

sonRAIL

—

Projektdokumentation

7. Oktober 2010

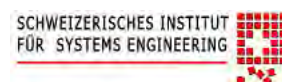


sonRAIL

—

Projektdokumentation

Autoren:	BAFU	Drangu Sehu	drangu.sehu@bafu.admin.ch
	EMPA	Jean Marc Wunderli	jean-marc.wunderli@empa.ch
		Kurt Heutschi	kurt.heutschi@empa.ch
	TU Berlin	Thomas Thron	thomas.thron@tu-berlin.de
		Markus Hecht	markus.hecht@tu-berlin.de
	PROSE AG	Andre Rohrbeck	andre.rohrbeck@prose.ch
	LCC	Thomas Ledermann	thomas.ledermann@lcc-consulting.ch



Inhaltsverzeichnis

I Berichtsteil – *sonRAIL* Dokumentation

1	Prolog	I-1
1.1	Zusammenfassung	I-1
1.2	Motivation und Ausblick des Auftraggebers	I-1
1.3	Pflichtenheft und Projektplan	I-2
1.3.1	Projektziel	I-2
1.4	Projektumsetzung	I-6
1.4.1	Projektvorlauf	I-6
1.4.2	Projektteam, nach Aufgabenbereichen gegliedert	I-6
1.4.3	Systematischer Projektstart	I-8
1.4.4	Kernstück - Die Messkampagne	I-8
1.4.5	Entwicklung des Emissionsmodells und des Ausbreitungsmodells	I-8
1.4.6	Umsetzung in ein produktives System	I-8
1.4.7	Berechnung des Nord-Süd-Korridors durch die Schweiz	I-9
1.5	Technische Spezifikation von <i>sonRAIL</i>	I-9
1.5.1	Emissionsmodell	I-9
1.5.2	Ausbreitungsmodell	I-10
1.5.3	Gesamtmodell	I-10
2	Modellbeschreibung	I-11
2.1	Akustisches Gesamtmodell	I-11
2.1.1	Berechnungsablauf	I-11
2.1.2	Unterteilung einer Strecke in Gleisabschnitte	I-13
2.2	Emissionsmodell	I-13
2.2.1	Auswahl eines Rollgeräuschmodells	I-14
2.2.2	Struktur des <i>sonRAIL</i> Emissionsmodells	I-16
2.3	Ausbreitungsmodell	I-18
2.3.1	Schnittstelle zum Emissionsmodell	I-18
2.3.2	Basis-Ausbreitungsmodell	I-20
2.3.3	Zusätzliche quellennahe Effekte bei künstlichen Bauwerken	I-38
2.3.4	Berücksichtigung von Wettereinflüssen	I-43
2.3.5	Reflexionen an künstlichen Objekten wie Gebäuden und Schallschirmen	I-53
2.3.6	Wald- und Felsreflexionen	I-60
2.4	Bestimmung der meteorologischen Inputparameter für das Schallausbreitungsmodell	I-72
2.4.1	Beschreibung des Meteorvorprozessors	I-72
2.4.2	Grundlagen	I-76
2.4.3	Berechnung der Ähnlichkeitsparameter	I-78
2.4.4	Berechnung der Meteoprofile	I-82
2.4.5	Ermittlung von Meteostatistiken	I-88
3	Planung und Durchführung der Emissionsmessungen	I-97
3.1	Planungsgrundlagen der Messungen	I-97
3.2	Verfahren zur Auswertung und Berechnung der Modellparameter	I-101
3.3	<i>FAMOS</i> Programmsequenz zur automatisierten Auswertung	I-104
4	Ergebnisse der Messungen	I-108
4.1	Ergebnisse der Rauheits- und Track Decay Rate Messungen	I-108

4.1.1	Schienenrauheiten	I-108
4.1.2	Radrauheiten des Messzuges	I-111
4.1.3	Track Decay Rates	I-111
4.2	Anzahl gemessener Fahrzeuge	I-112
4.3	Auswertung der Fahrzeugerkennung	I-113
4.4	Dokumentation der Ergebnisse der Basismessstellen 01 bis 35	I-113
4.5	Zusammenfassung der Ergebnisse der Basismessstellen	I-116
4.5.1	Vergleich der Radrauheiten	I-118
4.5.2	Vergleich der Transferfunktionen	I-118
4.5.3	Zusammenfassender Vergleich der Emissionspegel	I-123
4.6	Dokumentation der Arraymessungen	I-124
4.6.1	Durchführung der Messungen und Auswertungen	I-124
4.6.2	Ergebnisse der Arraymessungen	I-125
4.6.3	Vergleich von Array- und Basismessungen	I-136
5	Analyse von Einflussparametern auf die Emissionspegel	I-138
5.1	Rad- und Schienenrauheiten	I-138
5.1.1	Indirekte Messung der effektiven Gesamtrauheiten	I-138
5.1.2	Indirekte Messung der Schienenrauheit	I-141
5.1.3	Indirekte Messung der Radrauheiten	I-144
5.2	Track Decay Rate und Oberbautypen	I-146
5.2.1	Eigenschaften der Track Decay Rate	I-146
5.2.2	Direkte Messung der Track Decay Rate	I-149
5.2.3	Indirekte Messung der Track Decay Rate	I-152
5.2.4	Transferfunktionen zur Beschreibung der Rollgeräuschabstrahlung von Oberbau und Fahrzeug	I-159
5.3	Geräuschemissionen im Gleisbogen	I-161
5.3.1	Vergleich der Fahrzeuge bei Bogenfahrt	I-162
5.3.2	Schlussfolgerungen für die Modellerstellung	I-164
5.4	Geräuschemissionen an Weichenherzstücken	I-168
5.4.1	Durchführung von Messung und Auswertung	I-168
5.4.2	Bewertung der Ergebnisse	I-168
5.4.3	Schlussfolgerungen für die Modellerstellung	I-171
5.5	Geräuschemissionen auf Brücken	I-171
5.5.1	Datengrundlage	I-173
5.5.2	Einfluss von Rauheiten und Track Decay Rate	I-173
5.5.3	Schlussfolgerungen für die Modellerstellung	I-173
6	Standardwerte des Emissionsmodells und Anwendungsbeispiele	I-174
6.1	Standardwerte des Emissionsmodells	I-174
6.1.1	Definition von Fahrzeugkategorien und Fahrzeugtypen	I-174
6.1.2	Klassifizierte Rad- und Schienenrauheiten	I-174
6.1.3	Sekundäre Quellenleistungen	I-176
6.1.4	Verwendung von Abnahmedaten	I-178
6.1.5	Oberbau- und Brückentypen	I-178
6.2	Sensitivitätsanalyse des Emissionsmodells	I-187
6.2.1	Einflussparameter der Emissionsrechnung	I-187
6.2.2	Reduzierung der Quellenhöhen zur Rechenzeitoptimierung	I-187
6.2.3	Hinweise zur Modellierung	I-188
6.3	Programmapplikation für Emissionsberechnungen	I-190
6.4	Anwendungsbeispiele des Emissionsmodells	I-191
6.4.1	Verteilung der Quellenleistungen am Gesamtgeräusch	I-192
6.4.2	Lärmsanierung von Güterwagen unter Berücksichtigung der Schienenrauheit	I-193
6.4.3	Lärmsanierung von Güterwagen unter Berücksichtigung einer Verkehrssteigerung	I-193
6.4.4	Indirekte Messung von Radrauheiten an Monitoringstationen	I-194
6.4.5	Indirekte, netzweite Messung von Schienenrauheiten	I-195
6.4.6	Emissionsrechnungen für die Strecke Bern-Thun-Spiez	I-198

7	Modellvalidierung	I-200
7.1	Quellennahe Ausbreitung: Vergleich mit Lautsprechermessungen	I-200
7.1.1	Vergleich von Messungen und Berechnungen	I-202
7.2	Reproduktion der Emissionsmessdaten	I-220
7.2.1	<i>sonRAIL</i> Basismessstellen	I-221
7.2.2	<i>sonRAIL</i> Arraymessstellen	I-254
7.2.3	Externe Emissionsdaten	I-259
7.2.4	Modellerweiterung für höhere Geschwindigkeiten	I-262
7.3	Validierung des Basis- und Meteo-Ausbreitungsmodells	I-264
7.3.1	Bodeneffektberechnung bei homogener Atmosphäre und flachem Boden	I-264
7.3.2	Bodeneffektberechnung bei homogener Atmosphäre und unebenem Boden	I-265
7.3.3	Hindernisberechnung bei homogener Atmosphäre	I-266
7.3.4	Berechnung von Schallschattenzonen	I-266
7.4	Validierung des Reflexionsmodells (überbautes Gebiet und künstliche Hindernisse)	I-269
7.5	Validierung des Modells für Waldreflexionen	I-275
7.5.1	Beschreibung der Messsituationen	I-275
7.5.2	Vergleich von Messungen und Berechnungen	I-281
7.6	Validierung des Modells für Felsreflexionen	I-295
7.6.1	Beschreibung der Messsituationen	I-295
7.6.2	Ermittlung des idealisierten Streugrades	I-302
7.6.3	Vergleich von Messungen und Berechnungen	I-302
8	Modellunsicherheit	I-305
8.1	Genauigkeit der Emissionsberechnung	I-305
8.2	Genauigkeit der Ausbreitungsrechnung	I-306
8.3	Genauigkeit der resultierenden Immissionsprognose	I-307

II Anhangsteil – Externer Anhang

A	Detaillierte Beschreibung der <i>sonRAIL</i> Messstellen	II-1
B	Zusammengefasste Ergebnisse der Emissionsmessungen der Messstellen 01 bis 35	II-24
C	Zusammengefasste Ergebnisse der Arraymessungen der Messstellen 03, 15 und 35	II-90
D	Zusammenstellung der gemessenen Züge	II-104



Teil I

Berichtsteil – *sonRAIL* Dokumentation

1 Prolog

1.1 Zusammenfassung

Bislang basierten Eisenbahnlärmberechnungen in der Schweiz auf dem Modell *SEMIBEL*. Das Modell hat seinen Ursprung Ende der 1980er-Jahre und ist damit in vielerlei Hinsicht nicht mehr aktuell. So hat sich in der Zwischenzeit zum einen die Emission der Eisenbahnfahrzeuge verändert, zum anderen stehen hinsichtlich der Schallausbreitung heute wesentlich verfeinerte Ansätze zur Verfügung. Um die Eisenbahnlärmberechnung wieder dem aktuellen Stand des Wissens anzugleichen, beauftragte das Bafu ein Projektteam bestehend aus Partnern aus Deutschland und der Schweiz mit der Aktualisierung des Eisenbahnlärmberechnungsmodells - in der Folge *sonRAIL* genannt.

Zur Beschreibung der Emissionen wurde ein neues Quellenmodell entwickelt, das für eine Vielzahl verschiedener Fahrzeuge die abgestrahlte Leistung in jeweils fünf unterschiedlichen Teilquellen ausweist. Nebst der Fahrzeuggeschwindigkeit werden die Einflüsse des Oberbautyps und der Schienenrauheit berücksichtigt. Überdies sind Korrekturen für kleine Bogenradien, Weichen und Brücken festgelegt worden. Diese im Vergleich zu früheren Modellen wesentlich detailliertere Emissionsberechnung erlaubt neu quantitative Aussagen zum Lärmreduktionspotenzial an der Quelle durch Massnahmen wie z.B. Schienenschleifen oder Änderung des Oberbautyps.

Für die Berechnung der Schallausbreitung von der Quelle zu den Immissionspunkten existiert mit der internationalen Norm ISO 9613-2 eine vollständige Rechenvorschrift. Das neue Modell *sonRAIL* stützt sich in den Grundzügen auf dieses Formelwerk, beschreitet aber in der Behandlung des Bodeneffekts, der meteorologischen Einflüsse und der Reflexionen an Waldrändern, Felswänden und künstlichen Objekten im urbanen Raum neue Wege. Die Bodeneffektrechnung basiert auf der wellentheoretischen Lösung des Schallfeldes über ebenem homogenem Boden mit einer semi-empirischen Verallgemeinerung mittels Fresnelzonen. Die Auswirkungen der Meteorologie auf die Ausbreitung werden mit einem Strahlverfolgungsalgorithmus nachgebildet. Als meteorologische Eingangsdaten stehen feinmaschig und flächendeckend für die ganze Schweiz Informationen zur Temperaturschichtung und zur Windgeschwindigkeit zur Verfügung.

sonRAIL ist als Rechenkern ausprogrammiert worden. Durch die Integration in das GIS-System *EnvGDB* steht damit ein benutzerfreundliches Anwenderinterface für die Datenaufbereitung und Datenvisualisierung zur Verfügung.

1.2 Motivation und Ausblick des Auftraggebers

Die Bedeutung eines effizienten und auch umweltverträglichen Schienenverkehrs in Europa und insbesondere in der Schweiz nimmt zu. Grund dafür ist zum einen der freie Warenverkehr - eine von vier Säulen der europäischen Wirtschaftspolitik. Zum anderen verursacht die Globalisierung eine regionale Clusterbildung der Wirtschaft; diese fortschreitende Arbeitsteilung führt zu laufend mehr transportierten Gütern.

Die Wirtschaftsdynamik spielt sich in Europa hauptsächlich entlang der blauen Banane ab, einem Gebiet, das sich von London über die Benelux-Staaten sowie Ost-Frankreich und West-Deutschland, die Schweiz und Norditalien erstreckt. Die Alpen sind hier das topografische Hindernis. Deshalb wird der transalpine Güterverkehr in Transitkorridoren gebündelt - und die beiden von der EU als prioritär definierten Transitkorridore gehen durch die Schweiz.

Das Streckennetz der schweizerischen Eisenbahngesellschaften ist tagsüber mit Personenverkehr vollständig belegt; für die Güterzüge bleibt nur die Nacht. Das Rollmaterial der Güterzüge verursacht jedoch im Vergleich deutlich mehr Lärm. Folglich verkehrt in der lärmsensiblen Nacht das schlechteste Rollmaterial.

Schlussfolgerung für den Schienenverkehr: Soll die Verlagerungspolitik der Schweiz ein Erfolg werden, dann muss der Schienengüterverkehr leiser werden.

Um zielgerichtet und Kosten sparend Vorgehen zu können, ist zuerst einmal eine genaue Diagnose des Eisenbahnlärms nötig. Die bis dato vorliegenden Berechnungsmodelle entstammen den 80-er und 90-er Jahren des letzten Jahrhunderts und mögen weder phänomenologisch noch von der Genauigkeit her den heutigen Ansprüchen zu genügen. Mit dem Berechnungsmodell *sonRAIL* (siehe <http://www.sonrail.net>) wird eine neue Modellgeneration eingeführt, welche sich sowohl bei der Schallentstehung als auch bei der -ausbreitung an den zugrunde liegenden physikalischen Prozessen orientiert und deshalb die resultierenden Immissionen mit grosser Genauigkeit prognostizieren kann.

Die genaue Prognose des Eisenbahnlärms ist in zweierlei Hinsicht wichtig: zum einen besteht ein Bedürfnis, den aktuellen Zustand abbilden zu können (was mit Messungen grossflächig nicht mehr bezahlbar ist), zum anderen sind zukünftige Szenarien darzustellen. Spätestens hier kommt nur noch die rechenbasierte Prognose zum Einsatz. Dank den neuen Möglichkeiten der Simulationstechnik, z.B. auf Grosscomputersystemen, öffnet sich die Tür in ein neues Zeitalter der Eisenbahnlärmbekämpfung.

Die umfangreichen Messungen, welche im Rahmen von *sonRAIL* durchgeführt wurden, haben einmal mehr den entscheidenden Einfluss der Rad- und Schienenrauigkeiten auf die Rollgeräusentstehung aufgezeigt. Die Qualität der Räder wird dabei massgeblich vom Bremssystem beeinflusst; im Bereich der Schienenqualität liegen noch keine gesicherten Erkenntnisse bezüglich der Ursachen vor. Da die Bremssysteme durch Umrüstung auf K-Sohlen-Bremsen bzw. Scheibenbremsen fortlaufend optimiert werden, ist der verbleibende grosse Lärminderungsgewinn bei der Schienenqualität zu orten. Deshalb ist prioritär eine entsprechende Schienenschleiftechnik zu entwickeln und mit einem geeigneten Wirtschaftspartner umzusetzen. Mittelfristig sind Anstrengungen notwendig, um ein grundsätzliches Verständnis der Entstehungsmechanismen von Schienenrauigkeit zu entwickeln und konkrete Massnahmen am Gleiskörper auszuarbeiten, um eine gute Schienenqualität auch langfristig gewährleisten zu können.

Der Nationalrat ist entgegen dem Antrag des Bundesrates mit dem Beschluss vom 11. März 2009 nicht auf die Kürzung des Kredits für die Lärmsanierung der Eisenbahnen eingegangen. Der Entscheid ist als politische Willenskundgebung des Parlaments zu verstehen, bei der Lärmsanierung zusätzliche Schritte auszulösen. Damit kann davon ausgegangen werden, dass ca. CHF 500 Mio. zur Verfügung stehen, um die Lärmbelastung durch die Eisenbahnen weiter zu begrenzen.

Das UVEK prüft nun das weitere Vorgehen. Die Arbeiten werden vom Bundesamt für Verkehr BAV in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Umwelt BAFU mit hoher Priorität geführt. BAV und BAFU sind bestrebt, den Auftrag des Parlaments rasch umzusetzen und mit den zur Verfügung stehenden Mitteln ein Maximum an Lärmschutz zu erreichen. Innerhalb der Bundesämter besteht zurzeit Einigkeit darüber, dass in erster Priorität Massnahmen direkt an der Quelle anzustreben sind, mit denen ein möglichst flächendeckender Nutzen erzielt werden kann. Das akustische Schienenschleifen ist eine dieser Massnahmen. Deshalb hat das Projekt hohe Priorität aus Sicht der effizienten Lärmbekämpfung.

1.3 Pflichtenheft und Projektplan

Vor Beginn der Projektausschreibung wurde durch den Auftraggeber in Zusammenarbeit mit der Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung ein Pflichtenheft erarbeitet, welches das Projekt bereits in Teilmodule mit separaten Anforderungen strukturierte. Das entsprechende Dokument aus dem Jahre 2004 wird nachfolgend der Vollständigkeit halber aufgeführt.

1.3.1 Projektziel

Es soll ein Berechnungsmodell entwickelt werden, welches eine Ermittlung der Schallimmissionen von fahrenden Eisenbahnzügen im Hinblick auf eine Beurteilung gemäss der Schweizerischen Lärmschutzverordnung LSV erlaubt. Das Berechnungsmodell soll für sämtliche relevanten Situationen ab Beurteilungspegeln von 45 dB(A) gemäss Anhang 4 LSV Resultate von hoher Genauigkeit liefern. Es soll somit sowohl über freiem Feld als auch in bebauten Gebieten einsetzbar sein. Die Modellentwicklung soll dokumentiert, das Endprodukt validiert und in einer Softwarelösung für den internen Gebrauch des Auftraggebers umgesetzt werden.

1.3.1.1 Quellenseitige Anforderungen

Durch das Modell erfasst werden müssen:

- Eisenbahnzüge auf freier Strecke bei Geschwindigkeiten von 50 bis 200 km/h
- Der überwiegende Teil des Rollmaterials, welches in der Schweiz regelmässig zum Einsatz kommt. Künftige, bereits absehbare Entwicklungen sind zu berücksichtigen.
- Die wichtigsten Oberbauarten, welche in der Schweiz im aktuellen Zustand eingesetzt werden. Künftige, bereits absehbare Entwicklungen sind zu berücksichtigen.
- Der Einfluss von Kurvenradien auf die Schallabstrahlung
- Gleiszustand

Mit einer reduzierten Genauigkeit abgebildet werden müssen:

- Der Einfluss von Weichen auf die Schallabstrahlung
- Der Einfluss von Brücken auf die Schallabstrahlung

Nicht behandelt werden müssen:

- Rangier-, Bahnhofsbereiche
- Beschleunigungs- und Abbremsvorgänge
- Kurvenquietschen

1.3.1.2 Ausbreitungsseitige Anforderungen

Durch das Modell erfasst werden müssen:

- Einflüsse der Topographie
- Hinderniswirkungen an Wänden oder Gebäuden
- Wettereinflüsse
- Reflexionen an Wagenkasten, Wänden oder Gebäuden
- Diffuse Reflexionen an Waldrändern und Felswänden
- Walddämpfung
- Unterschiedliche Bodeneigenschaften
- Tunnelöffnungen

1.3.1.3 Angestrebte Genauigkeit

Die Genauigkeit des Modells kann durch zwei Grössen charakterisiert werden. Neben der systematischen Abweichung von einem Referenzwert, welche als Modellfehler interpretiert werden kann, ist auch die stochastische Abweichung von Interesse, da letztere eine Aussage zur erwarteten Streuung im Einzelfall erlaubt. Diese beiden Aspekte werden durch den mittleren quadratischen Fehler gemäss nachfolgender Definition abgebildet.

$$\Psi = \sqrt{\frac{1}{n} \sum x_i^2} \quad (1.1)$$

wobei x_i die i -te von gesamthaft n Stichproben der Testgrösse x darstellt.

Die angestrebte Genauigkeit wird für die beiden Teilmodelle sowie für das Gesamtmodell als Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehler (Quadratwurzelfehler) für die nachfolgend definierten Testgrössen definiert.

Angestrebte Genauigkeit des Emissionsmodells:

Testgrösse für die Genauigkeit des Emissionsmodells sind die Differenzen zwischen gemäss ISO/DIS 3095.2 messtechnisch ermittelten und mit dem Emissionsmodell prognostizierten Vorbeifahrtspegeln ganzer Züge aus Situationen, in denen sämtliche Modellparameter bekannt sind. Der Quadratwurzelfehler aller Stichproben x soll weniger als 0.5 dB(A) betragen.

$$x_i = L_{Ri} - L_{Mi} \quad (1.2)$$

wobei L_{Ri} und L_{Mi} die Pegel der Referenz bzw. der Modellrechnung bezeichnen.

Angestrebte Genauigkeit des Ausbreitungsmodells:

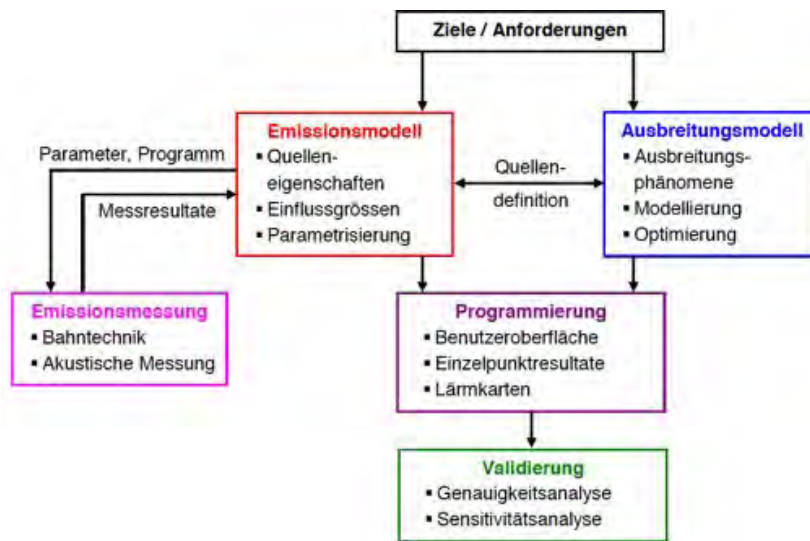


Abbildung 1.1: Projektstruktur gemäss dem Projektplan.

Zur Beurteilung der Genauigkeit des Ausbreitungsmodells werden für eine Vielzahl von Einzelsituationen Ausbreitungsdämpfungen mit dem Ausbreitungsmodell bestimmt und mit einer Referenz verglichen. Die Ausbreitungsdämpfungen sind dabei als Differenz der Quellenpegel in einem Meter Abstand und der A-bewerteten Pegel beim Empfangspunkt zu interpretieren. Als Referenz werden entweder Messungen oder Berechnungen mit einem wellentheoretisch korrekten Berechnungsmodell herangezogen. Als Testgrösse werden die Differenzen der Ausbreitungsdämpfungen von Modell und Referenz, geteilt durch die Ausbreitungsdämpfung der Referenz ermittelt. Diese Normierung über den Betrag der Dämpfung erlaubt es, ein Genauigkeitskriterium zu definieren, welches unabhängig von der Messdistanz oder den Ausbreitungsbedingungen angewendet werden kann. Der Quadratwurzelfehler aller Stichproben x soll weniger als 0.1 betragen.

$$x_i = \frac{D_{R,i} - D_{M,i}}{D_{R,i}} \quad \text{mit } i = 1 \dots 119 \quad (1.3)$$

wobei $D_{R,i}$ und $D_{M,i}$ die Ausbreitungsdämpfungen der Referenz bzw. der Modellrechnung bezeichnen.

Angestrebte Genauigkeit des Gesamtmodells:

Entsprechend dem Projektziel, Beurteilungen gemäss der Schweizerischen Lärmschutzverordnung vorzunehmen, soll die Genauigkeit des Gesamtmodells im Hinblick auf die Ermittlung von Beurteilungspegeln verifiziert werden. Als Vergleichsgrösse sollen Pegeldifferenzen zwischen messtechnisch und rechnerisch ermittelten Beurteilungspegeln aus Situationen verwendet werden, in denen sämtliche Einflussgrößen bekannt sind, wobei auf eine korrekte Abbildung der meteorologischen Einflüsse bei der Bildung des Jahresmittelwertes geachtet werden muss. Der Quadratwurzelfehler dieser Pegeldifferenzen soll im Bereich der Immissionsgrenzwerte und darüber weniger als 2.0 dB und im Bereich der Planungswerte weniger als 3.0 dB betragen.

1.3.1.4 Projektstruktur / Arbeitsplanung / Arbeitsteilung

Das Gesamtprojekt wird in 5 Teilprojekte gemäss der Darstellung 1.1 unterteilt. Basierend auf den in den Projektzielen definierten Anforderungen werden das Emissions- und Ausbreitungsmodell entwickelt. Um eine problemlose Anbindung der Ausbreitungsrechnung an das Emissionsmodell zu gewährleisten, muss zu einem frühen Zeitpunkt die Quellendefinition als Schnittstelle der beiden Module festgelegt werden. Im Emissionsmodell werden die Parameter identifiziert, welche massgeblich für die abgestrahlte Schallleistung der Eisenbahnlärmquellen verantwortlich sind. Es wird ein Messprogramm aufgestellt, welches eine Erfassung der Quellenleistung in Abhängigkeit dieser Einflussgrößen bei einer Vielzahl von Betriebszuständen erlaubt. Die Durchführung dieser Messungen sowie die Auswertung ist in einem separaten Teilprojekt zusammengefasst. Die Auswertung umfasst u.a. die Rückrechnung von den Messorten auf die Quellenpositionen. Diese Rückrechnung hat mittels Algorithmen aus dem Ausbreitungsmodell zu erfolgen.

Die Emissionsmessungen liefern die Inputgrößen, welche zur Definition der Quellenpegel in sämtlichen relevanten Betriebszuständen benötigt werden. Die Ausarbeitung des Emissions- und Ausbreitungsmodells kann abgesehen von den erwähnten Überschneidungen voneinander unabhängig verlaufen. Das gesamte Modell wird anschliessend ausprogrammiert, mit einer graphischen Benutzeroberfläche sowie verschiedenen Resultatausgaben wie Einzelpunktresultate und Lärmkarten versehen. Im Anschluss an die Ausprogrammierung wird eine Validierung des Gesamtmodells vorgenommen, welche einerseits eine Kontrolle der angestrebten Genauigkeit und andererseits eine Sensitivitätsanalyse umfasst. Letztere bezweckt eine Aussage über die Unsicherheit der Berechnung, welche sich als Folge nur ungenügend bekannter Inputparameter, wie beispielsweise den Zustand der Schienen oder des Rollmaterials ergibt.

1.3.1.5 Pflichtenhefte

Emissionsmodell

1. Ermittlung der relevanten Schallquellen (Bemerkung: In Gegenwart von Hindernissen können auch Quellen mit deutlich tieferer akustischer Leistung relevant werden, sofern sie von einer Abschirmung nicht betroffen sind).
2. Festlegen der Schnittstelle zum Ausbreitungsmodell, Quellendefinition (akustische Zielgrößen und ihre Eigenschaften).
3. Ermittlung der Parameter, welche die Quelleneigenschaften beeinflussen.
4. Modellfestlegung / Parametrisierung (Ableitung der Quelleneigenschaften aus den Einflussgrößen).
5. Erstellen eines Mess- und Auswertkonzeptes zur Erfassung der Ziel- und Einflussgrößen.
6. Erstellen eines Messprogramms (Oberbautypen, Rollmaterial, Betriebszustände, Messstrecke, Messstandorte, Schienenrauigkeit usw.).
7. Dokumentation.
8. Mindestens eine Publikation in einer Fachzeitschrift unter Einbezug der Resultate der Emissionsmessungen.

Emissionsmessungen

1. Organisation / Koordination der Bahntechnik (Messstrecken, Versuchszüge, Bahnbetrieb).
2. Organisation / Koordination / Durchführung der akustischen Messungen.
3. Dokumentation der Messungen, Verwaltung der Messresultate.
4. Auswertung der Messdaten, Dokumentation der Auswertung.

Ausbreitungsmodell

1. Festlegen der Schnittstelle zum Emissionsmodell.
2. Entwicklung der Berechnungsalgorithmen zur Behandlung der in den Projektzielen aufgeführten Effekte auf die Schallausbreitung (Gelände, künstliche Hindernisse, Wetter usw.).
3. Unterstützung der Messauswertung im Projektteil Emissionsmessungen (Rückrechnung von den Messdistanzen auf die Referenzdistanz bzw. Quellenleistung).
4. Kombination der einzelnen Berechnungsalgorithmen zu einem Gesamtmodell.
5. Definition des Modells in variabler Form mit dem Ziel, eine Optimierung zwischen Berechnungsaufwand und Genauigkeit durch gezielte Aktivierung komplexerer Berechnungsmodule zu erlauben. Als separate, zuschaltbare Module sind die Behandlung der Wettereinflüsse, die diffusen Reflexionen, sowie die Reflexionen an künstlichen Hindernissen auszugestalten.
6. Dokumentation.
7. Mindestens eine Publikation in einer Fachzeitschrift.

Ausprogrammierung

1. Erfassung des Emissionsmodells in einer Quelldatenbank.
2. Ausprogrammierung des Ausbreitungsmodells inkl. der Wahlmöglichkeiten bzgl. Detaillierungsgrad bzw. Präzision.
3. Berücksichtigung der Pegelkorrektur gemäss LSV Anhang 4.
4. Erstellen einer graphischen Benutzeroberfläche zur Definition der Berechnungsprojekte.
5. Definition eines Speicherformates für Projektdateien, welches sämtliche Parameter sowohl des Projektes als auch der Programmeinstellungen enthält.
6. Definition eines Resultatformates, welches für einzelne Empfangspunkte die Beurteilungspegel sowie zur Kontrolle der Berechnung relevante Zwischenresultate ausweist.
7. Berechnung, Darstellung sowie Speicherung von Lärmbelastungskarten.
8. Erstellen einer Programmdokumentation

Validierung

1. Kontrolle der Emissionsmessungen auf das Genauigkeitskriterium gemäss Projektziel.
2. Erstellen einer Sensitivitätsanalyse des Emissionsmodells. Abschätzung der Auswirkung auf die Genauigkeit unter Bedingungen, in denen verschiedene Modellparameter nicht explizit bekannt sind.
3. Vergleich des Ausbreitungsmodells mit einem auf der Wellengleichung basierenden Referenzmodell. Kontrolle des Genauigkeitskriteriums gemäss Projektziel basierend auf diesen Vergleichsberechnungen.
4. Punktuelle Kontrolle des Emissions- und Immissionsmodells mit Messungen.
5. Dokumentation der Validierung.
6. Publikation des Gesamtmodells sowie der resultierenden Genauigkeit in einer Fachzeitschrift.

1.4 Projektumsetzung

1.4.1 Projektvorlauf

Um einen nutzbringenden Beitrag durch das BAFU zu erbringen, wurden ab 2003 umfangreiche Sondierungsgespräche und Vorabklärungen durchgeführt. Es wurden die Anforderungen an das Berechnungsmodell formuliert und Leistungsprofile von potenziellen Projektpartnern eingeholt. Das Einholen von Offerten basierte auf der Ausarbeitung von Arbeitsplänen und Finanzierungsmodellen. Im Herbst 2006 konnte eine definitive Projektbeschreibung, bestehend aus Inhalten, Zeitplan und Finanzierung vorgelegt werden. Der interne Projektantrag wurde von der BAFU Direktion genehmigt und die beteiligten Projektpartnern konnten evaluiert werden.

1.4.2 Projektteam, nach Aufgabenbereichen gegliedert

1.4.2.1 Modul Emissionsmessungen

- **Lead: PROSE AG, measuring and testing** (www.prose.ch), Kontakt: S. Bühler (stefan.buehler@prose.ch, +41 52 262 74 12)
- Technische Universität Berlin, Fachgebiet Schienenfahrzeuge (www.schieneffzg.tu-berlin.de), Kontakt: Prof. M. Hecht (markus.hecht@tu-berlin.de, +49 30 314 25 195)
- Sulzer Innotec (www.sulzerinnotec.com), Kontakt: Dr. Hans Rudolf Graf (hansrudolf.graf@sulzer.com, +41 52 262 82 40)
- Empa, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Abteilung Akustik / Lärminderung (www.empa.ch/Akustik), Kontakt: Dr. J.M. Wunderli (jean-marc.wunderli@empa.ch, +41 44 823 47 48)
- PSIA Austria (www.psia.at), Kontakt: Dr. M. Kalivoda, kalivoda@psia.at, +43 186 567 55)

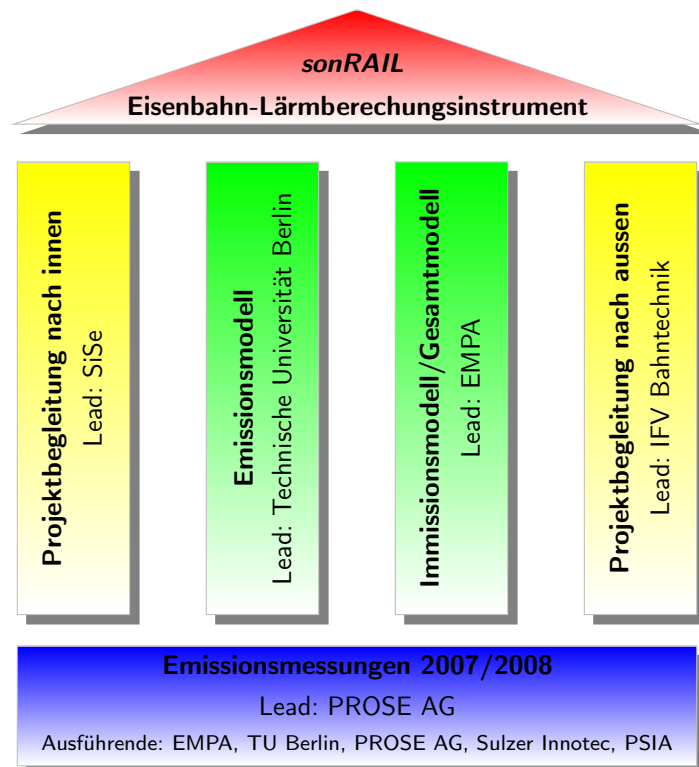


Abbildung 1.2: Projektstruktur und Projektpartner des Projektes *sonRAIL*

1.4.2.2 Modul Emissionsmodell

- **Lead: Technische Universität Berlin, Fachgebiet Schienenfahrzeuge** (www.schienenfzg.tu-berlin.de), Kontakt: Prof. M. Hecht (markus.hecht@tu-berlin.de, +49 30 314 25 195)
- PROSE GmbH (www.prose-deutschland.de), Kontakt: T. Thron (thomas.thron@prose-deutschland.de), +49 30 97 449 75)

1.4.2.3 Modul Ausbreitungsmodell

- **Lead: Empa, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Abteilung Akustik / Lärmmin- derung** (www.empa.ch/Akustik), Kontakt: Dr. J.M. Wunderli (jean-marc.wunderli@empa.ch, +41 44 823 47 48)

1.4.2.4 Modul Programmierung

- **Lead: Empa, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Abteilung Akustik / Lärmmin- derung** (www.empa.ch/Akustik), Kontakt: Dr. J.M. Wunderli (jean-marc.wunderli@empa.ch, +41 44 823 47 48)
- LCC Consulting (www.lcc-consulting.ch), Kontakt: T. Ledermann (thomas.ledermann@lcc-consulting.ch, +41 44 454 30 15)

1.4.2.5 Modul Validierung

- **Lead: Empa, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Abteilung Akustik / Lärmmin- derung** (www.empa.ch/Akustik), Kontakt: Dr. J.M. Wunderli (jean-marc.wunderli@empa.ch, +41 44 823 47 48)
- Technische Universität Berlin, Departement für Schienenfahrzeuge (www.prose.ch), Kontakt: S. Bühler (stefan.buehler@prose.ch, +41 52 262 74 12)

1.4.2.6 Projektbegleitung

- SISE - Schweizerisches Institut für Systems Engineering (www.swissinstitute.ch), Kontakt: Dr. R. Züst (rainer.zuest@swissinstitute.ch, +41 44 932 51 59)
- IFV BAHNTECHNIK (www.ifv-bahntechnik.de), Kontakt: E. Schulz (schulz@ifv-bahntechnik.de, +49 30 3142 1698)

1.4.3 Systematischer Projektstart

Ende 2006 / Anfang 2007 wurden die Verträge mit den beteiligten Partnern abgeschlossen. Die anspruchsvolle Ressourcen- und Liquiditätsplanung, bedingt durch die umfangreiche Messkampagne im selben Jahr, wurde Anfang 2007 durchgeführt. Die Aufgaben- und Ressourcenverteilung innerhalb des Projektteams musste durch eindeutig definierte Schnittstellen genau geregelt werden. Zur Abklärung dieser inhaltlichen Fragen wurden ausführliche Workshops und Kick-Off's durchgeführt, in denen der definitive Termin der Messkampagne im Jahr 2007, die Kürzung der Projektdauer auf 2.5 Jahre und die inhaltliche Zusammenarbeit geregelt wurde. Diese Übereinkunft wurde von allen Projektpartnern eigenhändig auf dem ausgearbeiteten Projektplan ratifiziert. In Abbildung 1.1 ist die Projektstruktur mit den jeweiligen Aufgabenbereichen dargestellt.

1.4.4 Kernstück - Die Messkampagne

Die Basis von

sonrail ist die Erhebung von Messdaten, die während einer Messkampagne im Sommer 2007 durchgeführt wurde. Im Vorfeld der Messungen wurden 15 Messstellen ausgewählt, die vor Ort an den Bahnstrecken Lausanne – Bern und Mattstetten – Rothrist ausgewählt wurden. Die Auswahl erfolgte hinsichtlich optimaler Umgebungsbedingung und Streckendaten.

Die Messstellen 1 bis 12 wurden zeitlich parallel betrieben. Nebst den ordentlich verkehrenden Zügen wurde auf der Messstrecke Lausanne-Freiburg ein pendelnder, speziell konditionierter Messzug, bestehend aus 2 Lokomotiven, 7 Personenwagen und 6 Güterwagen (drei 4-achsige und drei 2-achsige Wagen) erfasst. Die inhaltliche Vorbereitung der Messkampagne wurde mit folgenden Massnahmen flankiert: Risikomanagement, Durchspielen von Notfall-Szenarien, Einüben standardmässigen Verhaltens in regulären und ausserordentlichen Situation sowie stufengerechte Abgabe der entsprechenden Dokumentation an jeden Teilnehmer der Messkampagne, dokumentierte Unterlagen zu Notfallsituationen mit einer klaren Führungs- und Entscheidungsstruktur. Die Messkampagne konnte in der Kalenderwoche 33 des Jahres 2007 mit vollem Erfolg durchgeführt werden – dies trotz der unmittelbar vorhergegangenen Unwetter und Streckensperrungen.

Die Daten der Messkampagne wurden in ein einheitliches Format aufbereitet und in einem Datenbanksystem hinterlegt. Insgesamt wurden mehr als 30 GB Messdaten von mehr als 30'00 Zugsvorbeifahrten erfasst.

1.4.5 Entwicklung des Emissionsmodells und des Ausbreitungsmodells

Der Aufbau von Emissions- und Immissionsmodell erfolgte parallel durch die Projektpartner TU Berlin und Empa, wobei im Voraus die genaue Schnittstelle zwischen beiden Modellen definiert wurde. Die Entwicklung des Emissionsmodells stützte sich stark auf die Daten der Emissionsmessungen ab. Weitere Parameter wie z.B. Brückenzuschläge mussten jedoch basierend auf Literatur-Recherchen bestimmt werden. Die Entwicklung des Ausbreitungsmodells erfolgte weitgehend unabhängig von den Emissionsmessungen. Spezielle Herausforderungen stellten der Bodeneffekt über Schotter dar, welcher mit einem eigens entwickelten Modell behandelt wird, sowie die Reflexionsmodelle, für welche drei separate Modellansätze neu entwickelt wurden.

1.4.6 Umsetzung in ein produktives System

Die Ausprogrammierung des Ausbreitungsmodells erfolgte direkt durch die Empa. Das Emissionsmodell, die Benutzerführung, die Aufbereitung von Berechnungen und ihre Steuerung sowie die nachträgliche Darstellung und Auswertung von Resultaten wurde durch die Firma LCC Consulting in ihr bestehendes Produkt EnvGDB (Environmental Geo-DataBase) integriert (siehe Abbildung 1.3). Das Berechnungsmodell wurde speziell für Multi-Prozessor-Systeme ausgerichtet. Zum einen kann die im Vergleich zur Emissionsberechnung sehr aufwändige Ausbreitungsrechnung in vier Teilmodule aufgeteilt werden, zum anderen können grosse Projekte durch eine geeignete räumliche Kachelung in Teilprojekte aufgeteilt werden, welche separat berechnet werden. Das System wurde an der Empa eingerichtet und greift zur Durchführung von Berechnungen auf einen Linux-basierten Cluster mit der Bezeichnung Ipazia zu.

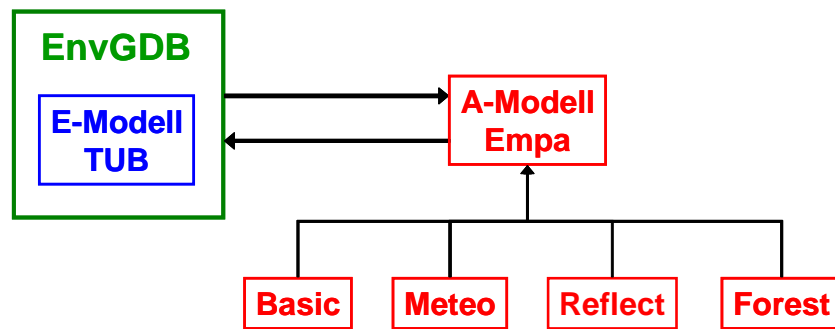


Abbildung 1.3: Projektstruktur gemäss dem Projektplan.

Ipazia besteht aktuell aus 46, teilweise mit Infiniband verbundenen Knoten, 248 Prozessoren mit gesamthaft 768 GB RAM und 24 TB Diskplatz. Der Rechen-Cluster wird laufend ausgebaut und erneuert und garantiert somit auch die Abwicklung grosser Projekte innert akzeptabler Zeit.

1.4.7 Berechnung des Nord-Süd-Korridors durch die Schweiz

Als erste praktische Anwendung wurden Anfang 2010 Berechnungen der Lärmimmissionen entlang des Nord-Süd-Korridors durch die Schweiz gestartet. Bis Mitte Februar wurde ein Gebiet mit einer Fläche von rund 340 km² berechnet, welches rund 50 Bahnkilometer, knapp 30'000 Gebäude, 17 Lärmschutzwände und 172'000 Empfangspunkte enthält.

Als grosse Herausforderung hat sich im Vorfeld dieser Testrechnungen die Beschaffung der Inputdaten erwiesen, welche für eine genaue Immissionsberechnung benötigt werden. Emissionsseitig haben sich neben den Verkehrsdaten vor allem die Schienenrauigkeiten entlang des Streckennetzes als Knackpunkt erwiesen. Da keinerlei Angaben zu den Schienenrauigkeiten auf dem Schweizer Schienennetz erhältlich waren, wurde durch Prose und TUB eigens ein Messzug ausgerüstet, mit welchem rund ein Drittel des Netzes abgefahren wurde. Dabei wurde die lokale Schienenrauigkeit durch ein neu entwickeltes Verfahren indirekt aus den Achsbeschleunigungen abgeleitet.

Beim Ausbreitungsmodell wurden grosse Anstrengungen unternommen, um die lokalen meteorologischen Verhältnisse beschreiben zu können. Zu diesem Zweck wurden durch die Empa Modelldaten der MeteoSchweiz für rund 25'000 Gitterpunkte mit einer Maschenweite von 2.2 km zu Meteostatistiken aufbereitet. Diese erlauben es, für jeden Punkt der Schweiz die Auftretenshäufigkeiten verschiedener Wetterlagen und Windrichtungen als Eingangsgrössen für die Schallausbreitungsrechnung abzulesen.

1.5 Technische Spezifikation von sonRAIL

1.5.1 Emissionsmodell

Zwingende Eingangsgrössen:

- Fahrzeugtyp
- Oberbautyp (vordefinierte Kategorie oder nutzerspezifische Transferfunktion)
- Schienenrauigkeit (vordefinierte Kategorie oder nutzerspezifisches Rauheitsspektrum)
- Radrauigkeit (vordefinierte Kategorie oder nutzerspezifisches Rauheitsspektrum)
- Geschwindigkeit [km/h]

Optionale Eingangsgrössen:

- Bogenradius bei Berechnungen im Gleisbogen
- Weichentyp bei Berechnungen an Weichenherzstücken

- Brückentyp bei Berechnungen auf Brücken
- Berücksichtigung von Flachstellen

Resultate: Für jede der fünf vordefinierte Quellenhöhen werden pro Fahrzeug die Emissionswerte als Schalleistungsspektren pro Terzfrequenz zwischen 100 und 8000 Hz angegeben.

1.5.2 Ausbreitungsmodell

Zwingende Eingangsgrößen:

- Topographie
- 3D-Koordinaten von Quellen und Empfängern
- Klassierung der Quellen als freie Strecke, Brücke, Tunnel, Einschnitt oder Galerie
- Klassierung der Quellen als feste Fahrbahn oder Schotteroberbau
- 3D- bzw. 2.5D-Koordinaten von Gebäuden und Lärmschutzwänden (Voraussetzung für die Berechnung von Gebäude-Reflexionen)
- lokale Oberflächeneigenschaften gemäss einer vorzugebenden Klassierung (Voraussetzung für die Berechnung von Wald und Fels-Reflexionen)
- Eine oder mehrere Meteosituationen, definiert über vorzugebende Vertikalprofile von Wind, Temperatur und Feuchte, Windrichtungen und Auftretenshäufigkeiten in den Zeitperioden Tag, Abend, Nacht (Voraussetzung für die Berechnung von Wettereinflüssen)

Optionale Eingangsgrößen:

- Oberflächeneigenschaften von Gebäuden und Lärmschutzwänden (zur Optimierung der Reflexionsberechnung)
- Schottertiefe (zur Optimierung der Bodeneffektberechnung)

Resultate:

Für jede Quellen-Empfänger-Kombination werden folgende Resultate ausgegeben:

- Ausbreitungsdämpfungen in Terzen von 100 Hz bis 8 kHz für 5 Quellenhöhen (0.0, 0.5, 2.0, 3.0 und 4.0 m) für die Direktschallausbreitung ohne meteorologische Einflüsse
- Ausbreitungsdämpfungen in Terzen von 100 Hz bis 8 kHz für 2 Quellenhöhen (0.5 und 3.0 m) und 3 Zeitabschnitte (Tag, Abend, Nacht) für meteorologische Einflüsse auf den Direktschall
- Ausbreitungsdämpfungen in Terzen von 100 Hz bis 8 kHz für eine Quellenhöhe von 0.5 m für Reflexionen an Gebäuden und Lärmschutzwänden
- Ausbreitungsdämpfungen in Terzen von 100 Hz bis 8 kHz für eine Quellenhöhe von 0.5 m für Reflexionen an Waldrändern und Felswänden

1.5.3 Gesamtmodell

Zwingende Eingangsgrößen:

- Verkehrszahlen pro Fahrspur und Fahrgeschwindigkeit, separiert für die Zeiträume Tag (06-18 Uhr), Abend (18-22 Uhr) und Nacht (22-06 Uhr). Die Verkehrszahlen umfassen die Anzahl Züge sowie die Anzahl Fahrzeuge pro Fahrzeugkategorie.
- Klassierung der Empfangspunkte als Fassadenpunkt (Empfangspunkt im offenen Fenster) oder als Punkt im Freien

Resultate:

- Mittelungspegel L_{eq} in dB(A) für die Zeiträume Tag, Abend und Nacht
- Beurteilungspegel L_r für die Zeiträume Tag und Nacht gemäss Schweizerischer Lärmschutzverordnung, Anhang 4

2 Modellbeschreibung

2.1 Akustisches Gesamtmodell

Das akustische Gesamtmodell zur Berechnung der Lärmimmissionen an Schienenwegen unterteilt sich in ein Emissionsmodell und ein Ausbreitungsmodell. Das Emissionsmodell ermöglicht die Beschreibung von Geräuschquellen am System Fahrzeug-Fahrweg, das Ausbreitungsmodell berücksichtigt alle relevanten Einflussparameter der Schallausbreitung.

2.1.1 Berechnungsablauf

Der allgemeine Berechnungsablauf des Gesamtmodells ist in Abbildung 2.1 dargestellt und strukturiert sich in folgende Punkte:

1. Diskretisierung der relevanten Strecke in Gleisabschnitte mit gleicher Emissionsstärke, Abbildung 2.5.
2. Berechnung der Schallleistung aller Fahrzeugkategorien die in dem Streckenabschnitt verkehren.
3. Berechnung des äquivalenten längenbezogenen Emissionspegels bezogen auf 1 Meter Gleisabschnitt pro Stunde, für die Anzahl der Fahrzeuge $N_{u,k}$ der Kategorie k und deren Vorbeifahrtgeschwindigkeit $v_{u,k}$, für alle Quellenarten p in allen Quellenhöhen h , Gleichung (2.3).
4. Berechnung der Ausbreitungsdämpfungen pro Gleisabschnitt (Bestandteil des Ausbreitungsmodells).
5. Berechnung des Immissionspegels der Gleisabschnitte j unter Berücksichtigung der Ausbreitungsdämpfung $A_{total,hmji}$ für jede Teilquelle m in einer Quellenhöhe h und der Frequenz i , Gleichung (2.1), (2.2).

Der A-bewertete Immissionsschalldruckpegel L_{Aeq} wird aus der energetischen Summation aller Schalldruckpegel der einzelnen Gleisabschnitte über alle Frequenzbänder ermittelt:

$$L_{Aeq} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{h=1}^H \oplus L_{eq,hji} + A_{bew,i} \text{ [dB]} \quad (2.1)$$

$\sum \oplus$: energetische Summation

L_{Aeq} : A-bewerteter Immissionsschalldruckpegel

$L_{eq,hji}$: Schalldruckpegel im Frequenzband i , des Abschnittes j , der Quellenhöhe h [dB]

$A_{bew,i}$: A-Bewertung im Frequenzband i [dB]

I : Anzahl der Frequenzbänder

i : Frequenzbandnummer

J : Anzahl der Gleisabschnitte

j : Abschnittsnummer

H : Anzahl der Quellenhöhen

h : Index der Quellenhöhe

Der Immissionspegel $L_{eq,hji}$ eines einzelnen Gleisabschnittes wird aus den längenbezogenen Emissionspegeln $L_{W',hji}$ der Teilquellen m eines Gleisabschnittes j , der Quellenhöhe h im Frequenzband i unter Berücksichtigung aller Ausbreitungsterme $A_{total,hji}$ berechnet:

$$L_{eq,hji} = L_{W',hji} - A_{total,hji} \text{ [dB]} \quad (2.2)$$

$L_{W',hji}$: Längenbezogenen Schallleistung des Gleisabschnittes j , konstant für alle Teilquellen

$A_{total,hji}$: Gesamtdämpfungsterm des Gleisabschnittes j in der Quellenhöhe h [dB]

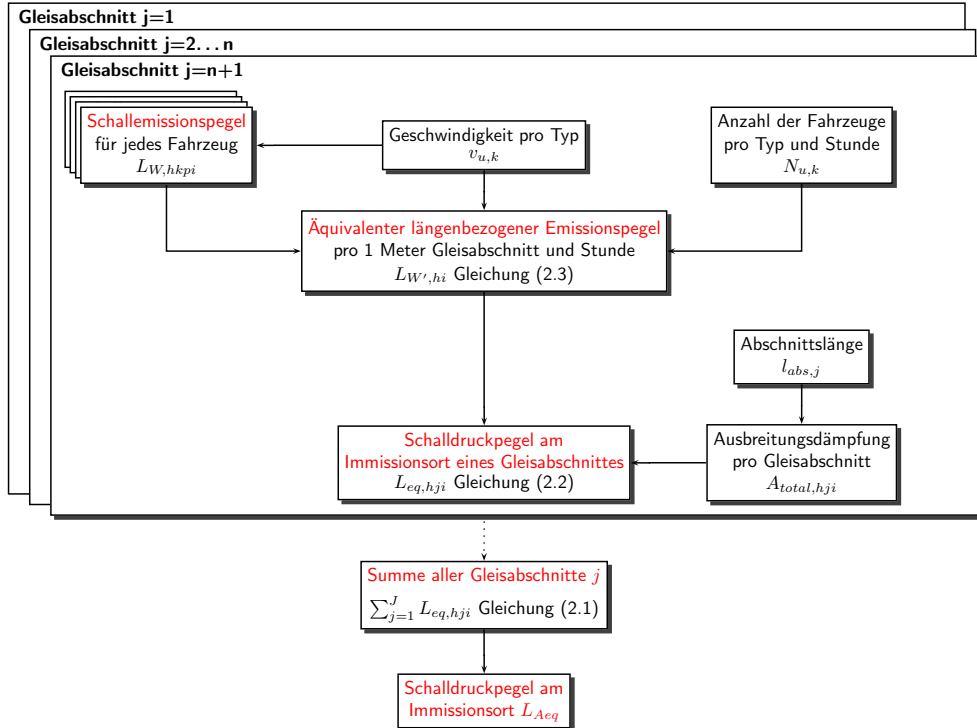


Abbildung 2.1: Ablauf der Berechnung von Immissionspegeln auf Grundlage der Emissionsdaten der Fahrzeuge, sowie der Zusammensetzung des Verkehrsflusses auf einer Eisenbahnstrecke

Der Einfluss der Abschnittslänge wird in der Berechnung der Gesamtdämpfungsterme berücksichtigt. Der längenbezogene Emissionspegel pro 1 Meter Gleisabschnitt und Stunde $L_{W',hi}$ berechnet sich aus dem Verkehrsfluss aller verkehrenden Fahrzeuge einer Fahrzeugkategorie k , unter Berücksichtigung der Anzahl der Fahrzeuge $N_{u,k}$ pro Stunde und der Vorbeifahrtdauer¹:

$$L_{W',hi} = \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P \oplus \left[L_{W,hkpi} + 10 \lg \left(\frac{N_{u,k}}{1000 v_{u,k}} \right) \right] \text{ [dB]} \quad (2.3)$$

$L_{W,hkpi}$: Schallleistung in den Quellenhöhen h einer Fahrzeugkategorie k

P : Anzahl der Geräuschquellen der Fahrzeugkategorie k in der Quellenhöhe h

K : Anzahl der Fahrzeugkategorien mit der Geschwindigkeit $v_{u,k}$

$N_{u,k}$: Anzahl der Fahrzeuge einer Kategorie pro Stunde mit der Geschwindigkeit $v_{u,k}$ [1/h]

$v_{u,k}$: mittlere Fahrzeuggeschwindigkeit der Kategorie k [km/h]

Hinweis: Abstrahlcharakteristik Jede Geräuschquelle p wird als Monopolquelle aufgefasst, so dass für die Abstrahlcharakteristik gilt: $C_{dir,hkpi} = 0$. Dies ist eine vereinfachende Annahme, da eine abweichende Abstrahlcharakteristik einzelner Quellentypen nicht ausgeschlossen werden kann. Für die Schiene als dominierende Geräuschquelle des Rollgeräusches kann von einer Abstrahlung in alle Raumrichtungen ausgegangen werden, so dass nur geringe Abweichungen zu erwarten sind. Bei Fahrzeugen mit stark dominierenden Sekundärquellen, können die Abweichungen jedoch zunehmen. In jedem Fall wird mit der obigen Annahme eine Berechnung "zur sicheren Seite" vorgenommen.

¹In Anlehnung an DIN 45642 [1] gilt unter Berücksichtigung der Vorbeifahrtdauer $T_{p,i} = \frac{l_{veh,k}}{v_{u,k}}$ und der Bezugsdauer $T_0 = 3600 \text{ sec}$ (1 h) für den Emissionspegel:

$$L_{W,hi} = \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P \oplus \left[L_{W,hkpi} + 10 \lg \left(\frac{T_p}{T_0} \right) + 10 \lg N_{u,k} \right] = \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P \oplus \left[L_{W,hkpi} + 10 \lg \left(\frac{3.6 l_{veh,k}}{3600 v_{u,k}} \right) + 10 \lg N_{u,k} \right] \left[v \text{ in } \frac{\text{km}}{\text{h}} \right]$$

$$L_{W',hi} = \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P \oplus \left[L_{W,hkpi} + 10 \lg \left(\frac{N_{u,k} l_{veh,k}}{1000 v_{u,k}} \right) + 10 \lg \left(\frac{1}{l_{veh,k}} \right) \right] = \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P \oplus \left[L_{W,hkpi} + 10 \lg \left(\frac{N_{u,k}}{1000 v_{u,k}} \right) \right] \left[v \text{ in } \frac{\text{km}}{\text{h}} \right]$$

Hinweis: Verkehrsdaten Die Daten des Verkehrsflusses (Anzahl und Geschwindigkeit der Fahrzeuge) werden den Datenbanken des Gesamtmodells entnommen, ebenso die Länge eines Gleisabschnittes für den ein konstanter Emissionspegel angenommen wird.

Hinweis: Verwendung von Daten des *IMAGINE Modells* Das vorgestellte Modellkonzept ist kompatibel zu dem *IMAGINE*² Modell für Schienenfahrzeuge [2], [3]. In der angegebenen Literatur werden als Ergebnis der Emissionsrechnungen äquivalente Schalldruckpegel $L_{peq, Tp, kmih}$ für 5 Quellenhöhen angegeben. Die längenbezogenen Schalleistungspegel pro 1 Meter Gleislänge und Stunde können für diese Emissionswerte analog zu Gleichung (2.3) und (3.5) berechnet werden³:

$$L_{W', kih} = L_{peq, Tp, kmih} + 10 \lg(4\pi d) - 10 \lg \phi - D_{ground, hi} \quad (2.4)$$

$$L_{W', hji} = \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P \oplus \left[L_{W', kih} + 10 \lg \left(\frac{N_{u, k} l_{veh, k}}{1000 v_{u, k}} \right) \right] \text{ [dB]} \quad (2.5)$$

$L_{peq, Tp, kmih}$: Schalldruckpegel der Quellenhöhen h einer Fahrzeugkategorie k

$L_{W', kih}$: Längenbezogene Schalleistung (Schalleistung pro Fahrzeuglänge) [dB]

d : Mikrofonabstand [m]

l_{veh} : Fahrzeuglänge [m]

$D_{ground, hi}$: Bodeneffekt der Quellenhöhe h [dB]

ϕ : Aspektwinkel $\phi = 2 \arctan \frac{l_{veh}}{2d}$

2.1.2 Unterteilung einer Strecke in Gleisabschnitte

In Abbildung 2.2 ist anhand eines Streckenverlaufes die Unterteilung in Gleisabschnitte mit konstanten Emissionswerten dargestellt. Die Unterteilung einer Strecke ist unabhängig von den Ausbreitungsbedingungen und richtet sich ausschliesslich an konstanten Emissionswerten. Jeder Gleisabschnitt wird durch eine bestimmte Anzahl von Teilquellen mit gleichen Emissionswerten abgebildet. Die Anzahl der Teilquellen pro Gleisabschnitt ist abhängig von der geforderten Genauigkeit der Berechnung. Weiterhin sind in Abbildung 2.2 die benötigten Eingangsdaten für die Emissionsberechnung angegeben. Im folgenden wird jeder Gleisabschnitt kurz erläutert:

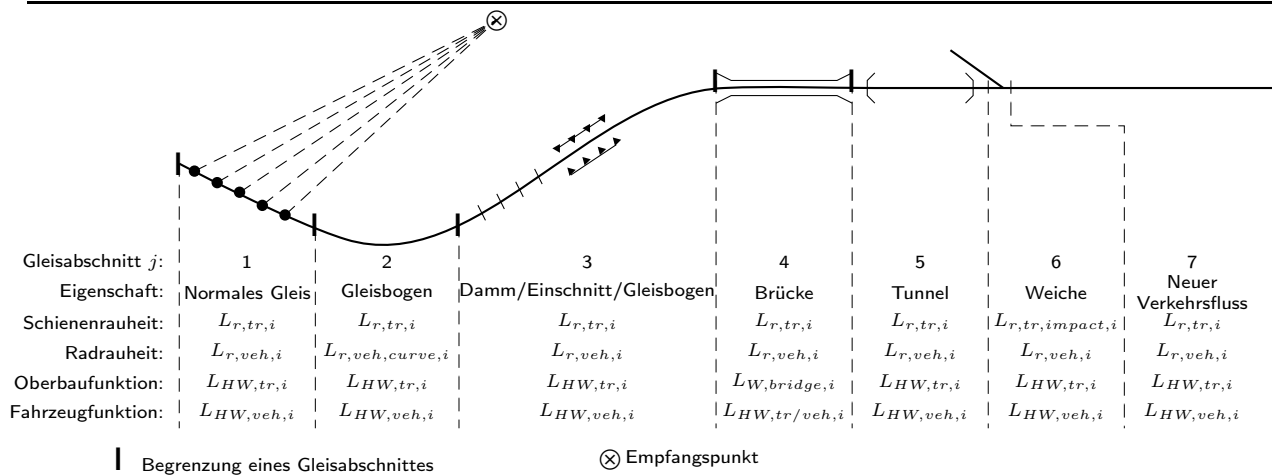
- Gleisabschnitt 1:** Die Emissionsberechnung erfolgt mit den Standardwerten des normalen Gleises.
- Gleisabschnitt 2:** Ein neuer Gleisabschnitt beginnt, da die Emissionsberechnung mit der äquivalenten Radrauheit für Gleisbögen durchgeführt werden muss, da $R < 1000$ m.
- Gleisabschnitt 3:** Die Emissionswerte bleiben konstant, es ändern sich nur die Ausbreitungsbedingungen von Dammlage zu Einschnitt. Dies führt jedoch nicht zu einer Unterteilung in 2 getrennte Gleisabschnitte.
- Gleisabschnitt 4:** Bei Brückenfahrt ändert sich der Emissionspegel, da für den jeweiligen Brückentyp ein frequenzabhängiger Pegelzuschlag verwendet werden muss.
- Gleisabschnitt 5:** Die Berechnung der Emissionswerte erfolgt auch im Tunnel bis zu einer Länge von 200 Meter. Im Tunnelbereich kann sich der Oberbautyp ändern.
- Gleisabschnitt 6:** In Weichenbereichen wird die äquivalente Schienenrauheit an Stossstellen für die Emissionsrechnung verwendet, so dass eine Änderung der Emissionswerte auftritt. Somit wird jeder Weiche automatisch ein kurzer Gleisabschnitt mit einem Meter Länge zugeordnet.
- Gleisabschnitt 7:** Nach einem Streckenabzweig kann sich der Verkehrsfluss (Anzahl und/oder Geschwindigkeit) ändern, dies führt zu veränderten Emissionswerten.

2.2 Emissionsmodell

Im Emissionsmodell werden das Rollgeräusch (Primärquelle) und die Geräusche von Antriebsaggregaten (Sekundärquelle) getrennt berechnet. Letztere sind meist fahrzeugspezifisch und können direkt aus Vorbeifahrtmessungen

²IMAGINE: Improved Methods for the Assessment of the Generic Impact of Noise to the Environment

³Nomenklatur nach [2]



● Teilquellen m innerhalb des Gleisabschnittes $j = 1$

Abbildung 2.2: Beispiel zur Unterteilung einer Strecke in Gleisabschnitte mit konstanten Emissionswerten

bestimmt werden. Die vertikale Verteilung der sekundären Geräuschquellen wird durch die Auswertung von Mikrofonarraymessungen im Emissionsmodell implementiert. Bei der Berechnung des Rollgeräusches müssen jedoch fahrzeug- und fahrwegspezifische Parameter berücksichtigt werden. Dazu soll eine Modellstruktur ausgewählt werden, bei dem die relevanten Einflussparameter durch Messungen bestimmt werden können.

2.2.1 Auswahl eines Rollgeräuschmodells

Das Rollgeräusch wird durch Unebenheiten (Rauheiten) im Kontaktbereich zwischen Rad und Schiene verursacht. Diese Rauheiten regen beide Kontaktpartner zu Schwingungen an, die über Rad, Schiene und Schwelle als primärer Luftschall abgestrahlt werden. Diese Grundzusammenhänge der Rollgeräuschentstehung gehen auf Arbeiten von Remington zurück [4]-[7]. Thompson verfolgte diesen Modellansatz weiter und entwickelte daraus das Berechnungsprogramm *TWINS*⁴ [8]-[11].

Die Forschungsprogramme *STAIRRS*⁵ [12], *METARAIL* [13] und *IMAGINE* [3] hatten zum Ziel, die komplexen Rollgeräuschmodelle in vereinfachte Messvorschriften umzusetzen, die eine messtechnische Bestimmung aller notwendigen Modellparameter ermöglicht. In *STAIRRS* werden dazu vier Stufen von Emissionsmessungen definiert, Tabelle 2.1. Im Level 0 werden nur Vorbeifahrtpegel aus Mikrofonmessungen erfasst, eine Trennung des Rollgeräusches unter Berücksichtigung der Rauheiten ist nicht möglich. In Level 1 können einzelne Schallquellen mittels geeigneter Messmethoden (Arraymessung) erfasst werden, ebenfalls unabhängig von Rad- und Schienenrauheiten. In Level 2 ist hingegen die Berechnung des Rollgeräusches $L_{W,roll,i}$ in Abhängigkeit von Rad- und Schienenrauheiten sowie eine Trennung des Rollgeräusches in einen Fahrzeuganteil $L_{W,veh,i}$ und einen Oberbauanteil $L_{W,tr,i}$ möglich [14]. Das Abstrahlverhalten von Fahrzeug und Oberbau wird dabei über Transferfunktionen $L_{HW,veh,i}$ und $L_{HW,tr,i}$ beschrieben. Die Transferfunktionen werden zwischen dem Emissionspegel und der effektiven Gesamtrauheit $L_{r,tot,i}$ gebildet. Die effektive Gesamtrauheit kann durch die direkte Messung von Radrauheit $L_{r,veh,i}$ und Schienenrauheit $L_{r,tr,i}$ oder durch eine indirekte Messmethode ermittelt werden. Bei der direkten Messung muss die Wirkung des Kontaktfilters $A_{3,i}$ im Rad-Schiene-Kontakt berücksichtigt werden. Dieser beschreibt vereinfacht, wie die Rauheiten im Kontaktbereich zu einer Schwingungsanregung von Rad und Schiene führen [15], [16]. In Level 3 werden zusätzliche Informationen zu den Kräften im Rad-Schiene-Kontakt benötigt. Diese Parameter lassen sich jedoch nur durch entsprechende Simulationsprogramme (z.B. *TWINS*) bestimmen.

Im *sonRAIL* Emissionsmodell wird der Level 2 nach *STAIRRS* umgesetzt, da hier alle wesentlichen Parameter für eine genaue Beschreibung des Rollgeräusches berücksichtigt werden und diese durch Messungen bestimmbar sind. Damit erfüllt die gewählte Modellstruktur die Empfehlungen der europäischen Kommission an ein zeitgemässes Berechnungsmodell für Schienenverkehrslärm [17]. Die Abbildung 2.3 zeigt die Grundzusammenhänge des ausgewählten Rollgeräuschmodells. Auf die Berechnung und Messung der dargestellten Modellparameter wird im Rahmen dieser Arbeit ausführlich eingegangen.

⁴ *TWINS*: Track-Wheel Interaction Noise Software

⁵ *STAIRRS*: Strategies and Tools to Assess and Implement noise Reducing measures for Railway Systems

Tabelle 2.1: Nach STAIRRS definierte Kategorien zur Beschreibung des Rollgeräusches

	Messgrößen					Anmerkungen
	Gesamt	Fahrzeug		Oberbau		
Level 0 (no separation)	$L_{W,roll}$	-		-		Trennung in Oberbau- und Fahrzeuganteil nicht möglich, kein Einfluss von Rauheiten
Level 1 (sound separation)	$L_{W,roll}$	$L_{W,veh}$		$L_{W,tr}$		Schallquellenortung durch z.B. Arraymessungen möglich, kein Einfluss von Rauheiten
Level 2 (sound and roughness separation)	$L_{W,roll}$	$L_{r,veh}$, $L_{W,veh}$	$L_{HW,veh}$	$L_{r,tr}$, $L_{W,tr}$	$L_{HW,tr}$	Trennung des Rollgeräusches durch Messung von Rauheiten und Transferfunktionen
Level 3 (sound, roughness and dynamics separation)	$L_{W,roll}$	$L_{r,veh}$, $L_{W,veh}$	$L_{HW,veh}$, Kontaktkraft	$L_{r,tr}$, $L_{W,tr}$	$L_{HW,tr}$, Kontaktkräfte	wie Level 2, verwendet jedoch zusätzliche Modellrechnungen zur Bestimmung von Kontaktkräften

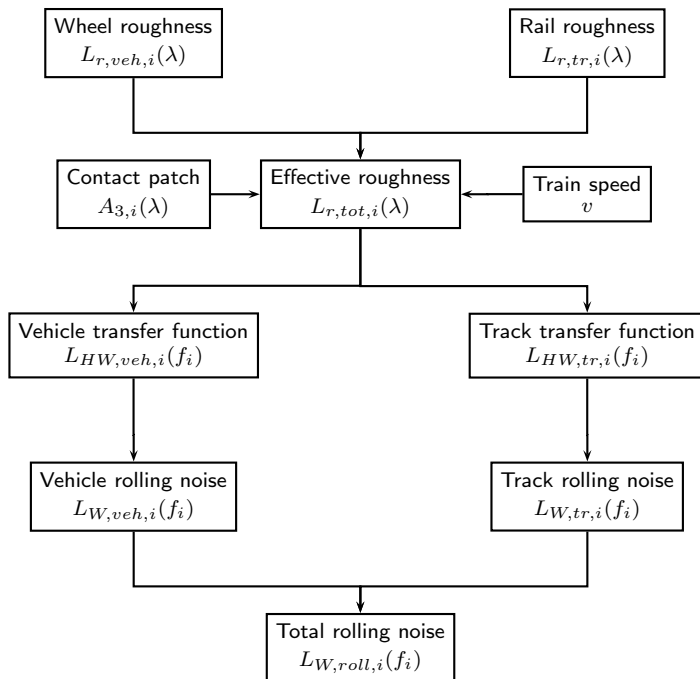


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung des verwendeten Rollgeräuschmodells in sonRAIL

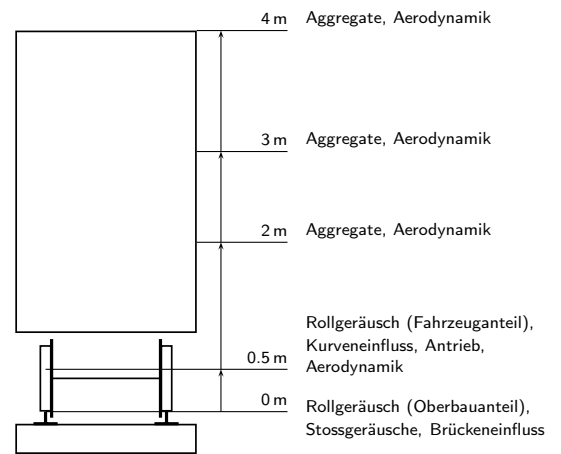


Abbildung 2.4: Zuordnung der Geräuschquellen p zu den Quellenhöhen h

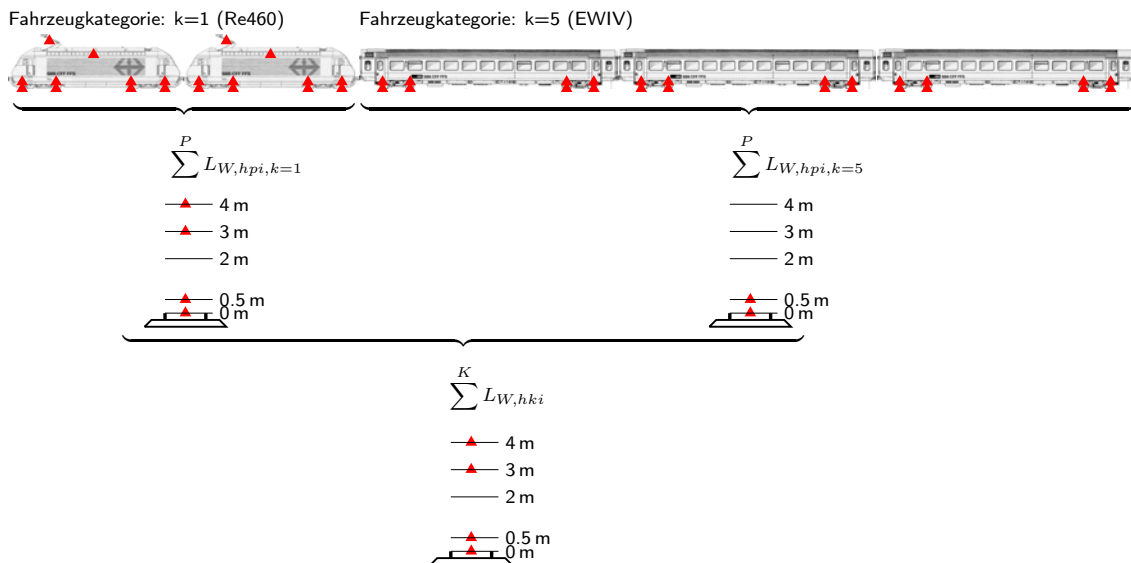


Abbildung 2.5: Schema zur Zusammenfassung der einzelnen Geräuschquellen zu einer Gesamtschalleistung des Zugverbandes

Tabelle 2.2: Geräuschquellen p und deren typische Verteilung in den Quellenhöhen

Quellentyp p	Quellenhöhe h	Formel
Rollgeräusch (Rolling noise)	0 m	$L_{W,roll,i}(h = 0\text{ m}) = L_{r,tot,i} + L_{HW,tr,i} + 10\lg N_{ac}$
	0.5 m	$L_{W,roll,i}(h = 0.5\text{ m}) = L_{r,tot,i} + L_{HW,veh,i} + 10\lg N_{ac}$
		$L_{r,tot,i} = L_{r,tr,i} \oplus L_{r,veh,i} + A_{3,i}$
Stossartige Geräusche (Impact noise)	0 m	$L_{W,impact,i}(h = 0\text{ m}) = L_{r,tot,i} + L_{HW,tr,i} + 10\lg N_{ac}$ $L_{r,tot,i} = L_{r,tr,impact,i} \oplus L_{r,veh,i} + A_{3,i}$
Brückeneinfluss (Bridge noise)	0 m	$L_{W,tr,i}(h = 0\text{ m}) = (L_{r,tot,i} + L_{HW,tr,i} + 10\lg N_{ac}) \oplus L_{W,bridge,i}$ $L_{r,tot,i} = L_{r,tr,i} \oplus L_{r,veh,i} + A_{3,i}$
Kurveneinfluss (Curving noise)	0 m	$L_{W,curve,i}(h = 0\text{ m}) = L_{r,tot,i} + L_{HW,tr,i} + 10\lg N_{ac}$
	0.5 m	$L_{W,curve,i}(h = 0.5\text{ m}) = L_{r,tot,i} + L_{HW,veh,i} + 10\lg N_{ac}$
		$L_{r,tot,i} = L_{r,tr,i} \oplus L_{r,veh,i} \oplus (L_{r,veh,curve,i} - \gamma \lg \frac{R}{R_0}) + A_{3,i}$
Sekundärgeräusche	0.5, 2, 3, 4 m	$L_{W,sec,hki} = L_{W80,hki} + \beta_{hki} \log(\frac{v}{v_0})$
Aerodynamische Geräusche	0.5, 2, 3, 4 m	$L_{W,aero,hki} = L_{W200,hki} + \delta \log(\frac{v}{v_1})$

2.2.2 Struktur des sonRAIL Emissionsmodells

Gemäss den Vorüberlegungen zur Auswahl einer geeigneten Modellstruktur und des sonRAIL Pflichtenplans des Schweizerischen Bundesamtes für Umwelt [18] ergibt sich eine Modellstruktur, die in wesentlichen Kernbereichen mit dem Emissionsmodell von IMAGINE übereinstimmt.

Das sonRAIL Emissionsmodell berechnet Schalleistungsspektren $L_{W,hkpi}$ zwischen 100 und 8000 Hz für fünf Quellenhöhen. Die Tabelle 2.2 enthält die typische Quellenverteilung pro Quellenhöhe und deren formelmässige Beschreibung im Modell. Nach Abbildung 2.5 werden für eine Fahrzeugkategorie die Geräuschquellen pro Quellenhöhe zu einer äquivalenten Punktschallquelle zusammengefasst. Die gewählten Quellenhöhen wurden entsprechend den Höhen des IMAGINE Modells gewählt.

Im Emissionsmodell werden Primärquellen (Rollgeräusch) und Sekundärquellen (Antriebs- und Aggregatgeräusche) unterschieden. Die Primärquellen werden über effektive Rauheiten und Transferfunktionen berechnet. Die Berechnung der Sekundärquellen erfolgt direkt über einen Grundwert und einer Geschwindigkeitsabhängigkeit. Die Abbildung 2.6 fasst die wesentlichen Berechnungsschritte des Emissionsmodells zusammen.

Im folgenden werden alle Berechnungsalgorithmen des Emissionsmodells in knapper Form vorgestellt. Eine genaue Analyse der Modellparameter und der Berechnungsalgorithmen folgt in den Kapiteln 4 und 5.

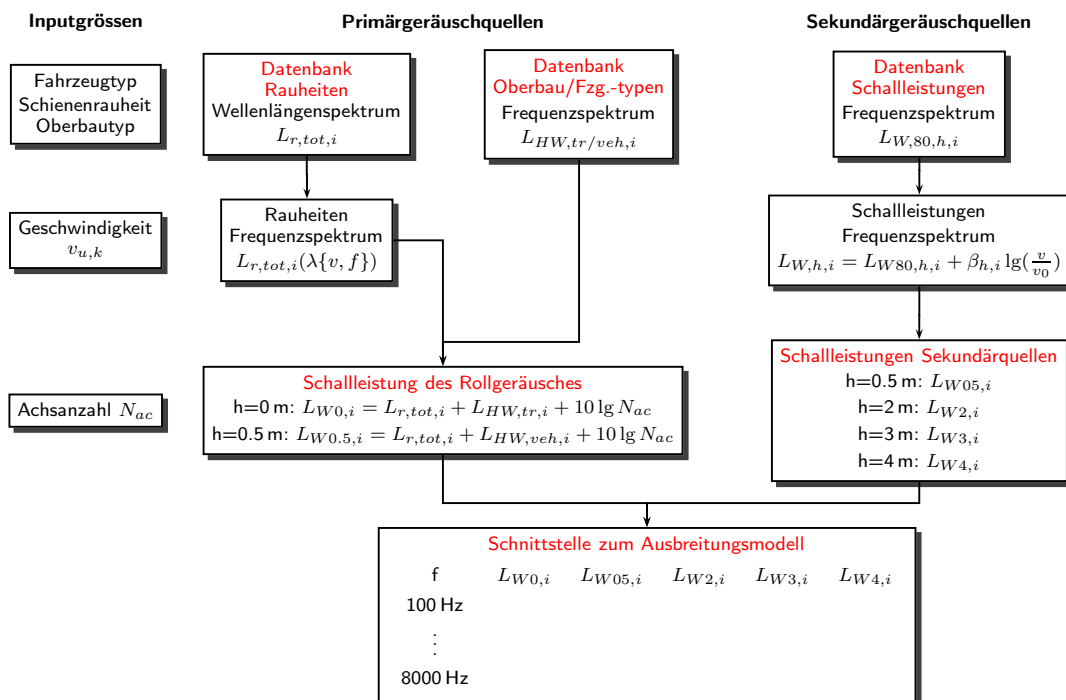


Abbildung 2.6: Schema zum Ablauf der Emissionsberechnung für Primär- und Sekundärquellen

Berechnung der Rollgeräuschanteile Das Rollgeräusch wird getrennt für Oberbau $L_{W,tr,i}$ und Fahrzeug $L_{W,veh,i}$ berechnet. Ausgehend von der effektiven Gesamtrauheit im Rad-Schiene-Kontakt $L_{r,tot,i}$ wird durch Verwendung von Fahrzeug- und Oberbautransferfunktionen ($L_{HW,veh/tr,i}$) und unter Berücksichtigung der Achszahl N_{ac} das Rollgeräusch berechnet:

$$L_{W,tr,i} = L_{r,tot,i} + L_{HW,tr,i} + 10 \lg N_{ac} \quad (2.6)$$

$$L_{W,veh,i} = L_{r,tot,i} + L_{HW,veh,i} + 10 \lg N_{ac} \quad (2.7)$$

Das Gesamrollgeräusch berechnet sich aus Fahrweg- und Fahrzeuganteil:

$$L_{W,roll,i} = L_{W,tr,i} \oplus L_{W,veh,i} \quad (2.8)$$

Die Rauheiten werden in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ angegeben. Die Umrechnung von Wellenlängen in Frequenzen bzw. umgekehrt erfolgt unter Berücksichtigung der Geschwindigkeit v :

$$\lambda(v, f) = \frac{v}{f} \text{ und } f(v, \lambda) = \frac{v}{\lambda} \quad (2.9)$$

Die Berechnung der effektiven Gesamtrauheit $L_{r,tot,i}$ erfolgt bei bekannter Rad- und Schienenrauheit $L_{r,veh/tr,i}$, unter Verwendung des Kontaktfilters $A_{3,i}$ nach:

$$L_{r,tot,i}(\lambda) = (L_{r,veh,i} \oplus L_{r,tr,i}) + A_{3,i} \quad (2.10)$$

Weiterhin kann die effektive Gesamtrauheit $L_{r,tot,i}$ messtechnisch über folgenden Zusammenhang erfasst werden:

$$L_{r,tot,i}(f_i) = L_{aeq,i} - A_2 - 40 \lg(2\pi f_i) - 10 \lg \left(8.686 \frac{N_{ac}}{l_{veh} D_{s,i}} \right) \quad (2.11)$$

Antriebs- und Aggregatgeräusche Die sekundären Emissionspegel sind auf die Bezugsgeschwindigkeit $v_0 = 80$ km/h bezogen und berechnen sich für jede Quellenhöhe h im Frequenzband i der Fahrzeugkategorie k nach:

$$L_{W,sec,hki} = L_{W80,hki} + \beta_{hki} \lg \left(\frac{v}{v_0} \right) \quad (2.12)$$

β_{hki} stellt dabei die Geschwindigkeitsabhängigkeit dar.

Aerodynamische Geräusche Zusätzlich zu Aggregat- und Antriebsgeräuschen kann ein aerodynamischer Geräuschanteil in der Emissionsrechnung berücksichtigt werden. Dieser wird für eine Quellenhöhe h der Fahrzeugkategorie k und der Terzfrequenz i über folgenden Zusammenhang beschrieben:

$$L_{W,aero,hki} = L_{W200,hki} + \delta \lg \left(\frac{v}{v_1} \right) \quad (2.13)$$

mit der Bezugsgeschwindigkeit $v_1 = 200$ km/h und der Geschwindigkeitsabhängigkeit $\delta = 60$. Dieser Wert wird als Default-Wert verwendet, ist unabhängig von der Fahrzeugkategorie k , der Quellenhöhe h und dem Frequenzband i .

Weichenfahrt Die Emissionspegel an einer Störstelle (Weichenherzstück, Schienenstoss) werden durch äquivalente Schienenrauheiten $L_{r,tr,impact,i}$ modelliert. Gemäss der Definition des Ausbreitungsmodells bezüglich konstanter Emissionswerte wird jeder Herzstückbereich als separater Gleisabschnitt mit einem Meter Länge modelliert:

$$L_{W,impact,i}(h = 0 \text{ m}) = L_{r,tot,i} + L_{HW,tr,i} + 10 \lg N_{ac} \quad (2.14)$$

$$L_{r,tot,i} = (L_{r,tr,impact,i} \oplus L_{r,veh,i}) + A_{3,i} \quad (2.15)$$

$$L_{W,impact,i}(h = 0.5 \text{ m}) = L_{r,tot,i} + L_{HW,veh,i} + 10 \lg N_{ac} \quad (2.16)$$

$$L_{r,tot,i} = (L_{r,tr,i} \oplus L_{r,veh,i}) + A_{3,i} \quad (2.17)$$

Bogenfahrt Der Einfluss von Gleisbögen auf das Emissionsverhalten von Fahrzeugen wird durch äquivalente Radrauheiten $L_{r,veh,curve,i}$ beschrieben, wobei in zwei Rauheitskategorien unterschieden wird. In Abhängigkeit vom Bogenlaufverhalten eines Fahrzeuges wird jeder Fahrzeugkategorie eine äquivalente Radrauheit zugeordnet:

$$L_{W,curve,i}(h = 0 \text{ m}) = L_{r,tot,i} + L_{HW,tr,i} + 10 \lg N_{ac} \quad (2.18)$$

$$L_{W,curve,i}(h = 0.5 \text{ m}) = L_{r,tot,i} + L_{HW,veh,i} + 10 \lg N_{ac} \quad (2.19)$$

$$L_{r,tot,i} = \left[L_{r,tr,i} \oplus L_{r,veh,i} \oplus \left(L_{r,veh,curve,i} - \gamma \lg \frac{R}{R_0} \right) \right] + A_{3,i} \quad (2.20)$$

Der Einfluss des Bogenradius wird in Abhängigkeit von der äquivalenten Radrauheit eines Fahrzeugs berücksichtigt:

$$\gamma = \begin{cases} 15.0 & : \text{Equivalent roughness: smooth} \\ 30.0 & : \text{Equivalent roughness: bad} \end{cases} \quad (2.21)$$

Der Bezugsradius beträgt $R_0 = 500 \text{ m}$. Ein Gleisabschnitt wird als Kurve definiert, wenn dessen Radius weniger als 1000 Meter beträgt.

Brückeneinfluss Der Einfluss von unterschiedlichen Brückentypen wird durch frequenzabhängige Pegelzuschläge $L_{W,bridge,i}$ in der Quellenhöhe 0 m für folgende Brückenkategorien berücksichtigt:

1. Massiv- und Stahlbetonbrücken mit Schotteroberbau
2. Stahlbrücken mit Schotteroberbau
3. Stahlbrücken ohne Schotteroberbau

Diese Kategorien unterteilen sich in weitere Brückentypen für die Default-Werte zur Verfügung gestellt werden. Die Berechnung erfolgt nach:

$$L_{W,tr,i} = (L_{r,tot,i} + L_{HW,tr,i} + 10 \lg N_{ac}) \oplus L_{W,bridge,i} \quad (2.22)$$

$$L_{W,veh,i} = L_{r,tot,i} + L_{HW,veh,i} + 10 \lg N_{ac} \quad (2.23)$$

2.3 Ausbreitungsmodell

Im vorliegenden Kapitel werden die Algorithmen zur Schallausbreitungsrechnung, welche im Modell *sonRAIL* zum Einsatz kommen, vorgestellt. Die Gliederung in Unterkapitel orientiert sich dabei am modularen Aufbau des Rechenkerns. Dieser ist in vier Berechnungsmodulen unterteilt, welche unabhängig von einander aufgerufen und bearbeitet werden können. Das Modul *Basis* wird für jede Ausbreitungsrechnung benötigt und umfasst die in den Unterkapiteln 2.3.2 und 2.3.3 beschriebenen Effekte. Die weiteren Module für Wittereinflüsse (Unterkapitel 2.3.4), Reflexionen an künstlichen Objekten wie Gebäuden und Schallschirmen (Unterkapitel 2.3.5) sowie an Wald und Fels (Unterkapitel 2.3.6) stellen Ergänzungen zur Basis-Berechnung dar, welche zusätzliche Effekte berücksichtigen und zur Erhöhung der Genauigkeit bei Bedarf aufgerufen werden können.

2.3.1 Schnittstelle zum Emissionsmodell

2.3.1.1 Quellendefinition und vorbereitende Schritte

Als Quelle wird ein Gleisabschnitt mit konstanter Schallemission, definiert als Schallleistung pro Laufmeter, vorgegeben. Gemäss Emissionsmodell setzt dies einen einheitlichen Oberbau, einheitliche Schienenrauigkeiten, einen konstanten Fahrzeugmix (ohne Abzweigungen) und pro Zugart konstante Fahrgeschwindigkeiten voraus. Die Quelle wird räumlich durch eine Reihe von XY-Punkten spezifiziert, welche sich in Gleismitte auf Terrainhöhe befinden. Als zusätzliche Parameter benötigt der Kern eine Zuordnung der Oberbau-Ausführung (Unterscheidung zwischen Schotteroberbau und fester Fahrbahn) sowie bei Schotteroberbauten eine Angabe zur Schottertiefen. Mit einem optionalen Parameter kann zusätzlich die Höhenanpassung des quellennahen Profils ins Gelände beeinflusst werden.

Im Rechenkern werden im Hinblick auf die Ausbreitungsrechnung folgende Transformationen und vorbereitenden Schritte getätigt:

- Da Reflexionen in Quellennähe von grosser Bedeutung sind, wird ein Schotterbett mit spezifischen akustischen Eigenschaften ergänzt, welches sich bei mehrgleisiger Streckenführung auch über benachbarte Quellensegmente erstreckt. Bei diesem Schritt wird auch eine allfällige Höhenanpassung vorgenommen, beispielsweise bei einer Schienenführung in leichter Dammlage, welche im Geländemodell nicht enthalten ist.
- Der als Linienquelle zu interpretierende Fahrweg wird durch eine Reihe von Punktquellen abgebildet.
- Die Punktquellen werden quer zur Fahrriichtung seitlich verschoben, so dass sie sich über der Schiene befinden, welche näher zum Empfangspunkt liegt.
- Jeder Quellenpunkt wird in fünf Teilquellen aufgeteilt, welchen bei gleicher XY-Position unterschiedliche Höhen von 0.0, 0.5, 2.0, 3.0 und 4.0 m über Schienenoberkante (SOK) zugeordnet werden. Es wird dabei davon ausgegangen, dass sich die Schienenoberkante 0.15 m über Terrain befindet.

2.3.1.2 Resultate der Ausbreitungsrechnung

Das Ausbreitungsmodell übergibt als Resultat für jede Quellen-Empfänger-Kombination 14 Dämpfungsspektren, bestehend aus 20 Terzen von 100 Hz bis 8 kHz:

- 5 Dämpfungs-Spektren der Basis-Ausbreitungsrechnung, je für die Quellenhöhen von 0.0, 0.5, 2.0, 3.0 und 4.0 m über SOK.
- 6 Meteokorrekturen, unterteilt für Tag, Abend, Nachtzeit und tiefe resp. hohe Quellen (0.5 und 3.0 m Quellenhöhe). Die für eine Quellenhöhe von 0.5 m berechneten Dämpfungen werden als repräsentativ für die Quellenhöhe 0.0 m verwendet. Gleiches gilt für die Quellenhöhen von 2.0 und 4.0 m, welche den Daten auf 3.0 m gleichgesetzt werden.
- 2 Dämpfungs-Spektren für Reflexionen an Objekten (im überbauten Gebiet), jeweils separat für tiefe resp. hohe Quellen (0.5 und 3.0 m Quellenhöhe). Analog zur Meteokorrektur werden die Dämpfungsspektren der nicht explizit berechneten Quellenhöhen aus berechneten Spektren abgeleitet.
- 1 Dämpfungs-Spektrum für diffuse Reflexionen an Fels und Wald (Quellenhöhe auf 0.5 m). Dieses Spektrum wird für alle Quellenhöhen als repräsentativ verwendet.

Die Gesamt-Ausbreitungsdämpfung A_{total} , welche gemäss Gleichung (2.2) zur Berechnung der Immissionspegel aus den Schalleistungen benötigt wird, wird für jeden Gleisabschnitt j , jede Quellenhöhe h und jede Empfängerposition sowie zusätzlich differenziert nach der Tageszeit gemäss Gleichung (2.24) berechnet. Mit dem Index L wird ergänzend zum Ausdruck gebracht, dass es sich dabei um integrale Dämpfungen für ganze Linienquellen handelt (siehe dazu den nachfolgenden Abschnitt 2.3.1.3).

$$A_{total,hji} = -10 \cdot \log \left[10^{-0.1 \cdot (A_{Basic,L} + A_{Meteo,L})} + 10^{-0.1 \cdot (A_{Reflect,L})} + 10^{-0.1 \cdot A_{ForestCliff,L}} \right] - \Delta E \quad (2.24)$$

mit

$A_{Basic,L}$	Ausbreitungsdämpfung des Moduls <i>Basis</i> . [dB]
$A_{Meteo,L}$	Meteokorrektur gemäss dem Modul <i>Meteo</i> . Im Gegensatz zu den übrigen Dämpfungsspektren kann A_{Meteo} auch negative Werte aufweisen, dies bei förderlichen Ausbreitungsbedingungen. [dB]
$A_{Reflect,L}$	Ausbreitungsdämpfung für Reflexionen an Gebäuden und Schallschirmen. [dB]
ΔE	Korrektur zur Unterscheidung von Empfangspunkten im Freien und im offenen Fenster. ΔE wird bei Gebäuden auf 1 dB gesetzt. Bei Freifeldpunkten ist $\Delta E = 0$ dB.
$A_{ForestCliff,L}$	Ausbreitungsdämpfung für diffuse Reflexionen an Wald und Fels. [dB]

Bemerkungen:

- Die Korrektur ΔE leitet sich aus der BUWAL-Mitteilung zur Lärmschutzverordnung Nr. 7 aus dem Jahre 1995 ab. Dort wurde festgestellt, dass Messungen auf einem geschlossenen Fenster 5 dB höhere Pegel ergeben als Messungen im offenen Fenster. Im Vergleich zu Freifeldpunkten resultieren bei Messungen auf einer Fensterscheibe aufgrund der Schalldruckverdoppelung bei schallharten Oberflächen 6 dB höhere Pegel. Somit lässt sich für den Vergleich von Freifeldpunkten und Empfangspunkten im offenen Fenster eine Erhöhung der Immissionspegel von 1 dB ableiten.

- Der *sonRAIL* -Ausbreitungsalgorithmus berechnet grundsätzlich Freifeld-Pegel, unabhängig von der Lage des Empfangspunktes. Die Korrektur Δ_E wird deshalb nicht im Rahmen der Ausbreitungsrechnung, sondern erst anschliessend, bei der Immissionspegelberechnung berücksichtigt.
- Wie bereits erwähnt, müssen nicht alle Teildämpfungen gemäss Gleichung (2.24) berechnet werden, um Immissionspegel auszuweisen. Lediglich die Basis-Dämpfung muss zwingend vorhanden sein. Wird der Meteeinfluss nicht ermittelt, so wird A_{Meteo} auf 0 gesetzt. Die Terme der Reflexionsmodelle können in der Summation weggelassen werden falls die entsprechenden Dämpfungen nicht ermittelt wurden.
- *sonRAIL* weist die Möglichkeit auf, die Berechnung von Reflexionen an künstlichen Objekten zu unterdrücken, falls eine direkte Sichtverbindung zwischen Quelle und Empfänger besteht. Es wird aus folgendem Grund empfohlen, diese Option zu verwenden: Befindet sich ein Reflektor sehr nahe an der Quelle oder am Empfänger, so sind Direktschall und Reflexion praktisch gleich laut. Die Reflexionsberechnung erfolgt jedoch mit einem deutlich vereinfachten Ausbreitungsmodell, welches keinen phasenrichtigen Bodeneffekt und keine meteorologischen Effekte berücksichtigt. Entsprechende Einflüsse beim Direktschall, beispielsweise aufgrund einer Änderung des Wetters, wirken sich in der Folge nur noch stark reduziert auf die Immissionspegel aus, da die Reflexionspegel unverändert bleiben. Dieses Verhalten ist akustisch nicht richtig und nicht im Sinne der Erfinder. Das Reflexionsmodell wurde mit dem Ziel entwickelt, Immissionsprognosen auch im überbauten Gebiet in Situationen mit stark abgeschirmtem Direktschall zu ermöglichen. Der Einsatz sollte deshalb auf solche Situationen beschränkt werden.

2.3.1.3 Bestimmung der integralen Ausbreitungsdämpfung einer Linienquelle

Wie in Abschnitt 2.3.1.2 erwähnt, wird jeder als einzelne Quelle definierte Streckenabschnitt durch eine Reihe von Punktquellen abgebildet. Die eigentliche Ausbreitungsrechnung, wie sie in den nachfolgenden Abschnitten erläutert wird, ist grundsätzlich nur für Punktquellen, d.h. für eine Schallausbreitung zwischen einem Quellenpunkt und einem Empfängerpunkt, definiert. Die Ausbreitungsdämpfung pro Linienquelle ergibt sich aus der Summation der Ausbreitungsdämpfungen aller Punktquellen. Gleichung (2.25) zeigt die Summation über m Punktquellen für die Teildämpfungen $A_{\text{Basic},m}$ des Basis-Moduls. Um nicht zwingend äquidistante Diskretisierungen der Linienquelle verwenden zu müssen, wird zusätzlich jede Teildämpfung mit einer Länge l des Gleisabschnittes gewichtet, für welche die Punktquelle repräsentativ ist. Für die Dämpfungen der anderen Module erfolgt die Summation sinngemäss.

$$A_{\text{Basic},L} = -10 \cdot \log \left[\frac{1}{\sum l_i} \sum_{i=1}^I l_i \cdot 10^{-0.1 A_{\text{Basic},i}} \right] \quad (2.25)$$

Die Diskretisierung der Linienquellen kann als Modellparameter für jedes Berechnungsmodul frei gewählt werden.

2.3.2 Basis-Ausbreitungsmodell

2.3.2.1 Einleitung

Das Basis-Ausbreitungsmodell in *sonRAIL* ist frequenzabhängig in Terzen formuliert und orientiert sich im Wesentlichen an der ISO-Norm 9613-1/2 [19],[20]. Vom ISO Standard wird primär beim Bodeneffekt abgewichen. In *sonRAIL* wird auf die numerische Näherungslösung für die Ausbreitung einer Punktquelle über ebenem homogenem Boden abgestützt. Die Lösung wird mit einer empirischen Fresnelzonenbetrachtung auf unebenes Terrain und inhomogenen Boden erweitert.

Die Ausbreitungsrechnung erfolgt generell basierend auf einem vertikalen Geländeschnitt zwischen einem Quell- und einem Empfangspunkt.

2.3.2.2 Übersicht

Die Ausbreitungsdämpfung $A_{\text{Basic},f}$ lässt sich in Anlehnung an die Nomenklatur in ISO 9613-2 in die folgenden, voneinander unabhängigen Aspekte aufgliedern

$$A_{\text{Basic},f} = A_{\text{div},f} + A_{\text{atm},f} + A_{\text{gr}/\text{bar},f} + A_{\text{fol},f} \quad (2.26)$$

mit

$A_{div,f}$	Geometrische Verdünnung im Terzband mit Mittenfrequenz f [dB]
$A_{atm,f}$	Luftdämpfung im Terzband mit Mittenfrequenz f [dB]
$A_{gr/bar,f}$	Bodeneffekt und Hinderniswirkung im Terzband mit Mittenfrequenz f [dB]
$A_{fol,f}$	zusätzliche Dämpfung durch dichten Bewuchs im Terzband mit Mittenfrequenz f [dB]

In der Berechnung einiger Ausbreitungsdämpfungsterme taucht die Schallgeschwindigkeit c auf. Generell wird für $c = 340$ m/s angenommen.

2.3.2.3 Geometrische Verdünnung

Die geometrische Verdünnung beschreibt die Schalldruckabnahme mit der Distanz aufgrund der Verteilung der Schallleistung auf eine Kugeloberfläche mit zunehmendem Radius. Die geometrische Verdünnung ist frequenzunabhängig und lässt sich angeben zu:

$$A_{div,f} = 20 \log \left(\frac{d}{d_0} \right) + 11 \quad [\text{dB}] \quad (2.27)$$

mit

d	Distanz Quelle - Empfänger [m]
d_0	Referenzabstand = 1 m

Der Term $+ 11$ dB in Gleichung (2.27) ergibt sich aus der Umrechnung vom Schallleistungspegel auf den Schalldruckpegel in 1 m Abstand.

2.3.2.4 Luftdämpfung

Schall erfährt beim Durchgang durch die Luft eine Abschwächung als Folge von verschiedenen Absorptionsmechanismen. Diese sogenannte Luftdämpfung $A_{atm,f}$ ist abhängig vom Zustand der Luft (wobei vor allem die Temperatur und die relative Feuchte von Bedeutung sind), von der Frequenz und von der Länge des Wegs, den der Schall in der Luft zurücklegt. Es gilt:

$$A_{atm,f} = \alpha_f \frac{d}{1000} \quad [\text{dB}] \quad (2.28)$$

mit

α_f	frequenzabhängiger atmosphärischer Absorptionskoeffizient für die Terz mit Mittenfrequenz f [dB/km]
d	Distanz Quelle - Empfänger [m]

Die ISO Norm 9613-1 spezifiziert den atmosphärischen Absorptionskoeffizienten α in Abhängigkeit der Frequenz, der Luftfeuchte und der Temperatur. Die Tabelle 2.3 zeigt für jede Terz die atmosphärischen Absorptionskoeffizienten, welche für die Basis-Ausbreitungsrechnung in *sonRAIL* verwendet werden. Die zugehörige Temperatur von $+8^\circ\text{C}$ und die relative Feuchte von 76% entsprechen den Jahresmittelwerten für den Schweizer Siedlungsraum, welche basierend auf langjährigen klimatologischen Auswertungen bestimmt wurden.

Die in Tabelle 2.3 ausgewiesenen Absorptionskoeffizienten gelten für einen Reinton der entsprechenden Frequenz. Wenn dieser Wert für das ganze zugehörige Terzband verwendet wird, bleibt der Fehler < 0.5 dB unter der Bedingung ((2.29)) [19].

$$\frac{d}{1000} \left(\frac{f^2}{1000^2} \right) < 6 \quad (2.29)$$

mit

50 Hz	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz
0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6	0.8	1.0
315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz
1.2	1.5	1.8	2.2	2.7	3.5	4.7	6.8
2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz	8000 Hz	10000 Hz
9.7	14.3	21.6	33.6	50.9	77.9	119.8	176.2

Tabelle 2.3: Atmosphärischer Absorptionskoeffizient α_f in dB/km für eine Temperatur von 8°C und eine relative Luftfeuchte von 76% in Abhängigkeit der Terzmittenfrequenz.

d Distanz Quelle - Empfänger [m]
 f Terzbandmittenfrequenz [Hz]

Für die 4000 Hz Terz, zum Beispiel, ergibt die Bedingung ((2.29)) eine maximale Distanz Quelle-Empfänger von knapp 400 m. Für grössere Distanzen führt die Luftabsorption zu einer starken Dämpfung der hohen Frequenzen, sodass ein grösserer Fehler ohne Einfluss auf den A-Pegel in Kauf genommen werden kann.

2.3.2.5 Bodeneffekt und Hinderniswirkung

2.3.2.6 Allgemeines

In praktisch allen Situationen existiert neben dem Direktschall von der Quelle zum Empfänger zusätzlich mindestens ein Schallausbreitungspfad via Bodenreflexion. In Hangsituationen treten oft zwei oder mehr Bodenreflexionspfade auf. Bei kleinen Abständen (typ. kleiner als 200 m), kleinen Quellen- und Empfängerhöhen, geringer Bodenrauigkeit und tiefen Frequenzen sind die Pfade als kohärent zu betrachten, d.h. ihre Beiträge sind am Empfangspunkt phasenrichtig aufzusummieren. Je nach Phasenlage führt diese Ueberlagerung zu einer verstärkenden oder abschwächenden Wirkung.

Wenn einer der Schallpfade - also der Direktschall und/oder die Bodenreflexion durch ein Hindernis unterbrochen wird, ergibt sich eine Abschwächung für den entsprechenden Pfad. Der Pfad muss dann so gelegt werden, dass er via jene Hinderniskante oder -kanten verläuft, für die der kleinste Umweg resultiert. Die Abschwächung durch das Hindernis ist im wesentlichen abhängig von der in Wellenlängen gemessenen Weglängendifferenz des Umwegs via Hinderniskante im Vergleich zur direkten Verbindung durch das Hindernis hindurch. Im Falle von Hindernissen entstehen durch die Einführung der Hinderniskantenpunkte als Sekundärquellen zusätzliche Schallpfade via Bodenreflexionen (siehe Abbildung 2.7).

