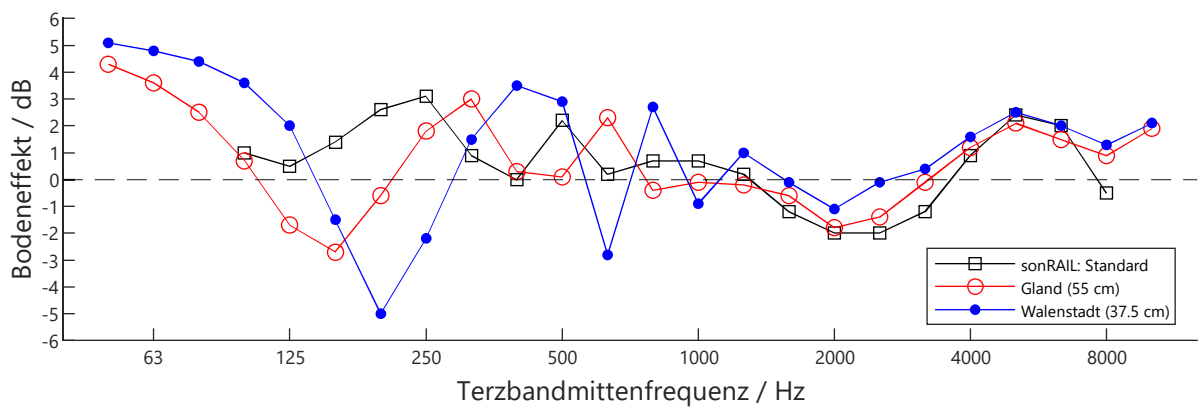


Abbildung 40: Vergleich der Bodeneffektspektren auf dem Übertragungsweg von Quellhöhe $h = 0$ m zum Empfänger in Standardposition (7.5 m lateral, 1.2 m vertikal) in sonRAIL, Gland mit $d_s = 55$ cm (höchster Wert) und Walenstadt mit $d_s = 37.5$ cm (niedrigster Wert).

6.5 Charakterisierung des Oberbaus

6.5.1 Schienenrauheit

Durch Berechnung des Rauheitsindikators $L_{\lambda,CA}$ [3] aus den jährlichen Rauheitsspektren (siehe Kapitel 4.2.1) wird die Schienenqualität nach sonRAIL-Formalismus in den drei Kategorien ermittelt. Tabelle 10 führt die Klassierung für alle 12 Gleise und Jahre auf. Alle drei Kategorien tauchen dabei auf, wobei 'average' am häufigsten ist. An allen Standorten treten Änderungen der Qualitätsklasse über die Zeit auf. Auffällig sind die beiden Sprünge von 'smooth' zu 'bad' in Steinen 115 von 2018 zu 2019 und in Lindau 120 von 2019 zu 2020. Einzig das Gleis 112 in Walenstadt bleibt konstant in der Klasse 'average'.

Tabelle 10: sonRAIL-Schienenrauheitsklassierung für die jährlich gemessenen Schienenrauheiten.

Gleis	Jahr				
	2016	2017	2018	2019	2020
Gland 321	average	average	smooth	average	average
Gland 421	smooth	average	smooth	average	average
Itingen 120	smooth	average	average	average	average
Itingen 220	smooth	average	average	average	smooth
Lindau 120	bad			smooth	bad
Lindau 220	bad			smooth	average
Steinen 115	smooth	average	smooth	bad	average
Steinen 215	average	average	average	bad	average
Walenstadt 112	average	average	average	average	average
Walenstadt 212	average	average	bad	bad	average
Wichtrach 317	average	average	smooth	smooth	smooth
Wichtrach 417	smooth	smooth	smooth	average	smooth

Die spektralen Schienenrauheiten sind in den folgenden Grafiken in Abbildung 41 bis Abbildung 52 für alle Standorte und die Jahre 2016 bis 2020 dargestellt. Die Kurven zeigen das energetische Mittel beider Schienen des jeweiligen Gleises. Die Pfeile $\langle \rangle$ repräsentieren die Messwerte der linken/rechten Schiene. Alle Graphen verlaufen innerhalb gleichfarbiger Korridore, die die Messunsicherheit $\pm \sigma$ entsprechend [10] widerspiegeln. Zum Vergleich sind den Messdaten die bei sonRAIL verwendeten Schienenrauheiten 'smooth', 'average' und 'bad' in schwarz hinterlegt. Daten desselben Jahres erscheinen in derselben Farbe.

Die geschätzten Unsicherheiten liegen meist im Bereich von 3 dB. Die Steigungen der Rauheitsspektren sind ähnlich wie diejenigen von sonRAIL. Ausnahmen bilden einerseits Fälle mit flachem spektralen Verlauf und andererseits Fälle, deren auffällige Peaks einzelner Terzbänder auf Schleifmuster hindeuten.

Abbildung 41 zeigt die jährlichen Schienenrauheiten links und rechts auf Gleis 321, Abbildung 42 auf Gleis 421 in Gland. Auf Gleis 321 sind 2017 die höchsten Rauheitswerte gemessen worden. Nach dem Schleifen in 2019 bleibt die Rauheit in den Wellenlängen $\lambda > 63$ mm unverändert, ist jedoch in den kürzeren Wellenlängen erhöht bzw. steigt in 2020 sogar auf den Höchstwert bei $\lambda > 6.3$ mm. Auf Gleis 421 wurden in 2017 mit Ausnahme der 80 mm-Terz höhere Rauheiten als im Vorjahr 2016 und Folgejahr 2018 gemessen. Ab 2019 – nach dem Schienenschleifen – ist die Rauheit der Wellenlängen $\lambda > 40$ mm erhöht.

Abbildung 43 zeigt die jährlichen Schienenrauheiten links und rechts auf Gleis 120 in Itingen, Abbildung 44 auf Gleis 220. Nachdem die Rauheit auf Gleis 120 mit Ausnahme der 250 mm- und 2.5 mm-Terz geringer als das sonRAIL-Spektrum 'smooth' war, ist sie in den Folgejahren in den Wellenlängen $\lambda \leq 25$ mm so weit erhöht, dass der Indikator $L_{\lambda,CA}$ in die sonRAIL-Kategorie 'average' fällt. Gleis 220 zeigt ein anderes Verhalten, indem die Rauheit in den kürzeren Wellenlängen $\lambda \leq 25$ mm zunächst zunimmt, jedoch nach 2018 wieder abnimmt und 2020 wie bereits 2016 in die Kategorie 'smooth' fällt. Auffällig ist ein Peak bei $\lambda = 40$ mm in 2018 auf Gleis 220, der bereits im Folgejahr geglättet ist.

Abbildung 45 zeigt die jährlichen Schienenrauheiten links und rechts auf Gleis 120, Abbildung 46 auf Gleis 220 in Lindau. Auffällig ist die deutlich höhere Rauheit der Schienen vor den Umbauarbeiten 2017-2018. Bei der ersten Messung nach dem Umbau in 2019 fallen beide Gleise in die sonRAIL-Kategorie 'smooth', jedoch sind die Rauheiten im kurzen Wellenlängenbereich $\lambda \leq 20$ mm bereits im Folgejahr 2020 so stark erhöht, dass die Gleise 120/220 in die sonRAIL-Kategorien 'bad'/'average' fallen.

Abbildung 47 zeigt die jährlichen Schienenrauheiten links und rechts auf Gleis 215, Abbildung 48 auf Gleis 115 in Steinen. Auffällig sind Peaks bei $\lambda = 40$ mm auf beiden Gleisen in 2019 und auf Gleis 215 bei $\lambda = 80$ mm in 2016. Tendenziell nimmt die Rauheit in kurzen Wellenlängen $\lambda < 25$ mm über die Jahre hinweg zu, während sie in langen Wellenlängen $\lambda > 160$ mm abnimmt. Diese Änderung der Rauheit hat auf Gleis 115 einen Wechsel von sonRAIL-Kategorie 'smooth' zu 'bad' zur Folge.

Abbildung 49 zeigt die jährlichen Schienenrauheiten links und rechts auf Gleis 212, Abbildung 50 auf Gleis 112 in Walenstadt. Auffällig ist ein Schleifmuster von $\lambda = 40$ mm Wellenlänge ab 2019. Die Rauheit beider Schienen auf Gleis 212 ist in kurzen Wellenlängen $\lambda < 20$ mm erhöht, ist aber bereits im Folgejahr wieder geglättet. Die Peaks bei $\lambda = 8$ und 16 mm auf Gleis 112 stechen nach dem Schleifen nicht mehr heraus.

Abbildung 51 zeigt die jährlichen Schienenrauheiten links und rechts auf Gleis 417, Abbildung 52 auf Gleis 317 in Wichtrach. Unter allen sechs Standorten ist Wichtrach jener mit den geringsten und vergleichsweise beständigen Schienenrauheiten mit Ausnahme des Gleises 317 in 2016.

Es ist bekannt, dass die Schienen in Gland und Walenstadt in 2019 geschliffen wurden (siehe Kapitel 6.1.2) und in Lindau während 2017 bis 2018 und in Wichtrach über den Jahreswechsel 2018-2019 Umbauarbeiten stattfanden. Für die Standorte Itingen und Steinen liegen keine Wartungs- oder Umbaudaten vor. Trotzdem sind die innerhalb eines Jahres gemessenen Rauheitsspektren zum Teil über die Messunsicherheit hinaus sehr verschieden.

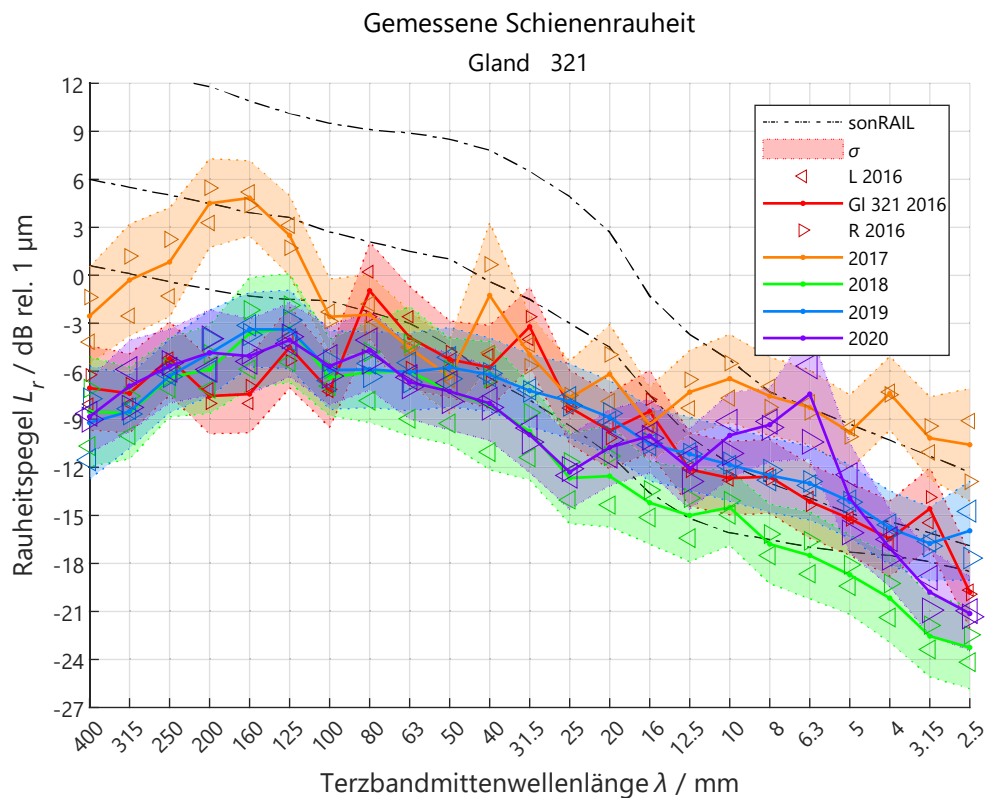


Abbildung 41: Jährliche Rauheitsspektren der linken und rechten Schienen auf Gleis 321 in Gland. Die Linien in schwarz zeigen die bei sonRAIL verwendeten Rauheiten smooth, average und bad.

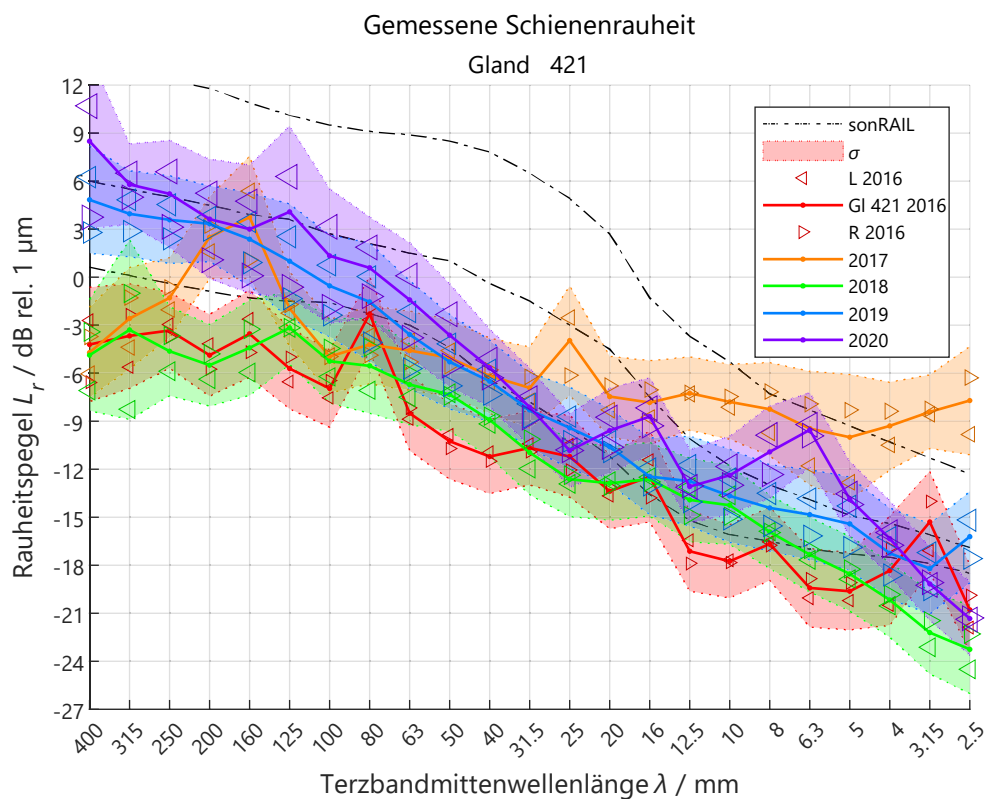


Abbildung 42: Jährliche Rauheitsspektren der linken und rechten Schienen auf Gleis 421 in Gland. Die Linien in schwarz zeigen die bei sonRAIL verwendeten Rauheiten smooth, average und bad.

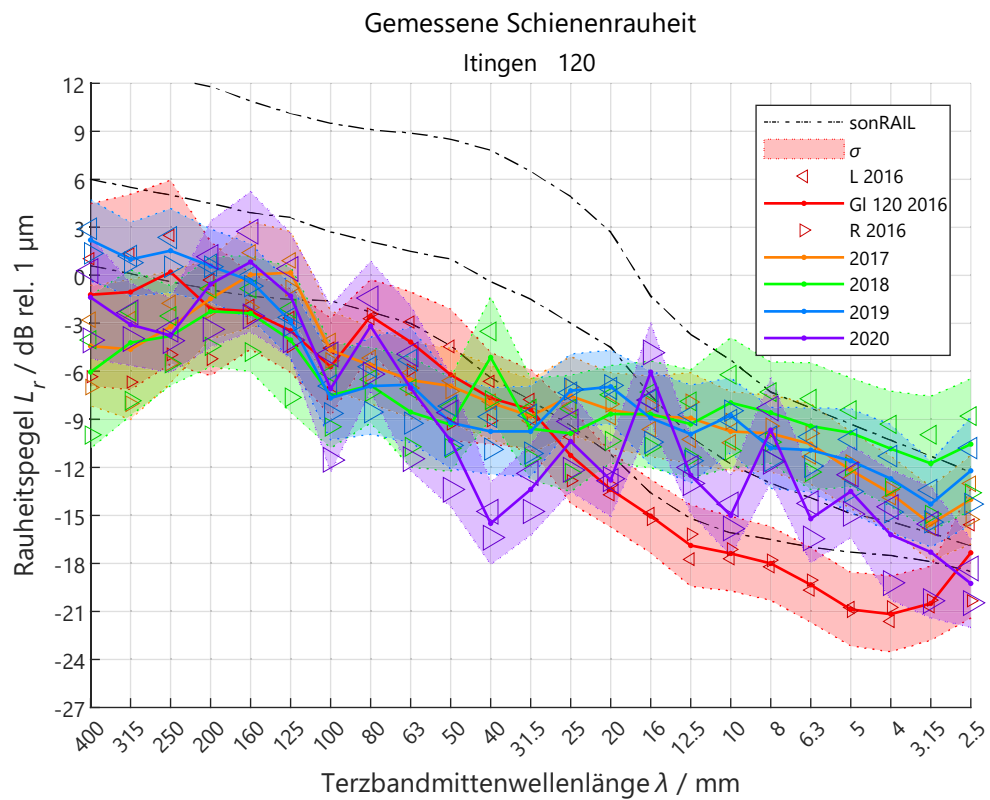


Abbildung 43: Jährliche Rauheitsspektren der linken und rechten Schienen auf Gleis 120 in Itingen. Die Linien in schwarz zeigen die bei sonRAIL verwendeten Rauheiten smooth, average und bad.

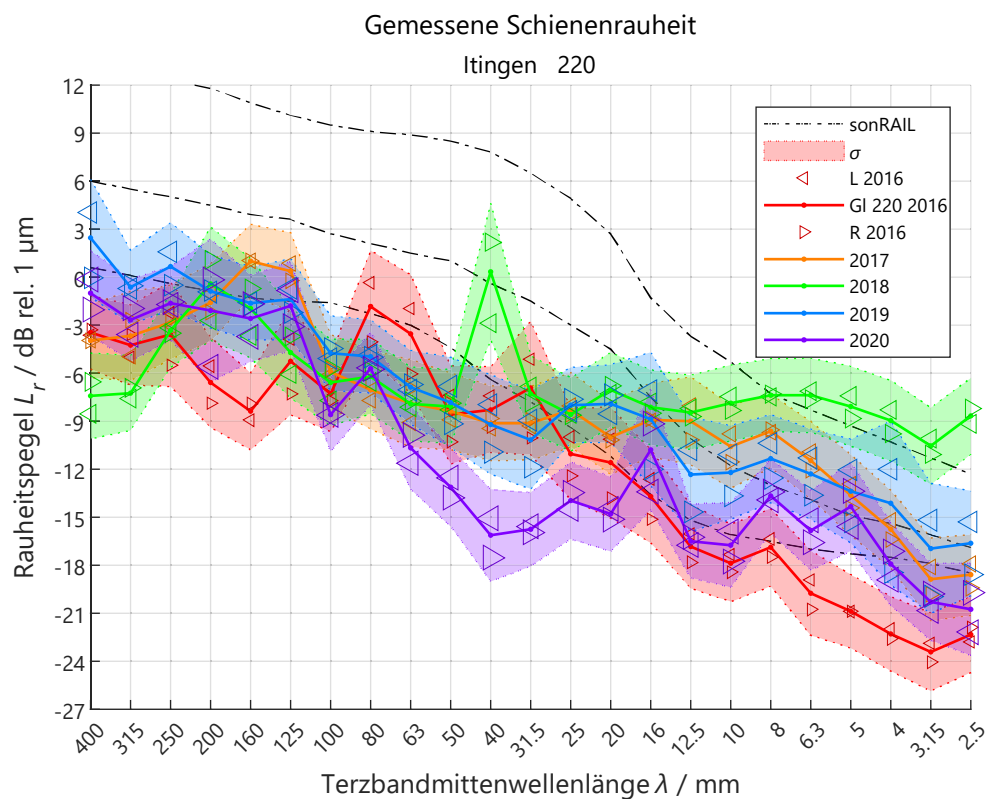


Abbildung 44: Jährliche Rauheitsspektren der linken und rechten Schienen auf Gleis 220 in Itingen. Die Linien in schwarz zeigen die bei sonRAIL verwendeten Rauheiten smooth, average und bad.

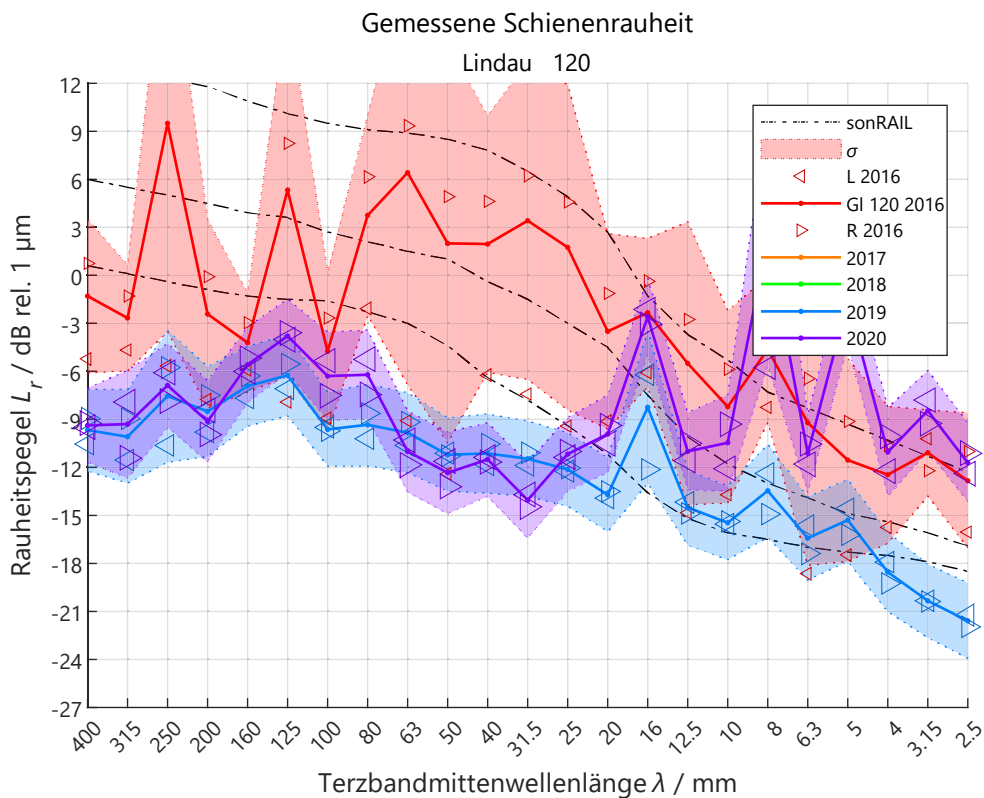


Abbildung 45: Jährliche Rauheitsspektren der linken und rechten Schienen auf Gleis 120 in Lindau. Die Linien in schwarz zeigen die bei sonRAIL verwendeten Rauheiten smooth, average und bad.

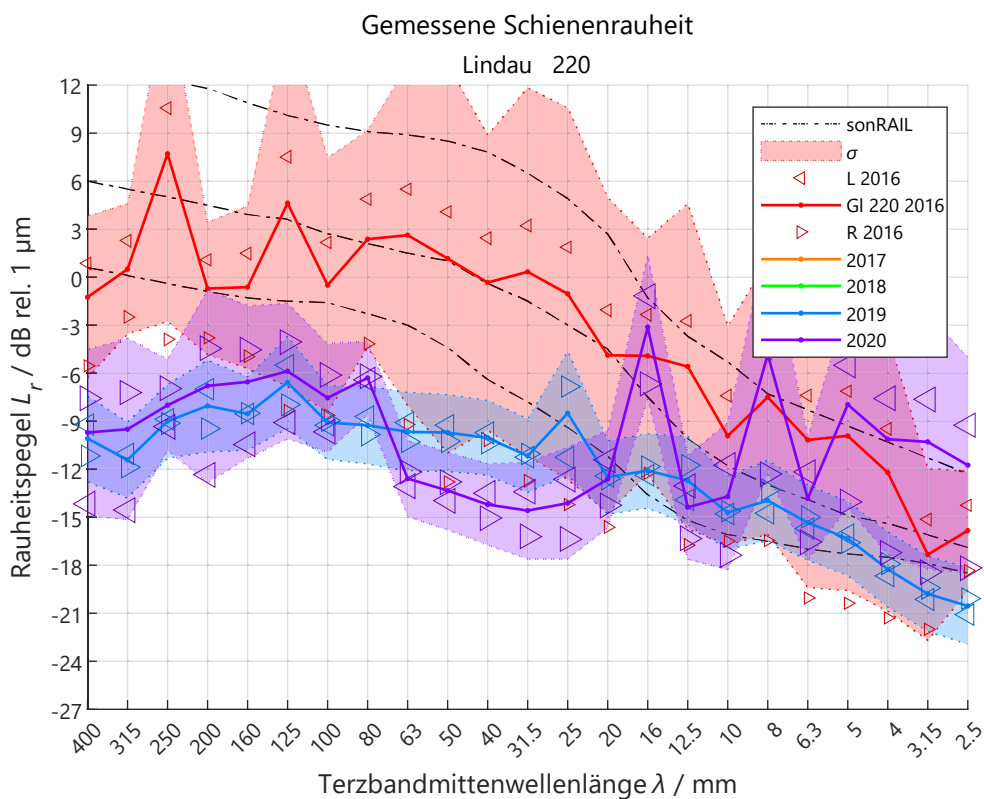


Abbildung 46: Jährliche Rauheitsspektren der linken und rechten Schienen auf Gleis 220 in Lindau. Die Linien in schwarz zeigen die bei sonRAIL verwendeten Rauheiten smooth, average und bad.