Der frequenzabhängige Dämpfungsterm $A_{gr/bar,f}$ ergibt sich aus der Differenz des Pegels des ungehinderten Direktschalls und dem Pegel, der sich aus der Überlagerung des Direktschalls und der oder den Bodenreflexionen, jeweils unter Berücksichtigung allfälliger Hinderniswirkungen, berechnet.

Zur Bestimmung von $A_{gr/bar,f}$ sind zuerst die gültigen Schallpfade zu ermitteln. Für jeden der Pfade wird die allfällige Hinderniswirkung nach ISO 9613-2 ($C2 = 40$) bestimmt. Für die am Boden reflektierten Pfade wird zusätzlich eine Amplituden- und Phasenkorrektur entsprechend dem Kugelwellenreflexionskoeffizienten vorgenommen, wobei mittels einer Fresnelzonenbetrachtung eine Abschwächung der Reflexion bei ungenügend grosser Bodenfläche bestimmt wird. Unter Berücksichtigung der Laufzeit werden schliesslich alle Pfade am Empfangspunkt aufsummiert und mit dem ungehinderten Direktschall verglichen.

2.3.2.7 Ausbreitungsrechnung für die einzelnen Schallpfade

Wenn die relevanten Schallpfade ermittelt sind, wird für jeden Pfad der Schalldruck am Immissionspunkt nach Amplitude und Phase bestimmt, wobei eine hier festgelegte Normierung der Quellenstärke entsprechend einem Schalldruck von 1 Pa in 1 m Abstand verwendet wird. Als Referenzgrösse wird der Schalldruck $p_{dir,ref}(f)$ am Empfänger unter Vernachlässigung allfälliger Hinderniswirkungen benötigt.

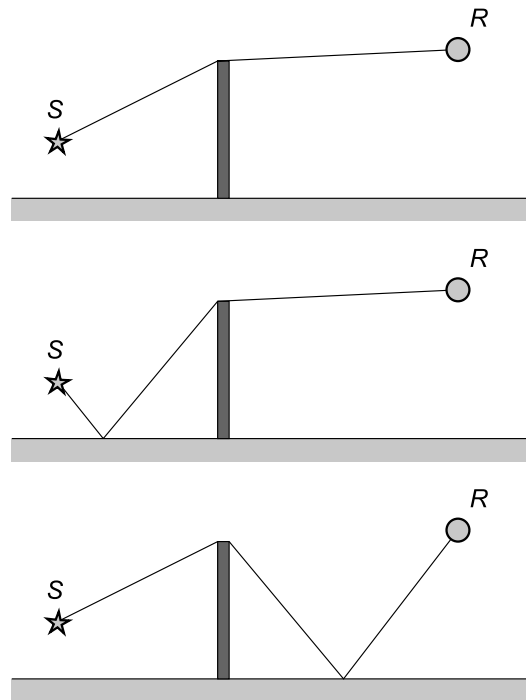


Abbildung 2.7: Ein Hindernis führt zu einem zusätzlichen Schallpfad, indem eine Bodenreflexion auf der Quellen- und eine auf der Empfängerseite des Hindernisses entsteht. Der Pfad Quelle-Boden-Hinderniskante-Boden-Empfänger wird ignoriert.

$$\underline{p}_{\text{dir,ref}}(f) = \frac{1}{r} e^{jkr} \quad (2.30)$$

mit

r	Abstand Quelle-Empfänger durch allfällige Hindernisse hindurch [m]
k	Wellenzahl = $\frac{2\pi}{\lambda}$ [1/m]
λ	Wellenlänge = $\frac{c}{f}$ [m]
c	Schallgeschwindigkeit = 340 [m/s]
f	Frequenz [Hz]
j	imaginäre Einheit, $j^2 \equiv -1$

Der effektive Direktschall $\underline{p}_{\text{dir}}(f)$ hat eine allfällige Hinderniswirkung zu berücksichtigen und ergibt sich zu

$$\underline{p}_{\text{dir}}(f) = 10^{-0.05D_z(f)} \frac{1}{r} e^{jkr'} \quad (2.31)$$

mit

$D_z(f)$	allfällige Hinderniswirkung gemäss Gleichung (2.32) in Funktion der Frequenz f [dB]
r	Abstand Quelle-Empfänger durch allfällige Hindernisse hindurch [m]
r'	Abstand Quelle-Empfänger um allfällige Hindernisse herum [m]

Für die Hinderniswirkung $D_z(f)$ wird der Ansatz nach ISO 9613-2 für den Fall der separaten Berücksichtigung der Bodenreflexion durch Spiegelquellen ($C2 = 40$) verwendet ((2.32)). Der Ansatz ist grundsätzlich nur für Doppelhindernisse definiert. Um gleichwohl Mehrfachhindernisse berücksichtigen zu können, wird in *sonRAIL* die Definition von e geringfügig angepasst.

$$D_z(f) = 10 \log \left(3 + \frac{40}{\lambda} C_3 z K_{\text{met}} \right) \geq 0 \quad (2.32)$$

mit

C_3	= 1 für die Beugung am Einfachhindernis, bzw. = $\frac{1 + (\frac{5\lambda}{e})^2}{\frac{1}{3} + (\frac{5\lambda}{e})^2}$ für die Beugung am Doppelhindernis
λ	Wellenlänge [m]
z	Pfadlängendifferenz um das Hindernis herum und durch das Hindernis hindurch [m]. Negative Hindernisse, die die direkte Sichtlinie knapp nicht unterbrechen, werden ignoriert. Dies führt zu einer Unstetigkeit an der <i>Schattengrenze</i> . Die tatsächliche Pegeländerung knapp ausserhalb der Schattengrenze verläuft allerdings derart abrupt, dass eine Approximation durch einen Sprung gerechtfertigt erscheint.
e	Im Falle von Doppel- bzw. Mehrfachbeugung: Distanz zwischen der ersten und letzten relevanten Hinderniskante [m].
K_{met}	Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Reduktion der Hinderniswirkung im Falle von gegen den Boden gekrümmter Ausbreitung. Da diese Effekte durch das ray tracing abgebildet werden (siehe Kapitel 2.3.4) ist $K_{\text{met}} = 1.0$.

Die Hinderniswirkung $D_z(f)$ wird auf 20 dB begrenzt, da höhere Abschirmwirkungen in der Praxis aufgrund von turbulenzbedingten Einstreuungen kaum auftreten.

Für die Schallpfade mit einer Bodenreflexion wird die Berechnung mit der Spiegelquelle und den gespiegelten Pfaden durchgeführt. In Ergänzung zu einer allfälligen Hinderniswirkung ist der frequenzabhängige Kugelwellenreflexionskoeffizient $Q(f)$ am Boden, sowie eine mögliche Abschwächung bei ungenügender Reflektorfläche zu berücksichtigen. Der Kugelwellenreflexionskoeffizient $Q(f)$ bestimmt sich aus der wellentheoretischen Lösung für eine Punktquelle über ebenem homogenem Terrain [21]. Es wird ein lokal reagierender Boden vorausgesetzt, d.h. als Randbedingung ist zu erfüllen, dass das Verhältnis des Schalldrucks zur Vertikalkomponenten der Schallschnelle gleich der Bodenimpedanz ist. Die Berechnung basiert auf folgenden Grössen (siehe auch Abbildung 2.8):

d	horizontaler Abstand Quelle - Empfänger [m]
h_s	Quellenhöhe über Boden [m]
h_r	Empfängerhöhe über Boden [m]
$Z(f)$	auf ρc normierte Impedanz des Bodens
R_1	Abstand Quelle - Empfänger [m]
R_2	Abstand Quelle - Reflexionspunkt - Empfänger [m]
λ	Wellenlänge [m]
k	Wellenzahl = $\frac{2\pi}{\lambda}$ [1/m]
ψ	Reflexionswinkel

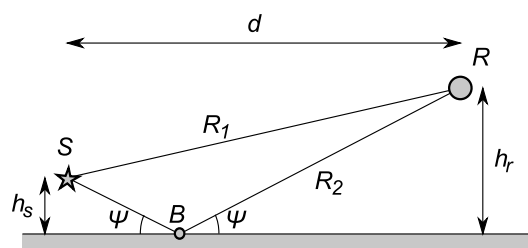


Abbildung 2.8: Situation zur Schallausbreitung einer Punktquelle über homogenem Boden der Impedanz $Z(f)$ mit der Quelle S, dem Reflexionspunkt B und dem Empfänger R.

Der Kugelwellenreflexionskoeffizient $Q(f)$ leitet sich aus dem Reflexionskoeffizienten $r_p(f)$ der ebenen Welle gemäss Gleichung (2.33) ab. Man beachte, dass die komplexen Variablen sowohl eine Amplituden- als auch eine Phaseninformation beinhalten.

$$Q(f) = r_p(f) + (1 - r_p(f))F(w) \quad (2.33)$$

mit

$$\begin{aligned} r_p(f) &= \frac{\sin(\psi) - \frac{1}{Z(f)}}{\sin(\psi) + \frac{1}{Z(f)}} \\ w &= \frac{1+j}{2} \sqrt{kR_2} \left(\sin(\psi) + \frac{1}{Z(f)} \right) \end{aligned}$$

Der Faktor $F(w)$ aus Gleichung (2.33) kann für streifende Schallausbreitung, d.h. $d \gg h_s + h_r$, approximiert werden zu [22].

$$F(w) \approx 1 + j\sqrt{\pi}we^{-w^2} \operatorname{erfc}(-jw) = 1 + j\sqrt{\pi}w \operatorname{wofz}(w) \quad (2.34)$$

In Gleichung (2.34) bezeichnet $\operatorname{erfc}(-jw)$ die komplexe Errorfunktion [23]. Für die Funktion $\operatorname{wofz}(w) = e^{-w^2} \operatorname{erfc}(-jw)$ existiert ein sehr effizienter Algorithmus zur numerischen Auswertung [24].

Die Impedanz des Bodens ist frequenzabhängig. Zur Charakterisierung des Bodens mit einem Einzahlwert wird in der Regel der Strömungswiderstand σ (sigma) verwendet. Mit dem empirisch gefundenen Modell von Delany u. Bazley [25] (Gleichung (2.35)) kann daraus für jede Frequenz f die auf ρc normierte Impedanz $Z(f)$ bestimmt werden. Man beachte, dass das Vorzeichen des Imaginärteils der Impedanz in Gleichung (2.35) von der Konvention der Zeitabhängigkeit in der komplexen Darstellung abhängt. Hier wird für diesen Schwingungsterm $e^{-j\omega t}$ angenommen [26].

$$Z(f) = 1.0 + 9.08 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0.75} + j11.9 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0.73} \quad (2.35)$$

mit

$Z(f)$	auf ρc normierte Impedanz
f	Frequenz [Hz]
σ	Strömungswiderstand [Rayl].

Die Tabelle 2.4 gibt für verschiedene Bodentypen den zugehörigen Strömungswiderstand an.

Es wird angenommen, die Reflexion am Boden beanspruche ein Gebiet, das der Grösse einer $\lambda/4$ -Fresnelzone entspreche. Dieses Gebiet ist durch jene Bodenpunkte gegeben, für die die Summe der beiden Abstände Quelle-Bodenpunkt und Bodenpunkt-Empfänger höchstens $\lambda/4$ grösser ist als die Summe der Abstände Quelle-Reflexionspunkt und Reflexionspunkt-Empfänger. Wenn dieses Gebiet nicht zur Verfügung steht, reduziert sich der reflektierte Anteil entsprechend, wobei die Proportionalität zwischen Schalldruck und Fläche besteht [27],[28]. Da generell nur im Schnitt gearbeitet wird, reduziert sich die Untersuchung der Fresnelzone auf eine Strecke. Diese Vereinfachung entspricht der Annahme, dass die an sich ellipsenförmige Fresnelzone durch ein Rechteck approximiert wird. Der frequenzabhängige Fresnelzonenfaktor $\Phi(f)$ für eine Reflexion an einem Bodensegment ergibt sich aus Gleichung (2.36).

$$\Phi(f) = \frac{l_s(f)}{l_F(f)} \quad (2.36)$$

mit

$l_F(f)$	Länge der $\lambda/4$ -Fresnelzone
$l_s(f)$	Länge des Segmentsabschnitts, der innerhalb der $\lambda/4$ -Fresnelzone liegt.

Bodentyp	Strömungswiderstand σ [Rayl]
Baumschule	150
Fels	20000
Fluss	20000
Gebüsch	150
Geröll mit Gebüsch	500
Geröll auf Gletscher	500
Geröll	500
Geröll in Wald	500
Geröll in offenem Wald	500
Gletscher	5000
Graspiste	200
Piste mit Hartbelag	20000
Kiesgrube	500
Lehmgrube	5000
Obstanlage	150
Reben	150
See	20000
Siedlung	10000
Staudamm	500
Staumauer	20000
Steinbruch	20000
Sumpf und Gebüsch	2000
Sumpf	2000
Sumpf in Wald	2000
Sumpf in offenem Wald	2000
Übriges Gebiet	500
Wald	100
Wald offen	150

Tabelle 2.4: Strömungswiderstände für verschiedene Bodentypen (Bodentypen-Klassierung gemäss Primärflächendatensatz des Vektor25-Modells der SwissTopo).

Die Länge der $\lambda/4$ -Fresnelzone kann mittels Konstruktion des Schnitts einer Ellipse mit der Segmentgeraden gefunden werden. Die Brennpunkte der Ellipse sind durch den Quellen- und Empfängerpunkt, bzw. durch die beiden Pfadepunkte unmittelbar vor und nach dem Reflexionspunkt gegeben. Die Ellipse beschreibt jenen geometrischen Ort für den gilt, dass die Summe der Abstände zum ersten und zweiten Brennpunkt konstant ist. Diese Summe der Abstände wird nun um $\lambda/4$ grösser als die Summe der Abstände des Reflexionspunkts zum Quellen- und Empfängerpunkt gewählt. Der Bereich, der zur Reflexion beiträgt, liegt zum einen innerhalb der Ellipse und zum anderen auf der Segmentgeraden. Der Abstand zwischen den beiden Schnittpunkten entspricht der Länge der $\lambda/4$ -Fresnelzone.

Es wird vorausgesetzt, dass die beiden Ellipsenbrennpunkte durch $F_1 = (x_{F_1}, z_{F_1})$ und $F_2 = (x_{F_2}, z_{F_2})$, der Reflexionspunkt durch $R = (x_R, z_R)$ gegeben seien. Dann gelten folgende Beziehungen für die Ellipsenhalbachsen a, b und die lineare Exzentrizität c :

$$a = \frac{1}{2} \left(\sqrt{(x_{F_1} - x_R)^2 + (z_{F_1} - z_R)^2} + \sqrt{(x_{F_2} - x_R)^2 + (z_{F_2} - z_R)^2} + \frac{\lambda}{4} \right) \quad (2.37)$$

$$c = \frac{1}{2} \sqrt{(x_{F_1} - x_{F_2})^2 + (z_{F_1} - z_{F_2})^2} \quad (2.38)$$

$$b = \sqrt{a^2 - c^2} \quad (2.39)$$

Die Berechnung der Schnittpunkte der Ellipse mit der Segmentgeraden wird relativ einfach, wenn durch zwei Koordinatentransformationen der Ellipsenmittelpunkt in den Koordinatenursprung verschoben und die grosse

Ellipsenhalbachse auf die x -Achse gedreht wird.

Die Abbildung 2.9 zeigt exemplarisch die konstruierte Fresnelzonen-Ellipse einer Bodenreflexion.

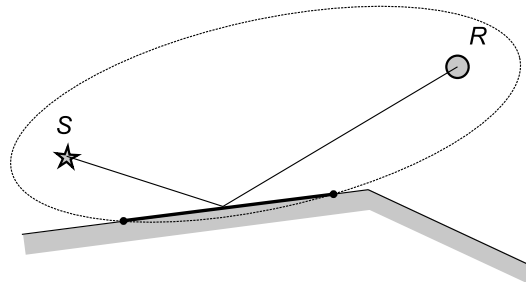


Abbildung 2.9: Beispiel einer Ausbreitungssituation mit der Fresnelzonen-Ellipse für eine Bodenreflexion. Die markierten Schnittpunkte mit dem Terrainsegment bezeichnen den Abschnitt der zur Reflexion beiträgt. Die Grösse der Ellipse ist frequenzabhängig.

Schliesslich ergibt sich der Schalldruck, der durch einen am Boden reflektierten Schallpfad am Empfänger hervorgerufen wird in komplexer Schreibweise zu:

$$\underline{p}_{\text{gr}}(f) = 10^{-0.05 D_z(f)} \frac{Q(f)\Phi(f)}{r} e^{jkr'} \quad (2.40)$$

mit

- $D_z(f)$ allfällige Hinderniswirkung für den gespiegelten Pfad [dB]
- $Q(f)$ Kugelwellenreflexionskoeffizient
- $\Phi(f)$ Fresnelzonenfaktor
- r Länge des Pfades in der Spiegelform durch allfällige Hindernisse hindurch [m]
- r' Länge des Pfades in der Spiegelform um allfällige Hindernisse herum [m]

Die Beiträge der einzelnen Schallpfade lassen sich jetzt mit Gleichung (2.41) zum Term $A_{\text{gr}/\text{bar}}(f)$ zur Berücksichtigung des Bodeneffekts und der Hinderniswirkung verrechnen, wobei die Summierung über alle gültigen Pfade zu erfolgen hat.

$$A_{\text{gr}/\text{bar}}(f) = 10 \log \left(\frac{|\underline{p}_{\text{dir,ref}}(f)|^2}{K^2 \left| \underline{p}_{\text{dir}}(f) + \sum_{i'} \underline{p}_{\text{gr}}(f) \right|^2 + (1 - K^2) \left(|\underline{p}_{\text{dir}}(f)|^2 + \sum_{i'} |\underline{p}_{\text{gr}}(f)|^2 \right)} \right) \quad (2.41)$$

mit

- $\underline{p}_{\text{dir,ref}}(f)$ Referenzschalldruck nach Gleichung (2.30).
- $\underline{p}_{\text{dir}}(f)$ effektiver Direktschalldruck nach Gleichung (2.31).
- $\underline{p}_{\text{gr}}(f)$ Schalldruck am Empfänger für einen Bodenreflexionspfad nach Gleichung (2.40).
- K Kohärenzfaktor nach Gleichung (2.42).
- $|\dots|$ Betrag der entsprechenden komplexen Grössen
- $\sum_{i'}$ Summe über alle gültigen Bodenreflexionen

Grundsätzlich werden in Gleichung (2.41) der Direktschall und die Bodenreflexionen phasenempfindlich aufsummiert. Die streng phasenempfindliche Addition ist nur bei kleinen Abständen, kleinen Weglängenunterschieden und tiefen Frequenzen gültig. Inhomogenitäten in der Luft sowie Unebenheiten am Boden reduzieren die Kohärenz zwischen den einzelnen Beiträgen. Dieser Umstand wird hier durch einen Kohärenzfaktor K berücksichtigt. Ein Wert $K = 0$

bedeutet verschwindende Kohärenz, d.h. die Addition der Anteile erfolgt energetisch. Ein Wert $K = 1$ steht für vollständige Kohärenz, d.h. phasensensitive Addition. Die Schätzung von K ist schwierig und mit einer beträchtlichen Unsicherheit verbunden. Es lässt sich vermuten, dass K von der Länge der Schallwege, der örtlichen Trennung von Direktschall und Bodenreflexion, von der Bodenbeschaffenheit, von der Frequenz und vom Zustand der Atmosphäre (Temperaturschichtung, Stärke der Konvektion, Wind, ...) abhängt. Vereinfachend wird hier für die Bestimmung von K die Gleichung (2.42) angesetzt. Die Frequenz f wird in der Bestimmungsgleichung für K nicht linear sondern im Quadrat angenommen, da die Frequenzabhängigkeit der Kohärenz von zwei Aspekten abhängt. Dabei wird von der Vorstellung ausgegangen, dass sowohl örtlich als auch zeitlich eine zufällige Streuung der Laufzeiten auftritt. Zum einen ist hinsichtlich der Auswirkungen auf die Phase die Laufzeitstreuung in Wellenlängen zu messen. Zum anderen ergibt sich der Schalldruck, der durch einen Schallpfad hervorgerufen wird, aus der Integration über ein begrenztes räumliches Gebiet. Dadurch erfolgt eine gewisse Ausmittelung der Laufzeitstreuungs-Effekte. Der Grad der Ausmittelung kann über eine Fresnelzonenbetrachtung abgeschätzt werden, wobei der Flächeninhalt der ersten Fresnelzone im wesentlichen proportional zur Wellenlänge ist. Der Einfluss der örtlichen Trennung von Direktschall und Bodenreflexion wird ignoriert.

$$K = e^{-(\gamma_0 + \gamma f^2 r'_{dir})} \quad (2.42)$$

mit

γ_0	empirischer Parameter = 9.0×10^{-3}
γ	empirischer Parameter = $1.0 \times 10^{-10} [s^2/m]$
f	Frequenz [Hz]
r'_{dir}	Länge des Direktschallpfads, um allfällige Hindernisse herum [m].

Hinweis:

Durch Bildung der inkohärenten Summe in Gleichung (2.41) über die Betragsquadrate der Reflexionspfade wird der Bodeneffekt von der Segmentierung des Terrainschnittes abhängig. Dieser Effekt manifestiert sich nur bei grossen Abständen und hohen Frequenzen. Für die Anpassung der empirischen Parameter γ_0 und γ wurde von einer Segmentierung von 5 m ausgegangen. Tests haben ergeben, dass die Abweichungen für Segmentierungen zwischen 2 m und 25 m gering bleiben.

Der Bodeneffekt und die Hinderniswirkung sind stark frequenzabhängig. Ein jeweils für eine Terz stehender Term $A_{gr/bar,j}$ kann nicht nur anhand einer einzigen Frequenz bestimmt werden, sondern muss aus einer Mittelung über das ganze Terzband gewonnen werden. Für diese Mittelung wird ein Terzband durch neun geometrisch verteilte Frequenzen repräsentiert. Für die Terzen von 50 bis 10'000 Hz werden folgende Stützfrequenzen verwendet:

$$f_i = 44.76510929 \times 2^{\frac{i}{27}} \quad [\text{Hz}] \quad (2.43)$$

wobei i die Werte 0,1,2,...,215 annimmt. Der Terzwert $A_{gr/bar,j}$ wird dann aus dem energetischen Mittelwert für die 9 im Terzband liegenden Frequenzen gewonnen:

$$A_{gr/bar,j} = -10 \log \left(\frac{1}{9} \sum_{i=9j}^{9j+8} 10^{-0.1 A_{gr/bar}(f_i)} \right) \quad (2.44)$$

wobei j der Terznummer entspricht und die Werte 0,1,2,...,23 annimmt. Die zu j gehörige Terzfrequenz ergibt sich zu $f_j = 44.76510929 \times 2^{\frac{9j+4}{27}}$ Hz.

2.3.2.8 Terrainoptimierung

Wie oben dargestellt, basiert die Berechnung der Bodenreflexion auf einem Terrainschnitt, der aus stückweise geraden Segmenten besteht. Die Anzahl Segmente hat dabei einen bedeutenden Einfluss auf die Rechenzeiten. Es besteht deshalb ein Interesse, weitgehend eben verlaufende Geländesegmente zusammen zu fassen. Zu diesem Zweck wird ein Verfahren zur Reduktion der Anzahl Terrainsegmente eingesetzt, welches auf dem Prinzip der maximalen Abweichung basiert. Das Verfahren wurde bereits bei anderen Berechnungsmodellen eingesetzt, z.B.

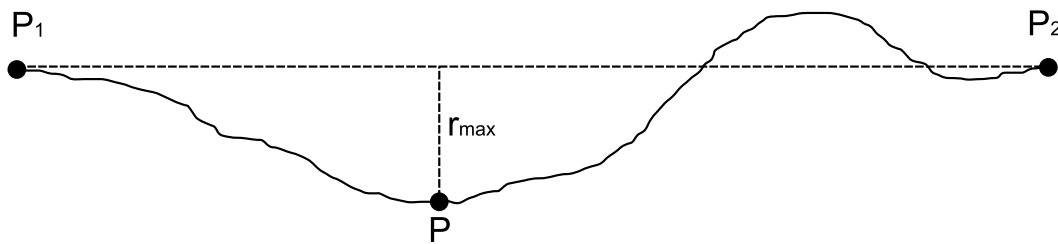


Abbildung 2.10: Identifikation des Punktes P , welcher in einem Geländeschnitt die grösste Distanz von der direkten Verbindung zwischen den Punkten P_1 und P_2 aufweist.

beim Harmonoise-Engineering-Modell [29].

In einem ersten Schritt wird zwischen dem Start- und Endpunkt des Geländeschnittes der Punkt mit der maximalen Abweichung von der direkten Verbindung gesucht, wie in Abbildung 2.10 dargestellt. Für diesen Punkt P werden die Kriterien gemäss den Gleichungen 2.45 und 2.46 kontrolliert. Werden sie nicht erfüllt, so erfolgt eine neue Suche zu beiden Seiten, d.h. es wird die maximale Abweichung auf der Strecke $\overline{P_1P}$ und auf der Strecke $\overline{P_2P}$ gesucht. Dieser Vorgang wird iterativ so lange wiederholt, bis die beiden Kriterien erfüllt sind.

$$r_{\max} = \begin{cases} 0.1 & \text{für } d \leq 50m \\ 0.002d & \text{für } 50m < d < 500m \\ 1 & \text{für } d \geq 500m \end{cases} \quad (2.45)$$

$$d_{\text{segm}} = \begin{cases} 1 & \text{für } d \leq 20m \\ 0.05d & \text{für } 20m < d < 200m \\ 10 & \text{für } d \geq 200m \end{cases} \quad (2.46)$$

mit

- r_{\max} Punkt in einem Geländeschnitt mit der grössten Distanz von der direkten Verbindung des Start- und Endpunktes des Geländeschnittes.
- d Distanz zwischen dem Punkt bei r_{\max} und dem Start- bzw. Endpunkt.
- d_{segm} Segmentlänge, Distanz zwischen zwei benachbarten Punkten auf dem Geländeschnitt.

2.3.2.9 Terrainglättung

Im Anschluss an die oben beschriebene Terrainoptimierung wird für die verbleibenden Geländesegmente zusätzlich eine Terrainglättung angewendet.

Bei streifender Ausbreitung ergibt sich eine grosse Empfindlichkeit der geometrisch konstruierten Reflexionspfade hinsichtlich kleiner Terrainhöenschwankungen. Diese Empfindlichkeit wird in Realität durch den Wellencharakter des Schalls stark reduziert, da sich dabei eine Art Mittelungseffekt einstellt. Abbildungen 2.11 und 2.12 zeigen beispielhafte Bodeneffektberechnungen mit dem in *sonRAIL* verwendeten geometrischen Modell und mit einem wellentheoretischen Referenzansatz. Dabei wurde flacher Boden angenommen, der im Terrainschnitt durch Segmente der Länge 20 m repräsentiert wird. Die Segmentanfangs- und endpunkte wurden dann mit einer zufälligen Höhenvariation Δh im Bereich ± 0.1 m versehen.

Die übergrosse Empfindlichkeit geometrischer Bodeneffektberechnungen im Bereich des Interferenzeinbruchs (Abbildung 2.11) kann wesentlich reduziert und damit der Realität angepasst werden, wenn vorgängig eine Terrainglättung durchgeführt wird. Dazu wird folgende Strategie angewendet [30]:

Ausgangslage ist ein Terrainschnitt bestehend aus n Segmenten, die durch insgesamt $n + 1$ Punkte definiert sind. Dieses Terrain wird jetzt durch Verschiebungen der Segmentpunkte geglättet, allerdings muss darauf geachtet werden, dass Hindernisse nicht verändert werden. Aus diesem Grund wird jeder Segmentpunkt darauf hin geprüft, ob er ein Hindernispunkt ist, d.h. die direkte Sicht zwischen Quelle und Empfänger versperrt. Wenn der Segmentpunkt ein

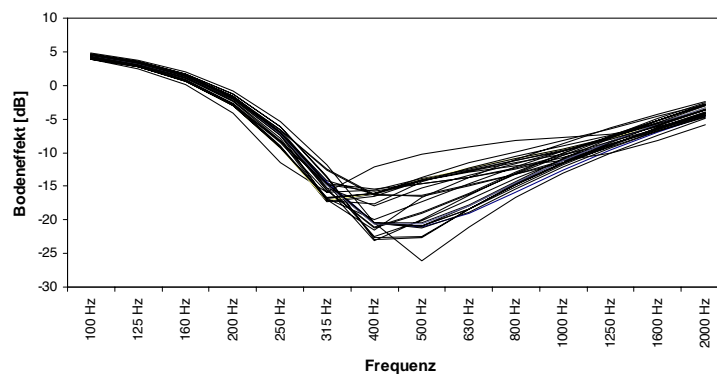


Abbildung 2.11: Berechneter Bodeneffekt mit dem in *sonRAIL* verwendeten Ansatz für 30 verschiedene Terrainsituationen mit einer Höhenvariation Δh von 0.1 m. Die Quelle ist auf 1 m angenommen, der Empfänger in 200 m Abstand auf einer Höhe von 2 m. Der Boden weist einen Strömungswiderstand von 300 Rayl auf.

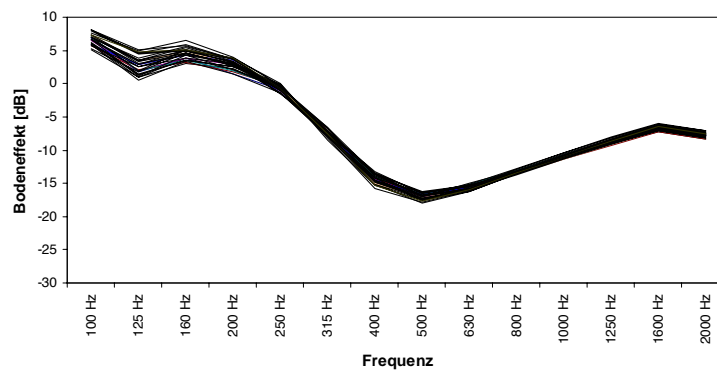


Abbildung 2.12: Berechneter Bodeneffekt mit einem wellentheoretischen Ansatz für 30 verschiedene Terrainsituationen mit einer Höhenvariation Δh von 0.1 m. Quellen- und Empfängergeometrie sind wie in Abbildung 2.11 angenommen.

Hindernispunkt ist, bleibt er unverändert. Für alle anderen Segmentpunkte werden die Abstände h_i zu einer gedachten Linie vom Terrain an der Quelle zum Terrain am Empfänger bestimmt (Abbildung 2.13). Die Segmentpunkte werden näher an diese gedachte Linie gezogen, sodass die neuen Abstände h'_i Gleichung (2.47) gehorchen.

$$h'_i = h_i - \frac{ah_i}{b + (h_i)^c} \quad (2.47)$$

wobei die Parameter a : 7.0, b : 9.0 und c : 3.0 entsprechen. Diese Parametersetzung minimiert die Abweichungen zu den Referenzberechnungen mit dem wellentheoretischen Modell.

Abbildung 2.14 zeigt exemplarisch die Variation des berechneten Bodeneffekts für 30 verschiedene Terrainschnitte mit einer Höhenvariation Δh von 1.0 m. Der geometrische Ansatz wurde auf das nach obiger Vorschrift geglättete Terrain angewendet und zeigt eine befriedigende Übereinstimmung mit der wellentheoretischen Berechnung.

2.3.2.10 Schallausbreitung über Schotter - Ansatz mit lateral reagierendem Medium

2.3.2.11 Einleitung

Eine Besonderheit von Eisenbahnlärm ist die quellennahe Schallausbreitung über Schotter. Im Gegensatz zu harten Oberflächen oder Grasland ist Schotter extrem offenporig und durchlässig und muss als lateral reagierendes Medium modelliert werden [31]. Diese Vorstellung lässt - im Gegensatz zum lokal reagierenden Medium - eine Schallausbreitung im Medium selbst zu. Zur Charakterisierung eines lateral reagierenden Mediums wird nebst der Impedanz die im

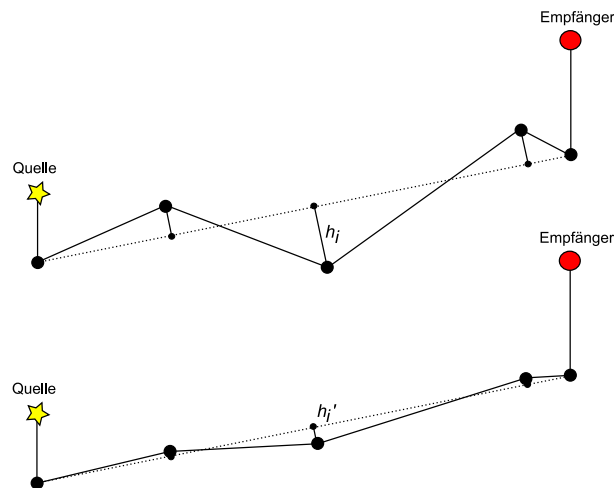


Abbildung 2.13: Strategie zur Terrainglättung, oben: Originalterrain, unten: geglättetes Terrain.

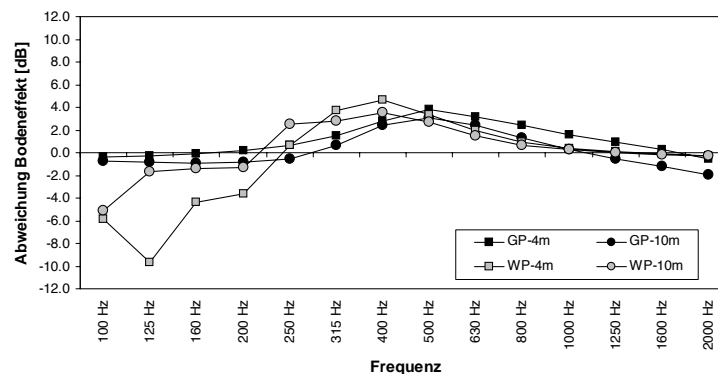


Abbildung 2.14: Mittlere Variation des berechneten Bodeneffekts bezüglich eines flachen Bodens für 30 verschiedene Terrainsituationen mit einer Höhenvariation Δh von 1.0 m. Die Quelle wurde 1.0 m über Boden mit Strömungswiderstand 300 Rayl angenommen, der Quellen-Empfängerabstand betrug 200 m, die Empfängerhöhen waren 4 bzw. 10 m. GP bezeichnet die Rechnung mit dem geglätteten Terrain in *sonRAIL*, WP steht für die wellentheoretische Berechnung.

Allgemeinen ebenfalls komplexe Wellenzahl $k = k_0(\alpha + j\beta)$ benötigt. Die Ausbreitung einer ebenen Welle im Medium lässt sich beschreiben als:

$$p = \hat{p}e^{jkx}e^{-j\omega t} = \hat{p}e^{jk_0\alpha x}e^{-k_0\beta x}e^{-j\omega t} \quad (2.48)$$

wobei \hat{p} der Amplitude bei $x = 0$ entspricht. Der Realteil der Wellenzahl k beschreibt die Phasendrehung mit dem Ort x , der Imaginärteil führt auf eine Dämpfung.

Für ein gegebenes Medium ist die Bestimmung der Impedanz und der Wellenzahl schwierig. Eine theoretische Prognose ist möglich, allerdings ist dazu die Kenntnis von nichtakustischen Parametern wie Strömungswiderstand und Strukturfaktor notwendig [32], [33], [34]. Diese Parameter selbst sind nicht als Einzahlwerte zu verstehen, sondern sind frequenzabhängig. Basierend auf einer Vielzahl von Messungen an fiberartigem Material haben Delany und Bazley ein empirisches Formelwerk entwickelt [25], das anhand des einzigen Parameters *Strömungswiderstand* σ die Frequenzgänge der Impedanz Z und der Wellenzahl k darstellen:

$$\frac{Z}{\rho c} = 1 + 9.08 \left(\frac{\sigma}{f}\right)^{0.75} + j11.9 \left(\frac{\sigma}{f}\right)^{0.73} \quad (2.49)$$

$$\frac{k}{\frac{2\pi f}{c}} = 1 + 10.8 \left(\frac{\sigma}{f}\right)^{0.70} + j10.3 \left(\frac{\sigma}{f}\right)^{0.59} \quad (2.50)$$

Die beiden Kenngrößen Impedanz und Wellenzahl sind auch messtechnisch bestimmbar. Eine Standardmessung im Impedanzmessrohr reicht dazu allerdings nicht aus, da zwei Unbekannte gesucht sind. Grundsätzlich werden dazu zwei Konfigurationen benötigt. So können z.B. zwei unterschiedliche Materialdicken oder zwei unterschiedliche rückseitige Volumina verwendet werden [35]. Allerdings ist dieses Messverfahren nicht in situ anwendbar.

2.3.2.12 Empirische Erweiterung der Weyl-Van der Pool Formel

Zur Berechnung der Bodenreflexion bei lateral reagierendem Medium schlagen Li et al. [36] eine heuristische Erweiterung der klassischen Weyl-Van der Pool Formel [37] vor. Dazu wird eine *effektive Admittanz* eingeführt, in welche die Materialkennwerte (Z, k) und die Parameter Schalleinfallswinkel und Schichtdicke eingehen. Die von einer Punktquelle ausgehende und unter dem Winkel θ (bzgl. der Flächennormalen) einfallende und am lateral reagierenden Medium reflektierte Schallwelle lässt sich schreiben als:

$$p = [R_p + (1 - R_p)F(w)] \frac{e^{jk_0 R_2}}{4\pi R_2} \quad (2.51)$$

wobei k_0 der Wellenzahl in Luft und R_2 dem Laufweg von der Quelle über den Reflexionspunkt zum Empfänger entspricht. Die Funktion $F(w)$ ist für nicht zu steilen Einfall

$$F(w) \approx 1 + j\sqrt{\pi}we^{-w^2} \operatorname{erfc}(-jw) \quad (2.52)$$

In Gleichung (2.52) ist "erfc" die Errorfunktion und w ist

$$w = (\cos \theta + \beta_e) \sqrt{\frac{1}{2}jk_1 R_2} \quad (2.53)$$

mit der komplexen Wellenzahl k_1 des Mediums.

R_p ist der ebene Welle-Reflexionskoeffizient gemäss

$$R_p = \frac{\cos \theta - \beta_e}{\cos \theta + \beta_e} \quad (2.54)$$

Für ein lateral reagierendes Medium der Schichtdicke d vor einem harten Abschluss gilt für die effektive Admittanz:

$$\beta_e = -jm_1 \sqrt{n_1^2 - \sin^2 \theta} \cdot \tan \left(k_0 d \sqrt{n_1^2 - \sin^2 \theta} \right) \quad (2.55)$$

dabei gilt $n_1 = \frac{k_1}{k_0}$ und $m_1 = \frac{1}{n_1}$.

Wie oben angesprochen setzt die Anwendung des Bodeneffektmodells von Li [36] Kenntnis der Impedanz Z und der Wellenzahl k voraus. Für Schotter sind in der Literatur weder Messangaben verfügbar noch konnte ein Modell gefunden werden, das die rechnerische, modelhafte Bestimmung von Z und k erlaubt hätte. Deshalb wurde ein einfaches Schottermodell gemäss dem nachfolgenden Abschnitt 2.3.2.13 angesetzt. Die Parameter wurden anschliessend im Vergleich mit Ausbreitungsmessungen optimal eingestellt [31].

2.3.2.13 Geometrisches Schottermodell

Das abstrahierte Schottermodell baut sich - von der Oberfläche aus in die Tiefe des Materials gesehen - aus Reihen von identisch grossen Poren mit Durchmesser d_P auf. Jeweils zwei übereinander liegende Poren einer Reihe sind über eine dünne Kapillare der Länge l und Durchmesser d_K miteinander verbunden. Der Abstand zwischen den Reihen

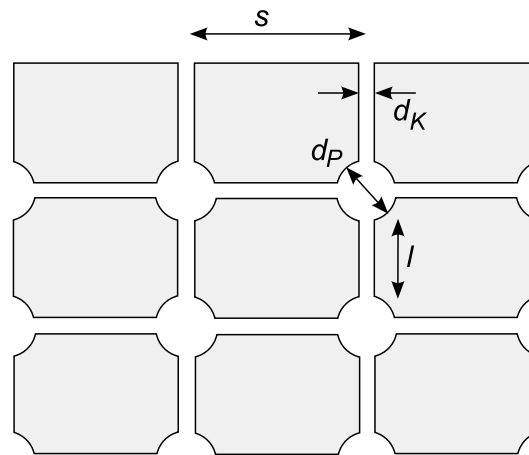


Abbildung 2.15: Geometrisches Schottermodell mit kugelförmigen Poren mit Durchmesser d_P und zylindrischen Kapillaren mit Durchmesser d_K und Länge l bzw. $s - d_P$.

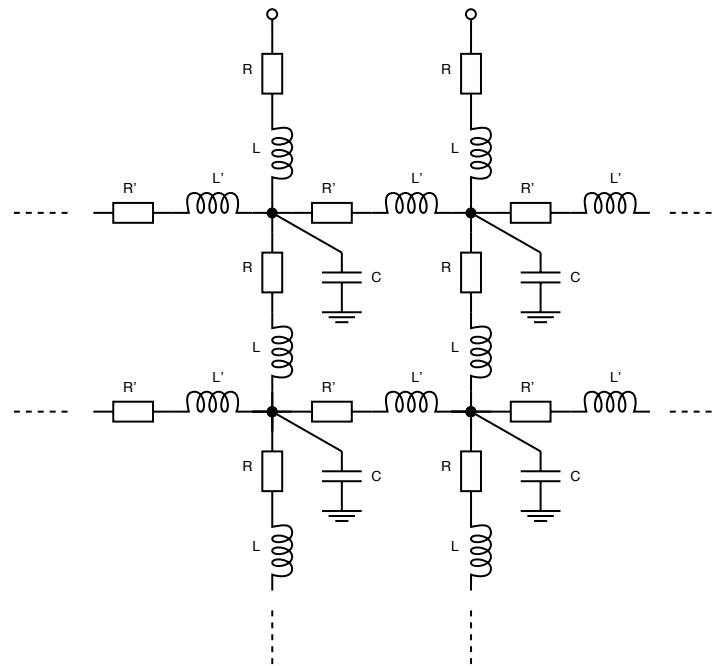


Abbildung 2.16: Analoges elektrisches Ersatzschaltbild für das Schottermodell.

wird mit s bezeichnet. Zwischen den Reihen existieren über Kapillaren der Länge $s - d_P$ ebenfalls Verbindungen (siehe Abbildung 2.15).

Die akustische Eigenschaft einer Pore ist jene einer Feder, eine Kapillare wirkt als beschleunigte Masse und als Widerstand. In der elektrischen Analogie entspricht das Schottermodell einem RLC-Netzwerk (Abbildung 2.16). Man beachte, dass in der Akustik die Impedanzen als Verhältnis von Schalldruck zu Schallfluss verstanden werden.

Die Impedanz Z und die Wellenzahl k des Schotters können für eine senkrecht von oben einfallende ebene Welle diskutiert werden. Da horizontale Nachbarknoten (über R' und L' verbunden) identische Druck und Flussverhältnisse sehen, finden keine horizontalen Ausgleichsvorgänge statt. Es genügt also die Diskussion einer vertikalen Kapillaren-Poren-Kaskade. Dies führt auf das bekannte Netzwerk einer Transmission-Line (Abbildung 2.17).

Für die Schaltung in Abbildung 2.17 kann die Impedanz Z' angegeben werden zu:

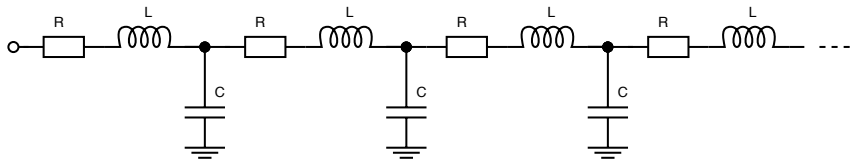


Abbildung 2.17: Elektrisches Ersatzschaltbild für das Schottermodell: Transmission Line.

$$Z' = \sqrt{\frac{L}{C} - j\frac{R}{\omega C}} \quad (2.56)$$

wobei ω der Kreisfrequenz $= 2\pi f$ entspricht. Die längenbezogene Ausbreitungskonstante Γ' wird

$$\Gamma' = \sqrt{-\omega^2 LC + j\omega RC} \quad (2.57)$$

Die Überführung der akustischen Federwirkung der Poren in eine Kapazität C erfolgt mit

$$C = \frac{V}{\rho c^2} \cdot \frac{1}{G_3 G_4} \quad (2.58)$$

wobei $V = \frac{\pi d_p^3}{6}$ dem Volumen einer Pore, ρ der Luftdichte und c der Schallgeschwindigkeit entspricht. Die Faktoren $G_3 = 1 \frac{Vm^2}{N}$ und $G_4 = 1 \frac{m^3}{As}$ stellen die Einheiten richtig.

Die Kapillare hat eine Massewirkung, entsprechend einer Induktivität L mit

$$L = \frac{\rho l}{A} \cdot G_3 G_4 \quad (2.59)$$

mit l : Länge und $A = \frac{\pi d_K^2}{4}$: Querschnittsfläche der Kapillare.

Die Kapillare zeigt einen Verlust, entsprechend einem Widerstand R mit

$$R = \frac{8l\eta}{\pi r^4} \quad (2.60)$$

mit l : Länge und $r = \frac{d_K}{2}$: Radius der Kapillare. Die dynamische Viskosität η ist $1.82 \times 10^{-5} \text{Nsm}^{-2}$.

Die gemäss Gleichung (2.56) berechnete Impedanz Z' gilt für das Verhältnis Schalldruck zu Schallfluss. Durch Multiplikation mit der Querschnittsfläche A wird die übliche Impedanzdefinition p/v gewonnen. Diese Impedanz gilt am Eingang einer Kapillare. Auf der übrigen Oberfläche wird angenommen, dass die Schallschnelle $= 0$ ist, d.h. die Impedanz ist dort ∞ gross. Für die resultierende Impedanz Z ist eine entsprechende Gewichtung mit dem Flächenverhältnis anzuwenden:

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C} - j\frac{R}{\omega C}} \cdot A \cdot \frac{s^2}{A} = s^2 \sqrt{\frac{L}{C} - j\frac{R}{\omega C}} \quad (2.61)$$

Man beachte, dass Z nach Gleichung (2.61) von der Konvention $e^{j\omega t}$ für den Schwingungsterm ausgeht. Unter der Annahme eines Ansatzes $e^{-j\omega t}$ ändert der Imaginärteil von Z das Vorzeichen.

Die Ausbreitungskonstante Γ' in Gleichung (2.57) ist längenbezogen zu verstehen, d.h. der Wert ist durch die physikalische Länge, die ein RLC Element aufspannt, zu dividieren. Damit ergibt sich Γ zu

$$\Gamma = \frac{1}{d_P + l} \sqrt{-\omega^2 LC + j\omega RC} \quad (2.62)$$

Die Wellenzahl k ergibt sich aus der Ausbreitungskonstanten Γ mit

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}[k] &= \operatorname{Im}[\Gamma] \\ \operatorname{Im}[k] &= \operatorname{Re}[\Gamma] \end{aligned} \quad (2.63)$$

2.3.2.14 Parameteroptimierung

Für die Parameteroptimierung, d.h. die Bestimmung der am besten passenden Werte für den Kapillardurchmesser d_K , die Kapillarlänge l , den Porendurchmesser d_P und den Reihenabstand s wurde auf einem Industriegleis eine Referenzausbreitungsmessung durchgeführt (Abbildung 2.18). Als Quelle wurde 0.5 m über Schotter ein Lautsprecher mit in der Vertikalen runden Abstrahlcharakteristik verwendet. Das Mikrophon wurde in 7.5 m Abstand 1.2 m über Schotter installiert. Die Quellen-Empfängerstrecke wurde längs dem Gleis angeordnet. Die Schwellen sind als über eine Stahlstrebe verbundene Betonklötze ausgeführt, so dass insgesamt von einem nahezu homogenen Schotterbett ausgegangen werden kann. Die Stärke des Schotterbetts lag bei rund 35 cm.



Abbildung 2.18: Schallausbreitungsexperiment auf einem Industriegleis mit dem anregenden Lautsprecher im Vordergrund und dem Mikrophon im Hintergrund.

Mit folgenden optimierten Werten:

$$\begin{aligned} d_K &= 0.00127 \text{ m} \\ l &= 0.00132 \text{ m} \\ d_P &= 0.0056 \text{ m} \\ s &= 0.006 \text{ m} \end{aligned}$$

und einer Schottertiefe von 0.33 m ergibt sich bis etwa 1.5 kHz eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung (Abbildung 2.19). Gegen die hohen Frequenzen zeigt die Messung gegenüber der Berechnung eine

zusätzliche Dämpfung, die vermutlich auf Streuverluste an der rauhen Oberfläche zurückzuführen ist. Man beachte, dass die optimalen Geometrieparameter durchaus realitätsnahe Werte annehmen. So liegt z.B. die Porosität des Modellmaterials bei 33%, was sehr gut mit Werten für realen Schotter übereinstimmt. Dies plausibilisiert die Annahme des einfachen Porenmodells.

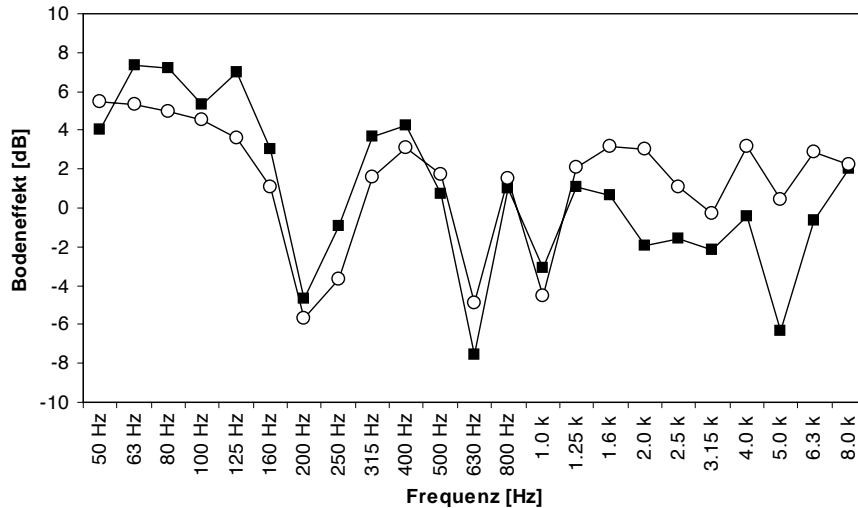


Abbildung 2.19: Gemessener (gefüllte Quadrate) und berechneter (leere Kreise) Bodeneffekt für eine Lautsprecherhöhe von 0.5 m, eine Empfängerhöhe von 1.2 m und einen Quellen-Empfängerabstand von 7.5 m.

Für die oben gezeigten Geometrieparameter ergeben sich die in Abbildung 2.20 und 2.21 gezeigten Frequenzgänge für Z und k .

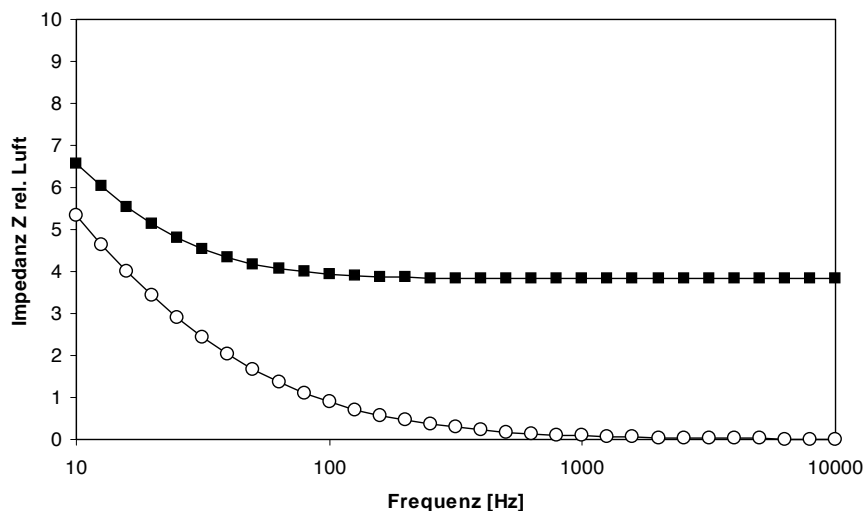


Abbildung 2.20: Frequenzgang der Impedanz Z bzgl. Luft (ρc) für den Modellschotter (gefüllte Quadrate: Realteil, leere Kreise: Imaginärteil).

2.3.2.15 Bewuchsdämpfung

In Gebieten mit dichtem Bewuchs (Bäume und hohe Sträucher) wird die Schallausbreitung zusätzlich gedämpft. Die ISO 9613-2 gibt für diese Bewuchsdämpfung A_{fol} Abschwächungswerte pro Laufmeter gemäss Tabelle 2.5 an. Da

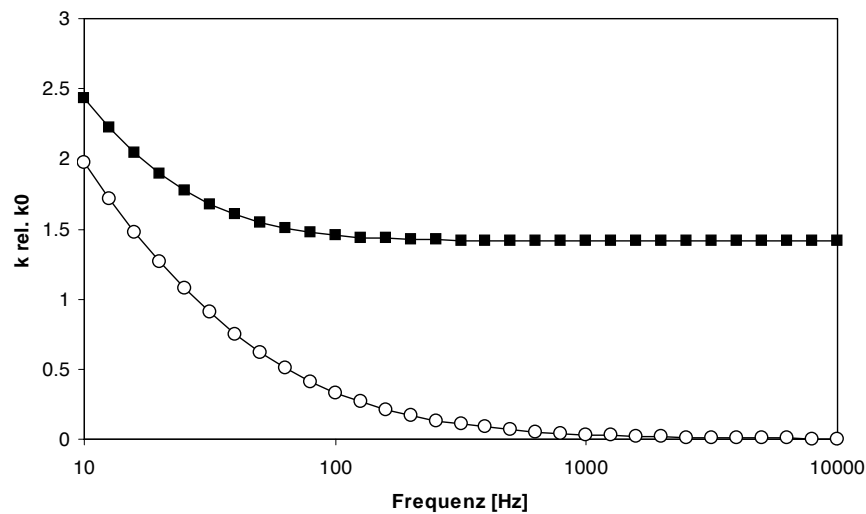


Abbildung 2.21: Frequenzgang der Wellenzahl k bzgl. k_0 für den Modellschotter (gefüllte Quadrate: Realteil, leere Kreise: Imaginärteil).

die ISO-Norm 9613-2 nur für Oktavbänder definiert ist und die Berechnung in *sonRAIL* in Terzen erfolgt, werden die Dämpfungswerte der einzelnen Terzen vereinfachend jeweils den entsprechenden Oktavwerten gleichgesetzt.

d_f	63	125	250	500	1k	2k	4k
10...20m	0dB	0dB	1dB	1dB	1dB	1dB	2dB
20...200m	0.02dB/m	0.03dB/m	0.04dB/m	0.05dB/m	0.06dB/m	0.08dB/m	0.09dB/m
> 200m	4 dB	6 dB	8 dB	10 dB	12 dB	16 dB	18 dB

Tabelle 2.5: Bewuchsdämpfung A_{fol} in Funktion der Frequenz gemäss ISO 9613-2.

Der effektiv im Bewuchs verlaufende Schallweg d_f wird gemäss Norm mittels einer zum Boden hin gekrümmten Kreisbahn mit einem Radius von 5 km ermittelt, entsprechend einer förderlichen Ausbreitung von der Quelle zum Empfänger. In der Ebene führt dies zu einer maximal im Wald verlaufenden Strecke von 200 m. Entsprechend wird die anrechenbare Ausbreitungsdistanz durch Wald in der Norm auf 200 m limitiert. Da in *sonRAIL* die Ausbreitung im Basismodell mit geraden Schallstrahlen gerechnet wird und dafür der Geländeverlauf einfließt, wurde entschieden, diese Limitierung auf 200 m nicht zu berücksichtigen. (Bei der Implementierung wird die maximale Ausbreitungsdistanz jedoch als Parameter eingeführt, so dass auch Berechnungen durchgeführt werden können, welche streng nach Norm erfolgen.) In Übereinstimmung mit der ISO-Norm 9613-2 wird aber für $d_f < 10$ m keine Bewuchsdämpfung ausgewiesen.

Die Identifikation von Flächen mit relevantem Bewuchs erfolgt basierend auf der in Tabelle 2.4 aufgeführten Klassierung des Vektor25-Primärflächendatensatzes der SwissTopo. Eine Bewuchsdämpfung gemäss Tabelle 2.5 wird dabei für die Geländetypen *Wald*, *Geröll in Wald* und *Sumpf in Wald* berechnet. Für die Geländearten *Wald offen*, *Geröll in offenem Wald* und *Sumpf in offenem Wald* wird eine um 50% reduzierte Bewuchsdämpfung ausgewiesen. Für sämtliche anderen Geländearten wird keine Bewuchsdämpfung ausgegeben, auch nicht bei Typen wie Gebüsch, Baumschule, Obstanlage oder Reben. Bei letzteren drei Arten ist die Dichte des Bewuchses für eine massgebliche Zusatzdämpfung nicht ausreichend. Gebüsch weisen in aller Regel keine Höhen auf, welche eine massgebliche Tangierung der Schallausbreitung zur Folge haben. Auch wird die minimale Tiefe von 10 m bei Gebüsch kaum einmal erreicht.

2.3.3 Zusätzliche quellennahe Effekte bei künstlichen Bauwerken

2.3.3.1 Übersicht

Grundsätzlich können Schallausbreitungsphänomene unabhängig von der Art der Lärmquelle beschrieben werden. Wie bei der im vorangehenden Kapitel besprochenen Ausbreitung über Schotter gibt es gleichwohl Effekte, die sehr quellenspezifisch sind und deshalb gesondert behandelt werden müssen. In diese Kategorie fallen auch die für Eisenbahnlinien typischen Kunstbauten wie Tunnels, Brücken, Galerien und Geländeeinschnitte, welche zu zusätzlichen Reflexionen und Abschirmungen führen und in *sonRAIL* separat erfasst werden.

Für Tunnelportale und Geländeeinschnitte mit reflektierend ausgestalteten seitlichen Begrenzungen werden die zusätzlich auftretenden Reflexionen gemäss den in den Abschnitten 2.3.3.2 bzw. 2.3.3.5 beschriebenen Rezepten berücksichtigt. Die resultierenden Ausbreitungsdämpfungen werden anschliessend mit den Resultaten der Basisrechnung kombiniert.

Zur Berücksichtigung von Brücken sind keine Erweiterungen des Ausbreitungsalgorithmus notwendig. Da aber bei Brücken die Quelle nicht mehr dem Verlauf des Geländes gemäss Terrainmodell folgt, wird für die Ausbreitungsrechnung das Terrain unterhalb der Brücke soweit angehoben, dass sich ein gleichmässiger Geländeverlauf zwischen den Höhen der anschliessenden Quellenpunkte vor und nach der Brücke ergibt. Als Resultat ergibt sich eine Situation entsprechend eines Schienenverlaufs in Dammlage. Für Immissionspunkte, welche sich genau unterhalb der Brücke befinden, kann für diese Quelle keine Berechnung durchgeführt werden. Diese Terrainanpassung ist jedoch nur für die Brückenquelle wirksam, so dass für sämtliche anderen Quellen auch Resultate unterhalb der Brücke ausgewiesen werden. Die erhöhte Abstrahlung, welche sich bei Brücken ergibt, wird im Emissionsmodell behandelt.

In Ermangelung eines geeigneten Berechnungsmodells wird vorderhand auf eine spezielle Behandlung von Galerien verzichtet.

2.3.3.2 Schallabstrahlung von Tunnelportalen

2.3.3.3 Einleitung

Im Bereich von Eisenbahntunnelportalen können relevante Schallimmissionen entstehen, die vom Portal abgestrahlt werden. Diese Schallenergie tritt während der Tunnelfahrt als Folge von Reflexionen an den Tunnelwänden auf. Das in der Folge dargestellte Rechenmodell wurde im Auftrag des damaligen BUWAL im Jahre 2004 von der B+S Ingenieur AG in Bern und der Empa in Dübendorf entwickelt [38],[39].

2.3.3.4 Rezept

Eine sich in einem Tunnel befindliche Quelle liefert an einen Empfänger Schallenergie aus zwei Anteilen. Zum einen erzeugt die Quelle im Tunnel durch Ein- und Mehrfachreflexionen an den Tunnelwänden eine Art diffuses Schallfeld. Dieses lässt sich durch die durch die Portalöffnung hindurchtretende diffuse Schallleistung $W_{\text{Portal,diffus}}$ beschreiben. Diese Schallleistung führt unter Berücksichtigung einer Richtwirkung zu einer Abstrahlung in die Umgebung. Für die Rechnung wird die Schallleistung in der Mitte der Portalöffnung konzentriert und ein Punktquellenverhalten (mit Richtcharakteristik), d.h. -6 dB/Abstandsverdopplung angenommen. Zum anderen versorgt die Quelle die Portalöffnung mit Direktschall $W_{\text{Portal,direkt}}$ und erzeugt am Empfangspunkt einen Direktschallanteil, wobei allfällige Hinderniswirkungen (z.B. an den Tunnelportalkanten) zu berücksichtigen sind. Figur 2.22 zeigt die allgemeine Tunnelsituation im Grundriss. Die Quelle befinde sich an den Koordinaten x, y_0, z_0 . Der Tunnel hat die Breite L_y und Höhe L_z wobei der Tunnelboden bei $z = 0$ und die empfangerseitige Tunnelseitenwand bei $y = 0$ liegt.

Basierend auf wellentheoretischen Betrachtungen zum Schallfeld in einem Kanal kann die totale, durch das Portal hindurchtretende Schallleistung $W_{\text{Portal}} = W_{\text{Portal,diffus}} + W_{\text{Portal,direkt}}$ angegeben werden zu

$$W_{\text{Portal}} \approx W_{\text{Quelle}} 10^{0.1(-3-\gamma \frac{x}{100m})} \quad (2.64)$$

mit

W_{Quelle}	Quellenleistung [W]
x	Abstand der Quelle vom Tunnelportal [m]
γ	Pegelabfall pro 100 m für den A-Pegel bzw. für die 1 kHz Oktave [dB/100 m]

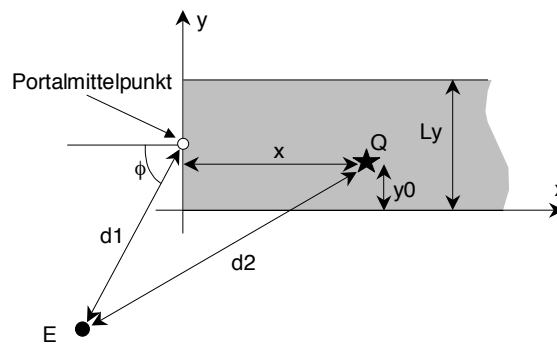


Abbildung 2.22: Situation im Grundriss zur Immission einer Quelle im Tunnel.

Aus Messungen an realen Tunneln mit hartem Untergrund, d.h. ohne Schotter, kann als Erfahrungswert für γ ein Wert von 4 dB/100 m abgeleitet werden. Im Falle einer geschotterten Fahrbahn ist für γ ein Wert von 10 dB/100 m anzusetzen.

Der diffuse Anteil der Portalleistung ergibt sich durch Subtraktion des Leistungsanteils, der direkt durch die Portalöffnung tritt:

$$W_{\text{Portal,diffus}} = W_{\text{Portal}} - W_{\text{Portal,direkt}} \quad (2.65)$$

Die direkt durch die Portalöffnung hindurchtretende Schalleistung $W_{\text{Portal,direkt}}$ ergibt sich nach Gleichung (2.66).

$$W_{\text{Portal,direkt}} = W_{\text{Quelle}} \frac{\theta}{4\pi} \quad (2.66)$$

mit

θ Raumwinkel den die Portalöffnung von der Quelle aus gesehen aufspannt.

Der Raumwinkel θ kann vereinfachend angenähert werden als Flächenverhältnis der Portalöffnung zur Kugeloberfläche mit einem Radius, der dem Abstand vom Quellenpunkt zur Portalmitte entspricht, skaliert mit 4π .

Wenn sich die Quelle gerade im Portal befindet, nimmt θ den Wert 2π an. Mit $W_{\text{Portal}} = 0.5W_{\text{Quelle}}$ wird $W_{\text{Portal,diffus}} = 0$.

Die entsprechenden Teil-Schalldruckpegel L_{diffus} und L_{direkt} am Immissionspunkt lassen sich schreiben als:

$$L_{\text{diffus}} = L_{W,\text{Portal,diffus}} + D(\phi) - 20 \log \frac{d_1}{1\text{m}} - 11 - A_{\text{Portal}} \quad (2.67)$$

mit

$L_{W,\text{Portal,diffus}}$ Diffuser Anteil der Portalleistung als Pegel = $10 \log \left(\frac{W_{\text{Portal,diffus}}}{10^{-12}\text{W}} \right)$ [dB]

$D(\phi)$ Richtwirkungskorrektur für die entsprechende Abstrahlrichtung [dB]

d_1 Abstand von der Portalmitte zum Immissionspunkt [m]

A_{Portal} zusätzliche Dämpfungseffekte wie Hinderniswirkung, Luftdämpfung etc. zwischen Portalmittelpunkt und Immissionspunkt [dB]

$$L_{\text{direkt}} = L_{W,\text{Quelle}} - 20 \log \frac{d_2}{1\text{m}} - 11 - A_{\text{Quelle}} \quad (2.68)$$

mit

$L_{W,Quelle}$	Quellenleistung als Pegel = $10 \log \left(\frac{W_{Quelle}}{10^{-12}W} \right)$ [dB]
d_2	Abstand vom Quellen- zum Immissionspunkt [m]
A_{Quelle}	zusätzliche Dämpfungseffekte wie Hinderniswirkung, Luftdämpfung etc. zwischen Quellen- und Immissionspunkt [dB]. Vereinfachend kann die Luftdämpfung und die Hinderniswirkung stellvertretend an der Frequenz 1 kHz ausgewertet werden.

Achtung: Die Reflexion am Boden wird durch den Bodeneffekt berücksichtigt. Der Boden führt damit nicht zu einer Richtwirkungskorrektur.

Als Richtwirkung für die diffus abgestrahlte Portalleistung wird ein Zusammenhang gemäss Gleichung (2.69) angenommen.

$$I(\phi) = I_0 (1 + \beta \cos(\phi))^2 \quad (2.69)$$

mit

$I(\phi)$	Intensität in Richtung ϕ [W/m ²]
I_0	Skalierungskonstante [W/m ²]
β	Richtwirkungsparameter, hier zu 2.5 angenommen
ϕ	Winkel bzgl. der Tunnelflächennormalen bzw. der Geleiseachse

Es wird davon ausgegangen, dass die diffuse Portalleistung in den Halbraum abgestrahlt wird, d.h. es gilt:

$$\int_0^1 2\pi I_0 (1 + \beta h)^2 dh = W_{Portal,diffus} \quad (2.70)$$

bzw.

$$I_0 = \frac{W_{Portal,diffus}}{2\pi \left(1 + \beta + \frac{\beta^2}{3} \right)} \quad (2.71)$$

Die Richtwirkungskorrektur $D(\phi)$ in Gleichung (2.67) ergibt sich aus dem Verhältnis der Intensität in Richtung ϕ und der Intensität für eine ungerichtete Abstrahlung in den halben Raumwinkel 2π :

$$D(\phi) = 10 \log \left(\frac{(1 + \beta \cos(\phi))^2}{1 + \beta + \frac{\beta^2}{3}} \right) \quad (2.72)$$

bzw. mit obiger Annahme von $\beta = 2.5$

$$D(\phi) = 10 \log \left(\frac{(1 + 2.5 \cos(\phi))^2}{5.6} \right) \quad (2.73)$$

Der totale Schalldruckpegel am Immissionspunkt ergibt sich aus der energetischen Überlagerung von L_{diffus} und L_{direkt} :

$$L_{total} = 10 \log (10^{0.1L_{diffus}} + 10^{0.1L_{direkt}}) \quad (2.74)$$

Die absorbierende Ausgestaltung des Portalbereichs wird durch eine pauschale Pegelreduktion des diffusen Anteils L_{diffus} um 10 dB berücksichtigt. Der Direktschallanteil bleibt unbeeinflusst. Wenn sich die Quelle ausserhalb des Tunnels befindet verschwindet der Anteil von L_{diffus} .

Die Integration der Tunnelportalabstrahlung in *sonRAIL* erfolgt durch Modifikation des Ausbreitungsterms $A_{Basic,f}$. Dazu wird in der Portalebene auf 4 m Höhe eine zusätzliche Schallquelle der Leistung $L_{W,Portal,diffus}$ eingeführt. Von dieser Quelle aus wird eine gewöhnliche Ausbreitungsrechnung zu den Empfangspunkten durchgeführt, wobei die Richtwirkungskorrektur $D(\phi)$ angewendet wird. Die so ermittelten Immissionen werden zu den übrigen Immissionen dazugeschlagen und verringern so das ursprüngliche $A_{Basic,f}$.

2.3.3.5 Geländeeinschnitte

2.3.3.6 Einleitung

Das Schallfeld in einer Eisenbahneinschnittssituation wird durch den Direktschall und Reflexionen gebildet, die sich zwischen den Einschnittwänden und zwischen Einschnittwand und Zugkörper ergeben. Die Reflexionen lassen sich grob in zwei Kategorien aufteilen:

- Bei kleinen Abständen zwischen Einschnittwand und Wagenkasten findet keine eigentliche freie Ausbreitung mehr statt. Vielmehr wird die Schallenergie in einem Kanal nach oben bis zur Höhe der Einschnittwand bzw. des Wagenkastens geführt. Erst dort wird der Schall abgestrahlt.
- Bei grösseren Abständen zwischen Einschnittwand und Wagenkasten bzw. zwischen den Einschnittwänden finden diskrete Reflexionen statt. Diese können bei (im Vergleich zur Wellenlänge) glatten Oberflächen als spiegelnd betrachtet werden. Die Existenz dieser spiegelnden Reflexionen hängt von der Geometrie ab. Sie reagieren daher empfindlich auf die Einschnittwandneigung.

Das in der Folge dargestellte Rechenmodell wurde im Auftrag des damaligen BUWAL im Jahre 2006 von der Empa in Dübendorf entwickelt [40], [41].

2.3.3.7 Rezept

In der Folge wird angenommen, dass die wesentliche Eisenbahnlärmquelle im Rad-/Schienenbereich liegt. Allfällige höherliegende Quellen wie Lüfter oder aerodynamische Ursachen werden ignoriert. Den in der Modellidee dargestellten Erkenntnissen folgend wird nebst den beiden Originalquellen (Rad/Schiene) zusätzlich auf beiden Seiten des Zugkörpers an der oberen Kante je eine Sekundärquelle angesetzt (Abbildung 2.23). Falls der Zugkörper die Einschnittwände überragt, werden diese Sekundärquellen auf den Einschnittwandkanten positioniert. Diese Sekundärquellen repräsentieren den diffus abgestrahlten Schallanteil.

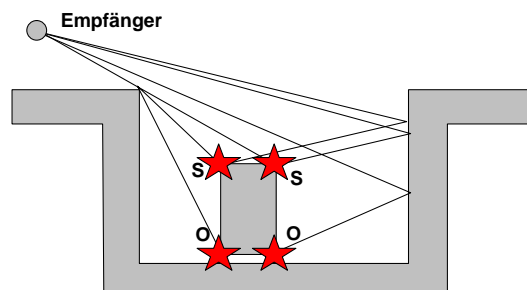


Abbildung 2.23: Schematische Einschnittssituation mit dem Zugkörper, den beiden Originalquellen *O*, den beiden Sekundärquellen *S* und den relevanten Ausbreitungspfaden zum Empfängerpunkt.

Der Immissionspegel L_p an einem Empfängerpunkt wird nach Gleichung (2.75) bestimmt:

$$L_p = 10 \log (10^{0.1L_{dO}} + 10^{0.1L_{rO}} + 10^{0.1L_{dS}} + 10^{0.1L_{rS}}) \quad [\text{dB}] \quad (2.75)$$

mit

- L_{dO} Pegel des Direktschalls der Originalquellen unter Berücksichtigung möglicher Hinderniswirkung
- L_{rO} Pegel der Spiegelreflexion 1. Ordnung der Originalquellen (sofern diese existiert) unter Berücksichtigung möglicher Abschwächung bei der Reflexion und Hinderniswirkung
- L_{dS} Pegel des Direktschalls der beiden Sekundärquellen auf Höhe der Dachkante an beiden Seiten des Zugkörpers
- L_{rS} Pegel der Spiegelreflexion der beiden Sekundärquellen auf Höhe der Dachkante an beiden Seiten des Zugkörpers

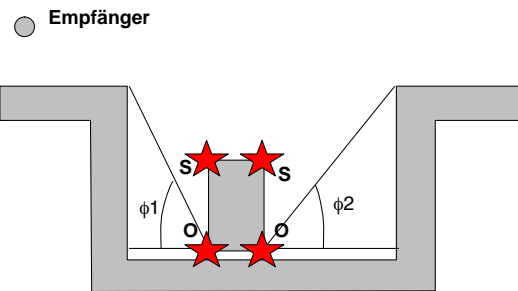


Abbildung 2.24: Relevante Winkelbereiche ϕ_1 und ϕ_2 zur Bestimmung der Stärke der Sekundärquellen.

Die Quellstärke der beiden Sekundärquellen ergibt sich aus dem Winkelbereich, der je von der Originalquelle aus gesehen durch den nicht-absorbierenden Einschnittsbereich gebildet wird. Dieser Winkel ϕ wird ab der Horizontalen im kürzesten Abstand gemessen (Abbildung 2.24).

$$L_{W,S} = L_{W,O} + 10 \log \left(\frac{\phi}{\frac{\pi}{2}} \right) \quad [\text{dB}] \quad (2.76)$$

mit

$L_{W,S}$ Schalleistungspegel je der beiden diffusen Sekundärquellen
 $L_{W,O}$ Schalleistungspegel der Originalquelle

Wie Massstabsmodellexperimente gezeigt haben, ist bei den Sekundärquellen zusätzlich eine frequenzunabhängige Richtwirkung zu berücksichtigen. Dazu wird die Abstrahlung in eine Richtung mit Elevationswinkel β bzgl. der Horizontalen skaliert mit (Abbildung 2.25)

$$\Delta R \text{ [dB]} = \begin{cases} -\infty & : \beta < 0 \\ 10 \log (0.15 + 2.5 \sin(\beta) - 1.3 \sin^2(\beta)) & : \beta \geq 0 \end{cases} \quad (2.77)$$

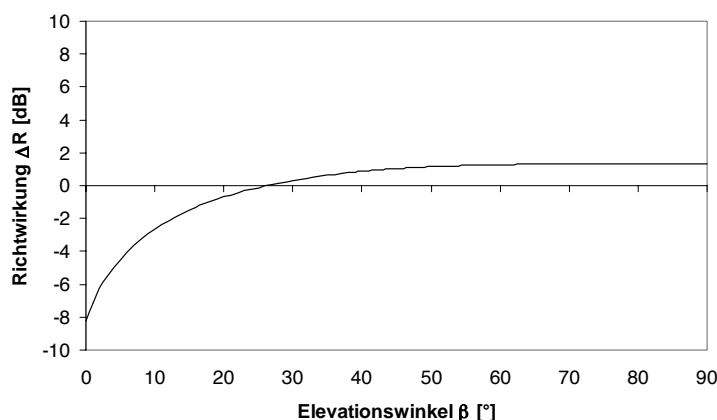


Abbildung 2.25: Richtwirkungskorrektur ΔR der Sekundärquellen in Funktion des Elevationswinkels β .

Die Integration in *sonRAIL* erfolgt durch entsprechende Modifikation des Dämpfungsterms $A_{\text{Basic},f}$. Für die Ausbreitungsrechnung werden nebst dem Direktschallpfad der oben eingeführte Pfad via spiegelnde Reflexion an der gegenüberliegenden Einschnittwand sowie der Anteil der Sekundärquellen betrachtet.

2.3.4 Berücksichtigung von Wettereinflüssen

2.3.4.1 Übersicht

Meteorologische Parameter beeinflussen die Schallausbreitung in verschiedener Weise:

1. Temperatur- und Windgeschwindigkeitsgradienten mit der Höhe

Die bedeutendsten meteorologischen Einflüsse auf die Schallausbreitung werden durch Temperatur- und Windgeschwindigkeitsgradienten mit der Höhe hervorgerufen. Diese führen zu einem Kippen der Wellenfronten und haben eine Schallausbreitung entlang gekrümmter Bahnen zur Folge. Im Vergleich zur Schallausbreitung in einem homogenen, ruhenden Medium wird dadurch die Wirkung von Hindernissen beeinflusst. Bei nach unten gekrümmten Schallstrahlen können Hindernisse überstiegen werden, selbst wenn die Sichtlinie zwischen Quelle und Empfänger unterbrochen ist. Entsprechende Situationen werden als förderlich bezeichnet. Umgekehrt kann es im gegenteiligen Fall, d.h. bei hinderlichen Situationen, zu deutlichen Pegelabsenkungen kommen, obwohl freier Blick zwischen Quelle und Empfänger besteht. In diesem Fall spricht man von der Ausbildung einer akustischen Schattenzone. Für grössere Distanzen und bodennahe Ausbreitung können durch diese Effekte im Vergleich zu neutralen Ausbreitungsbedingungen Pegelerhöhungen um bis zu 15 dB und teilweise sogar noch deutlichere Pegelreduktionen im Schattenfall auftreten. In *sonRAIL* werden diese Effekte mit Hilfe eines Schallstrahlverfolgungsalgorithmus abgebildet (siehe Abschnitt 2.3.4.3).

Bei förderlichen Situationen mit Schallpfaden welche sich über längere Distanzen in unmittelbarer Bodennähe ausbreiten, kann es aufgrund der Krümmung der Schallstrahlen zu Mehrfach-Bodenreflexionen kommen. Dieses Phänomen kann insbesondere bei der Schallausbreitung über Wasseroberflächen beobachtet werden und führt in grosser Distanz zu einer zusätzlichen Pegelerhöhung. Mit dem in *sonRAIL* implementierten Strahlverfolgungsverfahren können diese Mehrfachreflexionen allerdings nicht berechnet werden.

Als weitere Auswirkung kommt es bei einer Schallausbreitung entlang gekrümmter Schallstrahlen zu einer Veränderung der Bodeneffektspektren (siehe Abschnitt 2.3.2.5). Die Gradienten von Temperatur und Wind, welche gerade in Bodennähe sehr ausgeprägt sind, führen sowohl beim Direktschall als auch bei den Reflexionspfaden zu veränderten Schalllaufzeiten und Schalleinfallswinkeln bzw. Reflexionsfaktoren. Dadurch ändert sich das resultierende Interferenzmuster, so dass es in einzelnen Terzen zu deutlichen Abweichungen kommen kann. Die Auswirkung auf A-bewertete Summenpegel unterliegt jedoch nicht einer eindeutigen Tendenz und ist auch schwer prognostizierbar. Entschärfend ist der Umstand zu werten, dass der A-Pegel relativ unempfindlich auf kleine Frequenzverschiebungen des Interferenzmusters reagiert. Es wurde deshalb beschlossen, im Rahmen von *sonRAIL* auf eine Nachbildung dieses Effektes zu verzichten.

In Abschnitt 2.3.2.15 wurde die Zusatzdämpfung vorgestellt, die sich als Folge von dichtem Bewuchs ergibt. Diese Bewuchsdämpfung wird in Funktion der im bewaldeten Gebiet zurückgelegten Strecke bestimmt. Die ISO-Norm 9613-2 [20], welcher der Ansatz entnommen ist, geht grundsätzlich von leicht förderlichen Bedingungen aus. Unter der Annahme einer Ausbreitung in der Ebene ist deshalb die maximal innerhalb eines Waldes zurück zu legende Strecke in der Norm auf 200 m limitiert. In Abschnitt 2.3.4.8 wird ein Ansatz präsentiert, der die Dämpfung pro Laufmeter gemäss ISO 9613-2 mit den in der Schallstrahlverfolgung bestimmten Schallpfaden kombiniert. Je nach meteorologischen Bedingungen kann es zu grösseren oder kleineren Ausbreitungsdistanzen innerhalb des Waldes und entsprechend zu grösseren oder kleineren Bewuchsdämpfungen kommen.

2. absolute Temperatur und relative Feuchtigkeit

Die absolute Temperatur und die relative Feuchtigkeit beeinflussen die Luftdämpfung. Die Auswirkung auf die resultierenden Immissionspegel ist generell deutlich kleiner als dies aufgrund der Temperatur- und Windgeschwindigkeitsgradienten der Fall ist. Abbildung 2.26 zeigt exemplarisch für 1 und 4 kHz die Abhängigkeit der resultierenden Luftdämpfung von Temperatur und Feuchte. Die Berücksichtigung im Rahmen von *sonRAIL* wird in Abschnitt 2.3.4.9 dargestellt.

3. Mediumsinhomogenitäten und Turbulenzen

Mediumsinhomogenitäten und Turbulenzen führen zu einem zu kurzzeitigen Pegelschwankungen, welche aber im Hinblick auf die in *sonRAIL* anvisierten Grössen keine Rolle spielen. Zum anderen treten jedoch auch Effekte auf, welche durchaus Auswirkungen auf die resultierenden Mittelungspegel haben können. So kommt es zu einer Reduktion des Bodeneffektes als Folge von Kohärenzverlusten verschiedener Schallpfade (Direktschall und Reflexionen). Ausserdem führen Streuungen zu einer Reduktion von Hinderniswirkungen bzw. zu einer Begrenzung des Pegelabfalls in Schattenzonen.

Diese Effekte werden implizit bereits an mehreren Stellen des Basis-Ausbreitungsmodells berücksichtigt, so durch den Kohärenzfaktor im Bodeneffektmodell gemäss Gleichung (2.42) oder durch die Limitierung der

Hinderniswirkung. Auch bei der Berechnung des Meteoeffektes als Folge von Temperatur- und Windgeschwindigkeitsgradienten ist eine entsprechend motivierte Limitierung vorgesehen (siehe Abschnitt 2.3.4.6). Das Ausmass an Inhomogenitäten und Turbulenzen wird jedoch nicht in Funktion des aktuellen Wetters bestimmt. Entsprechende Zusammenhänge sind zum heutigen Zeitpunkt nicht oder nicht mit ausreichender Genauigkeit ermittelbar. Aus diesem Grund werden Annahmen zu mittleren Turbulenzeinflüssen verwendet, welche basierend auf Messerfahrten sowie aus der Literatur abgeleitet wurden. Die Turbulenzeinflüsse werden somit nicht von Wetterlage zu Wetterlage variiert sondern im gesamten Berechnungsmodell als konstant angenommen.

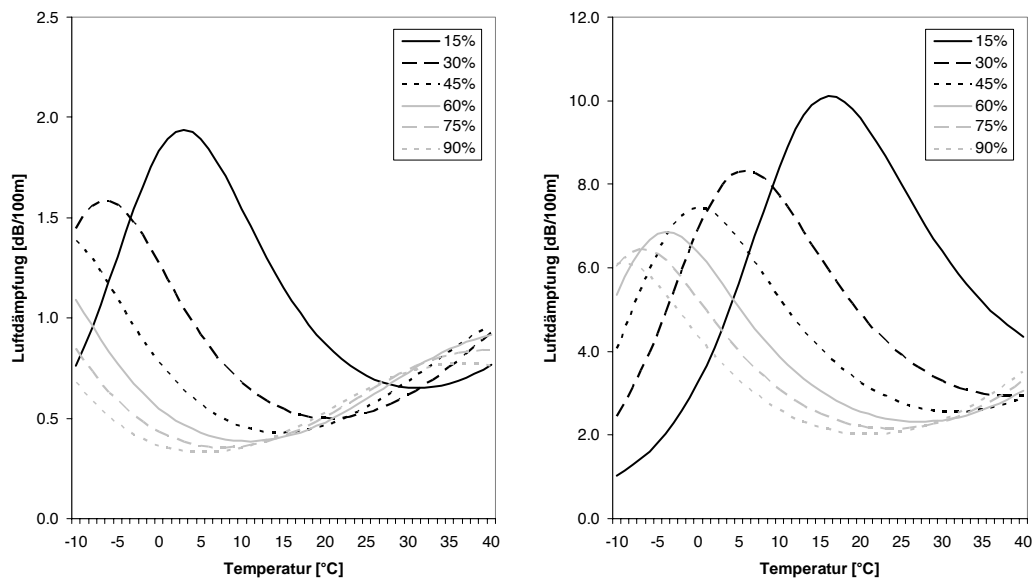


Abbildung 2.26: Einfluss von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit auf die Luftdämpfung, dargestellt für Reintöne von 1 kHz (links) und 4 kHz (rechts).

2.3.4.2 Umsetzung in sonRAIL

Zur Berechnung von Wettereinflüssen mit *sonRAIL* müssen eine oder mehrere Wetterlagen definiert und ihre Auftretenshäufigkeit während der Tageszeit (06 bis 18 Uhr), Abendzeit (18 bis 22 Uhr) und in der Nacht (22 bis 06 Uhr) angegeben werden. Zur Definition einer Wetterlage muss ein Meteoprofil sowie eine Windrichtung spezifiziert werden. In den Meteoprofilen sind die Vertikalprofile von Wind, Temperatur und Feuchte abgelegt, entweder parametrisiert nach einem LinLog-Ansatz oder als absolute Profile. Im LinLog-Format besteht zusätzlich die Möglichkeit, die Parameter für verschiedene Untergrundtypen zu variieren. Detaillierte Informationen zur Modellierung der bodennahen Atmosphäre können dem Kapitel 2.4) entnommen werden. Die Profilkfunktionen enthalten bereits absolute Werte für Temperatur und Feuchte. Optional können diese Parameter, welche zur Berechnung der Luftdämpfung verwendet werden, auch separat definiert werden.

Für jede definierte Wetterlage i wird unter Berücksichtigung der erwähnten Einflüsse eine Ausbreitungsdämpfung $A_{\text{Meteo},i}$ ausgewiesen, welche als Pegeldifferenz einer Berechnung mit meteorologischen Einflüssen im Vergleich zur Basisberechnung ermittelt wird:

$$A_{\text{Meteo},i} = (A_{\text{atm},\text{Meteo},i} - A_{\text{atm},\text{Basic}}) + (A_{\text{fol},\text{Meteo},i} - A_{\text{fol},\text{Basic}}) - D_{\text{met},i} \quad (2.78)$$

mit

$A_{\text{atm},\text{Meteo},i}$ Luftdämpfung unter Berücksichtigung von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit gemäss Wetterlage i . [dB]

$A_{\text{atm,Basic}}$	Luftdämpfung bei Standardbedingungen. [dB]
$A_{\text{fol,Meteo},i}$	Bewuchsdämpfung unter Berücksichtigung gekrümmter Schallstrahlen gemäss Wetterlage i . [dB]
$A_{\text{fol,Basic}}$	Bewuchsdämpfung unter der Annahme einer homogenen Atmosphäre. [dB]
$D_{\text{met},i}$	Auswirkung der Schallausbreitung entlang gekrümmter Schallstrahlen auf die Hinderniswirkung bzw. die Bildung von Schallschatten. Positive Werte bezeichnen dabei förderliche und negative Werte hinderliche Ausbreitungsbedingungen. [dB]

Die resultierende Ausbreitungsdämpfung des Moduls *Meteo* wird gemäss Gleichung (2.79) aus den Meteeffekten der verschiedenen Wettersituationen und ihren Auftretenshäufigkeiten, separat für die Zeiträume Tag, Abend und Nacht, berechnet. Dieser Wert entspricht dem für Langzeitmittelwerte repräsentativen Wettereinfluss:

$$A_{\text{Meteo}} = -10 \cdot \log \left[\frac{1}{\sum G_i} \sum_{i=1}^I G_i \cdot 10^{-0.1 A_{\text{Meteo},i}} \right] \quad (2.79)$$

mit

G_i	Auftretenshäufigkeit der Wetterlage i .
$A_{\text{Meteo},i}$	Meteeffekt der Wetterlage i . [dB]

2.3.4.3 Berechnung gekrümmter Schallstrahlen mittels ray tracing

In *sonRAIL* kommt ein spezielles Strahlverfolgungs-Verfahren (ray tracing) zum Einsatz, welches nicht auf einer statistischen Auswertung zufällig gesendeter Schallstrahlen beruht, sondern gezielt nach relevanten Schallstrahlen sucht. Die Simulation verwendet dabei folgende Daten:

- Quellen- und Empfängerposition.
- Geländeprofil zwischen Quelle und Empfänger.
- Vertikale Temperaturprofile (bez. Höhe über Boden) in Funktion der Untergrundeigenschaften.
- Vertikale Windprofile (bez. Höhe über Boden) in Funktion der Untergrundeigenschaften.
- Windrichtung. Diese wird verwendet, um die Windkomponente in Schallausbreitungsrichtung zu bestimmen.

Die Wind- und Temperaturprofile repräsentieren eine einzelne Meteosituation. Sie fliessen als Inputparameter in die Berechnung ein und werden in einem separaten Arbeitsschritt ermittelt (siehe Kapitel 2.4). Die Geländetypisierung für die variablen Untergrundeigenschaften basiert auf der Klassierung gemäss Tabelle 2.11.

Ray tracing Algorithmen sind gut dazu geeignet, um die Refraktion, d.h. die Krümmungen von Schallstrahlen unter Meteeinfluss auch für komplexe Situationen zu berechnen. Der Rechenaufwand ist dabei aber beachtlich, da ray tracing ein iteratives Verfahren ist. Normalerweise wird diese Iteration mit einem festen Zeitschritt durchgeführt. Um den Rechenaufwand zu reduzieren, wurde eine Variante entwickelt, welche statt dessen ein festes horizontales Raster einsetzt. Beim Einsatz können horizontale Raster von 1 m ohne signifikanten Verlust an Genauigkeit eingesetzt werden. Wenn zusätzlich die Meteogradienten als effektive Schallgeschwindigkeiten tabelliert werden, so werden zur Berechnung eines Iterationsschrittes auch unter Berücksichtigung des Terrains nur noch fünf Gleitkommaoperationen benötigt. Im folgenden Abschnitt wird diese Methode für die Schallausbreitung über flachem Boden mit beliebigem vertikalem effektiven Schallgeschwindigkeitsprofil hergeleitet.

Der Einheitsvektor \vec{n} normal zur Wellenfront lässt sich gut zur Beschreibung der Refraktion einsetzen. Seine vertikale Komponente n_z wird nach Pierce [42] direkt vom lokalen, temperaturabhängigen Schallgeschwindigkeitsgradienten $\partial c / \partial z$ beeinflusst:

$$\frac{\partial n_z}{\partial t} = - \frac{\partial c_{(z)}}{\partial z} \quad (2.80)$$

Unter der Annahme vorwiegend horizontaler Schallausbreitung kann die Refraktion aufgrund eines vertikalen Windgradienten mit dem Konzept der effektiven Schallgeschwindigkeit berücksichtigt werden:

$$\frac{\partial n_z}{\partial t} \approx - \frac{\partial c_{\text{eff}}(z)}{\partial z} \quad (2.81)$$

So wird die lokale effektive Schallgeschwindigkeit c_{eff} bei einer Mitwindsituation als Summe, bei einer Gegenwindsituation als Differenz der lokalen Schallgeschwindigkeit und der horizontalen Windgeschwindigkeit berechnet.

Die Ausbreitung eines Schallstrahlpartikels am Ort \vec{p} zur Zeit t kann iterativ mit Zeitschritt Δt berechnet werden:

$$\vec{p}_{(t+\Delta t)} = \vec{p}_{(t)} + \Delta t \cdot c_{\text{eff}}(p_{z(t)}) \cdot \vec{n}_{(t)} \quad (2.82)$$

Der Einheitsvektor $\vec{n}_{(t)}$ normal zur Schallwellenfront zur Zeit t kann dabei mit Gleichung (2.81) aufdatiert werden. Mit der Einführung eines konstanten, horizontalen Rasters Δx kann der Weg des Schallstrahls mit der vertikalen Komponente p_z von \vec{p} vollständig beschrieben werden:

$$\vec{p}_{[i]} = \begin{pmatrix} i \cdot \Delta x \\ p_{z[i]} \end{pmatrix} \quad (2.83)$$

i bezeichnet dabei den Iterationsschritt. Für die Berechnung der Refraktion wird die Höhendifferenz des Schallstrahls zweier benachbarter Iterationen betrachtet:

$$\Delta p_{z[i]} = p_{z[i]} - p_{z[i-1]} \quad (2.84)$$

Diese Grösse kann unter Verwendung der Vertikalkomponente von \vec{n} iterativ berechnet werden:

$$\Delta p_{z[i+1]} = \Delta p_{z[i]} + \left. \frac{\partial n_z}{\partial t} \right|_{z=p_{z[i]}} \cdot \Delta t \cdot \sqrt{\Delta x^2 + \Delta p_{z[i]}^2} \quad (2.85)$$

Der variable Zeitschritt Δt muss dabei über die effektive Schallgeschwindigkeit ausgedrückt werden:

$$\Delta p_{z[i+1]} = \Delta p_{z[i]} + \left. \frac{\partial n_z}{\partial t} \right|_{z=p_{z[i]}} \cdot \frac{\Delta x^2 + \Delta p_{z[i]}^2}{c_{\text{eff}}(p_{z[i]})} \quad (2.86)$$

Schliesslich kann $\partial n_z / \partial t$ durch Gleichung (2.81) ausgedrückt werden:

$$\Delta p_{z[i+1]} = \Delta p_{z[i]} - \left. \frac{\partial c_{\text{eff}}(z)}{\partial z} \right|_{z=p_{z[i]}} \cdot \frac{\Delta x^2 + \Delta p_{z[i]}^2}{c_{\text{eff}}(p_{z[i]})} \quad (2.87)$$

Dabei kann der in der Gleichung (2.87) enthaltene relative effektive Schallgeschwindigkeitsgradient K zur Steigerung der Rechengeschwindigkeit tabelliert werden. Mit dieser tabellierten Grösse K erhält man folgende Gleichung:

$$\Delta p_{z[i+1]} = \Delta p_{z[i]} - K_{(p_{z[i]})} \cdot (\Delta x^2 + \Delta p_{z[i]}^2) \quad (2.88)$$

Um die Schallausbreitung bei einem gegebenem Topografieprofil $G_{[i]}$ berechnen zu können, ist nur eine kleine Anpassung erforderlich:

$$\Delta p_{z[i+1]} = \Delta p_{z[i]} - K_{(p_{z[i]} - G_{[i]})} \cdot (\Delta x^2 + \Delta p_{z[i]}^2) \quad (2.89)$$

Der ray tracing Algorithmus gemäss Gleichung (2.89) wird sowohl für hinderliche als auch für förderliche Ausbreitungsbedingungen eingesetzt. Abgesehen von diesem Algorithmus handelt es sich um zwei gänzlich verschiedene Verfahren, welche deshalb in den folgenden Abschnitten getrennt beschrieben werden. Die Entscheidung förderliche/hinderliche Ausbreitung ist bei der Zulassung komplexerer Meteoprofile nicht trivial, z.B. wenn die Schallausbreitung direkt über dem Boden förderlich, darüber aber hinderlich ist. Deshalb wird zuerst stets hinderliche Ausbreitung angenommen. Ergibt sich daraus ein Widerspruch, so wird das Verfahren zur Bestimmung unter förderlichen Ausbreitungsbedingungen durchgeführt.

2.3.4.4 Meteeffekt aufgrund von Temperatur- und Windgradienten bei hinderlichen Ausbreitungsbedingungen

Bei Gegenwind und/oder mit der Höhe abnehmenden Temperaturen werden die Schallstrahlen nach oben gekrümmt. Dies kann dazu führen, dass bei direkter Sichtverbindung zwischen Quelle und Empfänger kein Strahl den Empfänger erreicht. Tatsächlich verschwindet der Schalldruck in solchen Schattenzonen aber nicht vollständig, sondern erfährt lediglich eine deutliche Abschwächung. Durch Beugungs- und Streueffekte gelangt weiterhin Schallenergie in diesen Bereich. Während die Beugungseffekte vor allem bei tiefen Frequenzen wirksam sind, sind die Streueffekte für die hohen Frequenzen von Bedeutung. In der Literatur sind verschiedene Lösungen vorgeschlagen worden, um in diesen ray tracing-Schattenzonen gleichwohl eine Pegelaussage zu ermöglichen.

McBride [43] hat ausführliche numerische Simulationen zum Streuprozess an sogenannten *turbules* durchgeführt und die Konsequenzen für die Schallenergie in Schattenzonen untersucht. In Vergleichen mit Messungen konnte eine gute Übereinstimmung nachgewiesen werden.

Es besteht kein prinzipieller Unterschied zwischen der Schattenzone, die sich auf Grund aufwärts gekrümmter Schallausbreitung ergibt und der Schattenzone hinter einem entsprechenden Hindernis bei gerader Schallausbreitung. Für den Fall eines konstanten Schallgeschwindigkeitsgradienten bilden sich kreisförmige Schallstrahlen aus. In der Analogie führt dieser Umstand auf die Hinderniswirkung an zylindrischen Strukturen. Pierce [42] und Berry [44] geben für diesen Fall eine analytische Lösung des Schallfeldes in der geometrischen Schattenzone an. Die numerische Auswertung ist relativ aufwändig und zeigt im Übergang der Schattenzone eine Unstetigkeit.

Heimann [45] schlägt generell für Schattenzonen (bei Hindernissen oder aufwärts gekrümmten Strahlen) einen zufälligen Ablenkprozess der Strahlen vor. Die von der Frequenz, die der Strahl repräsentiert, abhängige Ablenkfunktion wurde anhand von publizierten Testfällen [46] kalibriert. Dieses Verfahren ist jedoch nur für statistisches ray tracing anwendbar.

Im Modell Nord2000 [28] wird vorgeschlagen, das Problem analog zur Schallfeldberechnung hinter einem Hindernis zu lösen. Im Vergleich zur ungestörten Ausbreitung wird ein Bodeneffekt und eine Hinderniswirkung dazugerechnet. Dazu wird der Strahl s konstruiert, der durch den Boden hindurchführend den Empfänger trifft. Der Bodeneffekt wird bestimmt, indem eine Bodenreflexion unter dem Einfallswinkel θ und mit einem Quellen-Empfängerabstand entsprechend der Länge des Strahls s angenommen wird. Die Hinderniswirkung wird mittels eines Ersatzhindernisses berechnet, wobei dessen Höhe und Position entsprechend dem Punkt der maximalen Eindringtiefe des Strahls s in den Boden bestimmt wird. Eine wesentliche Eigenschaft dieses Ansatzes ist der stetige Übergang in die Schattenzone. Bei der Berechnung des Meteeinflusses mit Nord2000 ist jedoch nachteilhaft, dass trotz des komplexen und aufwändigen Algorithmus nur Situationen mit konstanten Wind- und Temperaturgradienten abgebildet werden können, welche in der Natur kaum einmal vorkommen. Der dadurch notwendige Linearisierungsschritt kann Ausbreitungsrechnungen stark verfälschen.

Da die oben beschriebenen Methoden für den Einsatz in *sonRAIL* entweder zu rechenintensiv oder aber zu wenig robust sind, wurde an der Empa ein alternatives Modell entwickelt [47]. Dazu wurden mit FDTD, einem numerischen Verfahren zur wellentheoretischen Simulation der Schallausbreitung, eine Vielzahl solcher Schallschatten-Situationen simuliert. Die oben beschriebenen Streueffekte wurden dabei in einem aufwändigen Verfahren berücksichtigt. Anhand dieser Simulationen wurde ein empirisches ray tracing-Modell entwickelt, welches sich sowohl bezüglich der Genauigkeit als auch der Rechenintensivität für den Einsatz in *sonRAIL* eignet. Die Simulationen wurden zur Modellbildung gegenüber Messungen bevorzugt, da die meteorologische Situation während einer Messung aufgrund der räumlichen und zeitlichen Variabilität und des in verschiedener Hinsicht stochastischen Verhaltens der bodennahen Atmosphäre nur punktuell bestimmt werden kann.

In *sonRAIL* wird im Geländeschnitt zwischen Quelle und Empfangspunkt der in Abschnitt 2.3.4.3 beschriebene ray tracing-Algorithmus eingesetzt und so der Meteeinfluss auf die Ausbreitung charakterisiert. Dabei wird in einem iterativen Verfahren derjenige Schallstrahl gesucht, welcher dem Empfangspunkt möglichst nahe kommt. Wird ein Strahl gefunden, welcher den Empfangspunkt berührt (damit liegt der Empfangspunkt nicht in einem Schallschatten), so wird der Meteeffekt auf null gesetzt.

Empfangspunkte im Schallschatten werden gemäss Abbildung 2.27 mit zwei Parametern charakterisiert. Mit der empirischen Gleichung (2.90) und den durch Vergleich mit den numerischen Simulationen gefundenen Koeffizienten

A_0 und A_1 aus der Tabelle 2.6 wird der spektrale Meteeffekt D_{met} bestimmt.

$$D_{\text{met}} = A_0 + A_1 \cdot \frac{d_R}{l_R} \quad (2.90)$$

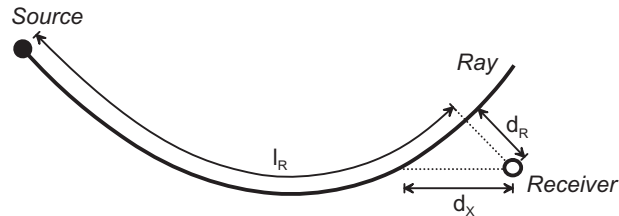


Abbildung 2.27: Die zur Charakterisierung einer Schattzone verwendeten Parameter d_R und l_R .

Frequency [Hz]	A_0 [dB]	A_1 [dB]
50	-0.4	-35.2
63	-0.3	-44.6
80	-0.2	-57.6
100	0.0	-72.1
125	0.7	-91.8
160	1.7	-112.4
200	2.8	-123.1
250	4.3	-119.9
315	5.1	-101.6
400	3.3	-65.9
500	-1.1	-31.6
630	-3.8	-53.4
800	-3.2	-120.0
1000	-2.1	-157.4
1250	-1.1	-188.8
1600	0.2	-264.5
2000	-0.8	-215.5

Tabelle 2.6: Die zur Berechnung des Meteeffekts im Schallschatten benötigten Koeffizienten.

Ist bei einer Ausbreitungssituation die Sichtverbindung unterbrochen, muss der Algorithmus erweitert werden, da sonst für diese Situationen auch unter neutralen Ausbreitungsbedingungen ein Meteeffekt ausgewiesen wird. Um dies zu verhindern, werden die Parameter d_R und l_R stets auch für geradlinige Schallausbreitung bestimmt (siehe Abbildung 2.28). Kann auf diese Weise mit Gleichung (2.90) eine Dämpfung berechnet werden, wird diese vom eigentlichen Meteeffekt abgezogen.

Die zur Modellbildung eingesetzten numerischen Simulationen zeigen im Bereich der Schallschattengrenze bei mittleren Frequenzen Pegelerhöhungen im Vergleich zur neutralen Ausbreitungsbedingung. Dieses Phänomen lässt sich dadurch erklären, dass eine Schallwelle bei hinderlichen Ausbreitungsbedingungen von der Schallschattengrenze aus in das darüberliegende Gebiet gelangt. Dies führt zu lokalen Verdichtungen im Schallfeld. Da der Bereich einer solchen Verdichtung auf wenige Meter beschränkt und aufgrund der turbulenten Natur der Atmosphäre auch nicht stabil ist, ist die Berücksichtigung positiver Meteeffekte bei hinderlichen Ausbreitungsbedingungen in der Praxis meist nicht sinnvoll. Positive Meteeffekte dieser Art werden deshalb bei *sonRAIL* im Spektrum auf Null gesetzt (siehe auch Abbildung 2.29).

Um Unstetigkeiten im Modell zu verhindern, wird der Meteeffekt an der Schallschattengrenze linear ausgeblendet. Dazu werden die Pegel D_{met} des mit Gleichung (2.90) berechneten Spektrums für Situationen mit $d_R/l_R < 0.05$ mit dem Faktor K_{fade} gewichtet:

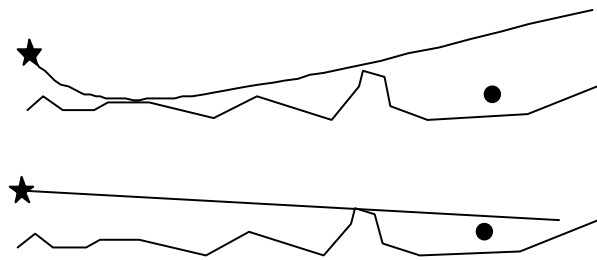


Abbildung 2.28: Suche des relevanten Schallstrahls zur Berechnung des Meteeffektes unter hinderlichen Ausbreitungsbedingungen. Der gefundene Strahl berührt, abhängig von der Meteosituation, oft den Boden nicht. Unten ist die Referenzsituation mit geradliniger Schallausbreitung dargestellt.

$$K_{\text{fade}} = 20 \frac{d_R}{l_R} \quad (2.91)$$

Abbildung 2.29 zeigt den Meteeffekt für verschiedene Werte von d_R/l_R . Dabei liegt der kleinste Wert mit $d_R/l_R < 0.025$ innerhalb des Ausblendungs-Bereichs ($K_{\text{fade}} = 0.5$). Das resultierende Spektrum muss danach noch wie oben beschrieben limitiert werden, da zwischen ca. 200 Hz und 400 Hz positive Meteeffekte auftreten.