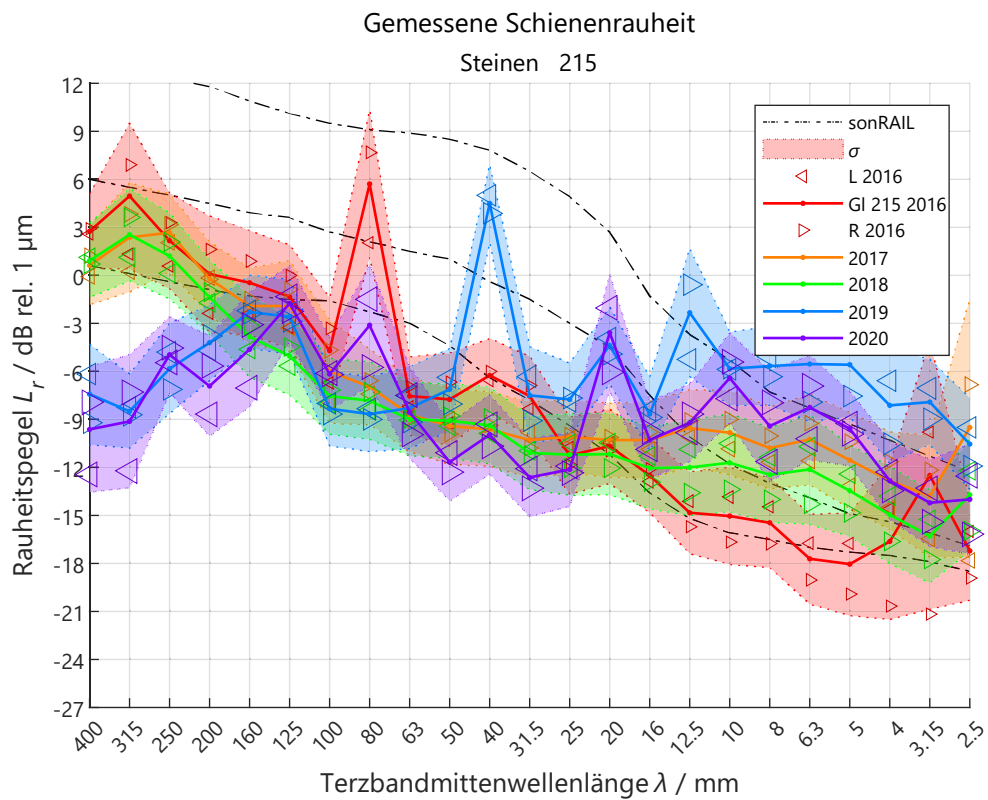


Abbildung 47: Jährliche Rauheitsspektren der linken und rechten Schienen auf Gleis 215 in Steinen. Die Linien in schwarz zeigen die bei sonRAIL verwendeten Rauheiten smooth, average und bad.

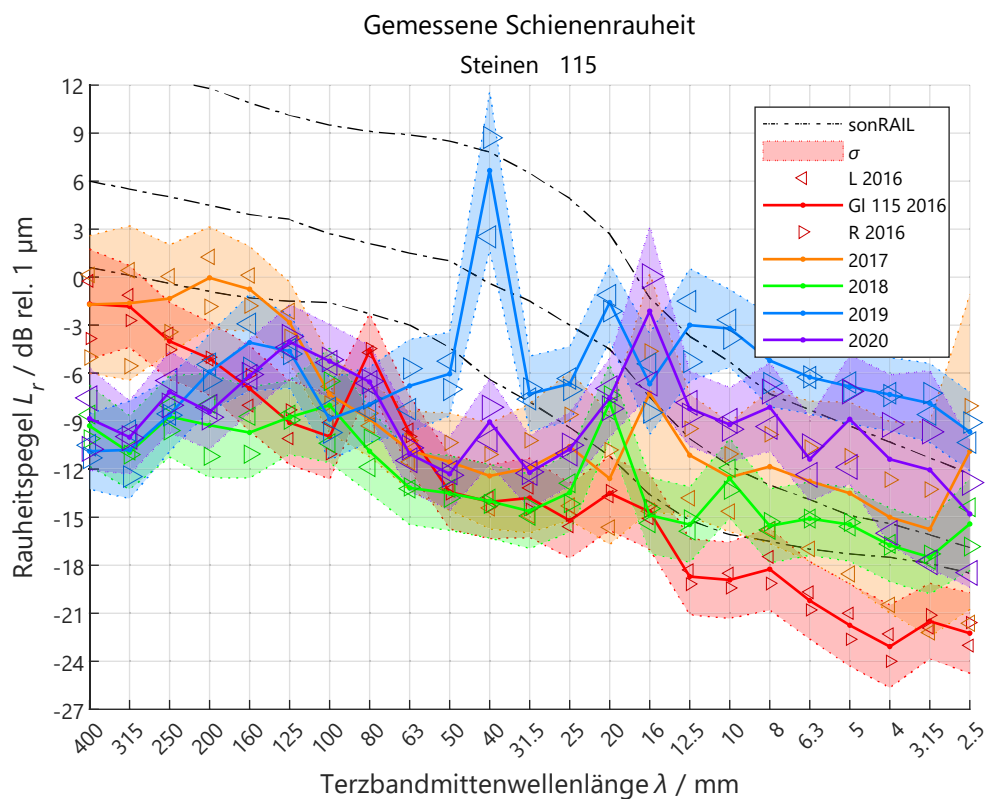


Abbildung 48: Jährliche Rauheitsspektren der linken und rechten Schienen auf Gleis 115 in Steinen. Die Linien in schwarz zeigen die bei sonRAIL verwendeten Rauheiten smooth, average und bad.

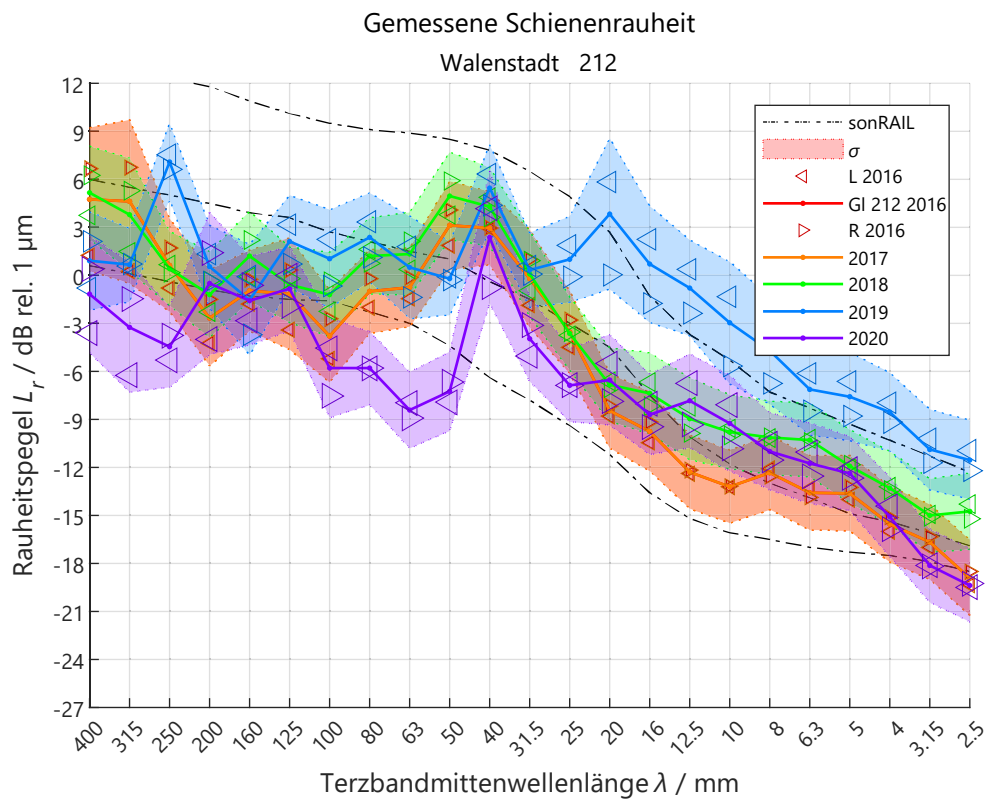


Abbildung 49: Jährliche Rauheitsspektren der linken und rechten Schienen auf Gleis 212 in Walenstadt. Die Linien in schwarz zeigen die bei sonRAIL verwendeten Rauheiten smooth, average und bad.

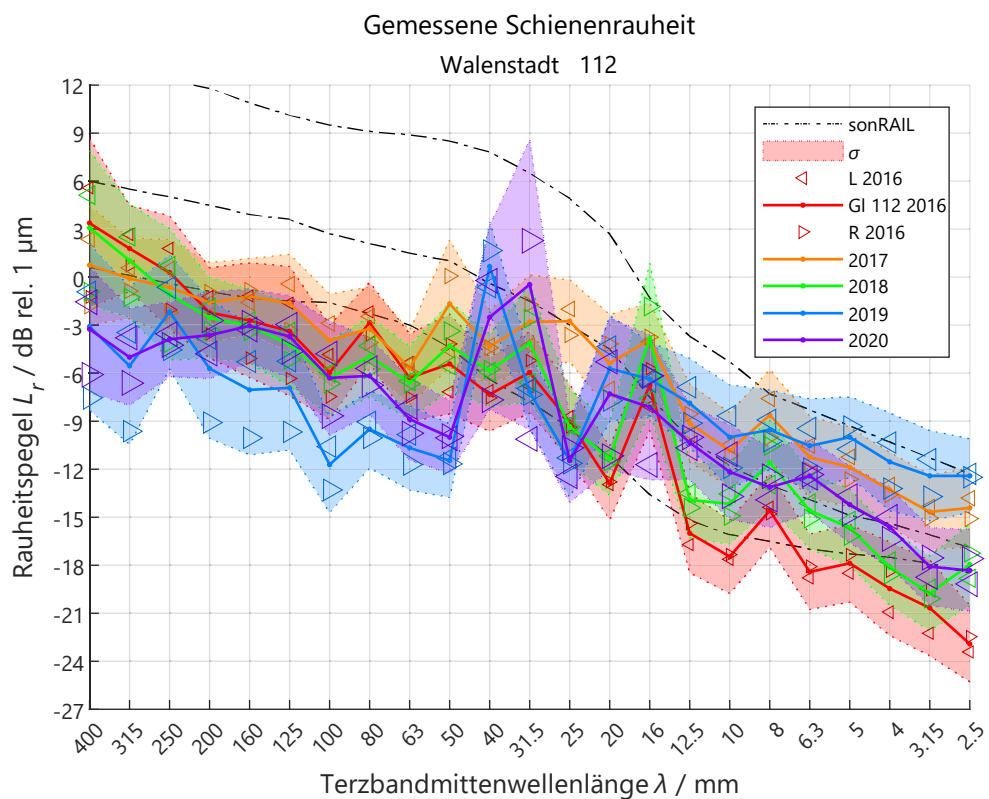


Abbildung 50: Jährliche Rauheitsspektren der linken und rechten Schienen auf Gleis 112 in Walenstadt. Die Linien in schwarz zeigen die bei sonRAIL verwendeten Rauheiten smooth, average und bad.

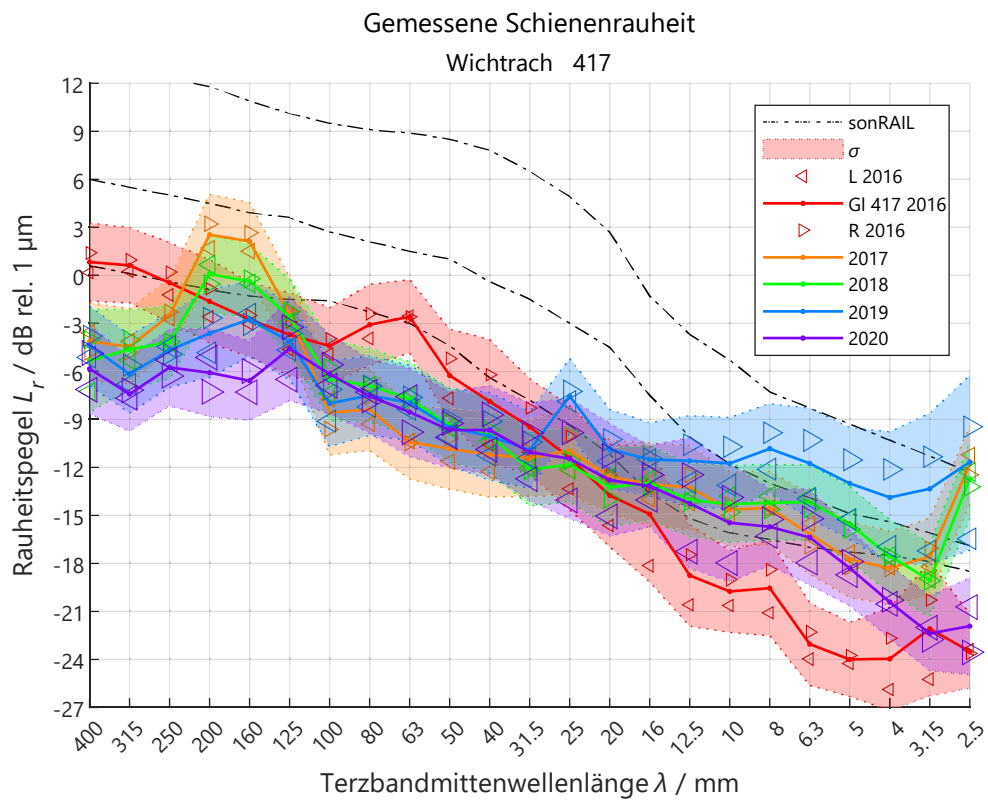


Abbildung 51: Jährliche Rauheitsspektren der linken und rechten Schienen auf Gleis 417 in Wichtrach. Die Linien in schwarz zeigen die bei sonRAIL verwendeten Rauheiten smooth, average und bad.

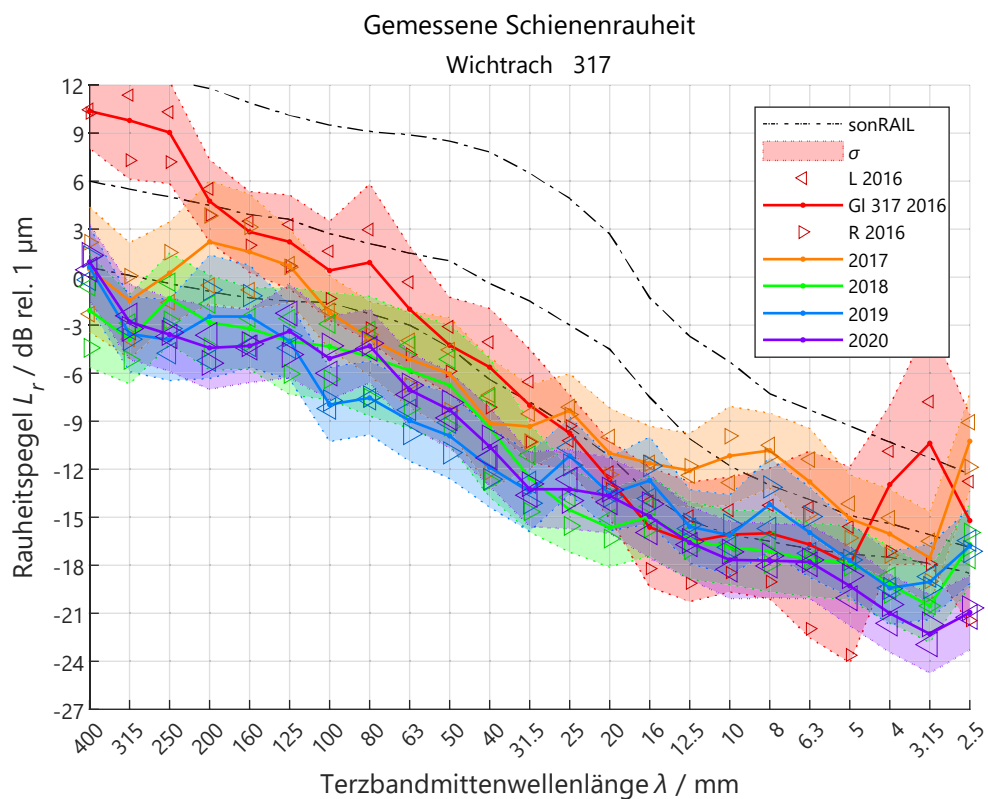


Abbildung 52: Jährliche Rauheitsspektren der linken und rechten Schienen auf Gleis 317 in Wichtrach. Die Linien in schwarz zeigen die bei sonRAIL verwendeten Rauheiten smooth, average und bad.

6.5.2 Schienenabklingraten (Track Decay Rates)

Schienenabklingraten (engl. Track Decay Rates, kurz TDR) werden zur Charakterisierung der dynamischen Eigenschaften von Gleisabschnitten verwendet und typischerweise für die beiden Richtungen horizontal (lateral) und vertikal ausgewiesen. Das Verfahren für deren Messung ist in [11] standardisiert.

Die folgenden Grafiken zeigen in Abbildung 53 bis Abbildung 76 die Spektren der TDRs für beide Schienen des jeweiligen Gleises, für alle Standorte und die Jahre 2016 bis 2020 (siehe Kapitel 4.2.1). Die Pfeile $\triangleleft/\triangleright$ repräsentieren die Messwerte der linken/rechten Schiene. Zum Vergleich sind den Messdaten die Minimalwerte der TSI Noise und die im sonRAIL-Projekt erfassten Mittelwerte des jeweiligen Schwellentyps in schwarz hinterlegt. Daten desselben Jahres erscheinen in derselben Farbe.

In fast allen Fällen liegen die gemessenen TDR-Kurven oberhalb der TSI-Kurve. Im Mittel zeigen die TDR-Kurven einen ähnlichen Verlauf wie die im sonRAIL-Projekt für den gleichen Oberbautyp gemessenen TDRs. Die horizontalen TDRs verhalten sich konsistenter über die Zeit, wohingegen die vertikalen TDRs pro Standort über die Zeit um bis zu einem Faktor 10 variieren. Die Messunsicherheit der TDRs konnte nicht quantifiziert werden. Aus den gezeigten Spektren konnte kein zeitliches Muster abgeleitet werden.

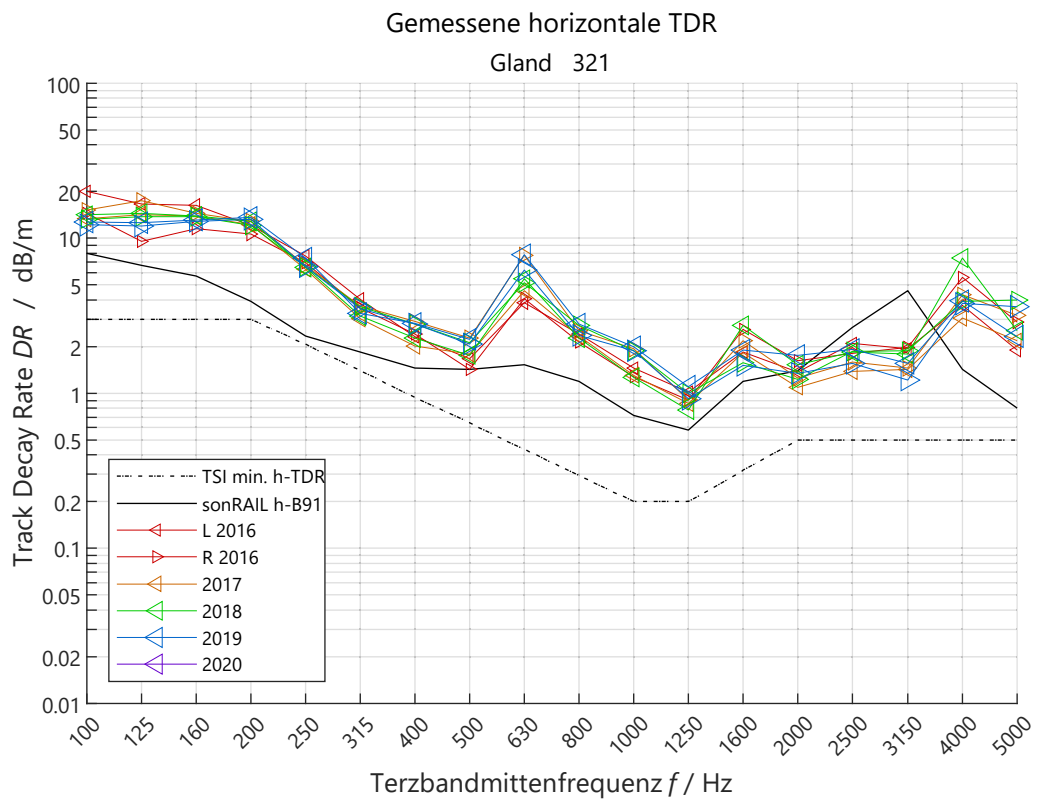


Abbildung 53: Jährliche horizontale TDR der linken und rechten Schienen auf Gleis 321 in Gland.

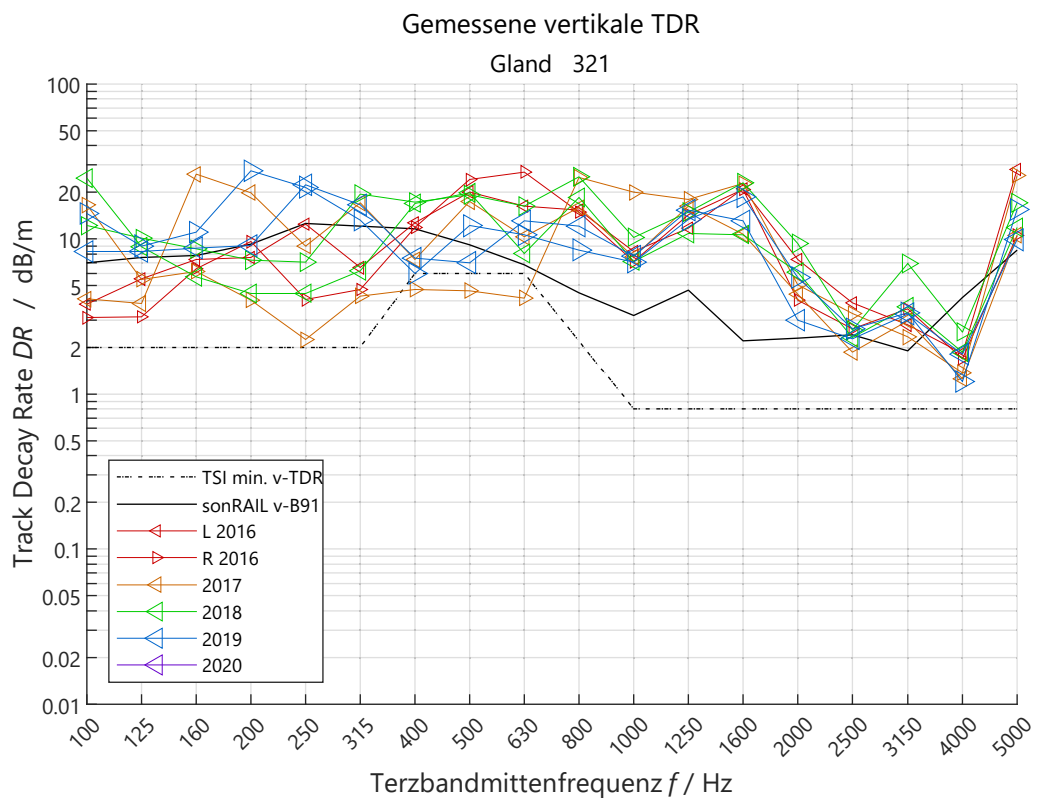


Abbildung 54: Jährliche vertikale TDR der linken und rechten Schienen auf Gleis 321 in Gland.

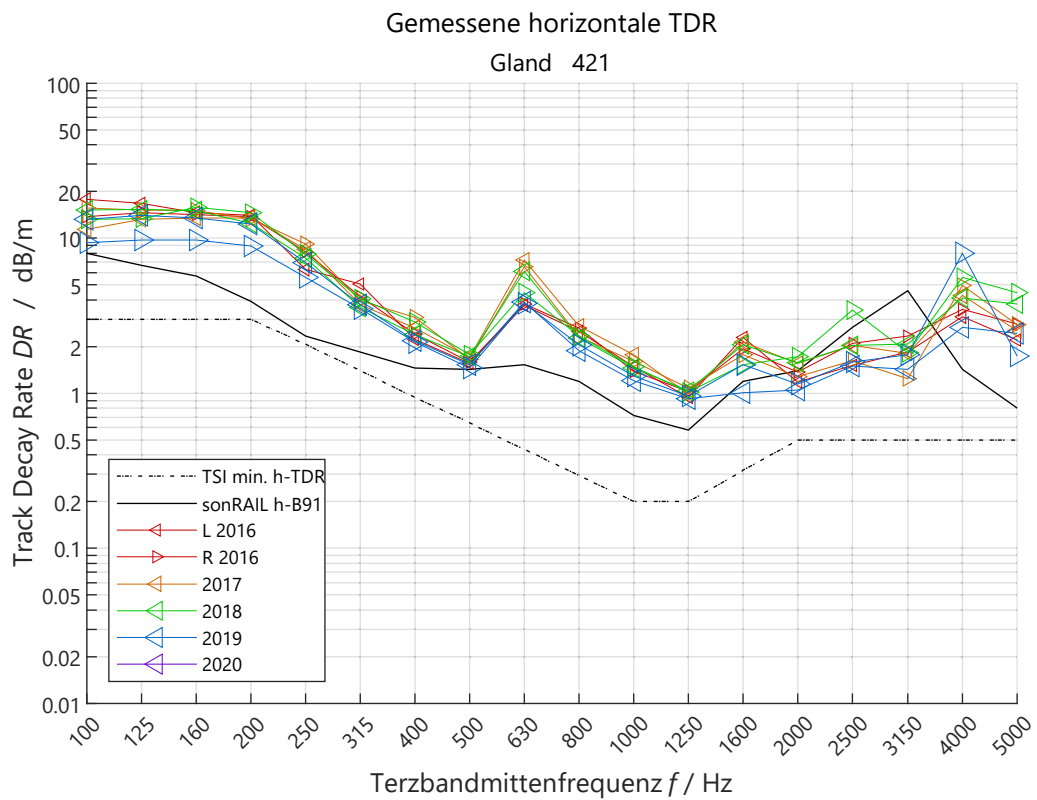


Abbildung 55: Jährliche horizontale TDR der linken und rechten Schienen auf Gleis 421 in Gland.

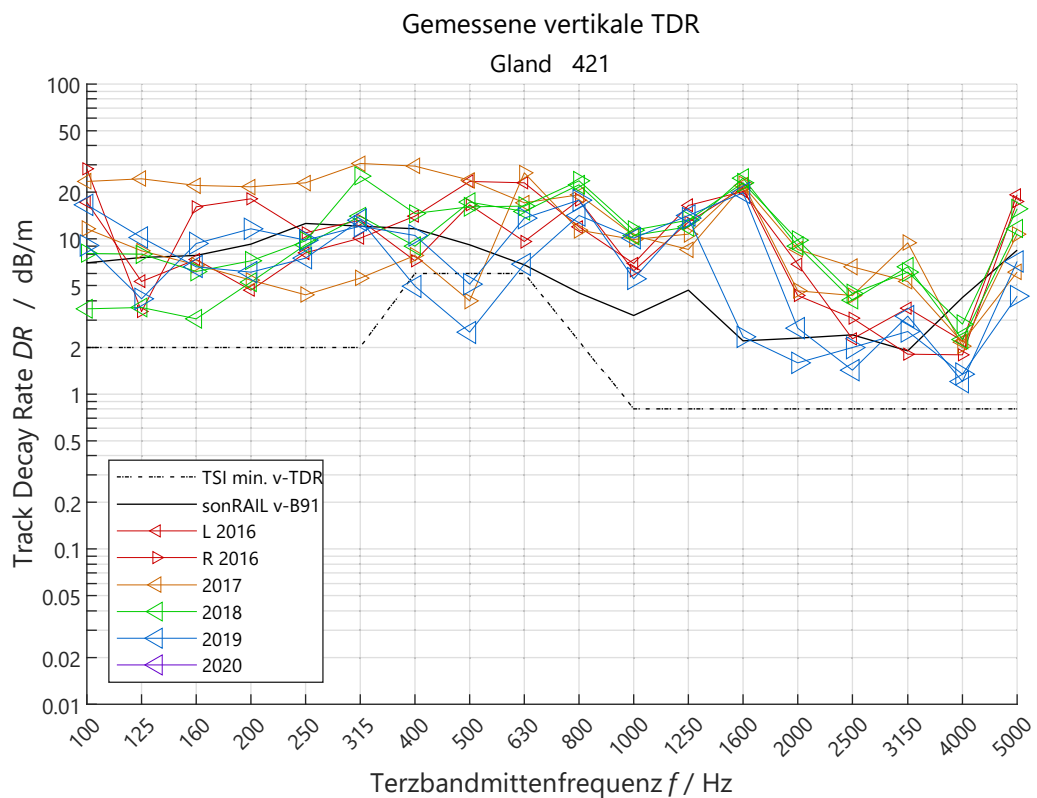


Abbildung 56: Jährliche vertikale TDR der linken und rechten Schienen auf Gleis 421 in Gland.

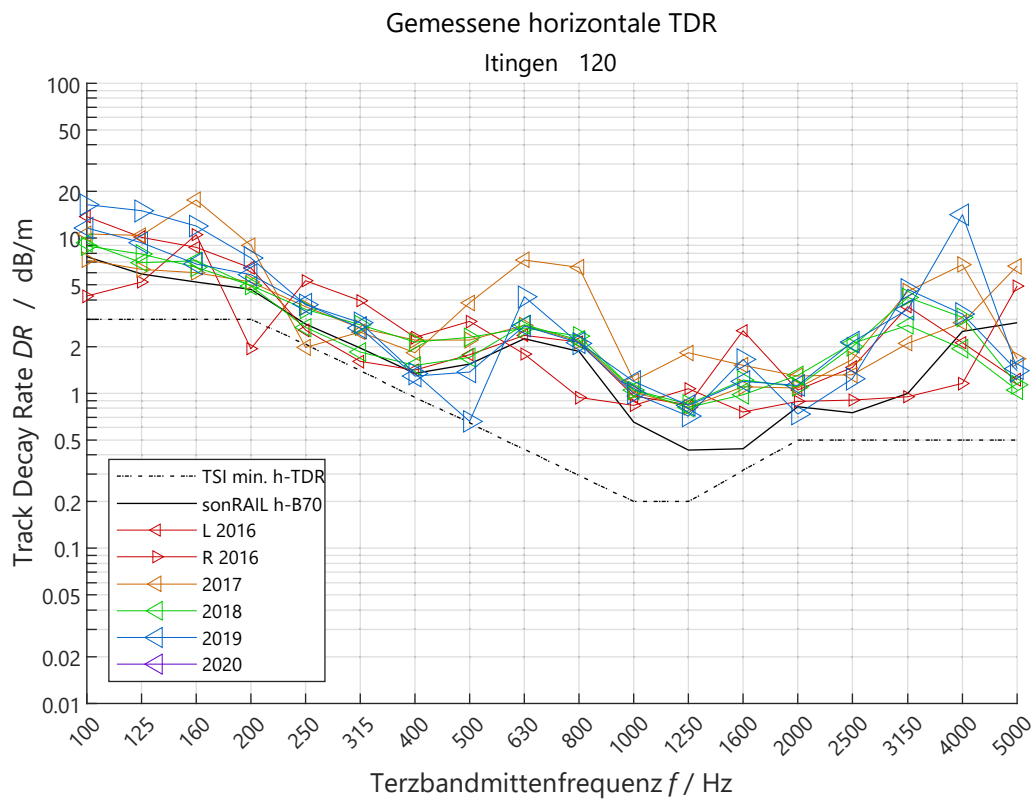


Abbildung 57: Jährliche horizontale TDR der linken und rechten Schienen auf Gleis 120 in Itingen.

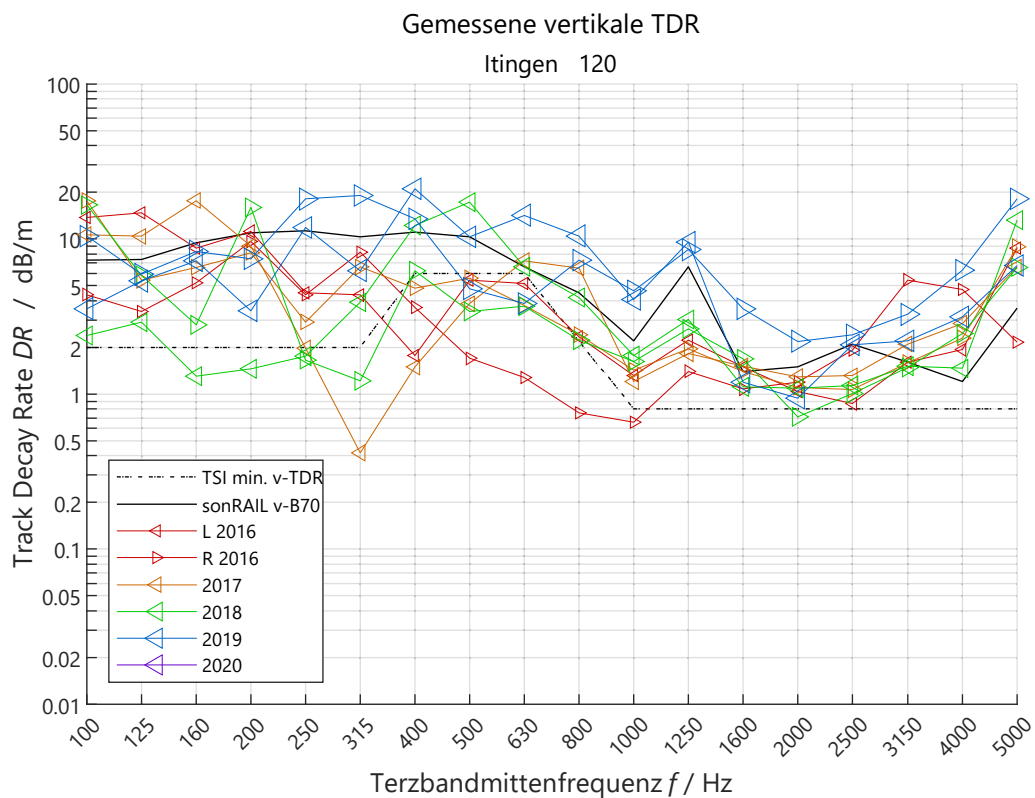


Abbildung 58: Jährliche vertikale TDR der linken und rechten Schienen auf Gleis 120 in Itingen.

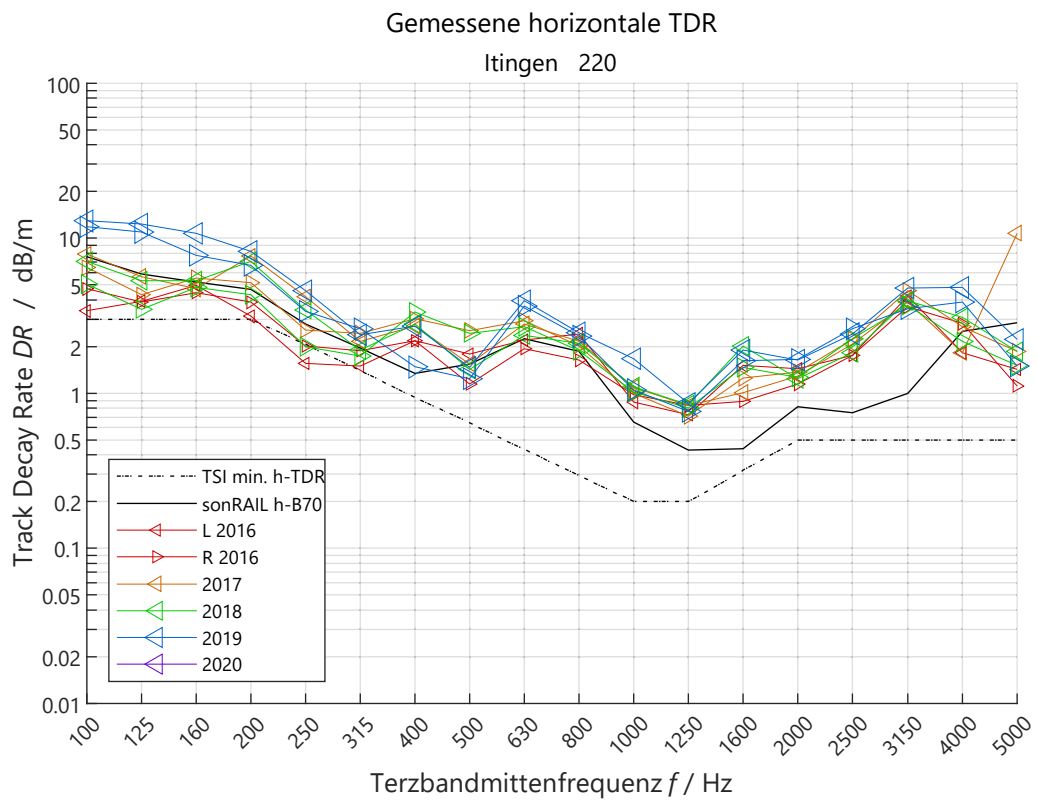


Abbildung 59: Jährliche horizontale TDR der linken und rechten Schienen auf Gleis 220 in Itingen.

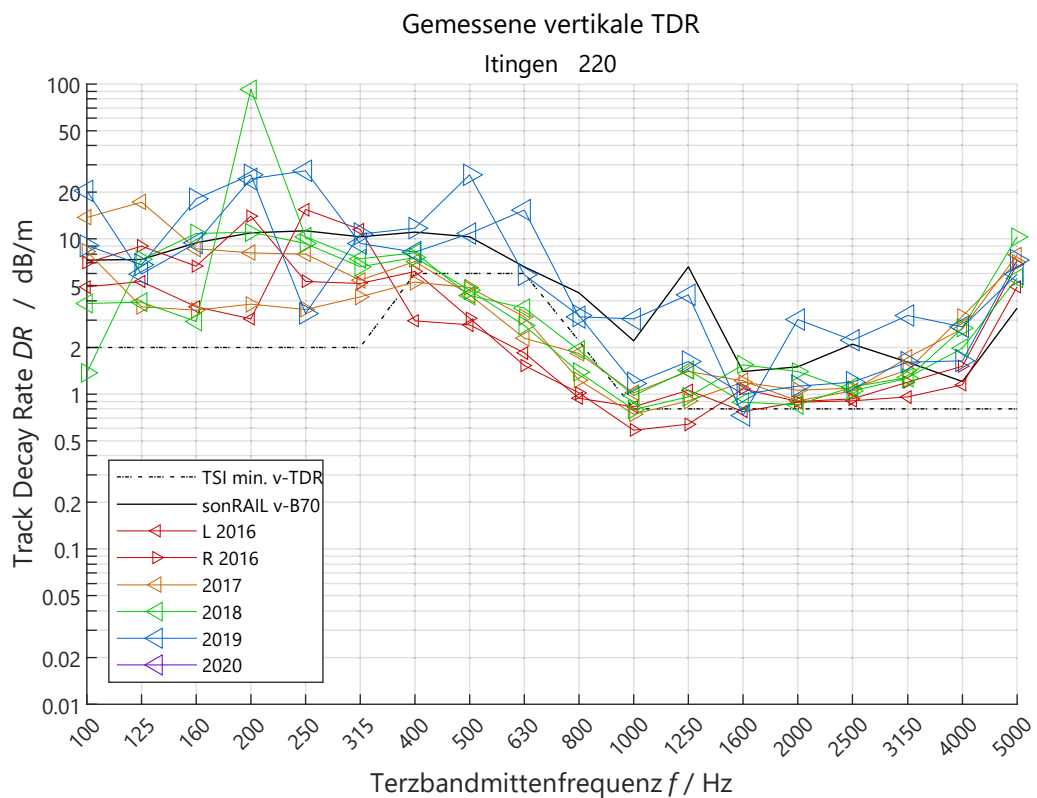


Abbildung 60: Jährliche vertikale TDR der linken und rechten Schienen auf Gleis 220 in Itingen.

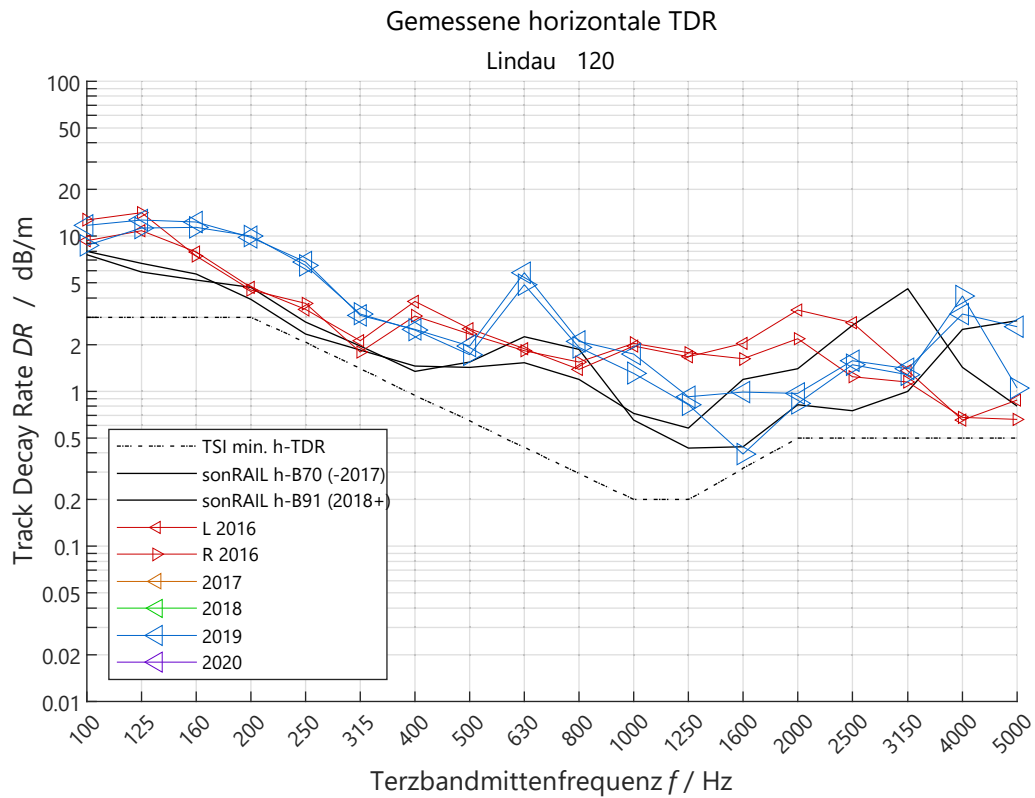


Abbildung 61: Jährliche horizontale TDR der linken und rechten Schienen auf Gleis 120 in Lindau.

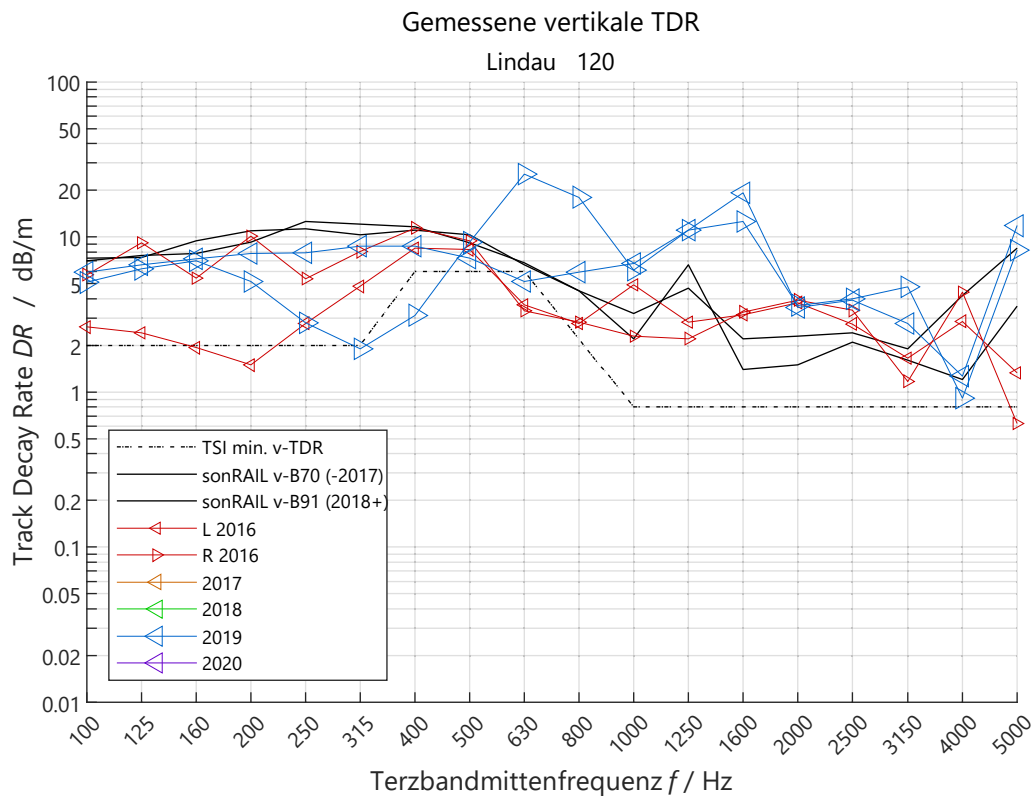


Abbildung 62: Jährliche vertikale TDR der linken und rechten Schienen auf Gleis 120 in Lindau.

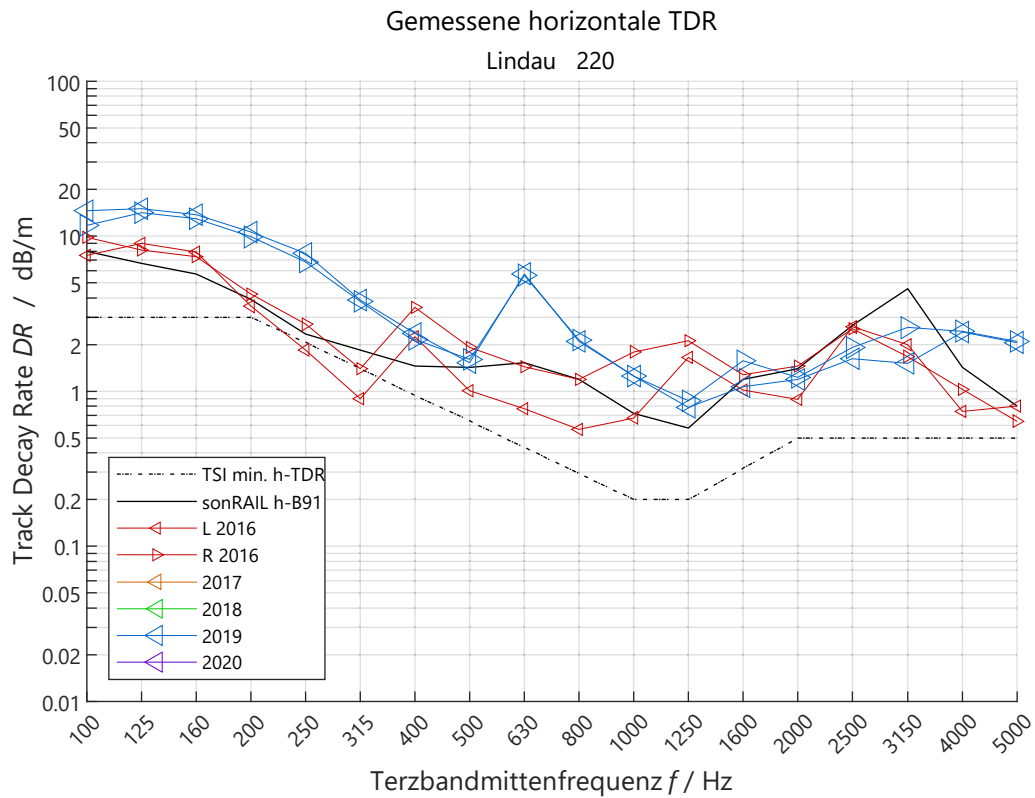


Abbildung 63: Jährliche horizontale TDR der linken und rechten Schienen auf Gleis 220 in Lindau.

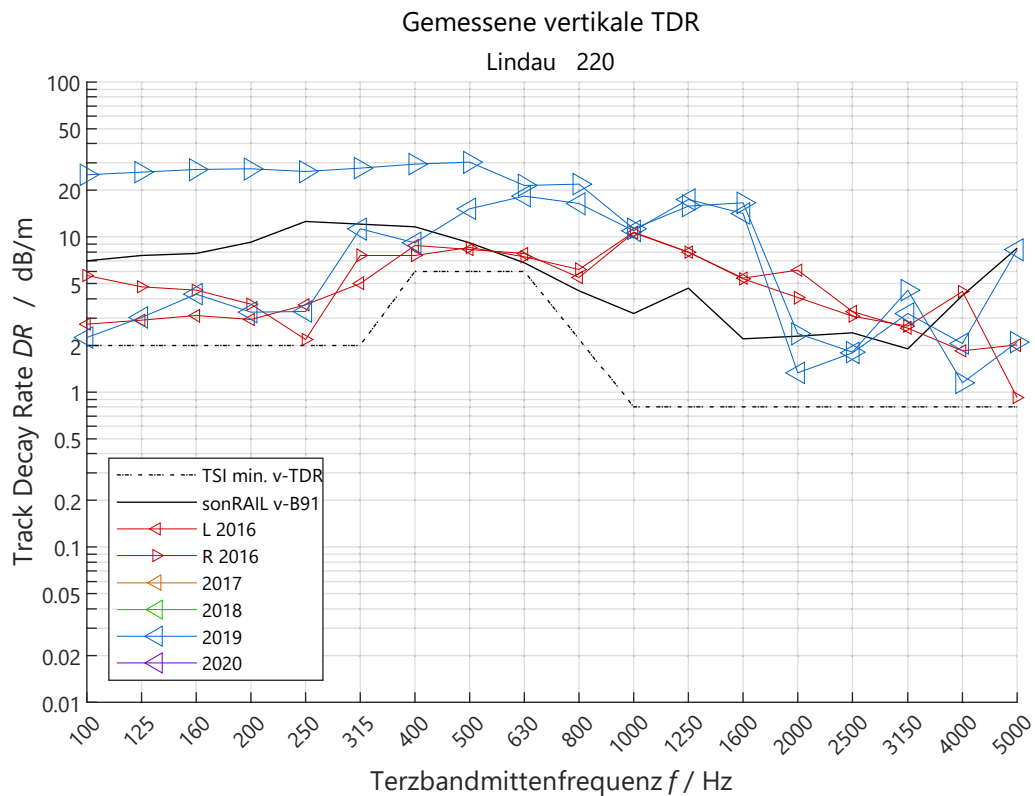


Abbildung 64: Jährliche vertikale TDR der linken und rechten Schienen auf Gleis 220 in Lindau.