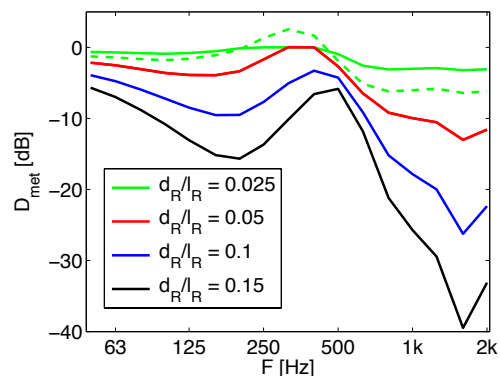


Abbildung 2.29: Die spektralen Meteeffekte D_{met} des Modells für unterschiedliche Werte für d_R/l_R . Die gestrichelte Linie zeigt das für $d_R/l_R = 0.025$ berechnete Spektrum gemäss Gleichung (2.90), welches aber aufgrund der Nähe zur Schallschattengrenze noch begrenzt und mit einem Faktor gewichtet werden muss.

2.3.4.5 Meteeffekt aufgrund von Temperatur- und Windgradienten bei förderlichen Ausbreitungsbedingungen

Bei förderlichen Ausbreitungsbedingungen wird als Meteeffekt ausschliesslich die Reduktion der Hinderniswirkung aufgrund gekrümmter Ausbreitungswege berechnet. Existieren Hindernisse, welche unter neutralen Ausbreitungsbedingungen die Sichtverbindung unterbrechen, so wird der Schallpfad in der vertikalen Ebene vom Quell- zum Empfangspunkt mit ray tracing analysiert (siehe Abschnitt 2.3.4.3). Dabei wird für jede Pfadstrecke (unter neutralen Ausbreitungsbedingungen) der aufgrund des Meteeinflusses gekrümmte Schallstrahl mit gleichem Start- und Endpunkt gesucht. Abbildung 2.30 illustriert in zwei Schritten die Suche nach dem Direktschallpfad über eine Hinderniskante. Gezeigt ist das Gelände inklusive einer Hinderniskante im Profil mit einem Quellen- und einem Empfangspunkt. Abbildung 2.30 (a) illustriert die Suche nach dem Direktschall-Pfad zur Hinderniskante, Abbildung 2.30 (b) zeigt die Pfad-Suche von der Hinderniskante zum Empfänger.

Die Analyse des gekrümmten Direktschall-Pfades in Abbildung 2.31 (a) umfasst die Längen d_Q und d_E der Pfadabschnitte sowie der Winkel β zwischen den Tangenten an den ein- und ausfallenden Schallstrahlen auf der Hinderniskante. Die Beugungssituation an der Hinderniskante wird durch eine winkel- und längentreue Transformation

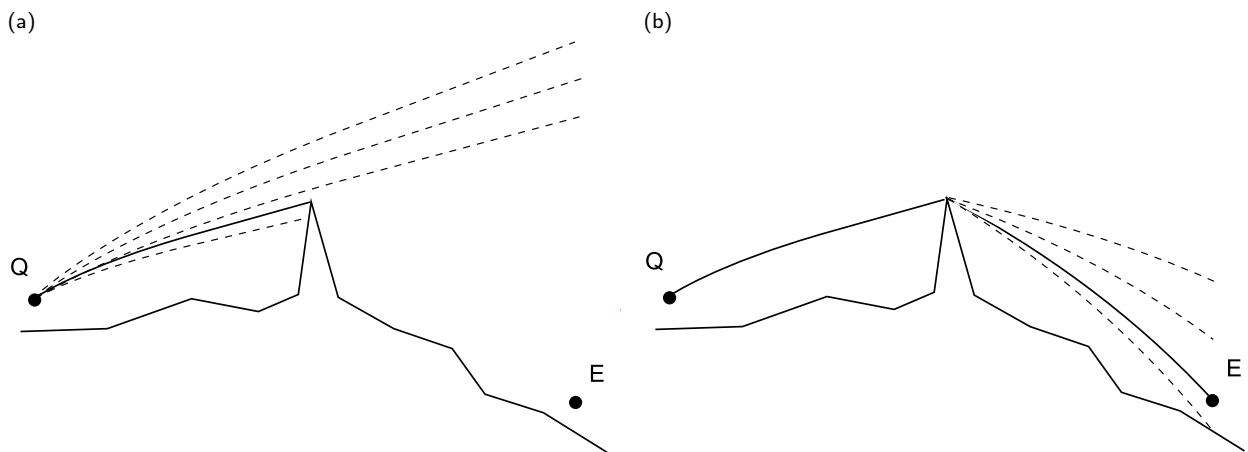


Abbildung 2.30: Suche nach dem Direktschall-Pfad über eine Hinderniskante mit dem iterative ray tracing Verfahren (siehe Abschnitt 2.3.4.3) vom Quellenpunkt Q zum Empfangspunkt E .

nicht wesentlich beeinflusst. Daher entspricht die Hinderniswirkung der transformierten Situation unter neutralen Ausbreitungsbedingungen der Hinderniswirkung der originalen Situation unter den ursprünglichen förderlichen Ausbreitungsbedingungen. Abbildung 2.31 (b) zeigt den transformierten Pfad mit der reduzierten Hinderniskantenhöhe h' .

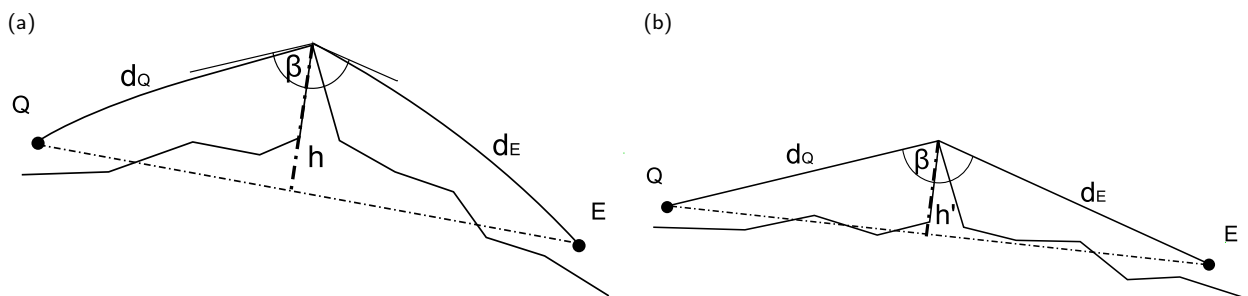


Abbildung 2.31: Längen- und winkeltreue Transformation des Direktschall-Pfads über eine Hinderniskante.

Für den transformierten Schallpfad wird mit Gleichung (2.32) eine spektrale Hinderniswirkung $D_{z, \text{Meteo}}$ berechnet. Die Bedingung, dass $z \geq 0$ sein muss gilt jedoch nicht. Es wird somit auch eine Hinderniswirkung ausgewiesen, wenn die Sichtlinie nicht unterbrochen ist. Die Pegeldifferenz zur Hinderniswirkung $D_{z, \text{Neutral}}$, welche unter Annahme neutraler Meteobedingungen berechnet wird, stellt den gesuchten Meteeffekt D_{met} dar:

$$D_{\text{met}} = D_{z, \text{Neutral}} - D_{z, \text{Meteo}} \quad (2.92)$$

Das Verfahren wurde mit wellentheoretischen Simulationen (FDTD) für Ausbreitungen bis 200 m überprüft. Dabei traten kleinere Differenzen auf, die u.a. darauf zurückzuführen sind, dass ein Pfad als Linie keine Breite besitzt und somit beliebig nahe am Boden verlaufen kann, wo die Refraktion besonders stark ist. Als Optimierung des ray tracing Verfahrens wird deshalb die Refraktion etwas abgeschwächt. Dazu wird im Refraktionsalgorithmus nicht der eigentliche relative effektive Schallgeschwindigkeitsgradient $K_{(h)}$ (siehe Gleichung (2.88)), sondern die Grösse $K_{(h)}^*$ eingesetzt:

$$K_{(h)}^* = 0.8 \cdot K_{(h+0.8)} \quad (2.93)$$

Hinderniskanten können sich aufgrund der Pfadstreckung so verschieben, dass sie die Sichtverbindung nicht länger unterbrechen. Dies entspricht der Situation, bei der aufgrund der gekrümmten Schallwege ein Hindernis überstiegen wird.

Wird bei einer förderlichen Ausbreitungssituation die Sichtverbindung nicht unterbrochen, so wird der Geländeschnitt (inklusive Hinderniskanten) nach dem Ort abgesucht, welcher bei einer Berechnung der Hinderniswirkung nach Mae-kawa die grösste Hinderniswirkung ergeben würde (Ort mit grösster Pfadlängendifferenz Z , wobei alle $Z < 0$ sind). Danach wird das oben beschriebene Verfahren mit dem gefundenen Ort als einzelne Hinderniskante aufgerufen. Auf diese Weise lässt sich der Meteeffekt jeder förderlichen Ausbreitungssituation als Pegeldifferenz zweier (ein- oder mehrfacher) Hinderniswirkungen berechnen.

2.3.4.6 Begrenzung des Meteeffektes aufgrund von Temperatur- und Windgradienten

Um Extremwerte in speziellen Situationen zu vermeiden, werden sowohl positive (verstärkende) als auch negative Meteeffekte begrenzt. Dazu wird bereits das fein aufgelösten Pegelspektrum (vor dem zusammenfassen in Terzbänder) für jede Frequenz zwischen -20 dB und +15 dB begrenzt.

Zusätzlich werden bei hinderlichen Ausbreitungsbedingungen die Resultate der Berechnung mit gekrümmten Schallstrahlen und der Referenzberechnung getrennt spektral begrenzt, so dass folgende Bedingung erfüllt ist (mit der Frequenz f und dem Parameter $D_{min} = -20$ dB).

$$D_{met} > \begin{cases} D_{min} - 3\text{dB} & \text{für } D_{min} > -0.1 \cdot f \\ -0.1 \cdot f - 3\text{dB} & \text{für } D_{min} \leq -0.1 \cdot f \end{cases}$$

2.3.4.7 Diskussion

Mit dem für förderliche Ausbreitungssituationen eingesetzten Algorithmus (Abschnitt 2.3.4.5) berechnet sich der Meteeffekt als Differenz zweier Hinderniswirkungen. Die Berechnung dieser Hinderniswirkungen erfolgt entsprechend dem *sonRAIL*-Basismodell gemäss ISO 9613-2. Zum Vergleich wurde dieses Verfahren zur Bestimmung des Meteeffektes einer Variante gegenübergestellt, welche zur Berechnung der Hinderniswirkung eine analytische Lösung von Pierce [42] verwendet. Diese beschreibt präzise die Situation ohne Boden, mit einer perfekten Halbebene als Hindernis. Die Lösung kann auch zur Berechnung des Meteeffektes für Situationen mit mehrfacher Hinderniswirkung verwendet werden, da sich dabei der Meteeffekt für jede Hinderniskante gesondert berechnen lässt.

Wie es sich aber zeigt, führt das Verfahren von Pierce zu unerwünschten Nebeneffekten in Situationen ohne eigentliche Hindernisse. In Abbildung 2.32 werden beide Berechnungsvarianten beispielhaft für eine flache Ausbreitungssituation ohne Hindernisse mit Quellenhöhe 0.4 m und Empfängerhöhe 4.0 m miteinander verglichen. Bei den förderlichen Situationen weist der mit *sonRAIL* berechnete Meteeffekt einen spektralen Verlauf auf, welcher sowohl für tiefe als auch für hohe Frequenzen gegen 0 dB geht (siehe Abbildung 2.32). Der Meteeffekt beim analytischen Lösungsansatz ist vor allem bei grösseren Distanzen ausgeprägter. Dies ist nicht überraschend, weist doch die analytische Lösung für die Halbebene höhere Dämpfungen aus in Situationen, welche die Sichtverbindung nur knapp unterbrechen. Zusätzlich treten im mit dem analytischen Lösungsansatz berechneten Spektrum ausgeprägte Interferenzmuster auf. Diese können als Interferenzen des Direktschalls mit Sekundärquellen interpretiert werden, welche sich auf virtuellen Hinderniskanten befinden. Sie sind in unserem Fall unerwünscht, da bei einer Mitwindsituation ohne reales Hindernis keine Lokalisierung von Sekundärquellen erfolgen kann. Somit erweist sich der in *sonRAIL* verwendete, einfachere Ansatz auch als plausibler.

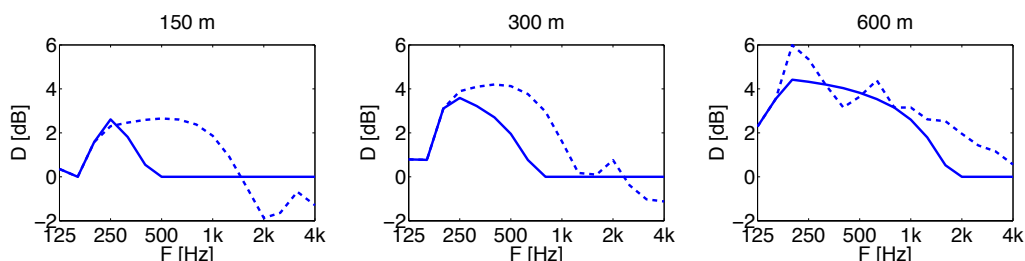


Abbildung 2.32: Mit *sonRAIL* berechneter Meteeffekt für eine flache Ausbreitungssituation mit Quellenhöhe 0.4 m und Empfängerhöhe 4.0 m bei 3 m/s Mitwind in 10 m Höhe. Angegeben sind die spektralen Pegeldifferenzen bezüglich neutraler Ausbreitung für die 4 m hohen und 150, 300 resp. 600 m entfernten Empfängerpunkte. Die gestrichelte Linie zeigt den Meteeffekt für eine Variante des Modells, bei welchem die äquivalente Hinderniswirkung gemäss dem analytischen Ansatz nach Pierce berechnet wird.

Besonders bei Situationen im Schallschatten wird die Ausbreitung durch die Wind- und Temperaturgradienten im ersten Meter über Boden entscheidend beeinflusst. Um dies zu verdeutlichen, wurde eine Mitwindsituation für verschiedene Bodenrauigkeiten berechnet. Dabei wurde das logarithmische Windprofil $v(z)$ so gewählt, dass die Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe stets gleich blieb:

$$v(z) = v_m \cdot \frac{\ln(z/z_0 + 1)}{\ln(z_m/z_0 + 1)} \quad (2.94)$$

v_m bezeichnet dabei die auf der Messhöhe z_m gemessene Windgeschwindigkeit, z_0 die Rauigkeitslänge des logarithmischen Wandgesetzes. Für Grasland und Ackerflächen bewegt sich dieser Wert von z_0 zwischen 0.005 m und 0.1 m [48]. Diese beiden Eckwerte wurden für die Berechnung verwendet. Abbildung 2.33 zeigt die resultierenden Meteeffekte. Mit abnehmender Rauigkeitslänge werden die Ausbreitungsbedingungen dabei stärker hinderlich. Betrachtet man die beiden recht ähnlichen Windprofile, so sind die grossen Pegelunterschiede bemerkenswert. Die Bestimmung der korrekten Rauigkeitslänge kann sich somit in der Praxis als problematisch erweisen. Bei Mitwindsituationen ist dieser Einfluss grundsätzlich kleiner, da sich dort die zur Charakterisierung der Situation relevanten Schallstrahlen in grösserer Höhe befinden.

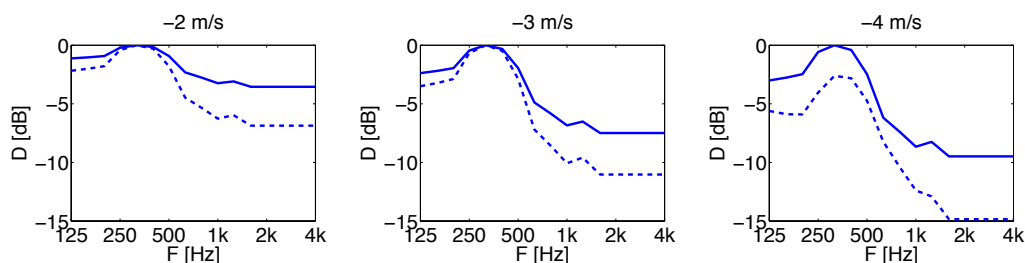


Abbildung 2.33: Mit *sonRAIL* berechneter Meteeffekt für eine flache Ausbreitungssituation mit Quellenhöhe 0.4 m und Empfängerhöhe 4.0 m bei 4 m/s Gegenwind in 10 m Höhe. Angegeben sind die spektralen Pegeldifferenzen bezüglich neutraler Ausbreitung für den 150 m entfernten Empfängerpunkt. Die ausgezogene Kurve zeigt den Meteeffekt bei geringer Bodenrauigkeit mit $z_0 = 0.005$ m, die gestrichelte Kurve den Meteeffekt mit $z_0 = 0.1$ m.

sonRAIL wurde bewusst so definiert, dass bei hinderlicher Ausbreitung für Frequenzen über 2 kHz ein tendenziell moderater Meteeffekt ausgewiesen wird. Der Grund dafür ist, dass bei diesen Situationen der an Luft-Inhomogenitäten, lokalen Schwankungen von Temperatur, Windrichtung und -stärke, gestreute Schall den Pegel bestimmt. Diese Luft-Inhomogenitäten wurden bei den Simulationen zur Abstimmung des *sonRAIL* -Meteomodells berücksichtigt, sie sind jedoch von vielen nur schwer messbaren Parametern abhängig. Der simulierte Meteeffekt wurde ausserdem zu hohen Frequenzen hin approximiert, da aufgrund der verfügbaren Rechenleistung keine Frequenzen über 2.5 kHz simuliert werden konnten.

2.3.4.8 Verwendung gekrümmter Schallstrahlen zur Berechnung der Bewuchsdämpfung

Die Bewuchsdämpfung $A_{fol,met}$ wird ebenfalls mit den distanzabhängigen Dämpfungstermen gemäss Tabelle 2.5 auf Seite I-37 berechnet. Als Erweiterung des in der ISO-Norm 9613-2 [20] vorgeschlagenen Verfahren wird jedoch die effektiv im Wald zurückgelegte Strecke des Direktschalls gemäss dem in Abschnitt 2.3.4.3 vorgestellten Ray-tracing-Verfahren verwendet. Die Limitierung der im Wald zurückgelegten Ausbreitungsdistanz auf maximal 200 m wird aufgehoben. Die Waldhöhe wird gemäss den Vorgaben aus Kapitel 2.3.6 auf 20 m festgelegt.

2.3.4.9 Meteorologische Einflüsse auf die Luftdämpfung

Die Luftdämpfung wird auch unter Berücksichtigung des lokalen Wetters gemäss ISO 9613-1 [19] berechnet, analog zum Ansatz im Basismodell gemäss Abschnitt 2.3.2.4. Im Gegensatz zum Basismodell werden jedoch nicht die Standardwerte von Temperatur und Feuchte verwendet, sondern vom Benutzer entsprechend den lokalen Bedingungen definierte Werte. Zusätzlich wird berücksichtigt, dass sich Temperatur und Feuchte mit der Höhe über Boden verändern. Als Basis werden dazu die Vertikalprofile des Standard-Bodentyps 'Z_Uebrige' gemäss Tabelle 2.11 der entsprechenden Wetterlage verwendet. Die mittlere Ausbreitungshöhe über Boden wird dabei aus dem Direktschallpfad bestimmt, wobei gerade Schallstrahlen zum Einsatz kommen. Diese Vereinfachung sowie der Verzicht auf eine

Variation der Vertikalprofile je nach Untergrund erscheint im Hinblick auf die kleinen resultierenden Abweichungen und auf die Bedeutung des Effektes als Ganzem zulässig.

2.3.5 Reflexionen an künstlichen Objekten wie Gebäuden und Schallschirmen

2.3.5.1 Einleitung

Eine Schallwelle, die auf ein künstliches Objekt auftrifft wird je nach Materialeigenschaften und Frequenz zu unterschiedlichen Anteilen reflektiert oder absorbiert; die Durchdringung des Materials als dritte Variante kann in aller Regel vernachlässigt werden. Gebäude weisen in den meisten Fällen akustisch harte Oberflächen auf, weshalb kaum Absorption auftritt und die Schallwellen praktisch vollständig reflektiert werden. Bei speziell konditionierten Oberflächen wie z.B. absorbierenden Lärmschirmen wird die Reflexion hingegen deutlich gemindert.

Bei Reflexionen gilt es zwischen spiegelnden und diffusen Reflexionen, d.h. Streuungen zu unterscheiden. Der fundamentale Unterschied zwischen spiegelnden und diffusen Reflexionen liegt im "Gedächtnis". Während diffuse Reflexionen die auf den Reflektor auftreffende Leistung unabhängig von der Einfallrichtung weitergeben, hängt bei spiegelnder Reflexion die bevorzugte Abstrahlrichtung vom Schalleinfall und damit bei Mehrfachreflexionen von der ganzen Vorgeschichte ab. Diese Erinnerung bei spiegelnder Reflexion ist in der spezifischen Schalldruckverteilung auf jeder Reflektoroberfläche gespeichert. Für die Modellierung spiegelnder Reflexionen hat dieser Umstand entscheidende Bedeutung. Die klassische Lösung zu diesem Problem verwendet die Konstruktion von Spiegelquellen, allerdings unter Vernachlässigung der endlichen Reflektorgrößen.

Hinsichtlich der Bedeutung der Reflexionen sind zwei Fälle zu unterscheiden:

Im ersten Fall besteht über einen grossen Aspektwinkel eine direkte Sichtverbindung vom Empfängerpunkt zur Quelle, z.B. in einer Häuserschlucht. Die Reflexionsanteile (auch mehrfach) liegen dann in der gleichen Größenordnung wie der Direktschall, so dass sich Unsicherheiten der Reflexionsberechnung abgeschwächt auf den Gesamtfehler auswirken. Vom akustischen Standpunkt aus gesehen wird diese Situation insofern vereinfacht, als keine Abschirmwirkungen zu berücksichtigen sind.

Der zweite Fall ist dadurch gekennzeichnet, dass der Direktschall weitgehend abgeschirmt ist, der Empfänger aber über Reflexionen mit bedeutenden Energieanteilen versorgt wird. In diesen Situationen kommt der präzisen Berechnung der Reflexionsanteile eine sehr grosse Bedeutung zu, da diese praktisch ausschliesslich den Immissionspegel bestimmen.

Exemplarisch kann der Einfluss von Reflexionen mit Massstabsmodelluntersuchungen ermittelt werden [49]. Für eine grossflächige Anwendung sind jedoch Rechenverfahren notwendig. In der Literatur werden verschiedene Ansätze zur Berechnung der Schallausbreitung in überbautem Gebiet vorgestellt. Eine exzellente Übersicht ist in [50] und [51] zu finden.

Eine erste Kategorie von Methoden bilden empirische Grobmodelle, die integral und in einem statistischen Sinne die abschirmende und reflektierende Wirkung von Häusern und anderen Strukturen beschreiben [52], [53], [20], [54]. Solche Modelle basieren auf wenigen Situationsparametern wie z.B. Bebauungsdichte und Länge des Schallwegs in dieser Zone und sind entsprechend grob, d.h. sie können spezifische lokale Gegebenheiten nicht detailliert abbilden. Die zweite Kategorie von Modellen bildet die Schallausbreitung lokal spezifisch nach. Dazu werden Spiegelquellenmodelle, ray tracing Verfahren oder Energieaustauschmethoden [55] bzw. radiosity Ansätze vorgeschlagen. Lee [56] und Lu [57] schlagen Modelle vor, die auf Spiegelquellenansätzen basieren und damit glatte Reflexionsflächen behandeln können. Diffuse Reflexionen an stark strukturierten Oberflächen können nach der Vorstellung eines Diffusionsprozesses [58], [59] oder mit der *radiosity* Methode [60] modelliert werden. Dabei steht die Modellidee im Zentrum, die Begrenzungsflächen geeignet zu unterteilen und zwischen stellvertretenden Punkten akustische Energie auszutauschen [55].

2.3.5.2 Modellanforderungen

Das Modell muss in der Lage sein, die Auswirkungen von Reflexionen (sowohl einfach als auch mehrfach) auf das Schallfeld korrekt abzubilden. Dabei sollten folgende Aspekte mitberücksichtigt werden:

- Modellierung von diffus streuenden und spiegelnden Reflexionen, wobei auch Mischformen auftreten können. Die Aufteilung in einen diffusen und einen spiegelnden Anteil sollte frequenzabhängig sein.
- Modellierung des Effektes der endlichen Reflektorfläche, insbesondere bei spiegelnder Reflexion. Bei streifendem Einfall und tiefen Frequenzen können benötigte Flächen für vollständige Reflexionen deutlich grösser als typische Fassadenflächen werden.

- Modellierung des Effekts einer Teilreflexion, auch wenn der Reflexionspunkt nicht auf der Reflektorfläche liegt.

Abgesehen von wellentheoretischen Ansätzen mit genügend feiner Diskretisierung (typisch $1/6$ bis $1/10$ der kürzesten Wellenlänge) können obige Modellanforderungen nicht sinnvoll mit einem einzigen universellen Formalismus erfüllt werden. Deshalb wird hier eine Aufteilung in inkohärente (diffuse) bzw. kohärente (phasenempfindliche) Anteile mit entsprechend separater Modellierung angenommen. Für Frequenzen mit Wellenlängen grösser als die Reflexionsstrukturtiefe wird kohärent, für Frequenzen mit kleineren Wellenlängen inkohärent gerechnet. Beiden Ansätzen ist gemein, dass sie die Begrenzungsflächen geeignet diskretisieren (Abbildung 2.34) und iterativ einen Intensitäts- bzw. Schalldruckaustausch vornehmen [61].

Vereinfachend wird angenommen, dass

- die Reflexion am Boden verlustlos mit einer Verdopplung des Schalldruckeffektivwertquadrats erfolgt. Dies kann durch Verdopplung der Quellenleistung bzw. Annahme der Abstrahlung in den Halbraum abgebildet werden.
- Reflexionen nur bei existierender Sichtverbindung auftreten (d.h. Beugungseffekte werden ignoriert).
- die Luftdämpfung basierend auf dem Abstand Quelle-Empfänger berechnet wird.

Die Strategie wird wie folgt umgesetzt:

1. In einem ersten Schritt werden die Schalldruckverteilungen auf den Reflektorflächen berechnet.
2. Für einen Empfängerpunkt im Raum wird dann der Reflexionsanteil durch Oberflächenintegration über die Reflektoren bestimmt. Für inkohärente Reflexionen wird über die Oberflächenintensitäten integriert, für kohärente Reflexionen wird mittels Kirchhoff-Helmholtz-Integral über den Schalldruck integriert.
3. Verlustbehaftete Reflexionen werden durch eine entsprechende Dämpfung der Oberflächen-Schalldrucke und -Intensitäten berücksichtigt.

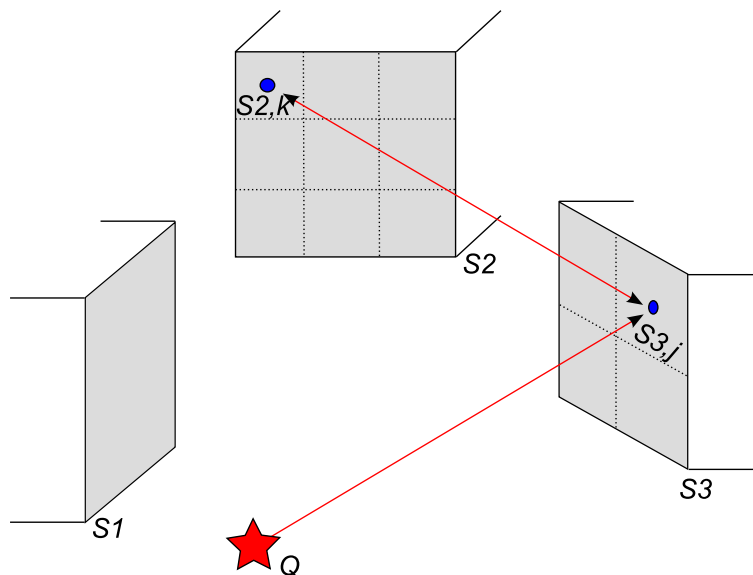


Abbildung 2.34: Situation zur Schallausbreitung im überbauten Gebiet. Die Geometrie ist durch die Quelle Q und drei reflektierende Flächen S_1, \dots, S_3 gegeben. Jede Fläche S_i wird in eine geeignete Zahl Teilflächen $S_{i,j}$ unterteilt.

2.3.5.3 Diffusor-Modell für inkohärente Reflexionsanteile

Für die Modellierung der inkohärenten Reflexionsanteile muss die auf eine Reflektorfläche auftreffende Schallleistung ermittelt werden. Diese ergibt sich aus dem Produkt der Fläche und der Intensitätsnormalkomponente. Diese wiederum ist durch das Produkt der Normalkomponenten der Schallschnelle und dem Schalldruck gegeben. Die

Normalkomponente der Schallschnelle hängt von der letzten und nur der letzten Absenderposition ab. Ein Algorithmus der diesen Energieaustausch nachbildet, muss kein weiter zurückreichendes Gedächtnis aufweisen. Der Fall des ganz streifenden Schalleinfalls an einem Reflektor führt zu einer verschwindenden Reflexion, da die Normalkomponente der Schnelle verschwindet.

Für die auf ein Flächenelement auftreffende Normalkomponente der Intensität kann geschrieben werden:

$$dI = \frac{W}{4\pi r_1^2} \cos \phi \quad (2.95)$$

mit

W	Leistung der Quelle
r_1	Abstand Quelle-Flächenelement
ϕ	Winkel der Verbindung Quelle-Flächenelement zur Flächennormalen

Die auf das Flächenelement auftreffende Leistung dW ergibt sich durch Multiplikation mit der Fläche dS . Es wird angenommen, dass diese Leistung gemäss dem Lambert'schen Gesetz zurückgeworfen wird. Die Intensität $dI(1m, \psi)$ in 1 m Abstand unter dem Winkel ψ bzgl. der Flächennormalen ist gegeben durch:

$$dI(1m, \psi) = I_0 \cos \psi \quad (2.96)$$

Die Konstante I_0 in Gleichung (2.96) wird bestimmt unter Ausnützung der Kenntnis, dass die reflektierte Leistung gleich der einfallenden ist. Dazu wird eine Integration über eine Halbkugel mit 1 m Radius vollführt und der einfallenden Leistung dW gleichgesetzt:

$$\int_{\text{Halbkugelfl.}} dI(1m, \psi) = \int_0^{\pi/2} I_0 \cos \psi 2\pi \sin \psi d\psi = I_0 2\pi \left. \frac{\sin^2 \psi}{2} \right|_0^{\pi/2} = I_0 \pi \quad (2.97)$$

Aus der Gleichsetzung

$$dW = I_0 \pi \quad (2.98)$$

lässt sich I_0 bestimmen. Die von dS herrührende Intensität an einem Empfangspunkt im Abstand r_2 unter dem Winkel ψ bzgl. der Flächennormalen wird schliesslich

$$dI(r_2, \psi) = \frac{dW}{\pi} \cos(\psi) \frac{1}{r_2^2} \quad (2.99)$$

Formulierung des Algorithmus Als Schallfeldgrösse wird die Normalkomponente der Intensität auf den Begrenzungsflächen verwendet.

Schritt 1: Die Flächen S_i werden je in Teilflächen $S_{i,j}$ der Grösse ΔS unterteilt (Abbildung 2.34). i bezeichnet die Flächennummer, j steht für die Nummer der Teilfläche.

Schritt 2: Die nullte Schätzung der Intensitätsverteilung $I_{0,i,j}$ wird 0 gesetzt. Die erste Schätzung der Intensitätsverteilung $I_{1,i,j}$ auf den Flächen S_i wird gefunden, indem eine Ausbreitung von der Quelle zur Fläche berechnet wird:

$$I_{1,i,j} = \frac{W_q}{4\pi r^2} \cos(\psi) \quad \psi \leq \frac{\pi}{2} \quad (2.100)$$

mit

W_q Leistung der Quelle
 r Abstand von der Quelle
 ψ Winkel der Geraden von der Quelle zum Flächenpunkt mit der Flächennormalen.

Für Winkel $\psi > \frac{\pi}{2}$ wird $I = 0$ gesetzt.

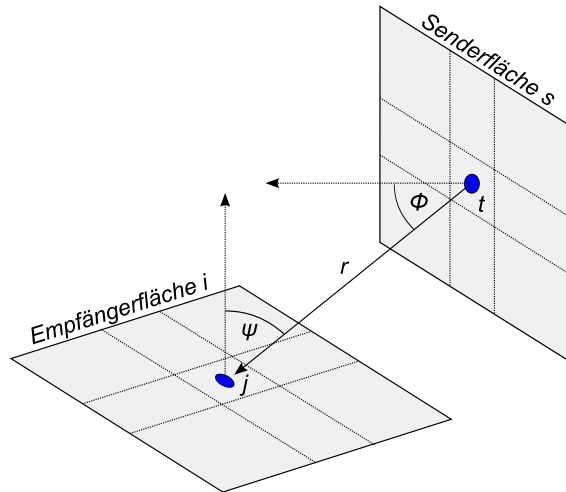


Abbildung 2.35: Situation zum iterativen Aufdatierungsprozess. Die Geometrie zeigt den von Teilfläche t auf der Oberfläche s herrührenden Beitrag an die Teilfläche j auf der Oberfläche i .

Schritt 3: Die n -te Schätzung der Intensitätsverteilung $I_{n,i,j}$ auf den Flächen S_i wird gefunden, indem die Beiträge der letzten Änderungen der Oberflächenpunkte dazu addiert werden:

$$I_{n,i,j} = I_{n-1,i,j} + \frac{1}{\pi} \sum_s \sum_t (1 - \alpha_s) (I_{n-1,s,t} - I_{n-2,s,t}) \frac{1}{r^2} \cos(\phi) \cos(\psi) \Delta S \quad \psi \leq \frac{\pi}{2}, \phi \leq \frac{\pi}{2} \quad (2.101)$$

mit

ϕ Winkel der Geraden vom Sender- zum Empfängerpunkt mit der Normalen zur Senderfläche.
 α_s Absorptionskoeffizient der Senderfläche s .

Man beachte, dass die Beiträge der Nachbarpunkte auf der eigenen Fläche S_i verschwinden. Für $\psi > \frac{\pi}{2}$ oder $\phi > \frac{\pi}{2}$ wird $I = 0$ gesetzt.

Schritt 4: Die in Gleichung (2.101) gefundenen Intensitäten werden in Schalldrucke umgerechnet. Es gilt

$$I\rho c = p'^2 \quad (2.102)$$

mit

p' Schalldruck im Freifeld

Da auf der harten Oberfläche eine Schalldruckverdopplung stattfindet, ergibt sich schliesslich:

$$p = 2\sqrt{I\rho c} \quad \text{bzw.} \quad p^2 = 4I\rho c \quad (2.103)$$

2.3.5.4 Kirchhoff-Modell für kohärente Reflexionsanteile

Die Modellierung der kohärenten Reflexionsanteile erfolgt mit einem phasenempfindlichen Modell - in der Folge als *Kirchhoff-Modell* bezeichnet - das mathematisch auf dem Kirchhoff-Helmholtz-Integral basiert. Die Schallfeldberechnung erfolgt im Frequenzbereich.

Gemäss dem Kirchhoff-Helmholtzintegral (Gleichung (2.104)) kann der Schalldruck $\check{p}(x, y, z, \omega)$ der Kreisfrequenz ω an einem beliebigen Beobachtungspunkt $\langle x, y, z \rangle$ bestimmt werden, wenn auf einer geschlossenen Hüllfläche S , die den Punkt einschliesst, sowohl die Normalkomponente $\check{v}_S(\omega)$ der Oberflächenschnelle als auch der Oberflächenschalldruck $\check{p}_S(\omega)$ bekannt sind. Die Variable r bezeichnet den Abstand vom Oberflächenpunkt zum Beobachtungspunkt, ρ_0 steht für die Dichte des Mediums und c für die Schallgeschwindigkeit.

$$\check{p}(x, y, z, \omega) = \frac{1}{4\pi} \int_S \left(j\omega\rho_0\check{v}_S(\omega) \frac{e^{-j\omega r/c}}{r} + \check{p}_S(\omega) \frac{\partial}{\partial n} \frac{e^{-j\omega r/c}}{r} \right) dS \quad (2.104)$$

Das Kirchhoff-Helmholtz Integral lässt sich mit folgenden Überlegungen in eine hier geeignetere Darstellung überführen:

$$\begin{aligned} k &= \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c} \Rightarrow e^{-j\omega r/c} = e^{-jkr} \\ \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{e^{-jkr}}{r} \right) &= \frac{1}{r^2} \left(r \frac{\partial}{\partial n} (e^{-jkr}) - e^{-jkr} \frac{\partial r}{\partial n} \right) \\ &= \frac{1}{r^2} \left(-jkr \frac{\partial r}{\partial n} e^{-jkr} - e^{-jkr} \frac{\partial r}{\partial n} \right) = \frac{1}{r^2} e^{-jkr} (-jkr - 1) \frac{\partial r}{\partial n} \end{aligned} \quad (2.105)$$

In ((2.105)) entspricht $\partial r/\partial n$ der Projektion von r auf die Normalenrichtung \vec{n} . Damit wird $\partial r/\partial n = -\cos\phi$ wenn ϕ dem Winkel zwischen der Normalenrichtung \vec{n} und der Richtung zum Aufpunkt (x, y, z) entspricht.

Damit wird das Kirchhoff-Helmholtz Integral:

$$\check{p}(x, y, z, \omega) = \frac{1}{4\pi} \int_S \left(j\omega\rho_0\check{v}_S(\omega) \frac{e^{-jkr}}{r} + \check{p}_S(\omega) \frac{1+jkr}{r^2} \cos\phi e^{-jkr} \right) dS \quad (2.106)$$

Obwohl später die Absorptionseigenschaft der Oberflächen berücksichtigt wird, gilt vorerst die Annahme, dass sämtliche Oberflächen schallhart sind, d.h. die Oberflächenschnelle verschwindet. In Gleichung (2.106) kann deshalb der Term mit der Schnelle ignoriert werden. In einer konkreten Situation werden die Oberflächenschalldrucke wie folgt iterativ bestimmt:

Formulierung des Algorithmus

Schritt 1: Die Flächen S_i werden je in Teilflächen $S_{i,j}$ der Grösse ΔS unterteilt (Abbildung 2.34).

Schritt 2: Die erste Schätzung der Schalldruckverteilung $\check{p}_{1,i,j}$ auf den Flächen S_i wird gefunden, indem eine Ausbreitung von der Quelle zur Fläche berechnet wird:

$$\check{p}_{1,i,j} = 2 \frac{jk\rho_0 c Q}{4\pi r} e^{-jkr} \quad \psi \leq \frac{\pi}{2} \quad (2.107)$$

mit

Q	Volumenfluss
ρ_0	Dichte
c	Schallgeschwindigkeit
k	Wellenzahl
ψ	Winkel der Geraden von der Quelle zum Flächenpunkt mit der Flächennormalen

ψ wird nur für die Kontrolle der Gültigkeit benötigt und geht ansonsten nicht in die Rechnung ein. Für Winkel $\psi > \frac{\pi}{2}$ wird $\check{p} = 0$ gesetzt. Der Faktor 2 beschreibt die Schalldruckverdopplung auf der harten Oberfläche.

Der Volumenfluss ergibt sich aus der Quellenleistung W gemäss:

$$Q = \sqrt{\frac{W4\pi}{k^2\rho c}} \quad (2.108)$$

Schritt 3: Die n -te Schätzung der Schalldruckverteilung $\check{p}_{n,i,j}$ auf den Flächen S_i wird gefunden, indem die Beiträge der letzten Aenderungen der Oberflächenpunkte dazu addiert werden:

$$\check{p}_{n,i,j} = \check{p}_{n-1,i,j} + 2\frac{1}{4\pi} \sum_s \sum_t \sqrt{1 - \alpha_s} (\check{p}_{n-1,s,t} - \check{p}_{n-2,s,t}) \frac{1 + jkr}{r^2} \cos(\phi) e^{-jkr} \Delta S \quad \psi \leq \frac{\pi}{2}, \phi \leq \frac{\pi}{2} \quad (2.109)$$

mit

α_s	Absorptionskoeffizient der Senderfläche s
ϕ	Winkel der Geraden vom Sender- zum Empfängerpunkt mit der Normalen zur Senderfläche
ψ	Winkel der Geraden von der Quelle zum Flächenpunkt mit der Flächennormalen

Für $\psi > \frac{\pi}{2}$ oder $\phi > \frac{\pi}{2}$ wird $\check{p} = 0$ gesetzt. Man beachte, dass die Beiträge der Nachbarpunkte auf der eigenen Fläche S_i verschwinden ($\cos(\pi/2) = 0$).

2.3.5.5 Auswertung des Dämpfungsterms

Für die Ermittlung des Dämpfungsterms $A_{\text{Reflect,L}}$ wird von einer Quellenleistung des Linienquellenabschnitts von $L \cdot 10^{-12} \text{W}$ ausgegangen, wobei L der Länge des Abschnitts in Meter entspricht. Damit ergibt sich ein Immissionspegel L_p von

$$L_p = 10 \log \left(\frac{p^2}{p_0^2} \right) - A_{\text{atm}} \quad (2.110)$$

wobei p dem Schalldruck am Empfänger und p_0 dem Bezugsdruck $2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$ entspricht. A_{atm} ist die Luftdämpfung für eine Ausbreitungsdistanz, die dem direkten Abstand zwischen Quellenpunkt und Empfänger entspricht. Daraus folgt für den Dämpfungsterm:

$$A_{\text{Reflect,L}} = -L_p \quad (2.111)$$

2.3.5.6 Auswertung des Reflexionsbeitrags an einem Empfangspunkt

Der Schalldruck an einem beliebigen Empfangspunkt berechnet sich aus der Summe der Beiträge aller sichtbaren Flächen. Auf Grund der Diskretisierung in Teilflächen erhält diese Auswertung für nahe an einer Fläche liegende Empfänger einen zufälligen Charakter. Deshalb wird auf den Versuch verzichtet, das Nahfeld vor einem Reflektor abzubilden. Generell wird für Empfänger, die näher als 1 m an einem Reflektor liegen, der Beitrag der entsprechenden Reflektorfläche ignoriert.

2.3.5.7 Diskretisierung

Die Feinheit der Diskretisierung ist von grosser Bedeutung hinsichtlich des Rechenaufwandes. Eine Halbierung der Gittermaschenweite führt auf eine viermal so hohe Gitterpunktezahl ($n \rightarrow 4n$). Da die Ausbreitung von jedem Gitterpunkt zu allen anderen Gitterpunkten untersucht werden muss, ergibt sich ein bzgl. der Gitterpunktezahl quadratischer Aufwand. Der Rechenaufwand mit der ursprünglichen Diskretisierung ist damit von der Ordnung n^2 , für die doppelt so feine Unterteilung ergibt sich $(4n)^2 = 16n^2 = 2^4 n^2$, d.h. der Aufwand steigt mit der vierten Potenz.

Für das Diffusormodell ist die Feinheit der Diskretisierung nicht kritisch, hier kann relativ grob gearbeitet werden. Das Kirchhoffmodell dagegen verliert bei zu grober Auflösung das in der Oberflächen-Druckverteilung gespeicherte "Gedächtnis" und kann mit deutlich zu grossen Schallfeldwerten reagieren. Der Grund dafür liegt in der Tatsache, dass sich bei spiegelnder Reflexion die Beiträge des grössten Teils der Reflektorfläche durch destruktive Interferenz gegenseitig annullieren. Bei ungenügender Diskretisierung erfolgt diese Annulation nicht mehr vollständig, was zu einer Überschätzung des durch die Reflexion hervorgerufenen Schalldruckanteils führt.

Als Gedankenmodell hilft eine auf Fresnelzonen basierende Vorstellung. Dabei werden auf dem Reflektor Zonen gebildet für welche der reflektierte Anteil innerhalb einer halben Wellenlänge bzw. 180° Phasendrehung eintrifft. Bei senkrechtem Schalleinfall und Reflexion sind diese Zonen Kreisringe, bei schrägem Einfall werden die Zonen ellipsenförmig verzerrt. Die Diskretisierung muss so fein sein, dass jede dieser Zonen genügend genau approximiert wird. Der kritischste Fall mit den kleinsten Zonenflächen entsteht für senkrechten Einfall und kleine Abstände der Quelle und des Empfängers zum Reflektor.

Die maximal zulässige Rasterung wurde numerisch mit dem oben formulierten Algorithmus untersucht. Dazu wurden der Quellen- und Empfängerpunkt an derselben Position im Abstand d vor einem Reflektor angenommen. Für eine Einfachreflexion wurde der Schalldruck am Empfänger in Abhängigkeit des Abstandes d , der Gitterweite Δx bzw. Δy , wobei $\Delta x = \Delta y$ angenommen wurde, und der Frequenz f untersucht. Die Abbildung 2.36 zeigt exemplarisch ein Ergebnis die Einfachreflexion an einer 10×10 m grossen Fläche. Für wachsende Rasterweiten und Frequenzen nehmen die Pegel ab einer bestimmten Grenze sprunghaft zu. Bei 800 und 1000 Hz wird dieser Punkt für eine Rasterweite von rund 0.35 m erreicht.

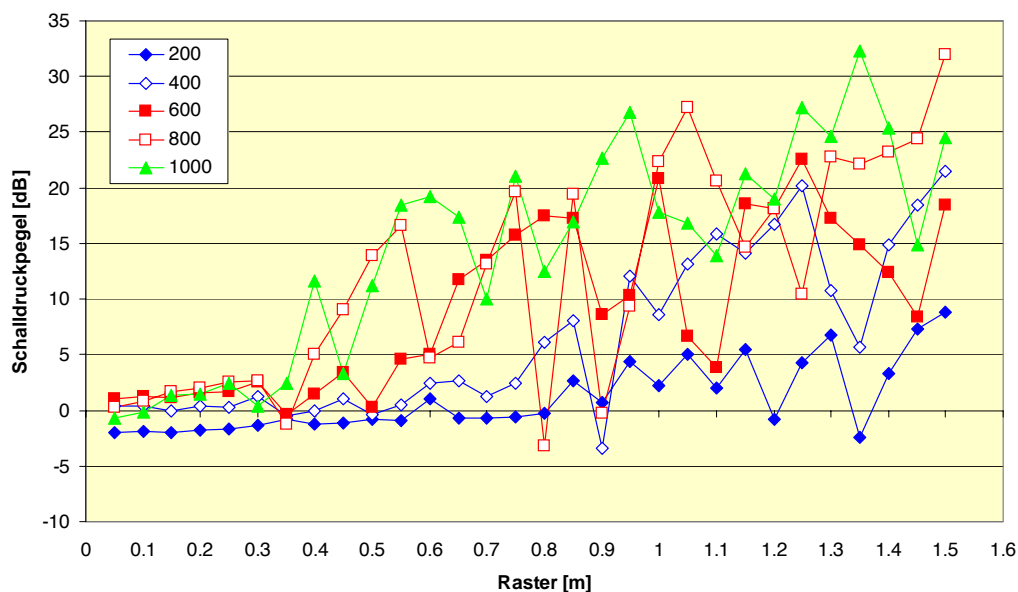


Abbildung 2.36: Einfluss der Rasterweite auf den Schalldruckpegel der Reflexion. Scharparameter ist die Frequenz. Gezeigt werden 200, 400, 600, 800 und 1000 Hz. Der Abstand des Quellen- und Empfängerpunktes beträgt 20 m.

Aus den numerischen Untersuchungen folgt für die maximal zulässige Rasterweite $\Delta x, y$:

$$\Delta x_{\max} = \Delta y_{\max} \approx 0.11\sqrt{d\lambda} \quad (2.112)$$

mit

d Abstand zum Reflektor
 λ Wellenlänge

Die Beziehung für Δx_{\max} erinnert an die Lösung für den Radius der ersten Fresnelzone in grossem Abstand d :

$$r_1 = \sqrt{d \frac{\lambda}{2} + \frac{\lambda^2}{16}} \approx \sqrt{d \frac{\lambda}{2}} \quad \text{für } d \gg \frac{\lambda}{8} \quad (2.113)$$

$\Delta x, y_{\max}$ entspricht damit rund 16% des Radius der ersten Fresnelzone.

Für das Modell wird von einem minimalen Abstand von 10 m ausgegangen. Damit ergeben sich in Funktion der Frequenz die in Tabelle 2.7 gezeigten minimalen Rasterweiten.

Frequenz [Hz]	200	400	600	800	1000
Rasterweite [m]	0.45	0.32	0.26	0.22	0.20

Tabelle 2.7: Minimale Rasterweite in Funktion der Frequenz für das Kirchhoffmodell.

2.3.6 Wald- und Felsreflexionen

2.3.6.1 Übersicht

Neben Reflexionen an künstlichen Objekten, wie sie im vorigen Kapitel behandelt wurden, kann es auch an Wäldern und Felswänden zu Reflexionen kommen. Diese diffusen Reflexionen, welche sich aufgrund der Grösse der reflektierenden Flächen meist als langgezogenes Echo manifestieren, sind nur in seltenen Fällen grenzwertrelevant. Sie können jedoch in Situationen mit deutlichen Abschirmungen des Direktschalles gleichwohl den Mittelungspegel dominieren. Gerade in Talsituationen, wie sie im Alpenraum häufig sind, kommt diesen Echos eine besondere Bedeutung zu.

Die Reflexionen an Waldrändern und Felswänden weisen ein grundsätzlich unterschiedliches Verhalten auf. Aus diesem Grund werden sie im Rahmen von *sonRAIL* mit zwei separaten Modellen behandelt. Die Ansätze stellen eigenständige Ausbreitungsmodelle dar, welche unabhängig von den übrigen Berechnungsmodulen (Basisrechnung, Meteorokorrektur, Reflexionen an künstlichen Objekten) betrieben werden können und direkt Ausbreitungsdämpfungen bei den Empfangspunkten liefern. Verschiedene Ausbreitalgorithmen werden jedoch vom Basismodell übernommen. Auf die Berechnung eines Wettereinflusses auf die Schallausbreitung wird im Sinne einer Rechenzeitoptimierung bewusst verzichtet. Diese Vereinfachung erscheint u.a. deshalb angebracht, da die Schallausbreitung in der Regel weniger bodennah als beim Direktschall vor sich geht und entsprechend von deutlich reduzierten meteorologischen Einflüssen ausgegangen werden kann.

Die kombinierte Ausbreitungsdämpfung $A_{\text{ForestCliff}}$ wird aus den Anteilen Waldreflexion A_{Forest} und Felsreflexion A_{Cliff} wie folgt gebildet:

$$A_{\text{ForestCliff}} = -10 \cdot \log \left(10^{-A_{\text{Forest}}/10} + 10^{-A_{\text{Cliff}}/10} \right) \quad (2.114)$$

mit

A_{Forest} Ausbreitungsdämpfung der Waldreflexionen gemäss Gleichung 2.117
 A_{Cliff} Ausbreitungsdämpfung der Felsreflexionen gemäss Gleichung 2.134

2.3.6.2 Reflexionen an Waldrändern

Das Waldreflexionsmodell basiert weitgehend auf einer Lösung, welche in [62] publiziert wurde. Das entsprechende Modell geht von der Vorstellung aus, dass ein einzelner Baum als stehender Zylinder modelliert werden kann. Dieser Modellansatz geht von der Annahme aus, dass lediglich der Stamm berücksichtigt werden muss und dass der Beitrag der Baumkrone vernachlässigt werden kann. Zum einen zeigte sich, dass mit dieser Modellvorstellung Situationen in kupertem Gelände nicht geeignet abgebildet werden können. Zum anderen war auch in [62] festgestellt worden, dass die Übereinstimmung zwischen Messungen und Berechnungen bei hohen Frequenzen nur ungenügend ausfällt. Aus diesem Grund wurde das Modell um den Beitrag der Baumkrone erweitert, welche durch eine Reihe von streuenden Kugeln abgebildet wird. Während der Stamm die Reflexion bei den tiefen Frequenzen dominiert, ist die Baumkrone

für den hochfrequenten Anteil verantwortlich.

Nachfolgend wird zuerst die Reflexion am Stamm und anschliessend an der Baumkrone für einen einzelnen Baum erläutert. Danach wird die Kombination dieser beiden Teilquellen sowie die Erweiterung auf den gesamten Wald gezeigt.

Reflexionen am Stamm Der Stamm eines einzelnen Baumes wird als stehender Zylinder modelliert. Basierend auf den Grundlagen für die Streuung von Kugelwellen (siehe [63], [64], [65]) kann gemäss Salomons [66] der Kugelwellen-Reflexionskoeffizient ρ_{cyl} eines unendlich langen Zylinders folgendermassen beschrieben werden:

$$\rho_{cyl} = \left[\sum_{m=0}^{\infty} \varepsilon_m \cos(m\phi) (-i)^m H_m^{(1)}(kr) \frac{J'_m(ka)}{H_m^{(1)'}(ka)} \right]^2 \quad (2.115)$$

mit

ϕ	Streuwinkel, definiert als der Zwischenwinkel von ein- und ausfallendem Schall in der Horizontalen.
r	kürzerer der beiden Abstände von der Quelle zum Reflektor bzw. vom Reflektor zum Empfänger.
k	Wellenzahl, definiert als das Verhältnis von Kreisfrequenz und Schallgeschwindigkeit.
a	Zylinderradius.
ε	= 1 für $m = 0$ und = 2 für $m \geq 1$.
$H_m^{(1)}$	Hankel Funktion erster Ordnung.
$H_m^{(1)'}$	Erste Ableitung der Hankel Funktion erster Ordnung.
J'_m	Erste Ableitung der Bessel Funktion J .

In Abbildung 2.37 sind drei Beispielrechnungen des Kugelwellen-Reflexionskoeffizienten ρ_{cyl} gemäss Gleichung (2.115) in Funktion der Frequenz zusammengestellt, welche die Abhängigkeit vom Zylinderdurchmesser a , vom Abstand r und vom Streuwinkel ϕ darstellen. Für die zweite und dritte Darstellung wurde der Zylinderdurchmesser auf 27.5 cm angenommen, was gemäss der statistischen Auswertung des Waldes in Abschnitt 2.3.6.3 dem mittleren Stammdurchmesser am Waldrand entspricht. Dieser Wert wird auch für sämtliche Modellberechnungen verwendet.

Die Hankel Funktion erster Ordnung $H_m^{(1)}(kr)$ verhält sich in guter Näherung umgekehrt proportional zum Abstand r . Das Produkt aus ρ_{cyl} und r kann somit für gegebene Zylinderdurchmesser und Streuwinkel als konstant angesehen werden. Aus diesem Grund wird bei der Umsetzung in *sonRAIL* darauf verzichtet, den Kugelwellen-Reflexionskoeffizienten ρ_{cyl} in jeder Situation neu zu berechnen. Vielmehr sind in tabellarischer Form die auf einen Referenzabstand von 1 m normierten Reflexionskoeffizienten in Terzen für diskrete Streuwinkel von 0 bis 135° mit einer Schrittweite von 15° abgelegt. Für beliebige Streuwinkel zwischen 0 und 135° wird der Reflexionskoeffizient als Interpolation aus den tabellierten Werten bestimmt. Reflexionen von Streuwinkeln > 135° werden ignoriert.

Reflexion an der Baumkrone Reflexionen in der Baumkrone erfolgen in erster Linie an den grossen Ästen. Diese weisen im Vergleich zum Stamm einen kleineren Durchmesser und eine deutlich kleinere Länge auf und stehen seitlich vom Stamm in alle Richtungen ab. In Analogie zur Modellierung des Stammes könnten die Äste durch eine Reihe von unterschiedlich grossen und unterschiedlich angeordneten Zylindern abgebildet werden. Aufgrund der eher zufälligen, in erster Näherung omnidirektionalen Ausrichtung der Äste und ihrer Länge, welche viel weniger als der Stamm dem Bild des unendlich langen Zylinders entspricht, ergibt sich jedoch in der Summe sämtlicher Reflexionen an der Baumkrone eher das Bild eines Streukörpers, der in alle Richtungen abstrahlt. Entsprechend wurde ein einfacherer, integraler Ansatz gewählt, indem die Baumkrone als eine streuende Kugel modelliert wird. Als Kugelradius wurde 15 cm festgelegt. Im Vergleich zu den Astabmessungen erscheint dieser Radius gross. Es soll damit jedoch dem Umstand Rechnung getragen werden, dass Zylinder tiefe Frequenzen effektiver reflektieren als eine Kugel mit gleichem Durchmesser. Dieser Verlust an tieffrequenter Reflexion beim Wechsel vom Zylinder- zum Kugelmodell soll damit kompensiert werden.

Über die Anzahl der entsprechenden Streukugeln wird die Stärke der Reflexion aus der Baumkrone bestimmt. Im Vergleich mit den Messdaten gemäss Kapitel 7.5 wurde ein Wert von 250 Streuquellen festgelegt.

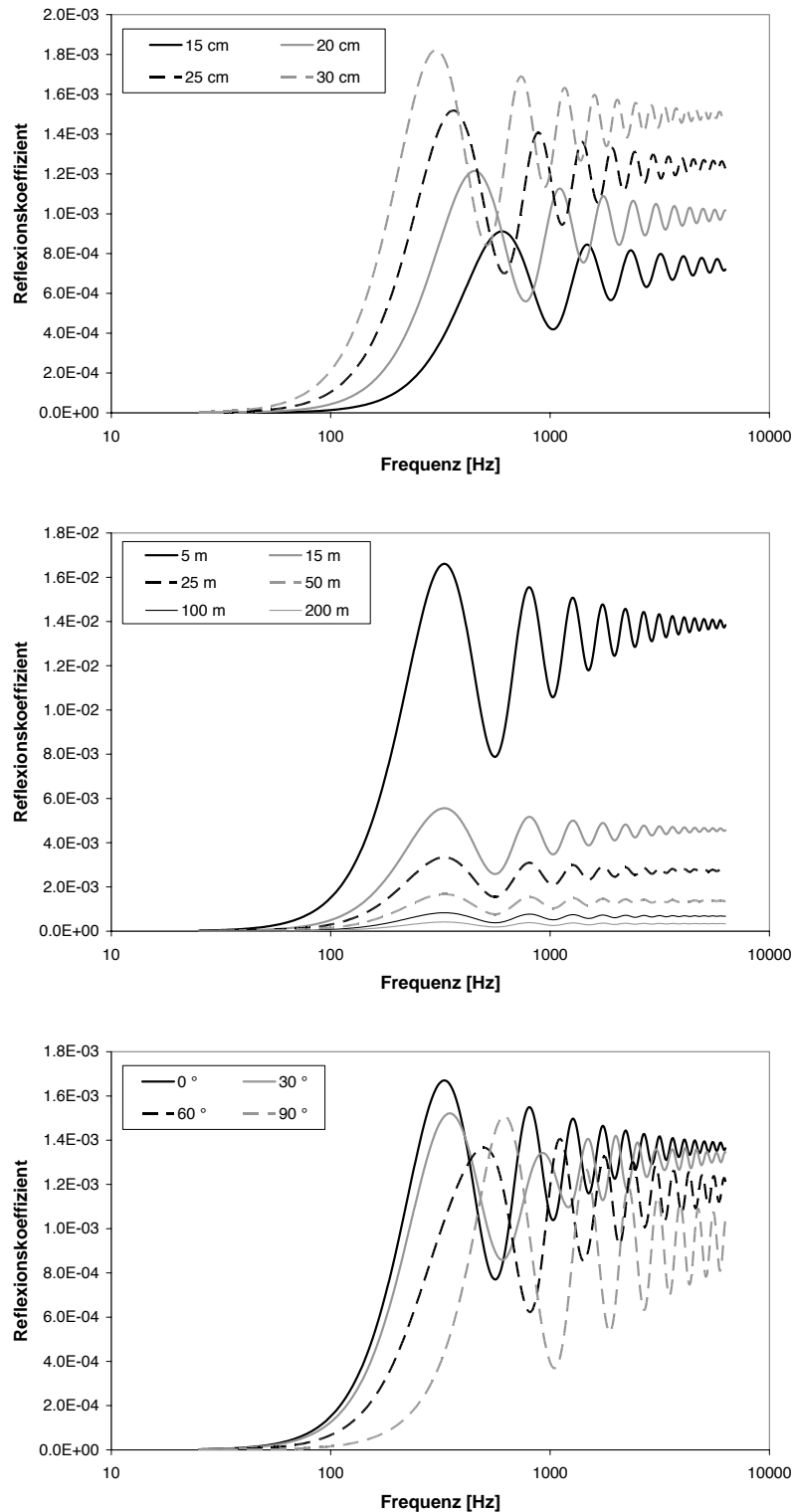


Abbildung 2.37: Reflexionskoeffizient eines Zylinders in Funktion des Durchmessers (a), der Distanz (b) und des Streuwinkels (c). Falls konstant gehalten, wurde der Streuwinkel auf 0° , die Distanz auf 50 m der Zylinderdurchmesser auf 27.5 cm gesetzt.

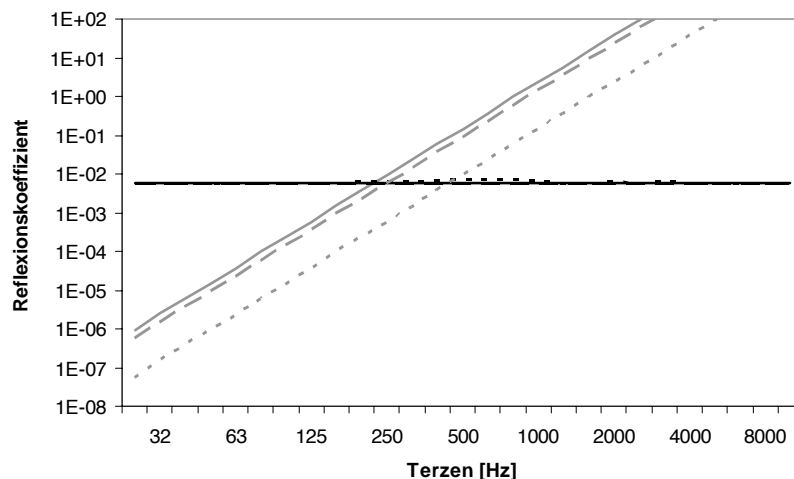


Abbildung 2.38: Reflexionskoeffizient einer Kugel mit Radius 15 cm. In grau ist der Ansatz für tiefe Frequenzen und in schwarz der Ansatz für hohe Frequenzen abgebildet. Für beide Ansätze sind Streuwinkel von 0, 45 und 90° als ausgezogene, gestrichelte und gepunktete Linien dargestellt.

Ausgehend von einer Lösung des Reflexionsproblems für starre Kugeln gemäss Morse und Ingard [64] wurde folgender Ansatz für den Reflexionskoeffizienten an einer Kugel bestimmt:

$$\rho_{\text{sph}} = \text{Min} \left\{ \begin{array}{l} \frac{k^4 a^6}{9} [1 - 3 \cos(\pi - \phi)]^2 \\ \frac{a^2}{4} [1 + \cot^2(\pi - \phi/2) J_1^2(ka \sin(\pi - \phi))] \end{array} \right. \quad (2.116)$$

mit

- ϕ Streuwinkel, definiert als der Zwischenwinkel von ein- und ausfallendem Schall.
- k Wellenzahl, definiert als das Verhältnis von Kreisfrequenz und Schallgeschwindigkeit.
- a Kugelradius. Der Kugelradius wird für die Streuung an der Baumkrone generell mit 0.15 m angenommen.
- J_1 Bessel Funktion erster Gattung.

Der Reflexionskoeffizient ρ_{sph} ist dabei definiert als Verhältnis der gestreuten zu einfallenden Schallintensität in 1 m Abstand, ausgehend von einer ebenen Welle. Die beiden Ansätze gemäss [64] wurden unter der Annahme hergeleitet, dass $ka \ll 1$ (gültig für tiefe Frequenzen) bzw. $ka \gg 1$ (gültig für hohe Frequenzen). Je nach Streuwinkel findet sich eine unterschiedliche Frequenz bei welcher beide Lösungen das gleiche Resultat liefern. Abbildung 2.38 zeigt den spektralen Verlauf der beiden Lösungen von ρ_{sph} für Streuwinkel von 0, 45 und 90°.

Analog zur Umsetzung für den Kugelwellen-Reflexionskoeffizient am Zylinder ρ_{cyl} werden die Reflexionskoeffizienten an der Kugel in Terzen für diskrete Streuwinkel von 0 bis 135° mit einer Schrittweite von 15° in tabellarischer Form abgelegt. Für beliebige Streuwinkel zwischen 0 und 135° wird der Reflexionskoeffizient als Interpolation aus den tabellierten Werten bestimmt. Reflexionen von Streuwinkeln > 135° werden ignoriert.

Die Streuquellen, welche die Baumkrone repräsentieren, werden im Modell auf einer mittleren Baumhöhe von 10 m auf dem Stamm zusammengefasst.

Erweiterung für einen ganzen Wald Die Reflexion eines ganzen Waldes kann grundsätzlich als Überlagerung der Reflexion vieler Einzelbäume berechnet werden. Im Sinne einer Rechenzeitoptimierung wurden jedoch verschiedene Vereinfachungen vorgenommen:

- Die von einer ganzen Waldfläche stammende Reflexionen wird durch die Baumreihe entlang des Waldrandes abgebildet.

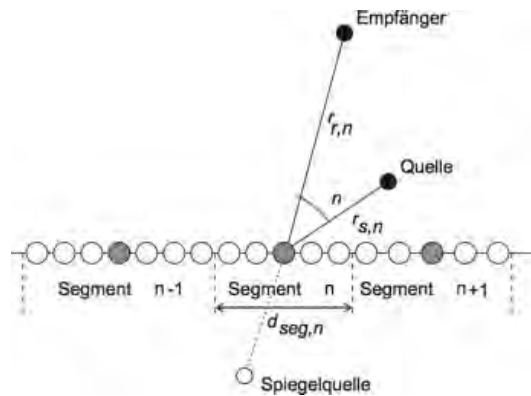


Abbildung 2.39: Reflexion von einer Reihe Zylinder. Die Reihe wird segmentiert und jedes Segment wird durch einen in der Mitte platzierten Zylinder repräsentiert (graue Kreise). Ebenfalls dargestellt ist eine Spiegelquelle.

- Es wird nicht jeder Baum in der ersten Baumreihe berechnet, vielmehr wird der Waldrand segmentiert. Pro Waldrandsegment wird nur ein repräsentativer Zylinder berechnet (siehe Abbildung 2.39).
- Die Beiträge der repräsentativen Zylinder werden nicht phasenrichtig sondern energetisch superponiert.
- Die einzelnen Zylinder erhalten eine Gewichtung zugeordnet, welche dem Umstand Rechnung trägt, dass die Zahl der berechneten Zylinder deutlich kleiner ist, als die in Wirklichkeit zu einer Reflexion beitragende Anzahl an Bäumen. Diese repräsentative Anzahl Bäume pro Waldrandsegment wird gemäss Abschnitt 2.3.6.2 in Funktion der Geometrie und der Frequenz bestimmt.

Die Dämpfung A_{Forest} berechnet sich gemäss Gleichung 2.117, wobei n die Anzahl der Segmente, N_n die repräsentative Anzahl Zylinder pro Waldrandsegment und $A_{\text{cyl},n}$ bzw. $A_{\text{sph},n}$ die Gesamtausbreitungsdämpfungen von Stamm und Krone des von Segment n reflektierten Schalls darstellen. Die Beiträge von Zylinder und Stamm werden energetisch addiert, wobei beim Stamm noch eine zusätzliche Gewichtungsfunktion w_{cyl} zum Einsatz kommt. w_{cyl} wurde basierend auf Messdaten bestimmt. Für Terzen bis 250 Hz beträgt w_{cyl} 1.0, d.h. die Zylinderreflexion wird voll berücksichtigt. Zwischen 250 Hz und 1 kHz wurde w_{cyl} auf 0.5 und oberhalb von 1 kHz auf 0.25 festgelegt. Diese Reduktion des Zylinderbeitrages kann dadurch erklärt werden, dass die tiefen Frequenzen durch die Anwesenheit der Äste nur wenig beeinflusst werden. Die Reflexion am Stamm erfolgt deshalb weitgehend ungestört. Bei den hohen Frequenzen erfährt die Schallwelle auf dem Weg zum Stamm und auf dem Rückweg aber eine Beeinflussung, so dass die Phasenbeziehung der am Zylinder reflektierten Welle gestört wird.

$$A_{\text{Forest}} = -10 \cdot \log \left(\sum_n N_n \left[-w_{\text{cyl}} \cdot 10^{A_{\text{cyl},n}/10} + 10^{A_{\text{sph},n}/10} \right] \right) \quad (2.117)$$

Ausbreitungsrechnung für den Stamm Die Gesamtausbreitungsdämpfung des von Segment n am Stamm reflektierten Schalls berechnet sich gemäss Gleichung 2.118 aus verschiedenen Dämpfungstermen:

$$A_{\text{cyl},n} = A_{\text{div},n} + A_{\text{atm},n} + A_{\text{gr}/\text{bar},n} + A_{\text{fol},n} + A_{\text{refl},n} \quad (2.118)$$

mit

- $A_{\text{div},n}$ Geometrische Verdünnung = $20 \cdot \log(r_{r,n} + r_{s,n}) + 11$ mit r_s der Distanz Quelle-Reflektor und r_r der Distanz Reflektor-Empfänger.
- $A_{\text{atm},n}$ Luftdämpfung gemäss Abschnitt 2.3.2.4 für die Strecke Quelle-Reflektor-Empfänger. Als Reflexionspunkt wird der Einfachheit halber die Lage der Streuquelle verwendet.
- $A_{\text{gr}/\text{bar},n}$ Bodeneffekt und Hinderniswirkung für die Strecke Quelle-Reflektor-Empfänger. Die Berechnung erfolgt nach einem vereinfachten Verfahren gemäss Abschnitt 2.3.6.5.
- $A_{\text{fol},n}$ Bewuchsdämpfung gemäss Abschnitt 2.3.2.15.

$A_{\text{refl},n}$ Reflexionsverlust gemäss Gleichung (2.119).

Der Reflexionsverlust $A_{\text{refl},n}$ wird gemäss Gleichung 2.119 aus dem Reflexionskoeffizienten von Zylinder n nach Gleichung 2.115 und einer Korrektur für die vertikale Effektivität der Reflexion Φ_n berechnet.

$$A_{\text{refl},n} = -10 \cdot \log(\Phi_n \cdot \rho_{\text{cyl},n}) \quad (2.119)$$

Mit Φ_n wird berücksichtigt, dass die Zylinder in Wirklichkeit nicht unendlich hoch sind und dass namentlich bei grösseren Distanzen und tiefen Frequenzen die Höhe des Reflektors für eine vollständige Reflexion nicht mehr ausreicht. Zur Berechnung von Φ wird wiederum ein Fresnel-Zonen-Ansatz verwendet, wie er bereits beim Bodeneffekt-Modell zum Einsatz kam. Die Definition entspricht dabei Gleichung 2.36 und bezeichnet das Verhältnis der Zylinderlänge, welche von der Fresnelzone abgedeckt wird, und der Länge der Fresnelzone in der Zylinderebene.

Ausbreitungsrechnung für die Baumkrone Die Gesamtausbreitungsdämpfung des von Segment n an der Baumkrone reflektierten Schalls berechnet sich gemäss Gleichung 2.120 aus verschiedenen Dämpfungstermen:

$$A_{\text{sph},n} = A_{\text{div},n} + A_{\text{atm},n} + A_{\text{gr}/\text{bar},n} + A_{\text{fol},n} + A_{\text{refl},n} \quad (2.120)$$

mit

- $A_{\text{div},n}$ Geometrische Verdünnung = $20 \cdot \log(r_r, n \cdot r_s, n) + 11$ mit r_s der Distanz Quelle-Reflektor und r_r der Distanz Reflektor-Empfänger.
- $A_{\text{atm},n}$ Luftdämpfung gemäss Abschnitt 2.3.2.4 für die Strecke Quelle-Reflektor-Empfänger.
- $A_{\text{gr}/\text{bar},n}$ Bodeneffekt und Hinderniswirkung für die Strecke Quelle-Reflektor-Empfänger. Die Berechnung erfolgt nach einem vereinfachten Verfahren gemäss Abschnitt 2.3.6.5.
- $A_{\text{fol},n}$ Bewuchsdämpfung gemäss Abschnitt 2.3.2.15.
- $A_{\text{refl},n}$ Reflexionsverlust gemäss Gleichung (2.121).

Der Reflexionsverlust $A_{\text{refl},n}$ wird gemäss Gleichung (2.121) berechnet. N_{sph} bezeichnet dabei die Anzahl Streuquellen, welche pro Baum angenommen wird. Im Vergleich mit den Validierungsmessungen wurde ein repräsentativer Wert von $N_{\text{sph}} = 250$ ermittelt.

$$A_{\text{refl},n} = -10 \cdot \log(N_{\text{sph}} \cdot \rho_{\text{sph},n}) \quad (2.121)$$

Repräsentative Anzahl Bäume pro Waldrandsegment Die Bestimmung der repräsentativen Anzahl Bäume N pro Waldsegment gemäss Gleichung (2.117) wurde aus [62] übernommen. Eine neuerliche Ermittlung, welche den zusätzlichen Einfluss der Baumkrone berücksichtigt, wurde nicht für nötig erachtet, da der Beitrag der Streuquelle nur bei hohen Frequenzen bzw. in kurzen Abständen dominiert und gerade bei diesen Bedingungen auch das Zylindermodell nur sehr geringe Reflexionen aus der Tiefe des Waldes ausweist.

Die repräsentativen Anzahl Bäume N wurde in [62] mittels Simulation bestimmt, bei welchen zum einen ausschliesslich Zylinder in der ersten Reihe und zum anderen über die gesamte bewaldete Fläche verteilte Zylinder berechnet wurden. Bei der Schallausbreitung innerhalb des Waldes wurde zusätzlich eine Bewuchsdämpfung gemäss 2.3.2.15 berücksichtigt. Es wurden Simulationsrechnungen mit 20 verschiedenen Geometrien durchgeführt, mit Quellen- bzw. Empfängerabständen vom Waldrand zwischen 7.5 und 400 m. Der Wald wurde dabei mit einer Tiefe von 100 m modelliert, was für eine weitgehend vollständige Reflexion ausreicht.

Gleichung (2.122) beschreibt den Einfluss der Geometrie nach einem Hyper-Flächen-Ansatz dritter Ordnung. Freie Parameter sind dabei der minimale Abstand zwischen Quelle und Reflektor bzw. Reflektor und Empfänger sowie die quadrierte Gesamtausbreitungsdistanz. Ersteres entspricht dem Distanzeinfluss auf den Reflexionskoeffizienten und letzteres dem Distanzeinfluss auf die geometrische Dämpfung.

$$u[x, y] = g + h \cdot f_x + i \cdot f_y + j \cdot f_x f_y + k \cdot f_x^2 f_y + l \cdot f_x f_y^2 + m \cdot f_x^2 f_y^2 \quad (2.122)$$

mit

$$\begin{aligned} x &= \text{Min}(r_r, r_s) & y &= (r_r + r_s)^2 \\ x_{\text{Min}} &= 7.5 & x_{\text{Max}} &= 400 \\ y_{\text{Min}} &= (7.5 + 50)^2 & y_{\text{Max}} &= (500 + 400)^2 \\ f_x &= \frac{\ln\left[\frac{x}{x_{\text{Min}}}\right]}{\ln\left[\frac{x_{\text{Max}}}{x_{\text{Min}}}\right]} & f_y &= \frac{\ln\left[\frac{y}{y_{\text{Min}}}\right]}{\ln\left[\frac{y_{\text{Max}}}{y_{\text{Min}}}\right]} \end{aligned}$$

Die freien Parameter wurden nach dem Ansatz der kleinsten Fehlerquadrate ermittelt: $g = 0.484$, $h = -0.387$, $i = -0.203$, $j = -0.713$, $k = 1.313$, $l = 0.814$, $m = -1.171$.

Gleichung (2.123) liefert die resultierende Anzahl Zylinder N pro Segment. N wächst mit zunehmender Wellenlänge und Ausbreitungsdistanz an. Das zweite Kriterium in Gleichung 2.123 garantiert, dass der Abstand zwischen den in einer Linie aufgereihten Zylinder nicht kleiner als null werden kann.

$$N = \text{Min} \left[\frac{d_{\text{seg},n}}{d_{\text{for}}} \frac{1}{u[x,y] + v \ln(\lambda)}, \frac{d_{\text{seg},n}}{2a} \right] \quad (2.123)$$

mit

d_{for}	Mittlerer Baumabstand für einen durchschnittlichen Wald. $d_{\text{for}} = 4.5$ (abgeleitet aus Anhang 2.3.6.3).
$d_{\text{seg},n}$	Breite des Segmentes n .
v	Parameter zur Berücksichtigung der Frequenzabhängigkeit. $v = -0.03$.
λ	Wellenlänge.
a	Zylinderradius.

Die Segmentbreite $d_{\text{seg},n}$ kann frei gewählt werden und kann auch innerhalb eines Waldrandes variieren.

Mit dem gewählten Ansatz wurden die zugrunde liegenden Flächensimulationen in den einzelnen Oktavbändern mit einer Standardabweichung von 0.5 dB reproduziert.

Identifikation von Waldflächen Die Identifikation von Waldflächen erfolgt analog zur Bewuchsdämpfung gemäss Abschnitt 2.3.2.15 basierend auf der Klassierung des Vektor25-Primärflächendatensatzes der SwissTopo. Für die Geländetypen *Wald*, *Geröll in Wald* und *Sumpf in Wald* wird eine vollständige Waldreflexion gemäss obigen Ansätzen berechnet. Für die Geländearten *Wald offen*, *Geröll in offenem Wald* und *Sumpf in offenem Wald* wird eine um 50% reduzierte Reflexion ausgewiesen. Diese reduzierte Reflexion wird über eine Reduktion der Anzahl reflektierenden Einzelbäume gemäss Gleichung (2.123) berücksichtigt. Für sämtliche anderen Geländearten wird keine Waldreflexion berechnet.

Erweiterung für Wälder mit grosser Ausdehnung Das Waldreflexionsmodell wurde auf eine Waldtiefe von 100 m ausgerichtet. Zur Abbildung von Wäldern grösserer Ausdehnung werden zusätzliche Reflektoren im Wald platziert. Die Berechnung der Immissionen erfolgt mit dem beschriebenen Waldreflexionsmodell, wobei bei der Ausbreitung im Wald zusätzlich die Walddämpfung gemäss Abschnitt 2.3.2.15 berücksichtigt wird. Zur Bestimmung der Positionen dieser zusätzlichen Reflektorelemente wird über das Gelände ein Raster mit 100 m Gitterweite gelegt. Reflexionen werden für jeden Reflektor berechnet, bei welchem sich die zugeordnete Fläche vollständig auf Waldboden befindet.

In der Ebene sind diese zusätzlichen Reflexionen aus der Waldtiefe in aller Regel vernachlässigbar. In Tälern mit ausgedehnten Waldflächen können Reflexionen vom Walddach jedoch die Gesamreflexionen bestimmen, weshalb diese Beiträge nicht vernachlässigt werden sollten.

2.3.6.3 Statistische Kenngrössen für Wald

Als Grundlage für die Berechnung von Waldreflexionen werden verschiedene Kenngrössen für Wald benötigt. Die Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL hat zu diesem Zweck statistische

Angaben zur Anzahl Bäume pro Fläche, der durch die Stämme abgedeckten Grundfläche (Basalfläche), des mittleren Durchmessers und der mittleren Höhe für vier Waldkategorien zur Verfügung gestellt. Tabelle 2.8 zeigt eine Zusammenfassung der Resultate für sämtliche erfassten Standorte. Im Hinblick auf Reflexionen an Waldrändern wurde eine zusätzliche Auswertung vorgenommen, welche nur Situationen am Waldrand umfasst (siehe Tabelle 2.9). Es zeigt sich, dass die Walddichte am Rand unabhängig vom Waldtyp etwas höher ausfällt.

Es wird generell empfohlen, für die Reflexionsberechnung die Mittelwerte von Tabelle 2.9 zu verwenden. Dabei gilt es jedoch zu berücksichtigen, dass im Einzelfall Abweichungen zu erwarten sind, welche sich bereits beim Vergleich der Mittelwerte verschiedener Waldtypen zeigen. Während sich der mittlere Baumdurchmesser und auch die Höhe unabhängig von der Waldkategorie als vergleichsweise stabil erweisen, variiert die Anzahl der Bäume und damit auch die Basalfläche je nach Typ deutlich. So weist ein reiner Nadelwald am Waldrand eine rund 20% höhere Dichte auf als ein reiner Laubwald. Dies entspricht einer um 0.8 dB höheren Reflexion. Pegelunterschiede in der gleichen Grössenordnung sind auch aufgrund der Schwankungen bei den mittleren Baumdurchmessern zu erwarten.

Waldtyp	Anz. Bäume [N/100 m ²]	Basalfläche [m ² /100 m ²]	Durchmesser [cm]	Höhe [m]
> 90% Nadelbäume	5.38 ± 5%	0.386 ± 5%	26.8 ± 5%	21.8 ± 5%
> 50% Nadelbäume	4.70 ± 5%	0.355 ± 5%	27.8 ± 5%	22.0 ± 5%
> 50% Laubbäume	4.48 ± 6%	0.308 ± 6%	26.5 ± 6%	21.0 ± 6%
> 90% Laubbäume	4.76 ± 5%	0.266 ± 4%	23.7 ± 5%	18.5 ± 5%
Mittel	4.83 ± 2%	0.326 ± 2%	26.1 ± 2%	20.7 ± 2%

Tabelle 2.8: Statistik für Schweizer Wald bis 1000 m über Meer [67]. Die letzte Zeile gibt über die Häufigkeit der verschiedenen Waldkategorien gewichtete Mittelwerte an. Der Stammdurchmesser und die Basalfläche werden in einer Höhen von 1.3 m gemessen. Bäume mit weniger als 12 cm Durchmesser wurden nicht gezählt.

Waldtyp	Anz. Bäume [N/100 m ²]	Basalfläche [m ² /100 m ²]	Durchmesser [cm]	Höhe [m]
> 90% Nadelbäume	6.11 ± 14%	0.453 ± 13%	27.5 ± 14%	22.1 ± 14%
> 50% Nadelbäume	5.26 ± 10%	0.418 ± 10%	28.5 ± 11%	22.5 ± 11%
> 50% Laubbäume	4.75 ± 12%	0.361 ± 12%	27.7 ± 13%	21.8 ± 13%
> 90% Laubbäume	4.50 ± 9%	0.314 ± 9%	26.4 ± 10%	20.2 ± 10%
Mittel	5.01 ± 5%	0.374 ± 5%	27.5 ± 6%	21.5 ± 6%

Tabelle 2.9: Waldrandstatistik für Schweizer Wald bis 1000 m über Meer [67]. Es wurden jeweils nur die ersten 30 m des Waldes erfasst. Die letzte Zeile gibt über die Häufigkeit der verschiedenen Waldkategorien gewichtete Mittelwerte an. Der Stammdurchmesser und die Basalfläche werden in einer Höhen von 1.3 m gemessen. Bäume mit weniger als 12 cm Durchmesser wurden nicht gezählt.

Oberhalb von 1000 m nimmt sowohl am Waldrand als auch in der Mitte die Walddichte ab und auch die mittleren Baumhöhen und -durchmesser gehen zurück.

2.3.6.4 Reflexionen an Felswänden

Übersicht Reflektierende Felsflächen werden als reine Streuquellen modelliert. Auf eine Berücksichtigung spiegelnder Anteile wird verzichtet. Diese Vereinfachung erscheint aufgrund der typischen Geometrien zwischen Quellen, Reflektoren und Empfängern zulässig, welche zumeist Spiegelpfade aufweisen, die stark himmelwärts gerichtet sind.

Analog zu den Reflexionen an Waldrändern kann a priori davon ausgegangen werden, dass zwischen den Beiträgen verschiedener reflektierender Elemente keine bedeutende Phasenbeziehung besteht. Entsprechend ist es zulässig, die Reflexionen einzelner Teilflächen energetisch zu addieren. Ebenso ist es auch statthaft, grössere Flächen zu diskretisieren und die Schallausbreitungsrechnung für jede Teilfläche separat durchzuführen.

Die Vorstellung reiner Streuquellen erlaubt eine separate Behandlung der Schallausbreitung von der Quelle zum Reflektor und von dort weiter zum Empfänger. Abbildung 2.40 zeigt die Situation der Felsreflexionen mit den beiden

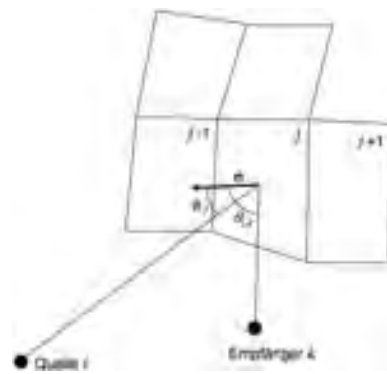


Abbildung 2.40: Situation zu den Felsreflexionen. Es sind die Schallausbreitungspfade für ein Reflektorelement j gezeigt, wobei $\phi_{i,j}$ den Schalleinfallswinkel bezüglich der Flächennormalen \mathbf{n} und $\theta_{j,k}$ den Schallausfallswinkel bezeichnen.

Schallausbreitungspfad für ein Reflektorelement.

Berechnung der Schalleistung der Sekundärquellen Der Beitrag der Originalquelle i zur Schalleistung der Sekundärquelle j berechnet sich gemäss Gleichung (2.124):

$$L_{WS,i,j} = L_{W,i} - A_{\text{div},i,j} - A_{\text{atm},i,j} - A_{\text{gr}/\text{bar},i,j} + C_{\text{proj},i,j} \quad (2.124)$$

mit

- $L_{WS,i,j}$ Schalleistungspegel der Sekundärquelle j , welcher durch die Originalquelle i erzeugt wird.
- $L_{W,i}$ Schalleistungspegel der Originalquelle i .
- $A_{\text{div},i,j}$ Geometrische Verdünnung = $20 \cdot \log(r) + 11$ mit r als Distanz zwischen Original- und Sekundärquelle. Die Position der Sekundärquelle wird 0.1 m über Terrain in der Mitte der Reflektorfläche angenommen.
- $A_{\text{atm},i,j}$ Luftdämpfung gemäss Abschnitt 2.3.2.4 für die Strecke Originalquelle-Sekundärquelle.
- $A_{\text{gr}/\text{bar},i,j}$ Bodeneffekt und Hinderniswirkung für die Strecke Originalquelle-Sekundärquelle. Die Berechnung erfolgt nach einem vereinfachten Verfahren gemäss Abschnitt 2.3.6.5.
- $C_{\text{proj},i,j}$ Projektionsanpassung gemäss Gleichung (2.125).

$$C_{\text{proj},i,j} = 10 \cdot \log(\cos(\phi_{i,j}) \cdot F_j) \quad (2.125)$$

mit

- $\phi_{i,j}$ Winkel der einfallenden Schallwelle bezüglich der Reflektor-Flächennormalen.
- F_j Fläche des Reflektorelementes j .

Berechnung des Immissionspegels bei einem Empfangspunkt Der Immissionspegel am Empfangspunkt k , der von der Sekundärquelle j , gespiesen durch die Originalquelle i , erzeugt wird, berechnet sich nach:

$$L_{i,j,k} = L_{WS,i,j} - A_{\text{div},j,k} - A_{\text{atm},j,k} - A_{\text{gr}/\text{bar},j,k} - A_{\text{refl},j,k} \quad (2.126)$$

mit

$L_{i,j,k}$	Immissionspegel der Sekundärquelle j , gespiesen durch die Originalquelle i , bei einem Empfangspunkt k .
$L_{WS,i,j}$	Schallleistungspegel der Sekundärquelle j , gespiesen durch Originalquelle i
$A_{div,j,k}$	Geometrische Verdünnung = $20 \cdot \log(r) + 11$ mit r als Distanz zwischen Sekundärquelle j und Empfänger k .
$A_{atm,j,k}$	Luftdämpfung gemäss Abschnitt 2.3.2.4 für die Strecke Sekundärquelle-Empfänger.
$A_{gr/bar,j,k}$	Bodeneffekt und Hinderniswirkung für die Strecke Sekundärquelle-Empfänger. Die Berechnung erfolgt nach einem vereinfachten Verfahren gemäss Abschnitt 2.3.6.5.
$A_{refl,j,k}$	Reflexionsverlust gemäss Gleichung 2.127.

Der Dämpfungsterm $A_{refl,j,k}$ beschreibt die Streu- und Absorptionseigenschaften des Reflektorelements und setzt sich aus folgenden drei Teilen zusammen

$$A_{refl,j,k} = A_{mat} - C - D(\theta_{j,k}) \quad (2.127)$$

mit

A_{mat}	Materialverlust, der die Eigenschaften Absorption und Streuung der Reflektoroberfläche gemäss Gleichung 2.132 beschreibt.
C	Bündelungsmass der Sekundärquelle = 6dB für Lambert-Strahler gemäss Gleichung 2.131
$D(\theta_{j,k})$	Richtungsmass der Sekundärquelle gemäss Gleichung 2.129

Die diffuse Streuung an der Felsoberfläche wird mit dem Lambertschen Reflexionsgesetz modelliert. Der Richtungsfaktor Γ des Lambert-Strahlers ist definiert als

$$\Gamma_{\text{Lambert}}^2 = \begin{cases} \cos(\theta_{j,k}) & \text{wenn } \theta_{j,k} < \pi/2 \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases} \quad (2.128)$$

mit

$\theta_{j,k}$ Winkel der ausfallenden Schallwelle bezüglich der Reflektor-Flächennormalen.

Aus Gleichung 2.128 ergibt sich für das Richtungsmass D der Streuquelle per Definition

$$D = 10 \cdot \log(\Gamma_{\text{Lambert}}^2) \quad (2.129)$$

Für den Bündelungsgrad γ der Streuquelle erhält man durch Einsetzen von Gleichung 2.128 in die Definition und kurze Rechnung

$$\gamma = \frac{S}{\oint \Gamma^2 dS} = 4 \quad (2.130)$$

mit

S Kugeloberfläche mit Radius 1m

Aus 2.130 folgt für das Bündelungsmass C der Streuquelle schliesslich

$$C = 10 \cdot \log(\gamma) = 6\text{dB} \quad (2.131)$$

Der Dämpfungsterm A_{mat} beschreibt die akustischen Eigenschaften Streuung und Absorption des Reflektorelements. Der frequenzabhängige Streugrad s entspricht dem Verhältnis diffus reflektierter zu spiegelnd reflektierter Schallenergie. Der Absorptionsgrad α beschreibt den Anteil vom Reflektorelement absorbiertes Schallenergie zur total

einfallenden Schallenergie. Der Streu- und der Absorptionsgrad werden richtungsunabhängig modelliert und liegen im Bereich zwischen 0 und 1.

$$A_{\text{mat}} = 10 \cdot \log (s(1 - \alpha)) \quad (2.132)$$

mit

- s Frequenzabhängiger statistischer Streugrad des Reflektors [0...1]
 α Frequenzabhängiger statistischer Absorptionsgrad des Reflektors [0...1]

Für den Absorptionsgrad α der Felsoberfläche wird 0 angenommen. Der Streugrad s wurde mit Messungen indirekt bestimmt. Abbildung 2.41 zeigt den idealisierten Verlauf des Streugrades für unterschiedliche Felsflächenrasterungen.

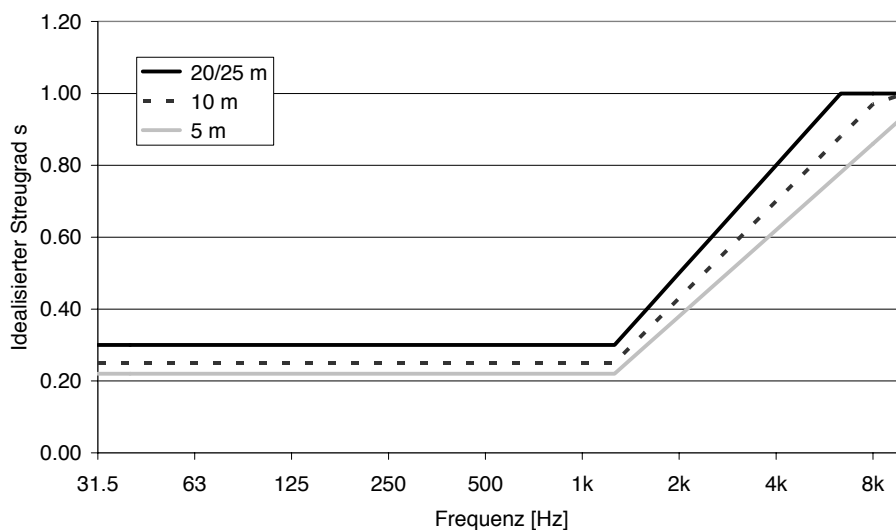


Abbildung 2.41: Idealisierter Streugrad s der Felsoberflächen für die Felsflächendiskretisierungen 20/25m, 10m und 5m.

Der gesamte Immissionspegel der Originalquelle i am Empfangspunkt k ergibt sich aus der Summation der Beiträge sämtlicher Streuquellen j :

$$L_{\text{Cliff},i,k} = 10 \cdot \log \left(\sum_j 10^{L_{i,j,k}/10} \right) \quad (2.133)$$

Durch Null-Setzen des Schalleistungspegels $L_{W,i}$ erhält man

$$A_{\text{Cliff},i,k} = -L_{\text{Cliff},i,k} \quad (2.134)$$

Identifikation und Diskretisierung von Felsflächen Die Identifikation von Felsflächen erfolgt analog zu den bewaldeten Flächen basierend auf der Klassierung des Vektor25-Primärflächendatensatzes der SwissTopo (siehe Tabelle 2.4 auf Seite I-26). Messungen, welche im Kapitel Validierung dokumentiert sind, haben gezeigt, dass neben dem Geländetyp *Fels* auch der Typ *Geröll* bei den Felsreflexionen berücksichtigt werden muss und dass für diese Geländeart die gleichen Eigenschaften wie für Fels verwendet werden können. Der Geländeart *Geröll* wird auch der Typ *Steinbruch* gleichgesetzt. Für die Geländearten *Geröll mit Gebüsch*, *Geröll auf Gletscher*, *Geröll in Wald* und *Geröll in offenem Wald* wird eine um 50% reduzierte reflektierende Fläche angenommen. Für sämtliche anderen

Geländearten wird keine Felsreflexion berechnet.

Zur Bestimmung der Sekundärquellen wird das Berechnungsgebiet mit einem Raster überzogen. Da die Beiträge der einzelnen Reflektoren nicht phasenrichtig überlagert werden, kann die Rasterung recht gross ausfallen. Als Standardeinstellung werden Elemente mit einer Grundfläche von 25 x 25 m verwendet. Feinere Rasterungen sind jedoch zulässig. Diese wirken sich allerdings geringfügig auf den Streugrad aus, da die aus dem Höhenmodell abgeleiteten Neigungen der Rasterelemente bei zunehmender Maschenweite in der Tendenz kleiner ausfallen. In Abbildung 2.41 sind die Streugrade für 25, 10 und 5 m Gitterweite dargestellt.

Zusätzlich kommt ein Gewichtungsfaktor zum Einsatz, welcher für Rasterelemente, welche nur zum Teil im felsigen Gebiet liegen, kleiner als eins ist. Die Höhe des Reflektors wird aus dem Geländedatensatz in der Mitte des Rasterelementes bestimmt. Der Flächeninhalt und die mittlere Neigung wird aus den vier Eckpunkten des Reflektorelementes ermittelt.

2.3.6.5 Vereinfachungen bei der Implementierung in sonRAIL

Zur Optimierung der Rechenzeiten wird bei den Wald- und Felsreflexionen auf eine explizite Berechnung der Hinderniswirkung und des Bodeneffektes verzichtet. In einem ersten Schritt wird die Sichtverbindung zwischen Quelle und Reflektor bzw. zwischen Reflektor und Empfänger geprüft. Ist die Sichtverbindung unterbrochen, so wird die Berechnung dieses Elementes abgebrochen und kein Reflexionsbeitrag angerechnet. Besteht eine Sichtverbindung, so wird ein idealisiertes Bodeneffektspektrum für $A_{gr/bar}$ gemäss Tabelle 2.10 eingesetzt.

Im Falle von Reflexionen an Waldrändern erfolgt die Schallausbreitung in der Regel dem Direktschall vergleichbar in Bodennähe. Entsprechend tritt ein spektraler Einbruch auf, der sich auch durch die Integration über ganze Linienquellen und eine Vielzahl von Reflektor-Elementen nicht ausmittelt. In Tabelle 2.10 ist ein idealisiertes Bodeneffektspektrum dargestellt, welches im Vergleich mit Messwerten abgeleitet wurde.

Bei reflektierenden Felswänden erfolgt die Schallausbreitung in aller Regel in grösserem Abstand zum Boden. Berechnete Bodeneffektspektren weisen deshalb Interferenzmuster auf, welche eine dichte Abfolge von Auslöschungen mit ersten Einbrüchen bereits unterhalb von 200 Hz zeigen. Die entsprechenden Interferenzmuster verschieben sich je nach Geometrie, so dass es in der Überlagerung der Beiträge vieler Reflektoren zu einer Ausmittlung kommt. Basierend auf Simulationen mit unterschiedlichen Geometrien, aber Reflektorelementen, welche sich durchwegs 100 m über Grund befanden, wurde eine mittlere Bodeneffektkorrektur abgeleitet, welche bei tiefen Frequenzen pauschal eine Anhebung um 6 dB und ab der 160 Hz Terz einen Pegelanstieg von 2 dB ausweist.

Frequenz	50 Hz	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz
Wald	6.0	6.0	6.0	3.0	0.0	-3.0	-9.0	-9.0
Fels	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	2.0	2.0	2.0

Frequenz	315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz
Wald	-8.0	-6.0	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0	0.0	2.0
Fels	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0

Frequenz	2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz	8000 Hz	10000 Hz
Wald	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Fels	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0

Tabelle 2.10: Idealisierte Bodeneffektspektren für Wald und Fels. Hinweis: Die Bodeneffektspektren gemäss Tabelle 2.10 beziehen sich auf den Ausbreitungspfad Quelle-Reflektor-Empfänger. Auch im Falle der Reflexionen an Felswänden und Baumkronen, welche beide als Streukörper modelliert werden, kommt das entsprechende Bodeneffektspektrum nur einmal zur Anwendung.

Bei Geröllfeldern ist die Annahme, dass die reflektierenden Flächen sich hoch über Grund befinden, nicht gegeben. Entsprechend hat das idealisierte Bodeneffektspektrum gemäss Tabelle 2.10 nur eine begrenzte Gültigkeit und es muss von grösseren spektralen Abweichungen zwischen Messung und Berechnung ausgegangen werden. Da

Reflexionen an Geröllfeldern primär im hochalpinen Raum ein Thema sind und in bewohnten Gebieten nur selten auftreten, wurde beschlossen, diese erhöhte Unsicherheit bei der Berechnung in Kauf zu nehmen.

Ein weiterer Spezialfall, der sich durch die Berücksichtigung von Geröll ergibt, ist, dass sich Quelle und Empfänger innerhalb von Flächen des Typs *Geröll* befinden können. Hier würden gleiche Flächen sowohl bei der Bodeneffektberechnung als auch bei der Berechnung diffuser Reflexionen einfließen. Um dies zu vermeiden, werden Reflektorelemente, die sich in zu kurzem Abstand von Quelle oder Empfänger befinden, ignoriert. Als Standardeinstellung für dieses minimale Distanzkriterium wird 30 m verwendet.

Ebenfalls Teil der vereinfachten Schallausbreitungsrechnung ist, dass für Wald- und Felsreflexionen auf die Berücksichtigung meteorologischer Effekte auf die Schallausbreitung verzichtet wird. Im Falle von Felsformationen, bei welchen die Schallausbreitung mehrheitlich hoch über Grund erfolgt, ist nur von einem geringen Wettereinfluss auszugehen. Entsprechend zeigen die in Kapitel 7.6 zusammengefassten Validierungen des Felsreflexionsmodells gute Übereinstimmungen mit den Messungen, unabhängig von der aktuellen Wetterlage. Bei Waldreflexionen können aber namentlich in ebenen Situationen mit Schallausbreitungspfaden knapp über Grund meteorologische Einflüsse auftreten, welche dem Direktschall vergleichbar sind. Entsprechende Messungen sind in Kapitel 7.5 dokumentiert. Die Berechnung führt in diesen Fällen zu einer systematischen Überschätzung der Immissionen. Die Ausbreitungsdistanzen sind jedoch so gross, dass die resultierenden Immissionspegel deutlich unterhalb sämtlicher Grenzwerte liegen und die Überschätzung deshalb in Kauf genommen werden kann.

Für die Kontrolle der Sichtverbindung wird ein Reflexionspunkt benötigt. Für Fels wird dieser in 0.1 m Höhe im Zentrum des Reflektorelementes angenommen. Für den Waldrand wird eine repräsentative Reflektorhöhe über Terrain von 10 m verwendet, was der mittleren Baumhöhe gemäss Tabelle 2.9 entspricht.

Bei den Felsreflexionen werden Schallquellen mit stark streifenden Einfallswinkeln $\phi_{i,j}$ nicht berücksichtigt und entsprechende Beiträge vernachlässigt. Der Schalleinfallswinkel wird in der Standardeinstellung mit $\phi_{i,j} < 80^\circ$ beschränkt. Diese Limitierung wird mit dem Ziel einer Rechenzeitoptimierung eingeführt.

2.4 Bestimmung der meteorologischen Inputparameter für das Schallausbreitungsmodell

Die Schallausbreitung im Freien unterliegt meteorologischen Einflüssen, welche im Ausbreitungsmodell von *sonRAIL* berücksichtigt werden. Die Definition einer Berechnungssituation umfasst entsprechend auch eine Beschreibung einer oder mehrerer Wetterbedingungen, wobei neben der Windrichtung die vertikalen Profile der Windgeschwindigkeit, der Temperatur und der relativen Luftfeuchte von Bedeutung sind. Zur Ermittlung dieser Profile wurde ein Meteovorprozessor als eigenständige Anwendung entwickelt, welcher im anschliessenden Abschnitt beschrieben wird. Die weiteren nachfolgenden Abschnitte liefern dazu die theoretischen Grundlagen und führen die implementierten Formeln auf.

Da neben einer korrekten Abbildung einer einzelnen Messsituation im Hinblick auf eine Beurteilung gemäss der Schweizerischen Lärmschutzverordnung (LSV) auch Jahresmittelwerte von Interesse sind, wird in Kapitel 2.4.5 die statistische Auswertung von Wetterdaten des Modells COSMO-2 der Meteo Schweiz präsentiert und gezeigt, wie für vordefinierte Standardprofile deren Auftretenswahrscheinlichkeit abgeschätzt werden kann.

2.4.1 Beschreibung des Meteovorprozessors

2.4.1.1 Übersicht

Der Meteovorprozessor wird dazu verwendet, Datenfiles für die Ausbreitungsrechnung zu generieren, welche die meteorologischen Bedingungen einer Ausbreitungssituation definieren. Mit Hilfe von allgemein gültigen Gesetzmässigkeiten werden dabei aus den an einzelnen Punkten vorliegenden Messwerten Profilkfunktionen für Windgeschwindigkeit, Temperatur und Feuchtigkeit der Luft ermittelt und mittels weniger Parameter charakterisiert. Mit dem Meteovorprozessor können die für Schallausbreitungsrechnungen erforderlichen Wind- und Temperaturprofile für verschiedene Meteosituationen und unterschiedliche Oberflächentypen ermittelt und in geeigneter Form ausgegeben werden. Meteoroparameter (z.B. gemessene Wind- und Temperaturwerte) sowie charakteristische Geländedaten werden über eine

Eingabemaske eingegeben. Basierend auf den in den Abschnitten 2.4.2 bis 2.4.4 beschriebenen Meteomodellen werden aus diesen Daten Höhenprofile berechnet. Es können verschiedene Berechnungsmethoden gewählt werden.

- a) Gradientenverfahren
- b) Lin-Log Darstellung
- c) Modifizierte Lin-Log Darstellung
- d) Explizite Vorgabe von Lin-Log Koeffizienten

Die berechneten Profile werden zu Kontrollzwecken grafisch dargestellt. Für die Weiterverarbeitung stehen Exportfunktionen zur Verfügung, mit denen die berechneten Profile als Textfiles exportiert werden können.

- a) Export der Absolutwerte
- b) Export der Lin-Log Parameter

Zusätzlich kann ein für einen vorgegebenen Geländetyp ermitteltes Profil auf andere Geländetypen umgerechnet werden. Diese Funktion besteht jedoch nur für die nach der modifizierten Lin-Log Darstellung ermittelten Profile. Die gewünschten Geländetypen können entweder auf den betreffenden Eingabefeldern spezifiziert oder als Parameterliste eingelesen werden.