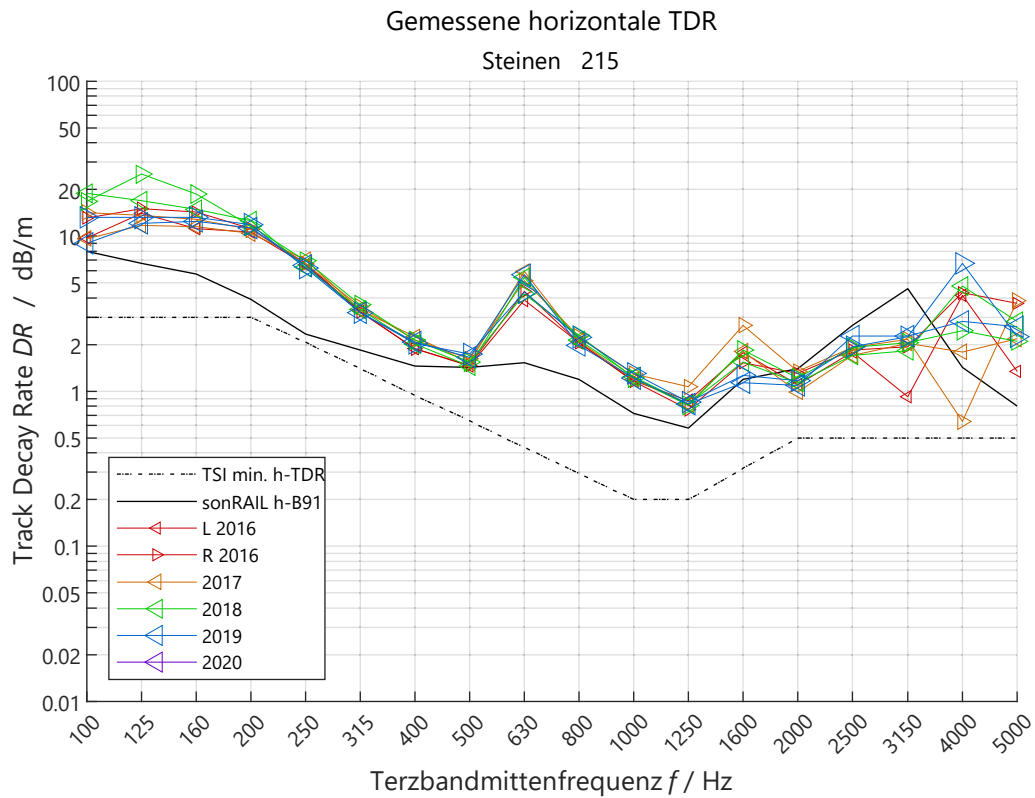


Abbildung 65: Jährliche horizontale TDR der linken und rechten Schienen auf Gleis 215 in Steinen.

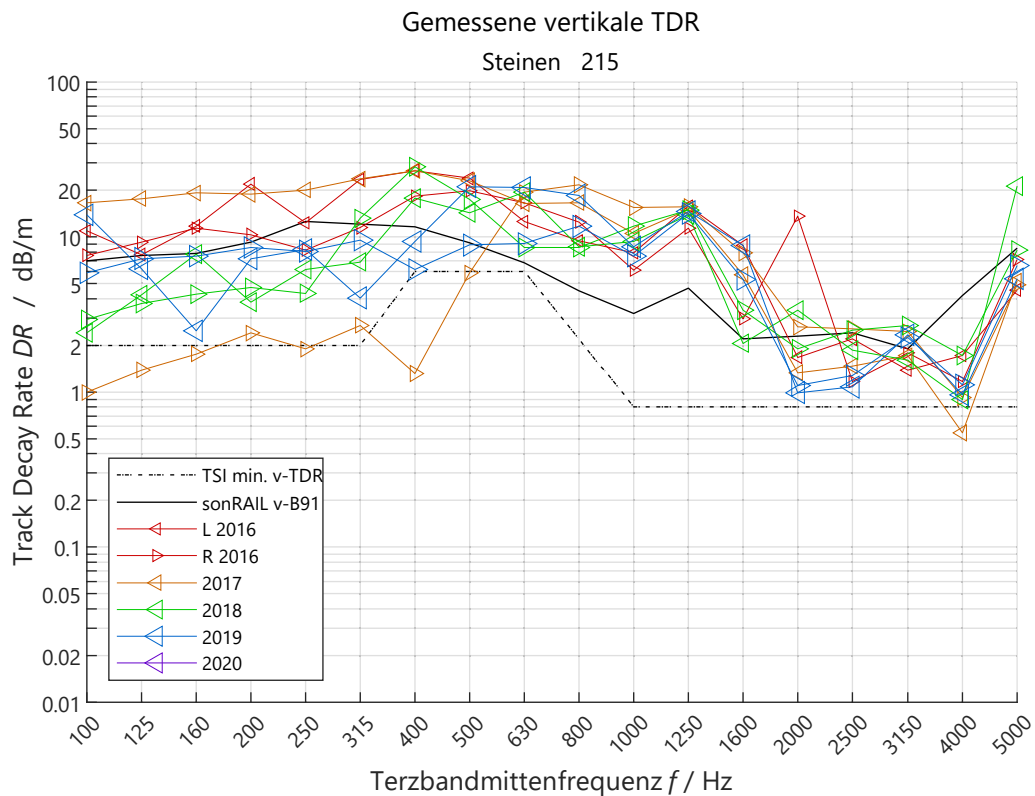


Abbildung 66: Jährliche vertikale TDR der linken und rechten Schienen auf Gleis 215 in Steinen.

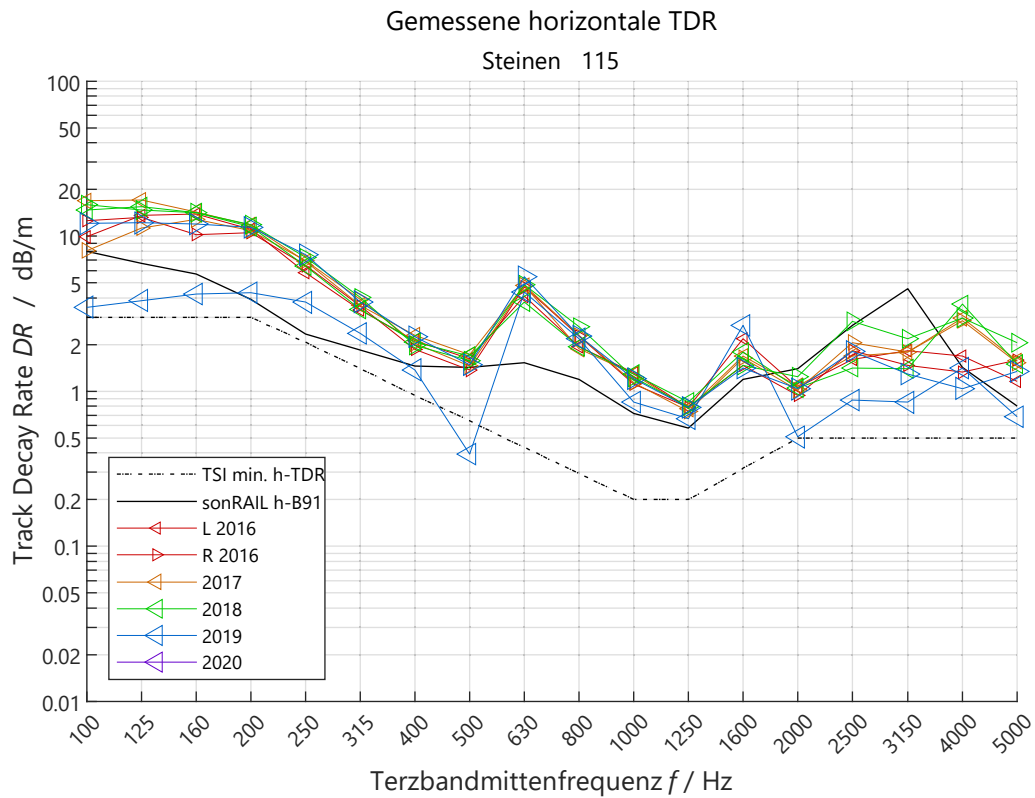


Abbildung 67: Jährliche horizontale TDR der linken und rechten Schienen auf Gleis 115 in Steinen.

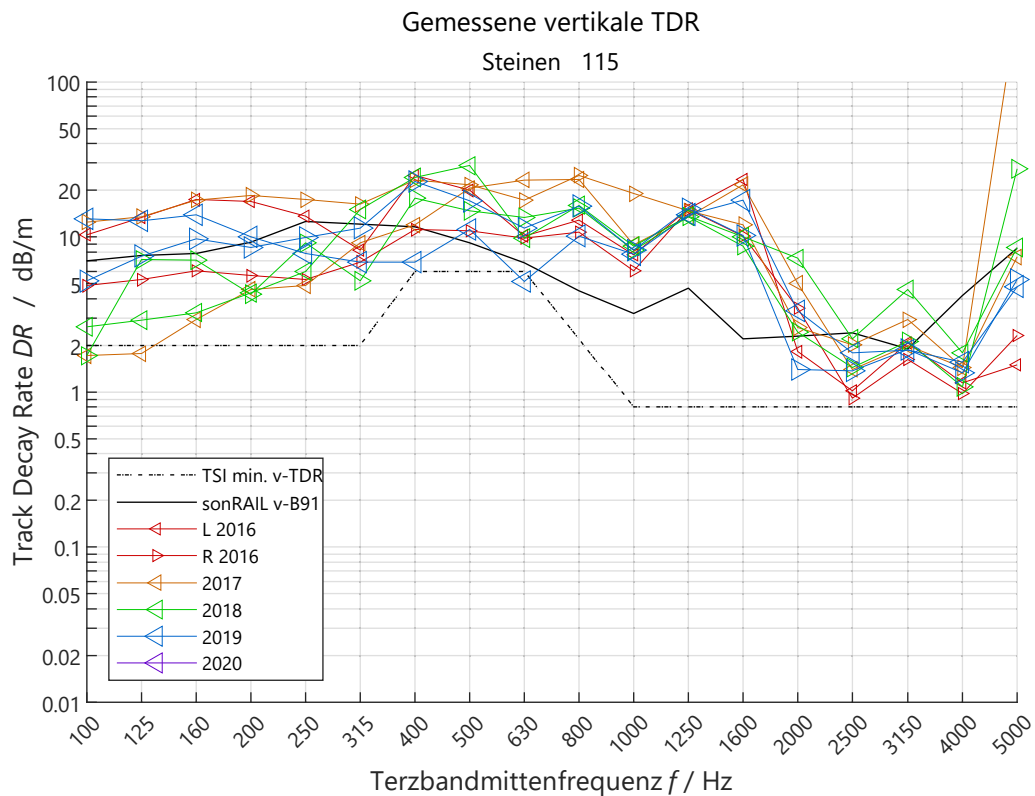


Abbildung 68: Jährliche vertikale TDR der linken und rechten Schienen auf Gleis 115 in Steinen.

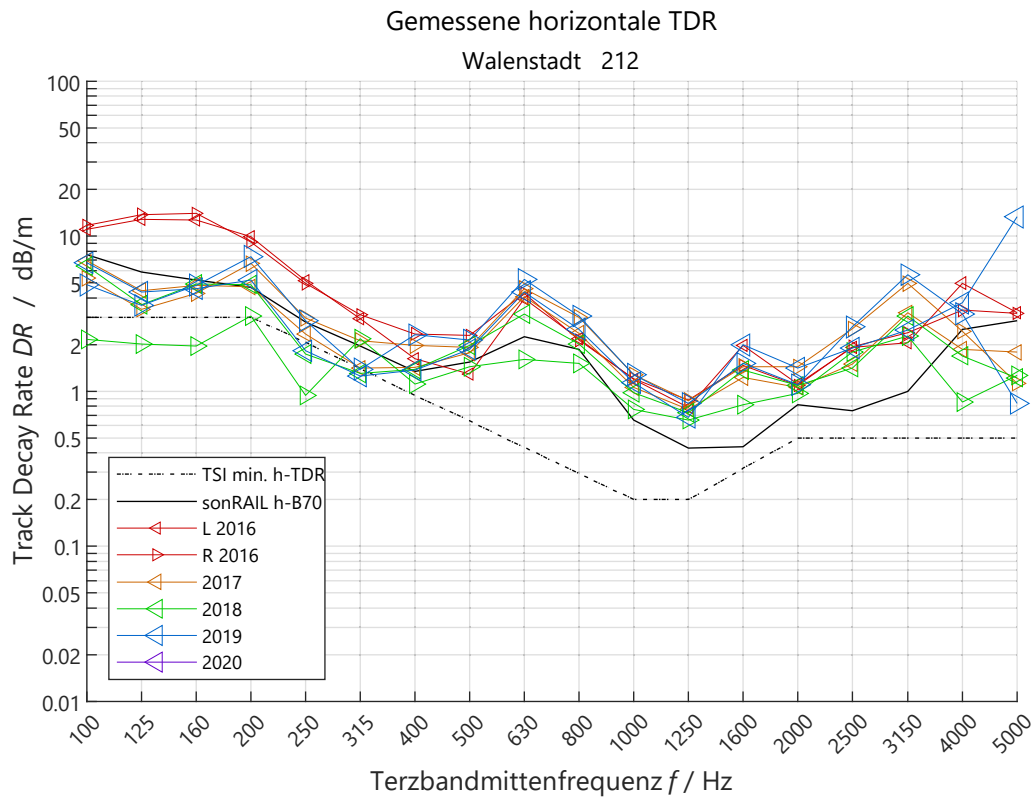


Abbildung 69: Jährliche horizontale TDR der linken und rechten Schienen auf Gleis 212 in Walenstadt.

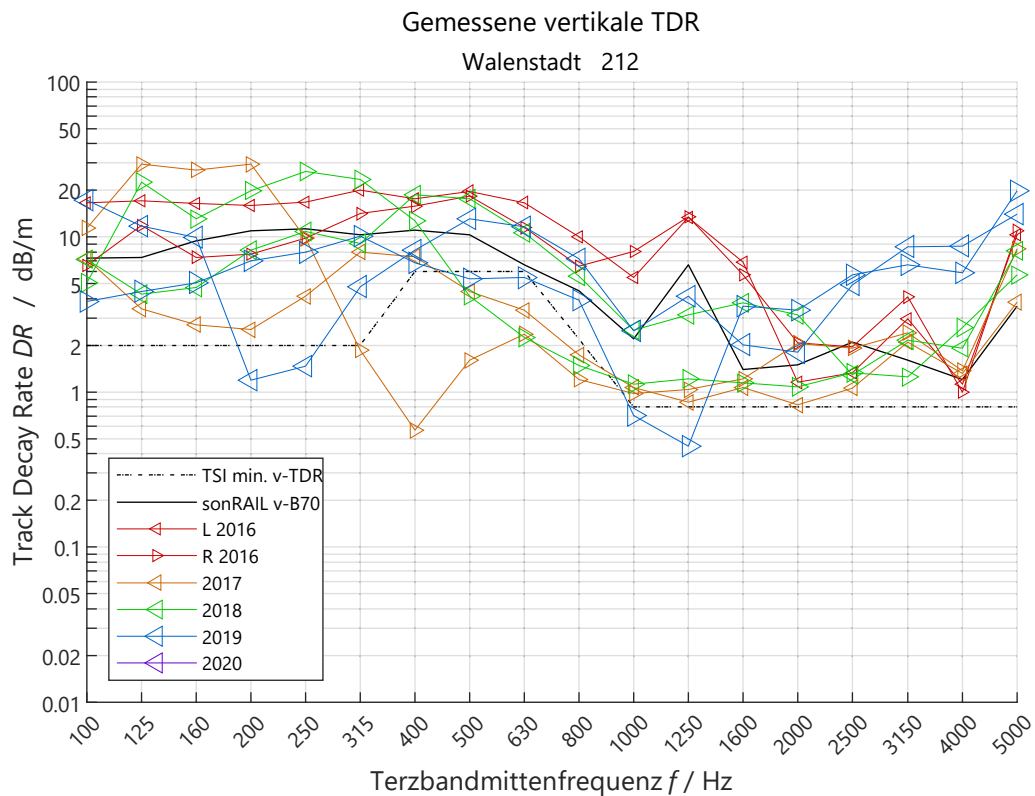


Abbildung 70: Jährliche vertikale TDR der linken und rechten Schienen auf Gleis 212 in Walenstadt.

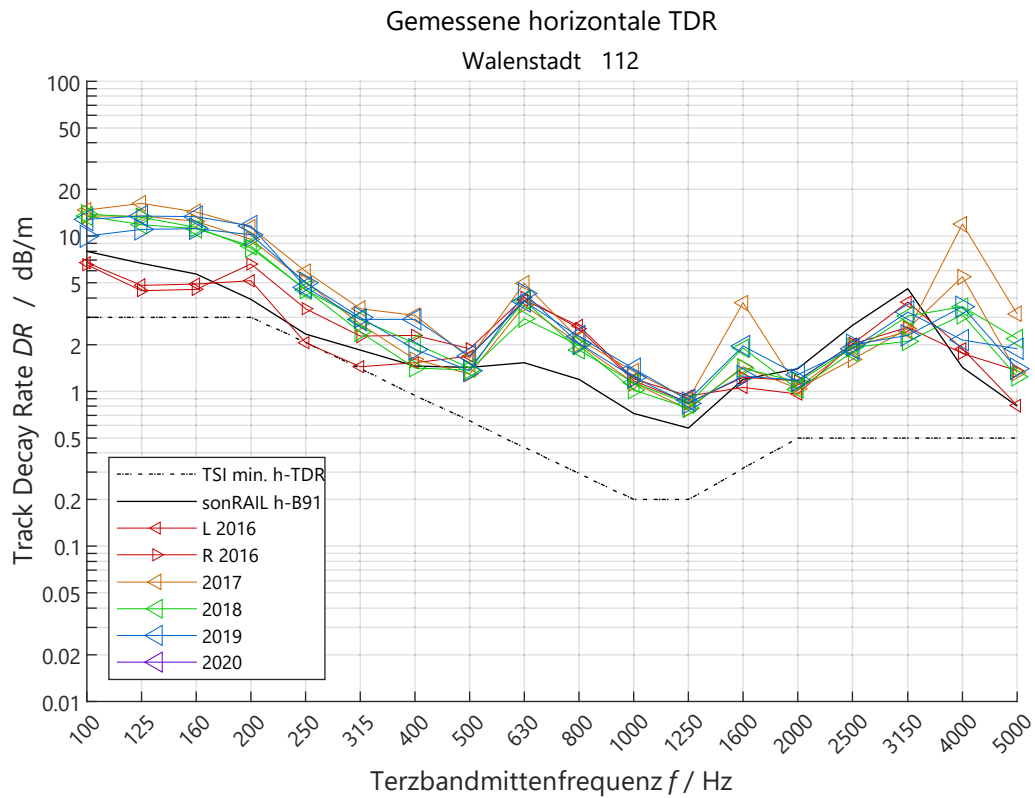


Abbildung 71: Jährliche horizontale TDR der linken und rechten Schienen auf Gleis 112 in Walenstadt.

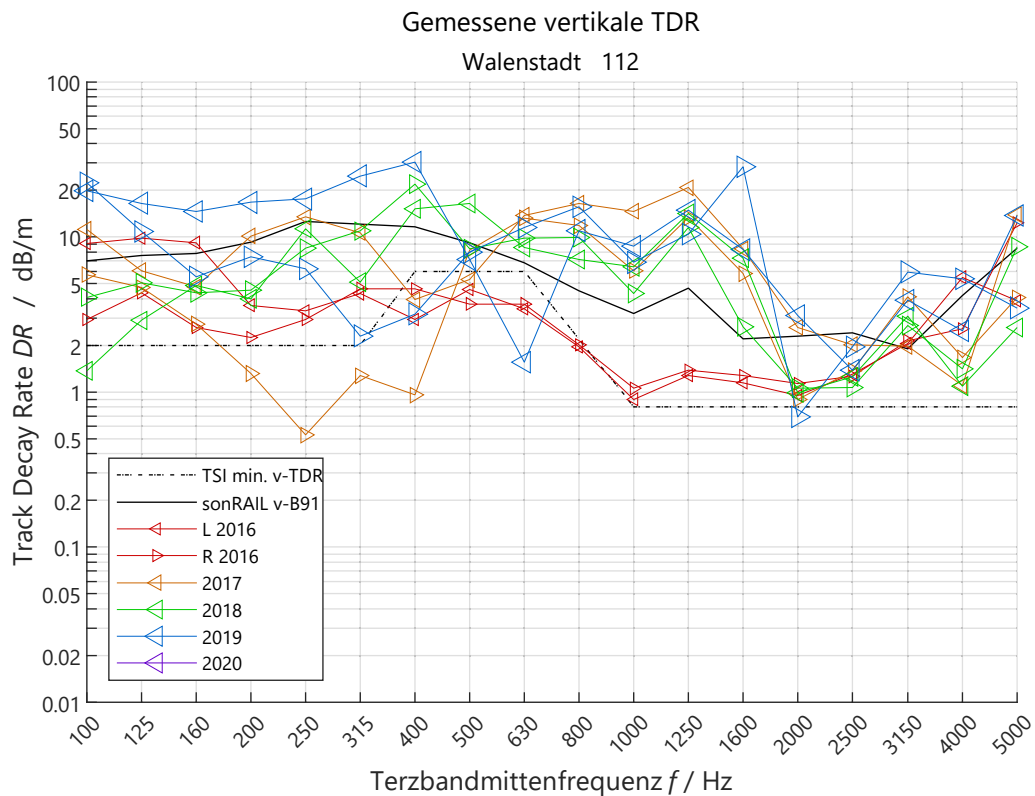


Abbildung 72: Jährliche vertikale TDR der linken und rechten Schienen auf Gleis 112 in Walenstadt.

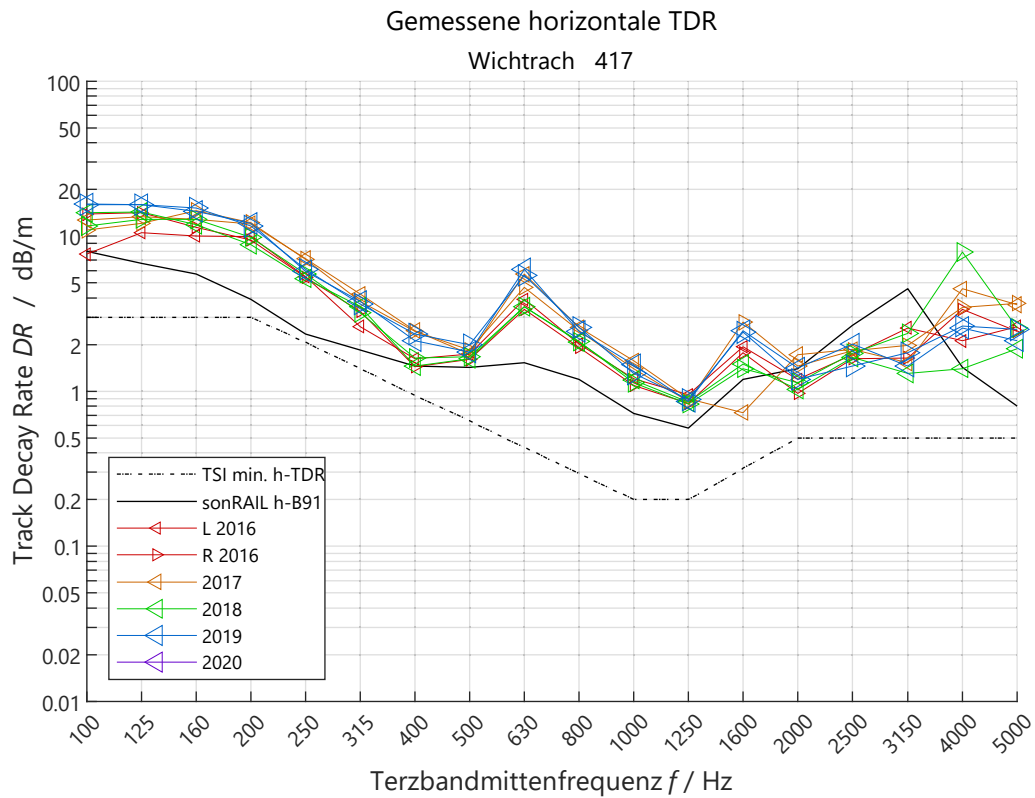


Abbildung 73: Jährliche horizontale TDR der linken und rechten Schienen auf Gleis 417 in Wichtrach.