2.4.1.2 Benutzeroberfläche und Inputparameter

Meteodaten und Parameter der Geländeoberfläche werden über die Benutzeroberfläche in die betreffenden Felder eingegeben (vgl. Abbildung 2.4.1). Hierzu werden folgende Daten angegeben:

Messdaten

z_m	[m]	Messhöhe [m]
$v(z_m)$	[m/s]	Windgeschwindigkeit in
WindDir	[°]	Windrichtung , 0°- Nordwind, 90°- Ostwind
$T(z_m)$	[°C]	Temperatur in der Höhe z_m
$rF(z_m)$	[%]	relative Luftfeuchtigkeit in z_m
N	[%]	Wolkenbedeckungsgrad

Geländedaten

Q_*	[W/m ²]	Nettostrahlung (VDI 3789, Blatt 2; BerechnungStrahlung.exe)
a	[]	Faktor zur Abschätzung des Energieflusses in den Boden (Albedo) $a = 0.1$ für ländliche Gebiete $a = 0.3$ für städtische Gebiete
α	[]	Faktor zur Abschätzung der Verdunstung, welcher die Verfügbarkeit von Feuchte in einem Untergrund beschreibt $\alpha = 0.0 - 0.2$: Wüste $\alpha = 0.2 - 0.4$: arid, ländlich $\alpha = 0.4 - 0.6$: Äcker, Wiesen bei ausgetrocknetem Boden $\alpha = 0.5 - 1.0$: Stadt mit Parks $\alpha = 0.8 - 1.2$: Äcker, Wiesen bei feuchtem Boden $\alpha = 1.2 - 1.4$: Wasserflächen
h_r	[m]	Höhe der Rauigkeitselemente

Zusätzliche Inputgrößen

Zusätzliche Parameter zur Steuerung der Berechnung:

The screenshot shows the 'Meteo2_V1.1' software interface. It is divided into several sections:

- Messdaten (Measurement Data):**
 - Höhe zm [m]: 10.0
 - WindDir [°]: 0
 - v(zm) [m/s]: 2.5
 - T(zm) [°C]: 15.0
 - rF(zm) [%]: 70
 - N [%]: 25
- Geländedaten (Terrain Data):**
 - Typ 1: 300, Typ 2: 300
 - Q* [W/m²]: 0.30, alpha [°]: 0.20
 - alpha [°]: 1.0, h [m]: 0.20
 - h [m]: 0.50
 - Rotationshöhe [m]: 100
- Output Data (Results):**

	original	optimiert	mod
u* [m/s]	0.221	0.199	0.221
Theta* [°K]	-0.332	-0.370	-0.306
q* [g/g]	-1.7896	-1.9625	-1.1312
Gg [W/m²]	90.0	90.0	40.0
Gh [W/m²]	90.5	90.5	0.1
Ge [W/m²]	119.5	119.5	76.7
Obukov-Länge L [m]	-10.8	-7.9	-11.8
Lef [m]	-10.8	-7.9	-11.8
Grenzschichthöhe h [m]	1000.0	1000.0	1000.0
untere Limite für L [m]	-1.0	0.80	0.50
obere Limite für L [m]	10.0		
untere Limite für v [m/s]	1.5		

Abbildung 2.42: Eingabeoberfläche des Meteorprozessors.

z_{\max}	[m]	Maximale Berechnungshöhe
dz	[m]	Schrittweite der Berechnung
s	[-]	Faktor zur Steuerung der Grenzhöhe z_s
p	[-]	Faktor zur Steuerung des Abklingverhaltens
$L1$	[m]	Untere Schranke der Monin-Obukhov-Länge Tag
$L2$	[m]	Untere Schranke der Monin-Obukhov-Länge Nacht

Für spezielle Untersuchungen steht eine zusätzliche Oberfläche bereit, über welche spezifische Meteoparameter direkt eingegeben werden können (beispielsweise für eine homogene Atmosphäre). Über diese Oberfläche können zudem auch die in Harmonoise [68] für einzelne Meteotypen vorgegebenen Ähnlichkeitsparameter eingegeben und direkt in Lin-Log Parameter konvertiert werden (vgl. Abbildung 2.43).

2.4.1.3 Menüstruktur und zusätzliche Fenster

Im Menü 'File' finden sich die Menüpunkte 'Parameter speichern', 'Absolutwerte exportieren', 'Geländedaten umrechnen' und 'Beenden'. Die Daten werden im ASCII-Format als *.txt-Files ausgegeben.

Mit dem Menü 'Parameter speichern' werden die LinLog-Parameter des nach der modifizierten Methode ermittelten Profils ausgegeben. Neben den reinen LinLog-Parametern für Windgeschwindigkeit, potenzielle Temperatur und Feuchtigkeit werden auch die für die Ermittlung dieser Parameter massgebenden Grössen ausgegeben.

Mit dem Menü 'Absolutwerte exportieren' werden die Absolutwerte des berechneten Profils für die Grössen Windgeschwindigkeit, absolute Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit ausgegeben. Die Daten werden bis zu der auf dem



Abbildung 2.43: Eingabeoberfläche für manuelle Eingabe der Lin-Log Parameter.

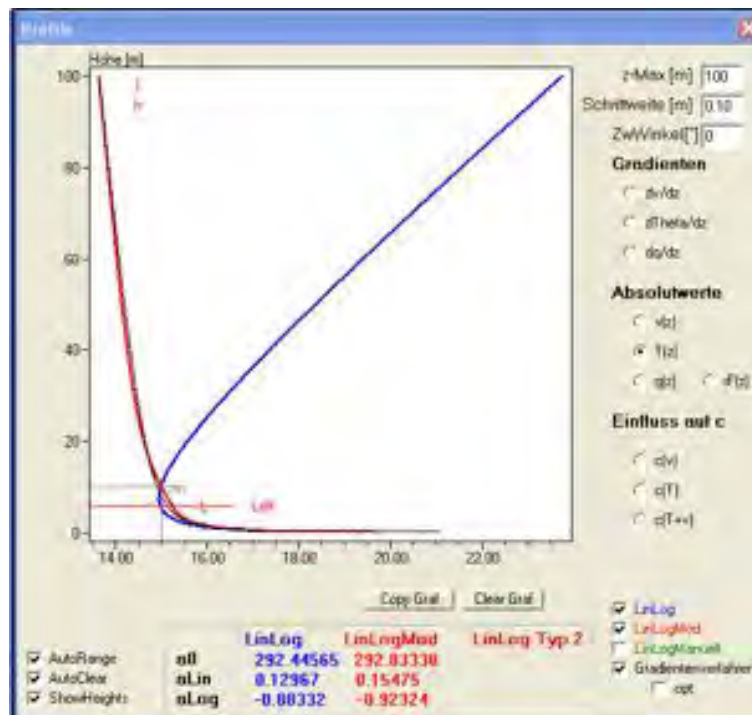


Abbildung 2.44: Grafikfenster mit Darstellung der Basis-Profilfunktionen, den LinLog-Profilen gemäss Harmonoise und dem modifizierten LinLog Profil.

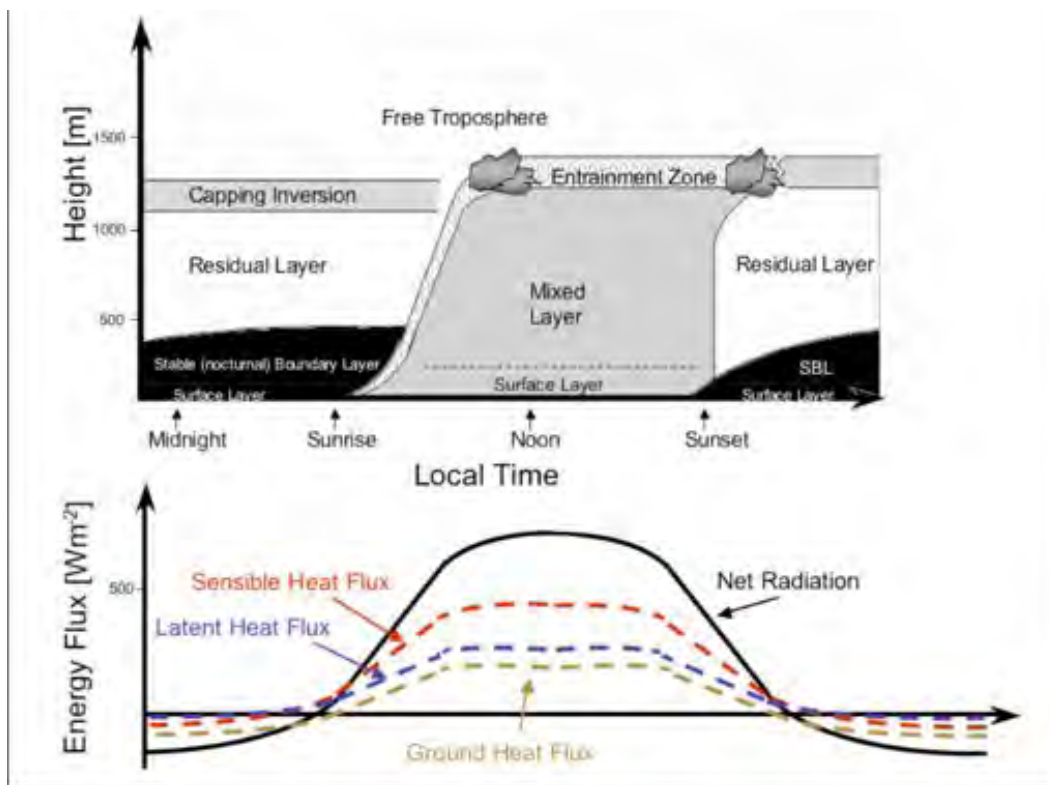


Abbildung 2.45: Schematische Darstellung der Atmosphäre im Tagesverlauf (Quelle: M. Rotach, Meteo Schweiz, adaptiert und erweitert nach [69]).

Anzeigefenster angegebenen Maximalhöhe z_{\max} mit der ebenfalls wählbaren Schrittweite dz abgespeichert. Zusätzlich werden die Gradienten der Windgeschwindigkeit, der potentiellen Temperatur sowie der absoluten Feuchtigkeit für die um eine halbe Schrittweite versetzte Höhe ausgegeben.

Mit dem Menü 'Geländedaten umrechnen' können Meteoprofile für unterschiedliche Geländetypen bzw. Geländeoberflächen berechnet werden. Die in einem ASCII-File spezifizierten Geländedaten werden eingelesen und für jeden Geländetyp wird das betreffende Meteoprofil berechnet. Die so berechneten Profile werden im Grafikfenster angezeigt und die Parameter in einem ASCII-File ausgegeben (nur LinLog-Parameter).

2.4.2 Grundlagen

2.4.2.1 Aufbau der bodennahen Atmosphäre

Abbildung 2.45 zeigt den Aufbau der bodennahen Atmosphäre im Tagesverlauf. Am Tag entstehen konvektive Bedingungen als Folge der positiven Strahlungsbilanz an der Oberfläche. Diese führen zu einer guten Durchmischung der Atmosphäre bis in grosse Höhen (Mixed Layer ML). In der Nacht bildet sich aufgrund der fehlenden Einstrahlung und des schnelleren Auskühlens der Oberfläche in Bodennähe eine Inversionsschicht, welche mit zunehmender Dauer der Nacht anwächst (Stable Nocturnal Boundary Layer SBL). Nach Sonnenaufgang beginnt diese Inversionsschicht vom Boden her aufzubrechen; vollständig verschwunden ist sie jedoch erst nach mehreren Stunden. Da der Stable Boundary Layer deutlich weniger mächtig ausfällt als der Mixed Layer, verbleibt oberhalb ein Bereich der Atmosphäre, welcher in etwa die Bedingungen des Vortages in dieser Höhe widerspiegelt, genannt Residual Layer (RL).

Der Bereich direkt an der Oberfläche wird Surface Layer genannt. Der Surface Layer wird dadurch charakterisiert, dass einerseits die vertikalen Flüsse von Wärme und Impuls als näherungsweise konstant angesehen werden können und dass andererseits die Bedingungen innerhalb des Surface Layer von den Randbedingungen an der Grenze Oberfläche-Atmosphäre abgeleitet werden können. Sowohl am Tag als auch in der Nacht weist der Surface Layer rund 10% der Mächtigkeit des Mixed Layers resp. des Stable Boundary Layers auf. Da der Mixed Layer in der Regel

mehr als 1 km hoch reicht, deckt der Surface Layer am Tag den gesamten Bereich ab, welcher für bodennahe Quellen aus akustischer Sicht von Interesse ist. Die nächtliche Inversionschicht weist jedoch deutlich geringere Höhen auf und kann teilweise weniger als 100 m betragen. Für nächtliche Situationen ist deshalb aus akustischer Sicht auch die Modellierung der Schichten oberhalb des Surface Layers von Bedeutung.

2.4.2.2 Ähnlichkeitstheorie

Grundlagen / Quellen: [69], Kap. 9: Similarity Theory, [70], Kap. 7: Dynamik der bodennahen Luftschichten

Ziel der Ähnlichkeitstheorie ist es, durch die Wahl geeigneter Parameter die interessierenden Größen mittels dimensionsloser Profilkfunktionen beschreiben zu können und damit universell gültige Gesetzmässigkeiten abzuleiten. Wichtige Parameter sind die Reibungsgeschwindigkeit u_* und die Normierungsparameter für die potenzielle Temperatur Θ_* und für die Feuchte q_* . u_* und Θ_* werden aus den Kovarianzen der vertikalen und horizontalen Windgeschwindigkeit resp. der vertikalen Windgeschwindigkeit und der Temperatur gebildet (Gleichung (2.135)). Der Index 'S' wie Surface bezeichnet den Bereich des Surface Layers. u_* ist auch ein Mass für die reibungsbedingte Schubspannung.

$$u_* = \sqrt{\overline{v'w'_S}} = \tau / \rho$$

$$\Theta_* = \frac{-\overline{T'w'_S}}{u_*} \quad (2.135)$$

mit:

- v' : Abweichung der Horizontalkomponente der Windgeschwindigkeit vom gleitenden Mittelwert
- w' : Abweichung der Vertikalkomponente der Windgeschwindigkeit vom gleitenden Mittelwert
- T' : Abweichung der Temperatur vom gleitenden Mittelwert
(Die Mittelungszeit beträgt typischerweise 30 Minuten.)
- τ : Schubspannung
- ρ : Dichte
- $\overline{\quad}$: Kovarianz

Die Beziehungen haben allgemeine Gültigkeit, d.h. sie gelten auch innerhalb des Stable Boundary Layers. Im Surface Layer⁶ ist die Reibungsgeschwindigkeit u_* per definitionem unabhängig von der Höhe und kann daher als Konstante angesehen werden. Bei thermisch neutraler Schichtung treten zudem keine konvektionserzeugenden Auftriebskräfte auf; Turbulenz und Impulsaustausch werden nur durch Scherkräfte initiiert. Diese Voraussetzungen erlauben eine relativ einfache Darstellung der Höhenprofile innerhalb dieser Schicht (vgl. [70], p. 295ff). Unter dieser Voraussetzung ist der Gradient der Windgeschwindigkeit umgekehrt proportional zur Höhe z .

$$\frac{dv_x}{dz} = \frac{u_*}{k \cdot z} \quad (2.136)$$

mit:

- v_x : x-Komponente der Windgeschwindigkeit [m/s]
- u_* : Reibungsgeschwindigkeit [m/s]
- k : von-Karmankonstante

Durch Integration ergibt sich daraus ein logarithmisches vertikales Windprofil der Form:

$$v_x(z) = \frac{u_*}{k} \cdot \ln \frac{z}{C_x} \quad (2.137)$$

mit der Integrationskonstanten C_x , die experimentell bestimmt werden muss (siehe weiter unten). Bei thermisch nicht neutraler Schichtung gelten diese einfachen Zusammenhänge nicht mehr. In Analogie zu Gleichung (2.136) wird der Gradient mit einer vom vertikalen Wärmefluss H abhängigen Korrekturfunktion erweitert zu

⁶Der Surface Layer wird in der Literatur z.T. auch als Prandtl-Schicht bezeichnet.

$$\frac{dv_x}{dz} = \frac{u_*}{k \cdot z} \cdot \Phi(H, u_*, z) \quad (2.138)$$

mit

$$\Phi(H, u_*, z) = \frac{\text{aktueller vertikaler Gradient der Windgeschwindigkeit}}{\text{Gradient der Windgeschwindigkeit bei neutraler Schichtung}} \quad (2.139)$$

Mit Hilfe einer geeigneten Skalierungslänge L kann die Profilmfunktion $\Phi(H, u_*, z)$ in der Form

$$\Phi(H, u_*, z) = \Phi(z/L) \quad (2.140)$$

geschrieben werden. Die Skalierungslänge L ist die sog. Monin-Obukhov Länge, welche ein Mass für die Schichtdicke der gut durchmischten Atmosphäre darstellt (vgl. Kap. 2.4.3.4). Die Monin-Obukhov-Gesetze basieren auf der Annahme konstanter Flüsse von Impuls, potenzieller Temperatur und Feuchte mit der Höhe. Unter dieser Voraussetzung gilt:

$$\frac{d\bar{u}}{dz} = \frac{u_*}{k \cdot z} \cdot \phi_m(z/L) \quad \frac{d\bar{\Theta}}{dz} = \frac{\Theta_*}{k \cdot z} \cdot \phi_h(z/L) \quad \frac{d\bar{q}}{dz} = \frac{q_*}{k \cdot z} \cdot \phi_q(z/L) \quad (2.141)$$

mit:

- ϕ : Dimensionslose Profilmfunktionen für Windgeschwindigkeit, Temperatur und Feuchte
- \bar{u} : Zeitlicher Mittelwert des dreidimensionalen Windgeschwindigkeitvektors
- $\frac{d\bar{u}}{dz}$: Gradient der Windgeschwindigkeit mit der Höhe
- $\frac{d\bar{\Theta}}{dz}$: Gradient der potenziellen Temperatur mit der Höhe
- $\frac{d\bar{q}}{dz}$: Gradient der spezifischen Luftfeuchtigkeit mit der Höhe
- k : von Karman Konstante ≈ 0.4
- u_* : Normierungsparameter für die Windgeschwindigkeit, Reibungsgeschwindigkeit [m/s]
- Θ_* : Normierungsparameter für die potenzielle Temperatur [K]
- q_* : Normierungsparameter für die Feuchte [g Wasser / g Luft]

2.4.3 Berechnung der Ähnlichkeitsparameter

Grundlagen / Quellen: [69], Kap. 7: Boundary Conditions and Surface Forcings, Kap. 9: Similarity Theory

2.4.3.1 Berechnung des Wärmebudgets an der Oberfläche

Grundlagen / Quellen: [71]

$$Q_* = Q_H + Q_E + Q_G \quad (2.142)$$

mit:

- Q_* : Nettostrahlung, inklusive langwellige und kurzwellige Komponenten [W/m²]
(Resultat der Strahlungsbilanz gemäss [72])
- Q_H : Fühlbarer Wärmefluss [W/m²]
- Q_E : Latenter Wärmefluss (in Form von Feuchtetransport) [W/m²]
- Q_G : Wärmefluss in den Untergrund [W/m²]

$$Q_G = a \cdot Q_* \quad (2.143)$$

mit:

- a : Faktor zur Abschätzung der Energieflusses in den Boden []

Priestly-Taylor Parametrisierung:

$$Q_H = \left[\frac{(1 - \alpha) + S}{1 + S} \right] \cdot Q_* \cdot (1 - a) - \alpha \cdot \beta' \quad (2.144)$$

mit:

- α : Faktor zur Abschätzung der Verdunstung []
- S : Lineare Approximation, gültig für -5 °C bis 35 °C siehe Gleichung (2.145)
- β' : Konstante zur Korrektur der Advektion = 5 W/m²

$$S = \frac{c_p}{L_e \cdot \frac{dq_s}{dT}} \approx 0.21 + \frac{1.8}{40 \cdot (35 - T[^\circ\text{C}])} \quad (2.145)$$

mit:

- c_p : spezifische Wärmekapazität für Luft
- L_e : Verdampfungsenergie von Wasser $\approx 2.5 \cdot 10^6$ J/kg
- $\frac{dq_s}{dT}$: Steigung der Sättigungskurve der spezifischen Feuchte in Luft (Clausius-Clapeyron-Gleichung)

Bemerkung: In [71] wird $\beta' = 20$ W/m² angegeben. β' wurde angepasst, um eine bessere Übereinstimmung mit Temperaturprofilen von COSMO-2 (siehe Abschnitt 2.4.5.1) zu erhalten.

Da Q_* einen Inputparameter darstellt, kann Q_E mit Hilfe von Gleichung (2.142) abgeleitet werden.

2.4.3.2 Berechnung der Reibungsgeschwindigkeit u_*

Surface scale similarity (Monin-Obukhov similarity)

Grundlagen / Quellen: [73], [74], [71], [75]

Die Reibungsgeschwindigkeit u_* wird nachfolgend gemäss [71] bestimmt. Die Gleichungen basieren auf den Profilfunktionen von Businger et al. [73], ohne jedoch die Modifikationen nach [75] zu berücksichtigen (siehe Kap. 2.4.3.5).

In der Nacht, d.h. wenn $Q_H \leq 0$ gilt:

$$u_* = \frac{k \cdot v_m}{2 \cdot \ln \left[\frac{z_m - d}{z_0} \right]} \left[1 + \sqrt{1 - 4 \left(\frac{4.7 \cdot g \cdot z_m \cdot \Theta_* \cdot \ln[(z_m - d)/z_0]}{k \cdot T_m \cdot v_m^2} \right)} \right] \quad (2.146)$$

Θ_* wird mittels zweier empirischer Gleichungen abgeschätzt, wobei jeweils der kleinere Wert der Gleichungen (2.147) und (2.148) verwendet wird. Gleichung (2.147) leitet Θ_* aus dem Wolkenbedeckungsgrad N und Gleichung (2.148) aus der Windgeschwindigkeit und weiteren Grössen ab.

$$\Theta_{*1} = 0.09(1 - 0.5 \cdot N^2) \quad (2.147)$$

$$\Theta_{*2} = \frac{k \cdot T \cdot v^2}{18.8 \cdot g \cdot z_m \cdot \ln[(z_m - d)/z_0]} \quad (2.148)$$

Als zusätzliche Obergrenze wird für das Produkt von u_* und Θ_* ein Wert von 0.05 K·m/s festgelegt. Bei zu hohen Werten wird Θ_* in Schritten von 10^{-4} reduziert, bis das Kriterium erfüllt wird. Der so abgeschätzte Wert von Θ_* wird lediglich für die Berechnung von u_* verwendet. Der eigentliche Wert von Θ_* wird anschliessend nach dem in Abschnitt 2.4.3.3 angegebenen Verfahren aus u_* berechnet.

Am Tag, d.h. wenn $Q_H > 0$ gilt:

$$u_* = \frac{k \cdot v_m}{\ln \left[\frac{z_m - d}{z_0} \right]} [1 + d_1 \cdot \ln(1 + d_2 \cdot d_3)] \quad (2.149)$$

mit:

- v_m : horizontale Komponente der Windgeschwindigkeit in der Messhöhe z_m
 d : Nullflächenverschiebung [m] $\approx 0.5 \cdot h_r$ mit h_r der Höhe der Rauigkeitselemente
 Die Nullflächenverschiebung d beschreibt den bodennahen Bereich in welchem die Gradienten des Windes, der potenziellen Temperatur und der absoluten Feuchte null sind.
 (Aufgrund der numerischen Umsetzung wird d auf die 1. Stelle nach dem Komma abgerundet.)
 z_0 : Rauigkeitslänge [m] $\approx 0.1h_r$
 d_1 : $0.128 + 0.005 \cdot \ln[z_0/(z_m - d)]$, falls $z_0/(z_m - d) \leq 0.01$, sonst $d_1 = 0.107$
 d_2 : $1.95 + 32.6[z_0/(z_m - d)]^{0.45}$
 d_3 : $\frac{Q_H}{\rho \cdot c_p} \frac{k \cdot g \cdot (z_m - d)}{T_m} \left[\frac{\ln[(z_m - d)/z_0]}{k \cdot v_m} \right]^3$
 T_m : Temperatur in der Messhöhe z_m

Für die Berechnung von u_* und Θ_* wird in mehreren Formeln der Rechenvorschrift von Hanna und Chang [71] der natürliche Logarithmus von $(z_m - d)/z_0$ gebildet. Es wird dabei davon ausgegangen, dass bei der Berechnung ein positiver Wert resultiert. Um dies zu garantieren, müssen die Eingabedaten folgendes Kriterium erfüllen:

$$\frac{z_m}{h_r} > 0.6 \quad (2.150)$$

2.4.3.3 Berechnung der Normierungsparameter für Temperatur und Feuchte

Θ_* und q_* werden aus der Reibungsgeschwindigkeit u_* sowie dem fühlbaren bzw. latenten Wärmefluss berechnet. Die Ansätze wurden aus [76] und [77] entnommen bzw. abgeleitet. Die neue Berechnung von Θ_* ersetzt den im vorherigen Abschnitt ermittelten Wert. Dieses Vorgehen wurde gewählt, da die Formeln (2.151) und (2.152) auf einem einheitlichen Konzept basieren und somit ein aufeinander abgestimmtes Verhalten zeigen.

$$\Theta_* = \frac{-Q_H}{\rho \cdot c_p \cdot u_*} \quad (2.151)$$

$$q_* = \frac{-Q_E}{\rho \cdot L_e \cdot u_*} \quad (2.152)$$

2.4.3.4 Monin-Obukhov-Länge und Höhe der atmosphärischen Grenzschicht

Ein Mass für die Höhe der mechanisch gut durchmischten Schicht der Atmosphäre ab Oberfläche ist die Monin-Obukhov-Länge L (vgl. [69] p. 181, [71]):

$$L = \frac{\bar{\Theta} \cdot u_*^2}{k \cdot g \cdot \Theta_*} = -\frac{u_*^3 \cdot \bar{\Theta} \cdot \rho \cdot c_p}{k \cdot g \cdot Q_H} \quad (2.153)$$

mit:

- $\bar{\Theta}$: mittlere potenzielle Temperatur
 T : absolute Temperatur [K]
 g : Erdbeschleunigung $\approx 9.81 \text{ m/s}^2$
 ρ : Dichte der Luft $\approx 1.225 \text{ kg/m}^3$ (auf Meereshöhe)
 c_p : spezifische Wärmekapazität für Luft $\approx 1004.67 \text{ J/kg/K}$ (trockene Luft)

Stabile Atmosphären sind gekennzeichnet durch $L > 0$; instabile Situationen durch $L < 0$. Im Übergangsbereich, d.h. bei neutraler Atmosphäre geht L gegen $\pm\infty$.

Bei instabilen Verhältnissen kann davon ausgegangen werden, dass die atmosphärische Grenzschicht in über 1 km Höhe liegt und somit deutlich grösser ausfällt, als es akustisch von Belang ist. Bei stabilen Situationen kann die atmosphärische Grenzschicht jedoch auf unter hundert Meter zurückgehen. Für stabile Situationen wird die Höhe der atmosphärischen Grenzschicht h gemäss folgendem Ansatz aus [71] abgeschätzt:

$$h = \frac{L}{3.8} \left[-1 + \sqrt{1 + 2.28 \cdot \frac{u_*}{f \cdot L}} \right] \quad (2.154)$$

mit:

f : Coriolis-Parameter für mittlere Breiten $\approx 10^{-4} \text{ s}^{-1}$

Da die Modelle nur im Surface layer Gültigkeit haben, sind Messdaten aus grösseren Höhen grundsätzlich nicht oder zumindest nur mit Einschränkungen einsetzbar. Falls sich die Messhöhe bereits ausserhalb des Surface layer befindet, d.h. $z_m > 0.1 \cdot h$ ist, werden als Warnung in der Benutzeroberfläche die Zahlenwerte der Höhe z_m und der Grenzschichthöhe h rot hinterlegt.

Die Monin-Obukhov-Gesetze stossen an ihre Grenzen, wenn nicht mehr genügend Turbulenz vorhanden ist, um konstante, höhenunabhängige Flüsse zu garantieren. Diese Situation tritt namentlich bei bodennahen Inversionen während der Nacht auf. Gemäss Gleichung (2.153) resultieren hier sehr kleine Monin-Obukhov-Längen, was namentlich unrealistisch hohe Temperaturgradienten zur Folge hat. Um ein entsprechendes Fehlverhalten einzuschränken, wird L in stabilen Situationen auf $\geq 10 \text{ m}$ limitiert.

2.4.3.5 Profilfunktionen

Die dimensionslosen Profilfunktionen wurden experimentell bestimmt. [75] gibt einen guten Überblick über die bekanntesten Ansätze.

Instabile Schichtung ($L \leq 0$ Monin-Obukhov similarity)

Grundlagen / Quellen: [74], [71]; [75]

Basierend auf [75] werden im Meteovorprozessor folgende Ansätze verwendet, welche eine Modifikation der Vorschläge von Businger et al. von 1971 [73] darstellen⁷.

$$\phi_m = \left[1 - 19.3 \frac{z}{L}\right]^{-0.25} \quad \phi_h = \left[1 - 12.0 \frac{z}{L}\right]^{-0.5} \quad \phi_q = \phi_h \quad (2.155)$$

Die Annahme gleicher Profilfunktionen für Feuchte und Temperatur ist nicht Teil von [71], sondern stützt sich auf [69], Seite 384 und [77].

Stabile Schichtung

Grundlagen / Quellen: [78], [74], [75]

Die Monin-Obukhov similarity enthält auch Profilfunktionen, welche den stabilen Fall innerhalb des Surface Layers beschreiben. Diese Funktionen liefern vergleichbare Resultate zu den nachfolgend aufgeführten Ansätzen. Da sie jedoch im Bereich des Local Scaling nicht anwendbar sind, werden sie zur Vermeidung von Unstetigkeiten beim Übergang nicht eingesetzt. Sie werden hier nur der Vollständigkeit halber aufgeführt (vgl. [75]).

$$\phi_m = 1 + 6.0 \frac{z}{L} \quad \phi_h = 0.95 + 7.8 \frac{z}{L} \quad \phi_q = \phi_h \quad (2.156)$$

Statt der oben aufgeführten, im Bereich des Local Scaling nicht anwendbaren Funktionen werden Profilfunktionen nach Forrer und Rotach [74] verwendet, welche auf den Stabilitätsfunktionen von Beljaars und Holtslag [78] basieren:

$$\begin{aligned} \phi_m &= 1 + a \frac{z}{L} + b \frac{z}{L} e^{-d \frac{z}{L}} - b \cdot d \frac{z}{L} \left(\frac{z}{L} - \frac{c}{d}\right) \cdot e^{-d \frac{z}{L}} \\ \phi_h &= 1 + a \frac{z}{L} \left(1 + \frac{2}{3} a \frac{z}{L}\right)^{0.5} + b \frac{z}{L} e^{-d \frac{z}{L}} - b \cdot d \frac{z}{L} \left(\frac{z}{L} - \frac{c}{d}\right) \cdot e^{-d \frac{z}{L}} \end{aligned} \quad (2.157)$$

mit:

$$a = 1, b = 0.667, c = 5, d = 0.35$$

⁷Die Modifikationen betreffen zwei Aspekte: Businger et al. verwendeten eine von Karman Konstante k von 0.35. Da heutzutage $k = 0.4$ gebräuchlich ist, wurden die Profile entsprechend korrigiert. Die so modifizierten Profilfunktionen für die Temperatur ergeben für $L = \infty$ 0.95 anstatt 1.0, wie das zu erwarten wäre. Die Konstante 0.95 wurde deshalb auf 1.0 angepasst.

Es wird wiederum angenommen, dass die Profilkfunktionen für Feuchte und Temperatur übereinstimmen.

Local scale similarity

Grundlagen / Quellen: [78], [74]

Die Voraussetzung der 'Monin-Obukhov similarity' ist nicht mehr erfüllt, wenn zu wenig Turbulenz vorhanden ist, d.h. wenn kaum Wind auftritt und sich aufgrund dominierender Ausstrahlung eine stabile, laminare Schichtung der Atmosphäre ergibt. In diesen Situationen sind die Ähnlichkeitsbeziehungen der 'Local similarity' anzuwenden. Anstatt der Ähnlichkeitsparameter u_* , Θ_* und q_* kommen u_L , Θ_L und q_L zur Anwendung, welche jedoch aus den Parametern des Surface Scaling abgeleitet werden. Im Gegensatz zu den Ähnlichkeitsparametern des Surface Scaling sind die Parameter des Local Scaling höhenabhängig und müssen deshalb für jede Höhe neu berechnet werden.

Mit zunehmender Höhe innerhalb des Stable Boundary Layers nehmen die vertikalen Flüsse des Impulses, der Temperatur und der Feuchte ab und sinken beim Übergang zum Residual Layer auf Null. Dieses Verhalten wird mit den nachfolgenden Funktionen aus [69], S. 361 nachgebildet.

$$\frac{u_L^2}{u_*^2} = \left[1 - \frac{z}{h}\right]^{1.5} \quad \frac{\Theta_L}{\Theta_*} = \left[1 - \sqrt{\frac{z}{h}}\right]^{1.5} \quad (2.158)$$

mit:

- z : Höhe über Boden [m]
 h : Höhe der atmosphärischen Grenzschicht [m]

Für die Feuchte werden die gleichen Gesetzmässigkeiten wie für die Temperatur angenommen. Die Obukhov-Länge L wird im Stable Boundary Layer nicht neu berechnet. (Da L_L , u_L und Θ_L gegen Null streben, ergeben sich sonst Divisionen durch sehr kleine Grössen mit der Gefahr un stetigen Verhaltens.)

2.4.4 Berechnung der Meteoprofile

Grundlagen / Quellen: [76], [69], Kap. 7 Boundary Conditions and Surface Forcings

Zur Berechnung der effektiven Höhenprofile gelangen zwei verschiedene Verfahren zur Anwendung:

- Die absoluten Windgeschwindigkeiten und Temperaturen werden direkt durch Aufsummation der betreffenden Gradienten berechnet. Ausgangspunkt für die Berechnung der absoluten Profile bilden die Messhöhe z_m und die dort messtechnisch ermittelten Absolutwerte von Wind, Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit.
- Die Höhenprofile werden mittels LinLog-Profilen dargestellt.

Die Berechnungen erfolgen für die Windgeschwindigkeit v , die potenzielle Temperatur Θ und für die spezifische Feuchtigkeit q . Die absolute Temperatur T und die relative Feuchtigkeit werden mittels nachfolgender Näherungsformel aus diesen Werten abgeleitet:

$$T = \Theta \left(\frac{p}{p_0}\right)^{0.286} \approx \Theta - \frac{g}{c_p} \cdot z \quad (2.159)$$

mit:

- p : Druck auf der Höhe z [Pa]
 p_0 : Druck auf der Referenzhöhe [Pa]; Annahme $p_0 \approx 100'000$ Pa

Um die Feuchtigkeit q in relative Luftfeuchtigkeit umzuwandeln, muss zuerst die maximale Wasseraufnahmefähigkeit der Luft bei den herrschenden Bedingungen bestimmt werden (vgl. [69], p. 276):

$$e_{sat} = 0.6112 \cdot e^{\frac{17.67[T(z)-273.16]}{T(z)-29.66}} \quad q_{sat} = 0.622 \cdot \frac{e_{sat}}{p} \approx 0.622 \cdot \frac{e_{sat}}{p_0 - \rho \cdot g \cdot z} \quad (2.160)$$

Die relative Luftfeuchtigkeit r ergibt sich aus dem Quotienten von q und q_{sat} .

$$r = \frac{q}{q_{sat}} \quad (2.161)$$

2.4.4.1 Gradientenverfahren

Beim Gradientenverfahren werden die Absolutprofile durch die Aufsummation der betreffenden Gradienten unter der Verwendung der Profilkfunktionen gemäss Abschnitt 2.4.3.5 berechnet. Ausgangspunkt für die Berechnung der absoluten Profile bilden die messtechnisch ermittelten Absolutwerte von Wind, Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit auf der Messhöhe z_m .

Die Gradienten werden mit Hilfe der massgebenden Profilkfunktionen für die diskreten Höhen $z_i = (i + 1/2) \cdot \Delta z$ berechnet mit $\Delta z = 0.1$ m.

In der Nacht (stabile Schichtung) werden bei der Berechnung drei Höhenbereiche mit unterschiedlichen Profilkfunktionen unterschieden:

- Surface-Layer ($0 \leq z \leq 0.1 \cdot h$) : Profile nach Gleichung (2.157)
- Local Scaling ($0.1 \cdot h < z \leq h$) : Profile nach Gleichung (2.157) und (2.158)
- Residual-Layer ($h < z \leq z_{max}$) : Gradienten werden generell auf 0 gesetzt.

Am Tag (labile Schichtung) werden die Profilkfunktionen nach Gleichung (2.155) verwendet. Es wird keine Unterscheidung nach Höhenbereichen vorgenommen.

Sämtliche Profile werden um die Nullflächenverschiebung d versetzt. Für $z \leq d$ werden die Gradienten der Windgeschwindigkeit, der potenziellen Temperatur und der Feuchte auf 0 festgelegt.

Bemerkung:

Per Definitionem sollte die Windgeschwindigkeit auf Bodenhöhe Null betragen. Als Ausgangspunkt zur Bestimmung der absoluten Profile werden jedoch die Messwerte auf der Höhe z_m verwendet. Dies hat zur Folge, dass die Windgeschwindigkeiten auf Bodenhöhe z.T. leicht von Null abweichen. Grössere Abweichungen sind als Hinweis auf eine Überforderung der Algorithmen zu interpretieren.

Bei der im nachfolgenden Kapitel beschriebenen Modellierung der Meteoprofile mittels LinLog-Profilen werden die Ähnlichkeitsparameter u_* , Θ_* , q_* und L derart modifiziert, dass die resultierende Windgeschwindigkeit am Boden exakt Null ist (vgl. Abschnitt 2.4.4.4). Durch die Aktivierung des Kontrollkästchens 'opt' können diese modifizierten Skalierungsgrössen zur Ermittlung der Profilkfunktionen nach dem Gradientenverfahren verwendet werden.

2.4.4.2 Darstellung mit LinLog-Profil

Ein in der Literatur häufig verwendeter Ansatz zur Modellierung der Windgeschwindigkeit und der Temperatur stellen Profilkfunktionen dar, welche einen logarithmischen und einen linearen Term kombinieren [79]⁸:

$$u(z) = a_{u,log} \cdot \ln \left[\frac{z - d + z_0}{z_0} \right] + a_{u,lin} \cdot (z - d) \quad (2.162)$$

$$T(z) = a_{0,T} + a_{T,log} \cdot \ln \left[\frac{z - d + z_0}{z_0} \right] + a_{T,lin} \cdot (z - d) \quad (2.163)$$

Im Rahmen des EU-Projektes HARMONOISE wurden Wind- und Temperaturprofile aus den Skalierungsparametern aus der Surface layer scale similarity abgeleitet [80], [81], [68]⁹:

⁸In der zitierten Publikation [79] wird allerdings kein Nullflächenversatz d verwendet.

⁹Die diesen Parametern zu Grunde liegenden Profilkfunktionen weichen jedoch geringfügig von den in Kap. 2.4.3.5 genannten Funktionen ab.

$$a_{u,log} = \frac{u_*}{k} \quad (2.164)$$

$$a_{u,lin} = \frac{u_*}{k} \frac{1.0}{L} \quad (Tag), \quad a_{u,lin} = \frac{u_*}{k} \frac{4.7}{L} \quad (Nacht)$$

bzw.

$$a_{T,log} = 0.74 \frac{\Theta_*}{k}$$

$$a_{T,lin} = \frac{\Theta_*}{k} \frac{0.74}{L} + \gamma_d \quad (Tag), \quad a_{T,lin} = \frac{\Theta_*}{k} \frac{4.7}{L} + \gamma_d \quad (Nacht) \quad (2.165)$$

Die nach den Gleichungen (2.162) und (2.163) auf der Messhöhe z_m berechneten Werte stimmen in der Regel nicht genau mit den gemessenen Werten überein. Um die Messwerte genau zu reproduzieren müssen daher zusätzliche Optimierungen vorgenommen werden. Das Optimierungsverfahren wird in Kap. 2.4.4.4 beschrieben.

LinLog-Profile der Feuchte werden analog zu den bei der Temperatur eingesetzten Ansätzen ermittelt. Die Profile der relativen Feuchte werden anschliessend gemäss Gleichung (2.161) in Abhängigkeit der lokalen Temperatur berechnet.

2.4.4.3 Darstellung mit modifiziertem LinLog-Profil

Das Verfahren gemäss Abschnitt 2.4.4.2 zur direkten Berechnung der Meteoprofile aus den Skalierungsparametern u_* , Θ_* und L ist nur für Höhen bis zur Monin-Obukhov-Länge L gültig. Für grössere Höhen sind die so berechneten Werte nicht zulässig und führen namentlich in sehr stabilen oder sehr labilen Situationen zu völlig unrealistischen Werten (siehe z.B. Abbildung 2.44). Damit das Verfahren auch für grössere Höhen anwendbar wird, werden die LinLog-Profilfunktionen entsprechend modifiziert. Dabei wird angenommen, dass in grösseren Höhen der Windgradient dv/dz und der Gradient der potenziellen Temperatur $d\Theta/dz$ gegen einen konstanten Wert ϵ gehen. Nach der hier vorgeschlagenen Methode werden die Harmonoise Original-Profile bis zur Grenzhöhe $z_s = s \cdot \text{Min}(L, h)$ übernommen¹⁰. Der Verlauf für grössere Höhen wird aus dem aktuellen Gradienten bei z_s ermittelt, indem die Höhenabhängigkeit dieses Gradienten exponentiell gegen einen vorgegebenen Grenzwert ϵ abnimmt. Sowohl für die Windgeschwindigkeit wie für die potenzielle Temperatur wird $\epsilon = 0$ gesetzt. Der Profilverlauf P kann unter Berücksichtigung des Höhenversatzes d entsprechend hergeleitet werden zu:

$$P(z > z_s + d) = a_0 + a_{lin} \cdot z_s + a_{log} \ln \left(\frac{z_s + z_0}{z_0} \right) + \left(a_{lin} + a_{log} \frac{1}{z_s + z_0} \right) \cdot (-p \cdot L) \cdot \left(1 - e^{-\frac{z - (z_s + d)}{p \cdot L}} \right) \quad (2.166)$$

Mit den freien Variablen s und p wird die Grenzhöhe resp. das Abklingverhalten der Funktion bestimmt. Im Vergleich mit den Profilen, welche mit dem Gradientenverfahren gemäss Abschnitt 2.4.4.1 resultieren, wurden für labile bzw. neutrale Situationen Standardwerte $s = 0.7$ und $p = 2.0$ und für stabile Situationen $s = 0.5$ und $p = 0.7$ ermittelt.

2.4.4.4 Abgleichen der Profile mit Messwerten

Die nach den Gleichungen (2.162) bis (2.165) bzw. (2.166) auf der Messhöhe z_m berechneten Werte stimmen in der Regel nicht genau mit den gemessenen Werten überein. Um die Messwerte genau zu reproduzieren müssen daher zusätzliche Optimierungen vorgenommen werden. Hierzu wird in einem Iterationsverfahren die Reibungsgeschwindigkeit u_* solange variiert, bis die nach (2.162) bzw. nach (2.166) berechnete Windgeschwindigkeit genügend genau mit dem vorgegebenen Wert übereinstimmt. Im Iterationsverfahren wird nicht nur u_* variiert, sondern es werden auch die von u_* abhängigen Grössen Θ_* , q_* und L stets neu berechnet. Zur Vermeidung allzu grosser Gradienten bei kleinen Höhen kann eine untere Schranke für den Absolutwert der Monin-Obukhov-Länge L gesetzt werden, welche

¹⁰Die Monin-Obukhov-Länge L kann sowohl positive wie auch negative Werte annehmen. Bei der hier folgenden Diskussion wird L immer als Absolutwert der Obukhov-Länge verstanden.

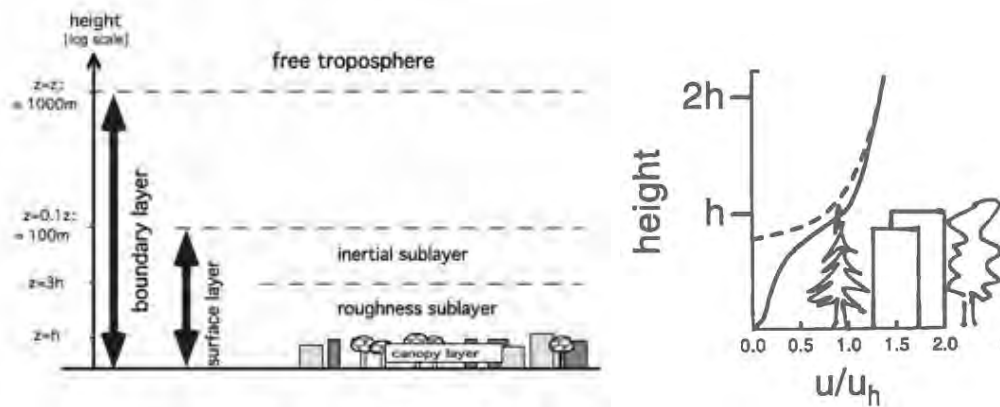


Abbildung 2.46: Darstellung des Roughness Sublayers (links). Die rechte Graphik zeigt als ausgezogene Linie den Verlauf des realen Windgeschwindigkeitsprofils im Vergleich zum Profil, welches sich unter Verwendung eines Nullflächenversatzes ergibt (gestrichelte Linie). (Quelle: [82])

für stabile und labile Luftschichtung ($L >$ bzw. < 0) separat vergeben werden kann.

Defaultwerte:

$L1 = -1 \text{ m}$ ($L < 0$, Tag)

$L2 = 20 \text{ m}$ ($L > 0$, Nacht)

Die Berechnung der LinLog-Koeffizienten nach Gleichung (2.164) bis (2.165) erfolgt anschliessend mit der für die vorgegebene Windgeschwindigkeit optimierten Reibungsgeschwindigkeit u_* . Der konstante Term a_0 in Gleichung (2.163) wird so angepasst, dass die Messwerte für Temperatur und Feuchtigkeit auf der Messhöhe z_m genau reproduziert werden.

2.4.4.5 Modifikation für geringe Windgeschwindigkeiten

Die der Berechnung der Meteoprofile zu Grunde liegende Ähnlichkeitstheorie setzt eine turbulente, genügend gut durchmischte Atmosphäre mit vertikalem Impulsaustausch voraus. Diese Voraussetzungen sind bei stabiler Luftschichtung und schwachem Wind nicht erfüllt. Damit auch Meteoprofile für geringe Windgeschwindigkeiten erstellt werden können, müssen daher zusätzliche Massnahmen getroffen werden. Hierzu wird eine untere Limite v_{\min} für die zu berücksichtigende Windgeschwindigkeit in der Messhöhe z_m definiert. Wird eine geringere Windgeschwindigkeit angegeben, dann wird diese ignoriert und die Ähnlichkeitsparameter werden mit der effektiven Windgeschwindigkeit v_{\min} ermittelt. Auch das oben beschriebene Optimierungsverfahren wird bezüglich v_{\min} angewandt. Daraus ergeben sich die LinLog Parameter für die potenzielle Temperatur Θ und für die spezifische Feuchtigkeit q . Das Profil der Windgeschwindigkeit u wird in einem separaten Schritt explizit auf Null gesetzt.

2.4.4.6 Modifikation der bodennahen Windprofile für grosse Rauigkeitlängen

In Abschnitt 2.4.3.2 wurde die Nullflächenverschiebung d eingeführt und gemäss Abschnitt 2.4.4.1 werden die Gradienten der Windgeschwindigkeit, der potenziellen Temperatur und der Feuchte unterhalb dieser Höhe d auf Null gesetzt. Diese vereinfachende Annahme, dass die Gradienten in unmittelbarer Bodennähe effektiv Null betragen, ist im Einzelfall nicht zutreffend. Bei Situationen mit grossen Rauigkeitshöhen, wie sie im Siedlungsbereich oder in der Nähe bewaldeter Flächen auftreten, bildet sich ein sogenannter Roughness Sublayer gemäss Abbildung 2.46 aus. Die dabei resultierenden Windgeschwindigkeitsprofile weichen deutlich von den Profilen ab, die sich aus einem Ansatz mit einem Nullflächenversatz gemäss Abschnitt 2.4.4.1 ergeben.

Aus diesem Grund werden die Absolutprofile der Windgeschwindigkeit für Höhen unterhalb der Rauigkeitshöhe h_r mit einem Ansatz aus [82] gemäss Gleichung (2.167) korrigiert:

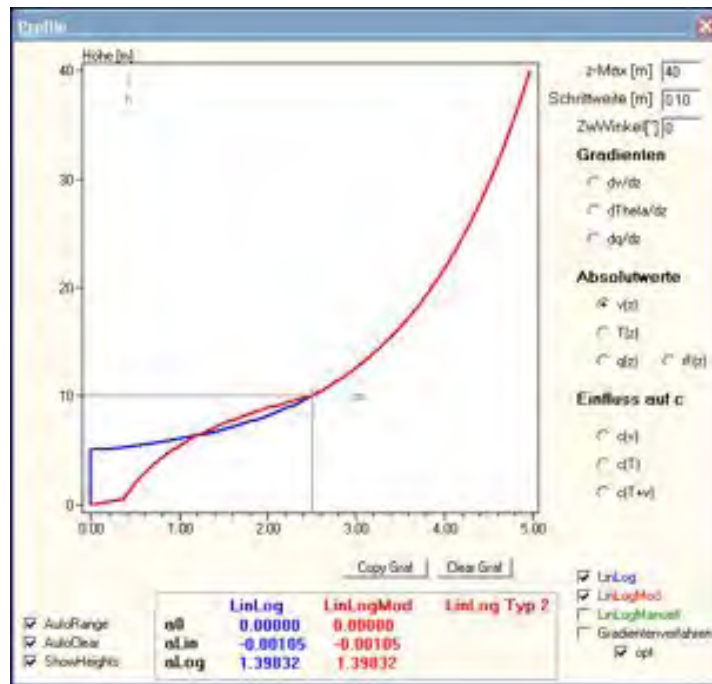


Abbildung 2.47: Auswirkung der Modifikation für eine Situation mit einer Rauigkeitshöhe von 10 m und einer Windgeschwindigkeit in 10 m von 2.5 m/s. Vergleich des original LinLog-Profiles mit dem modifizierten LinLog-Profil.

$$v(z) = v(h_r) \cdot \exp \left[-a \left(1 - \frac{z}{h_r} \right) \right] \quad (2.167)$$

mit: $a = 2$

Gleichung (2.167) liefert für $z = 0$ m eine Windgeschwindigkeit, welche nicht null entspricht. Um dieses Fehlverhalten zu kompensieren, wird die Windgeschwindigkeit ab $z = 0.5$ m linear ausgeblendet, so dass auf Bodenhöhe kein Wind mehr auftritt. Abbildung 2.47 zeigt exemplarisch wie sich die Modifikation auf die resultierenden Windgeschwindigkeitsprofile auswirkt.

2.4.4.7 Umrechnung auf andere Geländetypen

Ausgangsbasis für die Umrechnung eines Meteoprofils auf andere Geländeparameter ist die Windgeschwindigkeit auf der Referenzhöhe z_{ref} . Es wird davon ausgegangen, dass auf dieser Höhe der Einfluss des Untergrundes weitgehend vernachlässigbar ist und sich die Windgeschwindigkeit der freien Strömung einstellt. z_{ref} ist standardmässig auf 100 m festgelegt.

Für die Umrechnung auf einen anderen Geländetyp wird mit den zugehörigen Geländeparametern ein neues Wärmebudget ermittelt (Gleichung (2.143), (2.144)) und daraus nach Gleichung (2.146) bis (2.149) die Ähnlichkeitsparameter u_* , Θ_* , q_* sowie die zugehörige Monin-Obukhov-Länge L und die Grenzschichthöhe h nach Gleichung (2.154) berechnet. Anschliessend wird wiederum mit dem in 2.4.4.4 beschriebenen Iterationsverfahren die Reibungsgeschwindigkeit u_* variiert, bis die auf der Referenzhöhe z_{ref} vorgegebene Windgeschwindigkeit resultiert. Mit diesen Parametern werden auch die *LinLog*-Koeffizienten für die potenzielle Temperatur und Feuchte ermittelt und mit dem konstanten Term a_0 so verschoben, dass die vorgegebenen Werte auf der Höhe z_{ref} resultieren.

Für Meteosituationen mit geringer Windgeschwindigkeit, bei denen die Windgeschwindigkeit gemäss dem in Kapitel 2.4.4.5 definierten Kriterium generell auf Null gesetzt wird, wird als Referenzgeschwindigkeit v_{ref} diejenige Windgeschwindigkeit verwendet, welche sich mit der als untere Limite definierten Geschwindigkeit v_{min} auf der Referenzhöhe z_{ref} ergibt. Die Parameter für die potenzielle Temperatur und für die Feuchte werden mit Hilfe dieser Referenzgeschwindigkeit ermittelt. Die Parameter für die Windgeschwindigkeit werden anschliessend wiederum

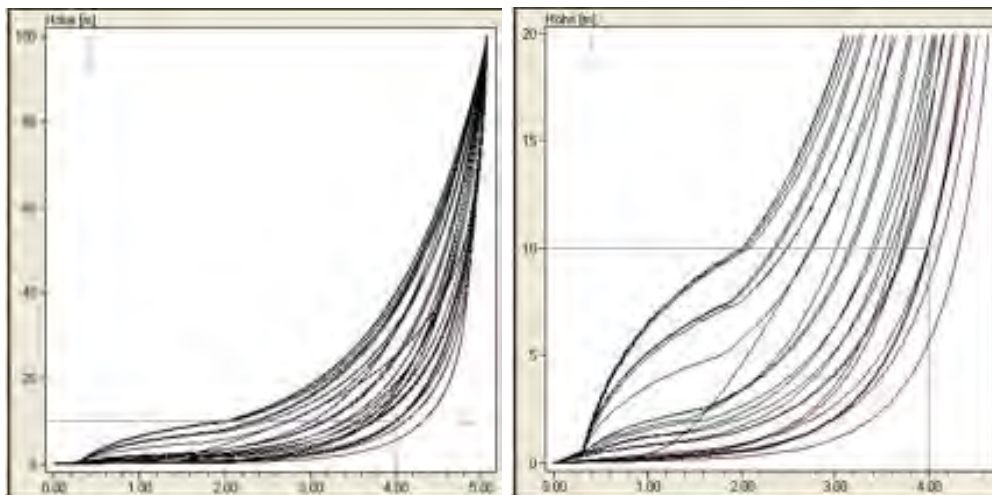


Abbildung 2.48: Windgeschwindigkeitsprofile für sämtliche Untergrundtypen gemäss Tabelle 2.11 für eine Situation mit 4 m/s Wind und einer Nettostrahlung von 50 W/m². Auf der linken Seite ist das Profil bis 100 m Höhe und auf der rechten Seite als Ausschnitt bis 20 m Höhe dargestellt. Der Standardtyp 'Graspiste' ist rot hervorgehoben.

generell auf Null gesetzt.

Die Nullflächenverschiebung d gemäss Abschnitt 2.4.3.2 beschreibt den bodennahen Bereich in welchem die Gradienten des Windes, der potenziellen Temperatur und der absoluten Feuchte null sind. Eine Veränderung der Höhe der Rauigkeitselemente h_r als geländespezifischem Parameter führt zu einer Anpassung der Nullflächenverschiebung d . Da die Profildfunktionen grundsätzlich erst ab einer Höhe $z \geq d$ definiert sind und die Messwerte auf Höhe z_m relativ zu diesem Nullflächenversatz zu interpretieren sind, ist eine Korrektur der echten Messhöhe auf eine scheinbare, dem neuen Geländetyp angepasste Höhe angezeigt. Diese Korrektur erfolgt, indem die Messhöhe z_m um die Differenz zwischen der ursprünglichen Nullflächenverschiebung des Referenzuntergrundes und dem neuen aus h_r berechneten Versatz angepasst wird. Auf diesem Weg wird auch ein Konflikt mit dem Ausschlusskriterium gemäss Gleichung 2.150 vermieden.

Die Charakterisierung des Untergrundes erfolgt in *sonRAIL* gemäss der Systematik des Primärflächendatensatzes aus dem Vektor25-Modell der Swiss Topo, da diese Daten auch zur Definition einer Berechnungssituation verwendet werden. Der Primärflächendatensatz weist in Form von geschlossenen Polygonen jede Fläche der Schweiz einer Objektart gemäss Tabelle 2.11 zu, welche durch ein mit 'Z_' beginnendes Schlüsselwort gekennzeichnet ist. In einem Parameterfile, welches als Inputgrösse von *sonRAIL* benötigt wird, werden den einzelnen Untergrundtypen über diese Schlüsselwörter Eigenschaften zugeordnet. Tabelle 2.11 zeigt die Eigenschaften sowie die zugeordneten Werte, welche für die Berechnung von standardisierten Meteoprofilen verwendet wurden. Die entsprechenden Schätzungen für a und α basieren auf Tabellen und Abbildungen aus [83], Seiten 372ff. Der Geländetyp 'S_Gleis' in der letzten Zeile von Tabelle 2.11 basiert nicht auf der Typisierung des Vektor25-Modells. Er wurde zur Abbildung der speziellen Ausbreitungseigenschaften über dem Gleiskörper nachträglich ergänzt (siehe dazu die Dokumentation zum Ausbreitungsmodell).

Der Geländetyp 'S_Gleis' in der letzten Zeile von Tabelle 2.11 basiert nicht auf der Typisierung des Vektor25-Modells. Er wurde zur Abbildung der speziellen Ausbreitungseigenschaften über dem Gleiskörper nachträglich ergänzt (siehe dazu die Dokumentation zum Ausbreitungsmodell).

Im Meteorvorprozessor kann diese Tabelle zur Geländetypisierung eingelesen und verarbeitet werden. Als Resultat werden Profildfunktionen für Wind, Temperatur und relative Feuchte für sämtliche Geländetypen im ASCII-Format ausgegeben. Diese Resultatfiles können dann in der *sonRAIL*-Benutzeroberfläche ausgewählt und für die Berechnung verwendet werden. Abbildung 2.48 zeigt als Beispiel Windgeschwindigkeitsprofile für sämtliche Untergrundtypen gemäss Tabelle 2.11 für eine Situation mit 4 m/s Wind und einer Nettostrahlung von 50 W/m².

ObjectVal	Beschreibung (Objektart)	hr	a	α
Z_BaumS	Baumschule	5.00	0.20	0.80
Z_Fels	Fels	0.50	0.30	0.10
Z_Fluss	Fluss	0.05	0.05	1.40
Z_Gebue	Gebüsch	2.50	0.20	0.80
Z_GerGeb	Geröll mit Gebüsch	2.00	0.25	0.50
Z_GerGle	Geröll auf Gletscher	1.00	0.30	1.10
Z_Geroel	Geröll	1.50	0.30	0.20
Z_GerWa	Geröll in Wald	10.00	0.20	1.00
Z_GerWaO	Geröll in offenem Wald	7.50	0.15	1.00
Z_Glet	Gletscher	0.30	0.80	1.40
Z_GsPist	Graspiste	0.20	0.20	1.20
Z_HaPist	Piste mit Hartbelag	0.10	0.30	0.80
Z_KiGrub	Kiesgrube	1.00	0.30	0.30
Z_LeGrub	Lehmgrube	1.00	0.15	0.40
Z_ObstAn	Obstanlage	2.50	0.20	0.80
Z_Reben	Reben	1.50	0.20	0.80
Z_See	See	0.05	0.05	1.40
Z_Siedl	Siedlung	10.00	0.25	1.00
Z_StauDa	Staudamm	7.50	0.30	0.40
Z_StauMa	Staumauer	7.50	0.30	0.40
Z_SteBru	Steinbruch	1.50	0.30	0.20
Z_SumGeb	Sumpf und Gebüsch	2.00	0.10	1.20
Z_Sumpf	Sumpf	0.30	0.10	1.40
Z_SumWa	Sumpf in Wald	10.00	0.10	1.30
Z_SumWaO	Sumpf in offenem Wald	7.50	0.15	1.20
Z_Uebrig	Übriges Gebiet	0.20	0.20	1.20
Z_Wald	Wald	10.00	0.20	1.00
Z_WaldOf	Wald offen	7.50	0.20	0.90
S_Gleis	Eisenbahntrasse, Gleiskörper	0.30	0.25	0.30

Tabelle 2.11: Geländetypisierung gemäss dem Primärflächendatensatz des Vektor25-Modells der Swiss Topo mit den zugeordneten Werten für die Höhe der Rauigkeitselemente hr und den Faktoren zur Abschätzung des Energieflusses in den Boden a und der Verdunstung α . Fett gedruckt ist der Standardtyp 'Graspiste' sowie der zugeordnete Typ 'Übriges Gebiet'. Der Geländetyp 'S_Gleis' in der letzten Zeile wurde zur Abbildung der speziellen Ausbreitungseigenschaften über dem Gleiskörper nachträglich ergänzt.

2.4.5 Ermittlung von Meteostatistiken

Mit dem in den vorhergehenden Abschnitten beschriebenen Verfahren können Vertikalprofile von Wind, Temperatur und Feuchte erzeugt werden, welche direkt in *sonRAIL* verwendet werden können. Diese können zur Reproduktion einzelner Messungen verwendet werden, beispielsweise zur Validierung des Berechnungsmodells. Im Hinblick auf die Ermittlung von Beurteilungspegeln, welche einen Vergleich mit Grenzwerten erlauben, sind jedoch statistische Informationen über die Auftretenshäufigkeit verschiedener Wetterlagen notwendig.

Meteorologische Bedingungen, namentlich die vorherrschenden Windrichtungen, können gerade in topographisch abwechslungsreichem Gebiet bereits innerhalb weniger Kilometer signifikant ändern (siehe z.B. [84]). Entsprechend wichtig ist eine kleinräumige Erfassung der lokalen Wetterbedingungen. Zumindest flächendeckend kann dies nicht basierend auf konventionellen Messstationen erfolgen - dafür ist selbst die Zahl der ca. 130 vollautomatisierten und über die typischen Klimazonen der Schweiz verteilten, kontinuierlich betriebenen Wetterstationen im neuen SwissMetNet von MeteoSchweiz deutlich zu klein. Aus diesem Grund wurde in Zusammenarbeit mit MeteoSchweiz entschieden, nicht direkt Messdaten, sondern Resultate des neuesten Berechnungsmodelles COSMO-2 zu verwenden. Der nachfolgende Abschnitt 2.4.5.1 fasst einige Hintergrundinformationen zu COSMO-2 zusammen. Anschliessend wird die Datenaufbereitung und statistische Auswertung beschrieben.

2.4.5.1 Das numerische Wetterprognosemodell COSMO-2

Das numerische Wetterprognosemodell COSMO wurde in internationaler Zusammenarbeit erstellt und wird laufend weiterentwickelt. Die nationalen Wetterdienste von Deutschland, Griechenland, Italien, Polen, Rumänien und der Schweiz arbeiten im Rahmen des *CO*nsortium for *S*mall-*S*cale *MO*delling (COSMO) eng zusammen. Dieses Konsortium wurde im Oktober 1998 gegründet mit dem Ziel des Erhaltens und der Verbesserung eines nicht-hydrostatischen, regionalen, atmosphärischen Modells, welches operationell und für Forschungszwecke genutzt werden soll. Das COSMO System besteht aus drei ineinander eingebetteten numerischen Wettervorhersagemodellen. Die äusserste Stufe bildet ein globales Modell, welches die gesamte Atmosphäre simuliert, jedoch nur eine mittlere Genauigkeit aufweist. Darin eingebettet befinden sich zwei regionale Modelle mit jeweils gesteigerter Genauigkeit (Auflösung), wobei COSMO-7 ganz Westeuropa und COSMO-2 den Alpenraum abdeckt (siehe Abbildung 2.49).

Ein numerisches Wettervorhersagemodell wie COSMO beschreibt Prozesse, die in der Atmosphäre und an der Erdoberfläche stattfinden. Es basiert auf physikalischen Gesetzen (z.B. Energieerhaltung, Phasenübergänge, Strahlungsprozesse). Mit der Übergabe passender Initial- und Randfelder kann der zukünftige Zustand der Atmosphäre numerisch ermittelt werden. Es können so viele atmosphärische Prozesse auf zeitlich und räumlich unterschiedlichen Skalen beschrieben werden (z.B. Entwicklung eines Tiefdruckgebietes, Schneefall, Föhn, Konvektion). Die Berechnungen erfolgen auf einem 3-dimensionalen Gitter. COSMO-2, welches die kleinste räumliche Auflösung besitzt, weist dabei ein Flächengitter von 2.2 x 2.2 km und 60 Höhenstufen auf. Die vertikalen Abstände zwischen den Gitterpunkten sind in geringeren Höhen kleiner, um bodennahe Phänomene besser beschreiben zu können.

Passende Initial- und Randfelder, um ein Modell zu starten, erhält man durch eine Kombination von Beobachtungsdaten, vorangegangenen Modellläufen und klimatologischen Informationen. Die Einbindung dieser Daten in den aktuellen Modelllauf nennt man Assimilation. Während eines typischerweise 24 Stunden dauernden Assimilationszyklus verarbeitet COSMO-7 Informationen von ca. 120 Radiosondierungen, ca. 8000 Flugzeugbeobachtungen, ca. 28000 Stationsbeobachtungen und ca. 1000 Wind Profilern. COSMO-2 verarbeitet zusätzlich Informationen aus dem Regen-Radar um konvektive Prozesse besser darstellen zu können.

2.4.5.2 Grundlagendaten und Auswertungen pro Rasterpunkt

Das Wetterprognosemodell COSMO-2 wird erst seit Ende Februar 2008 operativ eingesetzt. Als Basis für statistische Auswertungen wurden deshalb Assimilationszyklen, d.h. die Reproduktion des IST-Zustandes eines Jahres, vom 1. März 2008 bis 28. Februar 2009, für jede Vorhersagestunde auf einem Ausschnitt über der Schweiz (190x130 Gitterpunkte) beschafft¹¹. Folgende Daten waren im Lieferumfang enthalten:

- Langwellige und kurzwellige Strahlungsbilanz,
- Globalstrahlung und langwellige einfallende Strahlung,
- Temperatur auf 2 m und Wind auf 10 m,
- Temperatur und Feuchte auf ca. 10 m (unterste Modellfläche),
- Temperatur und Wind auf ca. 33 m und 65 m (2. und 3. unterste Modellfläche),
- Temperatur und Wind auf ca. 108 m und 160 m (4. und 5. unterste Modellfläche).

Zu den einzelnen Berechnungspunkten im Raster liegen zusätzlich zu diesen meteorologischen Grössen Angaben zur Lage, zur Land-Wasser-Verteilung, zur Bodenrauigkeit, zum Bodentyp und zur Höhe über Meer sowie zu den genauen Höhen der Modellflächen vor.

Grundlage für die statistische Auswertung ist eine Klassierung in 15 meteorologische Klassen gemäss Tabelle 2.12. Die Klassierung wird aufgrund der Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe sowie der Strahlungsbilanz vorgenommen. Die Unterteilung in drei Strahlungsbilanz-Klassen orientiert sich an der Klassierung gemäss Polster [85]. Die Grenzen wurden so gewählt, dass die stabilen Situationen mit Bezeichnung *S* durch die Polsterklasse *G* sowie die Hälfte der Klasse *F* abgebildet werden, die labilen Situationen mit Bezeichnung *L* den Polsterklassen *A* und *B* sowie der Hälfte von *C* entsprechen und der restliche Strahlungsbilanz-Bereich als neutral (*N*) zusammengefasst wird. Die repräsentativen Strahlungsbilanzwerte für LABIL und STABIL wurden etwas näher an den Klassengrenzen platziert, um extreme

¹¹Obwohl die Datenreihe nur ein Jahr umfasst, kann sie gemäss MeteoSchweiz als repräsentativ für mittlere jährliche Bedingungen im statistischen Sinne angesehen werden.

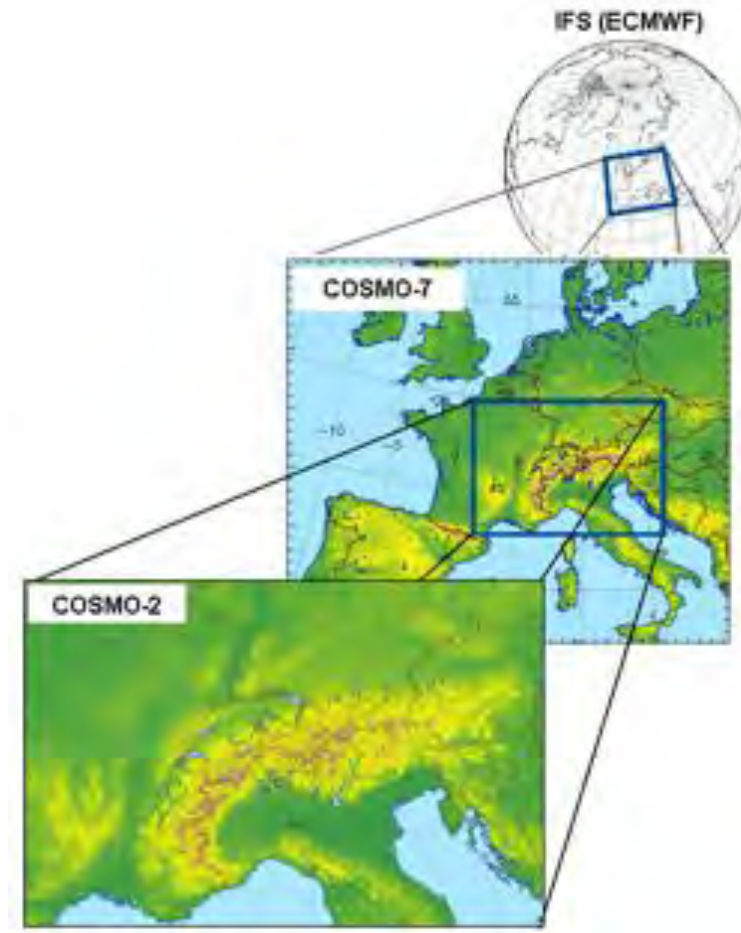


Abbildung 2.49: Die drei ineinander eingebetteten numerischen Wettervorhersagemodelle des COSMO Systems. Das Europäische Zentrum für Mittelfristige Wettervorhersage (ECMWF) liefert eine globale Vorhersage welche zur Initialisierung des regionalen COSMO-7 genutzt wird. Dieses wiederum stellt die Initialbedingungen für COSMO-2 bereit. (Quelle: MeteoSchweiz)

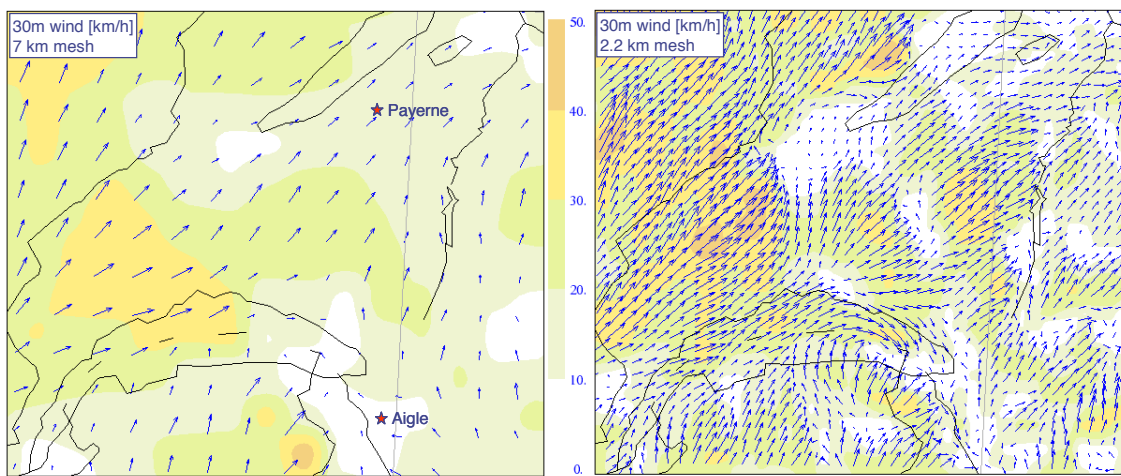


Abbildung 2.50: Vorteil der höheren Auflösung in komplexem Terrain. Simulation des Windes 30m über dem Boden in km/h im Kanton Waadt mit COSMO-7 (rechts) und COSMO-2 (links). (Quelle: MeteoSchweiz)

Windgeschwindigkeit		Strahlungsbilanz		
Klassen- grenzen	Klassen- mittel	Stabil	Neutral	Labil
		$\leq -18 \text{ W/m}^2$ -25 W/m^2	50 W/m^2	$\geq 180 \text{ W/m}^2$ 250 W/m^2
0-1 m/s	0.0 m/s	S0	N0	L0
1-2 m/s	1.5 m/s	S1	N1	L1
2-3 m/s	2.5 m/s	S2	N2	L2
3-5 m/s	4.0 m/s	S3	N3	L3
> 5 m/s	6.0 m/s	S4	N4	L4

Tabelle 2.12: Meteoklassierung mit mittleren Windgeschwindigkeiten v auf 10 m Höhe und der Netto-Strahlungsbilanzen Q^* . Es werden jeweils die Klassengrenzen und die Klassenmittelwerte angegeben.

Gradienten zu vermeiden. Der Klassenmittelwert für die NEUTRALE Klasse ist ebenfalls asymmetrisch platziert, entsprechend den asymmetrischen Klassenbreiten bzw. dem nicht linearen Zusammenhang der Strahlungsbilanz zur resultierenden Temperaturschichtung.

Die Klassengrenzen der Windgeschwindigkeit gemäss Tabelle 2.12 gehen von einem Untergrund mit kleiner Rauigkeit aus, wie es beim Standard-Untergrundtyp 'Graspiste' gemäss Tabelle 2.11 der Fall ist. Um den Einfluss der lokalen Rauigkeit auf die Windgeschwindigkeits-Klassierung zu vermeiden, wird die eigentliche Klassenzuordnung auf einer Höhe von 100 m durchgeführt. Damit wird dem Umstand Rechnung getragen, dass beispielsweise in einem Wald die Windgeschwindigkeit auf 10 m Höhe in einem anderen Verhältnis zur Freifeld-Windgeschwindigkeit in grosser Höhe steht, als dies über Grasland der Fall wäre.

Für jeden Rasterpunkt wurden bei der statistischen Auswertung folgende Grössen, unterteilt für die Zeiträume Tag (06-18 Uhr), Abend (18-22 Uhr) und Nacht (22-06 Uhr), ermittelt:

- Die Auftretenshäufigkeiten der meteorologischen Klassen gemäss Tabelle 2.12.
- Die durchschnittliche Temperatur in 10 m Höhe pro Meteo-Klasse und ihre Standardabweichung.
- Die durchschnittliche Temperaturdifferenz zwischen 10 und 2 m Höhe sowie Maximum, Minimum und Standardabweichung pro Meteo-Klasse.
- Die durchschnittliche relative Luftfeuchtigkeit in 10 m Höhe pro Meteo-Klasse und ihre Standardabweichung.
- Die durchschnittliche Netto-Strahlungsbilanz pro Meteo-Klasse und ihre Standardabweichung.
- Die drei dominierenden Windrichtungen sowie deren Auftretenshäufigkeiten pro Meteo-Klasse.

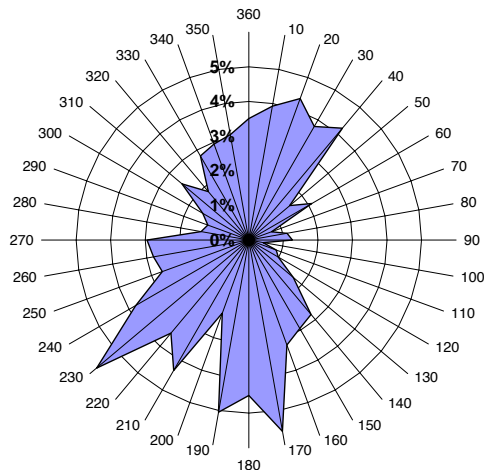
Windrichtungsangaben, welche innerhalb von $\pm 30^\circ$ liegen, werden zusammengefasst. Entsprechend werden nur Hauptwindrichtungen ausgegeben, welche mindestens um 30° voneinander abweichen. Als Resultat wird die Kombination von drei Windrichtungen ausgegeben, welche die gesamthaft grösste Abdeckung erzielen. Da mit 3 Windrichtungen nicht die ganze Windrose abgebildet werden kann, entspricht die summierte Auftretenshäufigkeit weniger als 100 %. Dies kann am in Abbildung 2.51 dargestellten Beispiel illustriert werden. Mit den Hauptwindrichtungen von 14° , 171° und 237° , welche für die auf der linken Seite dargestellte Schwachwind-Situation ermittelt wurden, gelingt es nur 78% sämtlicher Fälle abzudecken. Bei Starkwind hingegen konnte am gleichen Standort mit den Windrichtungen 241° , 272° und 51° eine Abdeckung von 99% erzielt werden.

Aus den Auftretenshäufigkeiten der einzelnen Meteoklassen und ihren dominierenden Windrichtungen pro Tagesabschnitt lassen sich für jeden Rasterpunkt diejenigen Meteosituationen auswählen, welche für eine Beschreibung der lokalen Wetterverhältnisse am geeignetsten sind. Je mehr einzelne Wetterlagen in die Berechnung einbezogen werden, um so besser gelingt die Nachbildung der meteorologischen Bedingungen im Jahresmittel.

2.4.5.3 Statistische Auswertungen für die Schweiz

Neben der Beschreibung der meteorologischen Bedingungen an ausgesuchten Standorten lassen sich aus den vorhandenen Daten auch Aussagen zu mittleren Bedingungen für die Schweiz oder zur Häufigkeit besonderer Phänomene ableiten. Tabelle 2.13 zeigt beispielsweise eine Auswertung der mittleren Temperaturen und Luftfechtigkeiten für alle Meteo-Klassen gemäss Tabelle 2.12. Die signifikant höheren Temperaturen und tieferen relativen Feuchten der labilen Klassen sind ein Hinweis dafür, dass diese Bedingungen praktisch ausschliesslich am Tag und zumeist bei sonnigen

Rasterpunkt 19208, Tag: 06 - 18 Uhr
Strahlungsbilanz: Neutral,
Windgeschwindigkeit: 1 - 2 m/s



Rasterpunkt 19208, Tag: 06 - 18 Uhr
Strahlungsbilanz: Neutral,
Windgeschwindigkeit: > 5 m/s

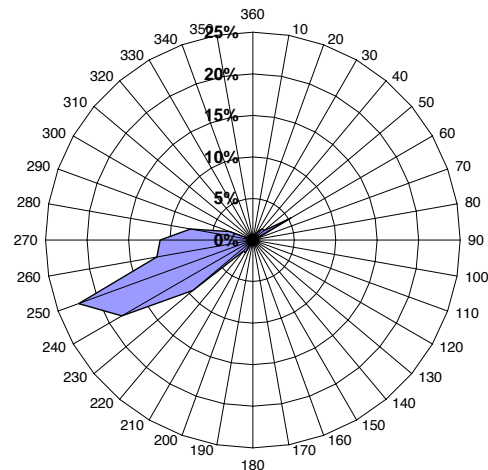


Abbildung 2.51: Windrose für den Rasterpunkt 19208 (Flughafen Kloten, auf dem Rollfeld) für neutrale Situationen am Tag und Windgeschwindigkeiten von 1 - 2 m/s links und > 5 m/s rechts.

Meteo-Klasse	L0	L1	L2	L3	L4	N0	N1	N2	N3	N4	S0	S1	S2	S3	S4
Temperatur	14.9	15.7	16.0	15.1	13.1	7.1	7.5	7.8	7.5	6.6	7.1	7.3	7.6	7.3	5.6
rel. Feuchte	63	61	58	56	56	81	81	79	77	75	76	76	74	72	71

Tabelle 2.13: Durchschnittliche Temperatur in °C und relative Luftfeuchtigkeit in % auf 10 m Höhe für alle Meteo-Klassen gemäss Tabelle 2.12, ausgewertet über sämtliche Rasterpunkte des COSMO-2-Modells, welche innerhalb der Schweiz auf weniger als 1000 m über Meer liegen.

Verhältnissen in Erscheinung treten. Als zweites Beispiel ist in Abbildung 2.52 eine Auswertung dargestellt, welche die Auftretenshäufigkeit von Inversionslagen während der Nachtzeit zeigt. Diese sind im Hinblick auf die Lärmbelastung bedeutsam, da bei solchen Bedingungen generell höhere Immissionen auftreten. Wie zu erkennen ist, stellen solche für die Schallausbreitung förderliche Bedingungen namentlich in den Alpentälern mit Auftretenswahrscheinlichkeiten über 65% den Regelfall dar.

2.4.5.4 Standardprofile

Für die Klassenmittelwerte der 15 Meteo-Klassen gemäss Tabelle 2.12 wurden Standardprofile von Wind, Temperatur und Feuchte gerechnet, welche bei der Berechnung von Jahresmittelwerten mit *sonRAIL* zum Einsatz kommen. Die nachfolgenden Abbildungen 2.53 bis 2.55 zeigen die resultierenden Profile von Wind und Temperatur für den Standard-Bodentyp *Graspiste* gemäss Tabelle 2.11. Man beachte, dass sowohl die Temperatur- als auch die Windprofile der stabilen Klassen sich deutlich von den labilen und neutralen Situationen unterscheiden. So nimmt die Windgeschwindigkeit bei den stabilen Klassen auch in grösseren Höhen noch zu; ein Phänomen das in der Literatur als 'low-level jet' oder 'nocturnal jet' beschrieben wird. Während bei den labilen Temperaturschichtungen nur in unmittelbarer Bodennähe hohe Gradienten zu verzeichnen sind, treten bei den stabilen Schichtungen deutliche Temperaturzunahmen bis zum Ende der Inversionsschicht auf. Die Höhe der Inversionsschicht ist allerdings beschränkt. Oberhalb von 30 bis 50 m Höhe geht bei den Standardprofilen S0 bis S4 der Trend über zu einer adiabatischen Temperaturabnahme mit zunehmender Höhe. Ebenfalls zu beachten ist, dass die Temperaturprofile

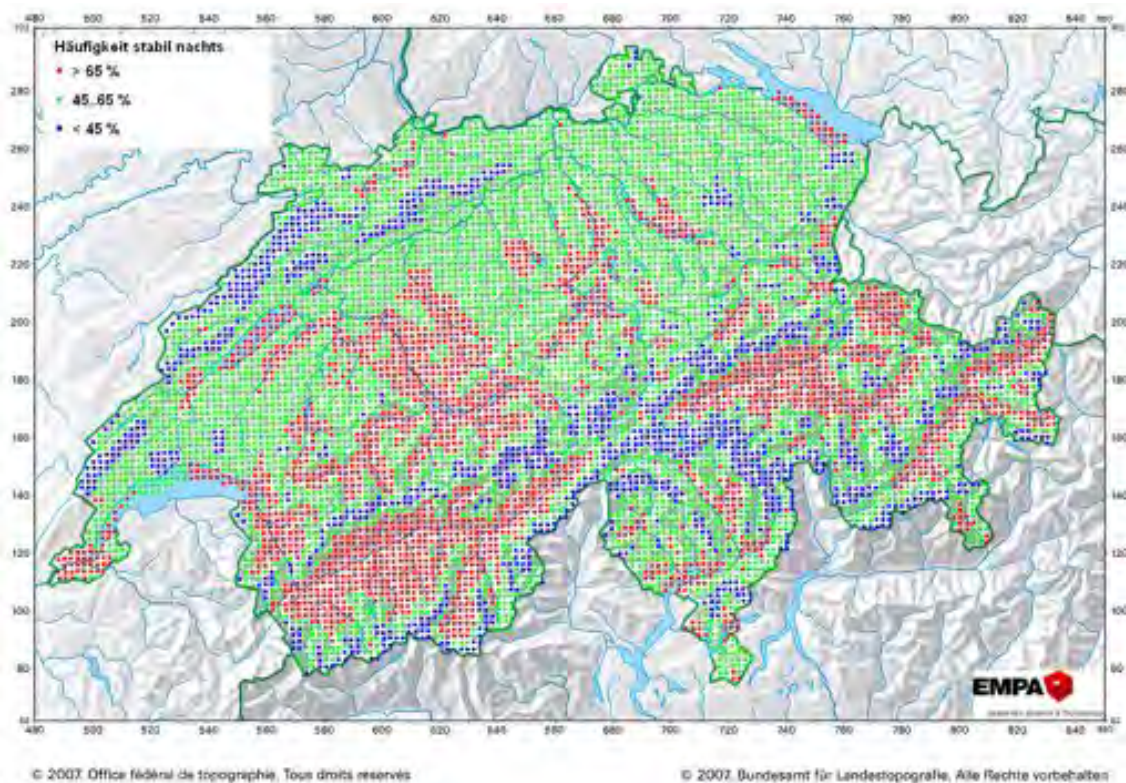


Abbildung 2.52: Statistische Auswertung der COSMO-2-Daten: Ermittlung der Auftretenshäufigkeit von stark förderlichen Ausbreitungsbedingungen aufgrund bodennaher Inversionslagen in der Nacht (Klassen S0, S1 und S2).

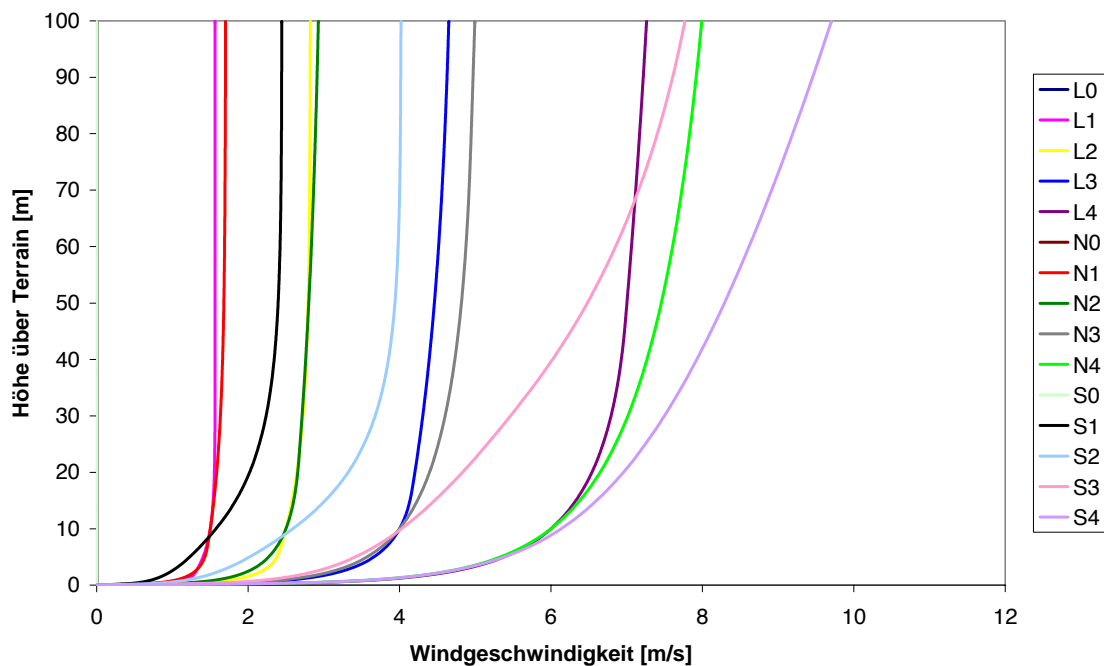


Abbildung 2.53: Windgeschwindigkeitsprofile der 15 Standard-Meteo-Klassen.

der neutralen Klassen nicht über die ganze Höhe eine adiabatische Temperaturabnahme aufweisen, sondern dass auf den ersten Metern über Grund deutlich grössere negative Temperaturgradienten auftreten.

Zur Einschätzung der überlagerten Wirkung von Wind und Temperatur im Hinblick die Schallausbreitung sind in den Abbildungen 2.56 und 2.57 die effektiven Schallgeschwindigkeitsprofile für Mitwind- und Gegenwindsituationen dargestellt. Es zeigt sich, dass sich der Temperatur- und der Windeinfluss bei stabiler Schichtung und einem Gegenwind zwischen 1 und 2 m/s (Klasse S1) in etwa gegenseitig kompensieren, so dass das Schallgeschwindigkeitsprofil kaum relevante Gradienten aufweist. Im Mitwindfall resultiert eine praktisch konstante Schallgeschwindigkeit für die Klassen N1 und L2, d.h. für Windgeschwindigkeiten von 1-2 m/s bzw. 2-3 m/s. Bei tieferen Windgeschwindigkeiten dominiert der Temperatureinfluss, so dass die Klasse S0 unabhängig von der Windrichtung für die Schallausbreitung förderliche Bedingungen aufweist und umgekehrt die Klassen N0 sowie L0 und L1 generell hinderliche Bedingungen ergeben. Auffällig ist, dass bei labilen und neutralen Situationen zumeist nur in Bodennähe deutliche Gradienten festzustellen sind, während sich in einer stabil geschichteten Atmosphäre auch in grösseren Höhen noch bedeutende Änderungen der effektiven Schallgeschwindigkeit ergeben können.

2.4.5.5 Danksagung

Das Kapitel zur Bestimmung der meteorologischen Inputparameter wurde in enger Zusammenarbeit mit der Meteo Schweiz erarbeitet. Speziellen Dank gebührt dabei Mathias Rotach, der die Entwicklung des meteorologischen Vorprozessors massgeblich unterstützt hat. Weitere Beiträge und Kommentare stammen von Pirmin Kaufmann, Guy de Morsier und Oliver Fuhrer.

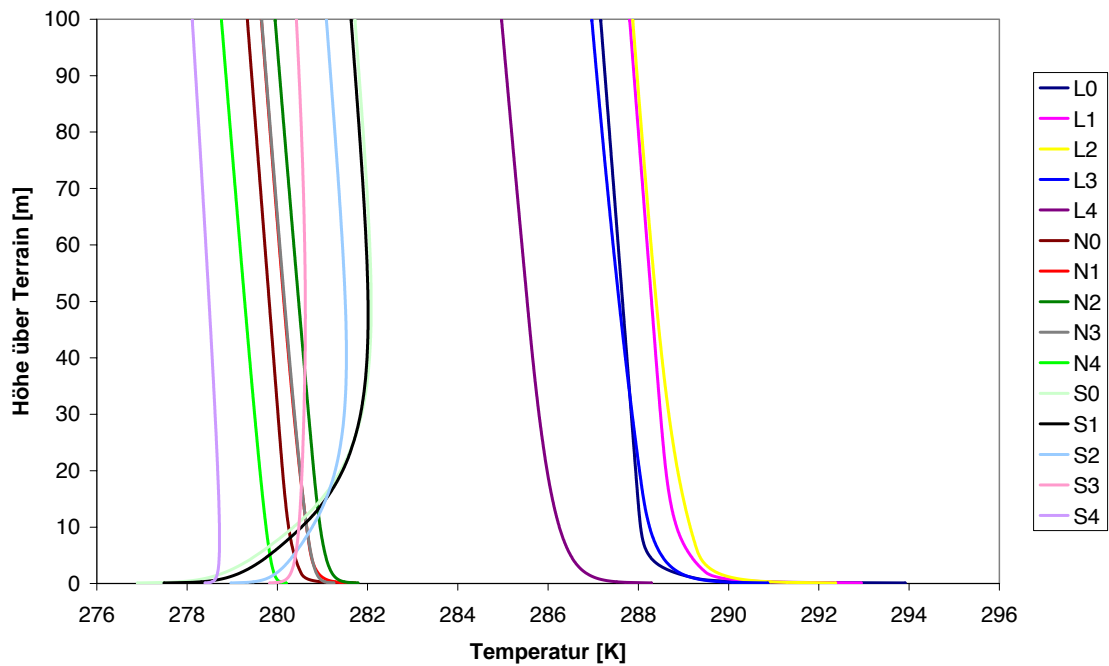


Abbildung 2.54: Temperaturprofile der 15 Standard-Meteo-Klassen.

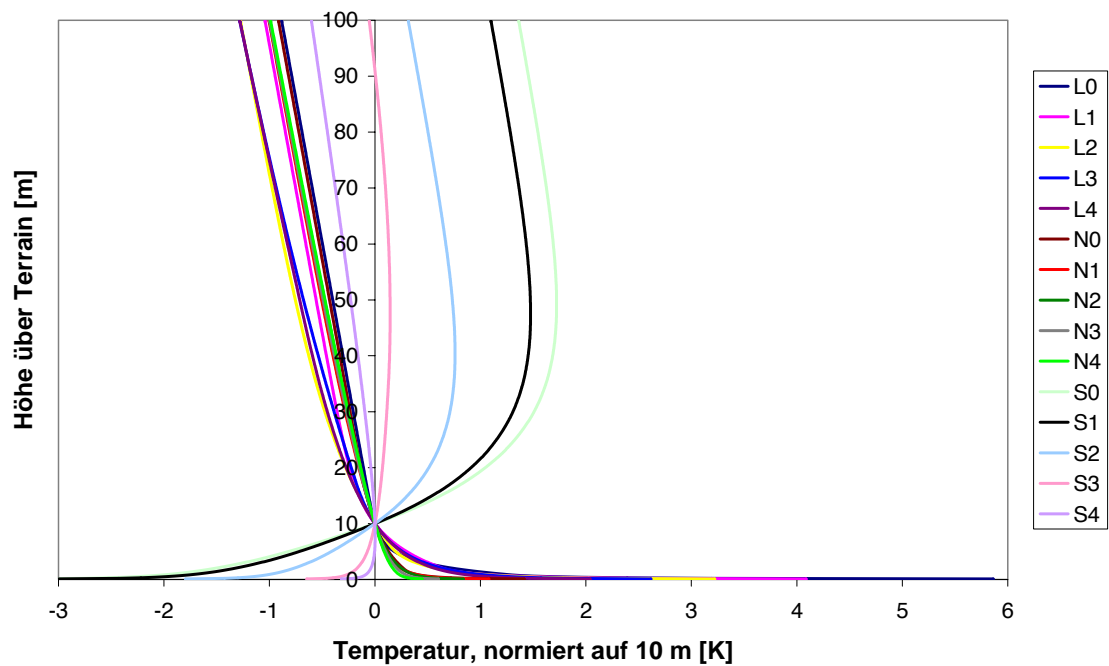


Abbildung 2.55: Temperaturprofile der 15 Standard-Meteo-Klassen, normiert auf eine einheitliche Temperatur in 10 m Höhe.

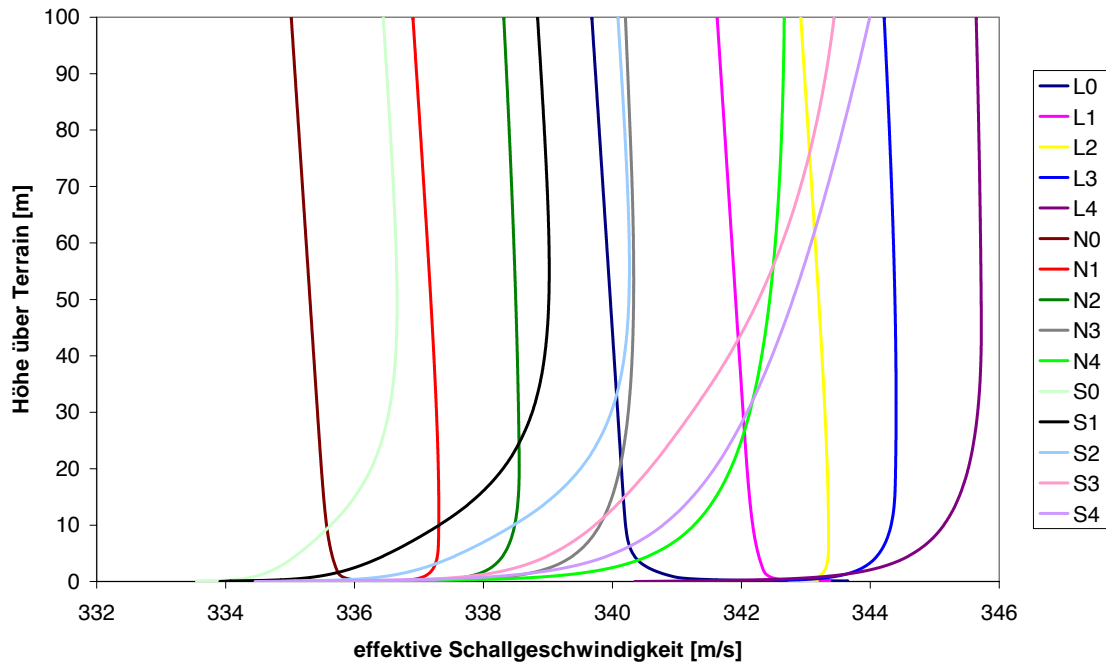


Abbildung 2.56: Resultierende effektive Schallgeschwindigkeitsprofile bei Mitwind-Bedingungen.

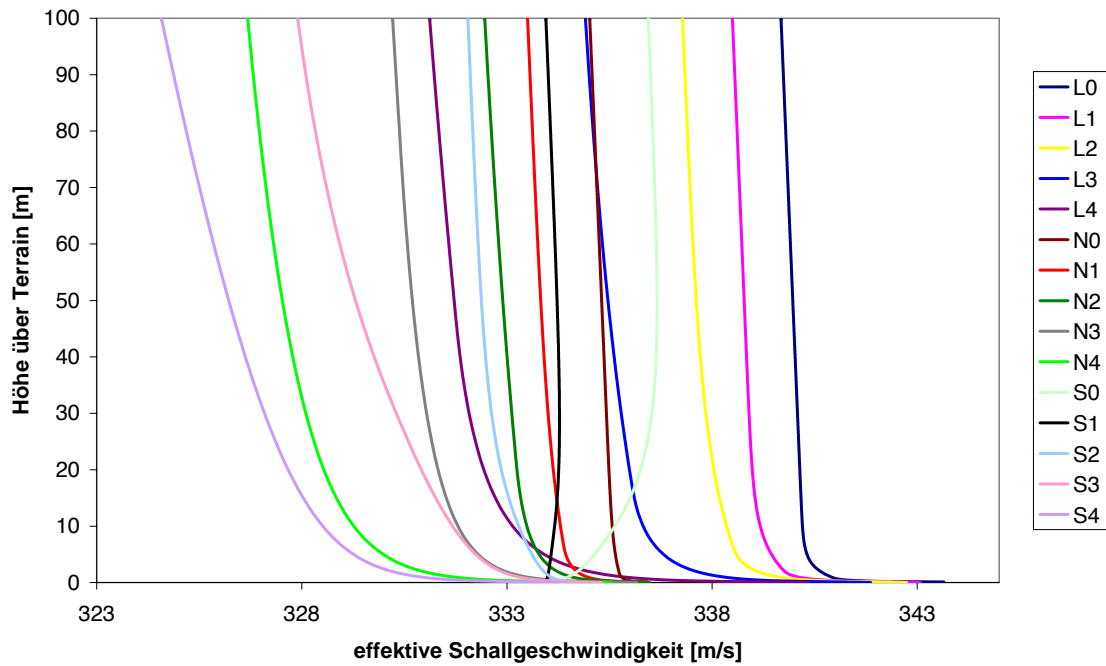


Abbildung 2.57: Resultierende effektive Schallgeschwindigkeitsprofile bei Gegenwind-Bedingungen.

3 Planung und Durchführung der Emissionsmessungen

3.1 Planungsgrundlagen der Messungen

Die relevanten Modellparameter sollen mit einer möglichst grossen Anzahl von Messungen an real verkehrenden Fahrzeugen bestimmt werden [18]. Daraus ergeben sich Anforderungen an die durchzuführenden Messungen:

1. Erfassung möglichst vieler Einflussparameter auf Geräuschenstehung und -abstrahlung von fahrenden Schienenfahrzeugen, wobei jeweils nur ein Parameter (Geschwindigkeit, Trassierung, Gleiszustand, Fahrzeuge) variiert werden soll. Daher müssen die Messungen zeitgleich an mehreren Messstellen einer Strecke erfolgen und es müssen verschiedene Fahrzeugtypen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten verkehren.
2. Erfassung einer repräsentativen Anzahl von in der Schweiz verkehrenden Schienenfahrzeugen, so dass eine Validierung des Modells anhand einer möglichst grossen Fahrzeuganzahl erfolgen kann.
3. Erfassung der vertikalen Verteilung von sekundären Schallquellen an Fahrzeugen durch Mikrofonarraymessungen.

Zur Umsetzung der Anforderungen wurden Messungen an der Bahnstrecke Lausanne-Freiburg (MS 01-12), der Neubaustrecke (NBS) Mattstetten-Rothrist (MS 13-15, 33-35) und der Stammstrecke Olten-Burgdorf (MS 14, 34) in den Jahren 2007 und 2008 durchgeführt. In Abbildung 3.1 ist die örtliche Verteilung der Messstellen an den Messstrecken

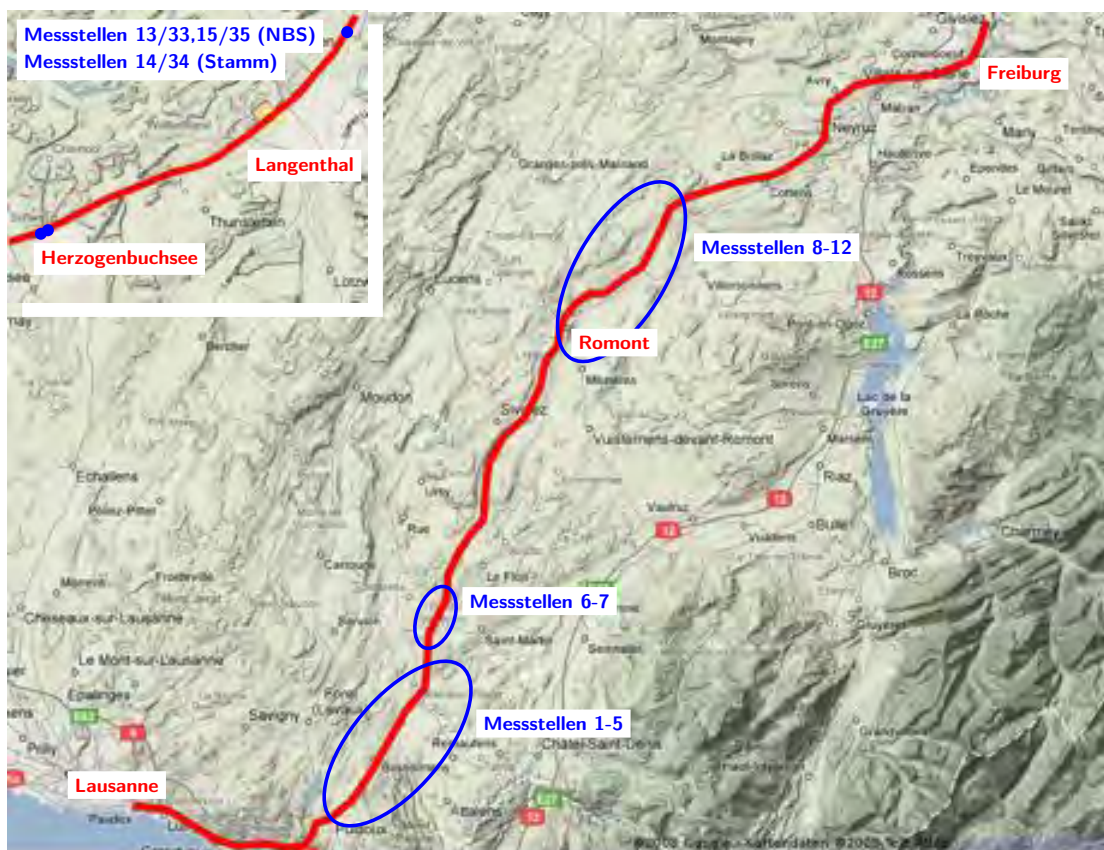


Abbildung 3.1: Übersicht der Messstellen zwischen Lausanne – Freiburg und der Neubaustrecke (NBS) Mattstetten – Rothrist

Tabelle 3.1: Übersicht der Messstellen der Emissionsmessungen und der verantwortlichen Messteams

Messabschnitt Lausanne-Freiburg (2007)							
MS	Kilometer	Landeskoordinaten		Gerade/Bogen	v_{max}	Messkonfiguration	Messteam
01	15.178	550300	151650	Bogen ^a	110-115	Basis	TU Berlin
02	16.550	551225	151875	Bogen ^b	110-115	Basis	TU Berlin
03	16.825	551600	152175	Gerade	110-115	Basis, Array	Sulzer
04	17.150	551725	152350	Gerade	110-115	Basis, Intensität	EMPA
05	20.2-20.3	553825	154400	Weiche ^c	60-115	Weiche	Sulzer
06	25.940	553500	159600	Gerade	85	Basis	PSIA consult
07	26.880	553650	160300	Gerade	85	Basis	PROSE
08	42.150	561125	172800	Gerade	140	Basis	PROSE
09	43.520	562275	173600	Gerade	140	Basis	EMPA
10	45.4-45.5	563625	174825	LSW	130	LSW	EMPA
11	49.000	566100	177475	Weiche	130	Weiche	TU Berlin
12	49.100	566095	177467	Gerade	130	Basis	TU Berlin
Messabschnitt Mattstetten-Rothrist, Olten-Burgdorf (2007)							
13	38.734 (NBS)	621450	228050	Gerade	160	Basis	TU Berlin
14	64.225 (Stamm.)	621450	228050	Gerade	140	2 Mikros	TU Berlin
15	45.816 (NBS)	627025	231975	Gerade	160	Array, Intensität, Basis	EMPA, Sulzer
Messabschnitt Mattstetten-Rothrist, Olten-Burgdorf (2008)							
33	38.734 (NBS)	621450	228050	Gerade	200	Basis	TU Berlin
34	64.225 (Stamm.)	621450	228050	Gerade	140	2 Mikros	TU Berlin
35	45.816 (NBS)	627025	231975	Gerade	200	Array, Intensität, Basis	EMPA, Sulzer

^aBogenradius: 830 m

^bBogenradius: 460 m

^cWeichen 7a (Ablenkung 1:12) und 8b (Ablenkung 1:9) im Bahnhof Palezieux-Gare

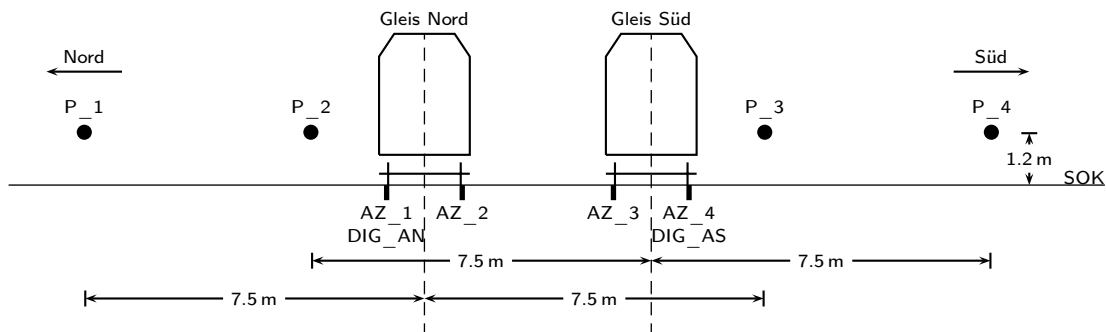


Abbildung 3.2: Messstellenplan nach EN 3095 [87], gültig für alle Basismessstellen der sonRAIL Messkampagnen [86]

dargestellt. Eine genaue Beschreibung der Messstellen befindet sich im Anhang A sowie in den Tabellen Tabellen 3.1 und 3.2. Entsprechend der messtechnischen Ausrüstung wird in Basismessstellen, Array- und Intensitätsmessstellen unterschieden.

Messtechnische Ausrüstung der Basismessstellen Die Basismessstellen sind nach einer einheitlichen Spezifikation [86] durch das jeweilige Messteam eingerichtet worden. Jede Messstelle wurde mit vier Mikrofonen in je 7.5 m Abstand zur Gleismitte, sowie mit je einem Beschleunigungsaufnehmer am Schienenfuß ausgerüstet. Im Messquerschnitt wurde pro Gleis ein Achsdetektor installiert. Die Abbildung 3.2 zeigt den Messaufbau sowie die Orientierung der Messstelle. Da alle Messstrecken in Ost-West-Richtung verlaufen, können die Richtungsgleise in Nord- und Südgleis unterschieden werden.

Einheitliche Kalibrierung der Messstellen Um eine Vergleichbarkeit der Messergebnisse der einzelnen Messstellen zu gewährleisten, wurde zusätzlich zur Mikrofonkalibrierung der Messstellen durch jedes Messteam auch eine

Tabelle 3.2: Zusammenstellung der Oberbauparameter der Rauheits- und Track Decay Rate Messungen

Randparameter der Messstellen für Messung der Schienenrauheiten und Track Decay Rate													
Messstelle	Kilometer	Gleis	Oberbauart [‡]	Schwellentyp	Schienentyp	Verlegeart	Verlegejahr	Zwischenlage	Rauheitsmessung	Decay Rate Messung	Datum	Zwischenlagentemp.	
01	15.178	Nord	Stahl	SBBI	UIC 54 E2	AeK	1976	ISOL 87*	x		30.07.07	29.0°C	
01	15.178	Süd	Beton Monob.	B70	UIC 54 E2	W	1988	Zw664a**	x	x	30.07.07		
02	16.550	Nord	Stahl	SBBI	UIC 54 E2	AeK	1976	ISOL 87*	x		31.07.07	33.3°C	
02	16.550	Süd	Beton Monob.	B70	UIC 54 E2	W	1988	Zw664a	x	x	31.07.07		
03	16.825	Nord	Stahl	SBBI	UIC 54 E2	AeK	1976	ISOL 87*	x		03.08.07	18.7°C	
03	16.825	Süd	Beton Monob.	B70	UIC 54 E2	W	1988	Zw664a	x	x	03.08.07		
04	17.150	Nord	Stahl	SBBI	UIC 54 E2	AeK	1976	ISOL 87*	x		02.08.07	15.5°C	
04	17.150	Süd	Beton Monob.	B70	UIC 54 E2	W	1988	Zw664a	x	x	02.08.07		
06	25.940	Nord	Beton Bi-Block	SL 73	UIC 54 E2	Bi	1973	?	x		04.08.07		
06	25.940	Süd	Stahl	SBBI	UIC 54 E2	AeK	1999	ISOL 87*	x	x	04.08.07	33.0°C	
07	26.880	Nord	Beton Bi-Block	SL 73	UIC 54 E2	Bi	1973	?	x	x	06.08.07	30.2°C	
07	26.880	Süd	Stahl	SBBI	UIC 54 E2	AeK	1999	ISOL 87*	x	x	06.08.07	30.4°C	
08	42.150	Nord	Beton Bi-Block	SL 73	UIC 54 E2	Bi	1972	?	x		07.08.07		
08	42.150	Süd	Beton Monob.	B91	UIC 60 E1	W	1994	Zw687a**	x		07.08.07		
09	43.520	Nord	Beton Bi-Block	SL 73	UIC 54 E2	Bi	1972	?	x	x	07.08.07	30.2°C	
09	43.520	Süd	Beton Monob.	B91	UIC 60 E1	W	1994	Zw687a**	x	x	07.08.07		
12	49.100	Nord	Holz	-	UIC 54 E2	K	1976	keine	x	x	10.08.07	20.2°C	
12	49.100	Süd	Holz	-	UIC 60 E1	Ke	1998	Zw664a**	x	x	10.08.07	20.1°C	
13	38.734	Nord	Beton Monob.§	B91	UIC 60 E1	Ws	2004	(weich)	x	x	22.05.07	16.2°C	
13	38.734	Süd	Beton Monob.§	B91	UIC 60 E1	Ws	2004	(weich)	x	x	22.05.07	16.1°C	
14	64.225	Süd	Beton Monob.¶	B91	UIC 60 E1	W	2002	Zw687a**	x	x	21.05.07	18.7°C	
15	45.816	Nord	Beton Monob.§	B91	UIC 60 E1	Ws	2004	(weich)	x	x	23.05.07	15.0°C	
15	45.816	Süd	Beton Monob.§	B91	UIC 60 E1	Ws	2004	(weich)	x	x	23.05.07	15.1°C	
33	38.734	Nord	Beton Monob.§	B91	UIC 60 E1	Ws	2004	(weich)	x	x	28.05.08	14.0°C	
33	38.734	Süd	Beton Monob.§	B91	UIC 60 E1	Ws	2004	(weich)	x	x	26.05.08	14.0°C	
34	64.225	Süd	Beton Monob.¶	B91	UIC 60 E1	W	2002	Zw687a**	x	x	26.05.08	18.3°C	
35	45.816	Nord	Beton Monob.§	B91	UIC 60 E1	Ws	2004	(weich)	x	x	27.05.08	20.2°C	
35	45.816	Süd	Beton Monob.§	B91	UIC 60 E1	Ws	2004	(weich)	x	x	27.05.08	20.1°C	
Radrauhheiten													
Wagen	Wagennummer	Wagentyp	Anzahl Achsen	Position im Zugverband	Achsnr. im Zugverband	Bemerkungen							
1	4734115	Stimmnps	4	Wagen 8	33, 34, 35, 36	keine							
2	4734118	Stimmnps	4	Wagen 9	37, 38, 39, 40	keine							
3	4734146	Stimmnps	4	Wagen 10	41, 42, 43, 44	keine							
4	3395149	kps	2	Wagen 11	45, 46	Flachstelle 1. Achse, beide Räder							
5	3395125	kps	2	Wagen 12	47, 48	keine							
6	3395122	kps	2	Wagen 13	49, 50	keine							

[‡] Alle Messstellen auf Schotteroberbau, ohne Schwellenbesohlung und Unterschottermatten

* Statische Nennsteifigkeit $\approx 200kN/mm^2$

** Statische Nennsteifigkeit $> 800kN/mm^2$

§ Unterbau: Asphalttragschicht, Schotterbettdicke > 35 cm; Spannklemme: Skl 14, weiche Zwischenlage

¶ Unterbau: Asphalttragschicht, Schotterbettdicke > 20 cm; Spannklemme: Skl 1, harte Zwischenlage (Hardomit)

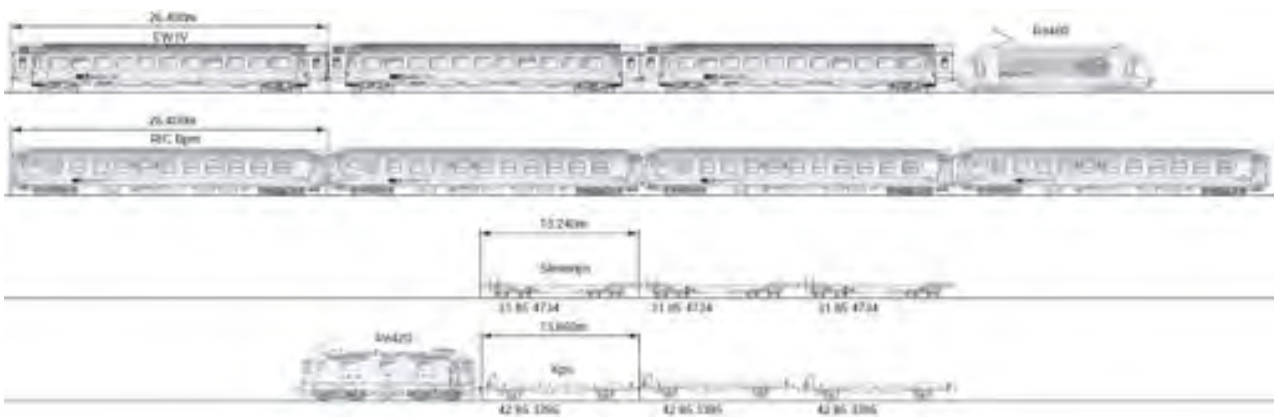


Abbildung 3.3: Zusammenstellung des *sonRAIL* Messzuges auf der Messstrecke Lausanne-Freiburg mit der Wagenreihung: Re460 → 3 × EWIV → 4 × RIC Bpm → 3 × SImmnps → 3 × Kps → Re420

Ringkalibrierung mit einem Normkalibrator der EMPA durchgeführt. Alle Ergebnisse einer Messkampagne sind auf diesen Kalibrator bezogen [86].

Einsatz von Messzügen Aus den Anforderungen der Modellerstellung wurde die Notwendigkeit des Einsatzes von zwei Messzügen abgeleitet. Dies ermöglicht eine Variation der Vorbeifahrtgeschwindigkeit an jeder Messstelle. Auf der Strecke Lausanne-Freiburg verkehrte ein speziell zusammengestellter Messzug (Abbildung 3.3) [88] bestehend aus:

- 1 Triebfahrzeug Re460,
- 3 scheinbremsen EWIV Fahrzeuge,
- 4 K-Klotz gebremste RIC Bpm Fahrzeuge,
- 3 GG-Klotz gebremste, 4-achsige Güterwagen,
- 3 GG-Klotz gebremste, 2-achsige Güterwagen und
- 1 Triebfahrzeug Re420.

Der Messzug verkehrte an jeder Messstelle und auf jedem Richtungsgleis mit den Geschwindigkeiten 1×60 km/h, 3×80 km/h und 2×100 km/h. Zudem wurde ein 3-teiliger NiNa-Messzug auf diesem Streckenabschnitt eingesetzt.

Zeitliche Abfolge der Messungen Im Vorfeld der Vorbeifahrtmessungen wurden an jeder Messstelle entsprechend Tabelle 3.2 die Schienenrauheiten und die Track Decay Rate (TDR) bestimmt. Durch diese Messungen wurden auch die eindeutigen Messquerschnitte der anschließenden Vorbeifahrtmessungen festgelegt. Im direkten Anschluss fanden über einen Zeitraum von 24 Stunden zeitgleiche Vorbeifahrtmessungen an allen Messstellen statt. Während dieser Messungen wurden auch die Ausbreitungsdämpfungen an jeder Messstelle bestimmt.¹ Im Anschluss an die Emissionsmessungen erfolgten im Depot Lausanne die Radrauheitsmessungen der Güterwagen des Messzuges.

Messdatenverarbeitung Da die Messungen von unterschiedlichen Messteams durchgeführt worden sind, ist für die weitere Auswertung eine Aufarbeitung der Rohdaten in ein einheitliches Format nötig. Die dazu durchgeführten Schritte sind in Abbildung 3.4 dargestellt. In der ersten Stufe werden von jedem Messteam die Rohdaten in kalibrierte Famosdaten aufgearbeitet [86]. Jede gültige Messung wird durch das Messteam mit einer eindeutigen *mess_id* gekennzeichnet, diese enthält u.a. die Messstellenbezeichnung. Diese *mess_id* wird während der gesamten Auswertung beibehalten, so dass jedes Ergebnis auf die Rohdatendatei zurückgeführt werden kann. Diese Messdaten werden in der zweiten Stufe von der Firma PROSE von allen Messteams gesammelt und der TU Berlin zur weiteren Auswertung zur Verfügung gestellt. Die von jedem Messteam angefertigten Messprotokolle sind in einer MySQL Messdatenbank hinterlegt, die u.a. Datum, Uhrzeit, Messstelle, Gleis, Richtung, Zugtyp, *mess_id* und *zug_id* enthält [89]. Jeder Zug

¹Die Messungen der Ausbreitungsdämpfungen wurden von einem mobilen Messteam der EMPA durchgeführt und werden bei der Erstellung des Emissionsmodells für die Berechnung der Schalleistungen benötigt.

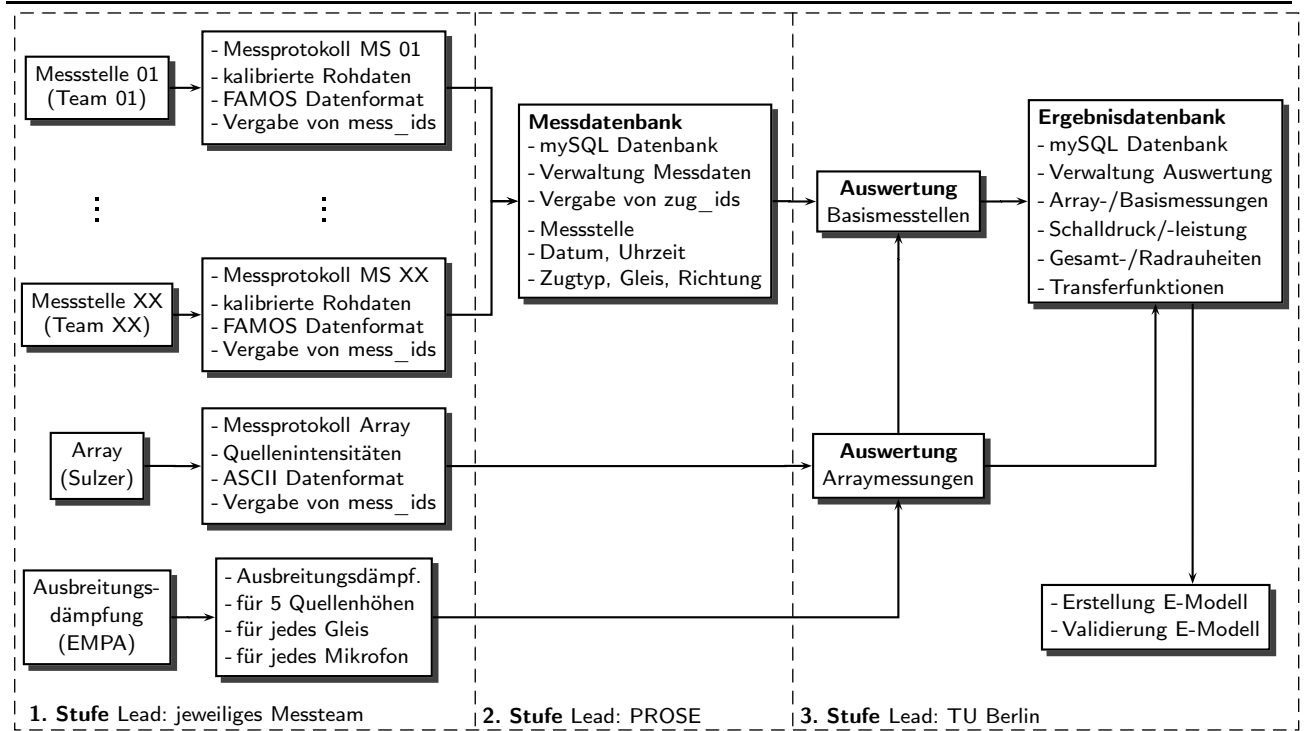


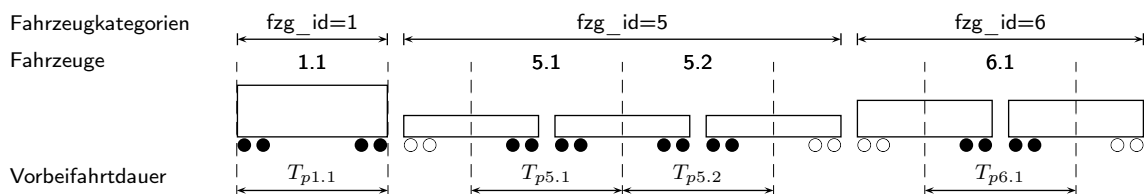
Abbildung 3.4: 3-stufiges Vorgehen bei der Messdatenverarbeitung mit dem Ziel der einheitlichen Datenauswertung und der Modellerstellung

wird mit einer durch PROSE vergebenen zug_id eindeutig markiert. Die gesammelten Messdaten von allen Messstellen werden in der dritten Stufe durch die TU Berlin hinsichtlich der Modellparameter ausgewertet, unter Verwendung der gemessenen Ausbreitungsdämpfungen der EMPA und den Ergebnissen der Arraymessungen der Firma Sulzer. Die Ergebnisse werden in einer MySQL Ergebnisdatenbank hinterlegt. Die Modellerstellung und -validierung basiert auf automatisierten Abfragen dieser Ergebnisdatenbank.

Struktur der Ergebnisdatenbank Die Ergebnisse der Auswertungen werden in einer MySQL Datenbank hinterlegt. Der Anhang ?? enthält die Struktur der Datenbank. Diese umfasst die Ergebnisse aller Array- und Basismessstellen.

3.2 Verfahren zur Auswertung und Berechnung der Modellparameter

Unterteilung von Zugverbänden Die Berechnung der Modellparameter wird für jedes Fahrzeug einer Vorbeifahrt durchgeführt. Jedes Fahrzeug innerhalb eines Zugverbandes wird durch die erste n_{anf} und letzte Achse n_{end} anhand der Achssignale genau bestimmt. In Abhängigkeit von Vorbeifahrtgeschwindigkeit v und Fahrzeuglänge l_{veh} wird die Vorbeifahrtzeit T_p bestimmt. Das Ausschneiden der Mikrofon- und Beschleunigungssignale aus den Gesamtsignalen erfolgt jeweils in der Fahrzeugmitte. Bei Triebfahrzeugen wird die Vorbeifahrtzeit zwischen Puffer und Puffer ermittelt. Die Abbildung 3.5 verdeutlicht dieses Vorgehen.



Achsen die bei der Auswertung berücksichtigt werden: ●

Abbildung 3.5: Schematische Darstellung der Auswertung eines Zugverbandes mit Diskretisierung in Fahrzeugkategorien

Verwendete Pegelgrößen der Auswertung Für die Auswertung werden folgende Beziehungen der Pegelgrößen verwendet [87]-[91]:

$$\text{Schallleistungspegel: } L_W = 10 \lg \frac{P}{P_0} \quad P_0 = 1 \cdot 10^{-12} \text{W} \quad (3.1)$$

$$\text{Schalldruckpegel: } L_p = 20 \lg \frac{p}{p_0} \quad p_0 = 20 \cdot 10^{-6} \text{Pa} \quad (3.2)$$

$$\text{Beschleunigungspegel: } L_a = 20 \lg \frac{a}{a_0} \quad a_0 = 1 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad (3.3)$$

$$\text{Rauheitspegel: } L_r = 20 \lg \frac{r}{r_0} \quad r_0 = 1 \cdot 10^{-6} \text{m} \quad (3.4)$$

Geschwindigkeitsbestimmung Die Geschwindigkeit v einer Vorbeifahrt wird am Anfang und am Ende des Zugverbandes anhand der Achssignale bestimmt. Abweichungen bis zu 2 km/h werden als Vorbeifahrten mit konstanter Geschwindigkeit gewertet. Bei grösseren Abweichungen wird von einer beschleunigten oder verzögerten Vorbeifahrt ausgegangen. Für diesen Fall wird die Geschwindigkeit für jedes Fahrzeug einzeln berechnet.

Berechnung der Vorbeifahrtpegel Von jedem Fahrzeug eines Zugverbandes werden die A-bewerteten, äquivalenten Schalldruckpegel $L_{p,Aeq}$ an allen 4 Mikrofonpositionen während der Vorbeifahrtzeit T_p , sowie die unbewerteten Terzspektren $L_{p,terz,i}(f_i)$ im Frequenzbereich zwischen 100 Hz und 8000 Hz bestimmt. In der Auswertung werden auch Fahrzeuge mit Flachstellen berücksichtigt.²

Berechnung der Schalleistungen Die Schalleistungsspektren $L_{W,tot,i}(f_i)$ werden aus den Schalldruckpegeln $L_{p,terz,i}(f_i)$ unter Verwendung der gemessenen Ausbreitungsdämpfungen $D_{ground,hi}$ an jeder Messstelle berechnet. Für die Berechnung der Schalleistungen wird die Ausbreitungsdämpfung der Quellenhöhe 0.5 m verwendet.³ Der Schalleistungspegel wird dann für jede Terz berechnet nach [92]:

$$L_{W,tot,i}(f_i) = L_{p,terz,i}(f_i) + 10 \lg(4\pi d) - 10 \lg \frac{\phi}{l_{veh}} - D_{ground,hi} \quad [\text{dB re } 10^{-12} \text{W}] \quad (3.5)$$

mit dem Mikrofonabstand d und dem Aspektwinkel $\phi = 2 \arctan \frac{l_{veh}}{2d}$. Unter Verwendung der sekundären Schalleistungen pro Fahrzeugkategorie, kann die Schalleistung der Rollgeräuschquelle berechnet werden:

$$L_{W,roll,i}(f_i) = L_{W,tot,i}(f_i) \ominus L_{W,sek,i}(f_i) \quad [\text{dB re } 10^{-12} \text{W}] \quad (3.6)$$

Dieses Vorgehen setzt voraus, dass die sekundären Quellenleistungen $L_{W,sek,i}(f_i)$ eines Fahrzeugs messstellenunabhängig sind. Die Ergebnisse der Arraymessungen können dann auf jede Messstelle übertragen werden. Die sekundären Quellenleistungen $L_{W,sek,i}(f_i)$ müssen unter Verwendung der Gleichung (2.12) für die jeweilige Geschwindigkeit der Messfahrt umgerechnet werden.

Berechnung der effektiven Rauheiten Für die Berechnung der effektiven Rauheiten $L_{r,tot,i}(\lambda)$ werden die vertikalen Beschleunigungen $L_{aeq,i}(f_i)$ an den Schienenfussunterseiten während des Zeitausschnittes T_p ausgewertet.⁴ Unter Berücksichtigung der vertikalen Track Decay Rate $D_{s,i}(f_i)$ wird für jede Terzmittenfrequenz f_i die effektive Rauheit $L_{r,tot,i}(f_i)$ auf beiden Schienen berechnet [13]:

$$L_{r,tot,i}(f_i) = L_{aeq,i}(f_i) - A_2 - 40 \lg(2\pi f_i) - 10 \lg \left(8.686 \frac{N_{ac}}{l_{veh} D_{s,i}} \right) \quad [\text{dB re } 10^{-6} \text{m}] \quad (3.7)$$

Unter Berücksichtigung der Vorbeifahrtgeschwindigkeit erfolgt die Umrechnung des Frequenzspektrums in ein Wellenlängenspektrum wobei zwischen den Stützstellen linear interpoliert wird:

$$L_{r,tot,i}(\lambda) \equiv L_{r,tot,i}(f(v, f_i)) \quad (3.8)$$

²Bei der Berechnung der effektiven Gesamtrauheit werden diese Fahrzeuge jedoch nicht berücksichtigt. Dieses Vorgehen ist dadurch begründet, dass Fahrzeuge mit Flachstellen sehr hohe Beschleunigungsamplituden an den Schienen erzeugen. Dabei kann es zu Übersteuerungen der Beschleunigungsaufnehmer und zu fehlerhaften Berechnungen der effektiven Rauheiten kommen.

³Das Rollgeräusch wird als die dominierende Schallquelle angesehen, daher werden die Ausbreitungsdämpfungen der Quellenhöhe 0.5 m verwendet.

⁴Als Erweiterung wird in den Abschnitten 5.1.3.3 und 6.4.4 auf die Berechnung der Rauheiten einzelner Räder eingegangen.

Die effektiven Rauheiten sind normiert auf die Achsdichte N_{ac}/l_{veh} , daher auf die Anzahl der Achsen, die einen Beitrag zu den vertikalen Schienenbeschleunigungen liefern und der Länge des ausgewerteten Fahrzeugs. A_2 beschreibt den Zusammenhang zwischen Schienenfussbeschleunigung und der resultierenden effektiven Gesamtrauheit. Die Werte für A_2 können nach [93] über die Rezeptanzen von Rad α_W , Schiene α_R und der Kontaktsteifigkeit α_C berechnet werden:

$$A_2 = 20 \lg \left(\frac{|\alpha_R|}{|\alpha_R + \alpha_W + \alpha_C|} \right) \quad [\text{dB re 1}] \quad (3.9)$$

In [93] werden in Abhängigkeit von der Zwischenlagensteifigkeit Standardwerte für A_2 angegeben. Diese Werte werden für die Auswertung der Messungen verwendet.

Berechnung der Radrauheiten Die Berechnung der Radrauheiten kann unter Verwendung der direkt gemessenen Schienenrauheit $L_{r,tr,i}$, der effektiven Gesamtrauheit $L_{r,tot,i}$ und dem Kontaktfilter A_3 erfolgen:

$$L_{r,tot,dir}(\lambda) = L_{r,tot,i}(\lambda) - A_3(\lambda) \quad [\text{dB re } 1 \cdot 10^{-6} \text{m}] \quad (3.10)$$

Mit der Unterscheidung:

$$L_{r,veh,i}(\lambda) = \begin{cases} L_{r,tot,dir}(\lambda) \ominus L_{r,tr,i}(\lambda) & : \quad L_{r,tot,dir}(\lambda) - L_{r,tr,i}(\lambda) \geq 1 \text{ dB} \\ L_{r,tot,dir}(\lambda) - 7 \text{ dB} & : \quad L_{r,tot,i}(\lambda) - L_{r,tr,i}(\lambda) < 1 \text{ dB} \end{cases} \quad (3.11)$$

Für den Fall $L_{r,tot,dir}(\lambda) - L_{r,tr,i}(\lambda) < 1 \text{ dB}$ gilt dann:

$$L_{r,tr,i}(\lambda) = L_{r,tot,dir}(\lambda) - 1 \text{ dB} \quad (3.12)$$

Berechnung der Transferfunktionen Die Gesamttransferfunktion $L_{HW,tot,i}(f_i)$ wird aus den Schallleistungsspektren der Rollgeräuschquelle $L_{W,roll,i}(f_i)$ und der effektiven Rauheit $L_{r,tot,i}(f_i)$ der mikrofonzugewandten Schiene berechnet:⁵

$$L_{HW,tot,i}(f_i) = L_{W,roll,i}(f_i) - L_{r,tot,i}(f_i) - 10 \lg N_{ac} \quad [\text{dB re } 1 \text{ W/m}^2] \quad (3.13)$$

Bei bekannter Referenztransferfunktion an einer Messstelle $L_{HW,ref,i}(f_i)$ können die Transferfunktionen des Oberbaus $L_{HW,tr,i}(f_i)$ und des Fahrzeuges $L_{HW,veh,i}(f_i)$ berechnet werden:

$$L_{HW,veh,i}(f_i) = \begin{cases} L_{HW,tot,i}(f_i) \ominus L_{HW,ref,i}(f_i) & : \quad L_{HW,tot,i}(f_i) - L_{HW,ref,i}(f_i) \geq 1 \text{ dB} \\ L_{HW,tot,i}(f_i) - 7 \text{ dB} & : \quad L_{HW,tot,i}(f_i) - L_{HW,ref,i}(f_i) < 1 \text{ dB} \end{cases} \quad (3.14)$$

$$L_{HW,tr,i}(f_i) = \begin{cases} L_{HW,ref,i}(f_i) & : \quad L_{HW,tot,i}(f_i) - L_{HW,ref,i}(f_i) \geq 1 \text{ dB} \\ L_{HW,ref,i}(f_i) - 1 \text{ dB} & : \quad L_{HW,tot,i}(f_i) - L_{HW,ref,i}(f_i) < 1 \text{ dB} \end{cases} \quad (3.15)$$

Die Referenztransferfunktionen $L_{HW,ref,i}(f_i)$ werden an den Messstellen 01-12 aus den Messfahrten des NiNa-Messzugs getrennt für beide Richtungsgleise bestimmt. An den Messstellen 13-35 werden die Vorbeifahrten von RoLa Zügen für die Beschreibung des Abstrahlverhaltens des Oberbaus verwendet.⁶

Klassifizierung der Schienenrauheiten Die Schienenrauheiten werden durch einen Rauheitspegel als Einzahlwert klassifiziert. Der Rauheitspegel $L_{\lambda,CA}$ wird nach [94] aus dem gemessenen Rauheitsspektrum⁷ $R(\lambda)$, einem Korrekturspektrum $\Lambda(\lambda)$, einem Kontaktfilter $C(\lambda)$ und dem A-Bewertungspegel für Schalldrucksignale $A_{bew}(f(\lambda, v))$ berechnet. Die Umrechnung der Wellenlängenspektren in Frequenzspektren erfordert die Angabe einer Vorbeifahrtgeschwindigkeit v . Diese wird in Anlehnung an [94] auf $v = 120 \text{ km/h}$ gesetzt. Der A-Bewertungspegel wird durch

⁵Die Angabe der Transferfunktionen kann auch analog mit den Schalldrucksignalen der Basismikrofone in 7.5 m Entfernung, normiert auf die Achsdichte, erfolgen: $L_{Hp,tot,i}(f_i) = L_{p,tot,i}(f_i) - L_{r,tot,i}(f_i) - 10 \lg \frac{N_{ac}}{l_{veh}} \quad [\text{dB re } 20 \frac{\text{Pa}}{\sqrt{\text{m}}}]$

⁶In Abschnitt 5.2.4.2 wird auf die Bestimmung von Referenztransferfunktionen genauer eingegangen.

⁷Es wird der energetische Mittelwert der gemessenen Schienenrauheiten aller 12 Messabschnitte an einer Messstelle pro Richtungsgleis verwendet (vgl. Anhang ??).

eine lineare Interpolation bestimmt. Die Berechnung erfolgt nach folgenden Beziehungen:

$$L_{\lambda,CA} = 10 \lg \sum_{\lambda=20 \text{ cm}}^{0.4 \text{ cm}} 10^{\frac{1}{10} \{R(\lambda) + \Lambda(\lambda) + C(\lambda) + A_{bew}(f(\lambda, v))\}} \quad [\text{dB re 1}] \quad (3.16)$$

$$\Lambda(\lambda) = -a \lg \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right), \quad \lambda_0 = 5 \text{ cm}, \quad a = 25 \quad (3.17)$$

$$C(\lambda) = \begin{cases} 0 & : \lambda \geq 10^{0.85} \\ 10 \lg(\lambda) - 8.5 & : 10^{0.35} < \lambda < 10^{0.85} \\ 20 \lg(\lambda) - 12 & : \leq 10^{0.35} \end{cases} \quad (3.18)$$

Im Emissionsmodell wird anhand der Rauheitspegel in die Rauheitskategorien glatter Schienenzustand (smooth), durchschnittlicher Schienenzustand (average) und schlechter Schienenzustand (bad) unterschieden:

$$\text{Kategorie} = \begin{cases} \text{smooth} & : L_{\lambda,CA} < 4 \text{ dB} \\ \text{average} & : 4 \text{ dB} \leq L_{\lambda,CA} \leq 10 \text{ dB} \\ \text{bad} & : L_{\lambda,CA} > 10 \text{ dB} \end{cases} \quad (3.19)$$

Bildung von Mittelwerten Wenn nicht anders vermerkt, wird die Mittelwertbildung von akustischen Parametern als energetische Mittelung durchgeführt.

3.3 FAMOS Programmsequenz zur automatisierten Auswertung

Die im vorherigen Abschnitt beschriebenen Algorithmen der Messauswertung wurden zur automatisierten Bearbeitung in einer FAMOS-Sequenz⁸ umgesetzt. Der Programmcode dieser Sequenz ist im Listing ?? des Anhangs angegeben und in Tabelle 3.3 dokumentiert. Die Sequenz verarbeitet alle Schalldruck-, Beschleunigungs- und Achssignale von jeder Messstelle, unter Verwendung folgender Zusatzdaten:

1. Schienenrauheiten für jede Schiene im Messquerschnitt $L_{r,tr,i}(\lambda)$
2. Referenztransferfunktionen der Schalldruck- und Schalleistungspegel $L_{Hp,ref,i}(f_i)$, $L_{HW,ref,i}(f_i)$
3. Ausbreitungsdämpfungen für jede Mikrofonposition und Quellenhöhe $D_{ground,i}(f_i)$
4. Sekundärschalleistungen für jede Fahrzeugkategorie $L_{W,sek,i}(f_i)$
5. Kontaktfilter $A_3(\lambda)$ und Konvertierungsspektrum $A_2(f_i)$

Die Sequenz wertet jedes Fahrzeug eines Zugverbandes aus und speichert für dieses Fahrzeug alle relevanten Modell-daten ab. Es werden 2 Methoden der Auswertung umgesetzt:

1. Bei einheitlichen Zugverbänden (IC, IC2000) können die erste n_anf und letzte Achse n_end einer Fahrzeugkategorie angegeben werden. Über die Angabe der Achsen pro Fahrzeug $achspakete$ (typisch 4 Achsen) wird die Gruppe der Fahrzeuge automatisch unterteilt und ausgewertet. Mit diesem Vorgehen wird eine effiziente und schnelle Auswertung ermöglicht.
2. Bei Zugverbänden mit sehr unterschiedlichen Fahrzeugkategorien und unterschiedlichen Achsanzahlen pro Fahrzeug (typisch Güterzüge) kann ein Fahrzeug direkt über seine erste n_w_anf und letzte Achse n_w_end im Zugverband bestimmt werden. Für jedes Fahrzeug wird die Fahrzeugkategorie einzeln abgefragt.

In den Abschnitten 6.4.4 und 6.4.5 wird die Weiterentwicklung dieser Auswertesequenz zur Berechnung von Radrauheiten an Monitoringstationen sowie zur Berechnung von Schienenrauheiten mit einem Monitoringzug vorgestellt.

⁸FAMOS: Fast Analysis And Monitoring Of Signals

Tabelle 3.3: Erläuterungen zum Quellcode der FAMOS Auswertung des Programmlistings ?? (Fortsetzung folgende Seite)

Zeilen	Input	Output	Gleichung	Anmerkungen
5-6	-	-	-	Festlegen der Messstelle und Angabe des Pfades für Zusatzdaten
8	-	-	-	Achsabstand des Dreigestells, welches für die Geschwindigkeitsberechnung verwendet werden soll
9	-	-	-	Achse im Zugverband, welche für die Geschwindigkeitsberechnung verwendet werden soll
10	-	-	-	Anzahl der Achsen die bei der automatischen Auswertung nach Abb. 3.5 zusammengefasst werden sollen
12	-	-	-	Setzen der aktuellen Pfadangabe der Messdaten
14-23	<i>zusatzdaten</i> _[MS].dat	<i>L_{r,ir,i}</i> , <i>L_{HP,ref,i}</i> , <i>L_{HW,ref,i}</i> , <i>D_{s,i}</i>	-	Einlesen der Zusatzdaten der aktuellen Messstelle
25-33	<i>zusatzdaten</i> _array.dat	<i>L_{w,sek,i}</i> , <i>D_{ground,i}</i>	-	Einlesen Sekundärschallleistungen aller Fahrzeugtypen und Ausbreitungsdämpfungen aller Messstellen
35	-	<i>beenden</i>	-	Beginn der Auswertung bis Benutzerabbruch
39-44	-	-	-	Auswahldialog zum Laden der Messdaten
46-56	-	-	-	Verwaltung der Dateinamen, Erstellung des Dateinamens für Ergebnisse der Auswertung
58-69	<i>AZ_1...4.dat</i>	<i>AZ_1...4</i>	-	Einlesen der Beschleunigungssignale
71-82	<i>P_1...4.dat</i>	<i>P_1...4</i>	-	Einlesen der Mikrofonssignale
84-89	<i>DIG_AN/S.dat</i>	<i>DIG_AN/S</i>	-	Einlesen der Achssignale des nördlichen und südlichen Gleises
91-95	-	<i>anzahl_achsen</i>	-	Bestimmung der Achspositionen und Ermittlung der Achsanzahl im Zug
97-130	-	<i>gleis,</i> <i>geschwindigkeit</i>	-	Bestimmung des Richtungsgleises und der Fahrgeschwindigkeit
132-139	-	-	-	Kontrollanzeige der eingelesenen Rohdaten (Mikrofon-, Beschleunigungs- und Achssignale, Anzahl der Achsen, Geschwindigkeit)
141-148	-	-	-	Bestätigung der Daten und Abfrage zur weiteren Auswertung, Benutzerabbruch möglich
150	-	<i>zug_ID</i>	-	Eingabe der <i>zug_id</i> der Messfahrt
152	-	-	-	Abfrage: einheitlicher Zugverband oder jedes Fahrzeug einzeln auswerten
154	-	<i>k_anz</i>	-	Wenn einheitlicher Zugverband: Anzahl der Fahrzeugkategorien im Zugverband angeben
164	-	-	-	Beginn Schleife: Auswertungen für alle Fahrzeugkategorien <i>k_anz</i>
165-170	-	<i>n_anf, n_end,</i> <i>fzg_id</i>	-	Wenn einheitlicher Zugverband: 1. und letzte Achse einer Fahrzeugkategorie im Zugverband angeben
181	-	-	-	Beginn Schleife: Auswertung für alle Fahrzeuge einer Fahrzeugkategorie
182-188	-	<i>n_w_anf,</i> <i>n_w_end,</i> <i>fzg_id</i>	-	Wenn nicht einheitlicher Zugverband: 1. und letzte Achse des auszuwertenden Fahrzeuges, Angabe der Fahrzeugkennung
189-193	-	<i>n_w_anf</i> <i>n_w_end</i>	-	Wenn einheitlicher Zugverband: automatische Berechnung der 1. und letzte Achse des auszuwertenden Fahrzeuges einer Kategorie durch Verwendung von <i>achspakete</i>
197-213	-	-	-	Bestimmung der Fahrzeuggrenzen in Fahrzeugmitte nach Abb. 3.5
215-220	-	-	-	jedes Fahrzeug wird als neue Gruppe festgelegt
222-225	-	-	-	Daten zur Gruppe Fahrzeug hinzufügen
229-246	<i>AZ_1...4</i>	<i>L_{req,i}</i>	-	Verarbeitung der Beschleunigungsdaten: in Fahrzeuggrenzen ausschneiden und Beschleunigungspegel in Terzspektren für alle 4 Signale bilden

Tabelle 3.3: Erläuterungen zum Quellcode der FAMOS Auswertung des Programmlistings ?? (Fortsetzung)

Zeilen	Input	Output	Gleichung	Anmerkungen
248-278	$L_{aeq,i}$, $D_{s,i}$, anz_achsen , $geschwindigkeit$, l_{veh}	$L_{r,tot,i}(f_i)$	(3.7)	Berechnung der effektiven Rauheiten für beide Schienen, je nach Richtungsgleis; Kontrollanzeige der aktuellen Auswertung
280-297	$L_{r,tot,i}(f_i)$, $geschwindigkeit$	$L_{r,tot,i}(\lambda)$	(3.8)	Berechnung der effektiven Rauheiten im Wellenlängenbereich
299-300	$L_{r,tot,i}(\lambda)$	-	-	Kontrollanzeige der effektiven Rauheiten
302-331	$L_{r,tot,i}(\lambda)$, A_3 , $L_{r,tr,i}$	$L_{r,veh,i}$	(3.10), (3.11)	Berechnung der Radrauheiten auf jeder Schiene des Richtungsgleises
333-348	$P_{1...4}$	$P_{1...4_terz}$	-	Verarbeitung der Mikrofonsignale: in Fahrzeuggrenzen ausschneiden, Vorbeifahrtpegel $L_{p,Aeq}$ und Tertspektren für alle 4 Signale bilden
350-359	D_{ground}	$A_{[N]}[N]$	(3.5)	Berechnung der Dämpfungsterme aus Aspektwinkel und Ausbreitungsdämpfung der aktuellen Messstelle
361-365	$L_{W,sek,i}$	-	-	Berechnung der sekundären Schalleistungen der aktuellen Fahrzeugkategorie
371-372 (457-458)	$P_{1...4_terz}$, $L_{r,tot,i}(f_i)$	$L_{HP,tot,i}(f_i)$	-	Berechnung der Gesamttransferfunktion zwischen Schalldruck und effektiver Rauheit für Nordgleis (Südgleis)
375-376 (460-461)	$L_{HP,tot,i}(f_i)$, $L_{HP,ref,i}(f_i)$	$L_{HP,veh,i}(f_i)$	-	Berechnung der Fahrzeugtransferfunktion für Schalldruck
378-380 (463-465)	$P_{1...4_terz}$, $A_{[N]}[N]$	L_{Wp_terz}	(3.5)	Berechnung der Schalleistungen
382-404 (467-489)	$L_{Wp_{1...4}}$, $L_{W,sek,i}$	L_{W0_terz}	(3.6)	Berechnung der Schalleistungen der Rollgeräuschquellen durch Abzug der sekundären Schalleistungsanteile
406-408 (491-493)	L_{W0_terz} , $L_{r,tot,i}(f_i)$	$L_{HW,tot,i}(f_i)$	(3.13)	Berechnung der Gesamttransferfunktion zwischen Schalleistung der Rollgeräuschquellen und effektiver Rauheit
410-412 (495-497)	$L_{HW,tot,i}(f_i)$, $L_{HW,ref,i}(f_i)$	$L_{HW,veh,i}(f_i)$	(3.15)	Berechnung der Fahrzeugtransferfunktion für Schalleistungen
414-436 (499-521)	$L_{HP,tot,i}(f_i)$, $L_{HP,ref,i}(f_i)$, $L_{HP,veh,i}$	$L_{HP,tr,i}(f_i)$	-	Berechnung der Oberbautransferfunktion für Schalldruck
437-454 (522-539)	$L_{HW,tot,i}(f_i)$, $L_{HW,ref,i}(f_i)$, $L_{HW,veh,i}$	$L_{HW,tr,i}(f_i)$	(3.15)	Berechnung der Oberbautransferfunktion für Schalleistung
542-549	$L_{W0...3_terz}$	$L_{W_{1...4}}$	-	Berechnung der Summenschalleistung pro Quellenhöhe
551-568	$L_{HP,tot,i}$, $L_{HP,veh,i}$, $L_{HP,tr,i}$, $L_{r,veh,i}$	-	-	Kontrollanzeige der Rauheitsspektren und Übertragungsfunktionen des ausgewerteten Fahrzeuges
570-576	-	-	-	Bestätigung der Gültigkeit der Ergebnisse durch Setzen von Marken (Wird ein Ergebnis als ungültig markiert, wird dieses trotzdem in die Datenbank aufgenommen und als ungültiges Ergebnis markiert. In der weiteren Auswertung bleibt dieses Ergebnis unberücksichtigt.)
581-699	$mess_ID$, fg_id , n_w_anf , n_w_end	-	-	Setzen von Attributen der berechneten Ergebnisse

Tabelle 3.3: Erläuterungen zum Quellcode der FAMOS Auswertung des Programmlistings ?? (Fortsetzung)

Zeilen	Input	Output	Gleichung	Anmerkungen
701-733	-	-	-	Hinzufügen der Ergebnisse zur Fahrzeuggruppe
743-835	-	-	-	Speicherung der Ergebnisse in Textdateien für späteres Einlesen in Ergebnisdatenbank
837-844	-	-	-	Speicherung der Ergebnisse im FAMOS Datenformat
846-853	-	-	-	Wenn nicht einheitlicher Zugverband: Abfrage, ob weiteres Fahrzeug des Zugverbandes ausgewertet soll
854	<i>anz_fzg</i>	<i>anz_fzg</i>	-	Erhöhung des Zählers der ausgewerteten Fahrzeuge
855	-	-	-	Ende Schleife: Auswertung eines Fahrzeuges einer Kategorie
854	<i>k</i>	<i>k</i>	-	Erhöhung des Zählers der ausgewerteten Fahrzeugkategorien
859	-	-	-	Ende Schleife: Auswertung aller Fahrzeuge einer Messfahrt
861-865	-	-	-	Abfrage, ob weitere Messfahrt ausgewertet werden soll

4 Ergebnisse der Messungen

4.1 Ergebnisse der Rauheits- und Track Decay Rate Messungen

Die Messungen der Schienenrauheiten und der Track Decay Rate dienen der Klassifizierung der Messstellen hinsichtlich ihrer akustischen Eigenschaften. In diesem Abschnitt werden zusammenfassend die Ergebnisse dieser Messungen vorgestellt. Die ausführliche Darstellung erfolgt in den Anhängen ?? und ?? sowie in den Berichten [95] und [96].

4.1.1 Schienenrauheiten

Die Schienenrauheit ist einer der zentralen Einflussparameter im Rollgeräuschmodell und wurde deshalb an allen Messstellen mit der direkten Messmethode bestimmt. Die Ergebnisse der Messungen sind in Abbildung 4.1 zusammengefasst für jede Messstelle und jedes Richtungsgleis dargestellt. Die Schienenrauheiten weisen eine sehr hohe Streuung auf, unabhängig von Verkehrsbelastung und Schwellentyp. Die maximale Differenz der Rauheitsamplituden kann pro Wellenlänge bis zu 20 dB betragen. Überschreitungen der TSI Grenzwertkurve treten eher im langen Wellenlängenbereich auf, für Wellenlängen kleiner als 2 cm nehmen die Überschreitungen ab. Davon ausgenommen sind Rauheitsamplituden die auf Schienenschleifvorgänge zurückzuführen sind. Diese sind in Abbildung 4.1 deutlich an den Messstellen der NBS bei den Wellenlängen 2 und 2.5 cm zu erkennen. Innerhalb eines Messquerschnitts können die Rauheiten für beide Richtungsgleise zudem deutlich unterschiedlich ausfallen (vgl. Abschnitt 5.1.2.2).

Zur Klassifizierung der Messstellen werden in Tabelle 4.1 die nach Gleichung (3.18) berechneten Rauheitspegel $L_{\lambda,CA}$ angegeben und in die drei Rauheitskategorien unterteilt. Die grosse Streuung der Schienenrauheiten wird auch hier anhand der Rauheitspegel deutlich. Zwischen den Messstellen 03 und 04 wird bei gleicher Verkehrsbelastung, Oberbautyp und Geschwindigkeit eine Differenz der Rauheitspegel von 9 dB(A) festgestellt.

4.1.1.1 Vergleich der Schienenrauheiten der NBS der Jahre 2007, 2008 und 2009

An den Messstellen 13,33; 14,34 und 15,35 wurden die Schienenrauheiten mit einem zeitlichen Abstand von einem Jahr an identischen Messquerschnitten gemessen. Die Ergebnisse der Messungen sind in Abbildung 4.3 dargestellt. Eine wesentliche Verbesserung der Schienenrauheiten konnte trotz der hohen Verkehrsbelastung durch scheinbrennste

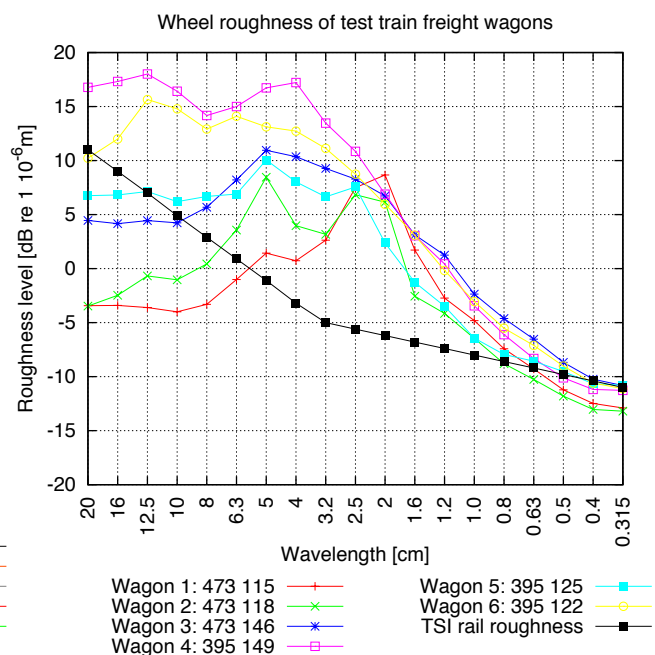
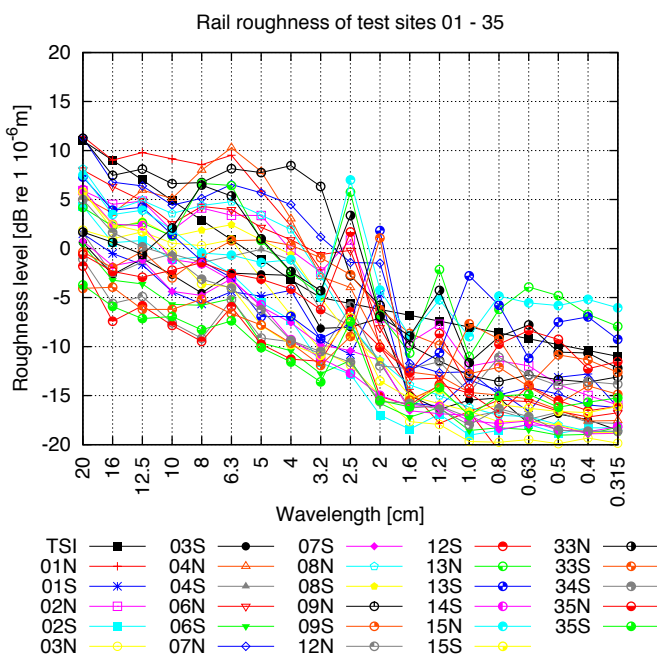


Abbildung 4.1: Schienenrauheiten der Messstellen 01 bis 35

Abbildung 4.2: Radrauheiten der Güterwagen des Messzuges

Tabelle 4.1: Rauheitspegel $L_{\lambda,CA}$ zur Klassifizierung der sonRAIL Messstellen und der TSI Grenzkurve in dB(A)

Messstelle 01				Messstelle 02			
MS 01 N N 12.2 bad	MS 01 N S 1.2 smooth	MS 01 S N 5.0 average	MS 01 S S 5.1 average	MS 02 N N 6.2 average	MS 02 N S 11.7 bad	MS 02 S N 2.2 smooth	MS 02 S S 0.0 smooth
Messstelle 03				Messstelle 04			
MS 03 N N 1.9 smooth	MS 03 N S 2.7 smooth	MS 03 S N 4.8 average	MS 03 S S 4.4 average	MS 04 N N 8.9 average	MS 04 N S 11.7 bad	MS 04 S N 6.3 average	MS 04 S S 2.8 smooth
Messstelle 06				Messstelle 07			
MS 06 N N 10.6 bad	MS 06 N S 6.3 average	MS 06 S N 0.2 smooth	MS 06 S S 0.4 smooth	MS 07 N N 9.6 average	MS 07 N S 10.5 bad	MS 07 S N 1.5 smooth	MS 07 S S 2.5 smooth
Messstelle 08				Messstelle 09			
MS 08 N N 6.9 average	MS 08 N S 8.2 average	MS 08 S N 5.9 average	MS 08 S S 3.3 smooth	MS 09 N N 7.1 average	MS 09 N S 15.8 bad	MS 09 S N 9.4 average	MS 09 S S 7.4 average
Messstelle 12				Messstelle 13			
MS 12 N N 4.4 average	MS 12 N S 5.3 average	MS 12 S N 1.6 smooth	MS 12 S S 2.9 smooth	MS 13 N N 13.4 bad	MS 13 N S 13.2 bad	MS 13 S N 9.9 average	MS 13 S S 11.7 bad
Messstelle 14		Messstelle 15					
MS 14 S N 2.4 smooth	MS 14 S S 0.3 smooth	MS 15 N N 8.3 average	MS 15 N S 11.9 bad	MS 15 S N 2.5 smooth	MS 15 S S 3.1 smooth		
Messstelle 33				Messstelle 34			
MS 33 N N 10.8 bad	MS 33 N S 11.7 bad	MS 33 S N 10.8 bad	MS 33 S S 11.7 bad	MS 34 S N 2.8 smooth	MS 34 S S -0.4 smooth		
Messstelle 35				TSI			
MS 35 N N 5.5 average	MS 35 N S 10.9 bad	MS 35 S N 3.3 smooth	MS 35 S S 0.6 smooth	8.9 average			

Personenzüge nicht festgestellt werden. Die Rauheitsamplituden bei 2.0 bzw. 2.5 cm sind bei allen Messkampagnen gleich hoch. Als mögliche Ursache für diese hohen Rauheiten kann eine zu hohe Steifigkeit des Oberbaus vermutet werden [97]¹. Diese hohe Oberbausteifigkeit wird u.a. durch eine Betongrundwasserwanne verursacht, die aus Umweltschutzgründen eingebaut werden musste [99]. Aus Gründen des Erschütterungsschutzes wurden jedoch einzelne Streckenabschnitte mit Schwellenbesohlung und Unterschottermatten ausgerüstet, so dass auf diesen Abschnitten die Steifigkeit des Oberbaus deutlich verringert werden konnte. Die Messungen sollen nun darüber Aufschluss geben, ob dies auch Auswirkungen auf die Schienenrauheiten in diesen Streckenabschnitten hat. Dazu werden in Abbildung 4.4 die Messstellen auf der NBS mit unterschiedlicher Oberbaukonfiguration verglichen.² Zwischen den Messstellen werden deutliche Unterschiede in den Schienenrauheiten gemessen, trotz identischer Verkehrsbelastung und Geschwindigkeit. Das Pegelmaximum bei $\lambda = 2.0$ cm wurde nur an der Messstelle 13/33 gemessen. Auf den Abschnitten mit Schwellenbesohlung und Unterschottermatten werden im gesamten Wellenlängenbereich deutlich niedrigere Rauheitsamplituden erfasst. Der Rauheitspeak bei 2 cm dominiert nicht mehr das Spektrum. Die Rauheitsunterschiede können somit nur auf den veränderten Oberbaueinfluss zurückgeführt werden.

Der Vergleich der vertikalen TDRs der drei Oberbaukonfigurationen in Abbildung 4.5 zeigt zudem, dass sich die dynamischen Eigenschaften des Oberbaus bei Frequenzen kleiner 250 Hz deutlich unterscheiden. Die Abklingraten der Messstellen mit Schwellenbesohlung und Unterschottermatten liegen deutlich unter den Werten des Messquerschnittes mit konventionellen Oberbau. Diese Messergebnisse stimmen mit den in [100] veröffentlichten Ergebnissen überein, hier wird der Einfluss von Schwellenbesohlung und Unterschottermatten auf die dynamischen Gleiseigenschaften in einem Frequenzbereich zwischen 100 und 300 Hz angegeben.

Die Ergebnisse der Untersuchungen legen den Schluss nahe, dass durch die Verwendung von Unterschottermatten und Schwellenbesohlung die Dämpfungseigenschaften des Oberbaus verändert werden. Dies kann positive Auswirkungen auf die Entwicklung von Schienenrauheiten haben.

¹In [98] wird für die Neubaustrecken der Deutschen Bahn AG anhand von Messungen ebenfalls eine sehr hohe Oberbausteifigkeit nachgewiesen.

²Die ausführliche Darstellung der Messergebnisse befindet sich im Anhang ??.

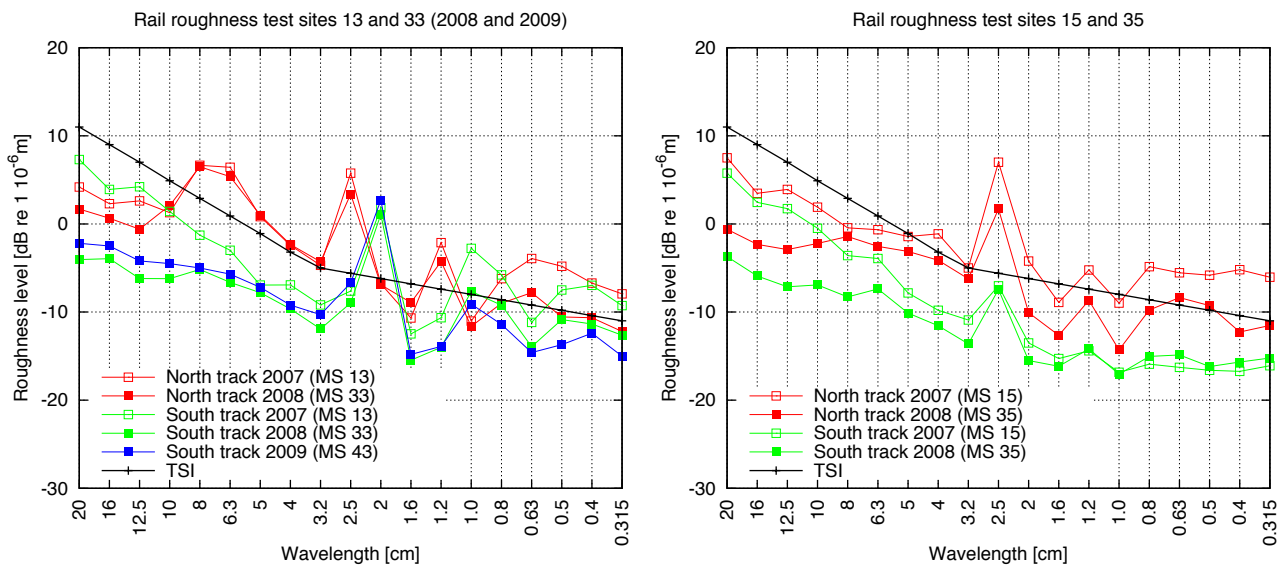


Abbildung 4.3: Vergleich der Schienenrauheiten an den Messtellen 13,33 und 15,35

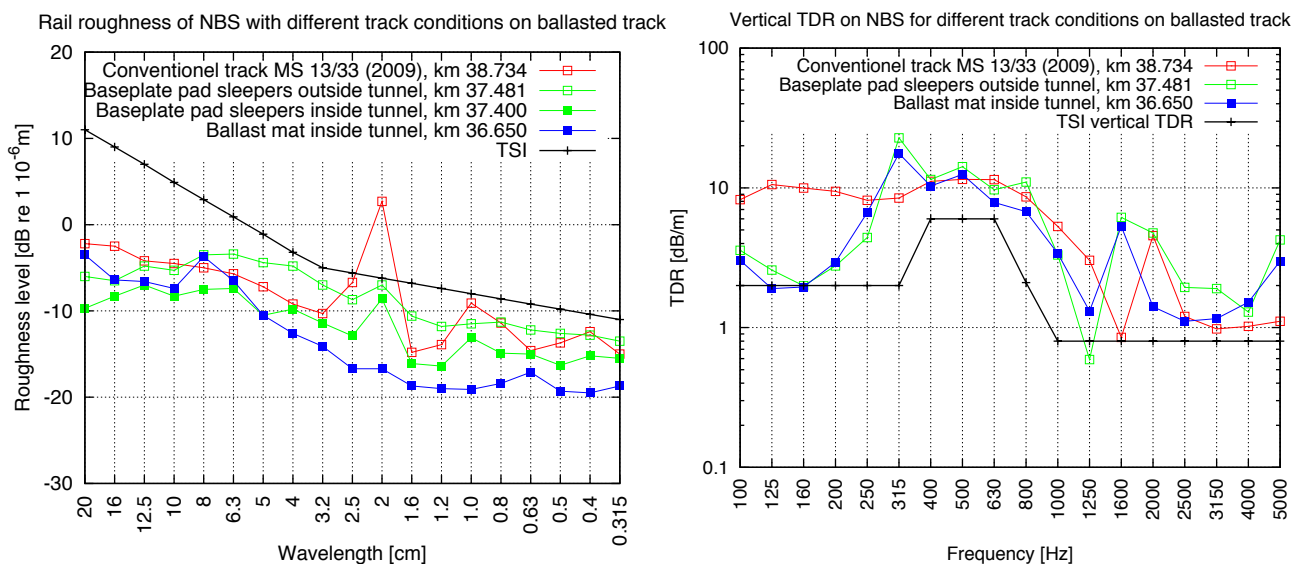


Abbildung 4.4: Schienenrauheiten auf der NBS Mattstetten-Rothrist an Messtellen mit Unterschottermatte (ballast mat), Schwellenbesohlung (Baseplate pad) und konventionellen Schotteroberbau

Abbildung 4.5: Vertikale Track Decay Rate auf der NBS Mattstetten-Rothrist an Messtellen mit Unterschottermatte, Schwellenbesohlung und konventionellen Schotteroberbau

4.1.1.2 Einfluss von Radrauheiten auf Schienenrauheiten

Ein Einfluss von Radrauheiten auf die Entwicklung von Schienenrauheiten kann anhand der durchgeführten Messungen nicht nachgewiesen werden. Die Annahme, dass hohe Radrauheiten von GG-Klotz gebremsten Fahrzeugen hohe Schienenrauheiten verursachen, wird durch die Messungen nicht bestätigt. In Abbildung 4.6 sind Schienenrauheiten von Strecken mit hoher Güterverkehrsbelastung dargestellt. Auf den Transitkorridoren Gotthard und Lötschberg werden Schienenrauheiten gemessen, die deutlich unterhalb der TSI Grenzwertkurve liegen.³ Dies gilt auch für die Messwerte auf der Rübelandbahn im Harz, die ausschliesslich für den Güterverkehr benutzt wird.⁴ Im Gegensatz dazu können auf Strecken mit überwiegendem Personenverkehr sehr hohe Schienenrauheiten gemessen werden, siehe

³Das Güterwagen mit Flachstellen oder unrunder Räder sehr starke dynamische Belastungen für den Oberbau darstellen und dies zu einer Verschlechterung der Gleisqualität führen kann, bleibt davon unberücksichtigt.

⁴Die Messungen wurden am 1.7.2009 am Bahnhof Michaelstein durchgeführt. Auf dieser Steilstrecke verkehren nur Schwerlastgüterzüge.

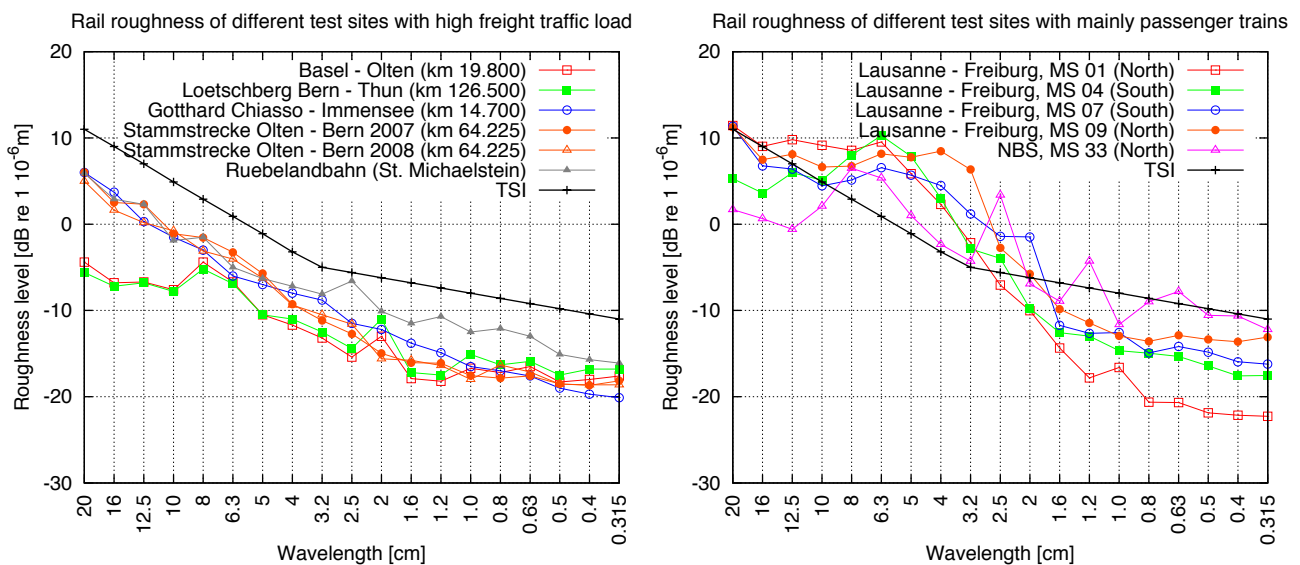


Abbildung 4.6: Vergleich der Schienenrauheiten an Messstellen mit hoher Güterverkehrsbelastung (linke Abbildung) und überwiegender Personenverkehrsbelastung (rechte Abbildung)

Rauheiten auf der NBS in Abbildung 4.3.

4.1.2 Radrauheiten des Messzuges

Die Radrauheiten der GG-Klotz gebremsten Güterwagen des Messzuges wurden im direkten Anschluss an die Messkampagne 2007 im Depot Lausanne ermittelt. Alle Räder sind mit der direkten Rauheitsmessung vermessen worden. Die Abbildung 4.2 zeigt für jeden Wagen die gemittelten Rauheiten aller Räder, die ausführliche Darstellung erfolgt im Anhang ???. Deutliche Unterschiede sind im langwelligen Bereich zu erkennen. Im relevanten Wellenlängenbereich um 2 cm (entspricht bei 80 km/h einer Frequenz von 1100 Hz) befindet sich bei allen Fahrzeugen das Rauheitsmaximum.⁵ Der Vergleich mit den Schienenrauheiten zeigt bereits deutliche Unterschiede in den Rauheitsamplituden.

4.1.3 Track Decay Rates

Die Track Decay Rate (TDR) wird für die Berechnung der effektiven Rauheit nach Gleichung (3.7) sowie für die Klassifizierung der Oberbautypen hinsichtlich ihrer dynamischen Eigenschaften benötigt. Aus diesen Gründen wurde an ausgewählten Messstellen die TDR nach TSI Lärm [101] mit der direkten Hammermethode gemessen. Die Abbildung 4.7 zeigt die lateralen und vertikalen TDRs der untersuchten Messstellen. Die vertikalen TDRs weisen innerhalb eines Oberbautyps sehr ähnliche Verläufe auf, so dass pro Typ ein charakteristischer Frequenzverlauf angegeben werden kann. Es wird aber darauf hingewiesen, dass bei veränderten Randbedingungen, z.B. Zwischenlagensteifigkeit, Befestigungssystem, Spannkraft sich diese Verläufe ändern können. Signifikante Unterschiede für Betonschwellen des Typs B70 und B91 konnten nicht nachgewiesen werden (vgl. Abschnitt 5.2.4.3). Stahlschwellen weisen von allen Oberbautypen die niedrigsten TDRs auf. Bei Bi-Blockschwellen ist die auffallend hohe TDR im Bereich zwischen 500 und 2000 Hz signifikant. In lateraler Richtung werden zwischen den Oberbautypen geringere Abweichungen gemessen. Die TDR des Bi-Blockoberbaus liegt dabei über den Werten der anderen Oberbautypen.

Vergleich der Track Decay Rates der NBS der Jahre 2007 und 2008 An den Messstellen 13,33; 14,34 und 15,35 wurde die TDR in einem zeitlichen Abstand von einem Jahr an identischen Messquerschnitten durchgeführt. Die Abbildungen ??? des internen Anhangs zeigen die Ergebnisse aus beiden Jahren. In lateraler Richtung liegen die Werte der Track Decay Rate unterhalb der Messergebnisse des Jahres 2007, in vertikaler Richtung sind kaum Veränderungen festzustellen.

⁵Die hohen Rauheitspegel bei langen Wellenlängen des 4. Wagens sind auf eine Flachstelle der 1. Achse an diesem Wagen zurückzuführen, vgl. Anhang ???.

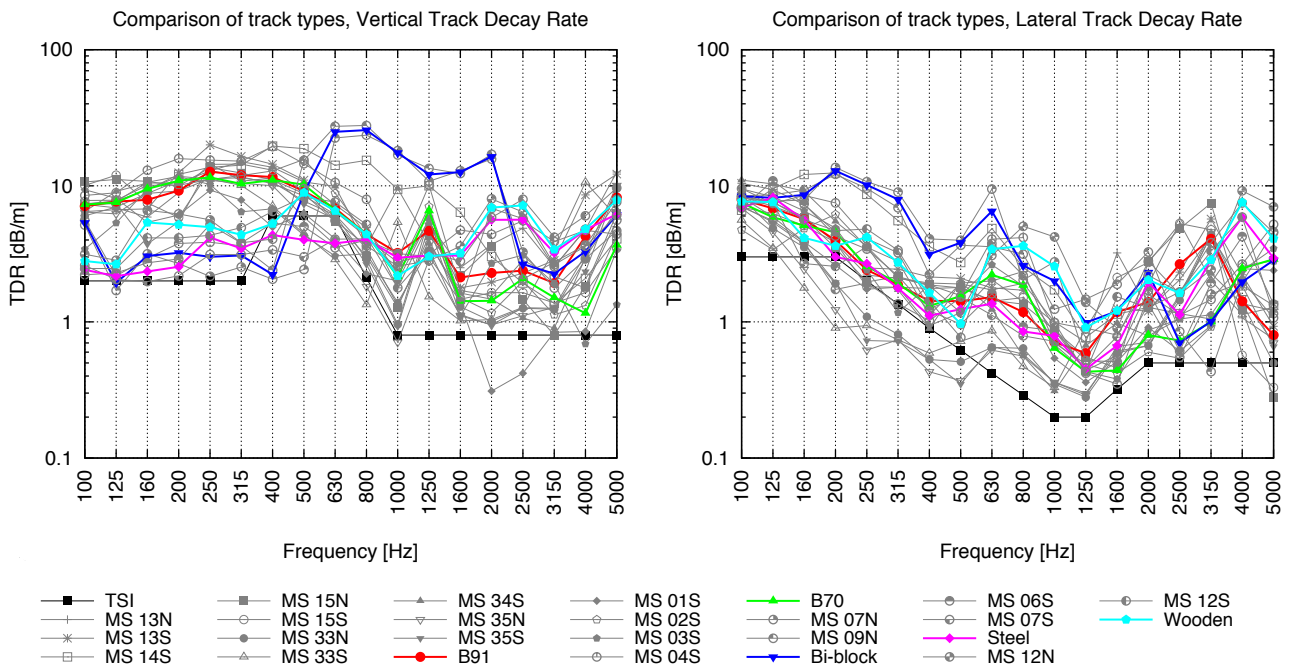


Abbildung 4.7: Vergleich der untersuchten TDRs der sonRAIL Messstellen; vertikale TDR (linke Abbildung), laterale TDR (rechte Abbildung)

4.2 Anzahl gemessener Fahrzeuge

Als Datengrundlage für die Modellerstellung werden die Vorbeifahrtmessungen an den Basismessstellen 01-15 im Sommer 2007 und 33-35 im Frühjahr 2008 verwendet. In Tabelle 4.2 ist die Anzahl der ausgewerteten Fahrzeuge unterteilt nach Fahrzeugkategorien und Messstellen aufgeführt. Insgesamt konnten über 14'000 Fahrzeuge messtechnisch erfasst und ausgewertet werden. Mit knapp 5'000 Fahrzeugen stellen die scheibengebremsen EWIV Wagen den grössten Anteil der Messdaten dar, gefolgt von IC2000 (≈ 4'100 Wagen), K-Klotz gebremsten Personenwagen (≈ 1'100 Fahrzeuge) und GG-Klotz gebremsten Güterwagen (≈ 1'000 Fahrzeuge). Re460 Lokomotiven wurden über 1'100 Mal gemessen, von ICN Zügen stehen 500 Messungen zur Verfügung. Von den Re420/620, Ae610 Fahrzeugen liegen 400 Messfahrten vor. Diese Zahlen zeigen, dass die Anforderung der Modellerstellung an eine möglichst grosse Datenbasis erfüllt werden konnte.

Tabelle 4.2: Anzahl der ausgewerteten Fahrzeuge pro Kategorie und Messstelle

	Messstellen																	Summe
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	11	12	13	14	15	33	34	35	
fzg_id_01	84	102	87	51	38	81	46	95	82	30	59	75	20	85	96	18	124	1173
fzg_id_02	27	26	23	18	7	17	9	72	67	32	55	0	2	0	19	11	16	401
fzg_id_03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	113	6	112	79	0	192	502
fzg_id_04	8	12	11	10	10	40	24	48	43	15	33	0	0	0	0	0	0	254
fzg_id_05	401	449	398	306	146	275	169	344	295	99	190	375	59	462	403	62	520	4953
fzg_id_06	77	82	75	58	19	35	10	250	230	107	192	0	0	0	0	0	0	1135
fzg_id_07	107	120	102	81	10	11	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	440
fzg_id_08	318	339	295	251	166	338	180	337	322	113	237	219	23	222	330	43	390	4123
fzg_id_09	74	72	68	72	19	48	18	55	58	30	54	0	59	0	138	111	119	995
fzg_id_10	17	15	15	3	3	13	12	10	9	10	8	0	10	0	88	8	75	296
fzg_id_11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	0	69	36	85	203
Summe	1113	1217	1074	850	418	858	477	1211	1106	436	828	782	192	881	1222	289	1521	14475

4.3 Auswertung der Fahrzeugerkennung

Zur Fahrzeugidentifikation wurde eine spezielle Kamera an den Messstelle 02, 14 und 33 installiert, die eine Zuordnung von zug_id und Fahrzeugnummern ermöglicht. Somit kann nachvollzogen werden, von welchen Fahrzeugen die Emissionsdaten erhoben wurden und wie oft ein Zug gemessen wurde. Der Anhang D enthält die Zugzusammensetzungen an der Messstrecke Lausanne-Freiburg und von Messstelle 14. Die Züge sind nach Zugtyp und Messfahrt (zug_id) geordnet.⁶ Züge die ausschliesslich zwischen den Messstellen 05 und 12 verkehrten, sind in dieser Aufstellung nicht aufgeführt. Dabei handelt es sich insbesondere um lokbespannte Regiozüge zwischen Romont und Freiburg, so wie um einen Triebwagen vom Typ RBe 4/4 zwischen Messstelle 06 und Messstelle 07.

4.4 Dokumentation der Ergebnisse der Basismessstellen 01 bis 35

Die folgenden Ausführungen fassen die Ergebnisse der Messungen für jede Messstelle hinsichtlich der Modellparameter zusammen. Im Anhang B werden die effektiven Rauheiten $L_{r,tot,i}$, die Gleis- und Fahrzeugtransferfunktionen $L_{HW,tr/veh,i}(f_i)$ und die Schallleistungspegel $L_{W,tot,i}$ pro Messstelle gezeigt.

Messstelle 01, Abbildungen B.1 bis B.7
<p>Effektive Rauheiten Bei der Bewertung der effektiven Rauheiten an den Bogenmessstellen müssen sowohl die Effekte der Bogenfahrt, als auch die tatsächlich vorhandene Schienenrauheit im Messquerschnitt berücksichtigt werden. Die gemessenen effektiven Rauheiten der bogenäusseren Schiene des Nordgleises sind für alle Fahrzeugkategorien nahezu identisch und entsprechen den gemessenen Schienenrauheiten. Effekte der Bogenfahrt sind hier nicht ersichtlich. Auf der bogeninneren Schiene ergibt sich eine Verteilung der effektiven Rauheiten, die den Radrauheiten der Fahrzeugtypen entspricht. Auch hier sind keine Effekte der Bogenfahrt ersichtlich. An der bogenäusseren Schiene des südlichen Gleises können auf Grund der niedrigen Schienenrauheit auch mögliche Einflüsse der Bogenfahrt abgeleitet werden. Die scheinbremsen IC2000 Fahrzeuge zeigen im langwelligen Bereich deutlich höhere Rauheitsamplituden, verglichen mit den Werten im geraden Gleis.</p> <p>Transferfunktionen Die Oberbautransferfunktionen beider Richtungsgleise werden von allen Fahrzeugkategorien mit geringer Streuung bestimmt. Bei den angetriebenen Fahrzeugen Re460 und den Triebwagen NPZ RBDs werden im mittleren Frequenzbereich etwas tiefere Oberbautransferfunktionen ermittelt. Abweichungen von der mittleren Transferfunktion im geraden Gleis treten bei Frequenzen über 3500 Hz auf, zurückzuführen auf die verwendeten Beschleunigungsaufnehmer an dieser Messstelle. [102] Auf dem südlichen Gleis werden für die IC2000 Fahrzeuge im tiefen Frequenzbereich niedrigere Oberbau- und Fahrzeugtransferfunktionen gemessen, zurückzuführen auf die höheren effektiven Rauheiten dieser Fahrzeuge.</p> <p>Emissionspegel Die Emissionspegel entsprechen den Ergebnissen der effektiven Rauheiten. Auf der bogenäusseren, nördlichen Gleisseite werden für alle Fahrzeuge hohe Emissionspegel gemessen, begründet durch die sehr hohe Schienenrauheit. Die Schallleistungspegel erreichen die gleichen Werte wie im geraden Gleis bei gleicher Schienenrauheitskategorie. Auf dem Nordgleis werden bei den GG-Klotz gebremsten, 4-achsigen Güterwagen niedrigere Emissionspegel als bei den 2-achsigen Fahrzeugen gemessen. Dies kann dadurch erklärt werden, dass nur die Güterwagen des Messzuges gemessen wurden und diese eine vergleichsweise niedrige Radrauheit aufweisen (vgl. Abbildung 4.2). Auf dem südlichen Gleis wurden auch regulär verkehrende 4-achsige Güterwagen gemessen, so dass hier eine grössere Datenbasis zur Verfügung steht. Hier liegen die Emissionswerte der 4-achsigen Fahrzeuge um bis zu 1.5 dB über den Werten der 2-achsigen Fahrzeuge. Die Emissionspegel am südlichen Gleis entsprechen den Werten im geraden Gleis. Bei den IC2000 Fahrzeugen werden bogenaussen um bis zu 2 dB höhere Emissionswerte gemessen die auf den Einfluss der Bogenfahrt zurückgeführt werden.</p>
Messstelle 02, Abbildungen B.8 bis B.14
<p>Effektive Rauheiten Auf der nördlichen Schiene des nördlichen Gleises werden für alle Fahrzeuge hohe effektive Rauheiten gemessen, begründet durch die hohe Schienenrauheit. Einflüsse der Bogenfahrt können daher nicht abgeschätzt werden. Dies gelingt jedoch auf dem südlichen Gleis mit niedriger Schienenrauheit. Auffällig sind die IC2000 Fahrzeuge, die im langwelligen Bereich sehr hohe Rauheitsamplituden aufweisen. Zwischen den 2- und 4-achsigen Güterwagen mit Y25 Drehgestellen werden ebenfalls deutliche Unterschiede in den Rauheitsamplituden gemessen, die im geraden Gleis nicht auftreten. Auf Grund des grösseren Achsabstandes der Einachsgüterwagen treten insbesondere bogenaussen höhere Werte auf.</p> <p>Transferfunktionen Die Oberbautransferfunktion des nördlichen Gleises weicht im oberen Frequenzbereich etwas von den Verläufen des geraden Gleises ab, am südlichen Gleis werden keine Abweichungen vom normalen Gleis gemessen. Bei den IC2000 und RIC Bpm Fahrzeugen liegen die Transferfunktionen bei niedrigen Frequenzen deutlich unterhalb der Ergebnisse der anderen Fahrzeuge, begründet durch die höheren effektiven Rauheiten.</p> <p>Emissionspegel Die Schallleistungspegel entsprechen den Verläufen der effektiven Rauheiten. Auf dem nördlichen Gleis werden auf Grund der höheren Schienenrauheit hohe Emissionspegel für alle Fahrzeugkategorien erreicht. Auf dem südlichen Gleis mit geringer Schienenrauheit werden bei einigen Fahrzeugkategorien deutlich höhere Emissionspegel im Vergleich zum geraden Gleis erreicht. Auffällig sind auch hier die IC2000 Fahrzeuge, die bogenaussen um bis zu 5 dB über den Werten der EWIV Fahrzeuge liegen. Ein signifikanter Unterschied zwischen den Fahrzeugsseiten (bogeninnen - bogenaussen) wird nur bei IC2000 Fahrzeugen festgestellt werden, dieser beträgt 2 dB. Auffällig niedrige Emissionspegel werden bei den nicht angetriebenen Steuerwagen der NPZ Züge gemessen, diese liegen noch deutlich unter den Werten der EWIV Fahrzeuge. Die Emissionswerte der Re460 und NiNa Fahrzeuge liegen um bis zu 1 dB über den Werten des geraden Gleises bei gleicher Schienenrauheit.</p>

⁶Beispiele für die Qualität der Bildaufzeichnung sind in Abbildung 6.8 zu finden.

Messstelle 03, Abbildungen B.15 bis B.18

Effektive Rauheiten Die effektiven Rauheiten entsprechen den Verläufen der gemessenen Schienenrauheiten und sind auf dem Südgleis etwas niedriger als auf dem Nordgleis. Auffällig ist die hohe Rauheit der Fahrzeugkategorie 01 und des NiNa Fahrzeuges auf dem Südgleis bei grossen Wellenlängen.

Transferfunktionen Die Oberbautransferfunktionen werden für beide Richtungsgleise von allen Fahrzeugkategorien mit geringer Streuung bestimmt. Sie entsprechen den bereits an Messstelle 01 und 02 ermittelten Verläufen für Stahl- und Betonschwellen.

Emissionspegel Die Schalleistungspegel liegen auf dem Nordgleis über den Werten des Südgleises, begründet durch die höhere Schienenrauheit. Bei scheibengebremsten Fahrzeugen werden die maximalen Emissionspegel bei 1000 Hz erreicht, dies entspricht für $v = 100 \text{ km/h}$ einer Wellenlänge von 2.8 cm. Bei dieser Wellenlänge wurde auch die maximale Schienenrauheit bestimmt. Die Emissionswerte der einzelnen Fahrzeugkategorien streuen auf beiden Gleisen nur gering. Auffällig sind jedoch 5 Messwerte des Fahrzeuges 560 020 der Fahrzeugkategorie 07 (NPZ RBD_e), die deutlich unterhalb der mittleren Emissionspegel dieser Kategorie liegen. Für Geschwindigkeiten von 100 km/h werden Emissionspegel um $L_{W, \text{tot}} = 112 \text{ dB}$ erreicht. Die indirekte Messung der Radrauheiten zeigt im Vergleich zu den anderen NPZ RBD_e Fahrzeugen deutlich niedrigere Amplituden (vgl. Abbildung 5.2).

Messstelle 04, Abbildungen B.19 bis B.22

Effektive Rauheiten Die effektiven Rauheiten entsprechen den Verläufen der gemessenen Schienenrauheiten. Die Schienenrauheiten des Nordgleises weisen von allen Messstellen die höchsten Amplituden auf. Daher weichen die effektiven Rauheiten aller Fahrzeugkategorien nur wenig voneinander ab. Die Radrauheiten der scheiben- und K-Klotz gebremsten Fahrzeuge haben kein Einfluss auf die Gesamtrauheit. Auf dem Südgleis werden bei entsprechend geringerer Schienenrauheit die Unterschiede der Fahrzeugtypen deutlich.

Transferfunktionen Die Gleistransferfunktionen werden für beide Richtungsgleise von allen Fahrzeugkategorien mit geringer Streuung bestimmt. Sie entsprechen den bereits ermittelten Verläufen für Stahl- und Betonschwellen. Es wird deutlich, dass die Transferfunktionen unabhängig von der Schienenrauheit sind. Die Transferfunktion für Stahlschwellen des nördlichen Gleises wird sowohl bei guter (MS 03) als auch bei sehr schlechter Schienenrauheit (MS 04) gleich bestimmt.

Emissionspegel Entsprechend der Schienenrauheiten liegen die Emissionswerte des Nordgleises für scheiben- und K-Klotz gebremste Fahrzeuge deutlich über den Werten des Südgleises. Die Pegel des Nordgleises sind für scheibengebremste Fahrzeuge um bis zu 6 dB höher als die des Südgleises. Dies entspricht der Änderung des Rauheitspegels $L_{\lambda, CA}$ von Nord- zu Südgleis (vgl. Tabelle 4.1).

Messstelle 05, Abbildungen B.23 bis B.25

Emissionspegel Die Emissionspegel der Weichenmessstelle werden getrennt für jede Mikrofonposition angegeben. Es wird daher unterschieden, ob sich das Mikrofon auf der Seite des Herzstückss (gap site) oder auf der gegenüberliegenden Seite (non-gap site) befindet. Auf beiden Seiten werden bei scheiben- und K-Klotz gebremsten Fahrzeugen deutlich höhere Emissionspegel im Vergleich zum ungestörten Gleis gemessen. Auf der Herzstückseite liegen diese um bis zu 5 dB über den Werten des ungestörten Gleises. Bei Fahrzeugen mit hoher Radrauheit, werden nur geringe Differenzen kleiner 1 dB erfasst, begründet durch das höhere Rollgeräusch im ungestörten Gleis.

Messstelle 06, Abbildungen B.26 bis B.29

Effektive Rauheiten Die effektiven Rauheiten entsprechen den Verläufen der gemessenen Schienenrauheiten. Die Schienenrauheiten des Nordgleises sind höher als die des Südgleises. Entsprechend werden für alle Fahrzeugtypen sehr hohe effektive Rauheiten auf dem Nordgleis gemessen. Die Radrauheiten der scheiben- und K-Klotz gebremsten Fahrzeuge haben keinen Einfluss auf die Gesamtrauheit. Auf dem südlichen Gleis werden auf Grund der sehr geringen Schienenrauheit deutliche Unterschiede in den effektiven Rauheiten gemessen. Die maximale Differenz der Rauheitsamplituden zwischen scheiben- und GG-Klotz gebremsten Fahrzeugen beträgt 15 – 20 dB. Dies entspricht auch der Differenz der Schalleistungsspektren beider Fahrzeugtypen von 104 dB bei scheiben- und 122 dB bei GG-Klotz gebremsten Fahrzeugen.

Transferfunktionen Die Gleistransferfunktionen werden von allen Fahrzeugkategorien mit geringer Streuung bestimmt.

Emissionspegel Die Emissionswerte des Nordgleises liegen für scheiben- und K-Klotz gebremste Fahrzeuge deutlich über den Werten des Südgleises. Die Angabe der Geschwindigkeitsabhängigkeit kann auf Grund der geringen Streuung der Messergebnisse nicht für alle Fahrzeugtypen erfolgen.

Messstelle 07, Abbildungen B.30 bis B.33

Emissionspegel Auf Grund eines Messtechnikfehlers liegen von dieser Messstelle nur eingeschränkt Messergebnisse vor. Die Berechnung von Rauheiten und Transferfunktionen ist nicht möglich. Die geringe Streuung der Geschwindigkeiten an dieser Messstelle und die verminderte Anzahl von Messergebnissen ermöglicht keine Berechnung der Geschwindigkeitsabhängigkeit. Auf Grund der hohen Schienenrauheiten liegen die Emissionswerte des Nordgleises für scheiben- und K-Klotz gebremste Fahrzeuge über den Werten des Südgleises.

Messstelle 08, Abbildungen B.34 bis B.37

Effektive Rauheiten Die effektiven Rauheiten entsprechen den Verläufen der gemessenen Schienenrauheiten. Deutlich sind die hohen Amplituden der GG-Klotz gebremsten Fahrzeuge im Wellenlängenbereich zwischen 8 und 1.6 cm zu erkennen. Bei 80 km/h entspricht dies einem Frequenzbereich zwischen 300 und 1400 Hz. In diesem Bereich werden auch die höchsten Emissionswerte gemessen. Ebenfalls sind die vergleichsweise hohen Rauheiten des NiNa Messzugs zu erkennen.

Transferfunktionen Die Gleistransferfunktionen beider Richtungsgleise werden von allen Fahrzeugkategorien über einen grossen Geschwindigkeitsbereich von 40 bis 140 km/h mit geringer Streuung bestimmt. Die Transferfunktion der B91 Schwellen entspricht den Verläufen der B70 Schwellen.

Emissionspegel Die Messwerte des Südgleises zeigen deutlich die Emissionsunterschiede zwischen den Fahrzeugkategorien. Die Pegeldifferenz zwischen scheiben- und K-Klotz gebremsten Fahrzeugen beträgt 5 dB. Zwischen K-Klotz und GG-Klotz gebremsten Fahrzeugen beträgt die Differenz 7 dB.

Messstelle 09, Abbildungen B.38 bis B.41
<p>Effektive Rauheiten Die effektiven Rauheiten des Nordgleises weisen für alle Fahrzeugtypen hohen Amplituden auf, was auf eine entsprechend hohe Schienenrauheit schliessen lässt. Dies kann durch die gemessene Schienenrauheit bestätigt werden. Auffällig ist jedoch der Wellenlängenbereich um 4 cm, hier liegt die Schienenrauheit über den Amplituden der effektiven Rauheit. Diese Ergebnisse können nicht erklärt werden. Die effektiven Rauheiten des Südgleises streuen entsprechend der Fahrzeugkategorien stärker. Hier ist auffällig, dass die effektiven Rauheiten deutlich oberhalb der gemessenen Schienenrauheiten liegen.</p> <p>Transferfunktionen Die Gleistransferfunktionen werden für beide Richtungsgleise von allen Fahrzeugkategorien mit geringer Streuung bestimmt und entsprechen den Ergebnissen der Messstelle 08.</p> <p>Emissionspegel Auf dem nördlichen Gleis werden bei niedrigen Geschwindigkeiten höhere Emissionspegel als auf dem südlichen Gleis gemessen. Dies kann durch die sehr hohen Amplituden der effektiven Rauheiten erklärt werden.</p>
Messstelle 11, Abbildungen B.42 bis B.43
<p>Emissionspegel Analog zu den Ergebnissen im ungestörten Gleis wird auch im Weichenbereich eine Abhängigkeit der Emissionspegel von der Vorbeifahrtgeschwindigkeit gemessen. Die Streuung der Ergebnisse ist im Vergleich zu den Basismessstellen deutlich geringer, begründet durch den dominierenden Einfluss der Herzstücklücke. Die Auswertung wurde analog zu den Basismessstellen für eine komplette Fahrzeuglänge durchgeführt, so dass der Emissionspegel sowohl das schlagartige Geräusch einer Achse am Herzstück, als auch das Rollgeräusch des umgebenden, ungestörten Gleises enthält. Dieser Rollgeräuschanteil hat, mit Ausnahme der GG-Klotz gebremsten Fahrzeuge, keinen signifikanten Einfluss auf den Gesamtemissionspegel. Für scheiben- und K-Klotz gebremste Fahrzeuge wird eine deutliche Zunahme der Emissionspegel gegenüber dem ungestörten Gleis gemessen.</p>
Messstelle 12, Abbildungen B.44 bis B.47
<p>Effektive Rauheiten Obwohl auf beiden Richtungsgleisen eine geringe Schienenrauheit gemessen worden ist, treten insbesondere im langwelligen Bereich sehr hohe effektive Gesamtrauheiten auf. Ein Einfluss der Radrauheiten bei scheiben- und K-Klotz gebremsten Fahrzeugen kann ausgeschlossen werden. Als möglicher Einflussfaktor kann die Steifigkeit des Oberbaus genannt werden. Der Oberbauzustand des nördlichen Gleises muss als extrem schlecht eingeschätzt werden, im näheren Umfeld des Messquerschnitts fehlten einige Schienenbefestigungen, es wurden keine Zwischenlagen verbaut und das Verlegedatum der Holzschwellen geht auf das Jahr 1976 zurück. Obwohl sich die TDRs an beiden Gleisen nicht unterscheiden, muss jedoch davon ausgegangen werden, dass sich die Oberbaueigenschaften im belasteten Zustand bei Zugüberfahrt ändern.</p> <p>Transferfunktionen Die Gleistransferfunktionen des Nordgleises zeigen einen ungewöhnlichen Verlauf bei höheren Frequenzen. Auf Grund der abweichenden Ergebnisse der effektiven Rauheiten, muss in diesem Bereich von einer fehlerhaften Bestimmung der Transferfunktionen ausgegangen werden.</p> <p>Emissionspegel Die Emissionspegel verhalten sich entsprechend den Ergebnissen der effektiven Gesamtrauheit. Der Vergleich beider Gleise zeigt, dass die Emissionspegel des südlichen Gleises im Mittel um 2 dB über den Werten des nördlichen Gleises liegen. Ein Grund dafür kann in dem abweichenden Schienenprofil gesehen werden. Auf Grund der grösseren Stegfläche der UIC60 Schienen kann von einer grösseren Schallabstrahlung ausgegangen werden (vgl. [87]).</p>
Messstelle 13, Abbildungen B.48 bis B.50
<p>Effektive Rauheiten Die effektiven Rauheiten entsprechen den Verläufen der gemessenen Schienenrauheiten. Deutlich ist die Amplitudenüberhöhung bei 2.5 cm infolge des Schienenschleifens zu erkennen. Allgemein ist die Schienenrauheit und damit die effektive Rauheit an dieser Messstelle sehr hoch.</p> <p>Transferfunktionen Die Transferfunktionen werden durch alle Fahrzeuge mit nur geringen Abweichungen bestimmt. Es gibt erwartungsgemäss keine signifikanten Unterschiede zwischen beiden Gleisen.</p> <p>Emissionspegel Die Emissionspegel verhalten sich entsprechend den Ergebnissen der effektiven Gesamtrauheit, es werden für alle Fahrzeuge sehr hohe Emissionswerte gemessen. Auf Grund der geringen Streuung der Geschwindigkeiten wird keine Geschwindigkeitsabhängigkeit angegeben. In der spektralen Darstellung werden die maximalen Emissionspegel bei einer Frequenz von 1600 Hz erreicht, dies entspricht bei einer Geschwindigkeit von 160 km/h einer Wellenlänge von 2.8 cm und stimmt mit der direkt gemessenen Schienenrauheit überein (vgl. Anhang ??).</p>
Messstelle 14, Abbildungen B.51 bis B.53
<p>Effektive Rauheiten Die effektiven Rauheiten entsprechen den Verläufen der gemessenen Schienenrauheiten. Die Überhöhung der Rauheitsamplituden von scheibengebremsten Fahrzeugen bei einer Wellenlänge um 4 cm kann durch die Schienenrauheit nicht erklärt werden. Die Streuung der Rauheiten pro Fahrzeugkategorie ist sehr gering.</p> <p>Transferfunktionen Die Transferfunktionen entsprechen den Ergebnissen der anderen Messstellen gleichen Oberbautyps. Auffallend sind die niedrigen Transferfunktionen der scheibengebremsten Fahrzeuge.</p> <p>Emissionspegel Die Emissionspegel verhalten sich entsprechend den Ergebnissen der effektiven Rauheiten, es werden sehr geringe Emissionswerte gemessen. Auf Grund der geringen Streuung der Geschwindigkeiten wird keine Geschwindigkeitsabhängigkeit angegeben. Die Emissionswerte der Güterwagen zeigen eine deutliche Streuung innerhalb eines Zugverbandes. Diese kann bis zu 10 dB betragen. Auffällig sind auch die hohen Emissionswerte eines Güterzuges mit Kesselwagen mit $v = 79 \text{ km/h}$. Die hohen Emissionspegel können nicht auf unterschiedliche Radrauheiten zurückgeführt werden. Auf die unterschiedlichen Emissionspegel in Abhängigkeit von der Güterwagenbauart wird in Abschnitt 4.6.2.8 eingegangen.</p>
Messstelle 15, Abbildungen B.54 bis B.56
<p>Effektive Rauheiten Die effektiven Rauheiten entsprechen den Verläufen der gemessenen Schienenrauheiten. Die Rauheiten des südlichen Gleises sind geringer, dies hat Auswirkungen auf die Emissionspegel.</p> <p>Transferfunktionen Die Transferfunktionen werden mit nur geringen Abweichungen bestimmt, es gibt keine signifikanten Unterschiede zwischen beiden Gleisen.</p> <p>Emissionspegel Die Emissionspegel verhalten sich entsprechend den Ergebnissen der effektiven Gesamtrauheit, es werden auf dem Nordgleis höhere Emissionswerte als auf dem Südgleis gemessen. Auf Grund der geringen Streuung der Geschwindigkeiten wird keine Geschwindigkeitsabhängigkeit angegeben.</p>

Messstelle 33, Abbildungen B.57 bis B.60

Effektive Rauheiten Die effektiven Rauheiten des Nordgleises werden durch die hohe Schienenrauheit dominiert, vor allem bei der Wellenlänge $\lambda = 2.5$ cm. Auf dem südlichen Gleis ist bei den Zügen mit 200 km/h eine Pegelüberhöhung bei 5 cm zu erkennen, die nicht im Spektrum der Schienenrauheit auftritt. Zudem nimmt die Rauheit für Wellenlängen kleiner 3.2 cm wieder zu, ein Effekt der an anderen Messstellen nicht gemessen wurde. Eine mögliche Fehlerquelle können fehlerhafte Beschleunigungssignale durch Übersteuerungen im höheren Frequenzbereich sein. [102]

Transferfunktionen Die Transferfunktionen werden auf beiden Gleisen mit nur geringen Abweichungen bestimmt, weisen jedoch für Frequenzen über 2000 Hz untypische Verläufe auf. Diese können auf die effektiven Rauheiten zurückgeführt werden, die bei kleinen Wellenlängen untypisch hohe Amplituden aufweisen.

Emissionspegel Die Emissionspegel verhalten sich entsprechend den Ergebnissen der effektiven Gesamtrauheit. Auf Grund der geringen Streuung der Geschwindigkeiten wird keine Geschwindigkeitsabhängigkeit angegeben. Die Streuung der Emissionswerte in einem Geschwindigkeitsbereich ist gering. Die Emissionswerte des nördlichen Gleises sind auf Grund der höheren Schienenrauheit grösser als die des Südgleises. Die spektrale Darstellung der Emissionspegel zeigt bei den scheinbremsen Fahrzeugen ein deutliches Maximum zwischen 1600 und 2000 Hz bei 200 km/h.

Messstelle 34, Abbildungen B.61 bis B.62

Effektive Rauheiten Die effektiven Rauheiten entsprechen den Verläufen der gemessenen Schienenrauheiten. Eine Überhöhung der Amplituden der effektiven Rauheiten bei einer Wellenlänge um 4 cm kann wie bei Messstelle 14 durch die Schienenrauheit nicht erklärt werden.

Transferfunktionen Die Transferfunktionen werden bei allen Fahrzeugen mit nur geringen Abweichungen bestimmt. Auffallend sind die sehr niedrigen Transferfunktionen im unteren Frequenzbereich der Fahrzeugkategorie 02. Dies kann durch die sehr hohen effektiven Rauheiten bei langen Wellenlängen erklärt werden. Wie bei Messstelle 33 werden die Transferfunktionen oberhalb einer Frequenz von 2000 Hz zu niedrig berechnet, begründet durch die Zunahme der effektiven Rauheiten bei kurzen Wellenlängen.

Emissionspegel Die Emissionspegel verhalten sich entsprechend den Ergebnissen der effektiven Gesamtrauheit, es werden sehr geringe Emissionswerte gemessen. Für die Fahrzeugkategorien mit genügend grosser Geschwindigkeitsstreuung ist die Abhängigkeit der Emissionspegel von der Geschwindigkeit angegeben. Die Emissionswerte der Güterwagen streuen sehr stark (vgl. Abschnitt 4.6.2.8).

Messstelle 35, Abbildungen B.63 bis B.66

Effektive Rauheiten Die effektiven Rauheiten entsprechen den Verläufen der gemessenen Schienenrauheiten. Eindeutig ist der Einfluss der Radrauheiten der GG-Klotz gebremsten Fahrzeuge auf die effektive Rauheit zu erkennen. Trotz der hohen Geschwindigkeit der Personenzüge von 200 km/h können die effektiven Rauheiten mit hoher Genauigkeit bestimmt werden.

Transferfunktionen Die Transferfunktionen beider Gleise weisen auf Grund der gleichen Oberbautypen keine signifikanten Unterschiede auf. Die Verläufe entsprechen den Ergebnissen der anderen Messstellen. Die Fahrzeugtransferfunktionen der Personenwagen mit hoher Geschwindigkeit zeigen im unteren Frequenzbereich deutliche Abweichungen. Hier können Einflüsse von aerodynamischen Sekundärquellen nicht ausgeschlossen werden.

Emissionspegel Die Emissionspegel verhalten sich entsprechend den Ergebnissen der effektiven Gesamtrauheit. Die Streuung der Emissionswerte in einem Geschwindigkeitsbereich ist gering. Die Emissionswerte des nördlichen Gleises sind auf Grund der höheren Schienenrauheit grösser als die des Südgleises. Die Werte der ICN Züge liegen entsprechend dem Antriebskonzept zwischen den Emissionswerten der Personenzüge und den Triebfahrzeugen der Kategorie 01. Die spektrale Darstellung der Emissionspegel zeigt bei den scheinbremsen Fahrzeugen ein deutliches Maximum zwischen 1600 und 2000 Hz bei 200 km/h. Dies kann auf das Rauheitsmaximum bei $\lambda = 2.5$ cm zurückgeführt werden.

4.5 Zusammenfassung der Ergebnisse der Basismessstellen

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Emissionsmessungen zusammengefasst dargestellt und dokumentiert. Betrachtet werden die Messergebnisse der:

1. Effektiven Gesamtrauheiten (Abbildungen 4.8),
2. Radrauheiten (Abbildung 4.13),
3. Oberbau- und Fahrzeugtransferfunktionen (Abbildungen 4.14, 4.15),
4. Schallleistungs- und Schalldruckpegel in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit⁷ (Abbildungen 4.9 bis 4.12).

Im Folgenden werden die untersuchten Fahrzeugkategorien hinsichtlich der gemessenen Rauheiten und Emissionspegel charakterisiert.

⁷Die Messwerte werden mit der Methode nichtlinearer kleinster Quadrate angenähert. Die Gleichung (2.12) wird als linearisierte Ansatzfunktion $\tilde{g}(x, \bar{\alpha})$ vorgegeben [103]:

$$\sum_{\nu=1}^N [y_{\nu} - \tilde{g}(x_{\nu}, \bar{\alpha})]^2 = \min!$$

Die wesentliche Anforderung des Verfahrens sind normalverteilte Messsignale, da Ausreisser y_{ν} die Ergebniskurve stark beeinflussen. Zur Lösung der Ansatzfunktion wird der Levenberg-Marquardt-Algorithmus verwendet.