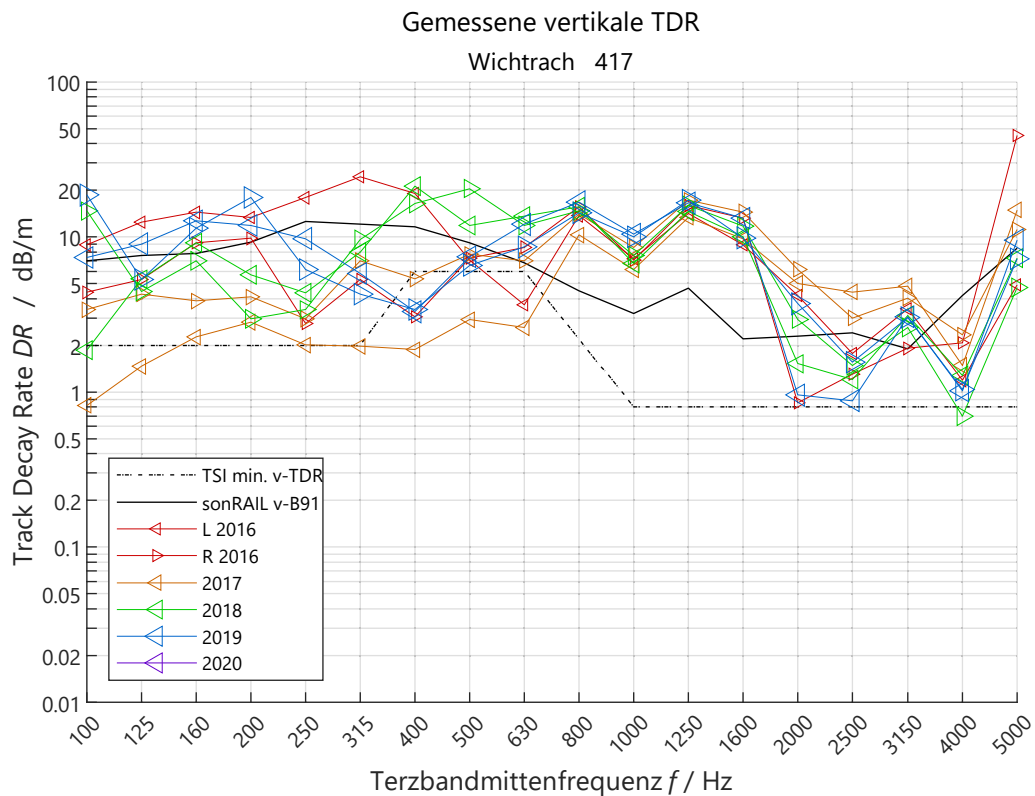


Abbildung 74: Jährliche vertikale TDR der linken und rechten Schienen auf Gleis 417 in Wichtrach.

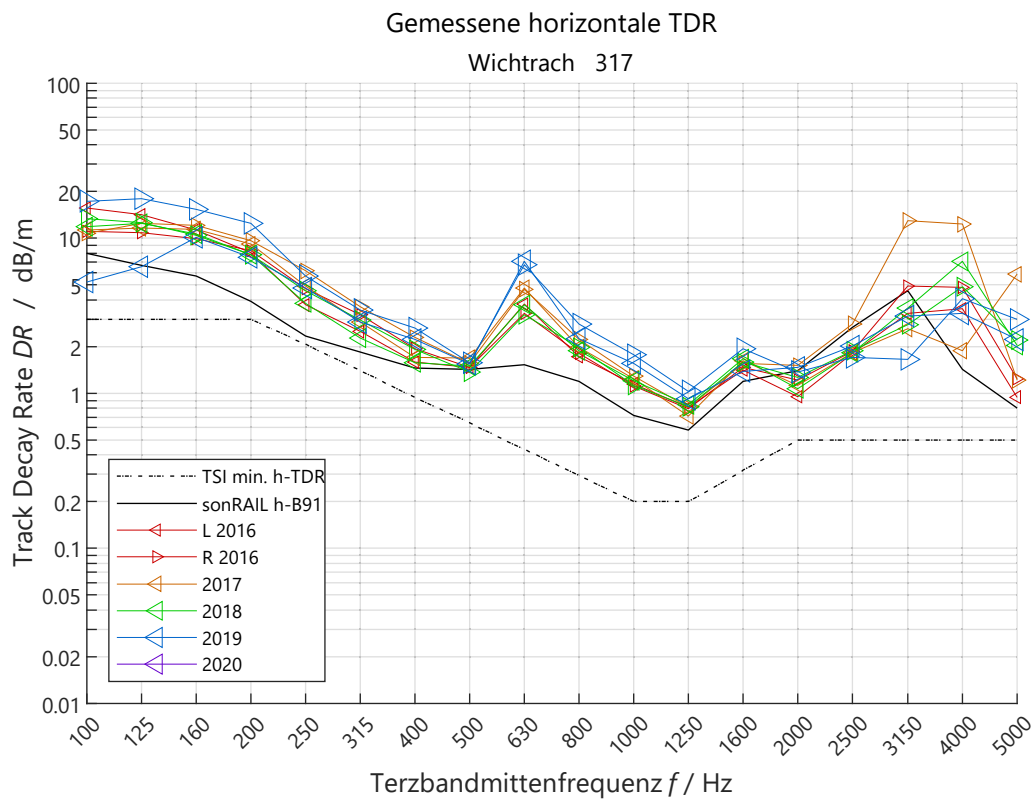


Abbildung 75: Jährliche horizontale TDR der linken und rechten Schienen auf Gleis 317 in Wichtrach.

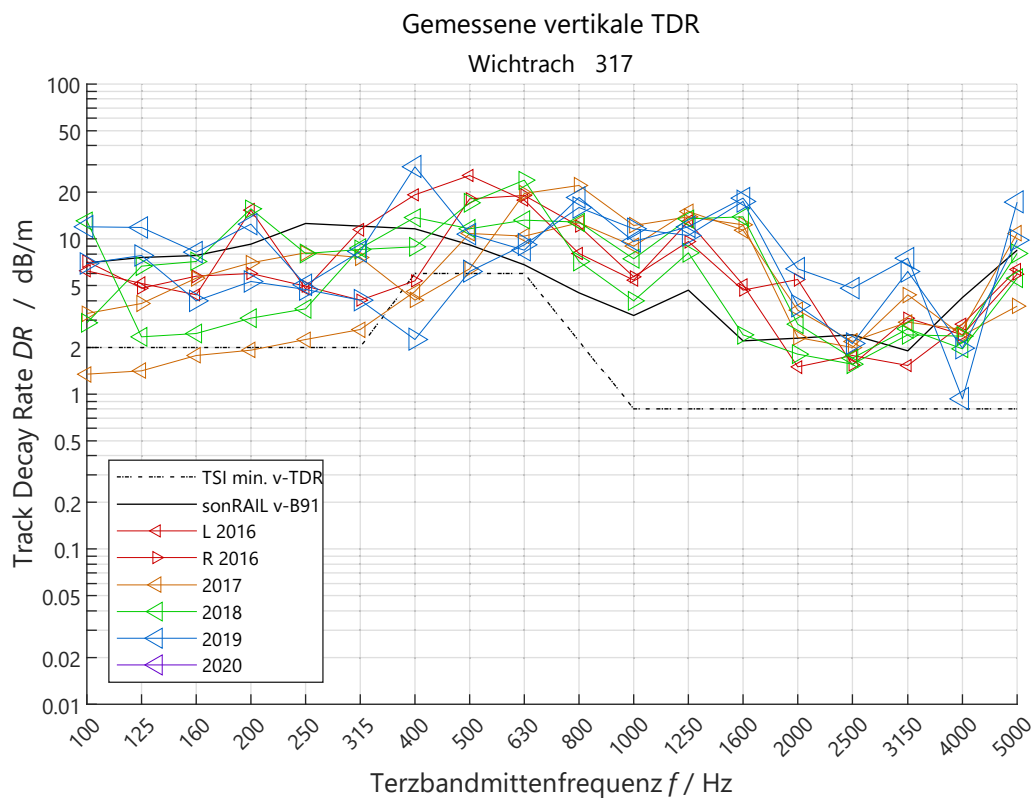


Abbildung 76: Jährliche vertikale TDR der linken und rechten Schienen auf Gleis 317 in Wichtrach.

7 Schlussfolgerungen

Im MineTrack-Projekt konnten grosse, über mehrere Jahre unabhängig erhobene Datensätze erfolgreich kombiniert und mit Data Mining-Methoden analysiert werden. Eine hohe Aussagekraft der Resultate konnte dabei erst durch eine deutliche Erhöhung der Datenqualität erreicht werden, was eine technisch herausfordernde, aufwändige Aufbereitung der Messdaten der BAV-Lärmmonitoringstationen und der Bahnbetriebsdaten der SBB erforderte. Die gewonnenen Ergebnissen liefern Hinweise für die Lärmekämpfung und für die Weiterentwicklung des sonRAIL-Modells.

Lärminderungspotential zeigte sich sowohl beim Unterhalt der Fahrzeuge (Kapitel 6.3) als auch beim Unterhalt des Oberbaus (6.1). Einzelne Individuen von Lokomotiven konnten über die Zeit akustisch verfolgt werden, wobei zeitliche Veränderungen der Emission von bis zu 10 dB festgestellt wurden. Die gefundenen zeitlichen Muster deuten auf Wartungszyklen hin, was durch künftige Analysen unter Einbezug von Wartungsinformationen weiter untersucht werden sollte. Durch Schienenschleifen fielen die Emissionen von Personenzügen an einem Messstandort um 4 dB, wobei sie an einem anderen Standort mit initial glatten Schienen durch das Schleifen um zeitweise 6 dB anstiegen. Dies zeigt das Potential des akustischen Schleifens, aber auch die Vorsicht, die bei der Wahl des Schleifverfahrens und des -zeitpunkts geboten ist.

Die Emissionen der häufigsten Lokomotivtypen zeigten deutliche Unterschiede von mehr als 5 dB und folglich ein prinzipielles Lärminderungspotential. Detaillierte Ergebnisse konnten im BAFU-Projekt "Literaturstudie und Datenanalyse zum Lärm von Güterzuglokomotiven" weiter verwertet werden. Weiter zeigte sich, dass LL- und K-Sohlen bei Güterwagen deutlich unterschiedliche Emissionen aufweisen (Kapitel 6.2.1). Die Auswertungen haben ergeben, dass LL-Sohlen je nach Geschwindigkeit 3 bis 5 dB über K-Sohlen liegen. Diese Differenzierung sollte bei der Lärmmodellierung berücksichtigt werden. Das heutige sonRAIL-Modell trägt diesem Umstand nicht Rechnung, da es aktuell nur Emissionswerte für K-Sohlen enthält. Abgesehen von den LL-gebremsten Güterwagen wurden keine markanten, systematischen Abweichungen zwischen sonRAIL und den Messwerten gefunden. Jedoch können lokal und für gewisse Fahrzeugtypen Abweichungen von mehr als 5 dB auftreten.

Obwohl die Messstandorte einen ähnlichen Oberbautyp aufweisen, zeigen sich sowohl deutliche akustische Unterschiede zwischen den Standorten als auch über die Zeit (Kapitel 6.1.1). Ein Teil dieser akustischen Unterschiede lassen sich durch die Schienenrauheit erklären. Die Variation der Schienenrauheit über einen Zeitraum von vier Jahren ergaben an einen Standort Pegeldifferenzen von bis zu 8 dB für Personenwagen und von 4 dB für K-Sohlen-gebremste Güterwagen. Diese Ergebnisse zeigen, dass es für die Lärmermittlung sowie einen lärmindernden Unterhalt nützlich wäre, die spektrale Schienenrauheit periodisch netzweit zu erfassen.

Des weiteren können standortspezifisch gemessene Pegeldifferenzen auf Unterschiede in den Bodenreflexionen zurückgeführt werden (Kapitel 6.4). Die Messstandorte unterscheiden sich nachweislich im akustischen Schottereffekt aufgrund unterschiedlicher akustisch wirksamer Schotterbettiefen. Der akustische Schottereffekt hat insbesondere unterhalb 500 Hz einen systematischen, standortspezifischen Einfluss. Dies rechtfertigt den Ansatz im sonRAIL-Ausbreitungsmodell, das diesen Effekt explizit berücksichtigt. Eine Schwierigkeit bei der grossflächigen Lärmermittlung stellt bislang die Unkenntnis der ortsspezifischen Schotterbetttiefe dar.

Zudem konnten gewisse Emissionsunterschiede zwischen Standorten und Gleisen auf Unterschiede in der vertikalen TDR bei 1 kHz zurückgeführt werden. Hier wird ein Einfluss der Schienenzwischenlagen vermutet.

In künftigen Projekte mit solch grossen Bahnlärm-Datensätzen wäre es interessant und hilfreich, zusätzlich Zeitsignale von Beschleunigungsaufnehmern zu verwenden, damit direkter das Schwingungsverhalten über längere Zeit untersucht werden kann und Rückschlüsse zu Rad- und Schienenrauheiten gezogen werden können. Möglicherweise können die Daten des neuen Fahrbahnlabors hier einen Beitrag leisten. Zudem wären künftige Messstandorte in Kurven und bei anderen Oberbautypen hilfreich, um mehr über die Emissionen in diesen Situationen zu erfahren.

8 Literaturverzeichnis

- [1] Attinger R: Monitoring Railway Noise in Switzerland from 2003 to 2010. *European Rail Technology Review* 50 (2010), 56-59.
- [2] Monitoring Eisenbahnlärm - Jahresbericht 2018 – 1. Januar - 31. Dezember 2018. Bundesamt für Verkehr (BAV), 3003 Bern, 25.3.2019.
- [3] Sehu D, Wunderli J, Heutschi K, Thron T, Hecht M, Rohrbeck A, et al. sonRail – Projektdokumentation, 7. Oktober 2010, Tech. rep., Empa, Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, Switzerland; 2010.
- [4] Thron T, Hecht M. The sonRAIL emission model for railway noise in Switzerland. *Acta Acust United Acust* 2010; 96: 873–83.
- [5] Pieren R, Lauper D, Heutschi K. Demonstrator for rail vehicle pass-by events, *Proceedings of the European Congress on Noise Control 2018 (EuroNoise 2018)*, Crete, Greece, ISSN: 2226-5147.
- [6] Heutschi, K. Sound Propagation over Ballast Surfaces. *Acta Acust United Acust* 2009; 95: 1006–1012.
- [7] ISO 3095:2013: Acoustics — Railway applications — Measurement of noise emitted by railbound vehicles. International Organization for Standardization.
- [8] Thompson D. *Railway Noise and Vibration*, Elsevier, 2009, Seite 13
- [9] T. Kitagawa, D.J. Thompson. Comparison of wheel/rail noise radiation on Japanese railways using the TWINS model and microphone array measurements. *Journal of Sound and Vibration*, 3, 496–509, 2006.
- [10] EN 15610:2019: Railway applications - Acoustics - Rail and wheel roughness measurement related to noise generation. European Committee for Standardization (CEN).
- [11] DIN EN 15461:2011: Bahnanwendungen – Schallemission – Charakterisierung der dynamischen Eigenschaften von Gleisabschnitten für Vorbeifahrtgeräuschmessungen. Deutsches Institut für Normung (DIN).
- [12] Monitoring Eisenbahnlärm - Jahresbericht 2021 – 1. Januar - 31. Dezember 2018. Bundesamt für Verkehr (BAV), 3003 Bern.

Anhang A Bezeichnung der Gleise

Die Gleisbezeichnungen unterscheiden sich je nach Quellenangabe leicht oder sind sogar widersprüchlich. Tabelle 11 zeigt die Zuordnungen, die diesem Bericht zugrunde liegen. Dabei wird jeweils bevorzugt die für die Messung der Schienenrauheit geltende Bezeichnung genutzt. Die Zuordnung der Gleisbezeichnung aus den Querschnittsplänen zu den Gleisbezeichnungen der Messung der Schienenrauheit ist eindeutig, da beide demselben Zahlenschema folgen. Die Zuordnung der Spalte (1 oder 2) der akustischen Messwerte und der Signale der Schienenschalter in den HDF5-Dateien zum korrekten Gleis kann auch den Querschnittsplänen entnommen werden. Dabei stehen jeweils die Messwerte des nahen Mikrofons in der gleichen Spalte wie die Signale des Schienenschalters. Mithilfe der Verkehrsdaten der SBB kann diese Zuordnung folgendermassen überprüft werden:

- Pro Richtung sind jeweils zwei Signale vorhanden. Dabei ist anzunehmen, dass das Signal mit den meisten Fahrten der Hauptrichtung entspricht (Linksverkehr).
- Die genaue Position der Signale relativ zum Gleis ist bekannt. Die Fahrtrichtung kann auf einer Karte abgelesen werden.
- Die Bezeichnung der Signale entspricht jeweils einem Gleis auf den Querschnittsplänen (ungerade / gerade erste Ziffer).
- Die Spalte des nahen Mikrofons (und somit der internen Gleisbezeichnung 1 oder 2) ist jeweils die, die höhere Schalldruckpegel aufweist.

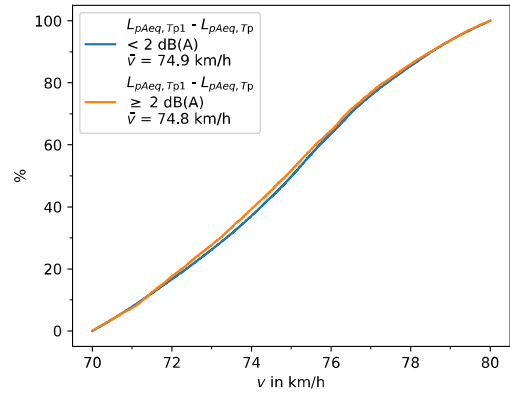
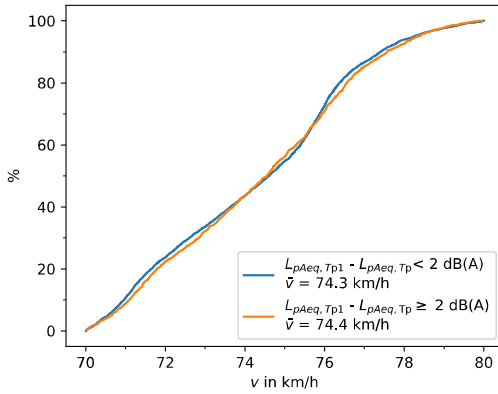
Die korrekte Zuordnung der Mikrofone zum jeweiligen Gleis konnte so für alle Standorte bestätigt werden. Folgende inkonsistente Angaben sind dabei aufgefallen:

- Der Querschnittsplan von Steinen gibt für das Gleis 216 entgegen der nach obigen Verfahren bestimmten Fahrtrichtung Arth-Goldau die Fahrtrichtung Schwyz. Durch Sichten von Bildmaterial der Strecke konnte jedoch bestätigt werden, dass die Fahrtrichtung in Tabelle 11 korrekt ist.
- Die Angabe der Fahrtrichtung in den Jahresberichten (z.B: [2]) stimmt in den Fällen von Gland, Steinen und Lindau nicht mit den nach obigem Verfahren bestimmten Fahrtrichtungen überein.

Tabelle 11: Bezeichnung der Gleise und Signale nach Standort und Fahrtrichtung.

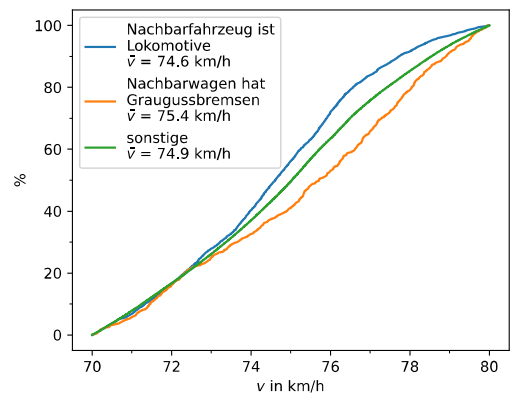
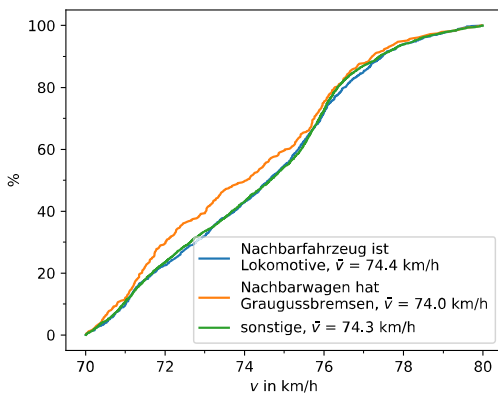
Standort	Gleis (hd5- Dateien)	Fahrtrichtung	Gleisbezeichnung (Messung Schienenrauheit)	Gleisbezeichnung (Querschnittspläne)	Signal	Signal bei Fahrt in Ge- genrichtung
Wichtrach	1	Bern	417	417	S418	P417
Wichtrach	2	Thun	317	317	P317	S318
Gland	1	Genf	321	121	A321	D321
Gland	2	Lausanne	421	221	D421	A421
Itingen	1	Olten	120	120	A120	S120
Itingen	2	Basel	220	220	S220	A220
Steinen	1	Arth-Goldau	215	216	S215	P214
Steinen	2	Flüelen	115	116	P114	S115
Walenstadt	1	Sargans	212	212	D212	A212
Walenstadt	2	Ziegelbrücke	112	112	A112	D112
Lindau	1	Winterthur	120	118	A120	S120
Lindau	2	Zürich	220	218	S220	A220

Anhang B Geschwindigkeitsverteilungen bei direkten Vergleichen von Vorbeifahrtspegeln



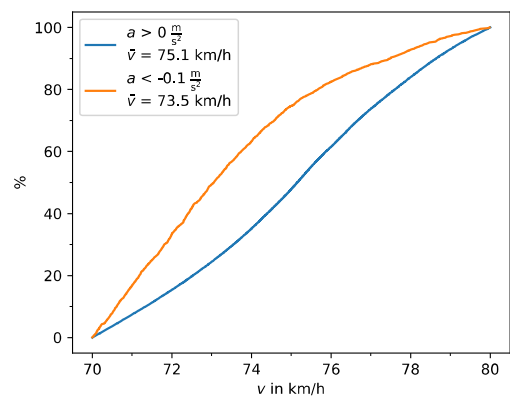
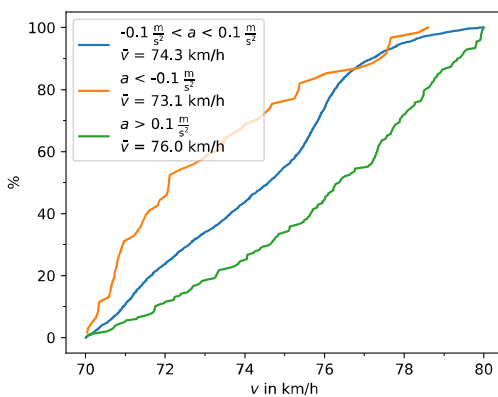
Geschwindigkeitsverteilung zu Abbildung 15 o.

Geschwindigkeitsverteilung zu Abbildung 15 u.



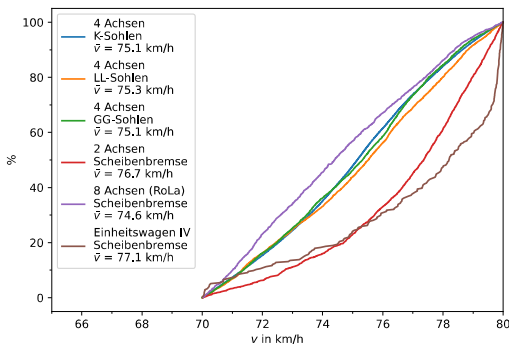
Geschwindigkeitsverteilung zu Abbildung 16 o.

Geschwindigkeitsverteilung zu Abbildung 16 u.

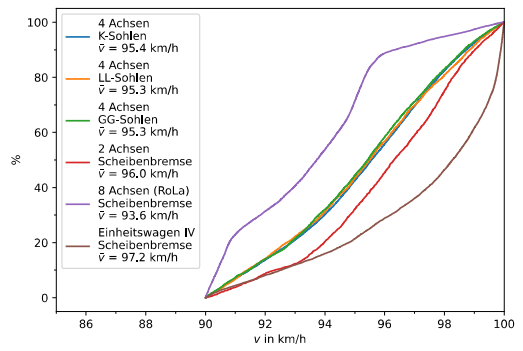


Geschwindigkeitsverteilung zu Abbildung 17 o.

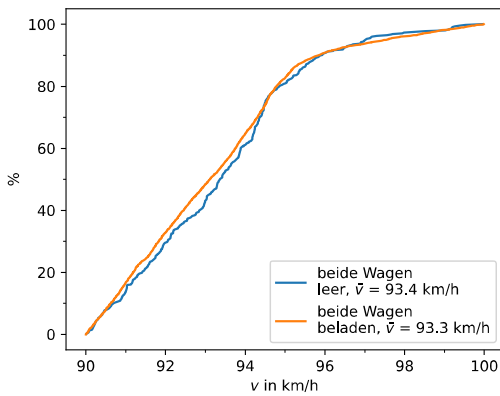
Geschwindigkeitsverteilung zu Abbildung 17 u.



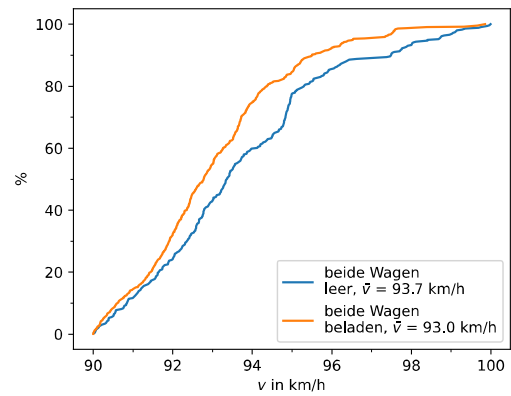
Geschwindigkeitsverteilung zu Abbildung 30



Geschwindigkeitsverteilung zu Abbildung 31



Geschwindigkeitsverteilung zu Abbildung 32
I. Abbildung 30



Geschwindigkeitsverteilung zu Abbildung 32 r.

Anhang C Spektrale Geräuschemissionen von Lokomotiven

Die Auswahlkriterien (Standorte und Geschwindigkeit) entsprechen den in Kapitel 6.2.2 präsentierten.