Scheibengebremste Fahrzeuge der Kategorien 05 und 08
<p>Effektive Rauheiten Die effektive Rauheit bei scheibengebremsten Fahrzeugen ist stark von der Schienenrauheit abhängig. Entsprechend der unterschiedlichen Schienenrauheiten werden grosse Unterschiede in den Amplituden der effektiven Rauheiten gemessen, Abbildung 4.8. Für eine genaue Modellrechnung ist daher die Kenntnis der Schienenrauheit von entscheidender Bedeutung.</p> <p>Emissionspegel Entsprechend den Ergebnissen der effektiven Rauheiten sind die Emissionspegel stark von der Schienenrauheit abhängig, Abbildung 4.9. Bei Geschwindigkeiten ab 160 km/h nehmen insbesondere bei vorausfahrenden Steuerwagen die aerodynamischen Geräuschanteile zu (vgl. Abschnitt 4.6.2.5). Die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Emissionswerte bei hohen Schienenrauheiten ist weniger stark ausgeprägt, d.h. die Steigung des $\lg v$-Verlaufs ist niedriger, begründet durch die nahezu konstanten Rauheitsamplituden bei langen Wellenlängen (vgl. Abbildung 4.1). Eine Änderung der Geschwindigkeit führt in diesen Bereichen nur zu geringen Änderungen in den Rauheitsamplituden.</p>
K-Klotz gebremste Fahrzeuge der Kategorien 06 und 10
<p>Effektive Rauheiten Analog zu den scheibengebremsten Fahrzeugen ist in Abbildung 4.8 eine Abhängigkeit der effektiven Rauheit von der Schienenrauheit zu erkennen, so dass auch hier eine Differenzierung nach Schienenrauheitskategorien erfolgt. Zwischen K-Klotz gebremsten Personen- und Güterwagen werden keine signifikanten Unterschiede in den Rauheitswerten gemessen.</p> <p>Emissionspegel Die Streuung der Emissionswerte von K-Klotz gebremsten Güterwagen innerhalb eines Zugverbandes kann bis zu 10 dB betragen. Eine ähnliche Streuung wird auch bei GG-Klotz gebremsten Fahrzeugen festgestellt. Es wird daher von einem Einfluss sekundärer Geräuschquellen ausgegangen.</p>
GG-Klotz gebremste Fahrzeuge der Kategorie 09
<p>Effektive Rauheiten In dieser Kategorie werden ausschliesslich GG-Klotz gebremste Güterwagen dargestellt. Der dominierende Einfluss der Radrauheiten führt an allen Messstellen, unabhängig von der Schienenrauheit, zu ähnlich hohen Emissionswerten, Abbildung 4.8. Im mittleren Wellenlängenbereich werden die höchsten Rauheitsamplituden gemessen, bei langen Wellenlängen ist die Rauheit nahezu konstant bei hohen Amplituden (vgl. Abbildung 4.2).</p> <p>Emissionspegel Im Vergleich zu den anderen Fahrzeugkategorien werden bei den GG-Klotz gebremsten Fahrzeugen die höchsten Emissionswerte gemessen. Die Emissionspegel sind unabhängig von der Rauheitskategorie der Schiene, so dass pro Oberbautyp nur eine Geschwindigkeitsabhängigkeit angegeben wird. Die Streuung der Emissionswerte innerhalb eines Zugverbandes kann analog zu den K-Klotz gebremsten Fahrzeugen bis zu 10 dB betragen. Diese Streuung wird nicht durch unterschiedliche Radrauheiten hervorgerufen. Die Emissionswerte von 2- und 4-achsigen Fahrzeugen unterscheiden sich zwischen 2 und 2.5 dB(A).</p>
Moderne Triebfahrzeuge der Kategorie 01
<p>Effektive Rauheiten Dargestellt sind die effektiven Rauheiten der Fahrzeuge Re460, 465, 481-485 sowie von ICE-Triebköpfen. Überwiegend wurden Re460 Fahrzeuge mit Klotzbremsten aus Sintermetal erfasst. Die effektiven Rauheiten dieser Fahrzeuge liegen daher über den Rauheitswerten von ICE Triebköpfen und Re480-485 Fahrzeugen.</p> <p>Emissionspegel Die Emissionswerte können über einen grossen Geschwindigkeitsbereich zwischen 50 und 200 km/h dargestellt werden. Bei ausgeprägten Sekundärquellen können deutlich höhere Emissionswerte gemessen werden. Im hohen Geschwindigkeitsbereich ab 160 km/h nimmt der Anteil aerodynamischer Geräuschquellen am Gesamtgeräusch zu.</p>
Ältere Triebfahrzeuge der Kategorie 02
<p>Effektive Rauheiten In dieser Kategorie sind die GG-Klotz gebremsten Fahrzeuge des Typs Re420, 620 und Ae610 zusammengefasst. Die effektiven Rauheiten weisen hohe Pegel auf, die Abhängigkeit von der Schienenrauheit ist sehr gering.</p> <p>Emissionspegel Die Emissionspegel werden von Radrauheiten und sekundären Quellen des Antriebs dominiert. Für Betriebszustände mit ausgeprägten Sekundärquellen werden deutlich höhere Emissionspegel gemessen.</p>
ICN Triebzüge der Kategorie 03
<p>Effektive Rauheiten Analog zu den scheibengebremsten Fahrzeugen ist eine Abhängigkeit der effektiven Rauheiten von den Schienenrauheiten zu erkennen. Auf Grund der Datenlage werden die Rauheiten in Abbildung 4.8 nur für zwei Schienenrauheitskategorien angegeben.</p> <p>Emissionspegel Die gemessenen Emissionswerte ordnen sich zwischen den Werten der scheibengebremsten Fahrzeuge und denen der Fahrzeugkategorie 01 ein. Dies kann durch die verteilte Antriebstechnik erklärt werden. Für die angetriebenen Fahrzeuge innerhalb eines Zugverbandes werden zusätzliche Sekundärquellen des Antriebs gemessen. Bei Geschwindigkeiten über 160 km/h nimmt der Einfluss aerodynamischer Geräuschquellen zu.</p>
NiNa Triebzüge der Kategorie 04
<p>Effektive Rauheiten Bei den NiNa Fahrzeugen werden deutliche Unterschiede in den Rauheiten zwischen angetriebenen und nicht angetriebenen Achsen gemessen (vgl. Abschnitt 5.1.3.2). Die Rauheiten der angetriebenen Endwagen entsprechen den Werten von scheibengebremsten Fahrzeugen. An den Rädern der nicht angetriebenen Achsen (ebenfalls scheibengebremst) werden bei längeren Wellenlängen deutlich höhere Rauheitspegel gemessen. Dies deutet auf unrunde Räder bzw. auf Räder mit Flachstellen hin.</p> <p>Emissionspegel Entsprechend der unterschiedlichen Radrauheiten können zwischen End- und Mittelwagen bis zu 4 dB Pegelunterschied in den Emissionswerten gemessen werden, wobei die angetriebenen Endwagen die niedrigeren Emissionswerte aufweisen.</p>
NPZ Triebwagen der Kategorie 07
<p>Effektive Rauheiten Für diese Fahrzeuge werden hohe effektive Rauheiten gemessen. Dies ist dadurch begründet, dass die NPZ Triebwagen mit Putzklotzen aus Sintermaterial ausgerüstet sind die das Adhäsionsverhalten der Fahrzeuge verbessern sollen [104].</p> <p>Emissionspegel Im unteren Geschwindigkeitsbereich wird das Emissionsverhalten durch sekundäre Antriebs- und Aggregatgeräusche beeinflusst. Auf Grund der hohen Radrauheiten dominiert das Rollgeräusch bei zunehmender Geschwindigkeit. Die Emissionswerte liegen deutlich über den Werten der Re460 Fahrzeuge.</p>
RoLa Fahrzeuge der Kategorie 11
<p>Effektive Rauheiten Die effektiven Rauheiten sind abhängig von der Schienenrauheit. Die Werte liegen geringfügig über den Rauheitswerten von scheibengebremsten Fahrzeugen. Die Streuung der Radrauheiten innerhalb eines Zugverbandes ist sehr gering.</p> <p>Emissionspegel Die Emissionswerte der RoLa Fahrzeuge sind abhängig von der Schienenrauheit und liegen zwischen denen der scheiben- und der K-Klotz gebremsten Fahrzeuge.</p>

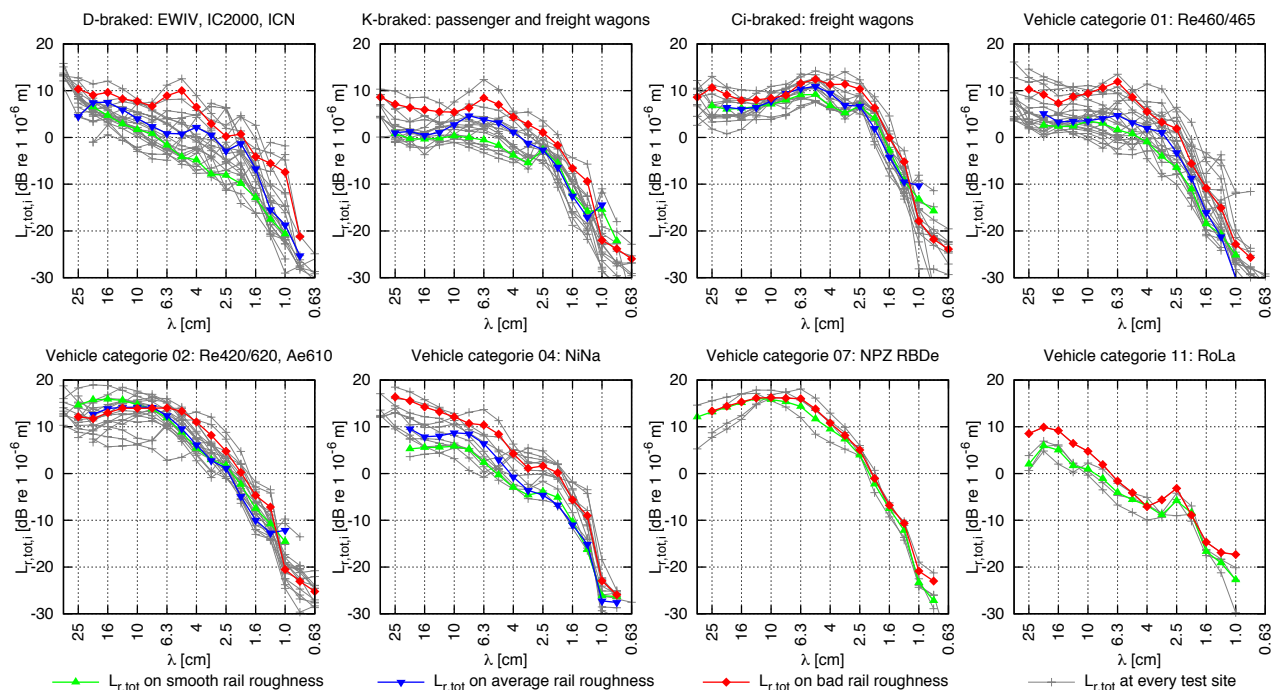


Abbildung 4.8: Effektive Rauheiten der untersuchten Fahrzeugkategorien unterteilt nach drei Schienenrauheitskategorien

4.5.1 Vergleich der Radrauheiten

Durch die Messung der effektiven Gesamtrauheiten $L_{r,tot,i}$ und der Schienenrauheiten $L_{r,tr,i}$ können die Radrauheiten $L_{r,veh,i}$ bei Zugüberfahrten ermittelt werden.⁸ Die Ergebnisse der indirekten Radrauheitsmessungen sind in Abbildung 4.13 für jede Fahrzeugkategorie dargestellt. Der Vergleich der Rad- und Schienenrauheiten zeigt, dass die Rauheiten von scheibengebremsten Rädern im Bereich der niedrigsten Schienenrauheitskategorie "smooth" liegen. Bei den K-Klotz gebremsten Fahrzeugen werden im mittleren Wellenlängenbereich im Vergleich zu den scheibengebremsten Fahrzeugen höhere Rauheitswerte gemessen. Dieser Unterschied von 5 bis 6 dB in den Rauheitsamplituden kann auch in den Emissionspegeln beider Fahrzeugkategorien gemessen werden (vgl. Abbildung 4.9). Die Radrauheiten der GG-Klotz gebremsten Fahrzeuge liegen im gesamten Wellenlängenbereich deutlich über den Werten der scheiben- und K-Klotz gebremsten Fahrzeuge, sowie über den Werten der Schienenrauheiten.

Bei den NiNa Fahrzeugen werden bei den Achsen der Mittelwagen im langwelligen Bereich sehr hohe Radrauheiten gemessen, dies deutet auf unrunde Räder bzw. Flachstellen hin. Die NPZ RBDe Fahrzeuge weisen durch den Einsatz von Putzklötzen sehr hohe Radrauheiten auf. Die GG-Klotz gebremsten Fahrzeuge der Kategorie 02 weisen ähnliche Rauheitsspektren auf. Bei den RoLa Fahrzeugen werden analog zu den scheibengebremsten Fahrzeugen niedrige Radrauheiten gemessen. Die Radrauheiten der Re460 Fahrzeuge liegen auf Grund der Klotzbremsen aus Sintermetal über den Werten der scheibengebremsten Fahrzeuge.

4.5.2 Vergleich der Transferfunktionen

4.5.2.1 Fahrzeugtransferfunktionen

Für die Berechnung des Rollgeräusches in der Quellenhöhe 0.5 m müssen die Fahrzeugtransferfunktionen bekannt sein. Diese sind in Abbildung 4.14 für ausgesuchte Fahrzeugkategorien an Messstellen mit unterschiedlichen Oberbautypen, Schienenrauheiten und Geschwindigkeiten dargestellt. Die Fahrzeugtransferfunktionen der EWIV und IC2000 Fahrzeuge unterscheiden sich nicht signifikant und werden an allen Messstellen mit nur geringen Abweichungen bestimmt. Die Transferfunktionen der Güterwagenräder (mit ebenfalls 920 mm Raddurchmesser) liegen im gesamten Frequenzspektrum um etwa 2 dB über den Werten der Transferfunktionen der Personenwagen. Eine mögliche Ursache kann in der veränderten Radbauform von Güterwagenrädern vermutet werden. Bei Fahrzeugen mit kleinen Raddurchmessern (RoLa) werden deutlich niedrigere Transferfunktionen gemessen. Dieses Ergebnis verdeutlicht zudem die Gültigkeit

⁸Für die Bestimmung der Radrauheiten von GG-gebremsten Fahrzeugen können die Ergebnisse aller Messstellen verwendet werden. Für scheiben- und K-Klotz gebremste Fahrzeuge dürfen nur die Messstellen mit einer niedrigen Schienenrauheit in der Auswertung berücksichtigt werden.

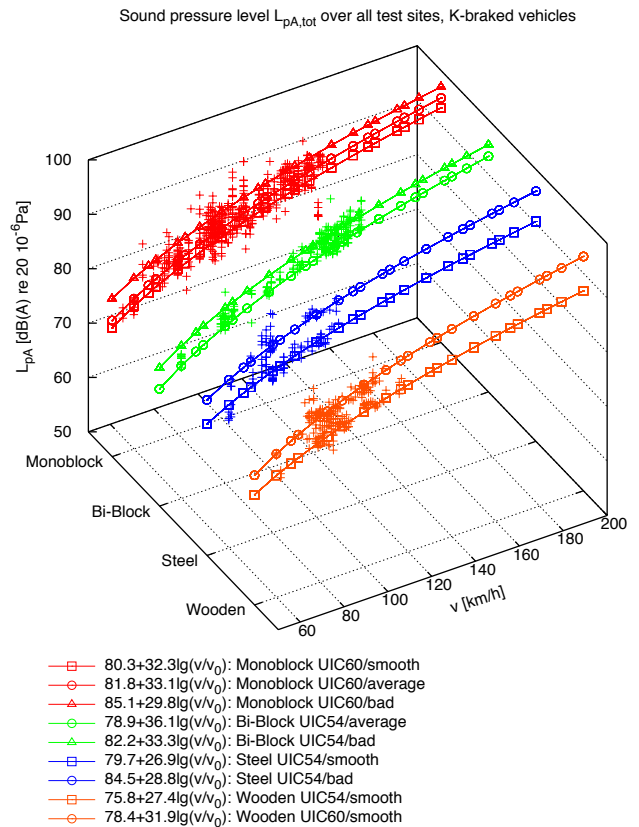
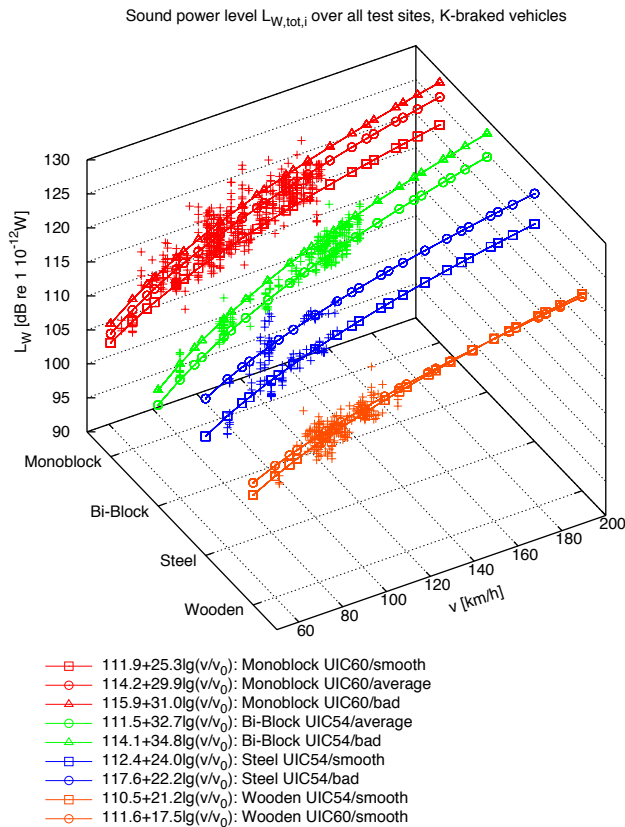
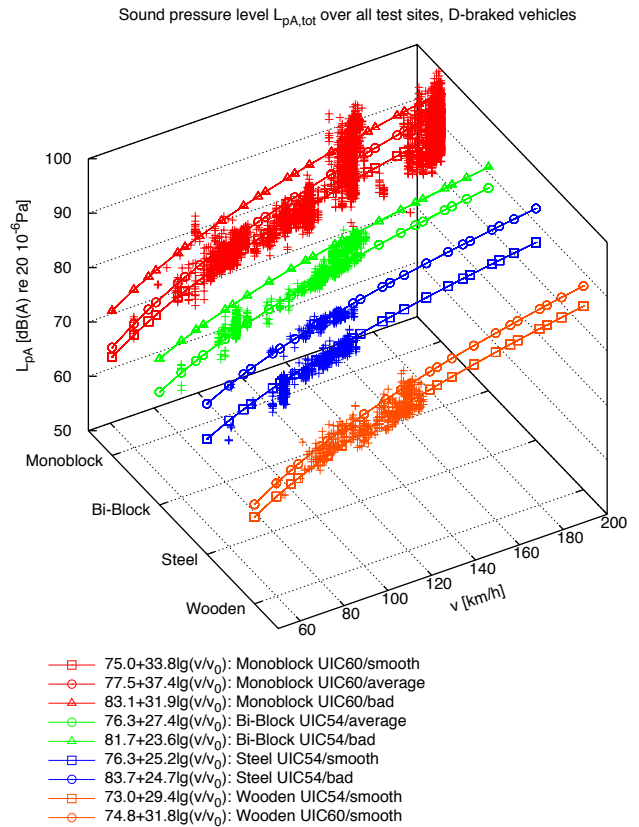
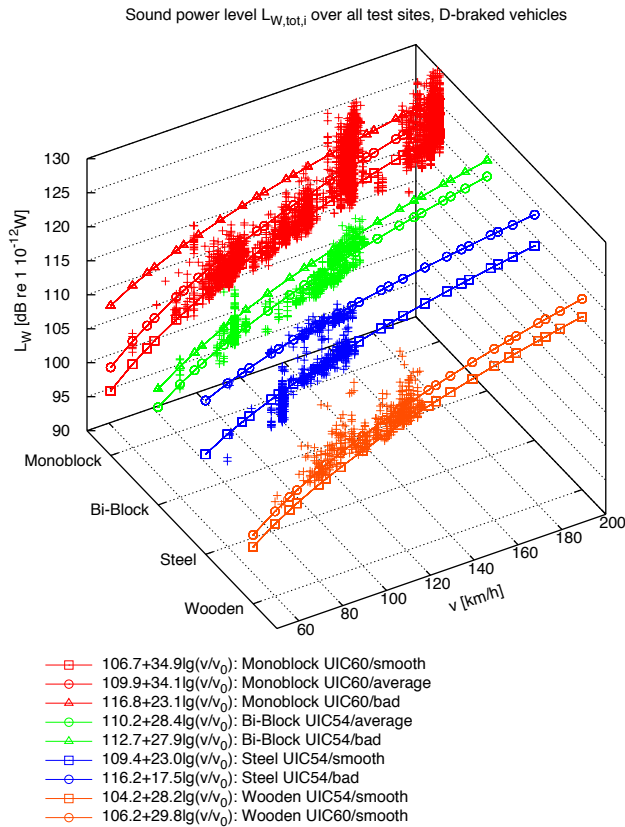
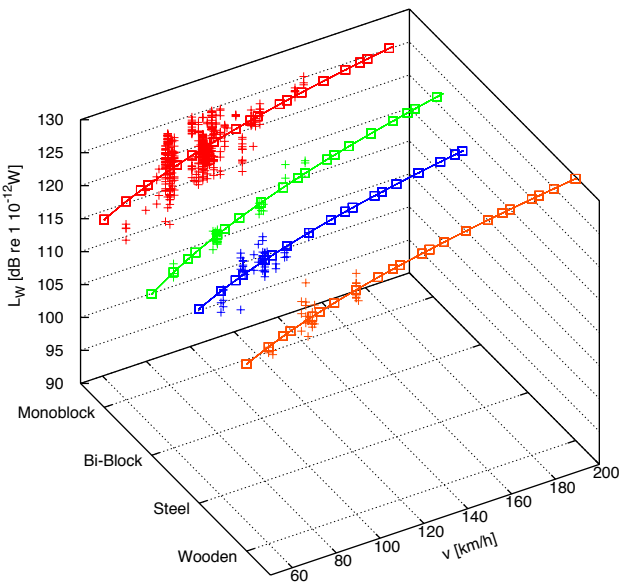


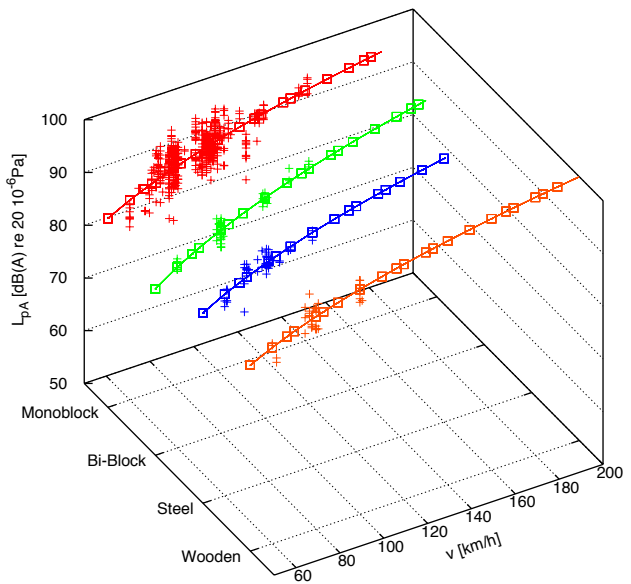
Abbildung 4.9: Schalleistungspegel $L_{W,tot}$ und Schalldruckpegel $L_{pA,tot}$ in Abhängigkeit von Geschwindigkeit, Schienenrauhigkeit und Oberbautyp der untersuchten Fahrzeugtypen, gemittelt über alle Messstellen

Sound power level $L_{W,tot,i}$ over all test sites, Ci-braked vehicles



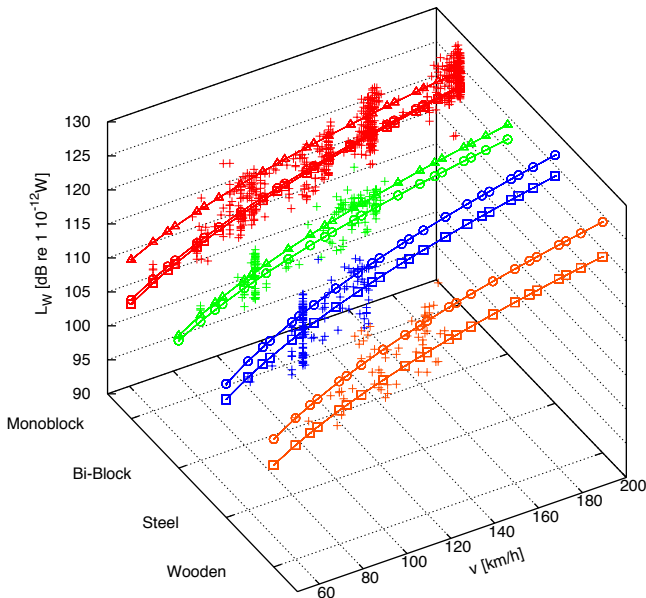
- +— 122.7+20.6lg(v/v₀): Monoblock UIC60
- +— 120.1+27.5lg(v/v₀): Bi-Block UIC54
- +— 123.5+19.8lg(v/v₀): Steel UIC54
- +— 122.2+18.8lg(v/v₀): Wooden UIC54

Sound pressure level $L_{pA,tot}$ over all test sites, Ci-braked vehicles



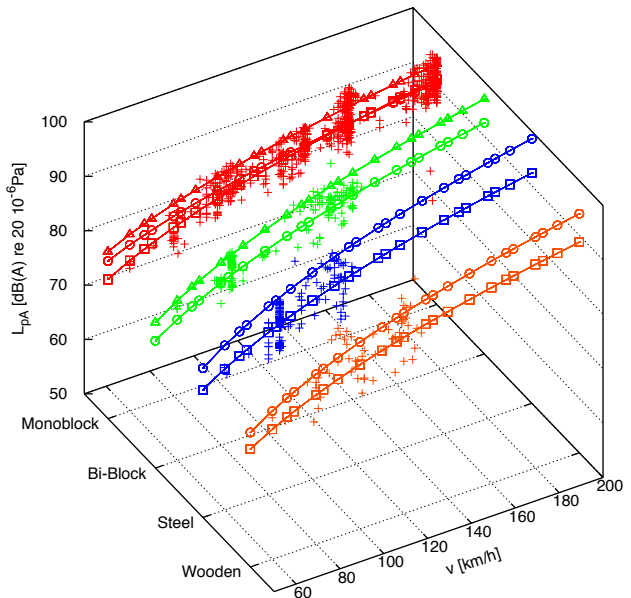
- +— 91.1+26.1lg(v/v₀): Monoblock UIC60
- +— 90.5+34.2lg(v/v₀): Bi-Block UIC54
- +— 91.7+27.5lg(v/v₀): Steel UIC54
- +— 90.3+24.5lg(v/v₀): Wooden UIC54

Sound power level $L_{W,tot,i}$ over all test sites, Vehicle categorie 01



- +— 111.9+25.0lg(v/v₀): Monoblock UIC60/smooth
- +— 112.4+24.3lg(v/v₀): Monoblock UIC60/average
- +— 117.1+18.2lg(v/v₀): Monoblock UIC60/bad
- +— 113.1+21.2lg(v/v₀): Bi-Block UIC54/average
- +— 114.3+23.6lg(v/v₀): Bi-Block UIC54/bad
- +— 112.8+26.6lg(v/v₀): Steel UIC54/smooth
- +— 115.4+27.9lg(v/v₀): Steel UIC54/bad
- +— 109.7+23.0lg(v/v₀): Wooden UIC54/smooth
- +— 113.9+25.2lg(v/v₀): Wooden UIC60/smooth

Sound pressure level $L_{pA,tot}$ over all test sites, Vehicle categorie 01



- +— 80.9+26.1lg(v/v₀): Monoblock UIC60/smooth
- +— 83.0+19.5lg(v/v₀): Monoblock UIC60/average
- +— 85.3+22.4lg(v/v₀): Monoblock UIC60/bad
- +— 79.9+31.7lg(v/v₀): Bi-Block UIC54/average
- +— 83.6+33.3lg(v/v₀): Bi-Block UIC54/bad
- +— 79.8+31.4lg(v/v₀): Steel UIC54/smooth
- +— 85.6+35.2lg(v/v₀): Steel UIC54/bad
- +— 77.4+28.3lg(v/v₀): Wooden UIC54/smooth
- +— 81.2+31.9lg(v/v₀): Wooden UIC60/smooth

Abbildung 4.10: Schalleistungspegel $L_{W,tot}$ und Schalldruckpegel $L_{pA,tot}$ in Abhängigkeit von Geschwindigkeit, Schienenrauhheit und Oberbautyp der untersuchten Fahrzeugtypen, gemittelt über alle Messstellen

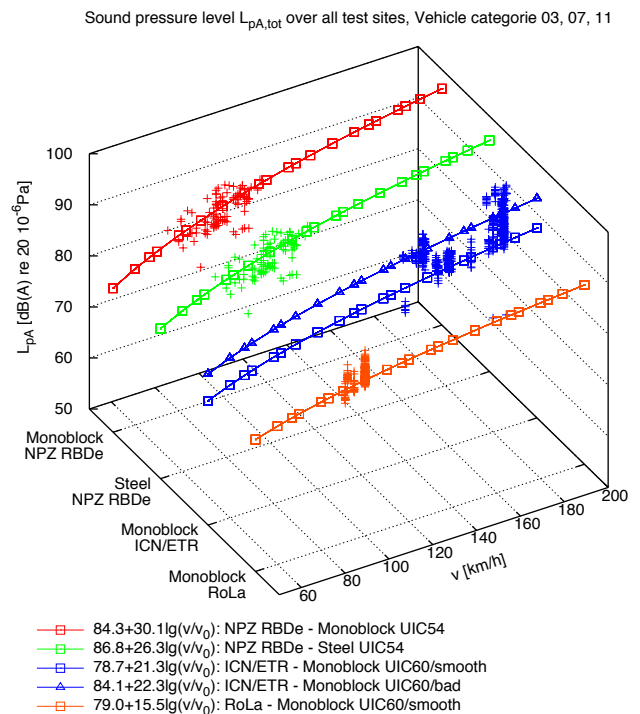
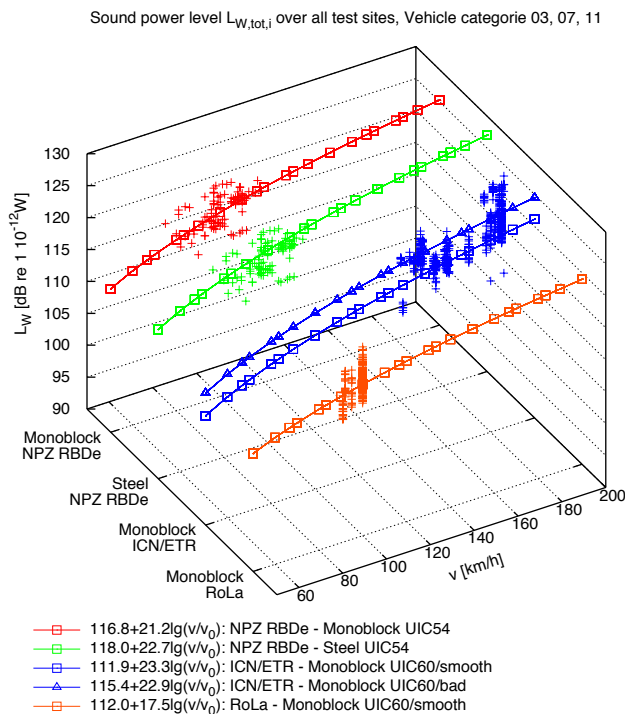
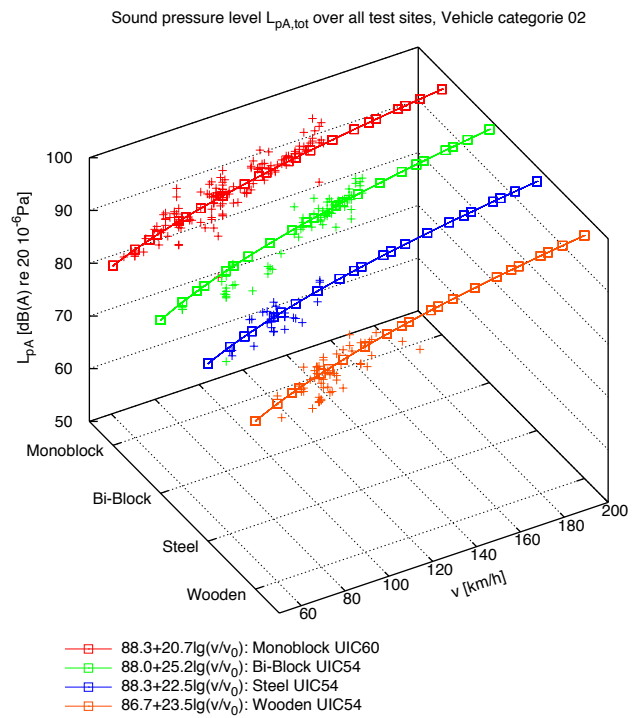
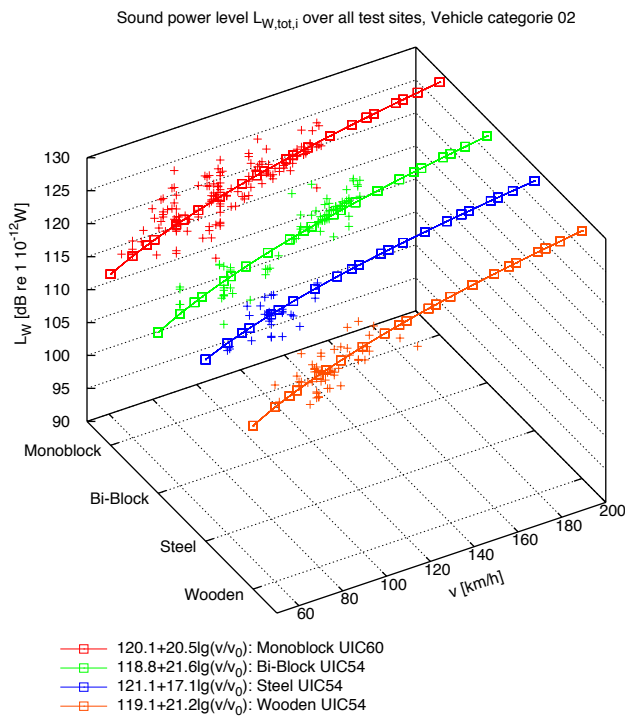
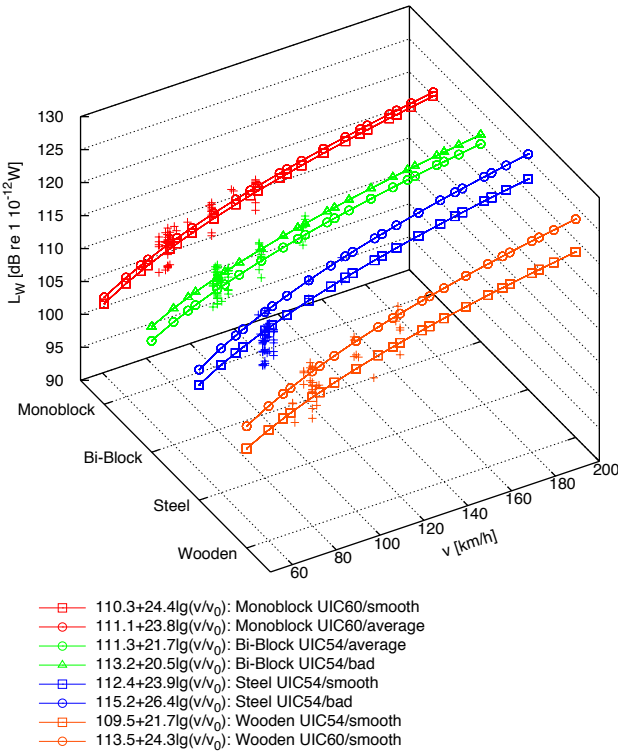


Abbildung 4.11: Schalleistungspegel $L_{W,tot}$ und Schalldruckpegel $L_{pA,tot}$ in Abhängigkeit von Geschwindigkeit, Schienenrauhheit und Oberbautyp der untersuchten Fahrzeugtypen, gemittelt über alle Messstellen

Sound power level $L_{W,tot,i}$ over all test sites, Vehicle categorie 04



Sound pressure level $L_{pA,tot}$ over all test sites, Vehicle categorie 04

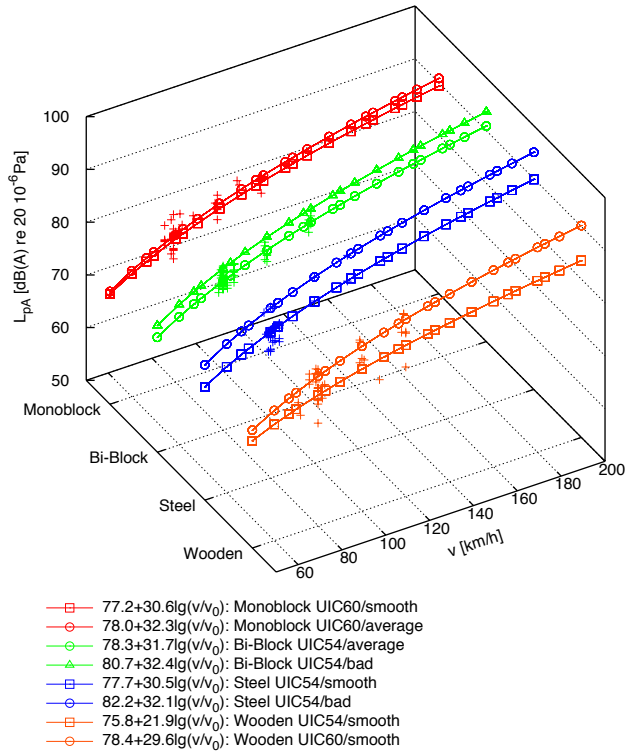
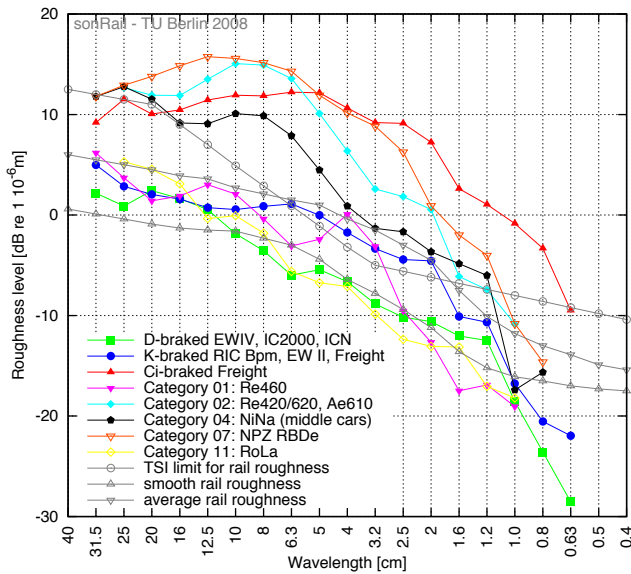


Abbildung 4.12: Schallleistungspegel $L_{W,tot}$ und Schalldruckpegel $L_{pA,tot}$ in Abhängigkeit von Geschwindigkeit, Schienenrauhheit und Oberbautyp der untersuchten Fahrzeugtypen, gemittelt über alle Messstellen

Indirect measured wheel roughness from all vehicle categories



Vehicle transfer function $L_{HW,veh,i}$

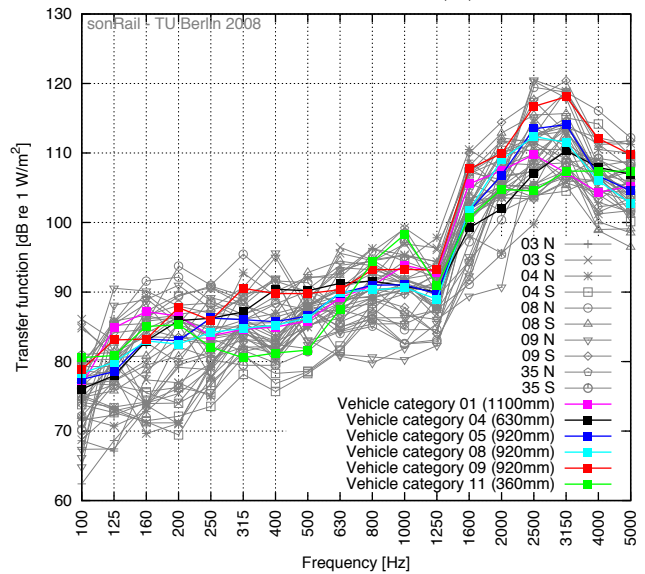


Abbildung 4.13: Gemittelte Radrauhheiten der ausgewerteten Fahrzeuge je Fahrzeugkategorie, sowie TSI Grenzwertkurve für Schienenrauhheiten und Schienenrauhheiten der Rauheitskategorien "smooth" und "average"

Abbildung 4.14: Vergleich ausgewählter Fahrzeugtransferfunktionen an unterschiedlichen Messstellen

der angewandten Referenzmethode zur Rollgeräuschtrennung, die Schallanteile der RoLa Fahrzeuge sind gegenüber denen des Oberbaus gering.

Bei allen Fahrzeugen ist eine Zunahme der Streuung der Messergebnisse zu tiefen Frequenzen hin erkennbar, dies wird durch die Ergebnisse von Messungen in [93] bestätigt und kann durch mögliche Sekundärquellen verursacht werden.

4.5.2.2 Oberbautransferfunktionen

Zur Berechnung der Rollgeräuschanteile von unterschiedlichen Oberbautypen müssen deren Transferfunktionen bekannt sein. In Abbildung 4.15 sind diese von allen Messstellen zusammengefasst dargestellt. Pro Oberbautyp wird eine mittlere Transferfunktion angegeben, die das akustische Abstrahlverhalten beschreibt. Die Transferfunktionen von Beton Monoblockschwellen wurden an acht unterschiedlichen Messstellen gemessen. Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Übereinstimmung, zwischen den Schwellentypen B70 und B91 werden keine Unterschiede im Abstrahlverhalten festgestellt. Abweichungen bei tiefen Frequenzen werden zwischen den Messstellen 08 und 09 an der Messstrecke Lausanne-Freiburg und den Messstellen der NBS festgestellt. Dieses Verhalten wird auf die sehr hohe Oberbauteifigkeit der NBS zurückgeführt.⁹

Die Transferfunktionen des Bi-Blockschwellenoberbaus liefern im Bereich zwischen 400 und 1000 Hz niedrige Werte (vgl. TDR in Abbildung 4.7). Dieses Ergebnis stimmt mit den in [2] vorgestellten TWINS Berechnungen überein. Die Transferfunktionen für Stahlschwellenoberbau streuen zwischen den Messstellen nur gering und weisen im gesamten Frequenzbereich die höchsten Werte auf. Begründet wird dies durch die niedrigen Track Decay Rates an den Messstellen (vgl. 4.7). Die Transferfunktionen des Holzschwellenoberbaus liefern für Frequenzen unterhalb 500 Hz die niedrigsten Werte.

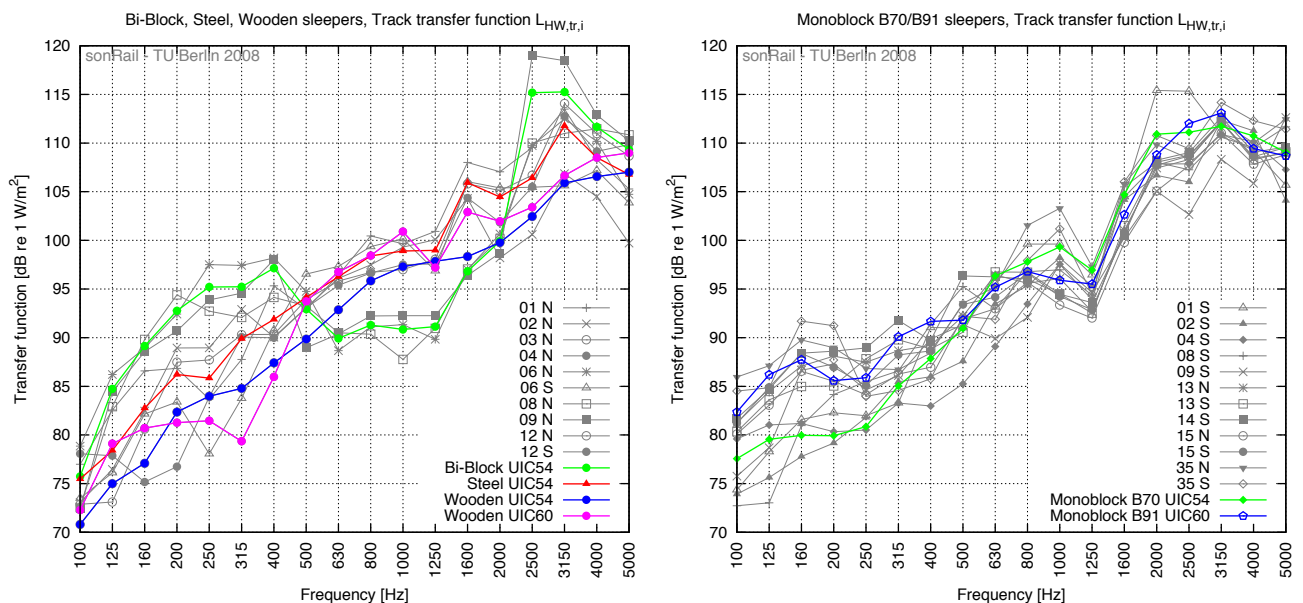


Abbildung 4.15: Vergleich der untersuchten Oberbautransferfunktionen

4.5.3 Zusammenfassender Vergleich der Emissionspegel

Diese Zusammenfassung gibt einen Überblick über das Emissionsverhalten aller untersuchten Fahrzeugkategorien für alle relevanten Oberbauarten und Schienenrauheiten. Dazu sind in Abbildung 4.16 die Schalleistungs- und Schalldruckpegel in Abhängigkeit von Oberbau und Schienenrauheit für jede Fahrzeugkategorie angegeben.¹⁰ Entsprechend der Datenlage werden die Felder in Abbildung 4.16 ausgefüllt.¹¹ Die angegebenen Werte beziehen sich auf eine

⁹Trotz dieser Unterschiede wird für diesen Oberbautyp nur eine typische Transferfunktion angegeben, da bei allen Messstellen die vertikale Track Decay Rate über der TSI Grenzwertkurve liegt. Liegt die TDR an einer Messstelle jedoch deutlich unterhalb der TSI Grenzwertkurve, sollte die Emissionsrechnung mit einer entsprechend abgeänderten Transferfunktion durchgeführt werden.

¹⁰Bei einem Vergleich der Schalldruckpegel $L_{pA,tot}$ müssen die Einflüsse unterschiedlicher Ausbreitungsdämpfungen an den jeweiligen Messstellen berücksichtigt werden.

¹¹In Abbildung 7.67 der Validierungsrechnungen werden auf Basis der Abbildung 4.16 die Messergebnisse durch Berechnungsergebnisse ergänzt.

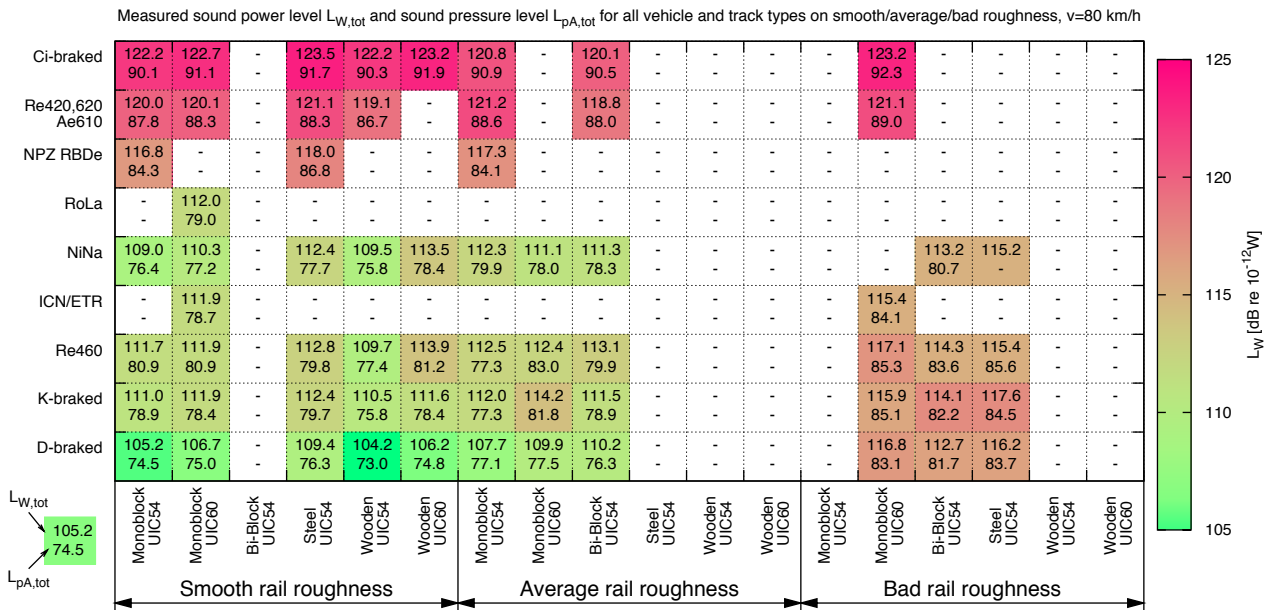


Abbildung 4.16: Zusammenstellung der Schalleistungen $L_{W,tot}$ [dB] (oberer Wert) und der Schalldruckpegel $L_{pA,tot}$ [dB(A)] (unterer Wert) aller gemessenen Fahrzeugtypen, Oberbautypen und Schienenzustände für die Bezugsgeschwindigkeit $v_0 = 80$ km/h nach Abbildung 4.9 bis 4.12

Geschwindigkeit von 80 km/h. Eine Zunahme der Emissionspegel wird bei steigender Schienenrauheit für alle Fahrzeuge mit "glatten" Rädern festgestellt. Im Extremfall ist eine Pegelzunahme von bis zu 10 dB für scheibengebremste Fahrzeuge möglich. Bei Fahrzeugen mit "rauen" Rädern werden unabhängig von der Schienenrauheit die höchsten Emissionspegel gemessen. Die maximale Pegeldifferenz zwischen scheiben- und GG-Klotz gebremsten Fahrzeugen beträgt bis zu 18 dB. Der Vergleich der Oberbauarten bestätigt eine Differenz der Emissionswerte zwischen UIC54 und UIC60 Schienen bei gleicher Schwellenart. Die Werte auf UIC54 Schienen liegen um 1 – 2 dB unterhalb der Werte von UIC60 Schienen (vgl. [87]). Die niedrigsten Emissionswerte werden auf Beton Monoblock und Holzschwellen Oberbau gemessen, die höchsten Werte auf Stahlschwellenoberbau. Die Differenz der Emissionswerte zwischen Holz- und Stahlschwellenoberbau liegt zwischen 2 – 3 dB.

4.6 Dokumentation der Arraymessungen

Mit den bisher durchgeführten Auswertungen der Vorbeifahrtmessungen ist eine genaue Positionsbestimmung von Schallquellen an den Fahrzeugen nicht möglich. Eine Unterteilung des Gesamtvorbeifahrtpegels in Rollgeräusch und Antriebsgeräusch kann somit nicht vorgenommen werden. Weiterhin muss für die korrekte Berechnung der Transferfunktionen nach Gleichung (3.6) nur die Schalleistung der Rollgeräuschquelle verwendet werden. Aus diesen Gründen wurden Mikrofonarraymessungen durchgeführt, welche eine Bestimmung der vertikalen Schalleistungsverteilung an Fahrzeugen in 4 Quellenhöhen ermöglicht. Fahrzeugspezifische Schallquellen können damit erfasst und von den Rollgeräuschquellen getrennt werden. Für jede Fahrzeugkategorie kann damit die Schalleistung der Sekundärquellen pro Quellenhöhe h und Terz f_i in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit angegeben werden.

4.6.1 Durchführung der Messungen und Auswertungen

4.6.1.1 Durchführung der Arraymessungen

Die Arraymessungen wurden von der Firma Sulzer Innotec durchgeführt und zur weiteren Auswertung der TU Berlin zur Verfügung gestellt [105]. Die Messungen sind mit einem vertikal angeordneten Linienarray mit 33 Mikrofonen durchgeführt worden. Für die hohen Frequenzen ab der 2 kHz-Terz wurde eine Reihe mit 21 Mikrofonen mit jeweils einem Abstand von 80 mm verwendet. Die tiefen Frequenzen bis zur 1.6 kHz-Terz wurden mit einer Mikrofonreihe mit 19 Mikrofonen in jeweils 240 mm Abstand erfasst.

Die Messungen sind im Jahr 2007 an den Messstellen 03 und 15, sowie im Jahr 2008 an der Messstelle 35 durchgeführt worden. Insgesamt konnten über 3'500 Fahrzeuge in einem Geschwindigkeitsbereich zwischen 60 und 200 km/h gemessen und ausgewertet werden.

4.6.1.2 Berechnung der Quellenintensitäten auf der Fahrzeugoberfläche

Bei der Berechnung der Quellenverteilung wird angenommen, dass sich die Schallquellen auf der Fahrzeugaussenwand befinden. Es wird auf 77 vertikal verteilte Quellenpunkte fokussiert, in einem Abstand von jeweils 0.1 m. Anhand einer Referenzschallquelle in 0.5 m Höhe wurde die Genauigkeit in der Bestimmung der vertikalen Quellenverteilung überprüft [105]. Die berechneten Quellenleistungen werden auf die Quellenintensität $L_{I,i}$ [dB(A)pW/m²] normiert, d.h. dem Effektivwert der Schalleistung, bezogen auf die Fläche. Die Schallquellen werden als Kugelstrahler angenommen. Dies ist dadurch begründet, dass die Richtcharakteristiken der einzelnen Schallquellen nicht bekannt sind. Bei der Berechnung der Intensitäten wird die höhenabhängige Ausbreitungsdämpfung im Messquerschnitt berücksichtigt.

4.6.1.3 Bestimmung der längenbezogenen Schalleistung

Die Quellenintensitäten werden über die jeweiligen Höhenbereiche integriert, so dass ein Pegelverlauf pro Quellenhöhe angegeben werden kann:

$$L_{W',h,i} = 10 \lg \int_h 10^{0.1L_{I,i}} dh \quad [\text{dB re } 1 \cdot 10^{-12} \text{ W/Laufmeter}] \quad (4.1)$$

In Abbildung 4.17 sind die längenbezogenen Schalleistungen eines IC2000 Zuges mit $v = 200$ km/h in Abhängigkeit von der Quellenhöhe für jede Terzfrequenz dargestellt. Bei allen Fahrzeugen des Zugverbandes werden die Emissionspegel der Quellenhöhe 1 vom Rollgeräusch dominiert, dies ist anhand der maximalen Quellenintensitäten an den Drehgestellen deutlich zu erkennen. Bei der Lok2000 am Ende des Zuges wird das Rollgeräusch durch zusätzliche Antriebsgeräusche in der unteren Quellenhöhen überlagert. Die Pegel der Quellenintensitäten liegen über den Werten der IC2000 Fahrzeuge. Der Steuerwagen IC2000 Bt zeichnet sich zudem durch einen breitbandigen Anteil von aerodynamischen Geräuschen aus. In der Quellenhöhe 2 fallen die Sekundärquellen am Steuerwagen und am 7. Wagen auf. Hier treten schmalbandige Pegelüberhöhungen auf, die auf die Lüftungseinlässe der Klimaanlage zurückgeführt werden. In der Quellenhöhe 3 werden ebenfalls diese Pegelüberhöhungen mit geringerer Leistung gemessen. Die Emissionspegel der Quellenhöhe 4 werden durch aerodynamische Effekte beeinflusst.

Das Beispiel zeigt zudem auftretende Probleme mit Aliasing-Effekten bei der Mikrofonarray-Messmethode auf. In der obersten Quellenhöhe treten ab einer Frequenz von 4000 Hz Schallquellen auf, die real nicht existieren. Diese Schallquellen stellen Nebenkeulen der realen Rollgeräuschquellen dar und ergeben sich aus dem Berechnungsalgorithmus der Schallquellenortung [106]. Deutlich sind die "scheinbaren" Achspositionen in den oberen Quellenhöhen zu erkennen. Aus diesem Grund werden für die Quellenhöhen 3 und 4 die Arraymessungen nur bis zu der Terzfrequenz 4000 Hz ausgewertet.

4.6.1.4 Schalleistung der Punktquellen pro Quellenhöhe

Die längenbezogenen Schalleistungen $L_{W',h,i}$ werden zu Punktquellen pro Quellenhöhe zusammengefasst. Die Schalleistung dieser Ersatzpunktschallquellen wird pro Quellenhöhe und Terz aus dem Effektivwert des Quellenpegelverlaufes $\bar{L}_{W',h,i}$ und der Fahrzeuglänge l_{veh} gebildet:

$$L_{W,h,i} = 10 \lg \left\{ l_{veh} \sqrt{\frac{1}{T} \int_T (10^{0.1L_{W',h,i}})^2 dt} \right\} \quad [\text{dB re } 1 \cdot 10^{-12} \text{ W}] \quad (4.2)$$

Pro Fahrzeugkategorie wird für jede Terz die Schalleistung in Abhängigkeit von Quellenhöhe h und Geschwindigkeit v berechnet.

4.6.2 Ergebnisse der Arraymessungen

In Kapitel C des Anhangs sind die Gesamtschalleistungen $L_{W,h}$ pro Quellenhöhe in Abhängigkeit von Fahrzeugkategorie und Geschwindigkeit für die Arraymessstellen 03, 15 und 35 dargestellt. Daraus kann die Geschwindigkeitsabhängigkeit pro Quellenhöhe und Fahrzeugtyp abgeleitet werden. Im Folgenden werden die spezifischen Merkmale der Sekundärquellen für jede Fahrzeugkategorie vorgestellt.

4.6.2.1 Triebfahrzeuge der Kategorie 01

Gesamtgeräusch In dieser Kategorie werden alle modernen Umrichterfahrzeuge betrachtet. Erfasst wurden an Messstelle 03 ausschliesslich Re460 Fahrzeuge, an den Messstellen 15 und 35 zusätzlich noch ICE Triebköpfe, Re465

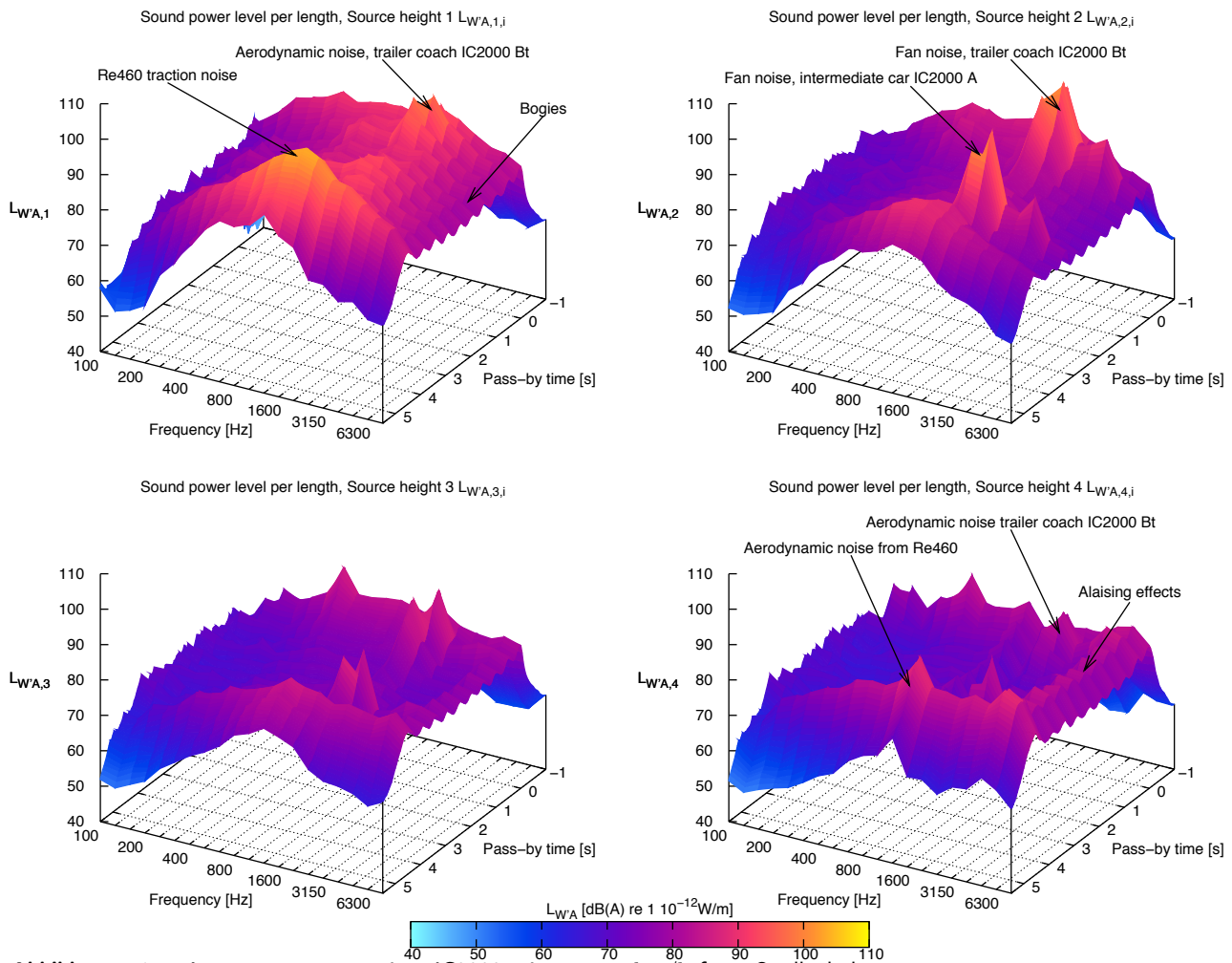


Abbildung 4.17: Arrayauswertungen eines IC2000 mit $v = 200 \text{ km/h}$ für 4 Quellenhöhen

und Re480/485 Fahrzeuge. Das Gesamtgeräusch wird bei allen Fahrzeugen von der untersten Quellenhöhe dominiert. Die Arraymessung erfasst in dieser Quellenhöhe sowohl das Rollgeräusch als auch sekundäre Schallanteile der Fahrmotoren und Getriebe in den Drehgestellen. Eine Trennung der Geräuschquellen ist nicht möglich.

Sekundäre Schallquellen In Abbildung 4.18 sind die Emissionspegel für Messfahrten mit niedriger und hoher Drehzahl der Traktionslüfter für das Fahrzeug Re460 091 an der Arraymessstelle 03 bei $v = 100 \text{ km/h}$ dargestellt. Die Emissionspegel in der Quellenhöhe 1 werden in beiden Fällen durch das Rollgeräusch bestimmt. Zum Vergleich ist die mittlere Schallleistung von EWIV Fahrzeugen bei gleicher Geschwindigkeit angegeben. Mit zunehmender Quellenhöhe werden die Pegeldifferenzen zwischen den Messfahrten grösser. Die Pegeldifferenz zwischen niedriger und hoher Lüfterdrehzahl beträgt in der Quellenhöhe 4 bis zu 9 dB. Demnach müssen bei Emissionsrechnungen mit maximaler Drehzahlstufe die sekundären Geräuschanteile der oberen Quellenhöhe berücksichtigt werden. Für die Messfahrt mit maximaler Lüfterstufe ist in Abbildung 4.20 die Verteilung der Quellenintensitäten über der Fahrzeughöhe z für die Terzfrequenz 1000 Hz dargestellt. Die sekundären Schallquellen lassen sich der genauen Position der Lüftungseinlässe zuordnen.

Die Abbildung 4.19 zeigt den Vergleich der Emissionspegel der vier Quellenhöhen für Re465 und Re485 Fahrzeuge. In der unteren Quellenhöhe liegen die Werte der scheidengebremsen Re485 Fahrzeuge über den Werten der Re465 Fahrzeuge. Diese Pegeldifferenz wird auf Sekundärquellen im Drehgestellbereich zurückgeführt.

Die Re465 weisen weiterhin deutliche Pegelmaxima bei 200 und 400 Hz in der Quellenhöhe 3 und 4 auf. Als mögliche Schallquellen können hier die Traktionslüfter angeführt werden, die bei der Drehzahlstufe II eine Grundfrequenz des Schaufeldrehklangs von 191 Hz erzeugen [107].

Aerodynamische Effekte Bei hohen Geschwindigkeiten können an Fahrzeugen am Zuganfang aerodynamische Geräuschquellen auftreten. Um den Einfluss dieser Quellen zu untersuchen, sind in Tabelle 4.3 für die Geschwindigkeitsbereiche $150 \dots 160 \text{ km/h}$ und $190 \dots 200 \text{ km/h}$ die Emissionspegel pro Quellenhöhe für Re460 Fahrzeuge

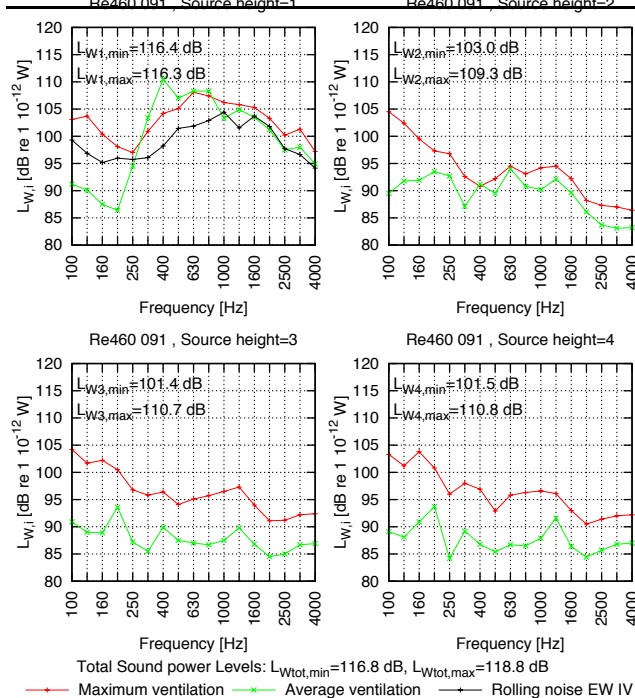


Abbildung 4.18: Schalleistungspegel der 4 Quellenhöhen von Vorbeifahrten der Re460 091 mit minimaler und maximaler Lüfterstufe bei $v = 110$ km/h

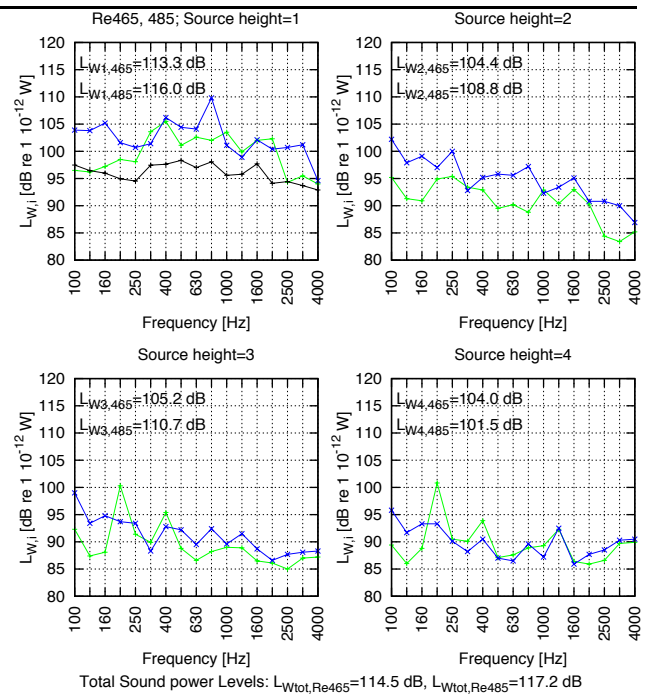


Abbildung 4.19: Schalleistungspegel der 4 Quellenhöhen von Re465 und Re485 Fahrzeugen an Messstelle 35 bei $v = 100$ km/h

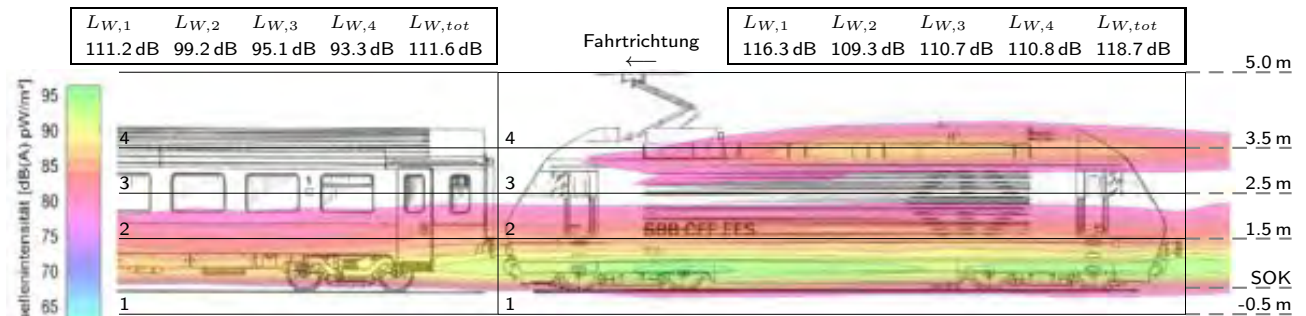


Abbildung 4.20: Verteilung der Quellenintensität $L_{I,1000}$ in der 1000 Hz-Terz und Angabe der Gesamtschallleistung $L_{W,h,1000}$ pro Quellenhöhe an einer Lok2000 mit EWIV Wagen mit $v = 100$ km/h an Messstelle 03

am Zugang und am Zugende angegeben. Bei den hohen Geschwindigkeiten werden Pegeldifferenzen zwischen der Fahrzeugposition am Zugang und am Zugende von bis zu 4 dB in der oberen Quellenhöhe gemessen. Diese Pegeldifferenzen werden auf die zusätzlichen aerodynamischen Effekte an den vorausfahrenden Fahrzeugen zurückgeführt. Die Messergebnisse an den ICE Zügen liefern zwischen dem ersten und letzten Triebkopf des Zugverbands in der Quellenhöhe 4 ebenfalls eine Pegeldifferenz von 3 dB. Für Geschwindigkeiten zwischen 150 km/h und 160 km/h werden zwischen den Fahrzeugpositionen am Zugang und Zugende Pegeldifferenzen von maximal 0.5 dB gemessen. Ein signifikanter Einfluss von aerodynamischen Quellen besteht hier nicht. Diese Untersuchungen zeigen, dass die Emissionspegel erst für Geschwindigkeit ab 200 km/h von aerodynamischen Schallquellen signifikant beeinflusst werden. Dieser Einfluss ist insbesondere bei Fahrzeugen am Zugang zu berücksichtigen.

Besonderheiten bei ICE Zügen Die Vorbeifahrten von ICE Zügen sind dadurch charakterisiert, dass sowohl am Zugang als auch am Zugende sehr hohe Emissionswerte gemessen werden. Dies wird durch die beiden Triebköpfe hervorgerufen, welche aus akustischer Sicht als Triebfahrzeuge behandelt werden. Die Emissionswerte der nicht angetriebenen Mittelwagen entsprechen den Werten der EWIV Fahrzeuge. Die typische Verteilung der Emissionsspektren bei einer ICE Vorbeifahrt mit 200 km/h ist in Abbildung 4.21 dargestellt. Daraus wird ersichtlich, dass bei allen Wagen in der Quellenhöhe 1 die höchsten Emissionspegel auftreten. In der Quellenhöhe 2 wird am vorausfahrenden Triebkopf ein um bis zu 1.5 dB höherer Vorbeifahrtpegel gemessen. Die Quellenhöhe 3 wird bei den Triebköpfen durch

Tabelle 4.3: Emissionspegel pro Quellenhöhe für Re460, ICE, ICN, EWIV und IC2000 Fahrzeuge an Messstelle 15 und 35

Fahrzeugtyp	$v = 190 \dots 200 \text{ km/h}$					150 .. 160 km/h
	$L_{W,1}$ [dB]	$L_{W,2}$ [dB]	$L_{W,3}$ [dB]	$L_{W,4}$ [dB]	$L_{W,ges}$ [dB]	$L_{W,ges}$ [dB]
Re460 am Zuanfang	122.3	116.0	114.8	115.4	124.4	116.8
Re460 am Zugende	120.7	113.0	110.7	112.3	122.2	116.2
ICE Triebkopf Zuanfang	121.6	115.2	114.5	115.5	123.9	116.6
ICE Triebkopf Zugende	119.8	113.0	112.8	113.1	121.1	117.1
ICN angetriebener Wagen	122.2	115.2	112.0	110.7	123.6	–
ICN nicht angetriebener W.	119.5	113.1	109.8	108.0	121.0	–
EWIV Bt am Zuanfang	120.5	115.2	111.9	110.5	122.5	116.1
EWIV Bt am Zugende	118.9	114.1	110.5	107.6	120.8	116.3
EWIV A B	118.3	112.3	108.3	105.6	119.8	–
IC2000 Bt am Zuanfang	119.0	115.9	113.5	112.8	122.2	115.5
IC2000 Bt am Zugende	117.1	113.6	110.4	108.1	119.8	116.4
IC2000 A B	117.8	113.8	110.5	108.2	120.1	–

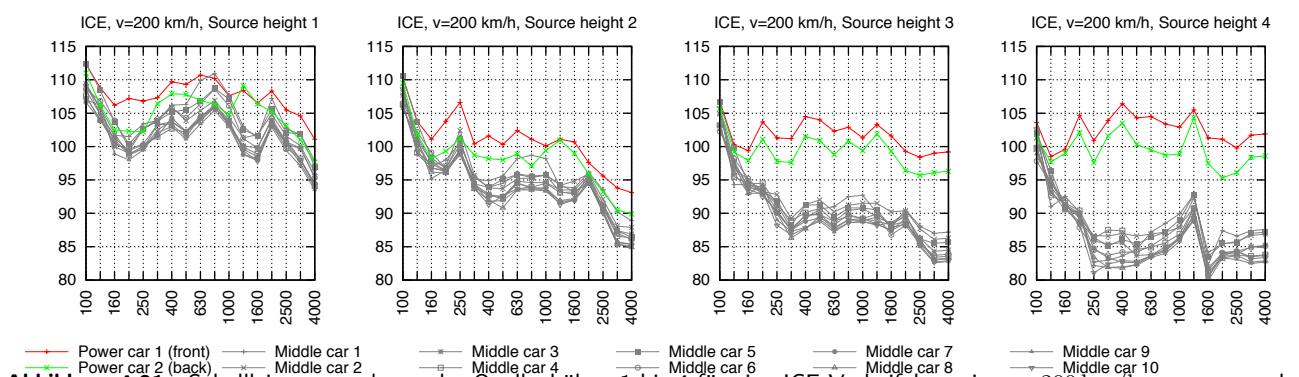


Abbildung 4.21: Schalleistungsspektren der Quellenhöhen 1 bis 4 für eine ICE Vorbeifahrt mit $v = 200 \text{ km/h}$ getrennt nach Triebköpfen und Mittelwagen; Gesamtschalleistungspegel nach Tabelle 4.3

seitliche Lüftungseinlässe bestimmt. Diese befinden sich an den Triebköpfen im Bereich zwischen 2.7 und 3.3 m über Schienenoberkante. Damit wird der signifikante Pegelunterschied von bis zu 20 dB zu den Zwischenwagen erklärt. Die Quellenhöhe 4 umfasst die Dachaufbauten des ICE. Die Schalleistung der oberen Quellenhöhe liegt bei den Triebköpfen um bis zu 15 dB über denen der Mittelwagen. Der Vergleich zwischen beiden Triebköpfen verdeutlicht ebenfalls den zusätzlichen Einfluss der aerodynamischen Quellen.

Fazit für die Modellerstellung Auf Basis der ausgewerteten Daten werden gemeinsame Standardwerte der Sekundärquellen für die Fahrzeugtypen Re460/465, Re480/485 sowie für ICE Triebköpfe BR401 ohne dominierende Sekundärquellen definiert. Zusätzlich werden Default-Werte für ausgeprägte Sekundärquellen (Kompressor in Betrieb, Traktionslüfterstufe 2 oder 3) und für ausgeprägte aerodynamische Geräuschquellen angegeben.

4.6.2.2 Triebfahrzeuge der Kategorie 02

Gesamtgeräusch In der Kategorie 02 werden die 4-achsigen Fahrzeuge Re420 und die 6-achsigen Fahrzeuge Re620 und Ae610 erfasst. Wie in Abbildung 4.22 zu erkennen ist, werden zwischen den Fahrzeugtypen in allen Quellenhöhen Unterschiede in den Emissionsspektren gemessen. Die Emissionspegel der 6-achsigen Re620 und Ae610 Fahrzeuge liegen bei gleicher Geschwindigkeit über den Werten der 4-achsigen Re420 Fahrzeuge. Dies wird auf die höhere Achszahl und Anzahl der Fahrmotoren zurückgeführt.

Sekundäre Schallquellen Auffällig sind bei einigen Re420 Fahrzeugen die lokalen Pegelmaxima in der Quellenhöhe 1 bei 630 Hz. Diese Maxima wurden nur bei Fahrzeugen in Doppeltraktion vor Güterzügen gemessen, so dass die Pegelüberhöhungen auf höhere Traktionsleistungen zurückgeführt werden. In Abbildung 4.23 ist die Verteilung der Quellenintensitäten einer Zugvorbeifahrt mit Re420 Fahrzeugen in Doppeltraktion dargestellt. Deutlich sind hier die Pegelmaxima bei 630 Hz im Bereich der Drehgestelle zu erkennen, die nach [108] auf die Zahneingriffsfrequenz der

Tabelle 4.4: Emissionspegel pro Quellenhöhe für Re420 und Ae610 Fahrzeuge an Messstelle 35 für Geschwindigkeiten zwischen 90...100 km/h

Fahrzeugtyp	$L_{W,1}$ [dB]	$L_{W,2}$ [dB]	$L_{W,3}$ [dB]	$L_{W,4}$ [dB]	$L_{W,ges}$ [dB]
Re420, ohne ausgeprägte Sekundärquellen	119.0	109.5	104.9	103.0	119.7
Re420, mit ausgeprägte Sekundärquellen	124.8	115.3	109.4	108.1	125.4
Ae610, ohne ausgeprägte Sekundärquellen	123.3	116.4	111.4	107.8	124.4
Ae610, mit ausgeprägte Sekundärquellen	126.1	116.4	110.6	109.8	126.7

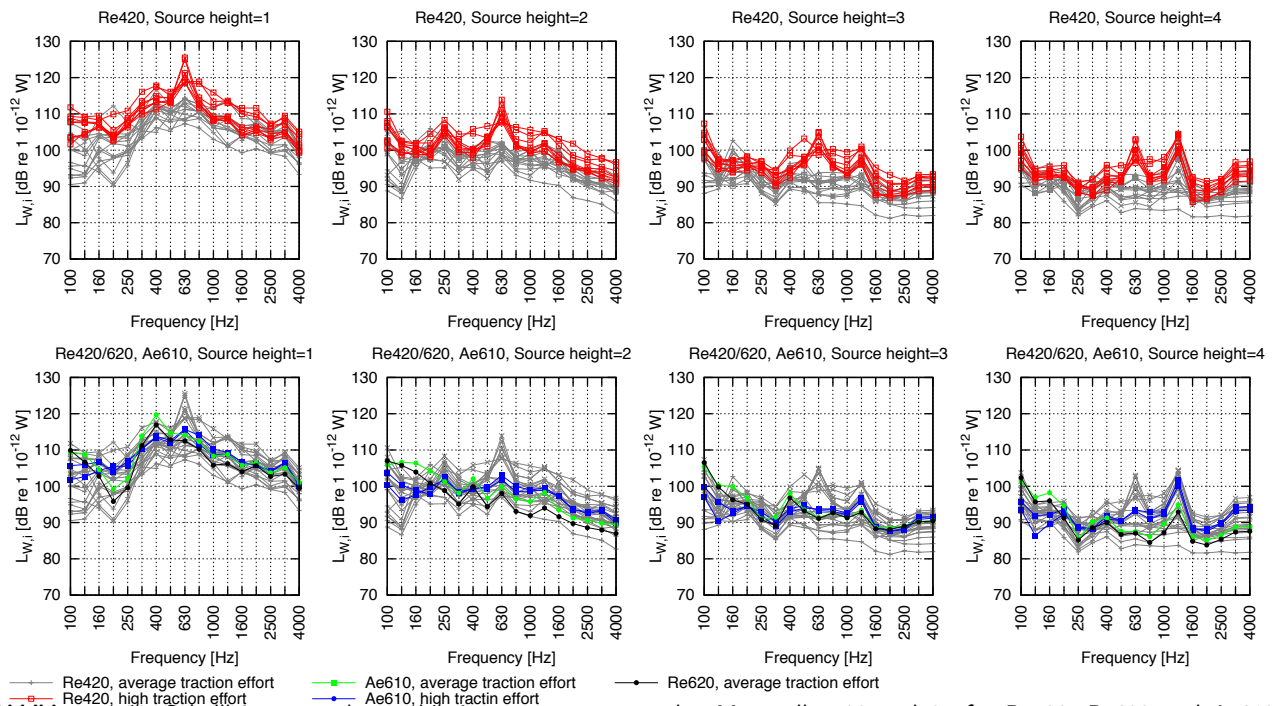


Abbildung 4.22: Schalleistungsspektren der Arraymessungen an den Messstellen 03 und 35 für Re420, Re620 und Ae610 Fahrzeuge bei unterschiedlichen Traktionsleistungen, Gesamtschalleistungen nach Tabelle 4.4

Getriebe zurückzuführen sind. Weitere Pegelmaxima werden bei 1250 Hz in der Quellenhöhe 4 gemessen, verursacht durch Sekundärquellen der Traktionslüfter [108]. Die Tabelle 4.4 enthält für die Typen Re420 und Ae610 die mittleren Emissionspegel pro Quellenhöhe an Messstelle 35 im Geschwindigkeitsbereich zwischen 90...100 km/h. Dabei wird in Fahrten mit und ohne Sekundärquellen unterschieden. Der Gesamtpegel über alle Quellenhöhen liegt bei den Re420 Fahrzeugen mit hoher Traktionsleistung um bis zu 5.5 dB über den Werten mit geringer Traktionsleistung. Bei den Ae610 Fahrzeugen beträgt diese Differenz knapp 2.5 dB.

Fazit für die Modellerstellung Auf Basis der ausgewerteten Daten werden Standardwerte für die Fahrzeugtypen Re420 und Re620/Ae610 angegeben. Diese berücksichtigen die unterschiedliche Achs- und Fahrmotorenanzahl beider Typen. Zusätzlich werden Standardwerte für hohe Traktionsleistungen angegeben. Diese berücksichtigen auch die diskreten Pegelmaxima bei 630 Hz und 1250 Hz.

4.6.2.3 Triebzüge der Kategorie 03

Gesamtgeräusch In der Kategorie 03 werden Triebzüge mit verteilten Antrieben (ICN, ETR) beschrieben. In Abbildung 4.24 sind die längenbezogenen Schalleistungen einer ICN Vorbeifahrt dargestellt. In den unteren Quellenhöhen dominiert bei allen Fahrzeugen das Rollgeräusch, bei den angetriebenen Achsen werden zusätzliche Antriebsgeräusche gemessen. Dies ist anhand der höheren Emissionspegel deutlich zu erkennen. Die Pegeldifferenzen zwischen angetriebenen und nicht angetriebenen Wagen sind jedoch auf Grund der verteilten Antriebstechnik niedriger als bei den ICE Triebkopfzügen. Die Positionen der beiden Stromabnehmer der gekuppelten ICN Züge sind anhand der höheren Quellenintensitäten in der oberen Quellenhöhe deutlich zu erkennen. Zwischen ICN und ETR Fahrzeugen wurden keine signifikanten Pegelunterschiede gemessen, die Differenzen sind kleiner 1 dB.

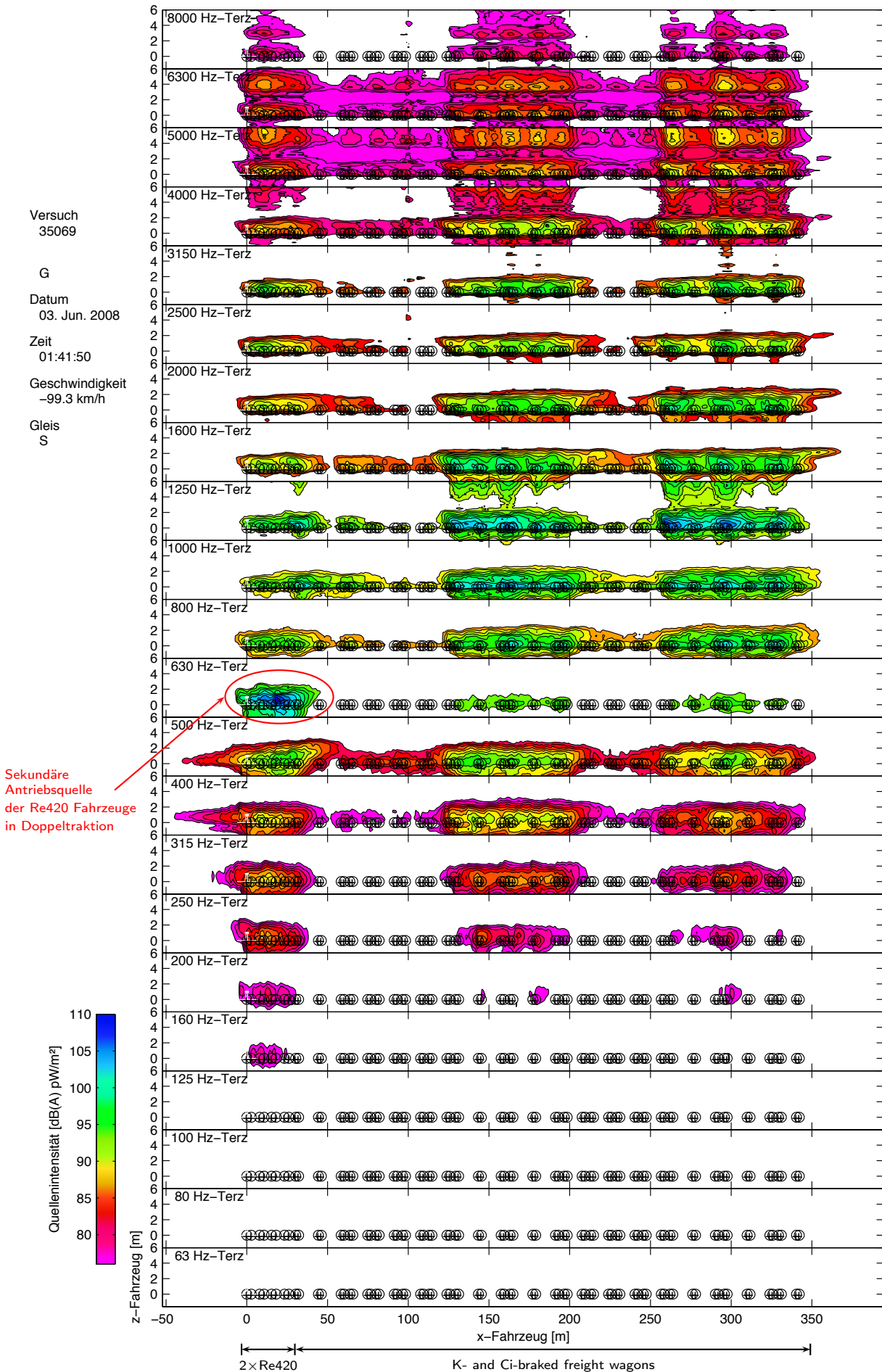


Abbildung 4.23: Quellenintensitäten für die Vorbeifahrt eines Güterzuges mit Re420 Doppeltraktion an der Arraymesstelle 35

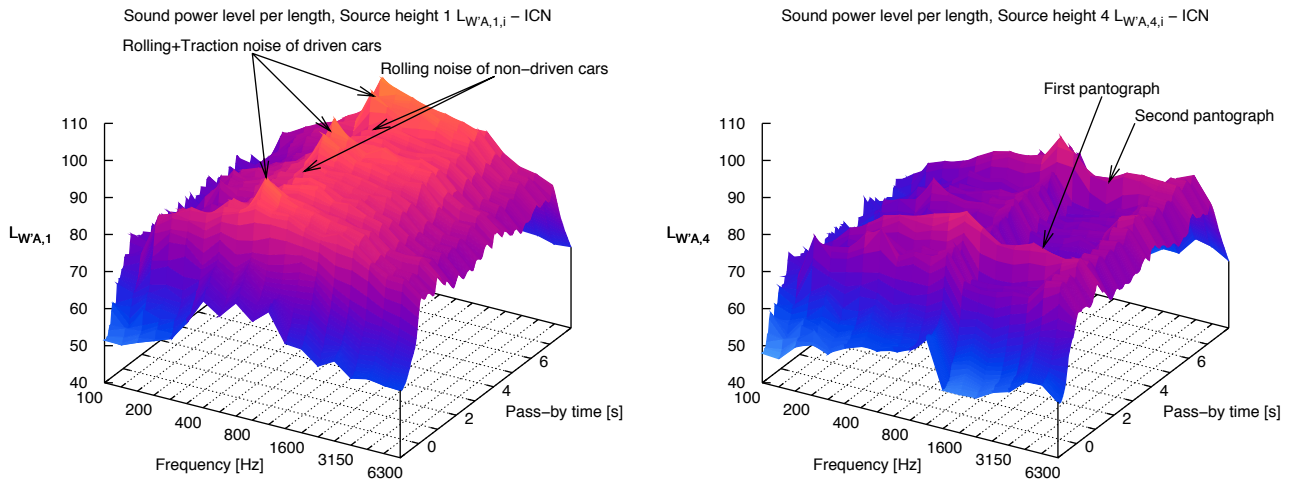


Abbildung 4.24: Arrayauswertung einer ICN Vorbeifahrt in Doppeltraktion bei $v = 200 \text{ km/h}$

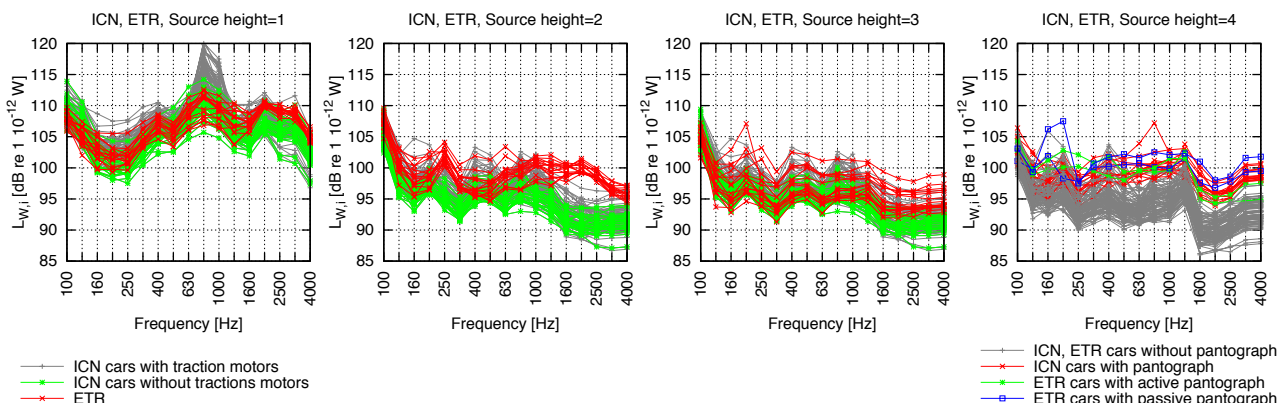


Abbildung 4.25: Schalleistungsspektren der Arraymessungen an ICN und ETR Fahrzeugen bei $v = 190 \dots 200 \text{ km/h}$, Schalleistungen nach Tabelle 4.3

Sekundäre Schallquellen Die ICN Fahrzeuge weisen in den Quellenhöhen 1 und 2 im Frequenzbereich zwischen 630 und 1000 Hz höhere Pegel als die ETR Fahrzeuge auf. Dies wird auf Sekundärquellen der Antriebstechnik in den Drehgestellbereichen zurückgeführt. Die Abbildung 4.25 zeigt die Emissionspegel von ICN Fahrzeugen getrennt für Wagen mit angetriebenen und nicht angetriebenen Achsen. Deutlich sind die Pegelunterschiede im angegebenen Frequenzbereich zu erkennen. In Tabelle 4.3 sind die Emissionspegel für angetriebene und nicht angetriebene Wagen von ICN Fahrzeugen für alle Quellenhöhen angegeben. Die Werte der nicht angetriebenen Wagen liegen um 2–2.5 dB unter den Werten der angetriebenen Wagen.

Aerodynamische Effekte Hervorzuheben sind die Fahrzeuge im Zugverband die mit einem Stromabnehmer ausgerüstet sind, Abbildung 4.25. Diese Fahrzeuge weisen in der Quellenhöhe 4 um bis zu 5 dB höhere Emissionspegel auf. Bei den ETR Fahrzeugen kann zudem nach aktiven (angelegten) und inaktiven (abgesenkten) Stromabnehmer unterschieden werden. Die Werte beim abgesenkten Stromabnehmer liegen ebenfalls über den Werten der anderen Fahrzeuge des Zugverbandes und um etwa 2–3 dB unter den Werten der Wagen mit angelegtem Stromabnehmer.

Fazit für die Modellerstellung Auf Basis der ausgewerteten Daten werden für ICN und ETR Züge gemeinsame Standardwerte angegeben. Jedes Fahrzeug im Zugverband wird mit den selben Standardwerten der Sekundärquellen berechnet. Eine Unterteilung in Trieb- und Beiwagen erfolgt daher nicht. Für die angetriebenen Wagen sind jedoch zusätzliche Sekundärquellen des Antriebs definiert. Für das erste Fahrzeug im Zugverband können zudem aerodynamische Geräuschquellen berücksichtigt werden, dabei wird die aerodynamische Geräuschquelle des Stromabnehmers auf das erste Fahrzeuge "verlagert".¹²

¹²Bei den ICN Fahrzeugen befindet sich der Stromabnehmer auf dem 3. Wagen des Zugverbandes.

4.6.2.4 Triebzüge der Kategorie 04

Der NiNa Messzug eignet sich durch die Niederflurbauweise für die Messung von hochliegenden Schallquellen im Dachbereich. Diese Schallquellen erlangen bei Ausbreitungsrechnung im Bereich von Lärmschutzwänden eine besondere Bedeutung. Bei den Messfahrten wurden jedoch keine ausgeprägten Sekundärquellen in den oberen Quellenhöhen festgestellt. Die Emissionspegel werden an allen Wagen des Zugverbands durch das Rollgeräusch dominiert.

Fazit für die Modellerstellung Auf Basis der ausgewerteten Daten werden für die NiNa Fahrzeuge Standardwerte ohne ausgeprägte Sekundärquellen angegeben. Für jedes Fahrzeug im Zugverband werden die selben Standardwerte der Sekundärquellen verwendet. Eine Unterteilung in Trieb- und Mittelwagen erfolgt nur auf Grund der unterschiedlichen Radrauheiten (vgl. Abschnitt 5.1.3.2).

4.6.2.5 Scheibengebremste Fahrzeuge der Kategorien 05 und 08

Gesamtgeräusch In diesen Kategorien werden EWIV und IC2000 Fahrzeuge ausgewertet. Die Rollgeräuschquelle dominiert bei beiden Fahrzeugtypen das Gesamtgeräusch. Bei hohen Geschwindigkeiten treten aerodynamische Geräuschquellen an den Steuerwagen auf.

Aerodynamische Effekte an Steuerwagen Die Abbildung 4.26 zeigt die Messergebnisse der Arraymessungen an Messstelle 35 für IC2000 und EWIV Fahrzeuge mit einer Geschwindigkeit zwischen 190 und 200 km/h. Um den Einfluss der aerodynamischen Quellen zu untersuchen, wird in Mittelwagen (IC2000 A,B) und Steuerwagen (IC2000 Bt) am Zuganfang sowie am Zugende unterschieden. Befindet sich ein Steuerwagen am Zuganfang werden in der obersten Quellenhöhe höhere Schallleistungspegel als an den Mittelwagen gemessen. Auffällig sind dabei Pegelmaxima zwischen 160 und 200 Hz an Steuerwagen am Zuganfang. Befinden sich die Fahrzeuge am Zugende, werden für diesen Frequenzbereich keine Pegelmaxima festgestellt. In Abbildung 4.27 ist die Verteilung der Quellenintensitäten an einer IC2000 Zugvorbeifahrt mit Steuerwagen am Zuganfang bei 190 km/h dargestellt¹³. Deutlich sind die Pegelmaxima bei den tiefen Frequenzen zu erkennen. Die Position der höchsten Quellenintensität befindet sich nicht an der erste Achse, sondern ist in Richtung Zugspitze vorverlagert und deutet somit auf eine aerodynamische Quelle hin. Auch im mittleren Frequenzbereich werden im Vergleich zu den anderen Achsen im Zugverband in der Quellenhöhe 1 vergleichsweise hohe Emissionswerte gemessen. Diese werden nur am vorausfahrenden Drehgestell gemessen, das nachlaufende Drehgestell des Steuerwagens zeigt niedrigere Emissionswerte.

An EWIV Fahrzeugen werden bei Steuerwagen am Zuganfang ebenfalls höhere Emissionswerte gemessen. Diese treten nur im mittleren Frequenzbereich auf. Die bei den IC2000 Steuerwagen gemessenen Pegelmaxima im tiefen Frequenzbereich werden nicht gemessen. Befinden sich die Fahrzeuge am Zugende, treten keine Pegelunterschiede zwischen Steuer- und Mittelwagen auf. Die Pegelüberhöhung bei 2000 und 2500 Hz kann auf die Schienenrauheit an der Messstelle zurückgeführt werden (vgl. Abbildung 4.3). In der Tabelle 4.3 sind diese Ergebnisse für IC2000 und EWIV Fahrzeuge zusammengefasst. Die Position des Steuerwagens im Zugverband führt analog zu den Fahrzeugen der Kategorie 01 zu einer Pegeldifferenz von 2 dB zwischen der Position am Zuganfang und am Zugende. Die maximalen Pegeldifferenzen treten in den Quellenhöhen 1 und 4 auf. Die Steuerwagen EWIV Bt und IC2000 Bt am Zugende unterscheiden sich in den Emissionsspektren von den konventionellen Wagen EWIV A(B) und IC2000 A(B) nur in der obersten Quellenhöhe. Hier kann die Differenz bis zu 2 dB betragen. Die Pegeldifferenz des Gesamtgeräusches ist jedoch kleiner 1 dB.

Sekundäre Schallquellen An einigen IC2000 Fahrzeugen wurden in der Quellenhöhe 2 sekundäre Schallquellen gemessen, vgl. Abbildung 4.17. Dies wird auf die seitlichen Lüftungseinlässe der Klimaanlage zurückgeführt.

Fazit für die Modellerstellung Auf Basis der ausgewerteten Daten werden in der Fahrzeugkategorie 05 Standardwerte für scheinengebremste Fahrzeuge EWIV, NPZ Bt, ICE Mittelwagen und in der Kategorie 08 für IC2000 Doppelstockwagen angegeben. Für die Steuerwagen EWIV Bt und IC2000 Bt werden zusätzliche Standardwerte unter Berücksichtigung der aerodynamischen Einflüsse bei hohen Geschwindigkeiten definiert.

¹³Bei der Darstellung ist zu beachten, dass die Darstellung der Quellenintensitäten A-bewertet erfolgt, wodurch sich im Vergleich zur unbewerteten Darstellung in Abbildung 4.26 geringere Emissionswerte ergeben.

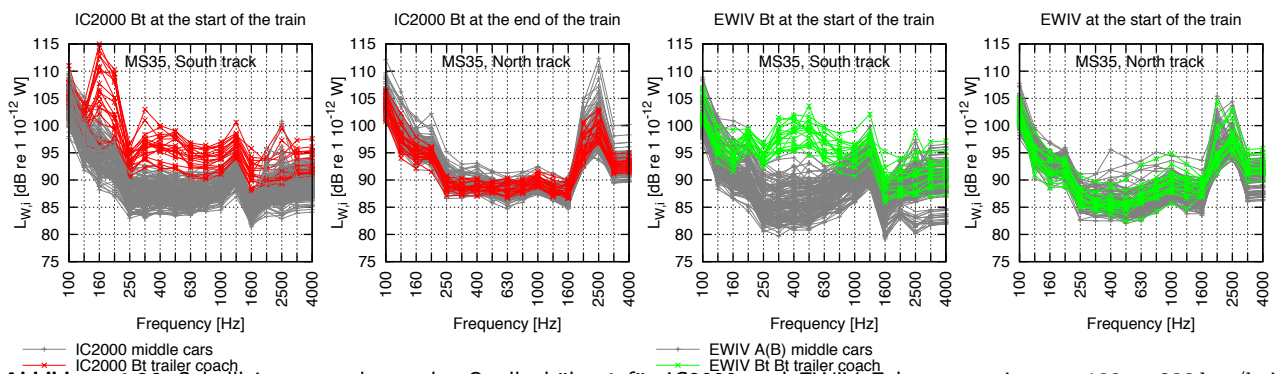


Abbildung 4.26: Schalleistungsspektren der Quellenhöhe 4 für IC2000 und EVIV Fahrzeuge mit $v = 190 \dots 200$ km/h in Abhängigkeit von der Position der Steuerwagen im Zugverband

4.6.2.6 K-Klotz gebremste Fahrzeuge der Kategorie 06

Gesamtgeräusch An der Arraymessstelle 03 wurden die K-Klotz gebremsten Fahrzeuge NPZ B und RIC Bpm messtechnisch erfasst. Das Emissionsverhalten der Fahrzeuge wird vom Rollgeräusch bestimmt, es werden keine Unterschiede zwischen beiden Fahrzeugtypen gemessen.

Fazit für die Modellerstellung Basierend auf den Messergebnissen werden die Standardwerte im Emissionsmodell gemeinsam für alle K-Klotz gebremsten Personenwagen definiert.

4.6.2.7 NPZ Triebfahrzeuge RBDe der Kategorie 07

Gesamtgeräusch Das Gesamtgeräusch der Fahrzeuge wird durch das Rollgeräusch bestimmt, bei niedrigen Geschwindigkeiten nimmt der Einfluss von sekundären Antriebsgeräuschquellen zu.

Sekundäre Schallquellen Bei den Triebfahrzeugen der NPZ Züge werden in der unteren Quellenhöhe sekundäre Schallquellen des Antriebs gemessen. Der Einfluss der Antriebsquellen wird anhand einer Vorbeifahrt mit $v = 45$ km/h in Abbildung 4.28 verdeutlicht. Im Bereich des Triebwagens werden im Frequenzbereich um 500 Hz in den Quellenhöhen 3 und 4 sehr hohe Emissionspegel gemessen. Als Schallquellen werden die Lufteinlässe der Ventilatorgruppen der Fahrmotoren und des Ölkühler des Umrichters angeführt. Der Gesamtschalleistungspegel des Triebwagens beträgt 109.5 dB, das reine Rollgeräusch beträgt bei dieser Geschwindigkeit 102.8 dB.¹⁴ Die Pegelzunahme von 7 dB kann somit auf die sekundären Schallquellen zurückgeführt werden.

Fazit für die Modellerstellung Basierend auf den Messergebnissen werden Standardwerte ohne ausgeprägte Sekundärquellen definiert.

4.6.2.8 GG-Klotz gebremste Güterwagen der Kategorie 09

Gesamtgeräusch Die Abbildung 4.29 zeigt die Ergebnisse der Arraymessungen von Messstelle 03 an 4-achsigen, GG-Klotz gebremsten Güterwagen. Für alle Fahrzeuge gilt der dominierende Einfluss der Radrauheiten auf das Rollgeräusch. Die Emissionspegel der Kessel- und Schüttgutwagen liegen in allen Quellenhöhen über den Werten der Flachwagen. Da die indirekte Messung der Radrauheiten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Güterwagentypen ergeben hat, muss von sekundären Geräuschquellen ausgegangen werden. Bei Kesselwagen treten in der Quellenhöhe 1 die höchsten Emissionswerte auf. In den oberen Quellenhöhen werden keine signifikant höheren Emissionspegel im Vergleich zu den anderen Güterwagentypen gemessen (vgl. [109]). In Tabelle 4.5 sind die gemessenen Emissionswerte der untersuchten Güterwagentypen dargestellt. Die Gesamtpegel streuen bis zu 7 dB.

Fazit für die Modellerstellung Basierend auf den Messergebnissen werden Standardwerte für Güterwagen unabhängig von der Bauart angegeben. Davon abweichend können für gedeckte Güterwagen und für Kesselwagen spezielle Werte der Sekundärschalleistungen in der Berechnung verwendet werden. Diese Werte berücksichtigen die höheren

¹⁴Dieser Wert ergibt sich aus den Messungen am schiebengebremsten, nicht angetriebenen Steuerwagen dieser Messfahrt. Dieser Vergleich ist möglich, da zwischen Trieb- und Steuerwagen die gleichen Radrauheiten gemessen wurden, vgl. Abbildung 5.2.