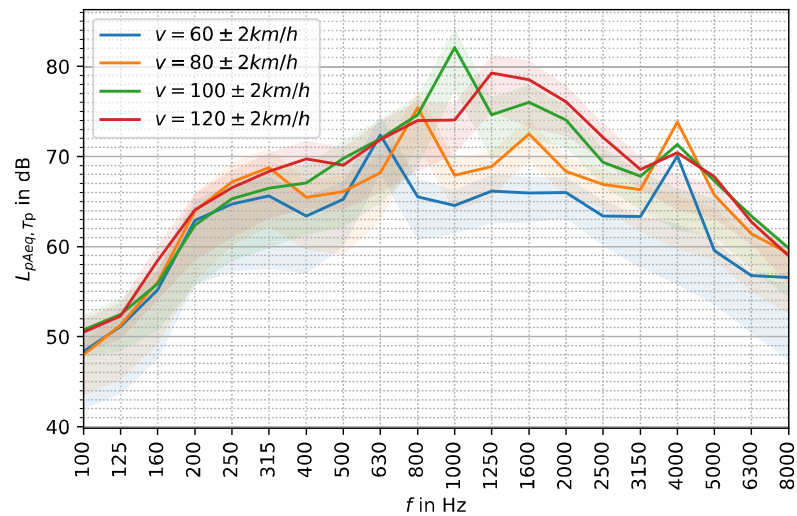


Abbildung 77: Spektrale Vorbeifahrtspegel des Lokomotivtyps Re460 / Re465 (Lok 2000) in vier Geschwindigkeitsklassen mit 4 km/h Breite. Die durchgezogenen Linien zeigen den energetischen Mittelwert. Die schattierten Flächen werden durch den arithmetischen Mittelwert plus und minus eine Standardabweichung aufgespannt.

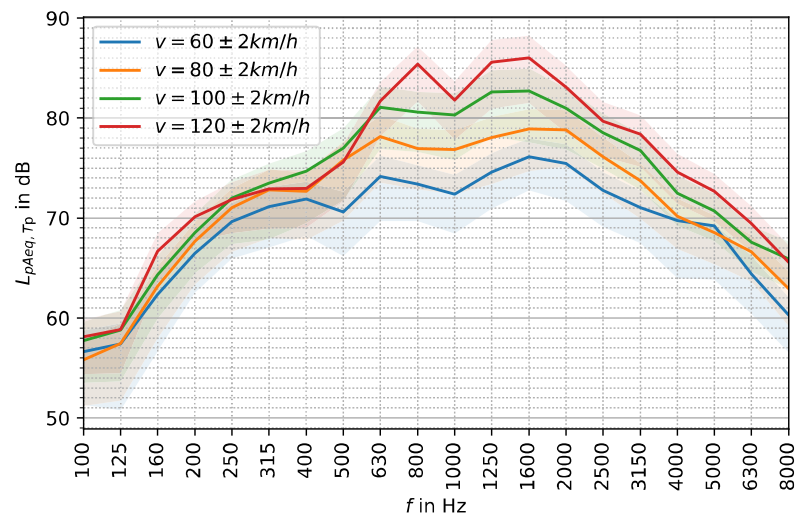


Abbildung 78: Spektrale Vorbeifahrtspegel des Lokomotivtyps Re420 / Re430 in vier Geschwindigkeitsklassen mit 4 km/h Breite. Die durchgezogenen Linien zeigen den energetischen Mittelwert. Die schattierten Flächen werden durch den arithmetischen Mittelwert plus und minus eine Standardabweichung aufgespannt.

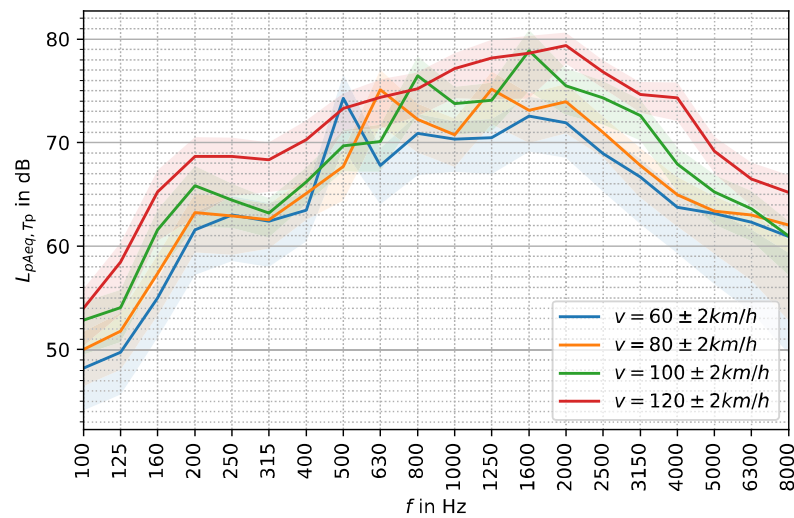


Abbildung 79: Spektrale Vorbeifahrtspegel des Lokomotivtyps Re482 / Re484 / Re485 / Re486 (Bombardier TRAXX F140) in vier Geschwindigkeitsklassen mit 4 km/h Breite. Die durchgezogenen Linien zeigen den energetischen Mittelwert. Die schattierten Flächen werden durch den arithmetischen Mittelwert plus und minus eine Standardabweichung aufgespannt.

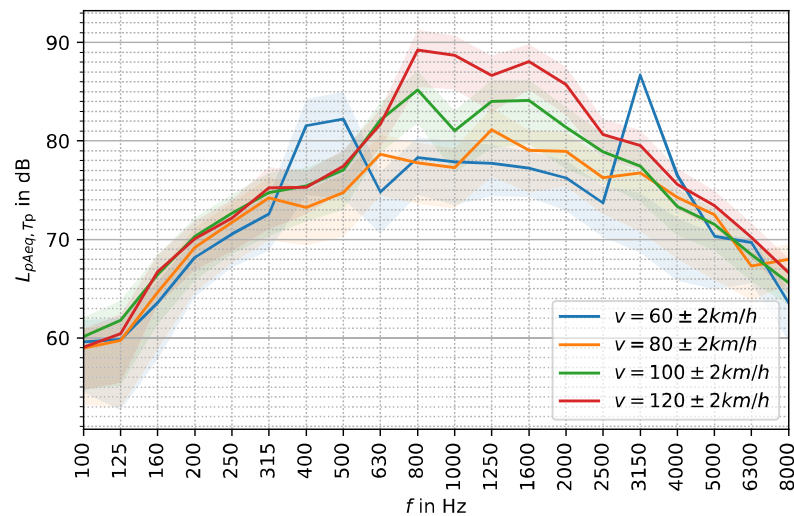


Abbildung 80: Spektrale Vorbeifahrtspegel des Lokomotivtyps Re620 in vier Geschwindigkeitsklassen mit 4 km/h Breite. Die durchgezogenen Linien zeigen den energetischen Mittelwert. Die schattierten Flächen werden durch den arithmetischen Mittelwert plus und minus eine Standardabweichung aufgespannt.

Anhang D Histogramme zur Bestimmung der lokalen Schotterbett-tiefe

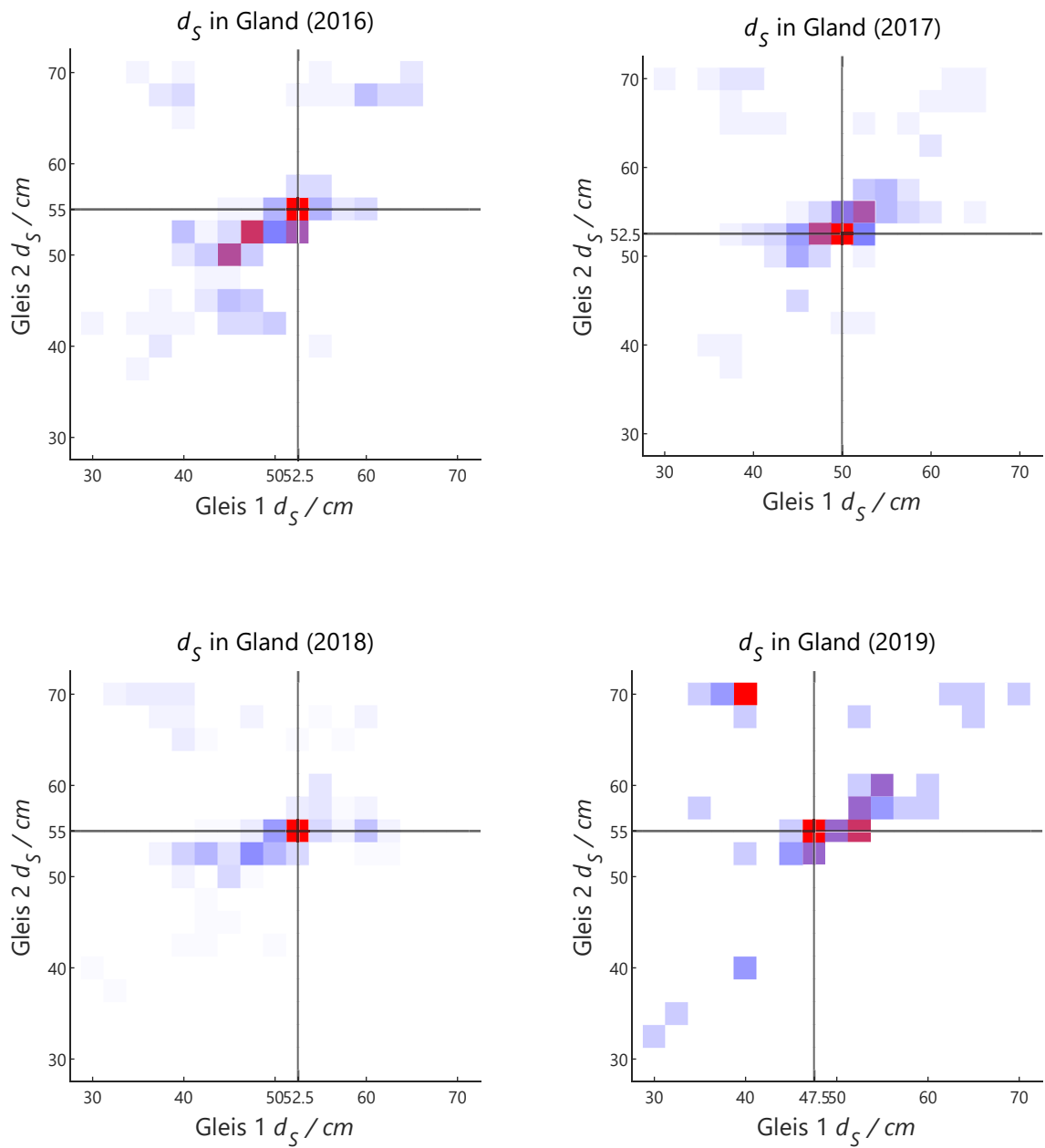


Abbildung 81: Jährliche, aus Histogrammen bestimmte d_s in Gland.

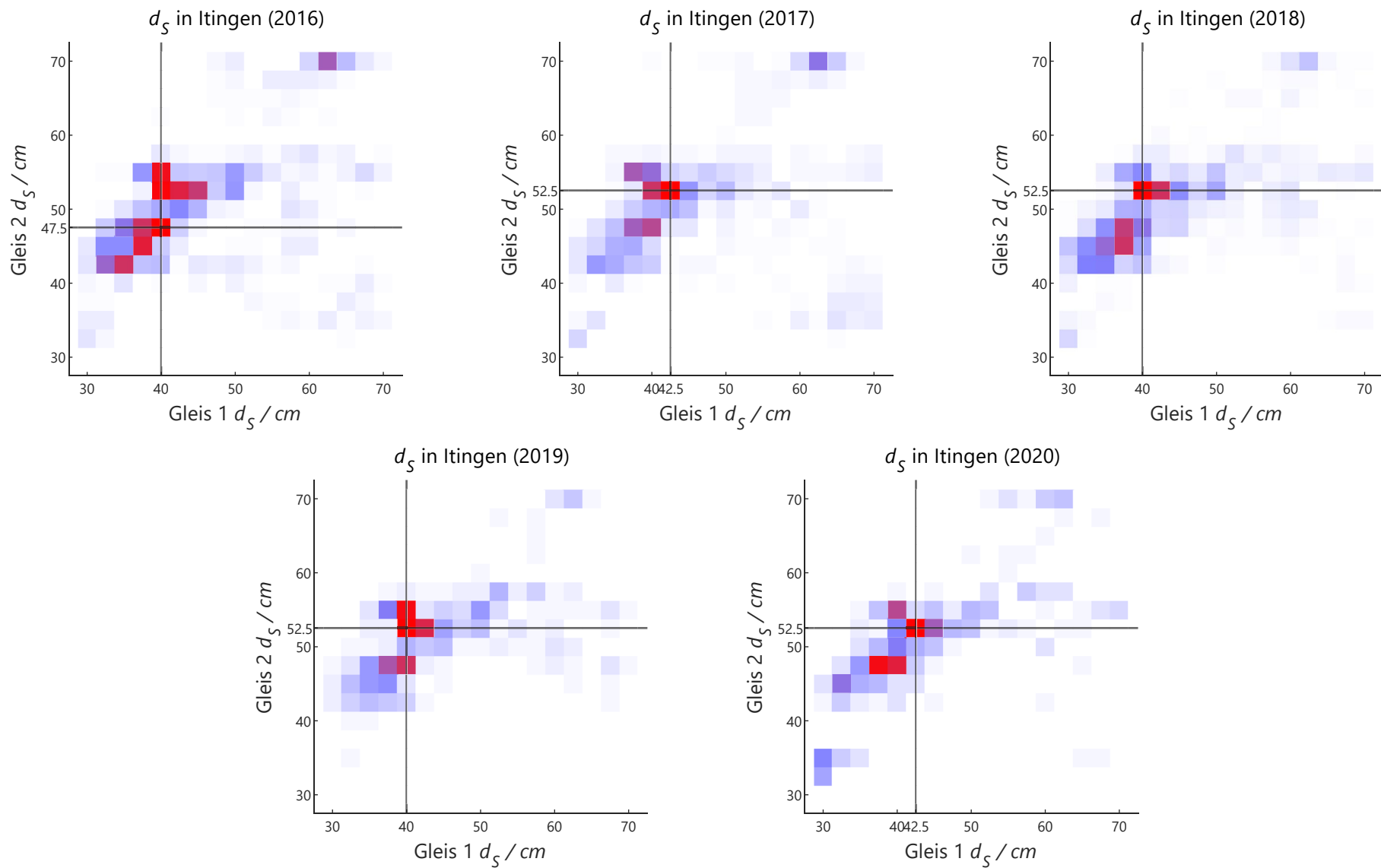


Abbildung 82: Jährliche, aus Histogrammen bestimmte d_s in Itingen.

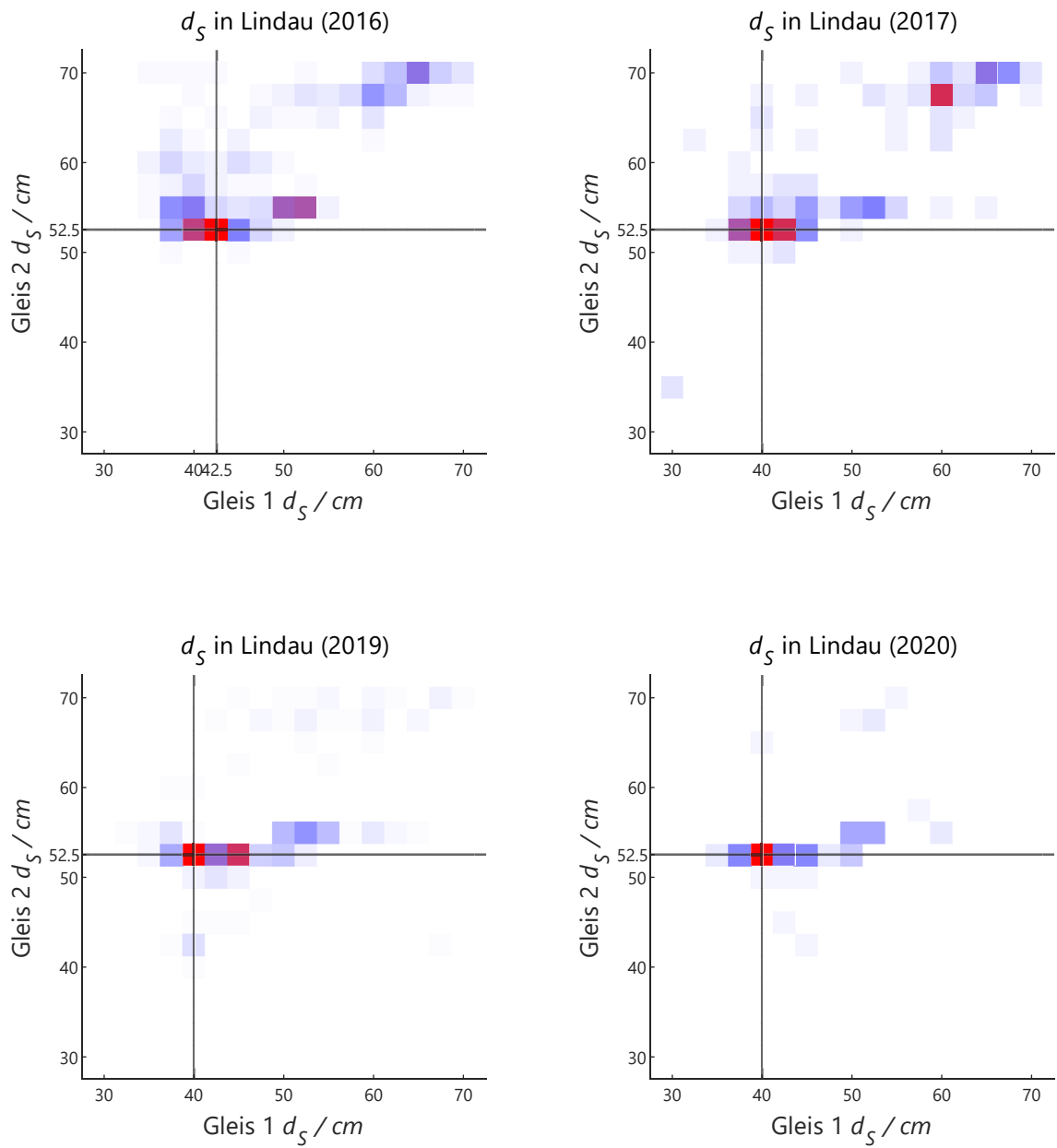


Abbildung 83: Jährliche, aus Histogrammen bestimmte d_S in Lindau.

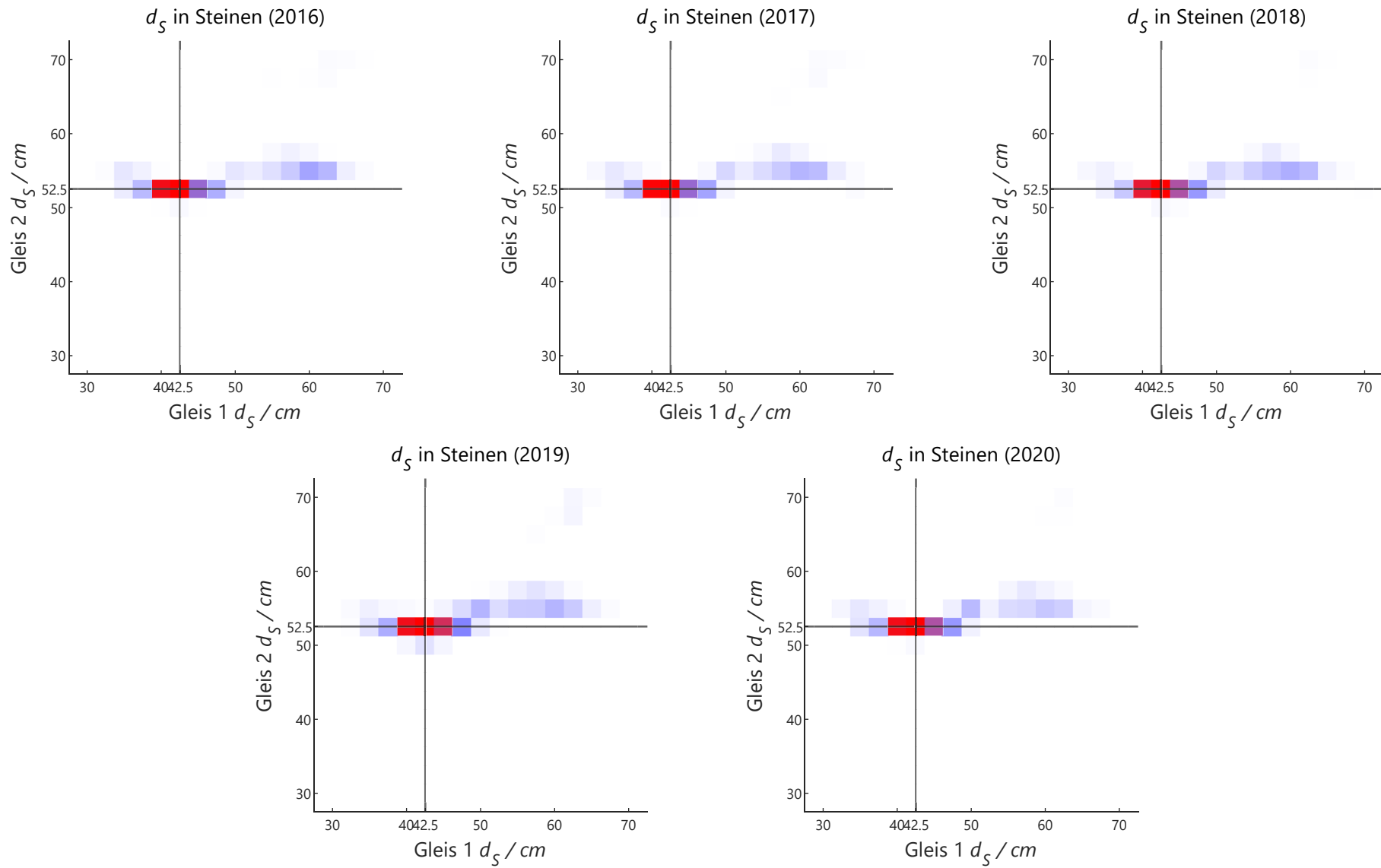


Abbildung 84: Jährliche, aus Histogrammen bestimmte d_S in Steinen.

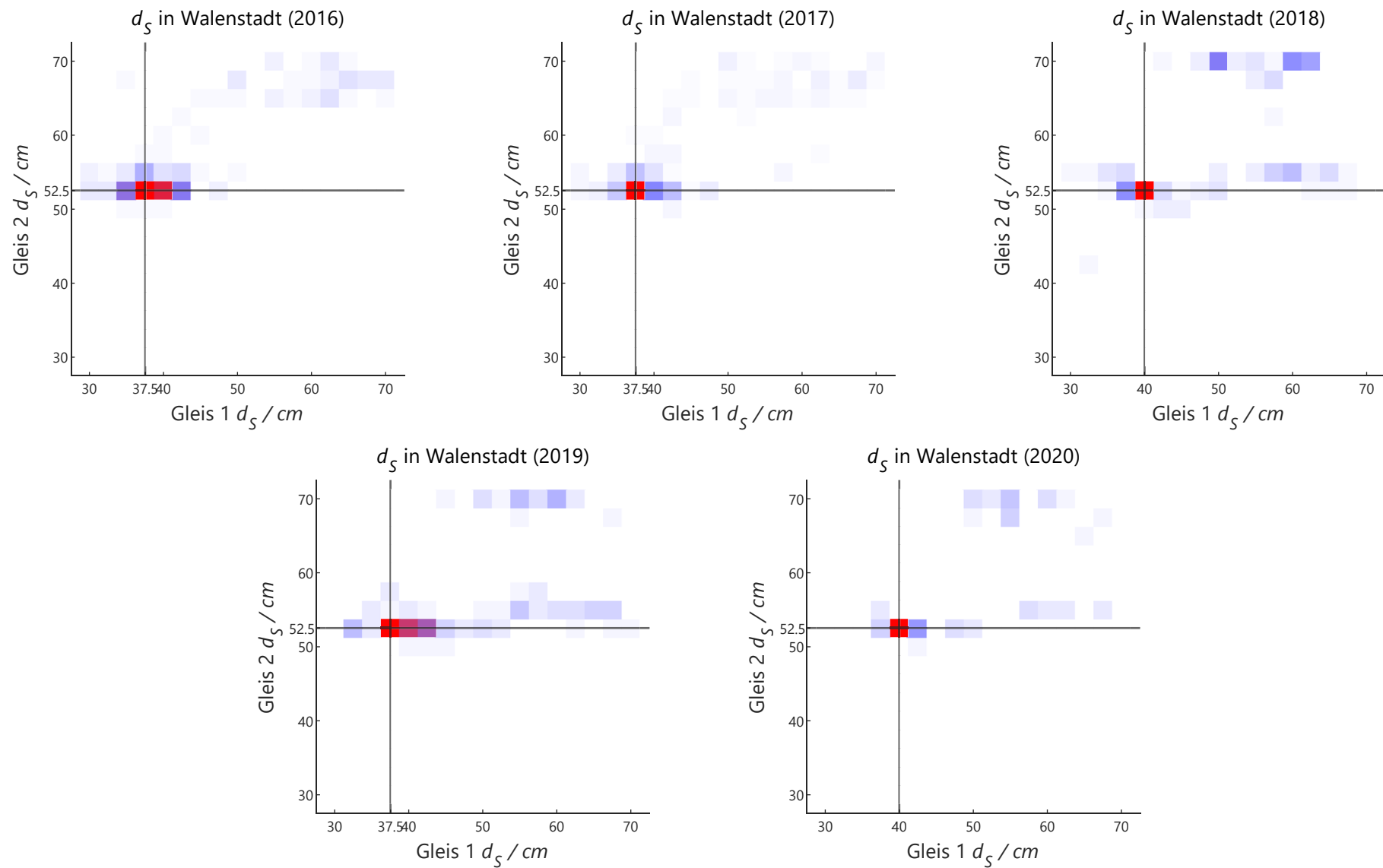


Abbildung 85: Jährliche, aus Histogrammen bestimmte d_s in Walenstadt.