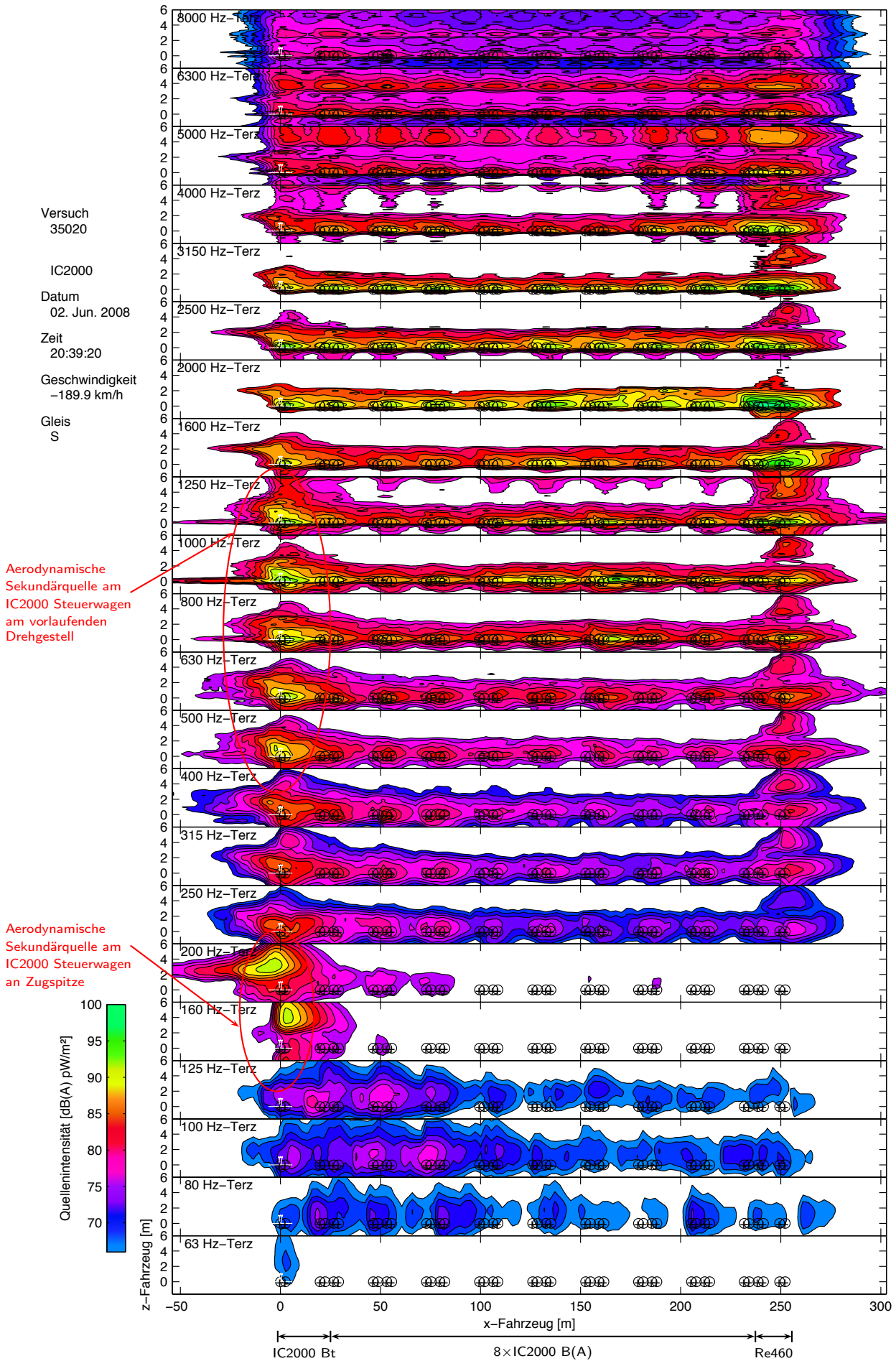


Abbildung 4.27: Quellenintensitäten für die Vorbeifahrt eines IC2000 Zuges an der Arraymessstelle 35

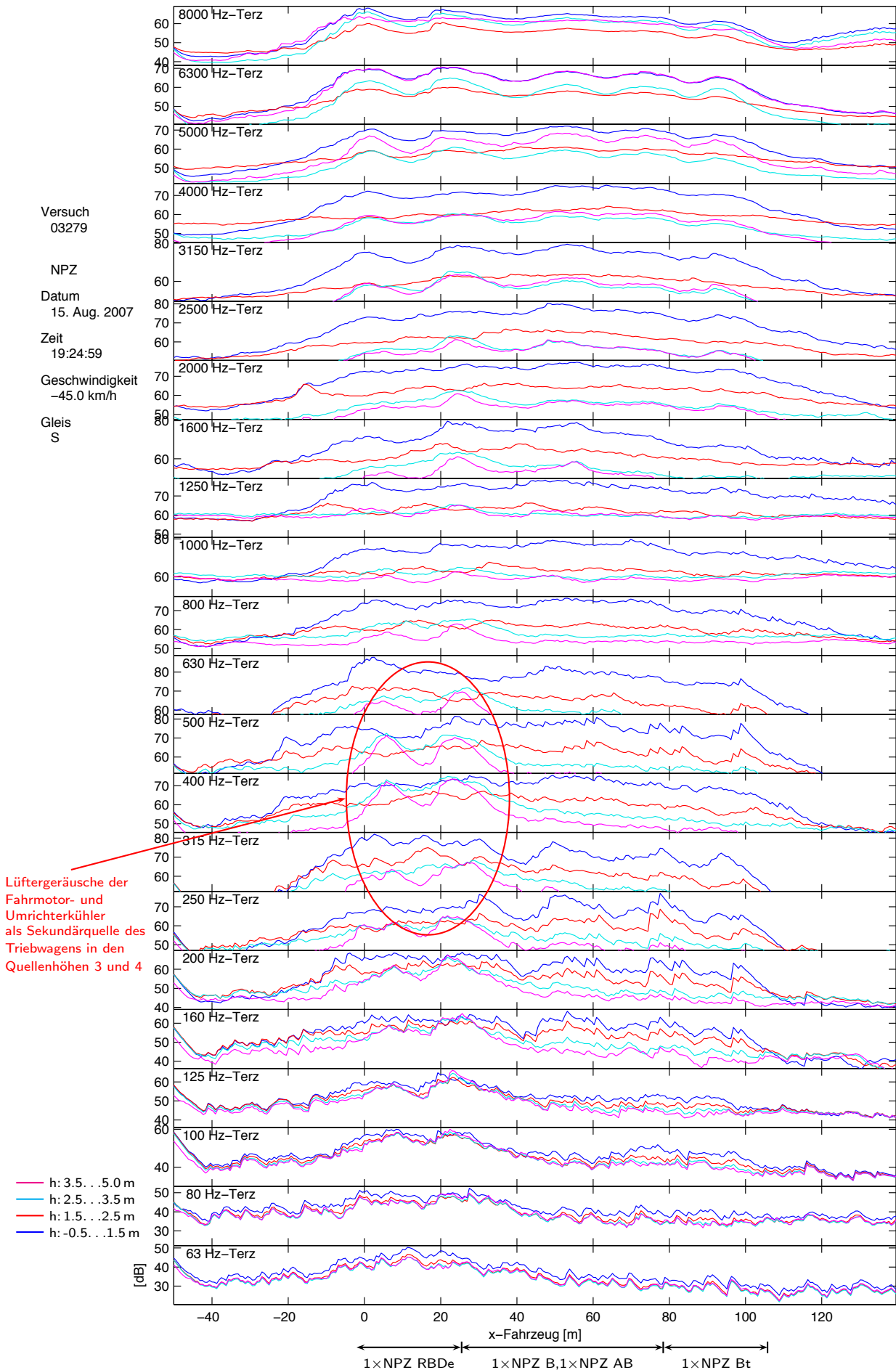


Abbildung 4.28: Längenbezogene Schallleistungen für die Vorbeifahrt eines NPZ Zuges an der Arraymesstelle 03

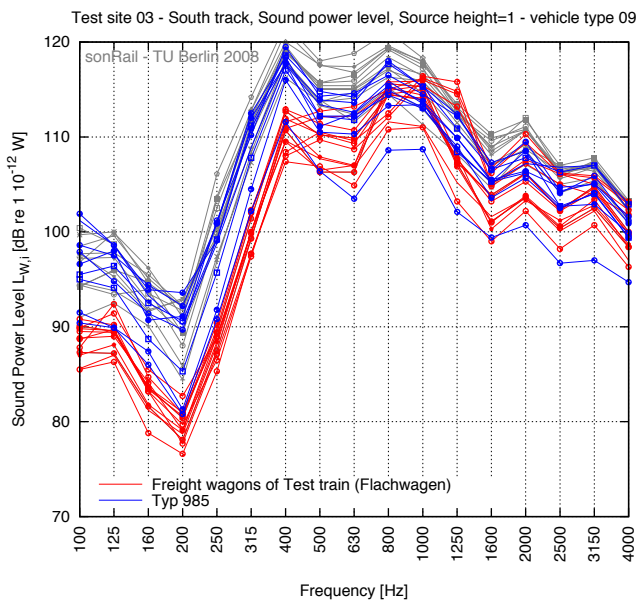


Abbildung 4.29: Arrayauswertungen von 4-achsigen Güterwagen an der Messstelle 03 bei $v = 80$ km/h

Tabelle 4.5: Emissionspegel für GG-Klotz gebremste Güterwagen getrennt nach Quellenhöhen bei $v = 80$ km/h

Güterwagentyp		$L_{W,1}$ [dB]	$L_{W,2}$ [dB]	$L_{W,3}$ [dB]	$L_{W,4}$ [dB]	$L_{W,ges}$ [dB]
Flachwagen	Slmnpns	120.5	107.6	100.3	100.0	120.7
Containerwagen	Sgnns	120.3	111.5	105.2	103.4	121.0
Schüttgutwagen	Tamns	123.7	111.0	104.7	102.7	124.0
Kesselwagen	Zans	127.1	111.2	104.7	102.5	127.2

Tabelle 4.6: Emissionspegel für beladene und unbeladene RoLa Fahrzeuge getrennt nach Quellenhöhen bei $v = 100$ km/h

	$L_{W,1}$ [dB]	$L_{W,2}$ [dB]	$L_{W,3}$ [dB]	$L_{W,4}$ [dB]	$L_{W,ges}$ [dB]
RoLa beladen	114.8	106.1	101.2	99.1	115.6
RoLa unbeladen	113.8	104.3	99.0	97.5	114.5

Emissionspegel dieser Bauarten. Ist die Zusammenstellung eines Güterzuges hinsichtlich der Güterwagenbauarten unbekannt, sollten die Standardwerte verwendet werden.

4.6.2.9 RoLa Fahrzeuge der Kategorie 11

Gesamtgeräusch Das Emissionsverhalten der RoLa¹⁵ Fahrzeuge wird durch das Rollgeräusch dominiert. Bei beladenen RoLa Fahrzeugen werden aerodynamische Schallquellen in den Höhen 3 und 4 gemessen, die sich aus der Anströmung der LKW Aufbauten ergeben. In Tabelle 4.6 ist der Vergleich der Emissionspegel von beladenen und unbeladenen RoLa Fahrzeugen mit $v = 100$ km/h für die 4 Quellenhöhen angegeben. Der Differenzpegel zwischen beladen und unbeladen Fahrzeugen beträgt 1 dB.

Fazit für die Modellerstellung Basierend auf den Messergebnissen werden gemeinsame Standardwerte für beladene und unbeladene Fahrzeuge angegeben. Sekundäre Schallquellen und aerodynamische Effekte werden nicht berücksichtigt.

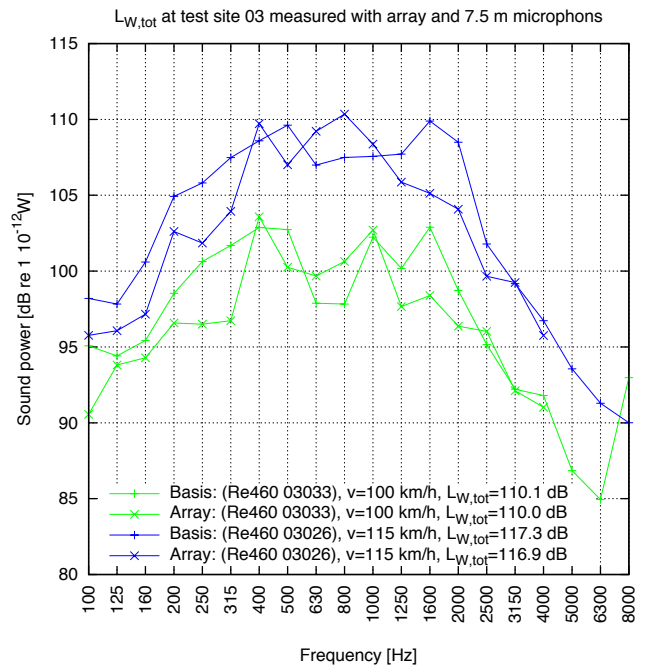
4.6.3 Vergleich von Array- und Basismessungen

An den Messstellen 03, 15 und 35 wurden Array- und Basismessungen zeitgleich an allen Zügen durchgeführt. Für zwei Vorbeifahrten an Messstelle 03 werden die Gesamtschallleistungen $L_{W,tot,i}$ der Array- und Basismessun-

¹⁵RoLa: Rollende Landstrasse

gen vergleichendargestellt. Die Verläufe zeigen eine gute Übereinstimmung, die Abweichungen in den Emissionspegeln sind kleiner 0.5 dB. Die auftretenden Abweichungen können durch folgende Fehlerquellen erklärt werden:

1. Für die Berechnung der Schalleistung aus den Basismessungen (7.5 m Mikros) werden Ausbreitungsdämpfung für $h = 0.5$ m verwendet, da dass Rollgeräusch als Primärquelle angesehen wird. Somit werden jedoch Schalleistungen von Sekundärquellen in anderen Quellenhöhen mit einem Fehler berechnet.
2. Die Schallanteile der oberen Quellenhöhen werden durch $1g$ -Verläufe berechnet (vgl. Anhang C), so dass Abweichungen zu den hier dargestellten Einzelfällen möglich sind.
3. Für die Berechnung der Schalleistungen aus den Arraymessungen werden die berechneten Ausbreitungsdämpfungen der jeweiligen Quellenhöhen verwendet. Diese beziehen sich jedoch immer auf eine Mikrofonhöhe von 1.2 m. Die Höhen der Mikrofone des Arrays sind jedoch zwischen 0 und 4.0 m über SOK verteilt angeordnet.



5 Analyse von Einflussparametern auf die Emissionspegel

5.1 Rad- und Schienenrauheiten

Rad- und Schienenrauheiten sind die zentralen Parameter des Emissionsmodells. Die Auswertung der durchgeführten Messungen zeigt, dass beide Parameter sehr starken Schwankungen unterliegen können. Dies hat einen signifikanten Einfluss auf die Emissionspegel. Aus diesem Grund werden beide Parameter im Hinblick auf das Rollgeräusch genauer analysiert.

5.1.1 Indirekte Messung der effektiven Gesamtrauheiten

Das Emissionsmodell geht von einer effektiven, zusammengesetzten Rad-Schiene-Rauheit als anregende Grösse des Rollgeräusches aus. Diese effektive Gesamtrauheit kann durch die direkte Messung von Rad- und Schienenrauheit bestimmt werden:

$$L_{r,tot,i} = (L_{r,veh,i} \oplus L_{r,tr,i}) + A_{3,i}. \quad (5.1)$$

Die direkte Methode eignet sich jedoch auf Grund des hohen Messaufwandes nur für eine geringe Fahrzeuganzahl. Um die Gesamtrauheiten einer möglichst grossen Anzahl von Fahrzeugen zu bestimmen, können die Rauheiten aus den vertikalen Schienenfussbeschleunigungen bei Fahrzeugüberfahrten berechnet werden, diese Methode wird als indirekte Rauheitsmessung bezeichnet:

$$L_{r,tot,i} = L_{aeq,i} - A_2 - 40 \lg(2\pi f_i) - 10 \lg \left(8.686 \frac{N_{ac}}{l_{veh} D_{s,i}} \right). \quad (5.2)$$

Beide Methoden wurden bei den durchgeführten Messungen angewandt. In einer ersten Analyse werden die Ergebnisse der indirekten Messung vorgestellt, anschliessend werden beide Verfahren verglichen.

In Abbildung 5.1 sind die zusammengefassten Ergebnisse der indirekten Rauheitsmessungen an über 1'500 Fahrzeugen der Messstelle 35 dargestellt. Anhand der Darstellung werden die wesentlichen Eigenschaften der indirekten Messmethode deutlich:

1. Der auswertbare Wellenlängenbereich ist abhängig vom Frequenzbereich der Beschleunigungsmessungen und der Fahrgeschwindigkeit. Die Fahrzeuge mit hoher Geschwindigkeit (Re460, ICN, IC, IC2000) ermöglichen die Berechnung auch für grosse Wellenlängen: $50 \text{ cm} > \lambda > 1.2 \text{ cm}$. Bei den langsam fahrenden Güterzügen werden die Rauheiten bei kürzeren Wellenlängen berechnet: $25 \text{ cm} > \lambda > 1.0 \text{ cm}$.
2. Die effektiven Gesamtrauheiten sind abhängig von der Schienenrauheit. Bei den scheibengebremsten Fahrzeugen wird der Peak der Schienenrauheit bei 2.5 cm auch in den Gesamtrauheiten gemessen.
3. Die effektiven Gesamtrauheiten sind abhängig von der Radrauheit. Die Rauheitsamplituden der GG-Klotz gebremsten Fahrzeuge liegen deutlich über den Werten der scheibengebremsten Fahrzeuge.

5.1.1.1 Einfluss der Geschwindigkeit bei der indirekten Rauheitsmessung

Der auswertbare Wellenlängenbereich bei der indirekten Rauheitsmessung ist durch die Umrechnung des Frequenzspektrums in ein Wellenlängenspektrum abhängig von der Vorbeifahrtgeschwindigkeit eines Zuges. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 5.2 anhand von Messungen an NPZ Triebwagen RBDe verdeutlicht. Der Grossteil der Fahrzeuge wurde mit $v \approx 90 \text{ km/h}$ gemessen. Bei einem Messbereich von $f = 100$ bis 4000 Hz ergeben sich nach:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (5.3)$$

die Grenzen des auswertbaren Wellenlängenbereiches von $\lambda_{100} = 25 \text{ cm}$ und $\lambda_{4000} = 0.625 \text{ cm}$. Eine Vorbeifahrt wurde jedoch mit einer Geschwindigkeit von 25 km/h gemessen. Dadurch können die Rauheitsamplituden auch bei

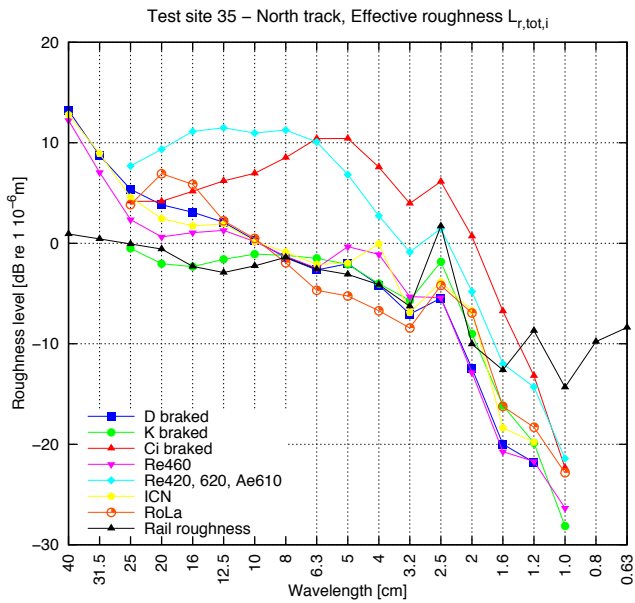


Abbildung 5.1: Effektive Gesamtrauheiten an Messstelle 35 für unterschiedliche Fahrzeugkategorien

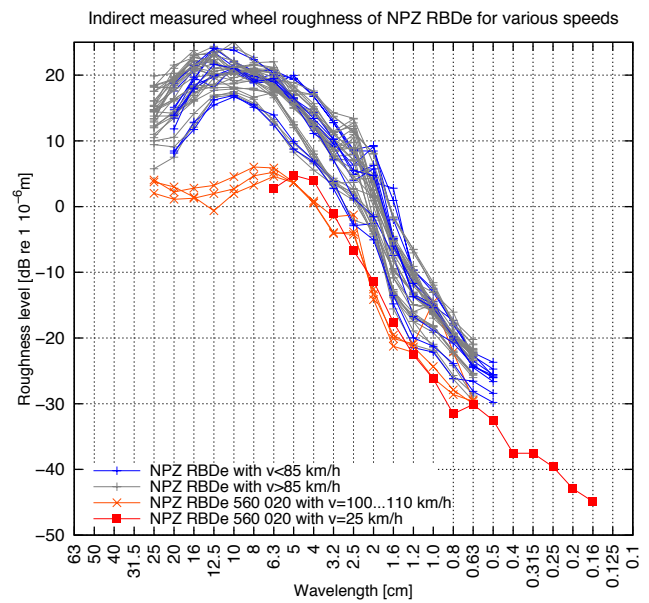


Abbildung 5.2: Indirekte Messung der Radrauheiten von NPZ RBDe Fahrzeugen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten

sehr kurzen Wellenlängen berechnet werden $\lambda_{4000} = 0.174 \text{ cm}$. Durch eine Variation der Vorbeifahrtgeschwindigkeit können somit die Rauheitsamplituden über einen sehr grossen Wellenlängenbereich bestimmt werden.¹

5.1.1.2 Einfluss von Schienen- und Radrauheit auf die Gesamtrauheit

Wenn die effektive Gesamtrauheit als anregende Grösse der Rollgeräusentstehung angesehen wird, muss geklärt werden, welcher der beiden Kontaktpartner den dominierenden Einfluss auf die Gesamtrauheit ausübt. Ein scheibengebremstes Rad mit niedriger Rauheit muss daher auf einer Schiene mit grosser Rauheit den gleichen Emissionspegel hervorrufen wie ein Rad mit hoher Rauheit auf niedriger Schienenrauheit. Um diese Zusammenhänge besser zu verstehen wird in Abbildung 5.3 der Einfluss der Schienenrauheit auf die effektive Gesamtrauheit für scheiben- und GG-Klotz gebremste Fahrzeuge untersucht. Bei scheibengebremsten Fahrzeugen wird die Gesamtrauheit fast ausschliesslich von der Schienenrauheit dominiert, die Amplitude der Gesamtrauheit orientiert sich an der Schienenrauheit der jeweiligen Messstelle. Bei den GG-Klotz gebremsten Fahrzeugen ist die Gesamtrauheit nahezu unabhängig von der Schienenrauheit. Der Vergleich mit den direkt gemessenen Radrauheiten der 2-achsigen, GG-Klotz gebremsten Güterwagen des Messzuges zeigt den dominierenden Einfluss der Radrauheiten. Von den vier denkbaren Kombinationsmöglichkeiten aus Rad- und Schienenrauheiten führt demnach nur eine Kombination zu einem niedrigen Rollgeräusch:

		Schienenrauheit	
		niedrig	hoch
Radrauheit	niedrig	niedriges Rollgeräusch	hohes Rollgeräusch
	hoch	hohes Rollgeräusch	hohes Rollgeräusch

Diese schematischen Zusammenhänge sind in Abbildung 5.4 anhand realer Messwerte verdeutlicht. In Abhängigkeit vom Pegel der Schienenrauheit $L_{\lambda,CA}$ sind die Vorbeifahrtpegel für scheiben- und GG-Klotz gebremste Fahrzeuge dargestellt. Eindeutig ist die Abhängigkeit der Emissionspegel der scheibengebremsten Fahrzeuge von der Schienenrauheit zu erkennen. Die Emissionswerte der GG-Klotz gebremsten Fahrzeuge sind nahezu unabhängig von der Rauheitskategorie der Schiene. Weiterhin kann gezeigt werden, dass bei scheibengebremsten Fahrzeugen die Differenz der Rauheitspegel $L_{\lambda,CA}$ der Veränderung der Emissionspegel $L_{p,Aeq}$ entspricht. Dies ist in der zugehörigen Tabelle in Abbildung 5.4 aufgeführt. Bei gleichen Oberbautypen entspricht die Änderung der Emissionspegel $\Delta L_{p,Aeq}$ zwischen zwei Messstellen der Änderung des Rauheitspegels $\Delta L_{\lambda,CA}$. Dies ermöglicht eine Abschätzung der Emissionspegel

¹Eine Besonderheit bei den gemessenen NPZ Zügen ist in Abbildung 5.2 ersichtlich. Das Fahrzeug RBDe 560 020 weist im Vergleich zu den anderen NPZ RBDe Fahrzeugen deutlich niedrigere Rauheits- und Emissionswerte auf. Dies kann möglicherweise auf fehlende Putzklötze hindeuten. Das Beispiel zeigt daher auch das Lärminderungspotenzial dieser Fahrzeuge bei einem Verzicht auf Putzklötze.

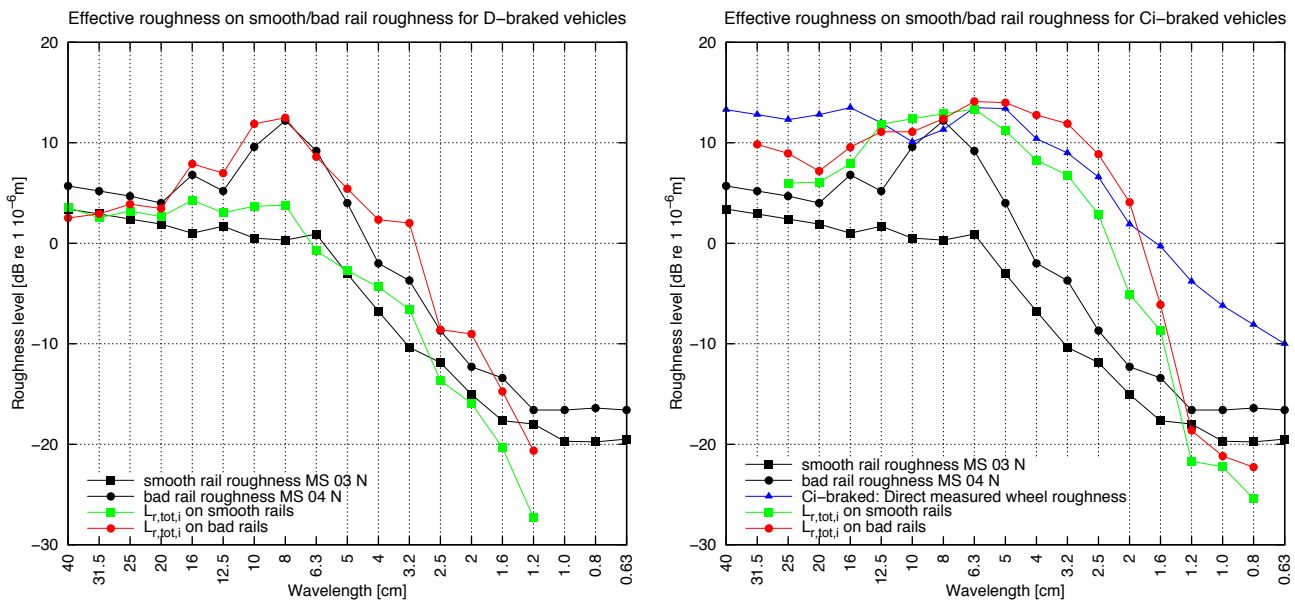
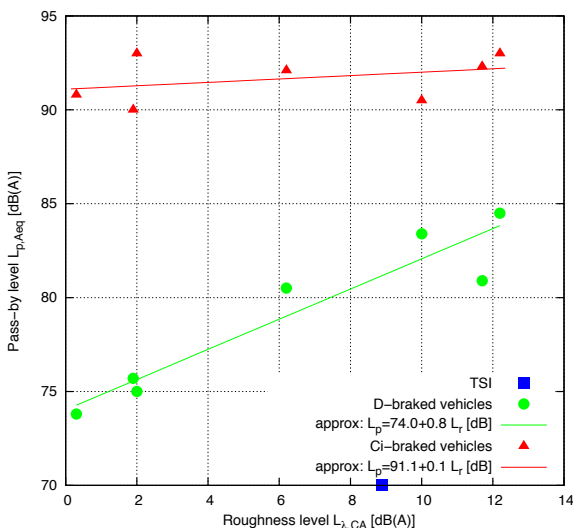


Abbildung 5.3: Einfluss von Rad- und Schienenrauheit auf die Gesamtrauheit von scheibengebremsten Fahrzeugen (linke Abbildung) und GG-Klotz gebremsten Fahrzeugen (rechte Abbildung) bei niedriger und hoher Schienenrauheit



	03N – 04N	03N – 06S	03N – 07N
$\Delta L_{\lambda, CA}$	7.7 dB(A)	2.0 dB(A)	9.7 dB(A)
D-braked $\Delta L_{p, Aeq}$	7.7 dB(A)	1.9 dB(A)	9.6 dB(A)
Ci-braked $\Delta L_{p, Aeq}$	0.5 dB(A)	0.7 dB(A)	0.3 dB(A)

Abbildung 5.4: Abhängigkeit des Vorbeifahrtpegels vom Rauheitspegel für scheibengebremste und GG-Klotz gebremste Fahrzeuge auf Stahlschwellenoberbau

bei veränderter Schienenrauheit. Bei Fahrzeugen mit hoher Radrauheit kann diese Abschätzung nicht erfolgen, die Differenz der Rauheitspegel repräsentiert nicht die Änderung der Emissionspegel.

Die Untersuchungen zeigen eindeutig, dass bei der Berechnung und Bewertung des Rollgeräusches immer beide Kontaktpartner berücksichtigt werden müssen. Dieses Fazit bestätigt die zentrale Rolle der Rauheiten im Emissionsmodell und hat weitreichende Auswirkungen auf die Durchführung und Bewertung von Lärminderungsmaßnahmen durch Schienenschleifen und Güterwagensanierung.

5.1.1.3 Einfluss der Track Decay Rate bei der indirekten Rauheitsmessung

Für die indirekte Berechnung der effektiven Rauheiten muss die vertikale Track Decay Rate (TDR) im Messquerschnitt bekannt sein. Bei der Auswertung der durchgeführten Messungen wurde an Messquerschnitten mit unbekannter TDR die mittlere TDR des Oberbautyps nach Abbildung 4.7 verwendet. Zur Abschätzung des dabei entstehenden Fehlers bei der indirekten Berechnung werden in Abbildung 5.5 für die Fahrzeuge des Messzugs die effektiven Gesamtrauheiten für zwei Oberbautypen auf Basis von drei unterschiedlichen TDRs berechnet:

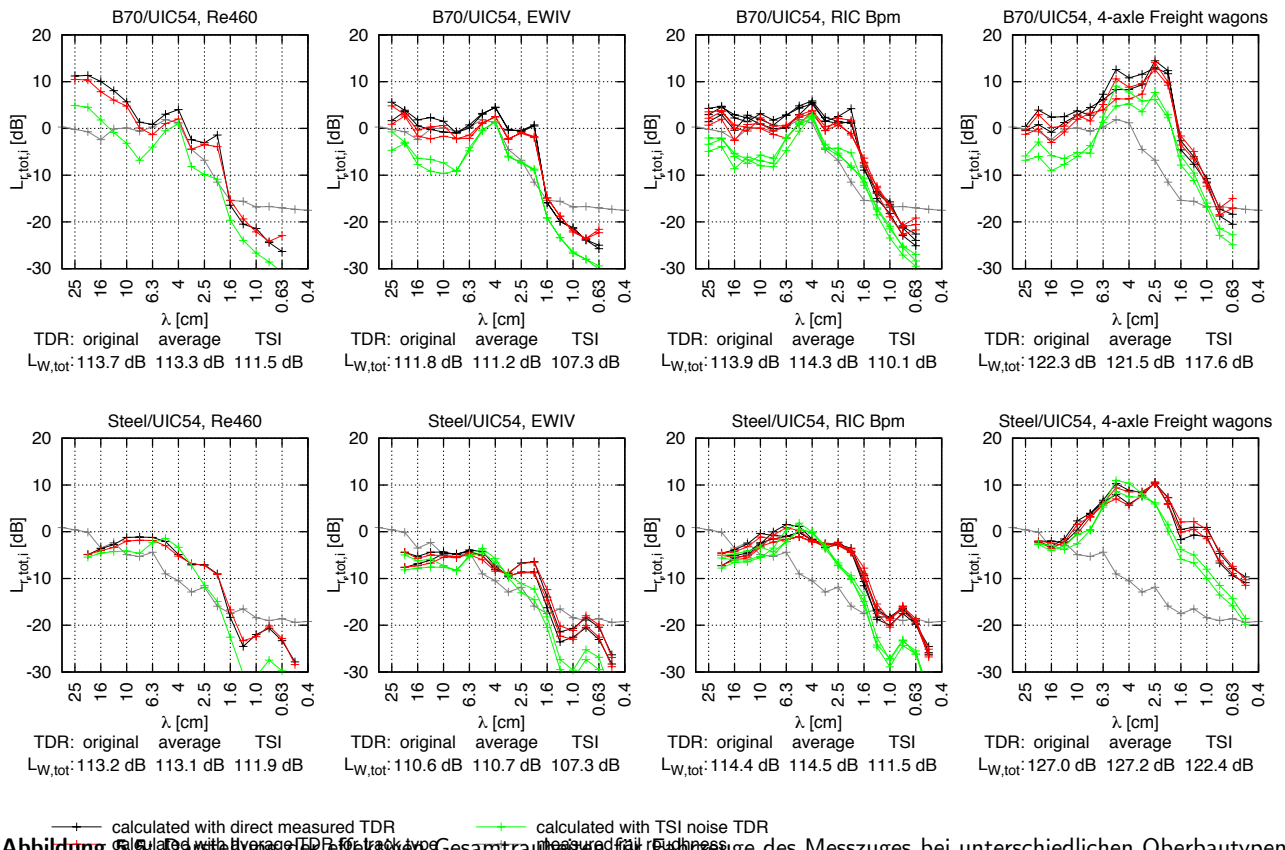


Abbildung 5.5: Darstellung der effektiven Gesamttrauenheiten für Fahrzeuge des Messzuges bei unterschiedlichen Oberbautypen und veränderten Track Decay Rates nach Gleichung (5.2) und Angabe der daraus berechneten Emissionspegel

1. die im Messquerschnitt mit der direkten Hammermethode ermittelten vertikalen TDRs
2. die durchschnittliche TDR für den jeweiligen Oberbau
3. die nach TSI Lärm vorgegebene vertikale TDR

Die Abweichungen in den Rauheitsspektren zwischen den Berechnungen mit direkt gemessener TDR und durchschnittlicher TDR des jeweiligen Oberbautyps sind für alle untersuchten Fahrzeug/Oberbaukombinationen sehr gering, die maximalen Abweichungen pro Wellenlänge sind kleiner 2 dB. Bei Verwendung der TDR nach TSI Lärm werden für alle Oberbautypen und Fahrzeuge zu niedrige Rauheitsspektren berechnet.

In Abbildung 5.5 sind weiterhin die berechneten Emissionswerte für Fahrzeuge des Messzuges angegeben. Die Unterschiede in den effektiven Rauheiten führen demnach zu entsprechenden Abweichungen in den berechneten Emissionspegeln. Bei Rechnungen mit originaler und durchschnittlicher TDR eines Oberbautyps sind die Abweichungen für alle Fahrzeuge kleiner 0.5 dB. Bei Verwendung der effektiven Rauheiten basierend auf der TSI TDR werden deutlich zu niedrige Emissionspegel berechnet. Diese Vergleiche zeigen, dass der Fehler bei Verwendung einer durchschnittlichen TDR pro Oberbautyp zu Abweichungen innerhalb der Messgenauigkeit führt. Im Hinblick auf eine netzweite, indirekte Messung von Schienenrauheiten mit einem Messzug ist festzustellen, dass neben der Aufzeichnung der vertikalen Achslagerbeschleunigungen auch der Oberbautyp erfasst werden sollte (vgl. Abschnitt 6.4.5).

5.1.2 Indirekte Messung der Schienenrauheit

Eine indirekte Messung der Schienenrauheit kann bei bekannter Gesamt- und Radrauheit erfolgen.

$$L_{r,tr,indir} = (L_{r,tot,i} - A_{3,i}) \ominus L_{r,veh,i} \quad (5.4)$$

Die Voraussetzung für dieses Vorgehen ist eine niedrige Radrauheit, da in diesem Fall die effektive Gesamttrauenheit von der Schienenrauheit dominiert wird.

5.1.2.1 Vergleich von direkt und indirekt gemessener Schienenrauheit

Bei dem Vergleich der direkt und indirekt gemessenen Schienenrauheit müssen folgende Punkte beachtet werden:

- Bei der direkt gemessenen Rauheit ist der tatsächliche Berührungspunkt von Rad und Schiene nicht bekannt, somit auch nicht die tatsächlich wirksame Gesamtrauheit bei der Achsüberfahrt.
- Bei der direkt gemessenen Schienenrauheit werden die Messpositionen 3/4 und 5/6 [87] im Mikrofonquerschnitt verwendet.
- Die Rauheitsspektren der direkten Messung sind über die 3 Aufnehmerspuren (DP_1 bis DP_3) energetisch gemittelt.
- Bei der indirekten Methode können die tatsächlichen Radrauheiten von den angenommenen Default-Werten abweichen.
- Für den Kontaktfilter werden Default-Werte angenommen, die von der realen Situation abweichen können.

Ein Vergleich beider Messmethoden ist in Abbildung 5.6 für die Messstelle 02 nördliche Schiene, nördliches Gleis angegeben. Die indirekten Rauheiten werden aus den Überfahrten von scheibengebremsten EWIV und NPZ Bt Fahrzeugen berechnet, da für diese Fahrzeuge die Forderung nach niedrigen Radrauheiten erfüllt ist. Die indirekte Methode bestimmt die direkt gemessenen Schienenrauheiten für Wellenlängen $\lambda > 4.0$ cm mit grosser Genauigkeit. Bei kleineren Wellenlängen nimmt der Fehler in der indirekten Berechnung zu, da die Radrauheit grösser ist als die zu bestimmende Schienenrauheit. Die Gesamtrauheit wird daher zunehmend von den Radrauheiten dominiert.

Die Unterschiede in den Rauheitsamplituden der drei Aufnehmerspuren der direkten Messung entsprechen der Standardabweichung der indirekt gemessenen Schienenrauheiten. Damit wird gezeigt, dass sich bei der Überfahrt einer Vielzahl von Fahrzeugen eines Typs² unterschiedliche Kontaktpunkte zwischen Rad und Schiene ausbilden können. Der mögliche Kontaktbereich wird dabei durch die 3 Aufnehmerspuren der direkten Messung erfasst.

5.1.2.2 Einfluss unterschiedlicher Schienenrauheiten im Fahrspiegel auf das Rollgeräusch

Die indirekte Messung der Schienenrauheiten an Messstelle 02 führte zu dem Ergebnis, dass innerhalb des Fahrspiegels deutliche Unterschiede in den Schienenrauheiten auftreten und sich der Rad-Schiene-Kontakt über den gesamten Fahrspiegel ausbilden kann. Dies muss nach den bisherigen Erkenntnissen zu unterschiedlichen Emissionspegeln führen. Diese Annahme wird bereits durch den Vergleich der Standardabweichungen der Emissionspegel ($s_p = 1.8$ dB(A)) mit der Differenz der Rauheitsamplituden im Fahrspiegel $\Delta L_{\lambda,CA} = 1.9$ dB(A) deutlich. Für einen genaueren Vergleich werden in Abbildung 5.7 für das nördliche Gleis der Messstelle 02 die mittleren Vorbeifahrtpegel der EWIV und NPZ Bt Fahrzeuge für $v = 110$ km/h angegeben. Beide Fahrzeugtypen weisen identische Schalleistungsspektren auf. Zusätzlich werden die Standardabweichungen der Rauheits- und Emissionspegel beider Fahrzeugtypen in Abhängigkeit von der Frequenz angegeben.³ Beide Standardabweichungen zeigen eine deutliche Übereinstimmung. Die unterschiedlichen Emissionswerte der gemessenen Fahrzeuge können somit auf die unterschiedlichen Kontaktbereiche zwischen Rad und Schiene zurückgeführt werden. Im mittleren Frequenzbereich werden sowohl für die Emissions- als auch für Rauheitspegel identische Standardabweichungen gemessen. Bei hohen und tiefen Frequenzen nehmen die Standardabweichungen der indirekt gemessenen Schienenrauheiten zu, da die Radrauheiten die Gesamtrauheiten zunehmend dominieren.

Die durchgeführten Vergleiche zeigen die Grenzen der erreichbaren Genauigkeit der Modellrechnung auf. Wird für einen Messquerschnitt nur eine Schienenrauheit angenommen, kann ein Fehler in der Emissionsrechnung in der Größenordnung der Standardabweichung der Rauheiten im Fahrspiegel auftreten. Die Genauigkeit kann dann erhöht werden, wenn die tatsächlich wirksame Schienen- und Radrauheit im Kontaktbereich bekannt ist.

Die durchgeführten Überlegungen lassen sich auch auf den Einfluss von Radrauheiten übertragen. Die Messung der Radrauheiten erfolgt ebenfalls in drei Aufnehmerspuren am Radumfang. Wenn pro Rad deutliche Unterschiede in den Rauheitsamplituden gemessen werden, können auch hier die angesprochenen Ungenauigkeiten in der Emissionsrechnung auftreten.

5.1.2.3 Indirekte Schienenrauheitsmessung für drei Rauheitskategorien

Im vorherigen Abschnitt konnte bereits der Vergleich zwischen direkt und indirekt gemessener Schienenrauheit der Rauheitskategorie "bad" gezeigt werden. Dieses Ergebnis sollen nun auf die Kategorien "average" und "smooth" erweitert werden. Anhand der bereits durchgeführten Auswertung in Abbildung 4.13 wird das Problem der Berechnung sehr niedriger Schienenrauheiten deutlich: die Radrauheiten von scheibengebremsten Fahrzeugen liegen in einigen

²Die indirekte Messung der Schienenrauheiten basiert auf über 200 Vorbeifahrten.

³Die Umrechnung der Rauheiten des Wellenlängenspektrums in ein Terzspektrum erfolgt für $v = 110$ km/h.

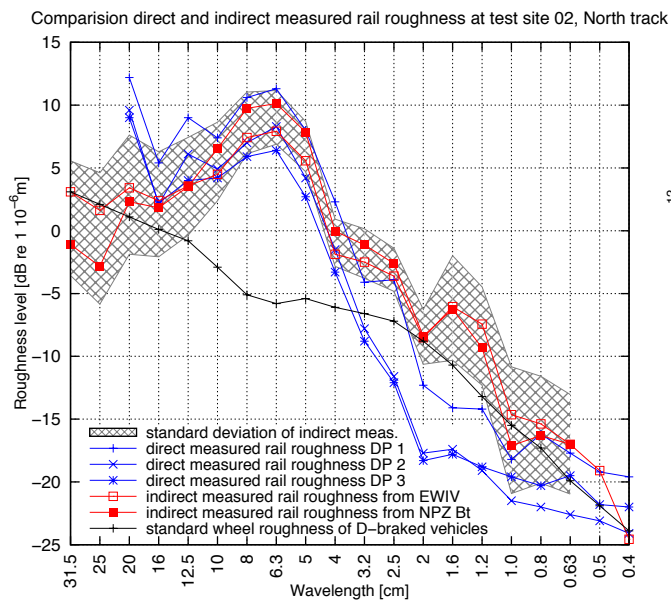


Abbildung 5.6: Vergleich von direkt und indirekt gemessenen Schienenrauheiten mit Angabe der Standardabweichung der indirekten Schienenrauheiten

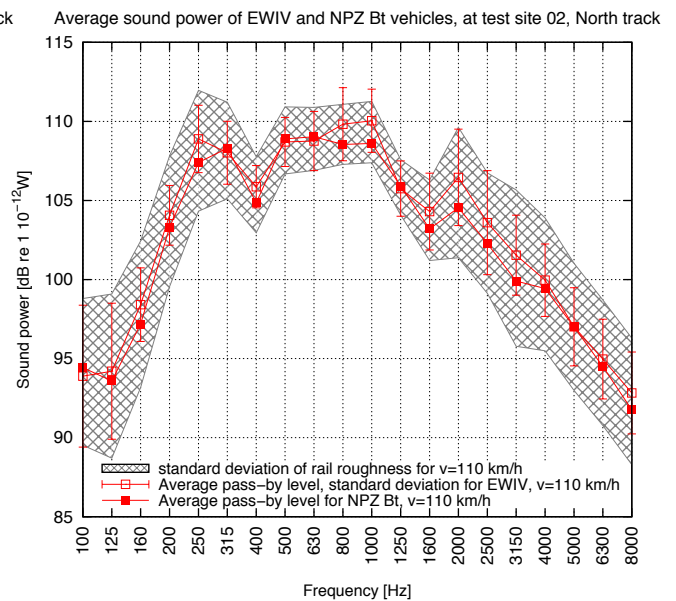


Abbildung 5.7: Mittlere Schalleistungsspektren für EWIV und NPZ Bt Fahrzeuge bei $v = 110 \text{ km/h}$ an Messstelle 02 nördliches Gleis, sowie Angabe der Standardabweichung der Schalleistungen und der effektiven Gesamtrauheiten

Wellenlängenbereichen unter den Schienenrauheiten. Die eingangs formulierte Forderung, dass die effektive Gesamtrauheit von der Schienenrauheit dominiert werden muss, ist demnach nicht mehr erfüllt. Es ist zu erwarten, dass in diesen Fällen die indirekte Messung zu hohe Rauheitsamplituden liefert. In Tabelle 5.1 werden für drei Messstellen mit unterschiedlichen Rauheitskategorien die direkt und indirekt gemessenen Schienenrauheiten verglichen. Die indirekt gemessenen Schienenrauheiten werden für anschliessende Emissionsrechnung verwendet. Dies ermöglicht die Abschätzung des Fehlers bei Verwendung der indirekten Messdaten. Die folgenden Schienenrauheitskategorien werden untersucht:

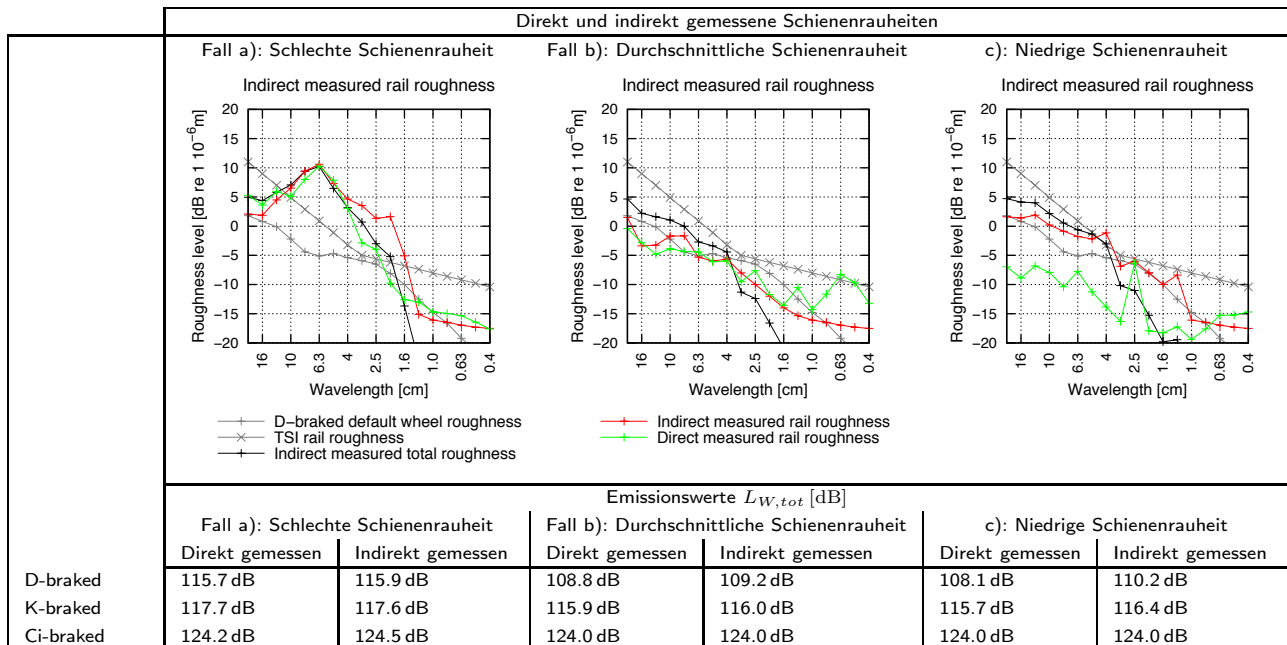
Fall a) Schlechte Schienenrauheit Der dargestellte Fall entspricht der Situation an Messstelle 04, nördliches Gleis. Die direkt gemessene Schienenrauheit liegt über den Werten der Radrauheiten, eine indirekte Berechnung der Schienenrauheit ist demnach möglich. Die Rauheiten im Wellenlängenbereich um 2.5 cm werden bei der indirekten Methode zu hoch berechnet. Das pegelbestimmende Rauheitsmaximum bei 6.3 cm wird hingegen genau berechnet. Die Abweichungen in den anschliessenden Emissionsrechnungen sind bei allen Fahrzeugen kleiner 0.5 dB.

Fall b) Durchschnittliche Schienenrauheit Der dargestellte Fall entspricht der Situation an Messstelle 35, nördliches Gleis. Radrauheit und direkt gemessene Schienenrauheit weisen nahezu identische Amplituden auf. Die indirekte Berechnung der Schienenrauheit führt in diesem Anwendungsfall ebenfalls zu genauen Ergebnissen. Die Abweichungen in den Emissionsrechnungen liegen auch noch bei scheibengebremsten Fahrzeugen unter 0.5 dB.

Fall c) Niedrige Schienenrauheit Der dargestellte Fall entspricht der Situation an Messstelle 35, südliches Gleis. Die direkt gemessene Schienenrauheit weist sehr niedrige Amplituden auf. Der Vergleich mit den Radrauheiten zeigt bereits, dass eine korrekte Berechnung der Schienenrauheit nicht möglich. Die Radrauheiten liegen über den Werten der Schienenrauheiten und dominieren somit die effektive Gesamtrauheit. Bei Verwendung der indirekt gemessenen Schienenrauheit liegen die berechneten Emissionspegel für scheibengebremste Fahrzeuge um bis zu 2 dB über den Werten der Rechnung mit direkt gemessener Schienenrauheit. Bei GG-Klotz gebremsten Güterwagen haben die Abweichungen in den Schienenrauheiten keinen Einfluss auf die Emissionspegel. Diese Untersuchungen zeigen, dass eine indirekte Messung der Schienenrauheiten der Kategorien "average" und "bad" möglich ist. Bei der Kategorie "smooth" werden durch den zunehmenden Einfluss der Radrauheiten zu hohe Schienenrauheiten berechnet.

Tabelle 5.1: Vergleich von direkt und indirekt gemessenen Schienenrauheiten für 3 Rauheitskategorien

$L_{\lambda,CA}$ dB(A) Kategorie	a): Schlechte Schienenrauheit		b): Durchschnittliche Schienenrauheit		c): Niedrige Schienenrauheit	
	Direkt gemessen	Indirekt gemessen	Direkt gemessen	Indirekt gemessen	Direkt gemessen	Indirekt gemessen
	13.4	10.5	4.3	5.7	1.6	6.2
	bad	bad	average	average	smooth	average



5.1.3 Indirekte Messung der Radrauheiten

Analog zu den Überlegungen zur indirekten Messung von Schienenrauheiten können auch Radrauheiten mit der indirekten Messmethode bestimmt werden. Die Forderung für dieses Vorgehen ist, dass die Schienenrauheit in einem Messquerschnitt deutlich unterhalb der zu messenden Radrauheit liegt. Ist diese Forderung erfüllt, wird die effektive Gesamtrauheit von der Radrauheit dominiert. Für GG-Klotz gebremste Fahrzeuge ist diese Forderung in den meisten Fällen erfüllt, bei scheibengebremsten Fahrzeugen muss ein Messquerschnitt mit sehr niedriger Schienenrauheit ausgewählt werden. Der Vorteil der indirekten Radrauheitsmessung liegt in der Möglichkeit der Messung einer Vielzahl von Fahrzeugen. In Abbildung 5.8 sind für die Messstelle 35 die indirekt berechneten Radrauheiten an über 270 scheibengebremsten EWIV Wagen und GG-Klotz gebremsten Güterwagen dargestellt. Zwischen beiden Fahrzeugkategorien kann ein deutlicher Unterschied in den Rauheitsamplituden, insbesondere im akustisch relevanten mittleren Wellenlängenbereich, festgestellt werden. Die Differenz in den Rauheitspegeln beträgt bis zu 15 dB. Die unterschiedlichen Vorbeifahrtpegel beider Fahrzeugkategorien lassen sich auf diesen Unterschied zurückführen.

5.1.3.1 Vergleich von direkt und indirekt gemessenen Radrauheiten

Damit ein Vergleich zwischen beiden Messmethoden möglich ist, wurden die Radrauheiten der Güterwagen des Messzuges mit der direkten Messmethode erfasst. Diese Messdaten können nun mit den indirekt gemessenen Radrauheiten verglichen werden. Dazu erfolgt in Abbildung 5.9 ein Vergleich von indirekt gemessenen Radrauheiten an 5 Messstellen mit den direkt gemessenen Radrauheiten. Der Vergleich zeigt eine gute Übereinstimmung der Resultate beider Messverfahren. Die maximale Differenz der Rauheitspegel beträgt 0.5 dB(A). Die Radrauheiten werden trotz unterschiedlicher Oberbautypen korrekt bestimmt. Der Einfluss der Fahrgeschwindigkeit auf die indirekte Messung ist in Abbildung 5.10 für die 2-achsigen Güterwagen des Messzuges dargestellt. Auch für diesen Anwendungsfall liefert die indirekte Messung eine hohe Übereinstimmung mit den direkt gemessenen Radrauheiten.

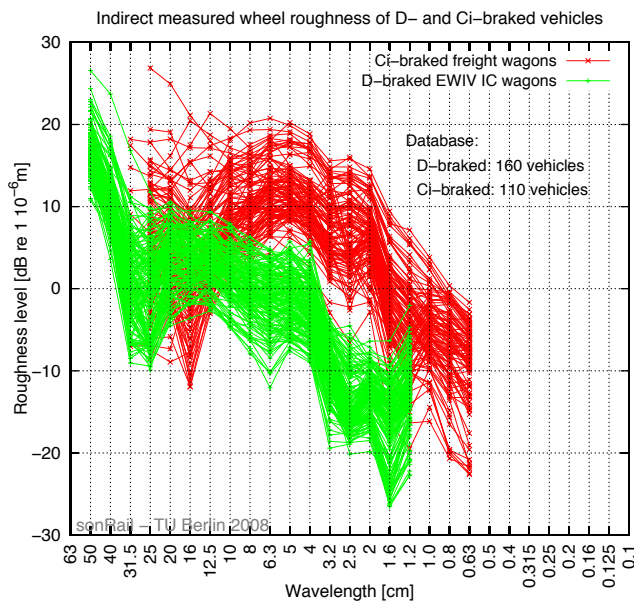


Abbildung 5.8: Indirekt gemessene Radrauheiten von scheibengebremsen EWIV Fahrzeugen mit 200 km/h und GG-Klotz gebremsten Güterwagen mit 80...100 km/h an Messstelle 35, südliches Gleis

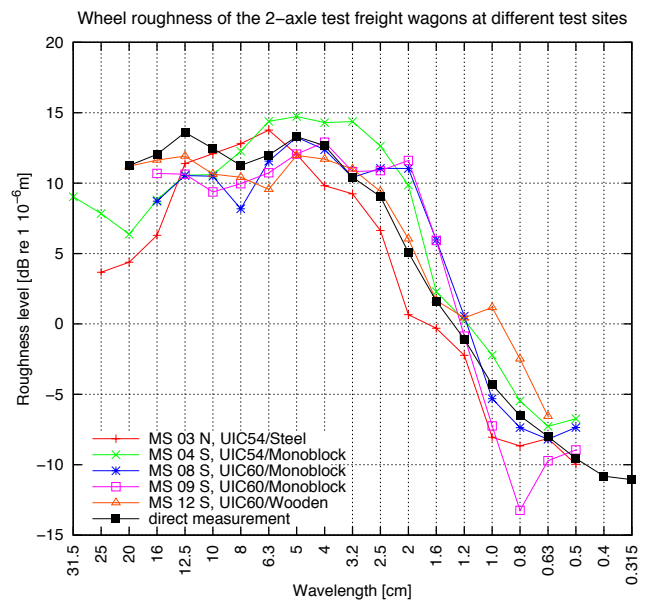


Abbildung 5.9: Indirekte Messung der Radrauheiten eines 2-achsigen Güterwagens an unterschiedlichen Messstellen und Vergleich mit direkt gemessener Radrauheit

5.1.3.2 Indirekte Messung der Radrauheiten des NiNa Messzuges

Bei den Messfahrten des NiNa Messzuges wurden innerhalb des Zugverbandes deutliche Unterschiede in den Emissionspegeln gemessen⁴. Die Pegel der Endwagen liegen an allen Messstellen deutlich unter den Werten der Mittelwagen, obwohl alle Achsen des Fahrzeugs scheibengebremst und die Achsen der Endwagen angetrieben sind. Als mögliche Ursache für dieses Verhalten werden unterschiedliche Radrauheiten vermutet. Da die Räder des NiNa Messzuges nicht mit der direkten Messmethode vermessen worden sind, wird das indirekte Messverfahren angewendet. Die Ergebnisse der indirekten Messung an Messstelle 12 sind in Abbildung 5.11 gezeigt. Die Radrauheiten der Mittelwagen liegen im relevanten Wellenlängenbereich über den Rauheiten der Endwagen. Die abweichenden Emissionspegel können somit auf unterschiedliche Radrauheiten zurückgeführt werden.

5.1.3.3 Indirekte Messung von Rauheiten einzelner Räder

Bei den bisherigen Auswertungen erfolgte die indirekte Messung der Radrauheiten gemittelt für alle Achsen eines Fahrzeuges. Die Methode der indirekten Radrauheitsmessung kann jedoch auch für die Berechnung von Rauheiten einzelner Räder angewendet werden. Dabei ist $N_{ac} = 1$ und die Dauer der Vorbeifahrt T_x ist die Zeit, in der eine Achse den Weg von $l = 1.8 \text{ m}$ zurücklegt [93]. Diese Länge wird so gewählt, dass der Einfluss benachbarter Räder verringert wird, wobei der Weg von -0.9 bis $+0.9 \text{ m}$ um die Radposition betrachtet wird:

$$L_{r,tot,i}(f_i) = L_{aeq,i}(f_i) - A_2 - 40 \lg(2\pi f_i) - 10 \lg\left(\frac{8.686}{D_{s,i} T_x v}\right) \quad (5.5)$$

In Abbildung 5.12 werden die direkt und indirekt gemessenen Radrauheiten der 4-achsigen Güterwagen des Messzuges verglichen. Bei der direkten Messung werden die Rauheitsamplituden aller 3 Messaufnehmer pro Rad dargestellt. Die Ergebnisse der indirekten Messung werden aus einer Vorbeifahrt an Messstelle 03, südliches Gleis, südliche Schiene bei $v = 80 \text{ km/h}$ berechnet. Der Vergleich der Radrauheiten zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen direkter und indirekter Messung. Die Amplituden und die spektralen Verläufe der Rauheiten können mit der indirekten Messung gut reproduziert werden. Im pegelbestimmenden, mittleren Wellenlängenbereich werden die geringsten Abweichungen in den Rauheitsamplituden gemessen. Auf mögliche Anwendungsbereiche dieser Methode wird in Abschnitt 6.4.4 eingegangen.

⁴Dieses Verhalten der NiNa Züge der BLS wurde auch während Messungen an der Strecke Bern-Thun bei regulär verkehrenden Fahrzeugen festgestellt.

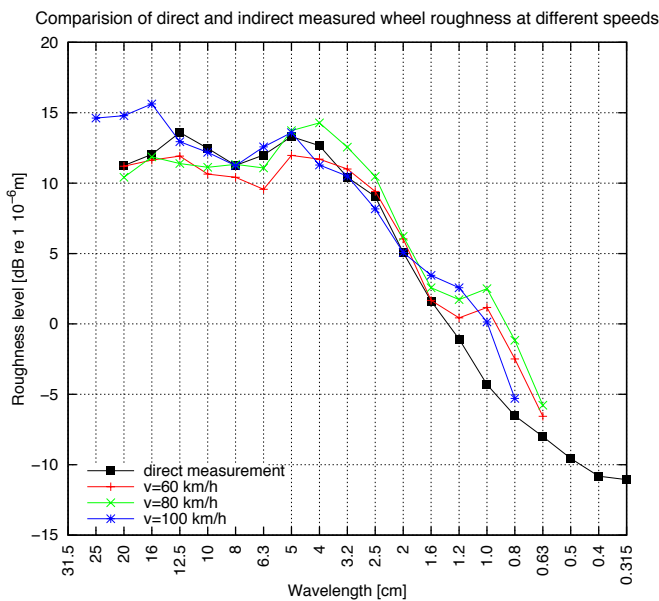


Abbildung 5.10: Indirekte Messung der Radrauheiten von Güterwagen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten an Messstelle 12

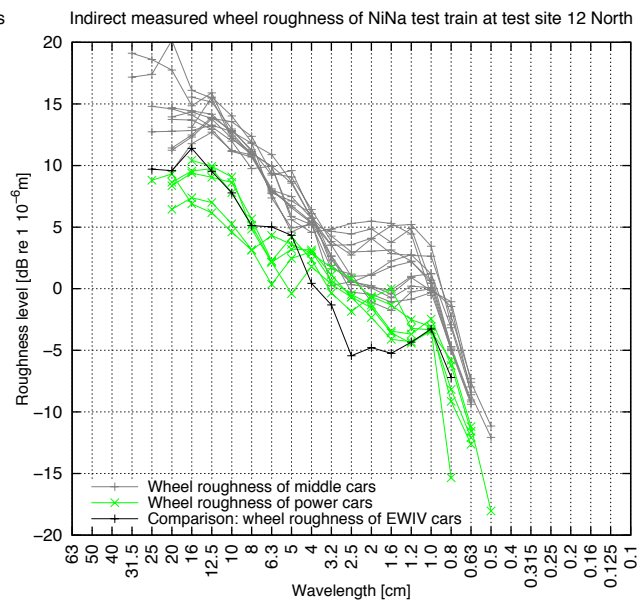


Abbildung 5.11: Indirekte Messung der Radrauheiten des NiNa Messzuges an Messstelle 12 getrennt nach Trieb- und Mittelwagen

5.2 Track Decay Rate und Oberbautypen

Als elementare Parameter der Rollgeräuschentstehung konnten die Rad- und Schienenrauheiten herausgestellt werden. Die dabei in das System eingeleiteten Schwingungen werden über Fahrzeug und Oberbau als Luftschall abgestrahlt. Der Anteil des vom Oberbau abgestrahlten Rollgeräusches ist im Wesentlichen von den dynamischen Eigenschaften des Gleises bestimmt. Diese Eigenschaften können über die Track Decay Rate (TDR) [dB/m] gemessen werden. Die TDR eines Gleises beschreibt, mit wieviel Dezibel eine Schwingungsanregung pro einem Meter Gleisabschnitt abnimmt. Bei schwachgedämpften Oberbautypen können sich die Schwingungen über einen längeren Gleisabschnitt ausbreiten, die Abstrahlfläche nimmt zu und damit auch das vom Oberbau abgestrahlte Rollgeräusch. Für die akustische Beschreibung von Oberbautypen, sowie für die Trennung des Gesamtrollgeräusches in Oberbau- und Fahrzeuganteile ist daher die Messung und Analyse der TDR notwendig.

5.2.1 Eigenschaften der Track Decay Rate

Die TDR kann in vertikaler und lateraler Richtung gemessen werden, wobei für die Rollgeräuschabstrahlung die vertikale TDR von entscheidender Bedeutung ist [110]. Die TDR eines Oberbaus weist charakteristische Eigenschaften auf, die in Abbildung 5.13 gezeigt werden. Im unteren Frequenzbereich wird eine sehr hohe TDR gemessen, da die Schienen über die Zwischenlagen mit den Schwellen gekoppelt sind. Oberhalb der Resonanzfrequenz der Zwischenlagen werden Schwellen und Schiene entkoppelt, die Dämpfung der Schiene nimmt deutlich ab [110]. Lokale Pegelmaxima treten in der Regel zwischen 1.0 – 1.25 kHz (Pinned-pinned frequency) und zwischen 4.0 – 5.0 kHz (Foot-flapping mode) auf.

5.2.1.1 Zwischenlagensteifigkeit

Die akustischen Eigenschaften von Oberbautypen werden im Wesentlichen durch die Steifigkeit der Zwischenlagen beeinflusst. Als Zwischenlagen werden elastische Elemente zwischen Schienenfuss und Schwellen bzw. Schienenbefestigung bezeichnet. Zahlreiche Untersuchungen gehen vertieft auf den Einfluss elastischer Elemente im Gleis ein [111] – [114]. Als wesentlicher Parameter für die akustischen Eigenschaften eines Oberbautyps wird die Steifigkeit der Zwischenlagen angesehen. Die Zwischenlagensteifigkeit beeinflusst die Koppelung der Schiene an die Schwellen und hat damit einen Einfluss auf das Abstrahlverhalten des Oberbaus. Die angeführten Untersuchungen zeigen, dass bei tiefen Frequenzen < 400 Hz das Rollgeräusch überwiegend von den Schwellen abgestrahlt wird. In diesem Bereich weist das System eine sehr hohe Dämpfung auf, da die Schiene über die Zwischenlagen gut an die Schwellen angebunden ist, wobei die Zwischenlagensteifigkeit die angegebene Frequenzgrenze bestimmt. In Abbildung 5.14 sind

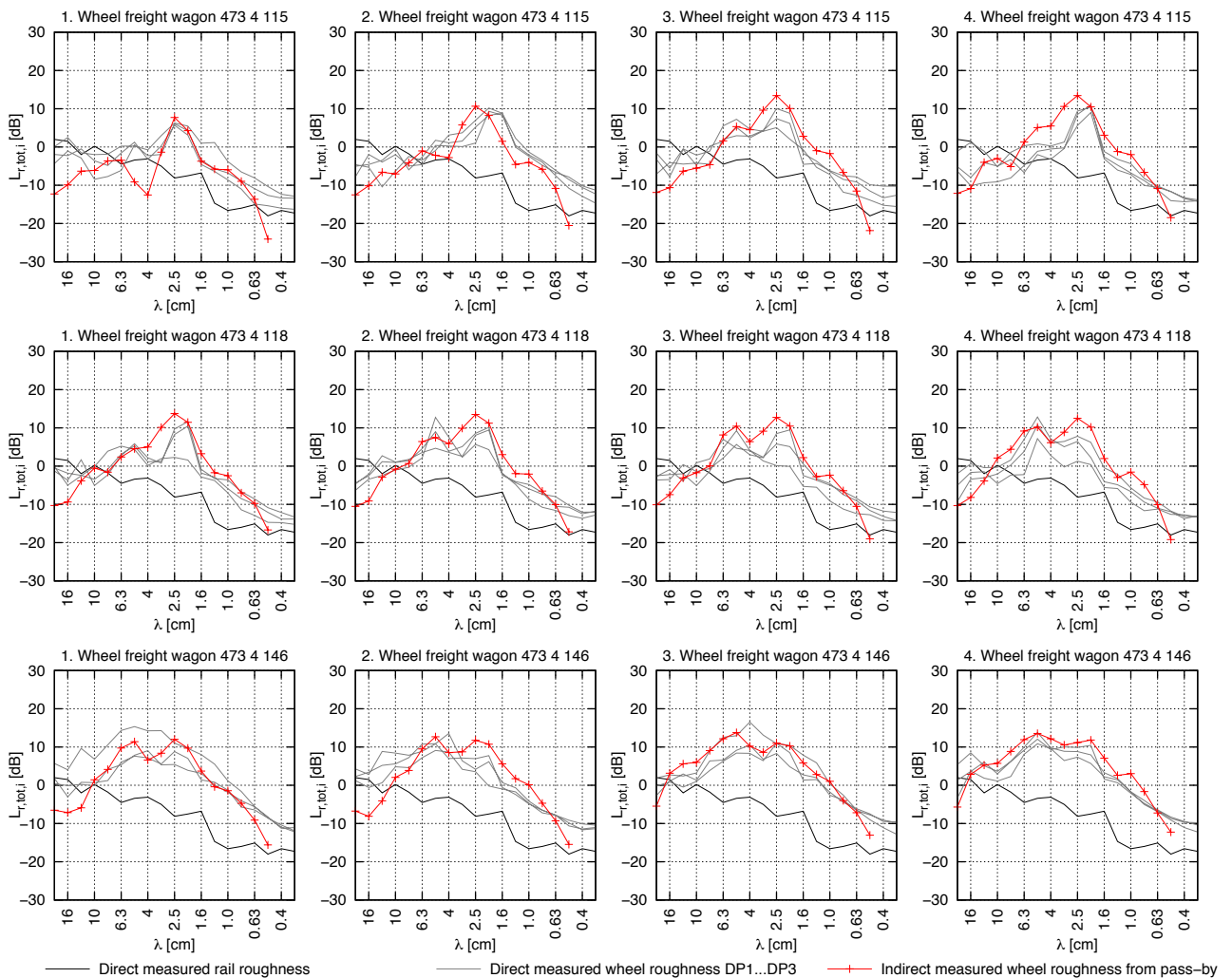


Abbildung 5.12: Indirekte Messung der Rauheiten für jedes Rad der 4-achsigen Güterwagen des Messzuges an Messstelle 03, südliches Gleis, südliche Schiene

für einen B91/UIC60 Oberbau die TDRs für zwei unterschiedliche Zwischenlagensteifigkeiten dargestellt. Die weiche Zwischenlage hat eine Nennsteifigkeit von $\approx 200 \text{ N/mm}^2$, die harte Zwischenlage liegt bei $> 800 \text{ N/mm}^2$. Deutlich ist der Einfluss der Zwischenlage zu erkennen. Bei der weichen Zwischenlage wird eine hohe TDR nur bis zur Frequenz 315 Hz gemessen und fällt danach deutlich ab. In [111] wird bei ähnlich niedrigen Nennsteifigkeiten eine Frequenzgrenze um 250 Hz angegeben. Bei der harten Zwischenlage wird eine Koppelung der Schiene an die Schwelle bis zu einer Frequenz von 630 Hz erreicht und entspricht ebenfalls den Ergebnissen in [111].

5.2.1.2 Pinned-pinned Frequenz

Vertikale TDRs weisen im Bereich zwischen 1000 und 1250 Hz oft lokale Maxima auf. Diese Maxima werden als pinned-pinned Frequenz bezeichnet und ergeben sich aus einer Resonanz zwischen der vertikalen Biegeeigenform der Schiene im Schwellenfach und dem Schwellenabstand von 60 cm. In [115] wird diese Frequenz rechnerisch bei 1058 Hz und in [116] bei 1070 Hz berechnet, in Abhängigkeit von der angesetzten Biegesteifigkeit der Schiene. In Abbildung 5.15 sind die Übertragungsfunktionen eines Oberbaus bei Hammerpositionen im Schwellenfach und über den Schwellen gezeigt. Die Übertragungsfunktionen der Positionen im Schwellenfach zeigen bei 1075 Hz deutliche Pegelmaxima, diese entfallen bei den Positionen über den Schwellen, hier erfolgt die Anregung in den Knoten der vertikalen Biegeeigenformen.

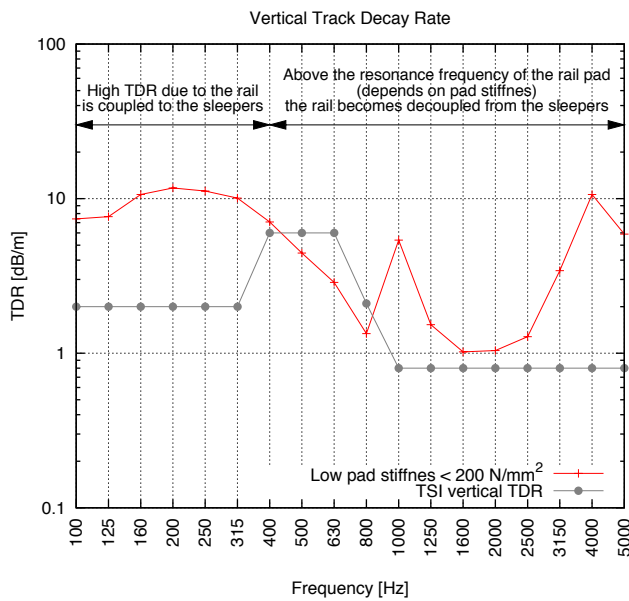


Abbildung 5.13: Charakteristischer Frequenzverlauf der vertikalen TDR eines Oberbaus mit weichen Zwischenlagen

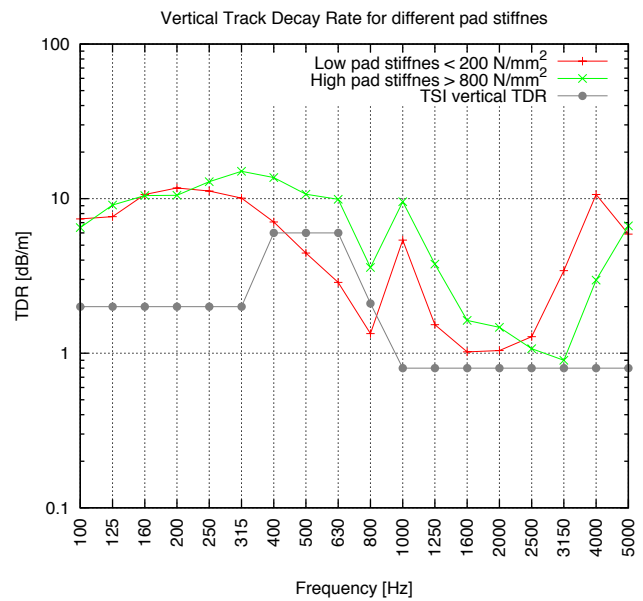


Abbildung 5.14: Vergleich der vertikalen Track Decay Rate für zwei unterschiedliche Zwischenlagensteifigkeiten

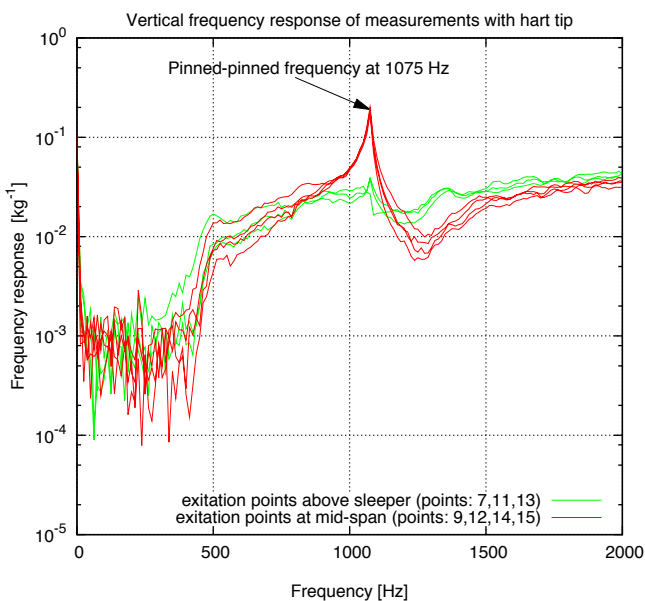


Abbildung 5.15: Gemessene Übertragungsfunktionen in vertikaler Richtung für Anregungspunkte im Schwellenfach (mid-span) und über Schwellen (above sleeper)

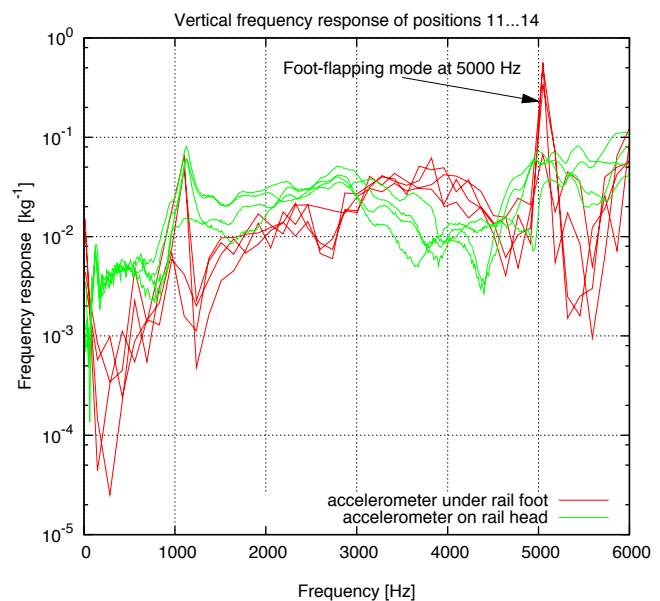


Abbildung 5.16: Gemessene Übertragungsfunktionen in vertikaler Richtung für Anregungspunkte am Schienenfuss und auf dem Schienenkopf

5.2.1.3 Foot-flapping Frequenz

Im höheren Frequenzbereich um 5000 Hz wird bei der vertikalen TDR ein weiteres lokales Maximum gemessen, dargestellt in Abbildung 5.16. Diese Frequenz wird als foot-flapping Frequenz bezeichnet. Die hohe Dämpfungsrate in diesem Frequenzbereich ist nach [117] auf Eigenmoden des Schienenfusses zurückzuführen. Nach [9] gehen die vertikalen Biegeeigenformen der gesamten Schiene für Frequenzen $> 4000 \text{ Hz}$ in reine Vertikalschwingungen des Schienenfusses über. Die Messungen in Abbildung 5.16 zeigen, dass die foot-flapping Frequenz nur durch den Aufnehmer am Schienenfuss gemessen wird.

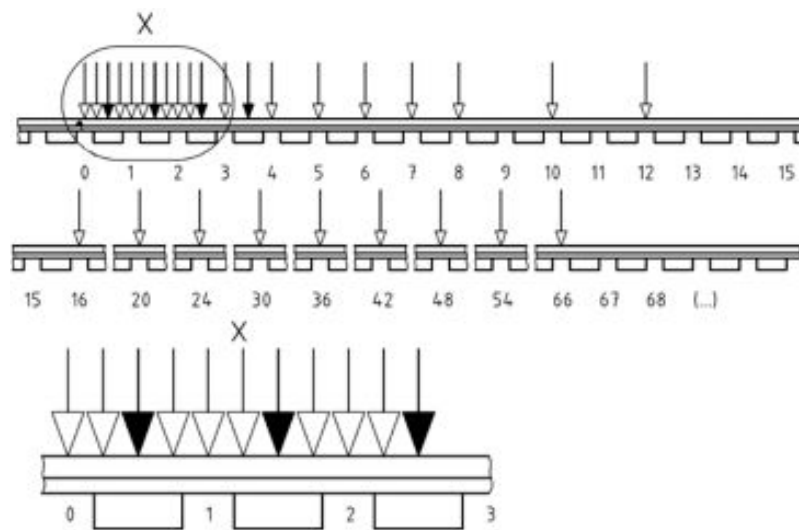


Abbildung 5.17: Positionsraaster der Anregungspunkte zur Messung der Track Decay Rate bei festen Messpunkt der Impulsantwort, Abbildung aus [118]

5.2.2 Direkte Messung der Track Decay Rate

5.2.2.1 Messverfahren

Die Messung der Track Decay Rate (TDR) mit der direkten Hammermethode ist in der TSI Lärm [101] und der DIN EN 15461 [118] festgelegt. Die TDR wird auf einer Schiene pro Richtungsgleis mit zwei unterschiedlichen Impulshämmern gemessen. Die Messungen werden an 29 Positionen in vertikaler und lateraler Richtung mit beiden Hämmern durchgeführt. Die Positionen der Kraftimpulse sind in Abbildung 5.17 dargestellt⁵. Der vertikale Beschleunigungsaufnehmer wird im Messquerschnitt unterhalb des Schienenfusses in Schwellenfachmitte angebracht, der laterale Aufnehmer am Schienenkopf. Pro Position, Richtung und Hammertyp werden vier Kraftimpulse auf den Schienenkopf aufgebracht. Für vier Impulse wird die mittlere Übertragungsfunktion (Frequency response function FRF) und die Kohärenz der Übertragungsfunktionen aufgezeichnet.

5.2.2.2 Berechnungsverfahren

Die Berechnung der TDR basiert auf der Messung von Übertragungsfunktionen. Die Schallleistung einer einzelnen vertikalen oder lateralen Schienenschwingung kann nach [110] ausgedrückt werden durch:

$$W_{wave} = \overline{W}_{wave} \int_{-\infty}^{+\infty} |v_{wave}(z)|^2 dz \quad (5.6)$$

wobei \overline{W}_{wave} die abgestrahlte, längenbezogene Schallleistung darstellt und v_{wave} die Schwinggeschwindigkeit ist. Unter der Annahme, dass die Schwingungen in der Schiene mit zunehmendem Abstand vom Anregungspunkt exponentiell abnehmen, gilt:

$$|v_{wave}(z)| = v_{wave}(0)e^{-\beta|z|} \quad (5.7)$$

Die Schallleistung einer Schwingung kann dann berechnet werden:

$$W_{wave} = \overline{W}_{wave} \int_{-\infty}^{+\infty} v_{wave}^2(0)e^{-2\beta|z|} dz = 2\overline{W}_{wave}v_{wave}^2(0) \int_0^{\infty} e^{-2\beta|z|} dz = 2\overline{W}_{wave}v_{wave}^2(0) \frac{1}{2\beta} \quad (5.8)$$

Nach [118] ist die abgestrahlte Leistung proportional zur Übertragungsfunktion $A(z)$, integriert über die Schienenlänge und multipliziert mit der Schwinggeschwindigkeit. Mit Gleichung (5.6) und (5.8) gilt dann:

$$\int_0^{\infty} \frac{|A(z)|^2}{|A(0)|^2} dz = \frac{1}{2\beta} \quad (5.9)$$

⁵Es ist ebenfalls möglich den Punkt der Kräfteinleitung nicht zu verändern und stattdessen die Position des Beschleunigungsaufnehmers zu variieren.

wobei $A(0)$ die Impulsantwort im Messquerschnitt darstellt. Die Abklingrate (TDR) D [dB/m] wird definiert als:

$$D = 20 \lg e^\beta = 8.686\beta \quad (5.10)$$

Mit Gleichung (5.9) kann bereits die TDR aus den Impulsantworten $A(z)$ in Abhängigkeit vom Abstand abgeschätzt werden. In [118] und [110] wird jedoch darauf hingewiesen, dass eine höhere Genauigkeit der Berechnung erreicht werden kann, wenn alle Impulsantworten aufsummiert werden⁶:

$$\frac{1}{2\beta} = \int_0^\infty \frac{|A(z)|^2}{|A(0)|^2} dz \approx \sum_{z_i=0}^{z_{max}} \frac{|A(z_i)|^2}{|A(0)|^2} \Delta z_i \quad (5.11)$$

Mit Gleichung (5.10) kann somit die gesuchte Gleisabklingrate berechnet werden:

$$D \approx 4.343 \frac{|A(0)|^2}{\sum_{z_i=0}^{z_{max}} |A(z_i)|^2} \quad (5.12)$$

Eine Kontrolle der berechneten TDR kann nach [110] durch den Vergleich der Übertragungsfunktion pro Terzband in Abhängigkeit vom Abstand zwischen Anregung (Hammerposition) und Antwort (Beschleunigungsaufnehmer) erfolgen. In Abbildung 5.18 werden pro Terzband die Übertragungsfunktionen der einzelnen Hammerpositionen mit der berechneten TDR verglichen. Es ist zu erkennen, dass die Abklingraten bei den niedrigen Frequenzen deutlich höher sind, die Übertragungsfunktionen fallen mit zunehmendem Abstand zwischen Anregung und Antwort schnell ab. Bei hohen Frequenzen nimmt die Abklingrate ab, die Übertragungsfunktionen fallen mit zunehmendem Abstand nur gering ab. Ausnahmen stellen die Terzfrequenzen 1.0 – 1.25 kHz (Pinned-pinned Frequenz) und 4.0 – 5.0 kHz (Foot-flapping Frequenz) dar.

5.2.2.3 Festlegen der auswertbaren Frequenzbereiche

Bei der Angabe der TDR muss entschieden werden, bis zu welcher Frequenz die mit dem schweren Hammer gemessene TDR verwendet werden kann. Diese Grenze richtet sich danach, bis zu welcher Frequenz noch genügend Energie in das Gleis eingeleitet wird. Die Entscheidung kann anhand der FFT (Fast Fourier Transformation) des Hammersignals oder durch Auswertung der Kohärenzfunktion erfolgen. In Abbildung 5.19 werden die FFTs der Impulse des leichten und schweren Hammers verglichen. Die FFT der Kraftimpulse zeigt bereits, dass mit dem schwerem Hammer bis etwa 1000 Hz genügend Energie in das System eingebracht werden kann. Entsprechend ist die Kohärenz in Abbildung 5.20 bis zu dieser Frequenz nahe dem Wert eins.⁷ Für darüber liegende Frequenzen müssen die Messungen des leichten Hammers ausgewertet werden, da nur dieser genügend Energie in das System einleitet.

5.2.2.4 Darstellung der Übertragungsfunktionen

In Abbildung 5.21 sind für alle 29 Messpositionen die Übertragungsfunktionen in vertikaler Richtung für beide Hämmer dargestellt. Gemäss DIN EN 15461 wird die Übertragungsfunktion H1⁸ als Schmalbandspektrum berechnet. Anschliessend erfolgt die Mittelung als Terzspektrum. In den Übertragungsfunktionen fallen bei allen Hammerposition lokale Maxima in den Bereichen 1000 Hz und 5000 Hz auf. Bei der Bewertung der Übertragungsfunktionen dürfen nur die Frequenzbereiche berücksichtigt werden, in denen genügend Energie in das System eingebracht wird.

5.2.2.5 Bewertung der Ergebnisse durch Kohärenzfunktionen

Für die Bewertung der Reproduzierbarkeit und damit der Güte der Messung sollte pro Hammerposition die Kohärenzfunktion aufgezeichnet werden. Die Abbildung 5.22 enthält die Kohärenzfunktionen pro Position und Hammer, entsprechend der Übertragungsfunktionen aus Abbildung 5.21. Durch die Verwendung der unterschiedlichen Massen und Aufsätze der Impulshämmer kann eine hohe Kohärenz im gesamten Frequenzbereich erreicht werden. Die Kohärenzen fallen jedoch bei zunehmenden Abstand vom Messquerschnitt deutlich ab. Für die Anregung mit dem schweren Hammer kann bis zur Position 15 eine hohe Kohärenz für $f < 1500$ Hz erreicht werden. Die Hammerposition 15 befindet sich in Abhängigkeit vom Schwellenabstand ca. 3 Meter vom Messquerschnitt entfernt. Bei der

⁶Dies ist dadurch begründet, dass neben den reinen Vertikal- und Lateralschwingungen auch die Torsion der Schiene einen Einfluss auf das Abklingverhalten ausübt.

⁷Eine Kohärenz von eins bedeutet, dass nur geringe Unterschiede zwischen den Übertragungsfunktionen der 4 Hammerschläge bestehen. Das Übertragungsverhalten des Oberbaus ist demnach durch die Messungen gut reproduzierbar.

⁸Die FRF wird als Verhältnis des Kreuzspektrums zwischen Impulsantwort und der Erregerkraft geteilt durch das Autospektrum der Kraft berechnet. Diese Schätzung der FRF wird als Schätzung H1 bezeichnet [118].

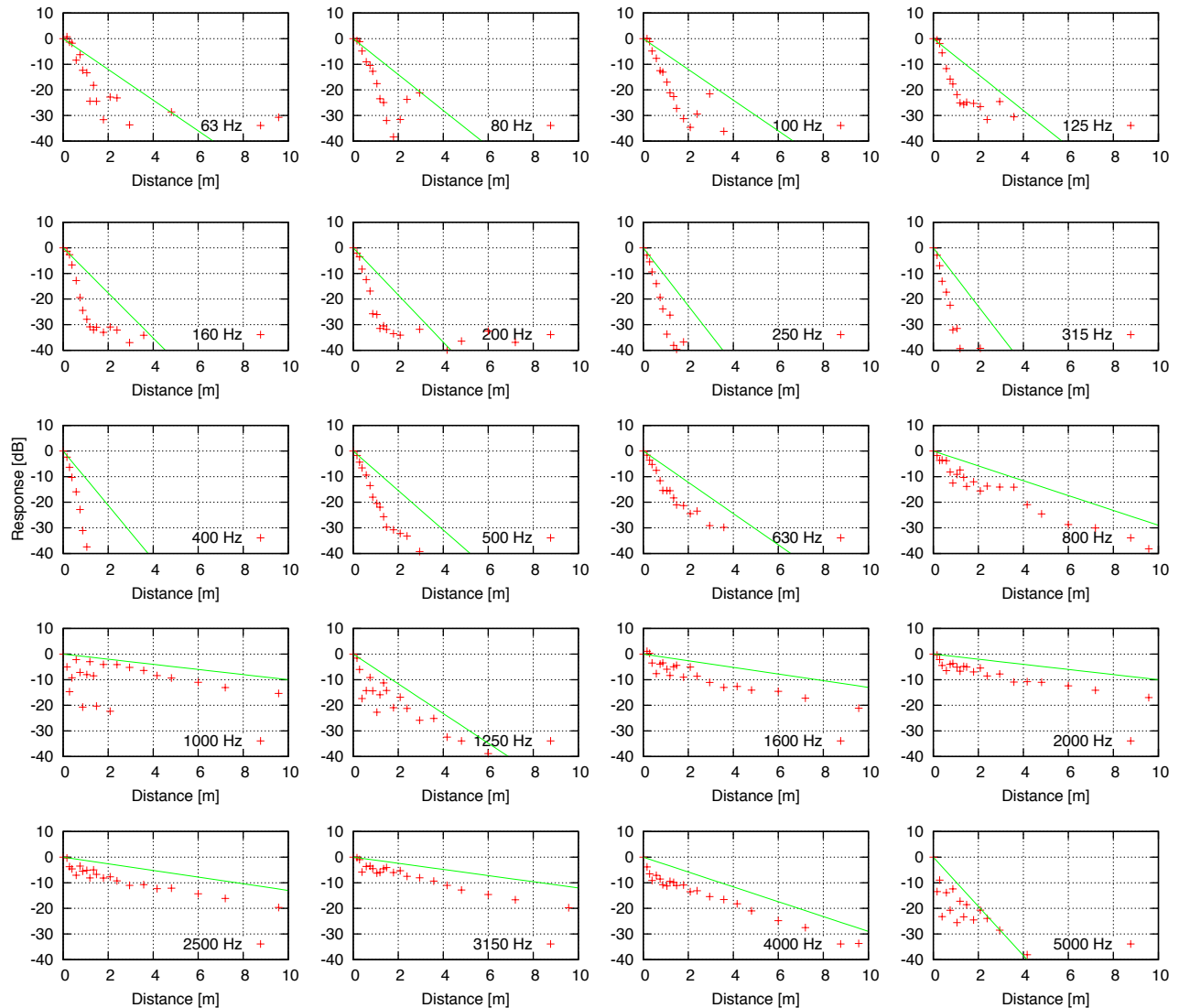


Abbildung 5.18: Vergleich der berechneten vertikalen TDR (-) mit den Übertragungsfunktionen (+) $A(z)$ bezogen auf $A(0)$ pro Hammerposition und Terzband in Abhängigkeit vom Abstand zum Beschleunigungsaufnehmer

Gleisanregung mit dem leichten Hammer und harter Spitze werden auch bei grösseren Abständen auf Grund der geringeren Dämpfung der höherfrequenten Schwingungen noch hohe Kohärenzen gemessen. Ab der Messposition 25 können jedoch auch hier keine korrekten Signale mehr bestimmt werden. In lateraler Richtung werden die Kohärenzen auch bei weiter entfernten Positionen mit guter Qualität bestimmt.

5.2.2.6 Messung der TDR mit weniger Hammerpositionen

Sowohl in der TSI Lärm als auch in der DIN EN 15461 wird keine Mindestanzahl von Hammerpositionen vorgegeben. Es wird lediglich darauf verwiesen, dass die Messungen bis zu einer genügend grossen Entfernung vom Beschleunigungsaufnehmer durchgeführt werden müssen, um auch bei schwach gedämpften, meist höherfrequenten Schwingungen eine korrekte Abklingrate zu bestimmen. Es wird ein Abstand von mindestens 40 Metern vorgeschlagen.⁹ Die genannten Normen verweisen darauf, dass die Messungen nur bis zu der Hammerpositionen durchgeführt werden müssen, bei dem die Übertragungsfunktion A_z in jedem Terzband um 10 dB unter der Übertragungsfunktion im Messquerschnitt A_0 liegt:

$$A(0) - A(z) < 10 \text{ dB} \tag{5.13}$$

⁹In Abbildung 5.18 ist bereits sehr gut ersichtlich, dass für die tiefen Frequenzen deutlich weniger Hammerpositionen als bei den höheren Frequenzen nötig wären.

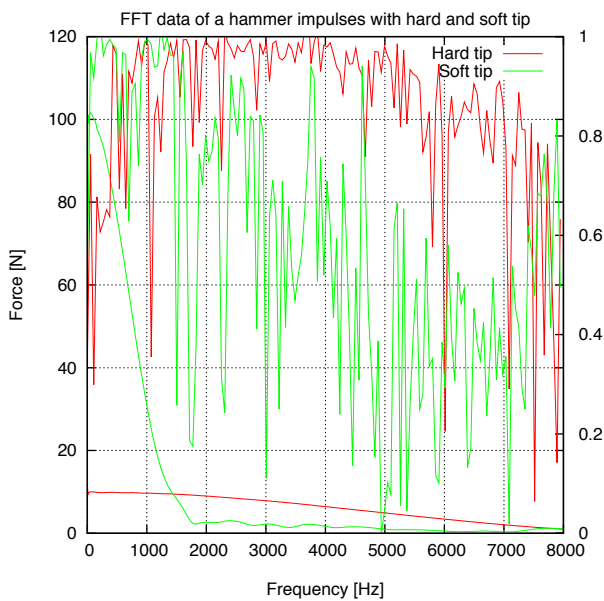


Abbildung 5.19: FFT von je einem Hammerschlag mit kleinen und grossen Impulshammer

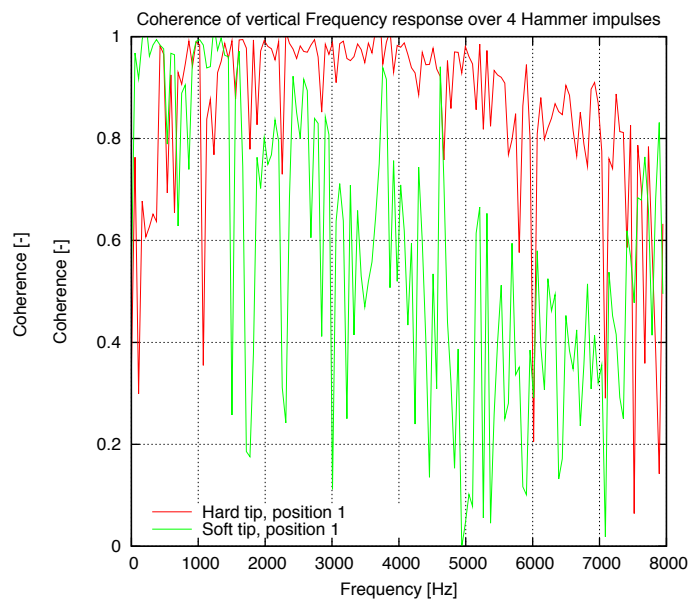


Abbildung 5.20: Kohärenzfunktionen der Übertragungsfunktionen für den kleinen und grossen Impulshammer (Kraftanregung nach Abbildung 5.19)

Um zu beurteilen, ab welcher Hammerposition weitere Messungen unnötig werden, sind in den Abbildungen 5.23 und 5.24 die vertikalen und lateralen Übertragungsfunktionen eines leichten und eines schweren Hammers für alle 29 Messpositionen dargestellt. Bei den vertikalen Übertragungsfunktionen des leichten Hammers ist bei allen Messpositionen die Forderung nach Gleichung (5.13) nicht erfüllt. Insbesondere bei der pinned-pinned Frequenz liegen nur die Übertragungsraten der letzten vier Hammerpositionen unter der Grenzkurve. Betrachtet man nur die relevanten Frequenzen > 1000 Hz müssten die letzten vier Positionen (26 bis 29) nicht mehr gemessen werden.

Bei den vertikalen Übertragungsfunktionen des schweren Hammers mit weichem Aufsatz ergeben sich analoge Ergebnisse. Da mit diesem Hammer nur bis in einen Frequenzbereich von 1000 Hz genügend Energie in das System eingeleitet werden kann, müssen auch hier die Messungen mindestens bis zur Position 26 durchgeführt werden. Würde man nur die Frequenzen bis 500 Hz berücksichtigen, könnten die Messungen bereits bei der Position 15 abgebrochen werden.

In lateraler Richtung müssen für beide Hämmer alle Hammerpositionen gemessen werden.

Das Fazit dieser Untersuchungen ist, dass bei einer normgerechten Messung der TDR in vertikaler und lateraler Richtung alle 29 Hammerpositionen mit einem leichten und einem schweren Impulshammer gemessen werden müssen.

5.2.3 Indirekte Messung der Track Decay Rate

Die direkte Messung der TDR ist eine sehr aufwendige Messmethode, so dass analog zur indirekten Rauheitsmessung auch eine indirekte Messung der TDR angestrebt wird. Ein solches Verfahren wird in [93] als Bestandteil der Pass-by Analyse vorgestellt. Die Berechnung beruht analog zur indirekten Rauheitsmessung auf der Erfassung von vertikalen und lateralen Schienenbeschleunigungen.

5.2.3.1 Track Decay Rate des belasteten und unbelasteten Gleises

Der wesentliche Unterschied zwischen indirekter und direkter Messmethode ergibt sich aus dem Umstand, dass mit der indirekten Messung die TDR des belasteten Gleises bestimmt wird. Dieser Punkt ist insbesondere beim Vergleich beider Methoden zu berücksichtigen.

In [111] wird umfassend untersucht, wie sich die TDR im belasteten Zustand gegenüber dem unbelasteten Gleis ändert. Eine Erhöhung der statischen Gleisbeanspruchung führt demnach zu einer Erhöhung der Zwischenlagensteifigkeit. Damit wird die Schiene stärker an die Schwelle gekoppelt, die Dämpfung nimmt somit im unteren Frequenzbereich gegenüber dem unbelasteten Gleis zu. Simulationen mit TWINS haben gezeigt, dass sich bei Überfahrt eines einzelnen

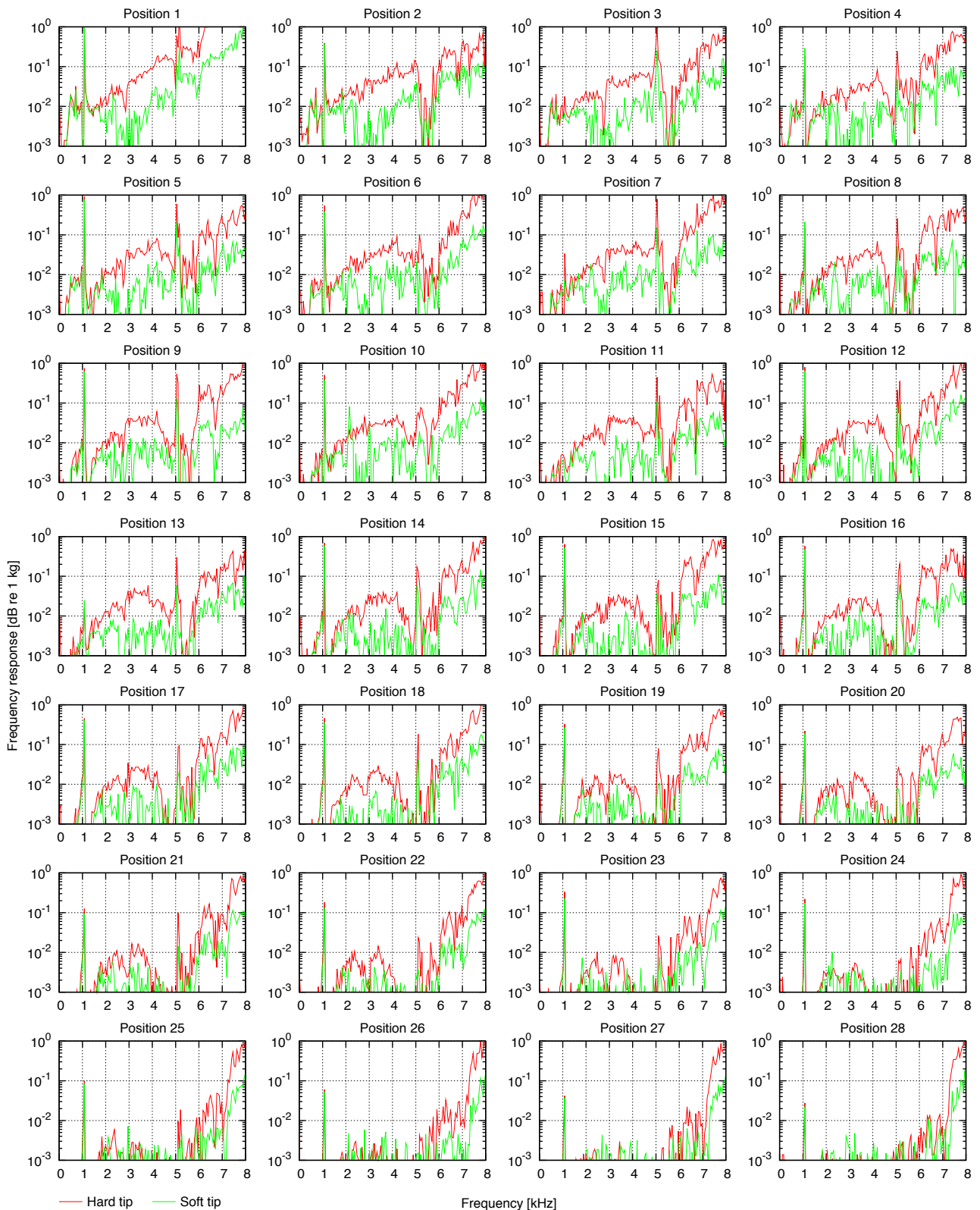


Abbildung 5.21: Vertikale, gemittelte Übertragungsfunktionen über 4 Hammerschläge für die Hammerpositionen 1 bis 28 bei Verwendung eines kleinen Hammers mit harter Spitze und eines grossen Hammers mit weichem Aufsatz (zugehörige Kohärenzen in Abbildung 5.22)

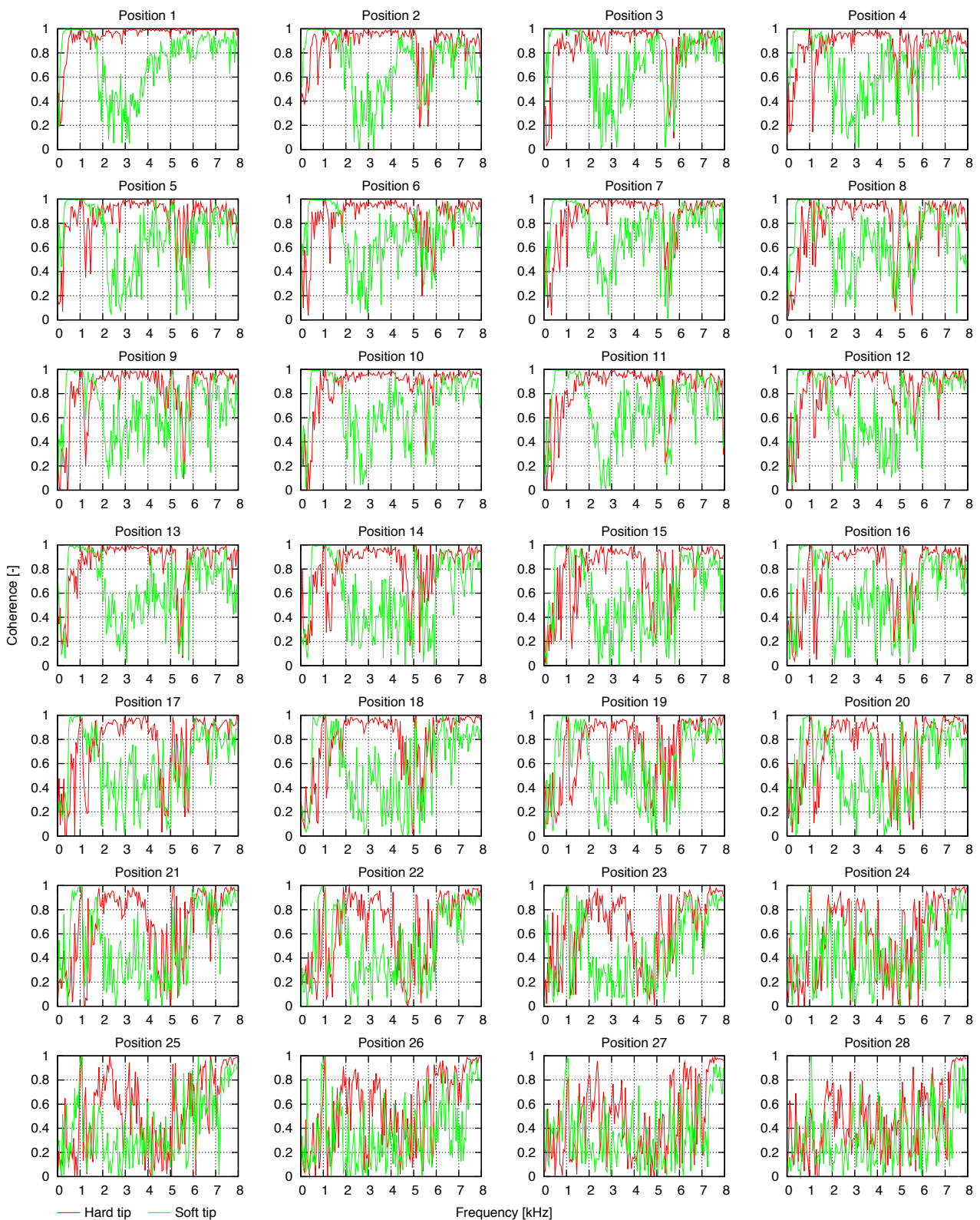


Abbildung 5.22: Kohärenzfunktionen der vertikalen Übertragungsfunktionen gemittelt über 4 Hammerschläge für die Hammerpositionen 1 bis 28 bei Verwendung eines kleinen Hammers mit harter Spitze und eines grossen Hammers mit weichem Aufsatz (zugehörige Übertragungsfunktionen in Abbildung 5.21)

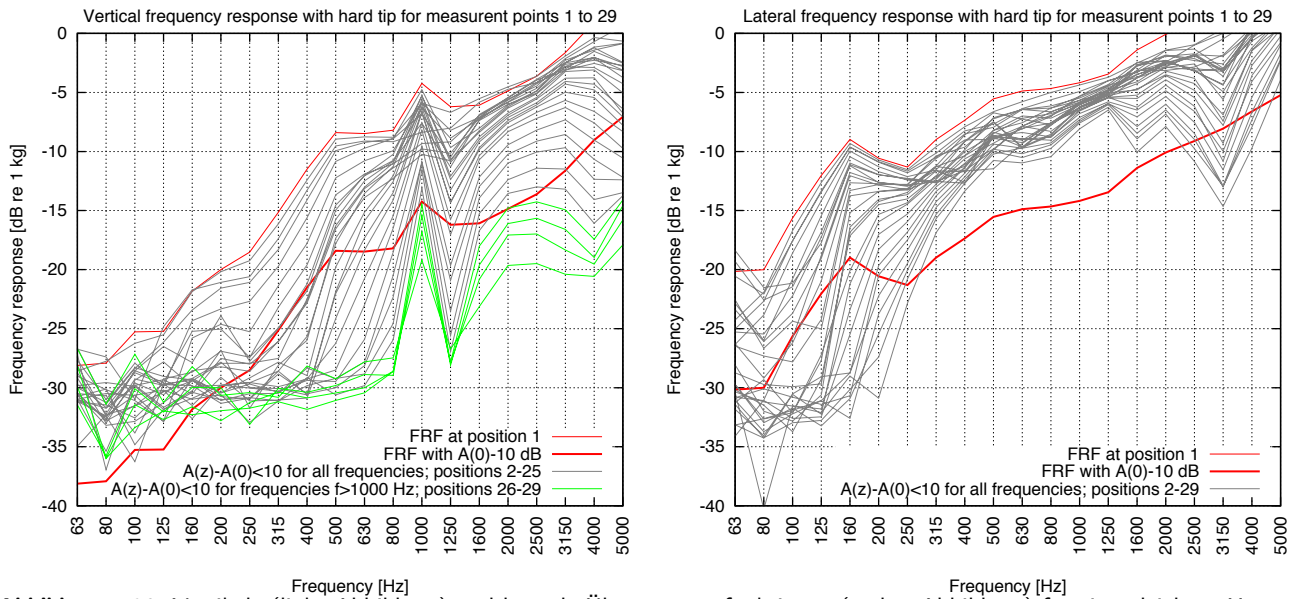


Abbildung 5.23: Vertikale (linke Abbildung) und laterale Übertragungsfunktionen (rechte Abbildung) für einen leichten Hammer mit harter Spitze für alle 29 Hammerpositionen

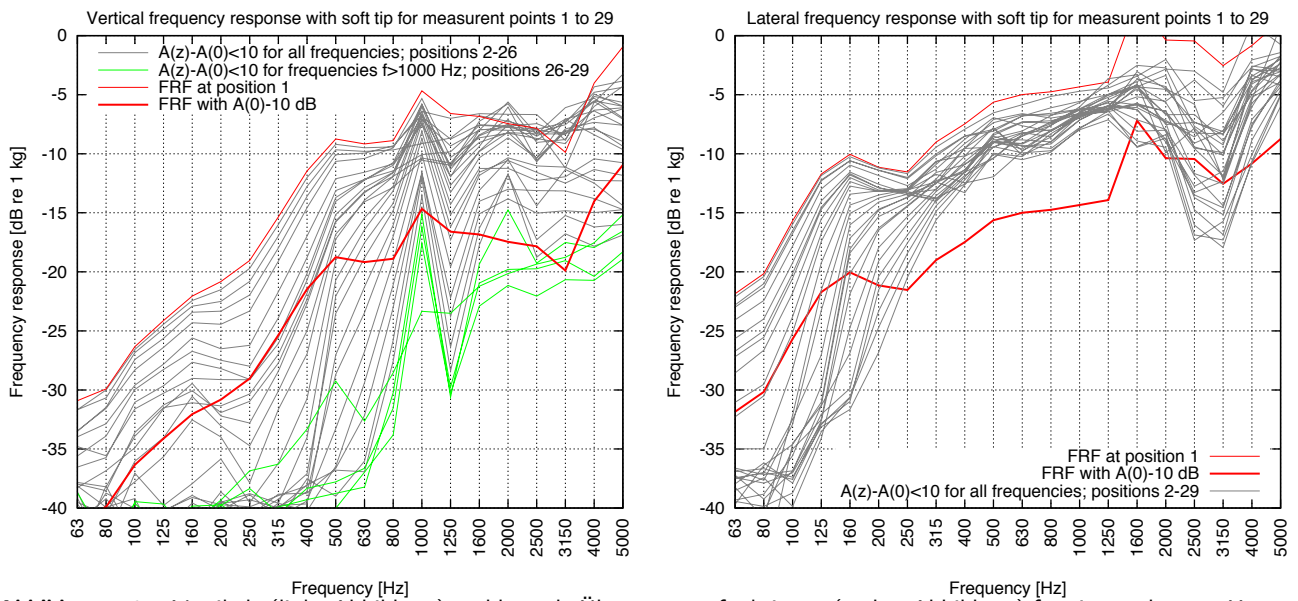


Abbildung 5.24: Vertikale (linke Abbildung) und laterale Übertragungsfunktionen (rechte Abbildung) für einen schweren Hammer mit weicher Spitze für alle 29 Hammerpositionen

Rades der Rollgeräuschanteile der Schwelle um bis zu 5 dB erhöht, der Anteil der Schiene um 2 dB abnimmt. Weiterhin muss bei der indirekten Messung der Einfluss benachbarter Achsen berücksichtigt werden. Insbesondere bei Drehgestellfahrzeugen wird eine zusätzliche Erhöhung der vertikalen Zwischenlagensteifigkeit durch die Vorbelastung der benachbarten Achse festgestellt. In Abhängigkeit von der Nennsteifigkeit der Zwischenlage wird unter Berücksichtigung benachbarter Achsen eine Pegelreduktion der Schienenabstrahlung von 4 dB und eine Pegelzunahme von 3 dB bei den Schwellen festgestellt [111].