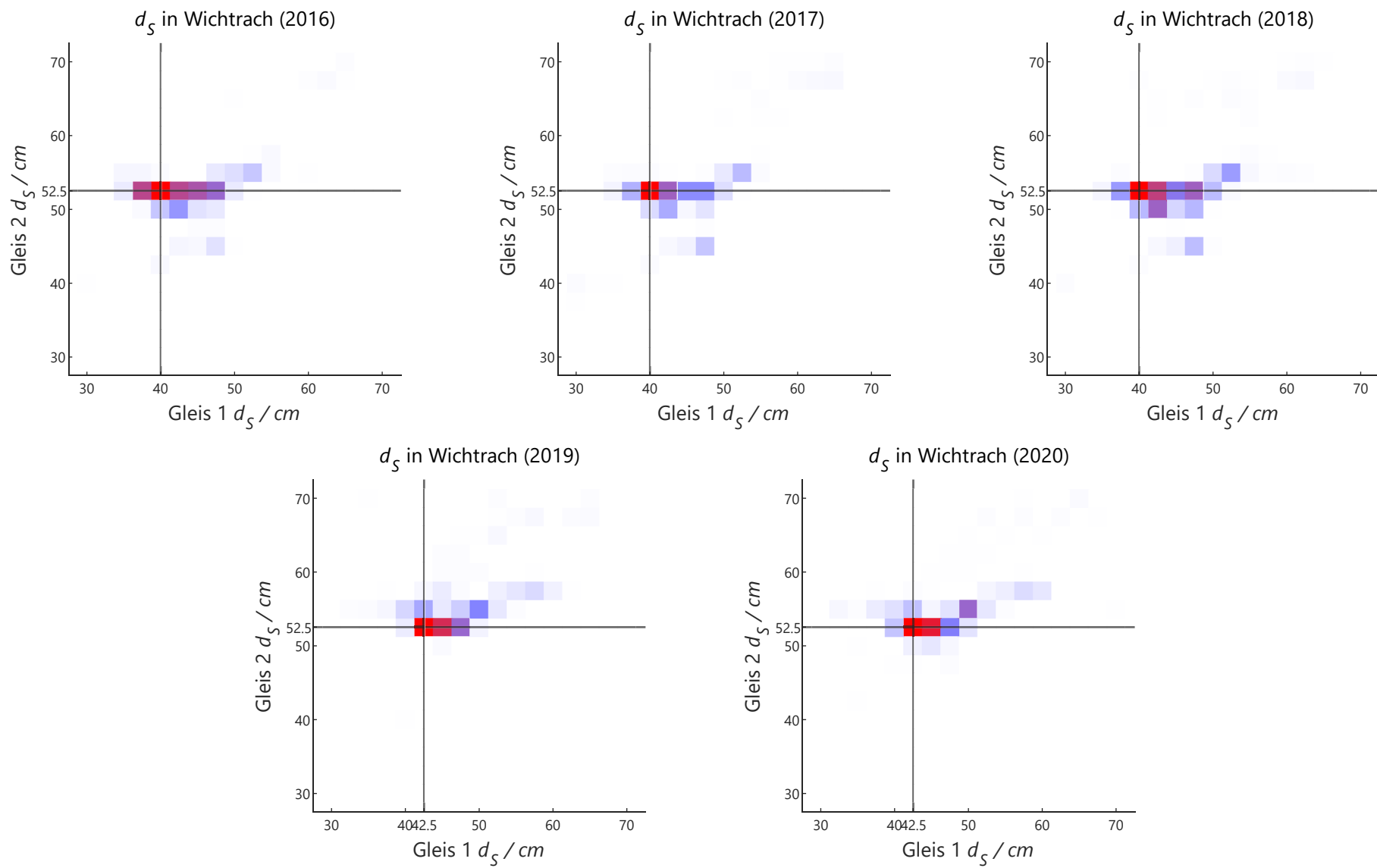


Abbildung 86: Jährliche, aus Histogrammen bestimmte d_S in Wichtrach.

Anhang E Akustischer Schottereffekt

Fernes Mikrofon (Standardposition)

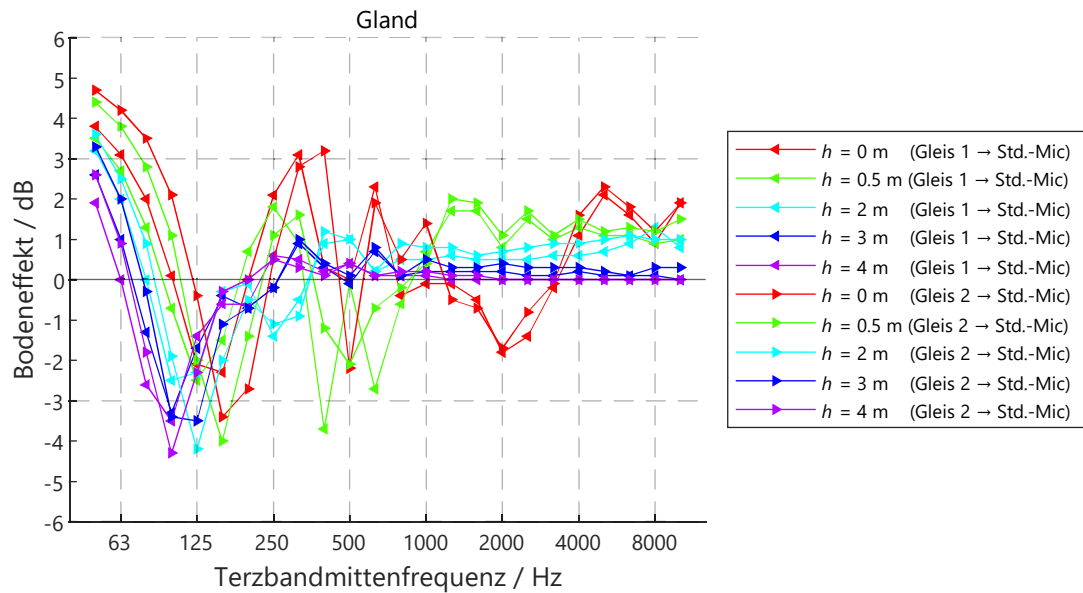


Abbildung 87: Akustischer Schottereffekt auf dem Übertragungsweg zur Standardmikrofonposition in Gland.

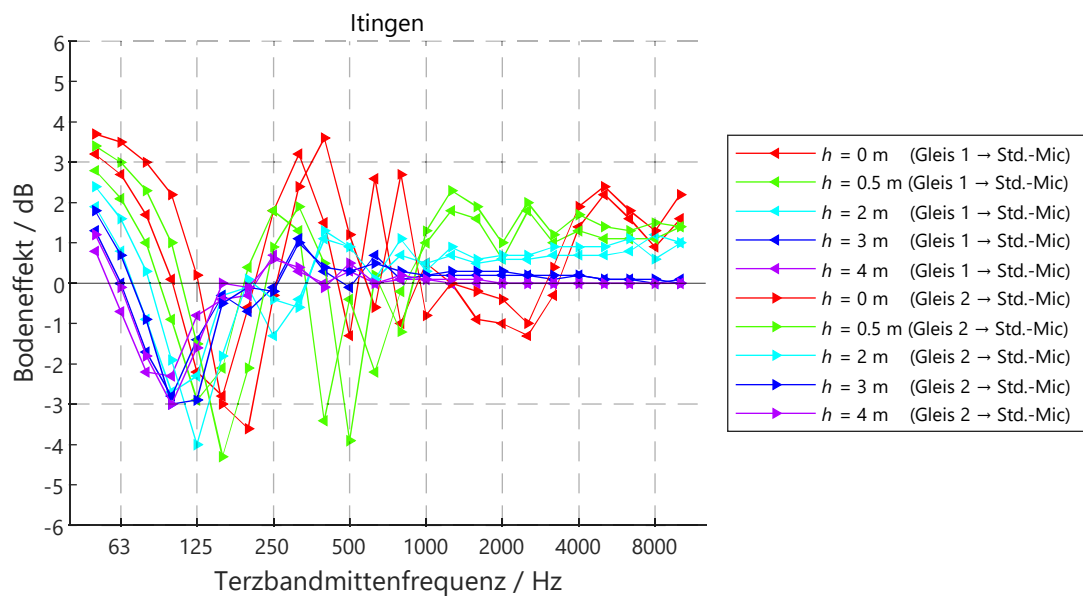


Abbildung 88: Akustischer Schottereffekt auf dem Übertragungsweg zur Standardmikrofonposition in Itingen.

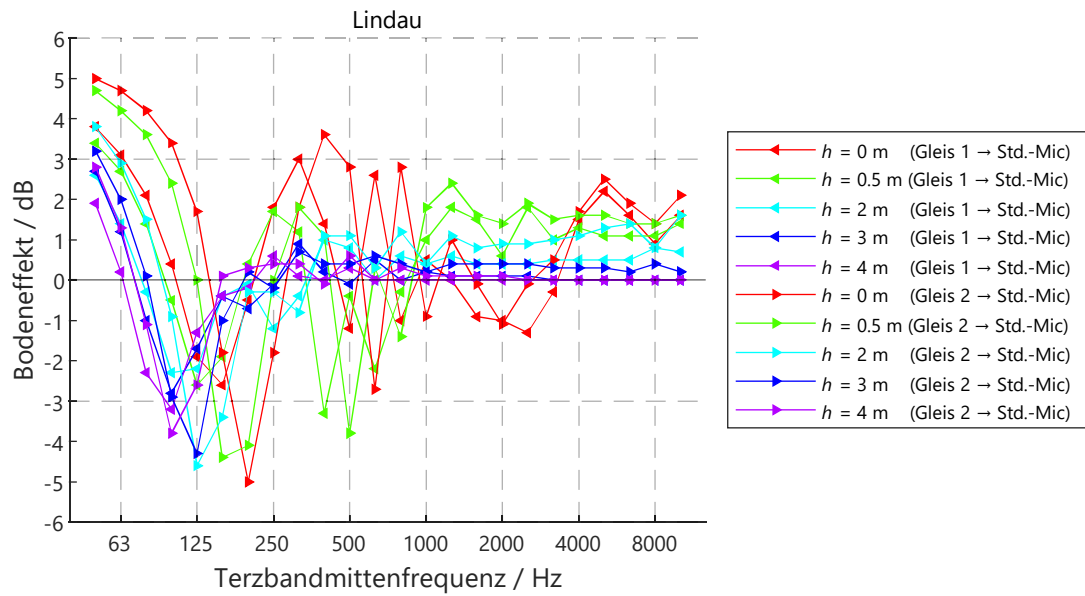


Abbildung 89: Akustischer Schottereffekt auf dem Übertragungsweg zur Standardmikrofonposition in Lindau.

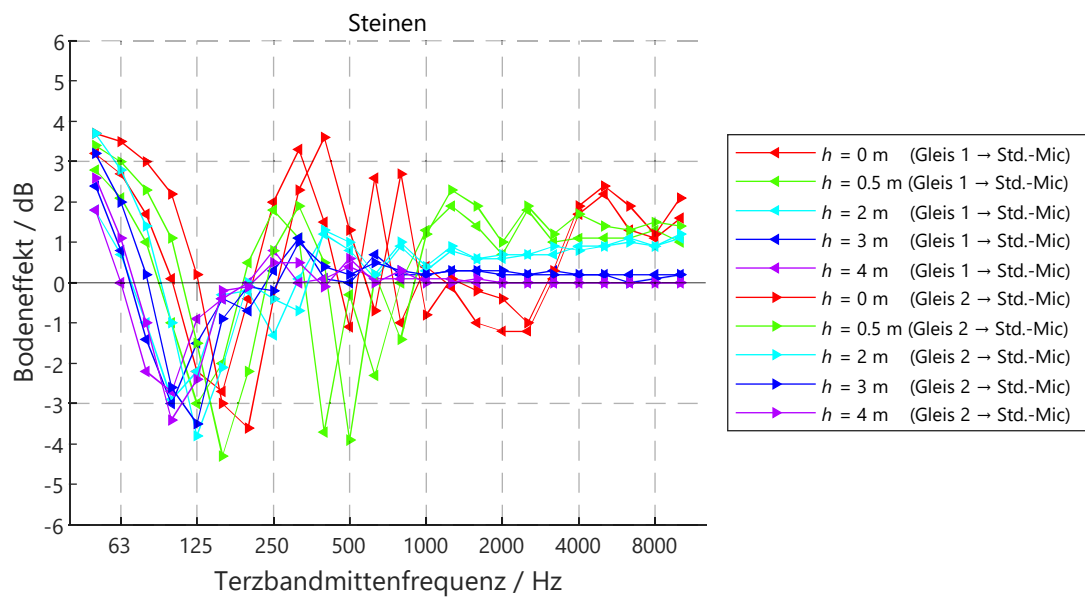


Abbildung 90: Akustischer Schottereffekt auf dem Übertragungsweg zur Standardmikrofonposition in Steinen.

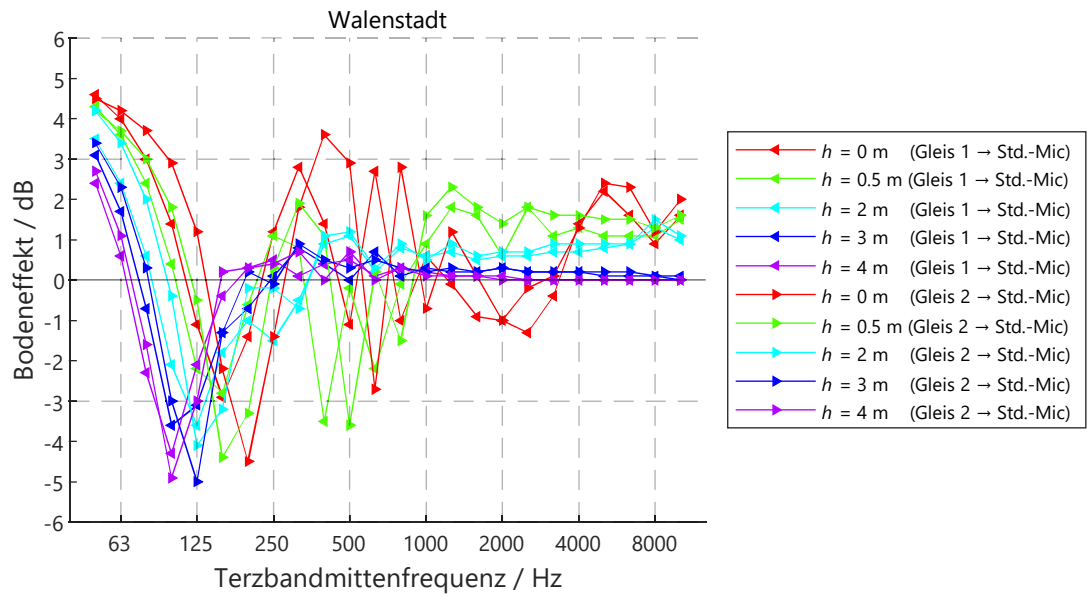


Abbildung 91: Akustischer Schottereffekt auf dem Übertragungsweg zur Standardmikrofonposition in Walenstadt.

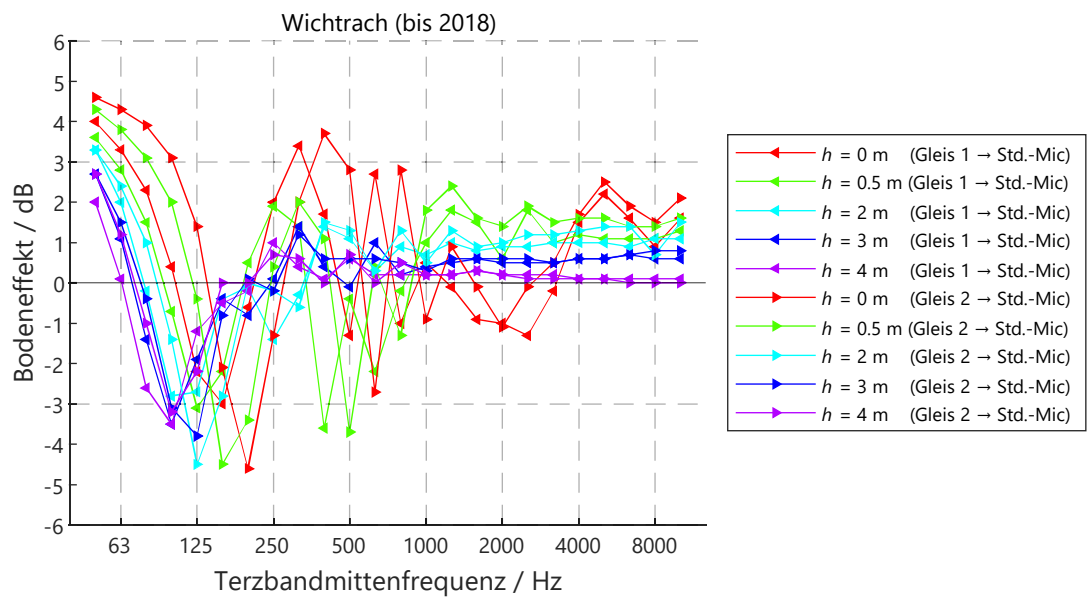


Abbildung 92: Akustischer Schottereffekt auf dem Übertragungsweg zur Standardmikrofonposition in Wichtrach vor dem Umbau 2019.

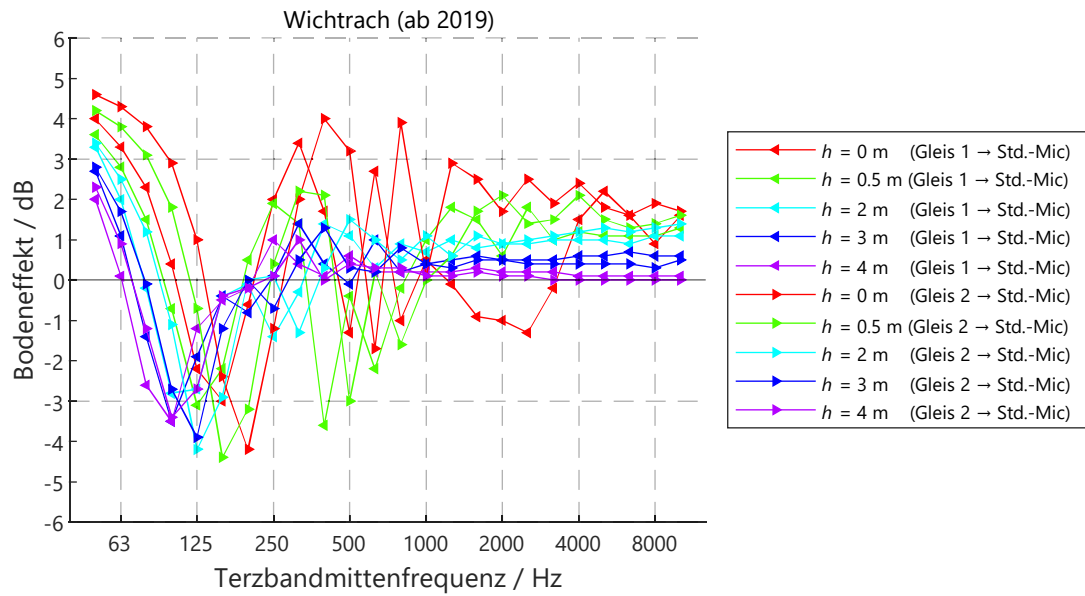


Abbildung 93: Akustischer Schottereffekt auf dem Übertragungsweg zur Standardmikrofonposition in Wichtrach nach dem Umbau 2019.

Nahes Mikrofon (ca. 3.7 m lateral, 1.2 m vertikal)

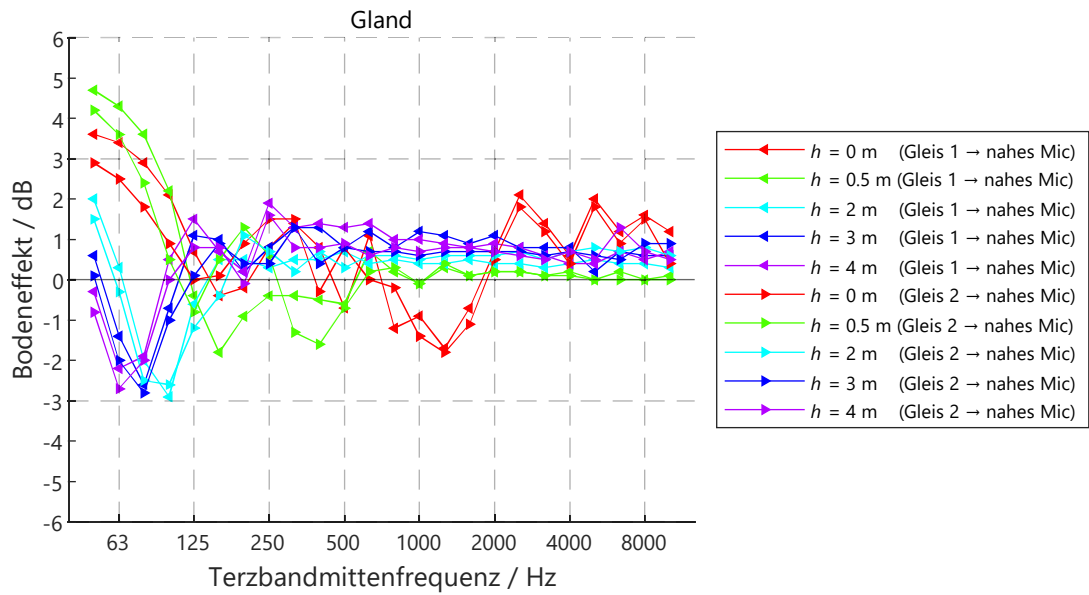


Abbildung 94: Akustischer Schottereffekt auf dem Übertragungsweg zum nahen Mikrofon in Gland.

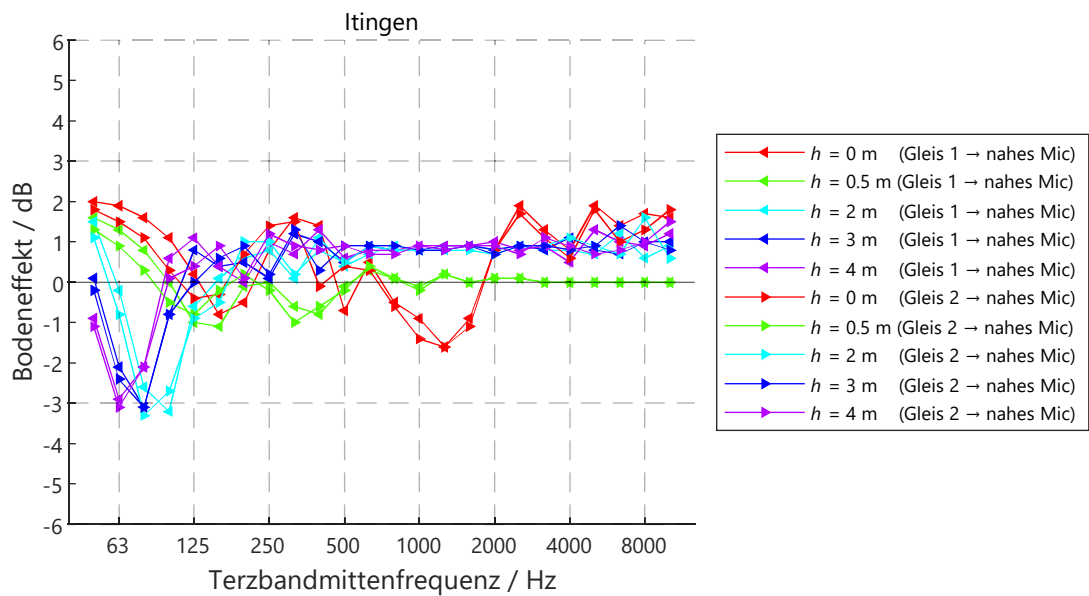


Abbildung 95: Akustischer Schottereffekt auf dem Übertragungsweg zum nahen Mikrofon in Itingen.

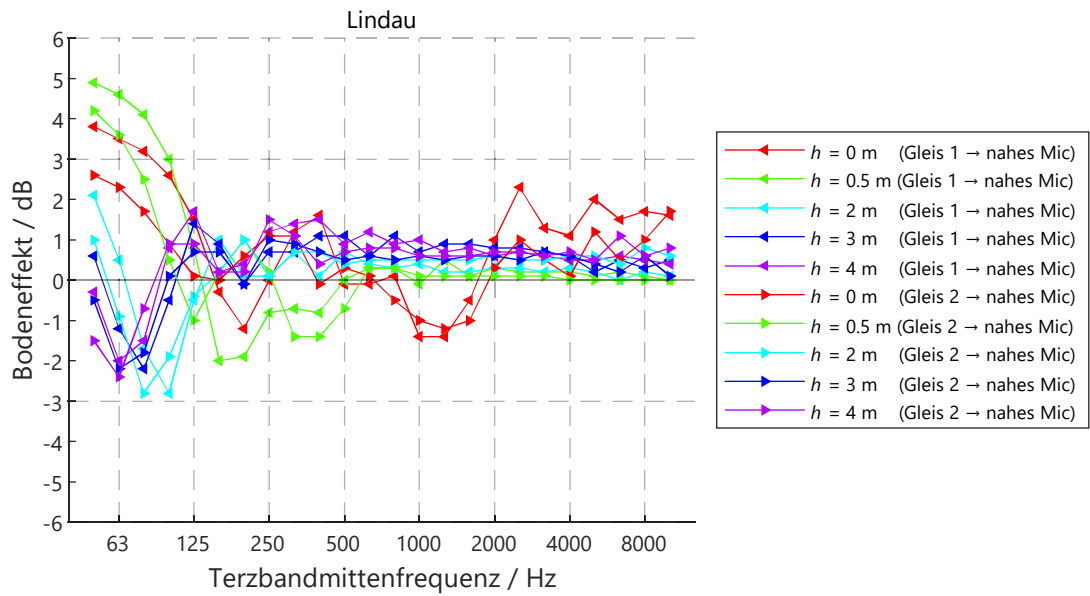


Abbildung 96: Akustischer Schottereffekt auf dem Übertragungsweg zum nahen Mikrofon in Lindau.

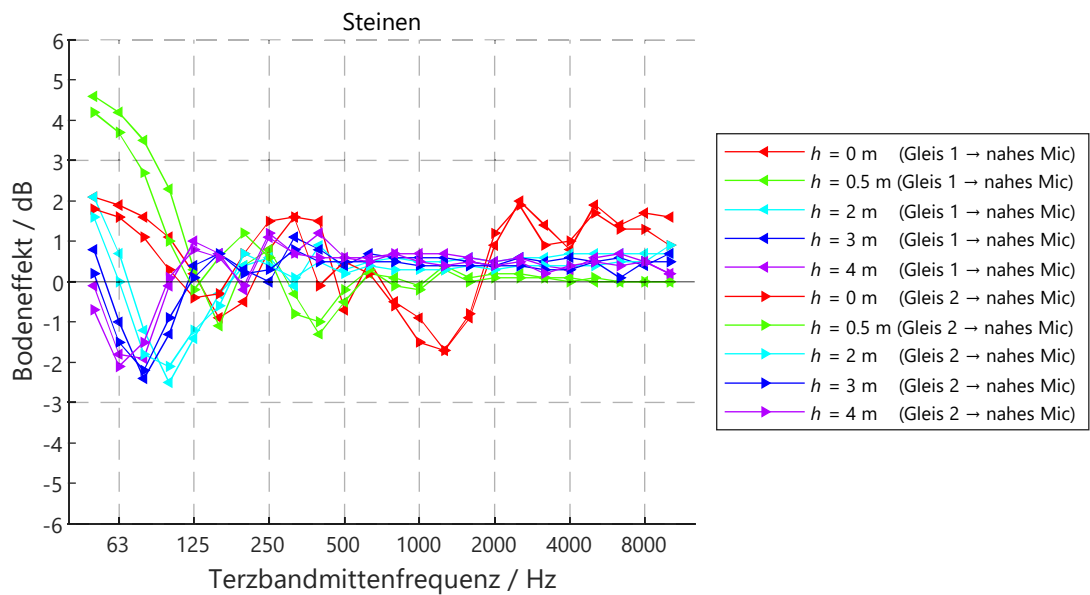


Abbildung 97: Akustischer Schottereffekt auf dem Übertragungsweg zum nahen Mikrofon in Steinen.

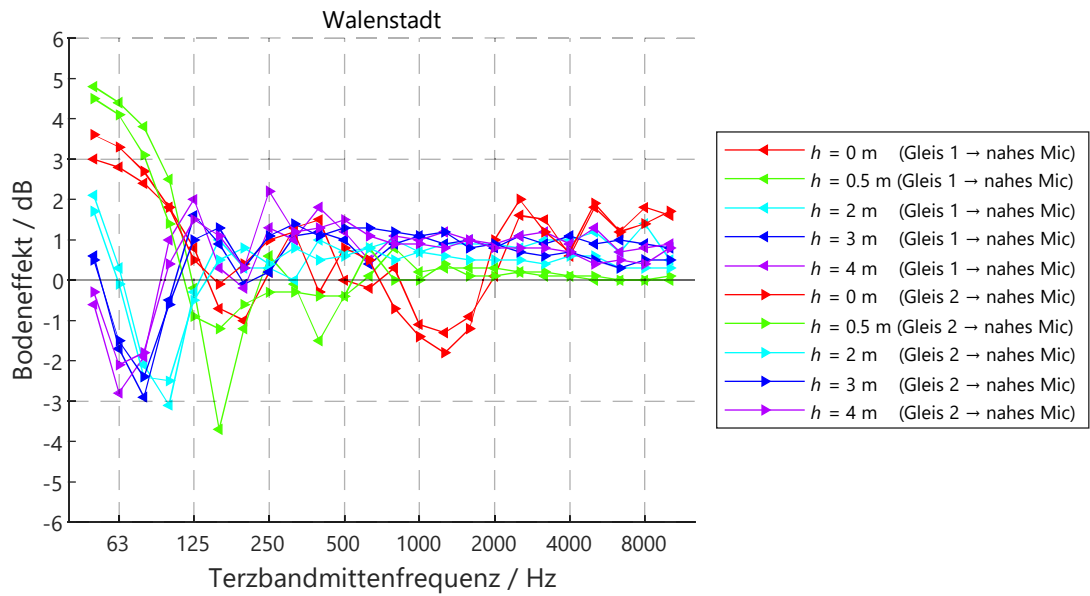


Abbildung 98: Akustischer Schottereffekt auf dem Übertragungsweg zum nahen Mikrofon in Walenstadt.

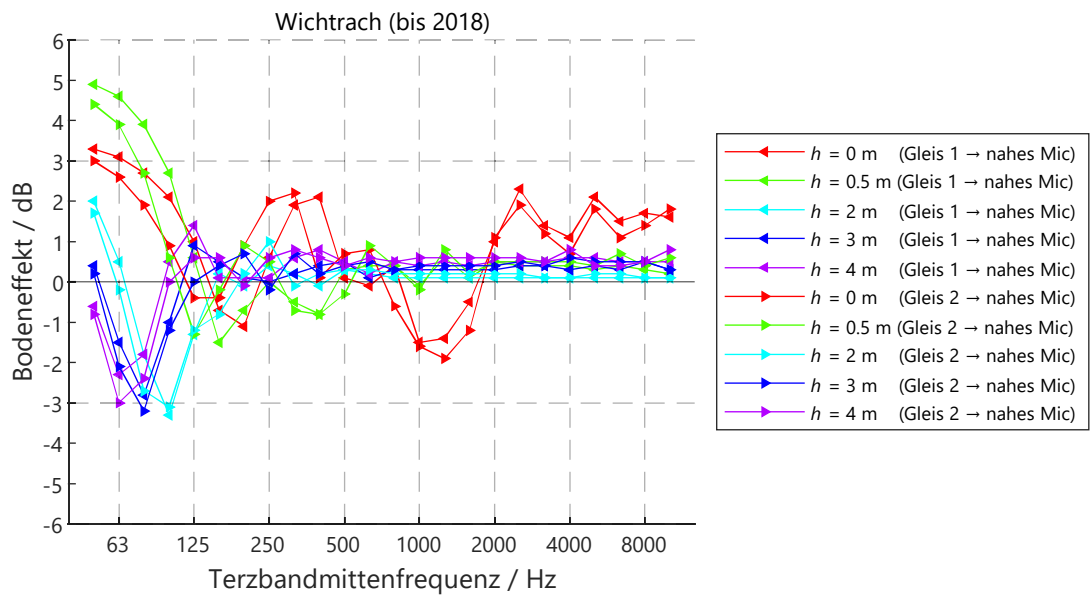


Abbildung 99: Akustischer Schottereffekt auf dem Übertragungsweg zum nahen Mikrofon in Wichtrach vor dem Umbau 2019.

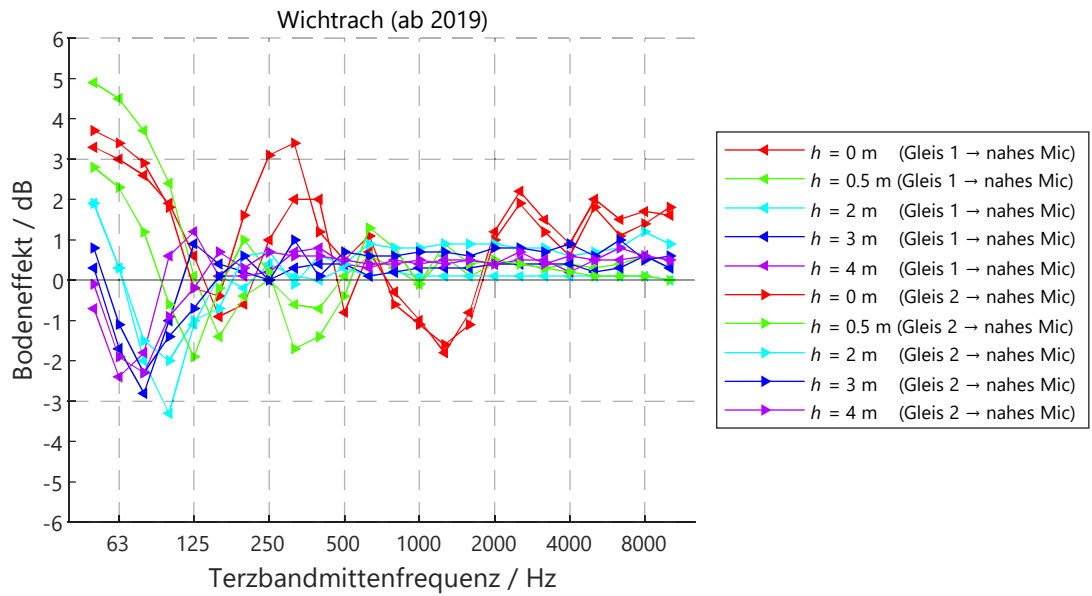


Abbildung 100: Akustischer Schottereffekt auf dem Übertragungsweg zum nahen Mikrofon in Wichtrach nach dem Umbau 2019.

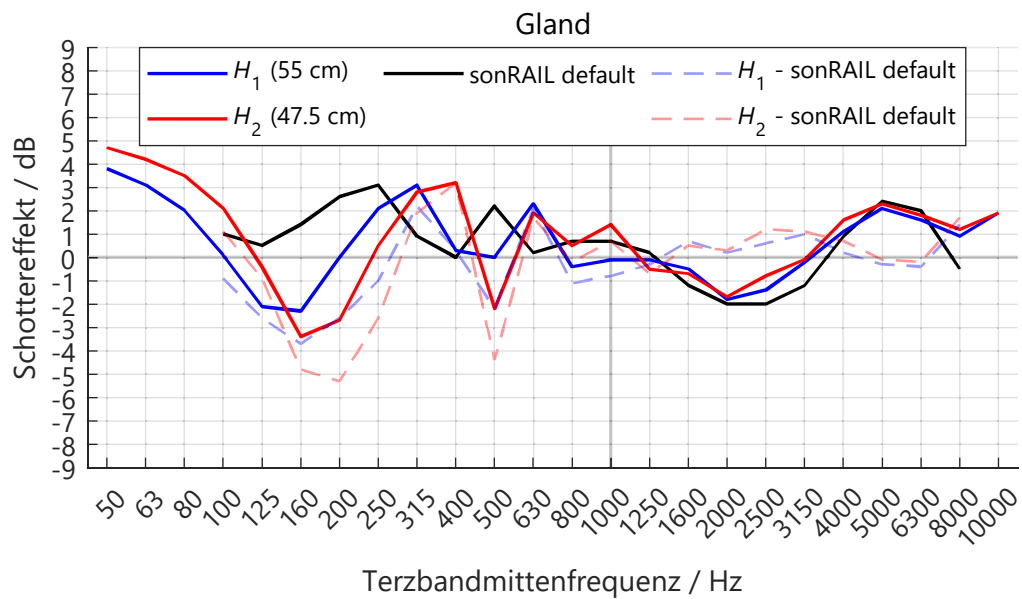
Vergleich zu sonRAIL-default in Quellhöhe $h_0 = 0$ m

Abbildung 101: Gegenüberstellung der Schottereffektspektren auf Quellhöhe $h_0 = 0$ m beider Gleise in Gland mit dem standardmässig in sonRAIL verwendeten Schottereffektspektrum.

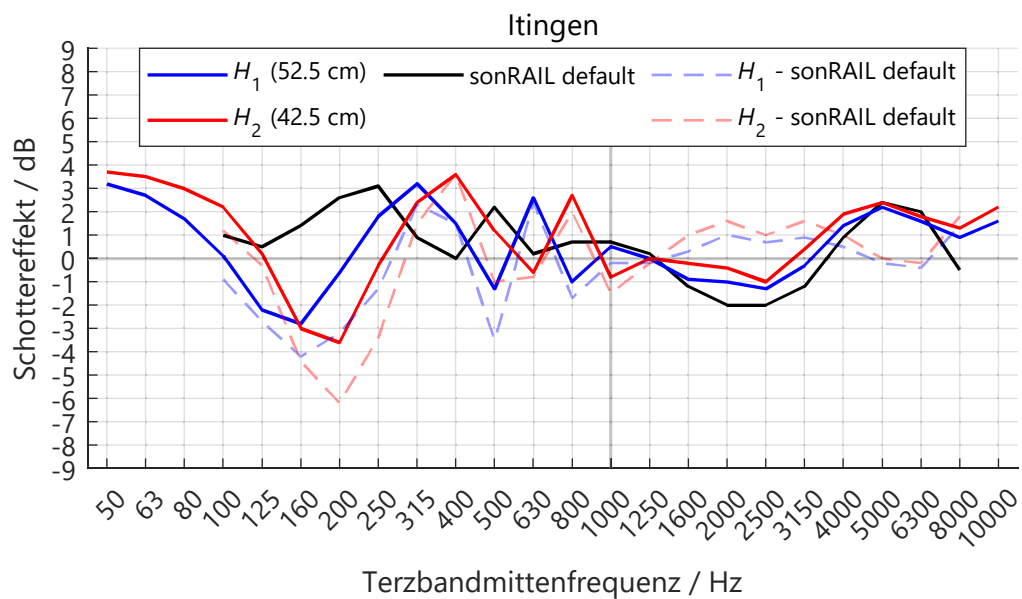


Abbildung 102: Gegenüberstellung der Schottereffektspektren auf Quellhöhe $h_0 = 0$ m beider Gleise in Itingen mit dem standardmässig in sonRAIL verwendeten Schottereffektspektrum.

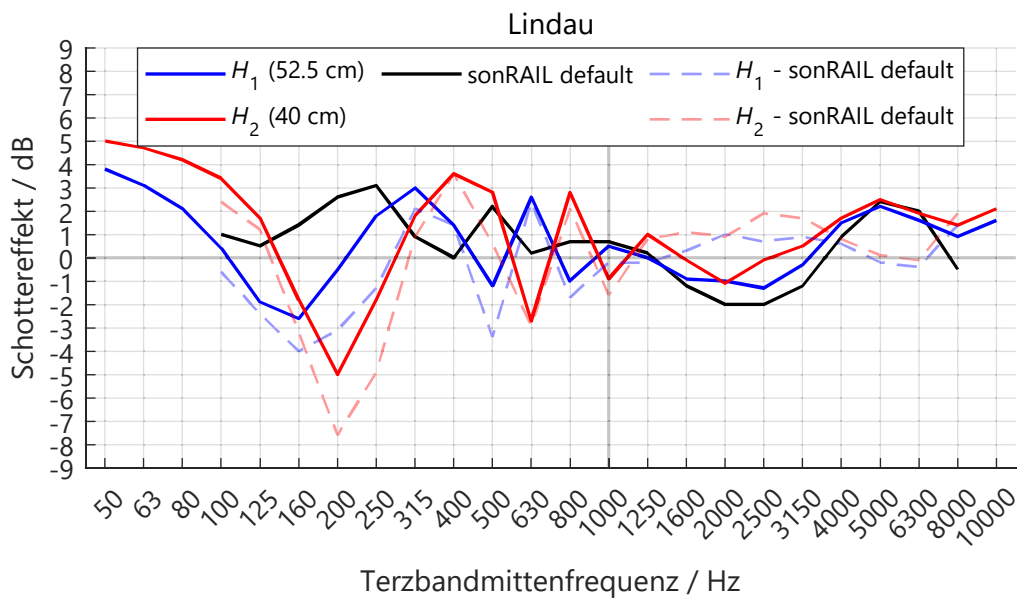


Abbildung 103: Gegenüberstellung der Schottereffektspektren auf Quellhöhe $h_0 = 0$ m beider Gleise in Lindau mit dem standardmässig in sonRAIL verwendeten Schottereffektspektrum.

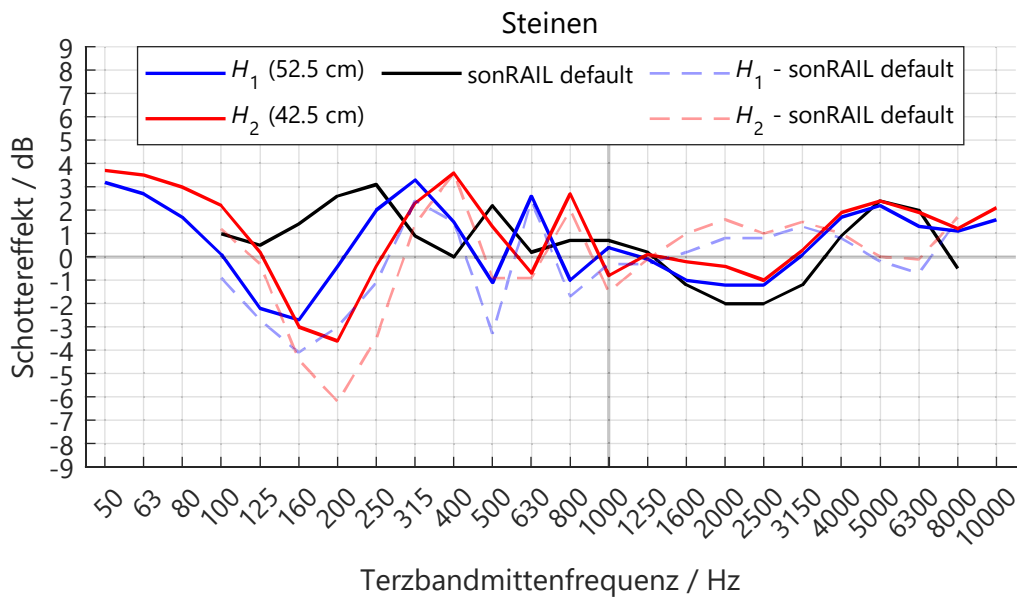


Abbildung 104: Gegenüberstellung der Schottereffektspektren auf Quellhöhe $h_0 = 0$ m beider Gleise in Steinen mit dem standardmässig in sonRAIL verwendeten Schottereffektspektrum.

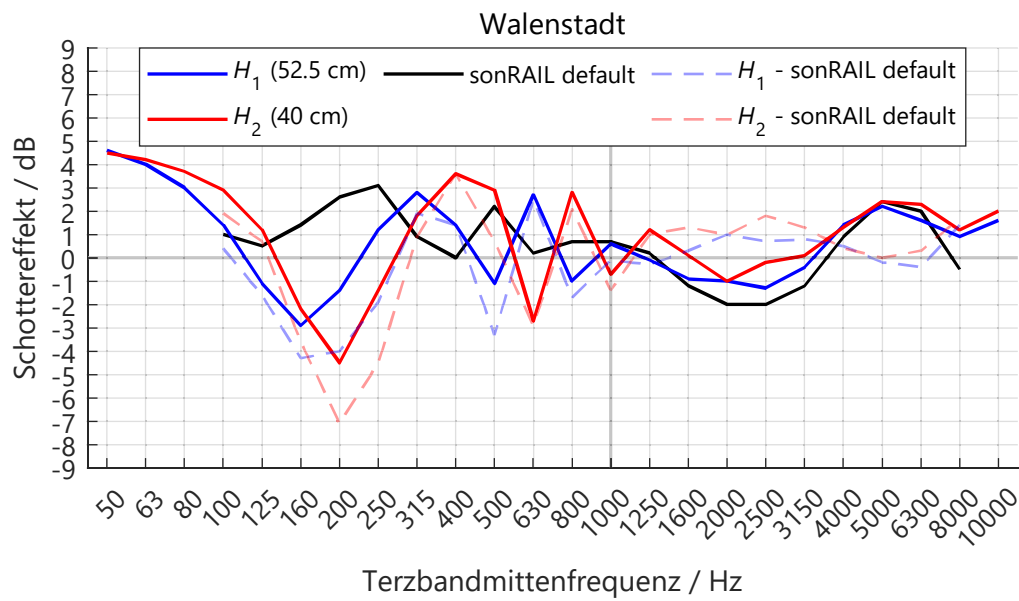


Abbildung 105: Gegenüberstellung der Schottereffektspektren auf Quellhöhe $h_0 = 0$ m beider Gleise in Walenstadt mit dem standardmässig in sonRAIL verwendeten Schottereffektspektrum.

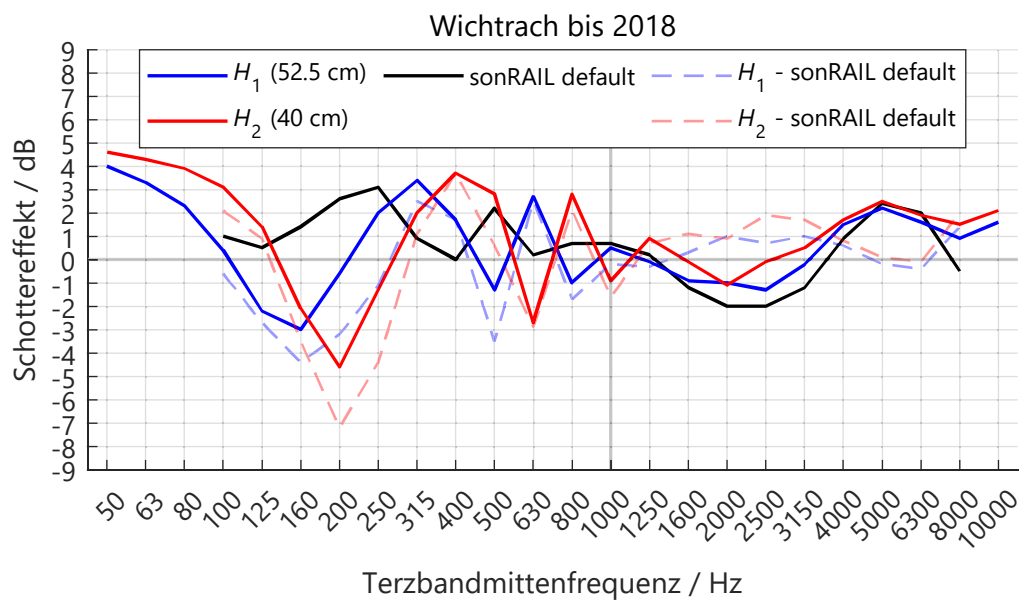


Abbildung 106: Gegenüberstellung der Schottereffektspektren auf Quellhöhe $h_0 = 0$ m beider Gleise in Wichtrach (vor dem Umbau) mit dem standardmässig in sonRAIL verwendeten Schottereffektspektrum.

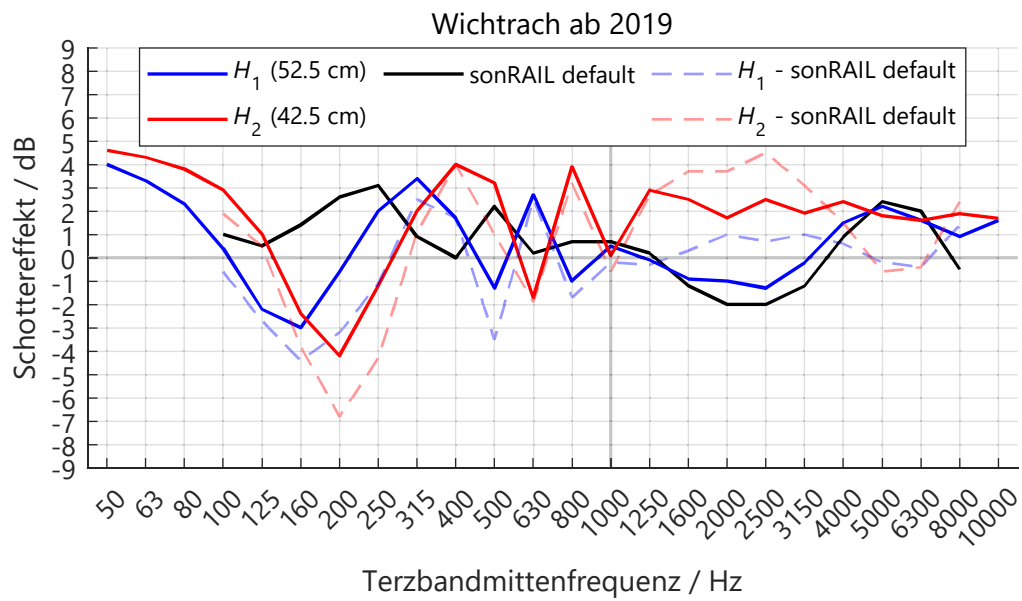


Abbildung 107: Gegenüberstellung der Schottereffektspektren auf Quellhöhe $h_0 = 0$ m beider Gleise in Wichtrach (nach dem Umbau) mit dem standardmässig in sonRAIL verwendeten Schottereffektspektrum.