5.2.3.2 Berechnungsverfahren der indirekten Messung

Die indirekte Berechnung geht von dem Ansatz aus, dass sich die Beschleunigungsamplituden $a(z)$ ausgehend vom Radaufstandspunkt $z = 0$ durch folgende Funktion beschreiben lassen:

$$a(z) \approx a(0)e^{-\beta z} \tag{5.14}$$

wobei z die Position entlang des Gleises beschreibt, $a(0)$ die Beschleunigungsamplitude im Radaufstandspunkt und β den Dämpfungsterm darstellt. Die TDR D [dB/m] wird analog zur direkten Messmethode definiert als:

$$D = 20 \lg e^\beta = 8.686\beta \quad (5.15)$$

Die TDR wird aus dem Verhältnis des Beschleunigungspegels integriert über die Länge L_2 und den integrierten Beschleunigungen über einen kurzen Bereich L_1 berechnet. Die Längen werden so gewählt, dass L_1 entsprechend Abbildung 3.5 die Beschleunigungen in direkter Umgebung des Radaufstandspunktes berücksichtigt und L_2 die Beschleunigungen eines Fahrzeuges, einer Wagengruppe oder des ganzen Zuges umfasst.

Die Beschleunigungsamplituden um alle N Räder für L_1 berechnen sich nach:

$$a_{\sum L_1}^2 = \sum_{n=1}^N a_{n,L_1}^2 = \sum_{n=1}^N \int_{-\frac{L_1}{2}}^{\frac{L_1}{2}} [a_n(0)e^{-\beta z}]^2 dz = \frac{1 - e^{-\beta L_1}}{\beta} \sum_{n=1}^N a_n^2(0) \quad (5.16)$$

Analog berechnet sich die Beschleunigungsamplitude der Länge L_2 welche alle N Räder einschliesst nach:

$$a_{\sum L_2}^2 = \sum_{n=1}^N a_{n,L_2}^2 = \sum_{n=1}^N \int_{L_2} [a_n(0)e^{-\beta z}]^2 dz = \frac{1 - e^{-\beta L_2}}{\beta} \sum_{n=1}^N a_n^2(0) \approx \frac{1}{\beta} \sum_{n=1}^N a_n^2(0) \quad (5.17)$$

Die Näherung in (5.17) gilt unter der Annahme einer grossen Länge L_2 (Zuglänge, Wagengruppe, Fahrzeug). Die Werte für $a_{\sum L_1}^2$ und $a_{\sum L_2}^2$ können direkt aus den Beschleunigungsmessungen generiert werden. Die Signale werden durch ein Terz-Bandpass gefiltert. Für jedes Frequenzband werden die Beschleunigungsamplituden quadriert und anschliessend über die entsprechenden Bereiche integriert.¹⁰

Für jedes Frequenzband wird das Verhältnis $R(f)$ zwischen $a_{\sum L_1}^2$ und $a_{\sum L_2}^2$ nach Gleichung (5.16) und (5.17) gebildet:

$$R(f) = \frac{a_{\sum L_1}^2(f)}{a_{\sum L_2}^2(f)} = 1 - e^{-\beta L_1} \quad (5.18)$$

Mit Gleichung (5.15) kann die Track Decay Rate berechnet werden:

$$D(f) = -\frac{8.686}{L_1} \lg\{1 - R(f)\} \quad (5.19)$$

Für Gleise mit niedriger TDR (< 3 dB/m) kann der Einfluss benachbarter Achsen in Gleichung (5.16) nicht ausgeschlossen werden. Dieser Einfluss kann durch eine Iteration des Berechnungsablaufes verringert werden. Ist die TDR in erster Näherung bekannt, kann diese in Gleichung (5.14) berücksichtigt werden. Nach 4-5 Iterationen wird eine Konvergenz der Ergebnisse erreicht. [110] Dies kann durch die Untersuchung in Abbildung 5.25 anhand einer TDR mit sehr niedriger Dämpfung bestätigt werden.

5.2.3.3 Anforderungen an die Datenverarbeitung

Nach Gleichung (5.16) müssen die Beschleunigungssignale $a_{\sum L_1}^2$ über einen kurzen Zeitbereich während der Achsüberfahrt ausgewertet werden. Dies führt insbesondere bei schnell fahrenden Zügen dazu, dass in der Frequenzdarstellung die Abbildung der tiefen Frequenzen mit zu niedrigen Amplituden erfolgt (vgl. [119]). Bei der Auswertung der Messdaten muss daher zuerst das Gesamtsignal der Vorbeifahrt mit einem Terzbandpass gefiltert werden. Pro Terzband wird damit ein Amplituden-Zeit-Verlauf erstellt, in dem die tiefen Frequenzen mit korrekter Amplitude abgebildet werden. Aus diesem Gesamtsignal pro Terzband werden anschliessend die Zeitbereiche gemäss L_1 ausgeschnitten, quadriert und anschliessend integriert.

In Abbildung 5.26 sind die Ergebnisse von zwei Auswerteargorithmen dargestellt. Algorithmus A berechnet die TDR nach der beschriebenen, korrekten Methode. Algorithmus B schneidet erst die einzelnen Zeitbereiche aus dem Gesamtsignal aus und filtert diese anschliessend mit einem Terzbandpass. Die Ergebnisse werden mit der direkt bestimmten TDR verglichen. Es wird der Fehler des Algorithmus B bei tiefen Frequenzen deutlich. Der Algorithmus A liefert auch bei tiefen Frequenzen genaue Ergebnisse. Um mögliche Fehler in der Frequenzauswertung zu vermeiden, sollten daher die Vorbeifahrtgeschwindigkeiten nicht über 100 km/h liegen.

¹⁰Dabei können Probleme bei zu kurzen Zeitausschnitten entsprechend der Weglänge L_1 auftreten

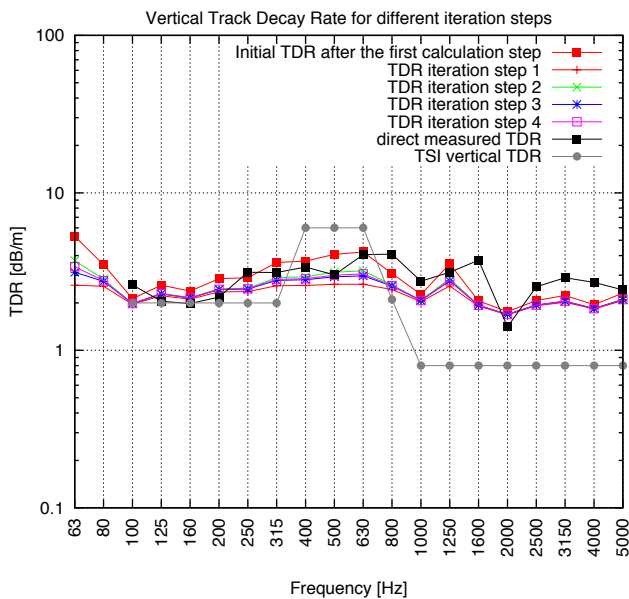


Abbildung 5.25: Vertikale TDR berechnet für verschiedene Iterationsschritte

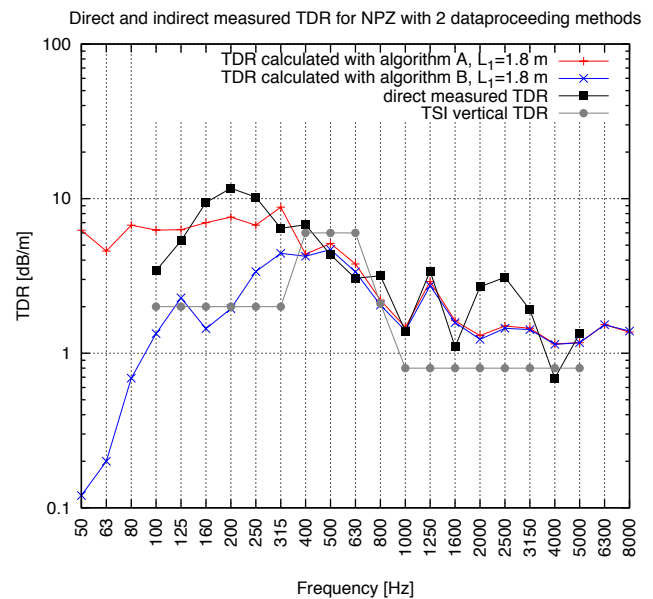


Abbildung 5.26: Vergleich der direkt und indirekt gemessenen vertikalen TDR auf B70 Betonschwellen mit UIC54 Schienen für einen NPZ mit $v = 100 \text{ km/h}$ berechnet mit 2 unterschiedlichen Auswertalgorithmen

5.2.3.4 Vergleich direkt und indirekt gemessener Track Decay Rates

Das vorgestellte indirekte Berechnungsverfahren der TDR wurde an verschiedenen Messstellen angewendet. Die Länge L_2 entspricht der gesamten Zuglänge, L_1 wurde auf 1.8 m festgelegt. Die Berechnungsergebnisse werden mit der direkt gemessenen TDR einer Messstelle verglichen.

Einfluss der Vorbeifahrtgeschwindigkeit Die Abbildung 5.27 zeigt die Ergebnisse der vertikalen TDR auf Betonschwellen mit UIC60 Schienen. Die Ergebnisse der indirekten Messung sind unterteilt nach den Fahrgeschwindigkeiten der Fahrzeuge und werden im Frequenzbereich $50 \leq f \leq 8000 \text{ Hz}$ angegeben. Unter Beachtung der angesprochenen Probleme bei der Auswertung sehr kurzer Zeitsignale wird bei allen Geschwindigkeiten die TDR mit geringer Streuung berechnet. Die direkt gemessene TDR mit der Hammermethode kann mit hoher Genauigkeit nachgebildet werden. Die pinned-pinned Frequenz der Schiene wird bei beiden Berechnungsmethoden in der 1250 Hz Terz bestimmt.

Einfluss der Fahrzeugkategorien In Abbildung 5.28 werden die indirekt berechneten TDRs unterteilt nach verschiedenen Fahrzeugkategorien. Die Ergebnisse weisen nur eine geringe Streuung auf, die TDRs können somit unabhängig vom Zugtyp berechnet werden. Bei Frequenzen zwischen 400 und 800 Hz treten jedoch bei allen Fahrzeugkategorien Abweichungen gegenüber der direkt gemessenen TDR auf.

Einfluss der Gesamtlänge L_2 Nach Gleichung (5.17) kann die auszuwertende Länge L_2 für einen kompletten Zug oder eine Gruppe von Wagen gewählt werden. Für den Messzug sind in Abbildung 5.29 die indirekten TDRs für den kompletten Zugverband, sowie für die einzelnen Wagengruppen dargestellt. Die TDR berechnet aus den Überfahrten der vier RIC Bpm Fahrzeuge zeigt die geringsten Abweichungen gegenüber der TDR des gesamten Zugverbandes. Bei den Güterwagen werden die kürzesten Längen L_2 ausgewertet, hier werden im unteren Frequenzbereich die niedrigsten TDRs berechnet.

Vergleich der TDR beider Schienen eines Gleises In Abbildung 5.30 wird anhand des Messzugs die TDR getrennt für beide Schienen eines Gleises berechnet. Die Abweichungen sind gering, das Abklingverhalten beider Schienen ist identisch. Diese Ergebnisse entsprechen den Darstellungen in [119].

Direct and indirect measured TDR for Monoblock Concrete Sleeper with UIC60 rails

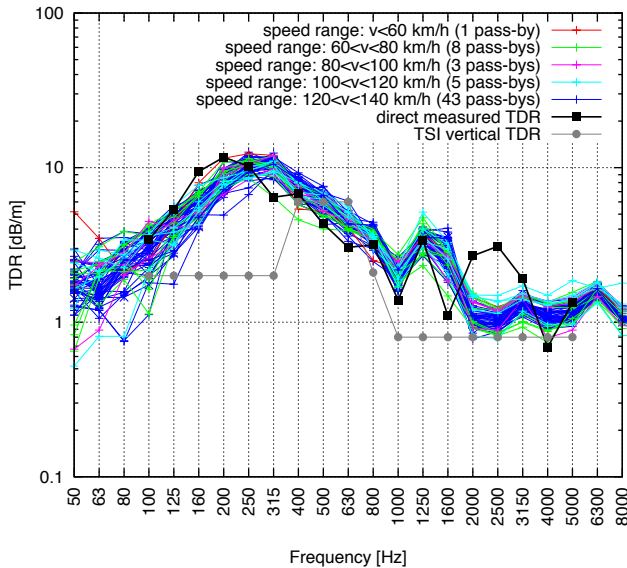


Abbildung 5.27: Vergleich der direkt und indirekt gemessenen vertikalen TDR auf B91 Betonschwellen mit UIC60 Schienen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten

Direct and indirect measured TDR for Bi-Block Concrete Sleeper with UIC54 rails

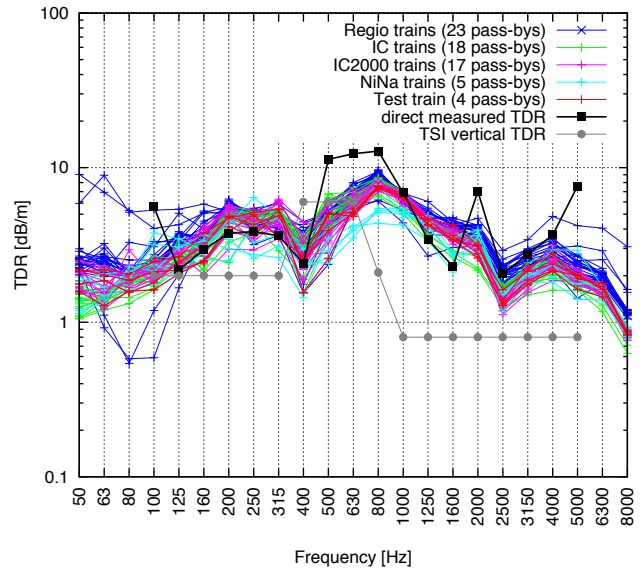


Abbildung 5.28: Vergleich der direkt und indirekt gemessenen vertikalen TDR auf Bi-Blockschwellen mit UIC54 Schienen für unterschiedliche Fahrzeugkategorien

Direct and indirect measured TDR for different vehicle groups of the Test train

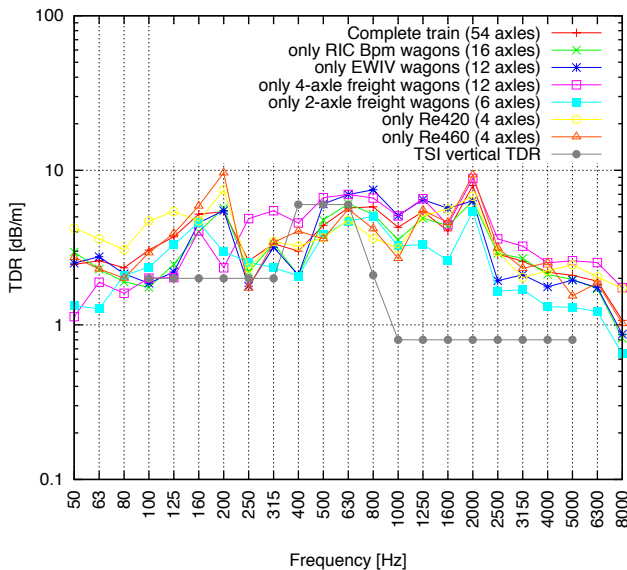


Abbildung 5.29: Vergleich der indirekt gemessenen vertikalen TDR auf Bi-Blockschwellen mit UIC54 Schienen des Messzuges bei Variation der Länge L_2

Direct and indirect measured TDR for both rails of a track from Test train

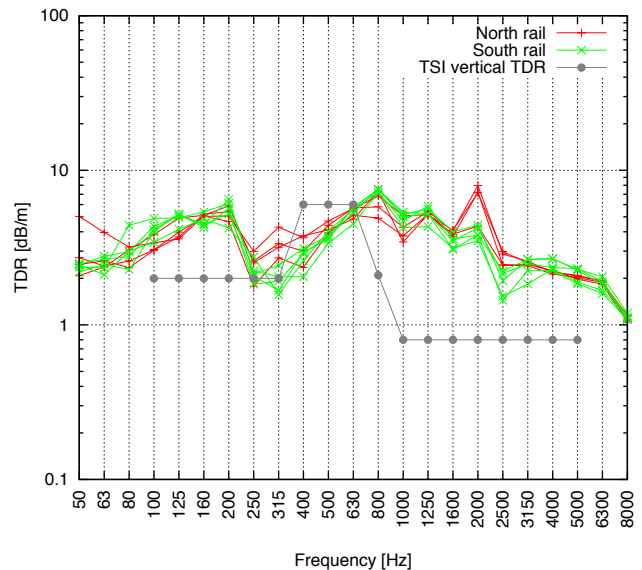


Abbildung 5.30: Vergleich der indirekt gemessenen vertikalen TDR der nördlichen und südlichen Schiene auf Bi-Blockschwellen mit UIC54 Schienen

Zusammenfassung zur indirekten Messung der Track Decay Rate Für die indirekte Messung der TDR gilt:

- Der Vergleich mit den direkt gemessenen TDRs zeigt eine gute Übereinstimmung. Die Berechnungen erfolgen mit hoher Genauigkeit.
- Die Berechnung der TDR bei hohen Vorbeifahrtsgeschwindigkeiten kann bei der Frequenzbewertung auf Grund zu kurzer Zeitintervalle zu fehlerhaften Resultaten bei tiefen Frequenzen führen.
- Wenn möglich sollte für die indirekte Berechnung die Vorbeifahrtsgeschwindigkeit nicht zu hoch gewählt werden ($v_{max} \approx 100 \text{ km/h}$), um mögliche Fehler in der Frequenzbewertung zu vermeiden.

- Unter Beachtung der obigen Punkte ist die indirekte Berechnung unabhängig von der Vorbeifahrtgeschwindigkeit.
- Die indirekte Berechnung ist unabhängig vom Fahrzeugtyp.
- Die Wahl einer möglichst grossen Länge L_2 (z.B. gesamter Zugverband) führt zu der höchsten Berechnungsgenauigkeit.

5.2.4 Transferfunktionen zur Beschreibung der Rollgeräuschabstrahlung von Oberbau und Fahrzeug

Im Emissionsmodell wird die Abstrahlung des Rollgeräusches von unterschiedlichen Oberbautypen und Fahrzeugkategorien durch Transferfunktionen beschrieben. Diese geben den Zusammenhang zwischen dem Emissionspegel (Schalldruck oder Schalleistung) und der effektiven Rauheit an. Über die Referenzmethode können die Transferfunktionen des Oberbaus $L_{HW,tr,i}$ und des Fahrzeuges $L_{HW,veh,i}$ berechnet werden.

5.2.4.1 Eigenschaften von Transferfunktionen

Oberbautransferfunktionen sind charakteristisch für jeden Oberbautyp Die für einen Oberbautyp berechneten Transferfunktionen von einer Messstelle lassen sich auf Messstellen gleichen Typs übertragen. In Abbildung 5.31 werden an allen dargestellten Messstellen nahezu identische Transferfunktionen für den Schwellentyp B91 mit UIC60 Schienen auf Schotteroberbau berechnet. Die Abweichungen im unteren Frequenzbereich werden auf abweichende Oberbausteifigkeiten der NBS zurückgeführt.

Oberbautransferfunktionen sind unabhängig von Fahrzeugtyp und Rauheit In Abbildung 5.32 sind die Gleistransferfunktionen für eine Messstelle mit zwei unterschiedlichen Oberbautypen dargestellt. Für jede erfasste Fahrzeugkategorie wird die mittlere Gleistransferfunktion berechnet. Die Abweichungen pro Richtungsgleis sind gering, jeder Fahrzeugtyp beschreibt den Oberbaueinfluss trotz unterschiedlicher Radrauheiten mit der gleichen Charakteristik.

Oberbautransferfunktionen sind unabhängig von der Fahrgeschwindigkeit Die Transferfunktionen sind von der Geschwindigkeit unabhängig. In Abbildung 5.33 sind die Transferfunktionen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten dargestellt, signifikante Unterschiede werden nicht gemessen.

Fahrzeugtransferfunktionen sind unabhängig vom Oberbau Die Fahrzeugtransferfunktion beschreibt die Schallabstrahlung des Rollgeräusches in der Quellenhöhe 0.5 m und sollte vom Oberbautyp unabhängig sein. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 5.34 verdeutlicht. Für die 4-achsigen Güterwagen des Messzuges sind die Fahrzeugtransferfunktionen gemessen an verschiedenen Messstellen mit unterschiedlichen Oberbautypen dargestellt. Die Eigenschaft der Rollgeräuschabstrahlung der Fahrzeuge ändert sich demnach nicht signifikant bei unterschiedlichen Oberbautypen.

5.2.4.2 Referenzmethode zur Trennung der Rollgeräuschanteile

Ziel der Untersuchung ist die Trennung des Gesamtrollgeräusches in Oberbau- und Fahrzeuganteile. Mit der Fahrzeug-Referenzmethode kann durch Messung einer Referenztransferfunktion $L_{HW,ref,i}$ das Abstrahlverhalten von unterschiedlichen Oberbautypen erfasst werden. Dieses Verfahren wurde im Projekt *METARAIL* entwickelt [13]. Die Referenztransferfunktion wird aus Vorbeifahrten von Fahrzeugen bestimmt, die im Vergleich zum Oberbau einen sehr geringen Anteil des Rollgeräusches abstrahlen. Dies kann durch die Verwendung von Fahrzeugen mit kleinen Raddurchmessern und geringer bzw. gut entkoppelter Fahrzeugstruktur erreicht werden. Wird ein solches Fahrzeug während einer Vorbeifahrt messtechnisch erfasst, kann davon ausgegangen werden, dass der gemessene Vorbeifahrtpegel von der Rollgeräuschabstrahlung des Oberbaus dominiert wird. Durch Berechnung der Transferfunktion zwischen effektiver Gesamttraueheit und dem Vorbeifahrtpegel kann die Referenztransferfunktion bestimmt werden. Als geeignete Fahrzeuge für diese Methode werden insbesondere RoLa und NiNa Fahrzeuge empfohlen.

Die Abbildung 5.35 zeigt die gemessenen Gesamttransferfunktionen $L_{HW,tot,i}$ an Messstelle 35 für verschiedene Fahrzeugkategorien. Für Frequenzen oberhalb von 1000 Hz werden bei den RoLa Fahrzeugen im Vergleich zu den anderen Fahrzeugen deutlich niedrigere Transferfunktionen gemessen. Im unteren Frequenzbereich gleichen sich die Transferfunktionen von allen Fahrzeugen an. Demnach ist in diesem tiefen Frequenzbereich das Abstrahlverhalten des

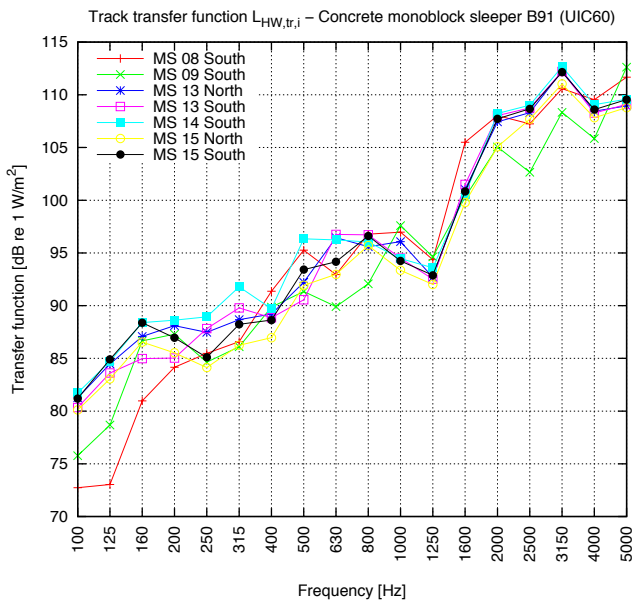


Abbildung 5.31: Oberbautransferfunktionen für B91 Schwellen, UIC60 Schienen an sieben unterschiedlichen Messstellen

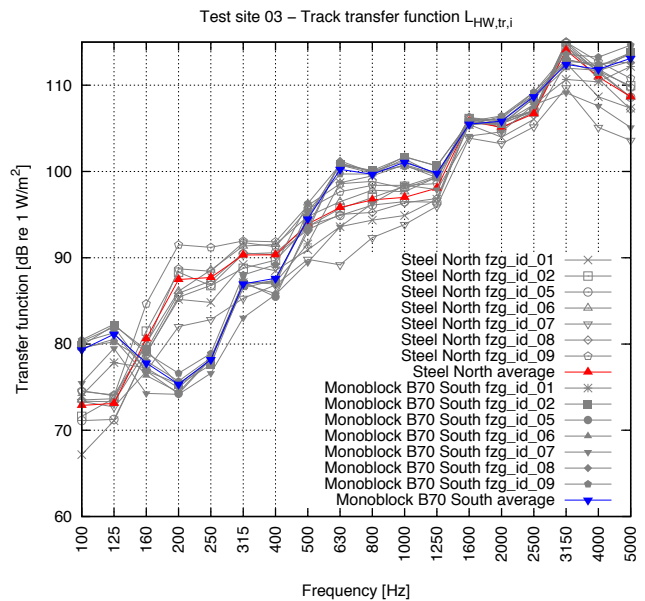


Abbildung 5.32: Oberbautransferfunktion an Messstelle 03, dargestellt für alle gemessenen Fahrzeugkategorien; Nordgleis: Stahlschwellen UIC54 Schienen, Südgleis: Betonschwellen B70 UIC54 Schienen

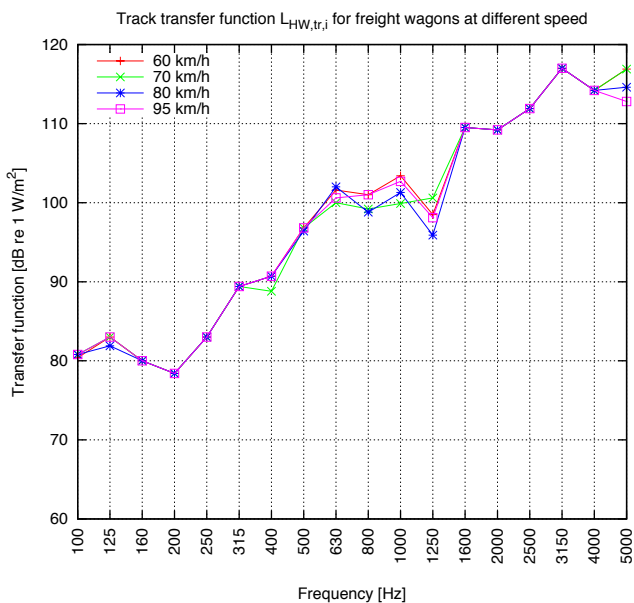


Abbildung 5.33: Oberbautransferfunktionen für GG-Klotz gebremste Güterwagen des Messzuges bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten an Messstelle 03

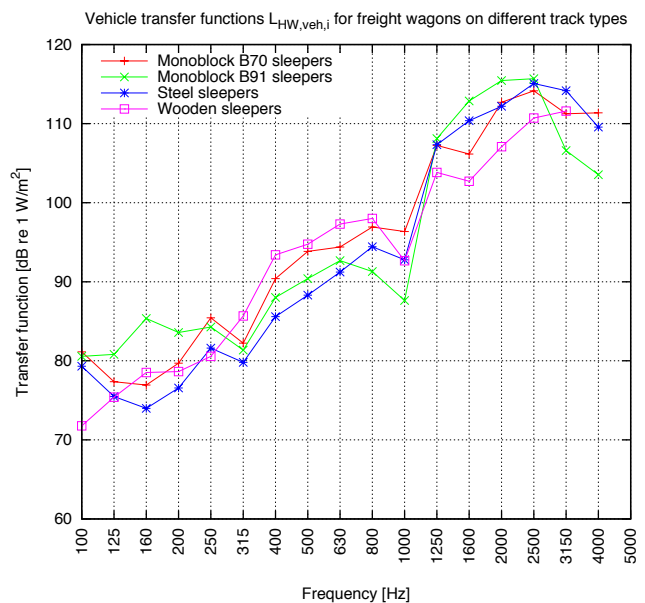


Abbildung 5.34: Fahrzeugtransferfunktionen für GG-Klotz gebremste Güterwagen des Messzuges an Messstellen mit unterschiedlichen Oberbauarten

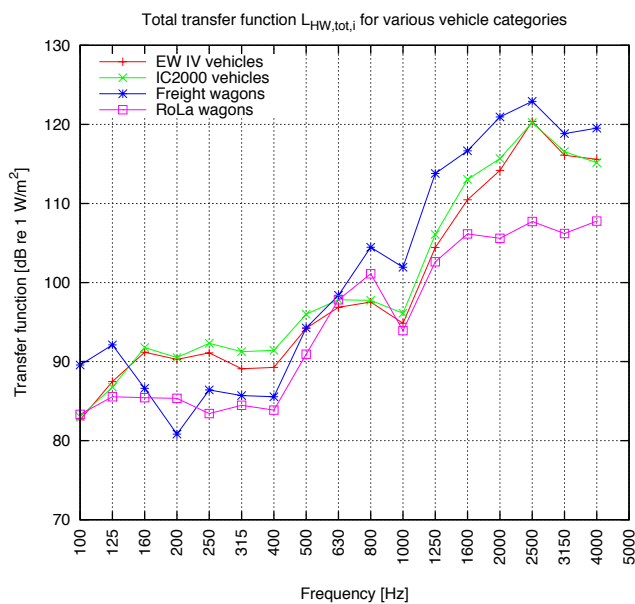


Abbildung 5.35: Gesamttransferfunktionen für unterschiedliche Fahrzeugkategorien zur Bestimmung eines Referenzfahrzeuges

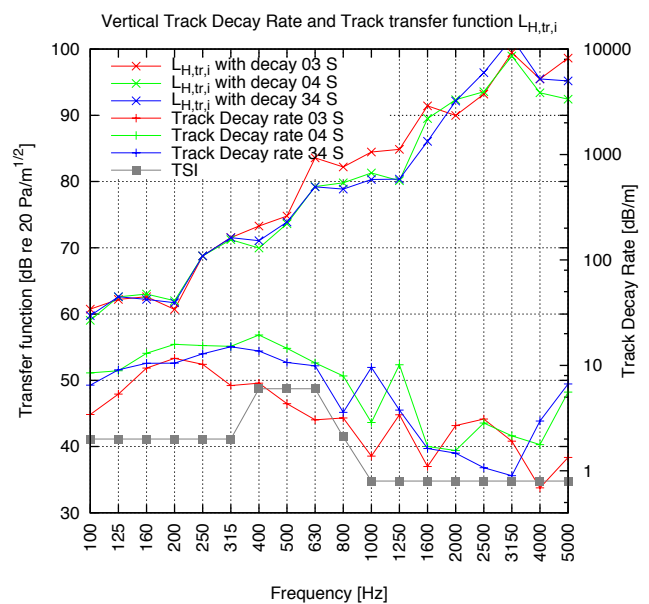


Abbildung 5.36: Vergleich von Oberbautransferfunktionen und direkt gemessenen Track Decay Rates

Rollgeräusches unabhängig vom Fahrzeugtyp, es dominiert die Abstrahlung des Oberbaus. Bei höheren Frequenzen überwiegt die Abstrahlung der Fahrzeuge. Da bei den RoLa Fahrzeugen keine signifikante Abstrahlung von der Fahrzeugstruktur ausgehen kann, werden entsprechend niedrigere Transferfunktionen berechnet. Daher eignen sich diese Fahrzeuge besonders gut als Referenzfahrzeuge.

5.2.4.3 Vergleich B70 und B91 Betonschwellen

Die Auswertungen der Messstellen mit B70 Betonschwellen (MS 03, 04) und B91 Betonschwellen (MS 08, 09, Stammstrecke und NBS) zeigen sowohl in den Emissionspegeln als auch in den Oberbautransferfunktionen deutliche Unterschiede, obwohl beide Schwellenarten nahezu identische Eigenschaften besitzen.

Die gemessenen Unterschiede in den Transferfunktionen werden nach Abbildung 5.36 auf die unterschiedlichen TDRs zurückgeführt. Die Messstelle 03 mit B70 Schwellen weist eine sehr niedrige TDR auf, demnach werden in diesem Frequenzbereich höhere Transferfunktionen berechnet. Im unteren Frequenzbereich werden für beide Schwellentypen nahezu identische Transferfunktionen gemessen. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass sich beide Schwellentypen hinsichtlich der Schallabstrahlung des Rollgeräusches nicht unterscheiden und im Emissionsmodell keine Unterscheidung beider Schwellentypen notwendig ist.¹¹

5.3 Geräuschemissionen im Gleisbogen

Die Geräuschemissionen im Gleisbogen werden durch eine Vielzahl von Parametern beeinflusst. Analog zum geraden Gleis gilt der Einfluss von Rad- und Schienenrauheiten sowie des Oberbautyps, zusätzlich müssen jedoch noch weitere Einflussparameter beachtet werden: Fahrwerkskonstruktion, Bogenradius, Überhöhung, Geschwindigkeit, Schräglaufwinkel, Quer- und Längsschlupf, Spurkranzanlauf und die Stellung der Radsätze. Diese Vielzahl von Faktoren und deren komplexe Zusammenhänge in Bezug auf die Geräuschemissionen können innerhalb eines Lärmprognosemodells nur vereinfacht dargestellt werden. Im Emissionsmodell wird daher auf die Abbildung der dominierenden Einflussfaktoren Bogenradius, Geschwindigkeit und Fahrzeugtyp fokussiert. Anhand der Auswertung der zwei Bogenmessstellen sollen diese Parameter genauer analysiert werden.

¹¹Werden innerhalb eines Oberbautyps deutliche Unterschiede in den Track Decay Rates festgestellt, sollte im Sinne einer genauen Modellrechnung ein neuer Oberbautyp eingefügt werden.

5.3.1 Vergleich der Fahrzeuge bei Bogenfahrt

In Abbildung 5.37 sind für die Bogenmessstelle 02 die Vorbeifahrtpegel in Abhängigkeit von der Vorbeifahrtgeschwindigkeit dargestellt.¹² Beim Grossteil der Fahrzeuge dominiert auch im Bogen die tatsächliche Schienen- und Radrauheit das Rollgeräusch. Bei gleichen Randbedingungen (Geschwindigkeit, Schienenrauheit, Oberbautyp) werden vor allem bei IC2000, EWIV und RIC Bpm Fahrzeugen Pegeldifferenzen zwischen Gerade und Bogen gemessen. Deren Emissionspegel liegen zum Teil deutlich über den Werten des geraden Gleises.

In den Abbildungen 5.37 bis 5.39 wird das Emissionsverhalten jeder Fahrzeugkategorie durch Auswertung der Rauheits- und Emissionsspektren verglichen. Als Mass für die auftretenden Rad-Schiene Kräfte werden die vertikalen Schienenfussbeschleunigungen ausgewertet. Analog der Auswertung des geraden Gleises werden daraus die effektiven Gesamtrauheiten berechnet.

fzg_id_01 (Re460): Die effektiven Rauheiten an der bogenäusseren Schiene sind höher als an der bogeninneren Schiene. Bogeninnen werden die Werte des geraden Gleises bei gleicher Schienenrauheit gemessen. Die Emissionswerte liegen um maximal 1 dB über den Werten des geraden Gleises.

fzg_id_02 (Re420, 620, Ae610): Die effektiven Rauheiten sind nur geringfügig von Bogenradius und Fahrgeschwindigkeit abhängig. Es besteht kein signifikanter Unterschied zwischen bogeninnerer und bogenäusserer Schiene. Die Emissionspegel bei Bogenfahrt entsprechen den Werten des geraden Gleises.

fzg_id_04 (NiNa): Die effektiven Rauheiten des NiNa Messzuges entsprechen den Werten des geraden Gleises. Eine signifikante Abhängigkeit von Bogenradius und Fahrgeschwindigkeit kann nicht nachgewiesen werden. Die Emissionspegel bei Bogenfahrt entsprechen den Werten des geraden Gleises.

fzg_id_05 (EWIV): Die effektiven Rauheiten steigen bei zunehmender Gleiskrümmung an und sind bogenaussen höher als bogeninnen. Jedoch nimmt die effektive Rauheit mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit wieder ab. Als Ursache kann eine veränderte Radsatzstellung bei höheren Geschwindigkeiten angenommen werden.¹³ Die Differenz der Emissionspegel beträgt bei 60 km/h und $R = 460$ m 2.4 dB, bei 100 km/h ist sie kleiner 0.5 dB.

fzg_id_05 (NPZ Bt): Die effektiven Rauheiten der nicht angetriebenen, schiebengebremsen Steuerwagen der NPZ Züge entsprechen den Werten des geraden Gleises. Eine Abhängigkeit der Rauheiten und der Emissionspegel von der Fahrgeschwindigkeit kann nicht abgeschätzt werden, da Messwerte nicht mit einer genügend grosser Streuung vorliegen. Die Emissionswerte bei 100 km/h entsprechen jedoch denen des geraden Gleises bei gleicher Schienenrauheit.

fzg_id_06 (NPZ B): Die effektiven Rauheiten der K-Klotz gebremsten Mittelwagen der NPZ Züge steigen bei zunehmender Gleiskrümmung an und sind auf der bogenäusseren Schiene höher als bogeninnen. Maximale Unterschiede treten im langwelligen Bereich auf. Die Emissionspegel entsprechen den Werten des geraden Gleises, ein Unterschied zwischen bogeninnerer und bogenäusserer Mikrofonposition ist nicht erkennbar.

fzg_id_06 (RIC Bpm): Im engen Gleisbogen werden auf der bogenäusseren Schiene im Vergleich zum geraden Gleis deutlich höhere effektive Rauheiten gemessen. Auffällig sind die hohen, pegelbestimmenden Terzpegel bei Frequenzen ab 2000 Hz. Die Differenz der Emissionspegel zwischen Gerade und Bogen beträgt bei 60 km/h 7 – 8 dB. Diese Differenz ist bei 100 km/h kleiner 2 dB. Damit zeigen diese Fahrzeuge ein ähnliches Bogenlaufverhalten wie die EWIV Fahrzeuge.

fzg_id_07 (NPZ RBDe): Die effektiven Rauheiten der NPZ Triebwagen entsprechen den Werten im geraden Gleis. Es ist keine Abhängigkeit vom Bogenradius erkennbar. Die Rauheiten auf der bogeninneren und bogenäusseren Schiene weisen nur geringe Unterschiede auf. Die Emissionspegel entsprechen den Werten des geraden Gleises.

¹²Bei dieser Darstellung muss die unterschiedliche Schienenrauheit beachtet werden, die maximale Differenz der Rauheitspegel nach Tabelle 4.1 ist jedoch kleiner 1 dB. Als Referenz für ein gerades Gleis werden die Ergebnisse der Messstelle 03 verwendet.

¹³Die Achsen können bei höheren Geschwindigkeiten z.B. in die äussere Sehnenstellung übergehen, so dass der Schräglaufwinkel des vorlaufenden Radsatzes verringert wird.

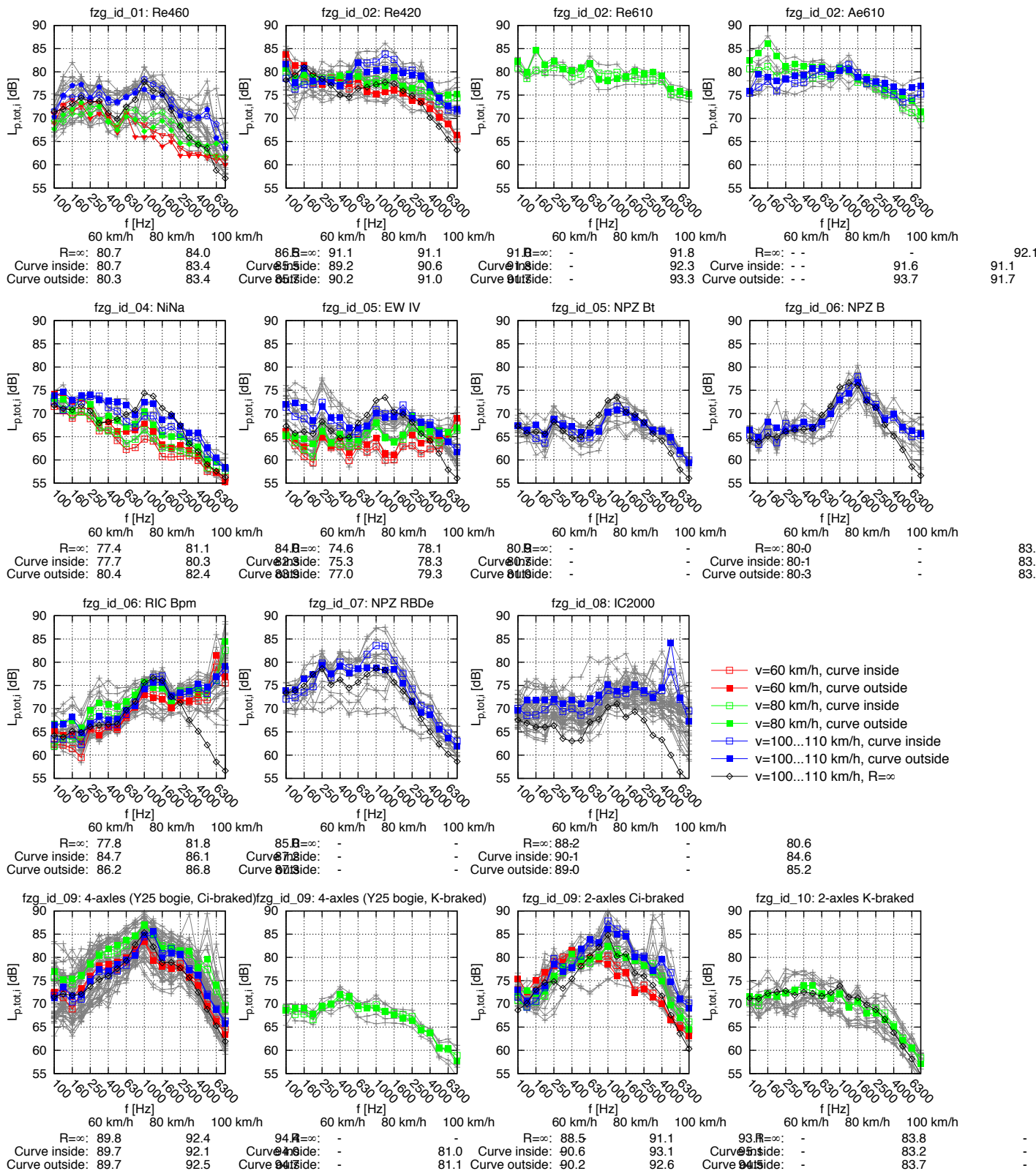


Abbildung 5.37: Vorbeifahrtpegel der untersuchten Fahrzeugtypen an der Bogenmessstelle 02 mit dem Radius 460 m für Geschwindigkeiten zwischen 60 und 110 km/h am südlichen Gleis

fzg_id_08 (IC2000): Die effektiven Rauheiten der IC2000 Fahrzeuge zeigen eine ausgeprägte Abhängigkeit vom Bogenradius, sowie von bogeninnerer und bogenäusserer Schiene. Die Werte der bogeninneren Schiene im weiten Bogen entsprechen in Amplitude und Wellenlänge den Werten des geraden Gleises. Die Abweichung nimmt in engen Bögen zu. Auf der bogenäusseren Schiene werden insbesondere im engen Bogen deutlich höhere effektive Rauheiten berechnet. Die Emissionspegel liegen breitbandig über den Werten des geraden Gleises, bei 100 km/h beträgt die Differenz 5 dB. Die IC2000 Fahrzeuge zeigen von allen scheinbremsen Fahrzeugen die höchsten Rauheits- und Emissionswerte im Gleisbogen.

fzg_id_09 (Ci-braked): Die effektiven Rauheiten der GG-Klotz gebremsten Güterwagen mit Y25-Drehgestellen zeigen in weiten Bögen keine Unterschiede zu den Werten im geraden Gleis. In engen Bögen nimmt die Rauheit bei langen Wellenlängen an der bogenäusseren Schiene zu. Die Emissionspegel entsprechen jedoch den Werten des geraden Gleises.

Bei den 2-achsigen Güterwagen ist die Abhängigkeit der effektiven Rauheit von bogeninnerer und bogenäusserer Schiene sowie vom Bogenradius ausgeprägter. Insbesondere bogenäusseren werden im engen Bogen auf Grund des grösseren Achsabstandes höhere Rauheitsamplituden im tiefen und hohen Wellenlängenbereich gemessen. Im mittleren Bereich werden die Werte des geraden Gleises erreicht. Dies deutet darauf hin, dass in diesem Wellenlängenbereich die Gesamtrauheit weiterhin von der Radrauheit dominiert wird.

fzg_id_10 (K-braked): Die effektiven Rauheiten der K-Klotz gebremsten Güterwagen mit Y25-Drehgestellen zeigen im engen Bogen geringe Unterschiede zum geraden Gleis. Für die bogenäussere Schiene werden im langwelligen Bereich höhere Rauheitsamplituden berechnet. Die Emissionswerte entsprechen jedoch denen des geraden Gleises.

5.3.1.1 Einfluss von Rad- und Schienenrauheiten im Gleisbogen

Rad- und Schienenrauheiten haben auch bei Bogenfahrten einen dominierenden Einfluss auf die Emissionspegel. Effekte die aus der Bogenfahrt entstehen, wirken sich nur bei niedriger Rad- und Schienenrauheit aus, dieser Zusammenhang ist in Abbildung 5.40 für scheinbremsen und GG-Klotz gebremste Fahrzeuge dargestellt. Nur bei niedriger Schienenrauheit (roughness: smooth) wird eine deutliche Pegelzunahme von bis zu 5 dB bei den IC2000 Fahrzeugen gemessen. In den Messquerschnitten mit hoher Schienenrauheit (roughness: bad) werden gegenüber dem geraden Gleis keine höheren Emissionswerte gemessen, es dominiert die Schienenrauheit. Bei den GG-Klotz gebremsten Fahrzeugen dominieren in jedem Fall die hohen Radrauheiten. Die Emissionspegel im Gleisbogen sind nahezu unabhängig von Bogenradius und Schienenrauheit.

5.3.1.2 Transferfunktionen im Gleisbogen

Für Emissionsrechnungen im Gleisbogen werden die Transferfunktionen des geraden Gleises verwendet. Dieses Vorgehen setzt voraus, dass auch im Gleisbogen die Transferfunktionen unabhängig von Fahrgeschwindigkeit und effektiver Gesamtrauheit sind. In Abbildung 5.41 werden die Oberbautransferfunktionen der Bogenmessstellen 01, 02 und der Messstelle 03 im geraden Gleis für Geschwindigkeiten zwischen 60 und 120 km/h verglichen. Diese Untersuchungen zeigen keine signifikanten Abweichungen gegenüber dem geraden Gleis.¹⁴

5.3.2 Schlussfolgerungen für die Modellerstellung

Im Emissionsmodell wird in Anlehnung an [13] ein Gleisabschnitt als Bogen definiert, wenn dessen Radius kleiner 1000 m ist. Die effektive Gesamtrauheit im Gleisbogen berechnet sich nach:

$$L_{r,tot,i} = L_{r,tr,i} \oplus L_{r,veh,i} \oplus \left(L_{r,veh,curve,i} - \gamma \lg \frac{R}{R_0} \right) \quad (5.20)$$

Der Einfluss des Bogenradius wird in Abhängigkeit von der Rauheitskategorie eines Fahrzeugs berücksichtigt:

$$\gamma = \begin{cases} 15.0 & : \text{Equivalent roughness: smooth} \\ 30.0 & : \text{Equivalent roughness: bad} \end{cases} \quad (5.21)$$

¹⁴Die auftretenden Abweichungen können durch die unterschiedlichen Track Decay Rates erklärt werden (vgl. Abbildung 4.7).

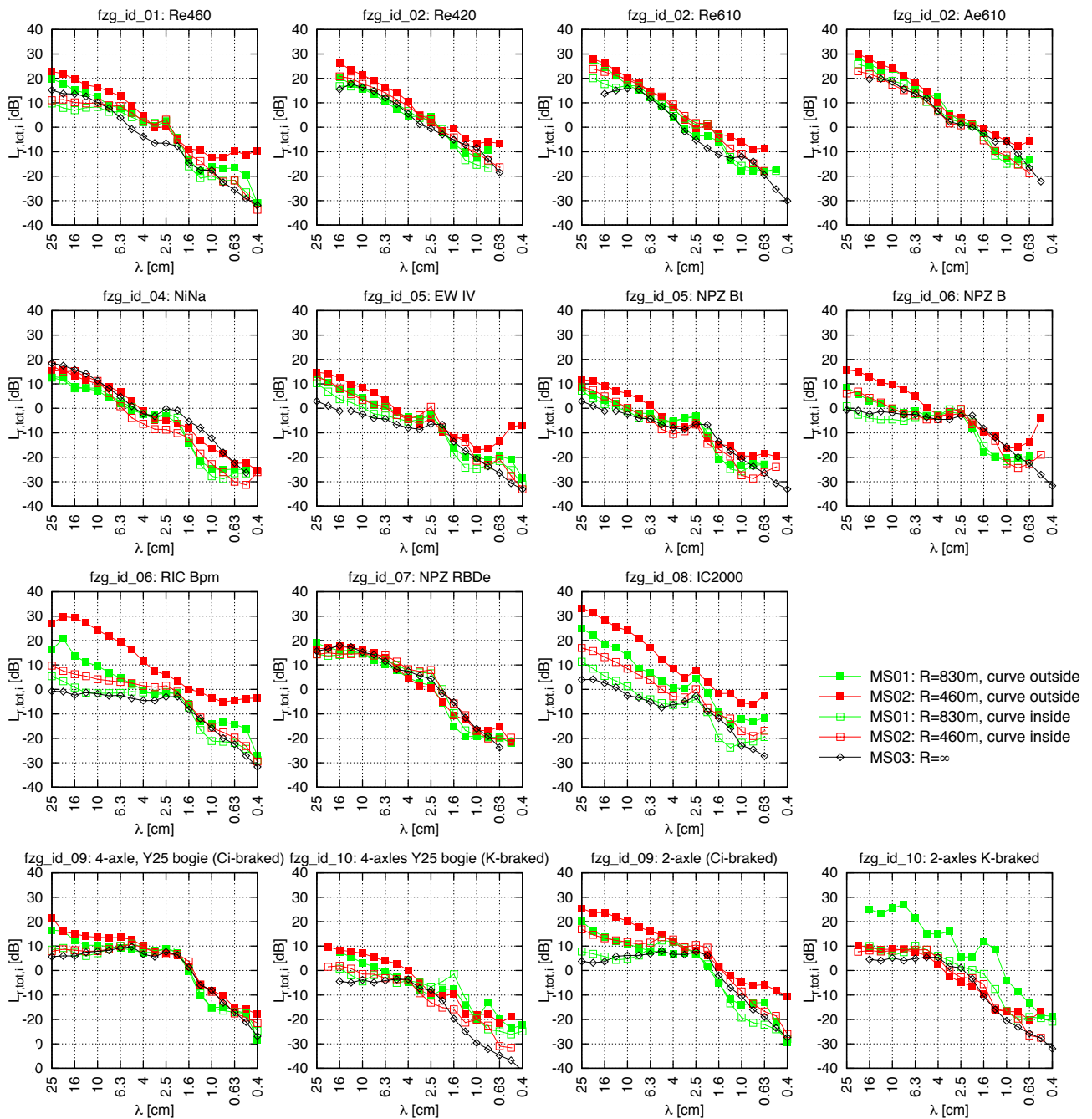


Abbildung 5.38: Vergleich der effektiven Gesamtrauheiten von Fahrzeugen an den Bogenmessstellen 01 und 02, sowie im geraden Gleis an Messstelle 03

Der Bezugsradius beträgt $R_0 = 500\text{ m}$.¹⁵

Der Faktor γ richtet sich nach der Rauheitskategorie der äquivalenten Radrauheit des jeweiligen Fahrzeugtyps. Mit den unterschiedlichen Werte für γ wird den Messergebnissen Rechnung getragen, dass bei Fahrzeugen mit schlechten Bogenlaufverhalten die Abhängigkeit vom Bogenradius stärker ausgeprägt ist.

In Abbildung 5.42 werden die Zusammenhänge nach Gleichung (5.20) für EWIV Fahrzeuge (Equivalent roughness: smooth) und IC2000 Fahrzeuge (Equivalent roughness: bad) für zwei unterschiedliche Schienenrauheiten dargestellt. Auf Grund des besseren Bogenlaufverhaltens der EWIV Fahrzeuge dominiert im Bogen mit niedriger Schienenrauheit der Einfluss der Bogenfahrt den Emissionspegel erst für $R < 400\text{ m}$. Bei den IC2000 Fahrzeugen dominieren die

¹⁵Der Bezugsradius wurde auf 500 m festgelegt, da sich die Angabe der äquivalenten Radrauheiten auf die Ergebnisse der Messstelle 02 beziehen.

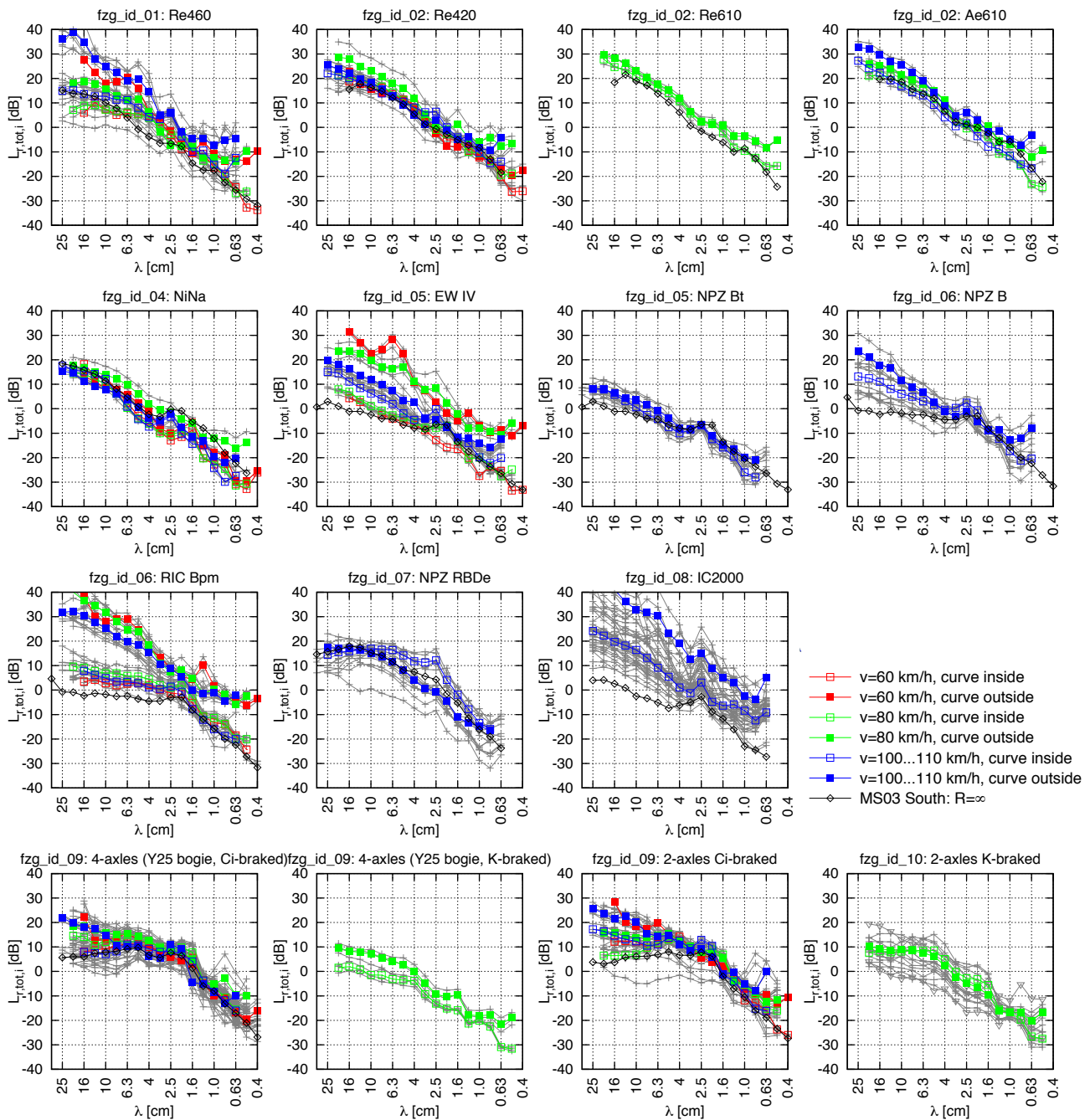


Abbildung 5.39: Effektive Gesamtrauheiten der untersuchten Fahrzeugtypen an der Bogenmessstelle 02 mit dem Radius 460 m für Geschwindigkeiten zwischen 60 und 110 km/h am südlichen Gleis

Effekte der Bogenfahrt bereits ab einem Bogenradius von $R < 700$ m. Werden Gleisbögen mit hoher Schienenrauheit befahren, dominiert auch noch bei engen Bogenradien das Rollgeräusch. Bei EWIV Fahrzeugen werden die Effekte der Bogenfahrt dann erst für $R < 200$ m, bei IC2000 Fahrzeugen für $R < 500$ m sichtbar.¹⁶ Diese Überlegungen lassen sich auch auf Fahrzeuge mit hohen Radrauheiten übertragen.

Hinweis: Kurvenkreischen Eine Berechnung von Emissionswerten bei Kurvenkreischen ist im Modell nicht implementiert. Dieser Effekt wird nur bei sehr kleinen Bogenradien beobachtet, diese stellen bei Vollbahnen eine Ausnahme dar. In [120] wird angegeben, dass für Bogenradien kleiner 300 m die Wahrscheinlichkeit von Kurvenkreischen stark

¹⁶Es ist jedoch zu überprüfen, ob sich diese Zusammenhänge auch auf sehr kleine Bogenradien mit $R < 150$ m übertragen lassen.

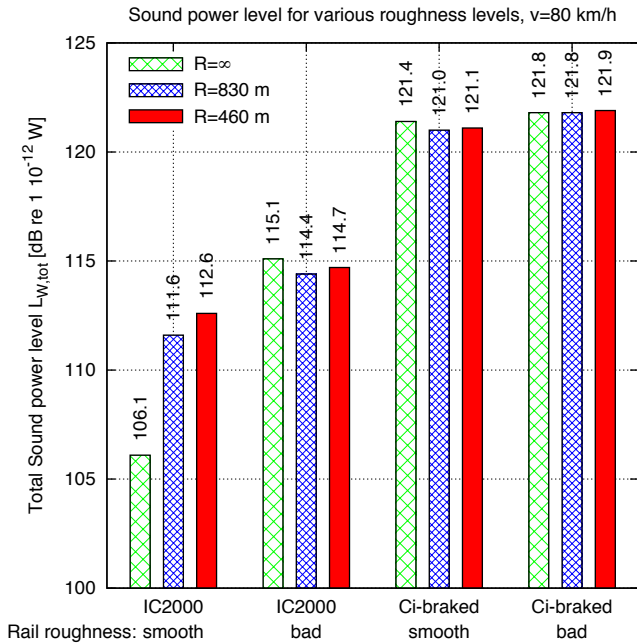


Abbildung 5.40: Emissionspegel im geraden Gleis und im Bogen in Abhängigkeit von Radius und Rad-/Schienenrauheiten bei $v = 80$ km/h

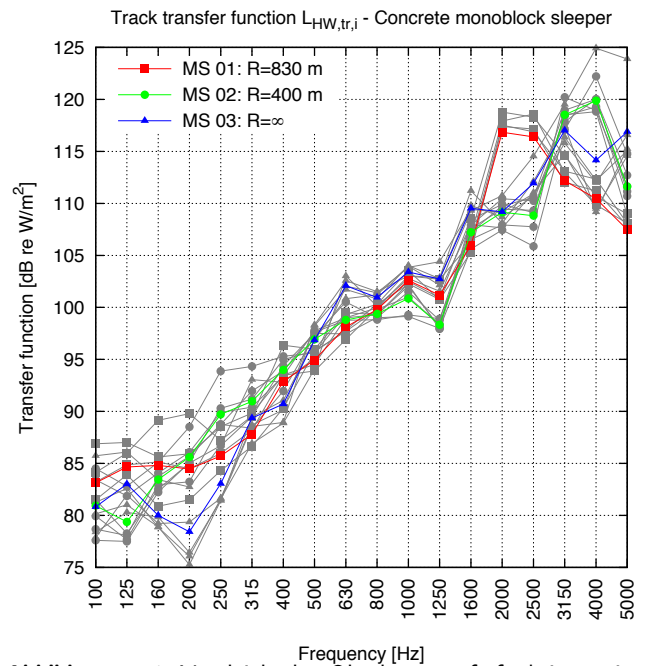


Abbildung 5.41: Vergleich der Oberbautransferfunktionen in Bogenmessstellen und im geraden Gleis für Geschwindigkeiten zwischen 60 und 120 km/h

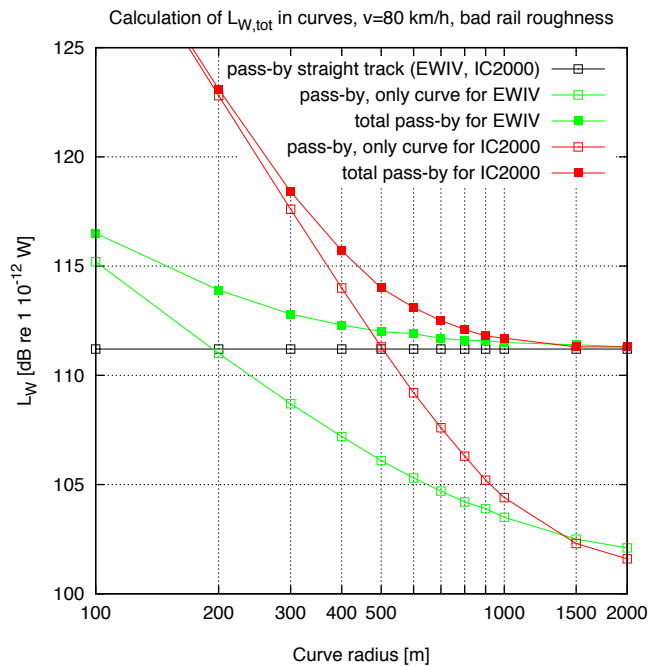
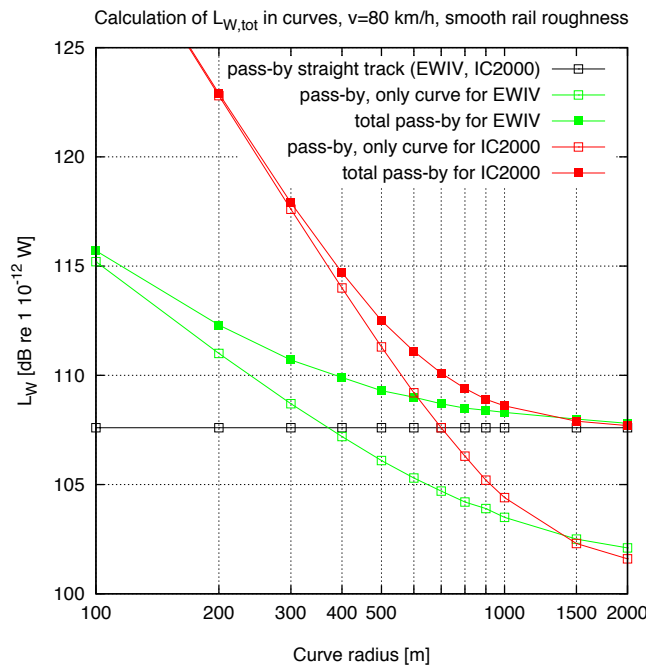


Abbildung 5.42: Graphische Darstellung der Gleichung (5.20) für die Berechnung der Emissionspegel im Gleisbogen in Abhängigkeit von Bogenradius und äquivalenter Radrauheit bei niedriger Schienenrauheit (linke Abbildung) und hoher Schienenrauheit (rechte Abbildung)

zunimmt. Häufig wird das Verhältnis von Bogenradius R und Radsatzstand im Drehgestell p als Indikator für mögliches Kurvenkreischen angegeben [121], [122]. Wenn $R/p < 100$, dann nimmt die Wahrscheinlichkeit des Kreischens stark zu. Für ein Y25-Drehgestell ($p = 1.8$ m) ergibt sich damit ein kritischer Bogenradius von 180 m, für Standard-drehgestelle bei Personenwagen (EWIV, IC2000) mit $p = 2.5$ m beträgt dieser 250 m.

Wenn in einem Gleisabschnitt Kurvenkreischen auftritt, kann dies durch die Anpassung der äquivalenten Radrauheit $L_{r,veh,curve,i}$ der betroffenen Fahrzeugtypen berücksichtigt werden. Entsprechend Fahrgeschwindigkeit und Frequenzlage der Kreisfrequenz kann das Rauheitsspektren in der betroffenen Wellenlänge angehoben werden.

5.4 Geräuschemissionen an Weichenherzstücken

Im Emissionsmodell können die Geräuschemissionen an Weichenherzstücken und Schienenstössen (allgemein Störstellen) berechnet werden. Für die Modellerstellung wurden deshalb zwei Messstellen in Weichenbereichen eingerichtet. In [123] – [125] wird die Geräuschemission an Störstellen und von Fahrzeugen mit Flachstellen diskutiert. Die wesentlichen Erkenntnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Die Geräuschemission ist abhängig von Fahrgeschwindigkeit, Länge und Tiefe der Herzstücklücke, sowie der statischen Achslast eines Fahrzeugs.
2. Die effektiven Rauheiten, sowie die Geräuschemissionen sind unabhängig von der Fahrtrichtung mit der eine Störstelle befahren wird.
3. Die Geräuschemissionen liegen breitbandig über den Werten des ungestörten Gleises.
4. Die Emissionspegel können nach dem Zusammenhang $30 \lg v$ beschrieben werden.

5.4.1 Durchführung von Messung und Auswertung

An den Weichenmessstellen 05 und 11 wurden die Mikrofone in der Ebene der Herzstücklücke in je 7.5 Meter zur Gleismitte positioniert. Die Messkonfiguration der Messstellen ist in Abbildung 5.43 dargestellt. Die Beschleunigungen des Schienenfusses wurden nicht erfasst.

Die Auswertung umfasst die Berechnung der Vorbeifahrtpegel von Fahrzeugen im Bereich des Herzstückes. Die so berechneten Schalldruckpegel werden analog zu den Basismessstellen in Schalleistungsspektren umgerechnet.

Nach den Vorgaben des Emissions- und Ausbreitungsmodells wird eine Störstelle als kurzer Gleisabschnitt mit hoher Schienenrauheit (Äquivalente Schienenrauheit) $L_{r,tr,impact,i}$ modelliert. Diese Rauheit berechnet sich aus der Schalleistung der untersten Quellenhöhe, wobei die Schienenrauheit $L_{r,tr,i}$ ausserhalb der Herzstücklücke und die Sekundärschalleistungen $L_{W,sek,i}$ der Fahrzeugtypen berücksichtigt werden:

$$L_{r,tot,impact,i} = (L_{W,tot,impact,i} \ominus L_{W,sek,i}) - L_{HW,tr,i} - 10 \lg N_{ac} \quad (5.22)$$

$$L_{r,tr,impact,i} = (L_{r,tot,impact,i} - A_{3,i}) \ominus L_{r,tr,i} \ominus L_{r,veh,i} \quad (5.23)$$

Bei der Berechnung wird davon ausgegangen, dass die Schallabstrahlung des Oberbaus dominiert, so dass in Gleichung (5.22) nur die Transferfunktion des Oberbaus $L_{HW,tr,i}$ berücksichtigt wird. Vergleicht man in Abbildung 5.46 die Schallemissionen des NiNa Fahrzeugs im Weichenbereich mit den Werten des ungestörten Gleises, so treten deutliche Unterschiede bei Frequenzen grösser 1000 Hz auf. Nimmt man die Gültigkeit der Referenzmethode (vgl. Abschnitt 5.2.4.2) des ungestörten Gleises auch für Weichenbereiche an, so kann mit den Messwerten des NiNa Fahrzeugs auf die Schallabstrahlung des Oberbaus im Weichenbereich geschlossen werden. Im ungestörten Gleis überwiegt die Schallabstrahlung des Rollgeräusches der Räder bei $f > 1000$ Hz. Da dieser Anteil bei den kleinen Raddurchmessern des NiNa-Zuges vernachlässigt werden kann, muss an Störstellen auch bei höheren Frequenzen die Schallabstrahlung des Oberbaus dominieren.

5.4.2 Bewertung der Ergebnisse

5.4.2.1 Vergleich der Emissionspegel an den Weichenmessstellen

In Abbildung 5.44 werden für die untersuchten Weichenbereiche die Schalleistungspegel dargestellt. Zwischen den Messstellen werden Unterschiede in den Emissionspegel gemessen. Die Schallemissionen an Messstelle 05 liegen bei tiefen Frequenzen deutlich über den Werten der Messstelle 11. Diese Unterschiede werden auf die Tatsache zurückgeführt, dass an Messstelle 11 eine Weiche mit Betonschwellen verbaut worden ist und bei den Messquerschnitten

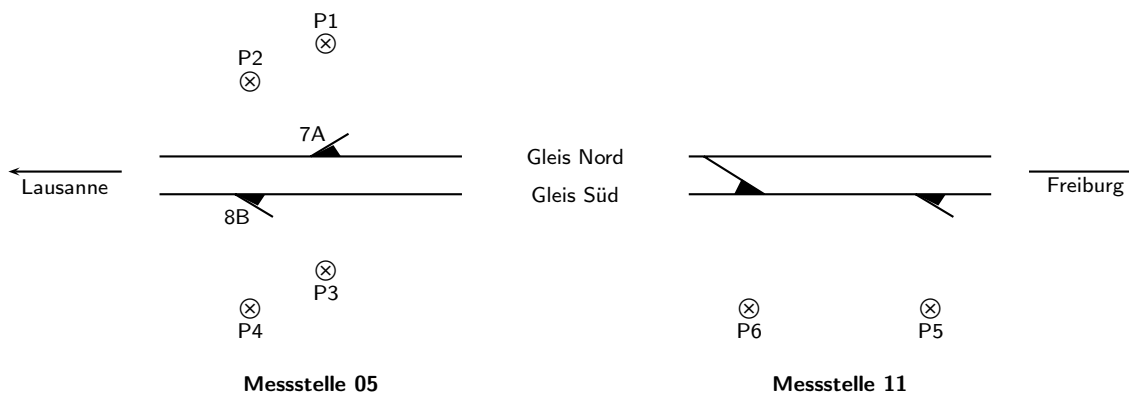


Abbildung 5.43: Konfiguration der Weichenmessstellen 05 und 11

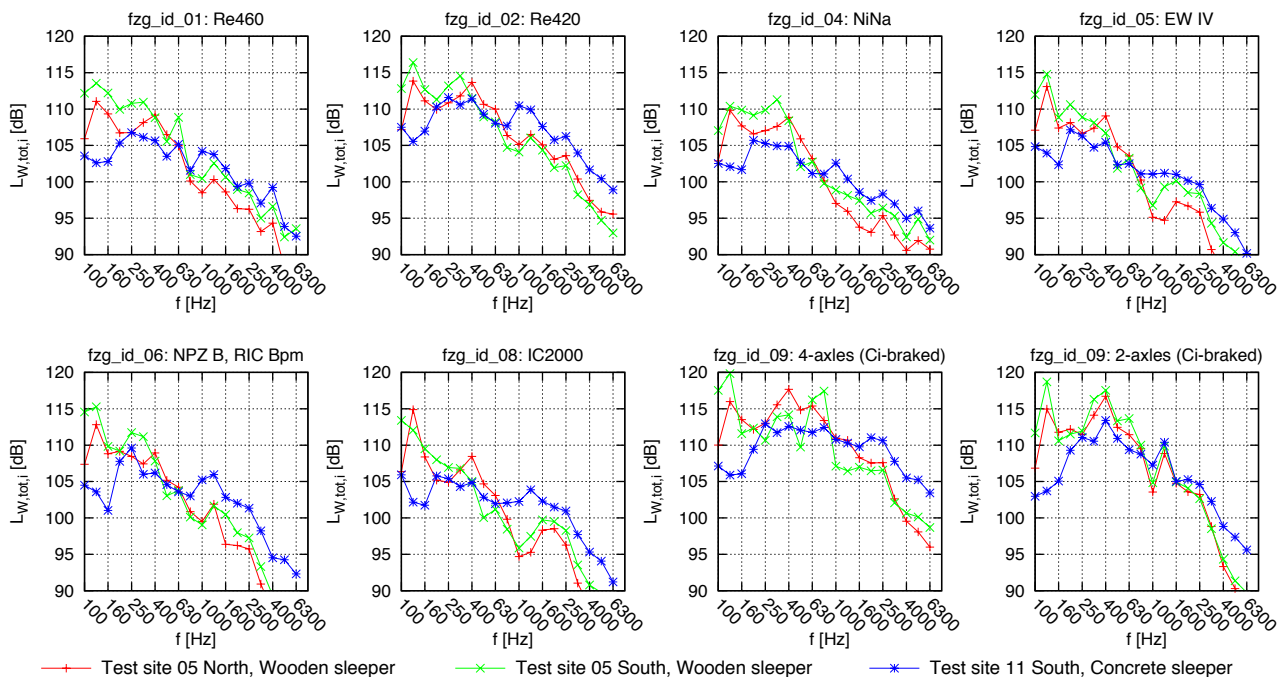


Abbildung 5.44: Vergleich der Emissionspegel der untersuchten Fahrzeuge an den Weichenmessstellen 05 (Weichen mit Holzschwellen) und 11 (Weiche mit Betonschwellen), bei 80 km/h berechnet für die Fahrzeuglänge pro Kategorie

der Messstelle 05 die Messungen an Weichen mit Holzschwellen erfolgte. Zudem konnten an Messstelle 05 deutliche Einsenkungen des Gleisrostes bei Zugüberfahrten beobachtet werden.

Die Emissionspegel an der Weiche mit Betonschwellen zeigen über einen grossen Frequenzbereich von 100 bis 1600 Hz nahezu konstante Werte, für höhere Frequenzen nehmen die Pegelwerte ab. Bei niedrigen Frequenzen liegen die Pegel deutlich unterhalb der Werte von Weichen mit Holzschwellen. Die Messwerte für Betonschwellen stimmen mit den in [125] durchgeführten TWINS Modellrechnungen qualitativ überein. Für die Ergebnisse der Messungen an den Weichen mit Holzschwellen liegen keine Simulationsergebnisse vor, die Werte zeigen jedoch eine gute Übereinstimmung mit den in [3] angegebenen Werten für die äquivalente Schienenrauheit an Störstellen des IMAGINE Emissionsmodells.¹⁷ Die Anzahl der Achsen die eine Herzstückklücke passieren beeinflusst stark den Emissionspegel in diesem Gleisabschnitt. Bei doppelter Achsanzahl wird eine Zunahme um 3 dB erwartet.¹⁸ Dieser Wert gilt jedoch nur bei gleicher Radrauheit der Fahrzeuge. Die gemessene Pegeldifferenz zwischen den 2- und 4-achsigen Güterwagen des Messzuges beträgt jedoch nur 1 dB, Abbildung 5.48. Dies wird durch die höheren Radrauheiten der 2-achsigen Güterwagen begründet.

¹⁷Im IMAGINE Modell wird jedoch kein Weichentyp spezifiziert.

¹⁸Radprofile können das Verschleissbild "falscher Spurkranz" aufweisen. Im Bereich von Herzstückklücken führt dies zu einer doppelten Stossbelastung und zu einer Zunahme des Emissionspegels. Nach Gleichung (5.22) gilt die äquivalente Schienenrauheit für einen Rad-Schiene Kontakt. Für ein Verschleissprofil "falscher Spurkranz" kann jedoch mit der doppelten Achsanzahl gerechnet werden, so dass der zusätzliche Kontakt auf dem Weichenherzstück in der Emissionsrechnung berücksichtigt wird.

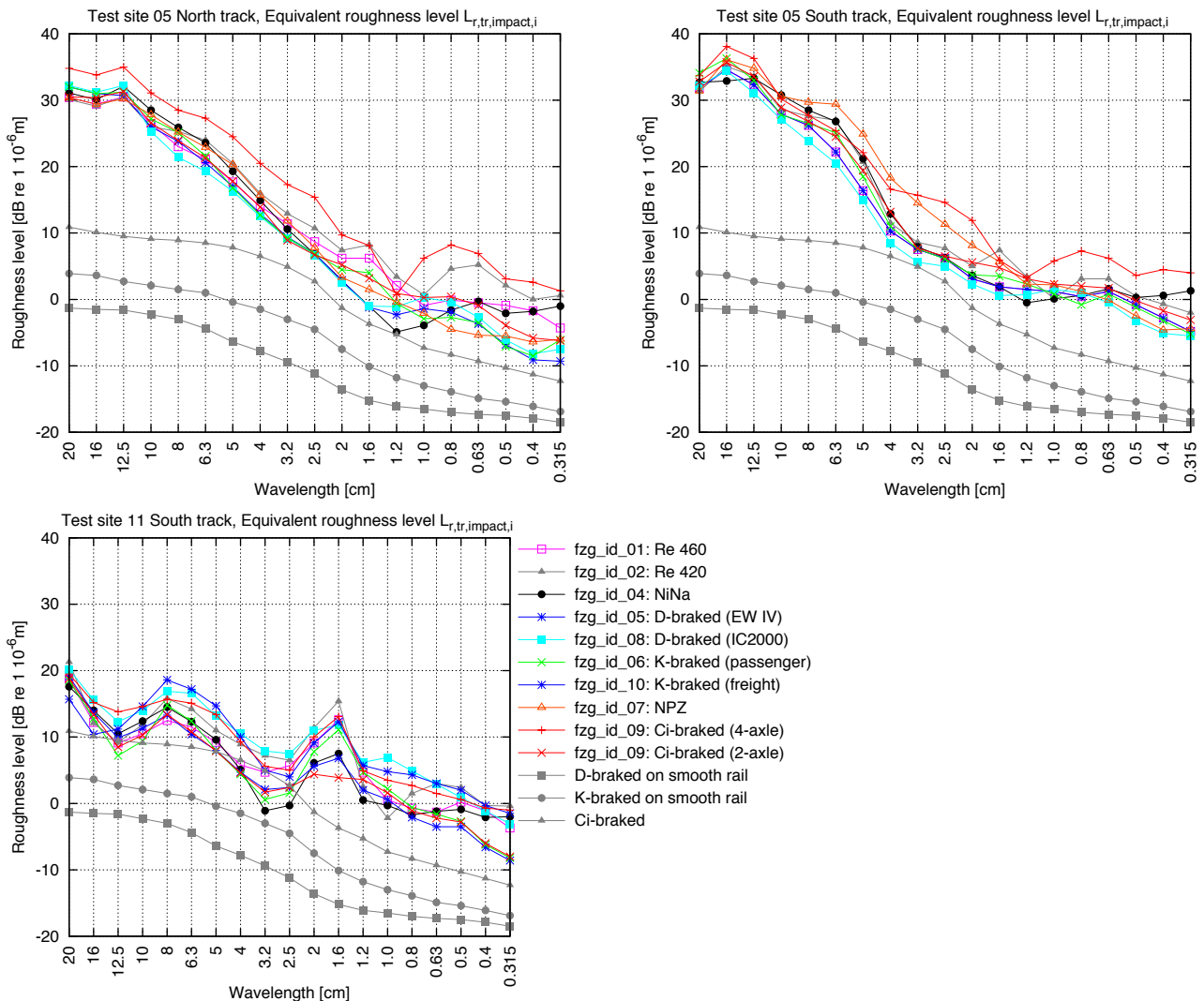


Abbildung 5.45: Äquivalente Schienenrauheit bei Fahrt über eine Herzstücklücke an den Weichenmessstellen 05 und 11, für unterschiedliche Fahrzeugtypen, sowie Vergleichswerte im ungestörten Gleis

5.4.2.2 Vergleich der äquivalenten Schienenrauheiten

Die berechneten äquivalenten Schienenrauheiten sind in Abbildung 5.45 für alle 3 Messquerschnitte und untersuchten Fahrzeugkategorien dargestellt. Deutlich ist die Zunahme der Rauheiten bei allen Fahrzeugkategorien gegenüber dem ungestörten Gleis zu erkennen. Für alle Kategorien werden ähnliche äquivalente Schienenrauheiten berechnet.

Das Rauheitsspektrum an Messstelle 11 zeigt bei allen Fahrzeugkategorien ausgeprägte lokale Maxima und Minima. In [125] wird diese Charakteristik auf die Rezeptanz des Oberbaus zurückgeführt. Modellrechnungen für einen Weichenbereich mit UIC60 Schienen und Betonschwellen führen zu einem lokalen Maximum der Rezeptanzen bei 240 Hz und einem lokalen Minimum bei 550 Hz. Für eine Fahrgeschwindigkeit von 80 km/h entspricht das einer Wellenlänge von 9.3 cm (lokales Maximum) und 4 cm (lokales Minimum). Der Vergleich mit den gemessenen Rauheitsspektren zeigt eine gute Übereinstimmung dieser charakteristischen Punkte.

Diese Charakteristik kann bei den Weichen mit Holzschwellen nicht festgestellt werden. Die äquivalenten Rauheiten liegen bei langen Wellenlängen deutlich über den Werten der Messstelle mit Betonschwellen. Im mittleren und kurzen Wellenlängenbereich sind keine signifikanten Unterschiede erkennbar.

5.4.2.3 Vergleich der Emissionspegel am Weichenherzstück und im ungestörten Gleis

In Abbildung 5.46 und 5.47 werden die Messergebnisse der Weichenmessstelle 11 mit den Ergebnissen der Messstelle 12, südliches Gleis (ungestörtes Gleis) verglichen. Die Ergebnisse lassen folgende Aussagen zu:

1. Die Emissionspegel an Störstellen liegen um bis zu 10 dB über den Werten des ungestörten Gleises. Die ma-

ximalen Unterschiede treten bei scheiben- und K-Klotz gebremsten Fahrzeugen auf. Bei Triebfahrzeugen sinkt die Differenz auf ca. 4 dB ab. Bei GG-Klotz gebremsten Güterwagen beträgt die Pegelerhöhung knapp 1 dB, auf Grund der höheren Emissionspegel im ungestörten Gleis.

2. Die Emissionspegel an den Weichen liegen im gesamten Frequenzbereich über den Werten des ungestörten Gleises.
3. Die Lage des Herzstückes bezüglich des Mikrofonstandorts führt zu Unterschieden in den Emissionspegeln zwischen 1.5 und 2.5 dB. Kein Einfluss der Herzstücklage wurde bei den Flachwagen des Messzugs gemessen, da von keiner abschirmenden Wirkung eines Wagenaufbaus ausgegangen werden kann. Die Abschirmwirkung ist bei den Doppelstockwagen (IC2000) und bei den NiNa-Fahrzeugen (Niederfluranteil) am höchsten.

5.4.3 Schlussfolgerungen für die Modellerstellung

Die Schallemissionen an Störstellen werden durch äquivalente Schienenrauheiten $L_{r,tr,impact,i}$ berechnet. Die Rollgeräuschquelle $L_{W,impact,i}(h = 0\text{ m})$ wird unter Berücksichtigung der äquivalenten Schienenrauheit ermittelt. Die Rollgeräuschquelle $L_{W,impact,i}(h = 0.5\text{ m})$ wird analog zum ungestörten Gleis berechnet. Als Schienenrauheit wird für diese Quellenhöhe die maximale Rauheit der angrenzenden Gleisabschnitte verwendet:

$$L_{W,impact,i}(h = 0\text{ m}) = L_{r,tot,i} + L_{HW,tr,i} + 10\lg N_{ac} \quad (5.24)$$

$$L_{r,tot,i} = L_{r,tr,impact,i} \oplus L_{r,veh,i} + A_{3,i}$$

$$L_{W,impact,i}(h = 0.5\text{ m}) = L_{r,tot,i} + L_{HW,veh,i} + 10\lg N_{ac} \quad (5.25)$$

$$L_{r,tot,i} = L_{r,tr,i} \oplus L_{r,veh,i} + A_{3,i}$$

Die äquivalente Schienenrauheit $L_{r,tr,impact,i}$ an einer Störstelle wird als Default-Wert für folgende Weichentypen definiert:

1. Störstelle (Weiche) mit hoher Steifigkeit des Oberbaus (Weichen mit Betonschwellen),
2. Störstelle (Weiche) mit geringer Steifigkeit des Oberbaus (Weichen mit Holzschwellen).

Die mit diesem Vorgehen berechneten Emissionswerte gelten für einen Gleisabschnitt von je 0.5 m zu beiden Seiten einer Störstelle (vgl. Abschnitt 6.2.3.8).

5.5 Geräuschemissionen auf Brücken

Die Geräuschemissionen von Eisenbahnbrücken können nach [126] durch folgende Punkte charakterisiert werden:

1. Die Abstrahlung des Rollgeräusches von Rad und Schiene analog zum normalen Gleis.
2. Die Schallabstrahlung der Brückenkonstruktion und deren Bauteile durch die Einleitung von Erschütterungen in die Konstruktion bei Zugüberfahrt.
3. Die aus akustischer Sicht ungünstige, meist ungehinderte Schallausbreitung durch fehlende Hindernisse und schallabsorbierende Umgebung. Bei Brücken über Wasseroberflächen muss von einer zusätzlichen reflektierenden Oberfläche ausgegangen werden.

Punkt zwei der obigen Liste stellt in den meisten Anwendungsfällen den dominierenden Einflussfaktor auf das Emissionsverhalten dar. In zahlreichen Untersuchungen [127] – [130] wurde das Emissionsverhalten verschiedener Brückentypen messtechnisch und analytisch untersucht. Dabei stellen Stahlbrücken, insbesondere bei direkter Schienenbefestigung, die Konstruktionen mit den höchsten Emissionspegeln dar. Es sind Pegelzunahmen gegenüber dem normalen Gleis von bis zu 15 dB in 25 Meter Entfernung möglich [114]. Die wesentlichen Pegelunterschiede werden im unteren Frequenzbereich bis 1000 Hz angegeben. Bei höheren Frequenzen werden Emissionspegel ähnlich dem normalen Gleis erwartet [114].

Die Abbildung im Emissionsmodell berücksichtigt die ersten beiden Punkte der obigen Auflistung. Punkt drei ist kein Bestandteil des Emissionsmodells und wird in der Ausbreitungsrechnung berücksichtigt.

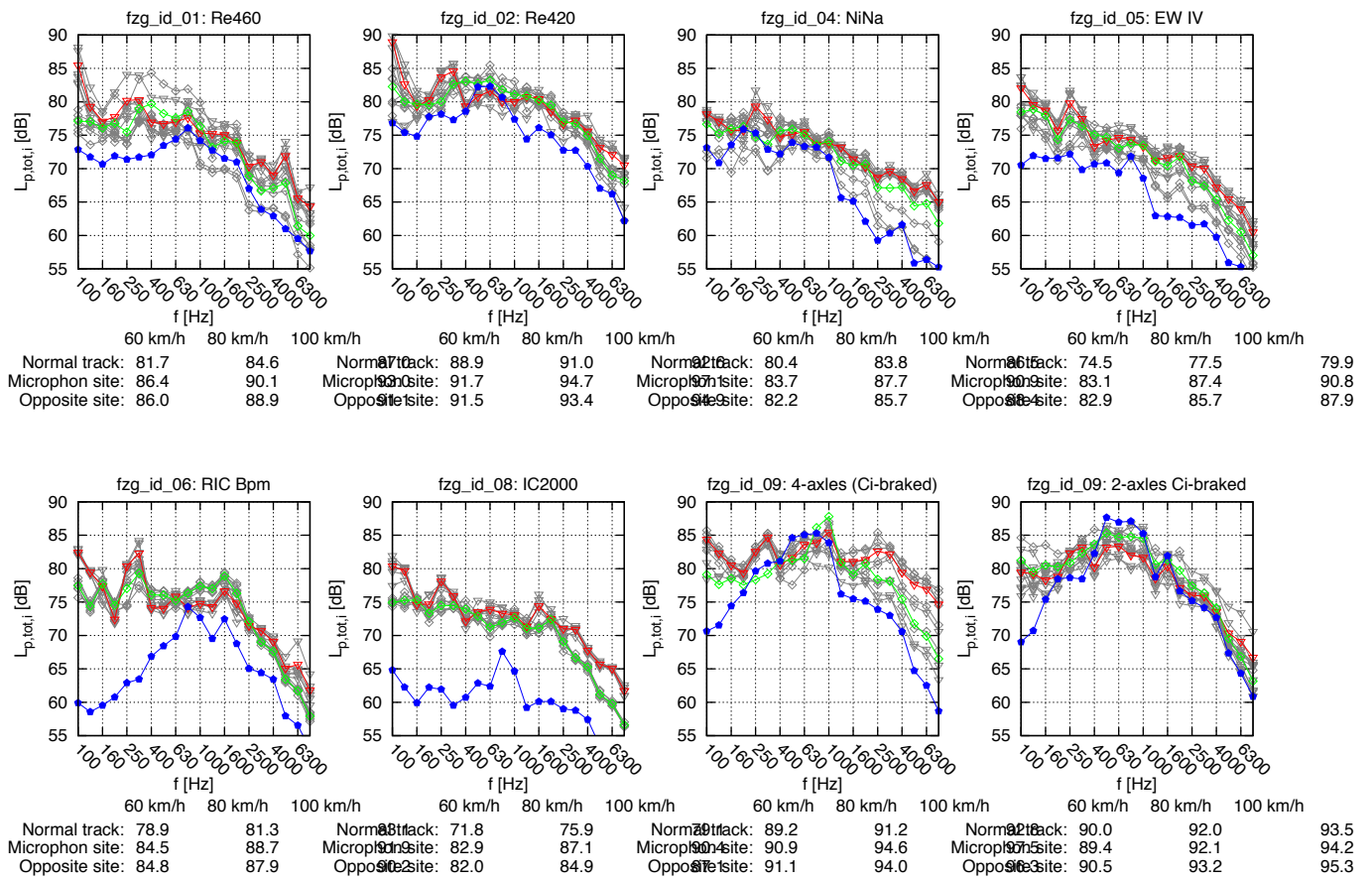


Abbildung 5.46: Vergleich der äquivalenten Schalldruckpegel bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten an der Weichenmessstelle 11 mit den Emissionswerten im normalen Gleis (Messstelle 12)

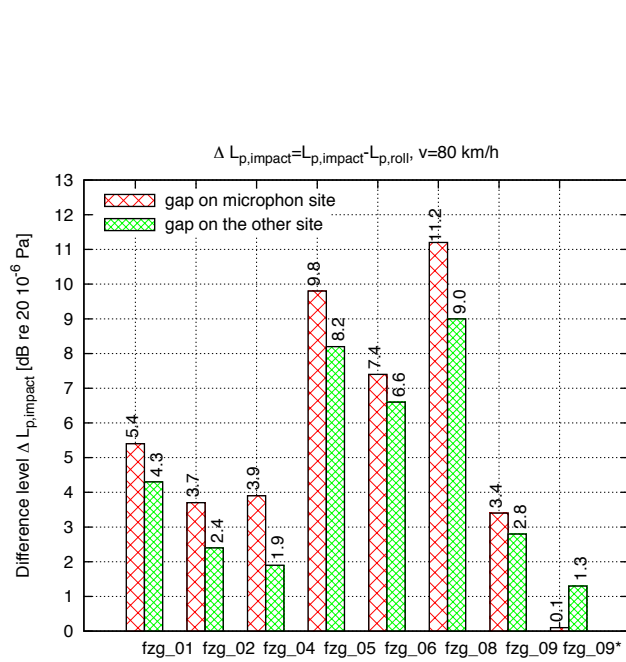


Abbildung 5.47: Differenzpegel zwischen Weichenfahrt und Fahrt im ungestörten Gleis bei $v = 80$ km/h getrennt für Herzstücklage (fzg_id_09*: 2-achsige Güterwagen)

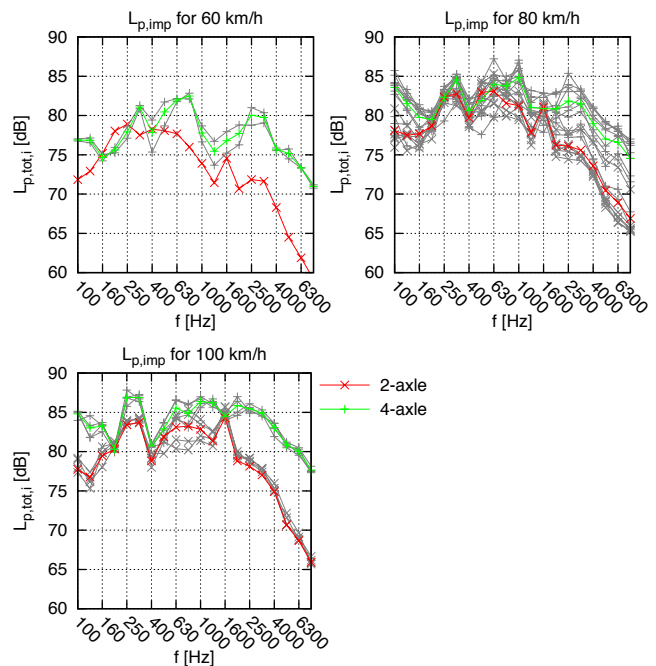


Abbildung 5.48: Emissionspegel der 2- und 4-achsigen Güterwagen des Messzuges an der Weichenmessstelle 11 bei 60, 80 und 100 km/h

5.5.1 Datengrundlage

Die Daten zur Modellerstellung werden durch die Auswertung der angeführten Literaturquellen ermittelt. Dazu werden aus den Literaturangaben (i.R. Schalldruckpegel in 25 Meter Entfernung und 3.5 m über SOK) Schallleistungsspektren berechnet. Die Berechnung der Schallleistungen erfolgt für Monopolquellen:

$$L_{W,bridge,i} = L_{p,bridge,i} + 10 \lg(4\pi) + 20 \lg(d) \quad (5.26)$$

Es wird in 3 Brückenkategorien mit verschiedenen Untertypen unterschieden:

1. Beton Massivbauweise mit Schotteroberbau auf Vollplatte oder Hohlkasten,
2. Stahlbeton-Verbundbauweise mit Schotteroberbau,
3. Stahlbauweise mit und ohne Schotteroberbau auf Fachwerk, Vollplatte oder Hohlkasten.

Brücken in Massiv- und Stahlbeton-Verbundbauweise werden nach [127] stets mit Schotterbett ausgeführt. Stahlbrücken werden mit Schotteroberbau oder mit direkter Schienenbefestigung ausgeführt.

5.5.2 Einfluss von Rauheiten und Track Decay Rate

Das in [126] vorgestellte Modell zur Berechnung der Schallabstrahlung an Brücken geht analog zum normalen Gleis von der effektiven Gesamtrauheit als anregende Grösse aus. Bei der Berechnung der Gleisschwingungen wird jedoch angenommen, dass im unteren Frequenzbereich ein Einfluss der Brückenkonstruktion auf das Schwingverhalten des Gleises besteht. Es kann daher im Bereich grosser Wellenlängen (100 Hz, 120 km/h: $\lambda = 33$ cm) ein Einfluss der Brückenkonstruktion auf das Rollgeräusch nicht ausgeschlossen werden.

In [131] werden Messungen an einer Stahlfachwerkbrücke in Burgdorf (Schweiz) vorgestellt. Die effektiven Rauheiten wurden auf der Brücke mittels der indirekten Rauheitsmessung erfasst. Der Vergleich mit den Rauheitsspektren im normalen Gleis zeigt für diesen Anwendungsfall keine signifikanten Abweichungen.

In [122] wird die TDR im geraden Gleis und auf einer Brücke mit direkter Schienenbefestigung verglichen. Die TDR auf der Brücke liegt im mittleren Frequenzbereich 400 – 2000 Hz deutlich unterhalb der TDR des normalen Gleises. Es ist somit von einer Zunahme des Rollgeräusches auszugehen, welche zusätzlich zu der Schallabstrahlung des Brückenbauwerks berücksichtigt werden muss.¹⁹ Dieser Effekt wird im vorliegenden Modell jedoch nicht berücksichtigt. Auf Brücken werden die Transferfunktionen des normalen Gleises verwendet.

5.5.3 Schlussfolgerungen für die Modellerstellung

Die Berechnung der Emissionspegel auf Brücken erfolgt über einen frequenzabhängigen Pegelzuschlag $L_{W,bridge,i}$ in der Quellenhöhe 0 m. Die Berechnung des Rollgeräusches der Quellenhöhe 0.5 m erfolgt analog dem normalen Gleis.

$$L_{W,tr,i} = (L_{r,tot,i} + L_{HW,tr,i} + 10 \lg N_{ac}) \oplus L_{W,bridge,i} \quad (5.27)$$

$$L_{W,veh,i} = L_{r,tot,i} + L_{HW,veh,i} + 10 \lg N_{ac} \quad (5.28)$$

Die Pegelzuschläge werden als Standardwerte im Modell zur Verfügung gestellt. In Anlehnung an [132] werden die Berechnungen für Brücken mit einer Länge grösser 10 Meter durchgeführt.

¹⁹Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Zunahme des Rollgeräusches gegenüber der Schallabstrahlung der Brückenkonstruktion vernachlässigt werden kann.

6 Standardwerte des Emissionsmodells und Anwendungsbeispiele

6.1 Standardwerte des Emissionsmodells

In diesem Abschnitt werden alle Standardwerte vorgestellt, die für eine Emissionsrechnung benötigt werden. Die Standardwerte sind aus den Ergebnissen der durchgeführten Messungen und Analysen abgeleitet. Für die Anwendung des Emissionsmodells werden folgende Daten zur Verfügung gestellt:

- Standardwerte für 11 Fahrzeugkategorien, sowie deren Fahrzeugtypen (Tabelle 6.1)
- Sekundärquellenleistungen für 11 Fahrzeugkategorien, sowie deren Fahrzeugtypen (Tabelle 6.4 bis 6.6)
- Sekundärquellenleistungen für aerodynamische Geräusche an Triebfahrzeugen und Steuerwagen (Tabelle 6.7)
- Standardwerte für 3 Schienenrauheitskategorien (Tabelle 6.3)
- Standardwerte für 6 Radrauheitskategorien (Tabelle 6.3)
- Standardwerte für 2 Weichentypen (Tabelle 6.3)
- Standardwerte für 2 Radrauheiten im Gleisbogen (Tabelle 6.3)
- Kontaktfilter für 3 Raddurchmesser und Radlasten (Tabelle 6.8)
- Transferfunktionen für 6 Oberbautypen (Tabelle 6.9)
- Transferfunktionen für 2 Radbautypen (Tabelle 6.9)
- Pegelzuschläge für 11 Brückentypen (Tabelle 6.10)

Folgende Berechnungsmethoden sind im Modell implementiert:

- Default-Methode: Verwendung der von *sonRAIL* bereitgestellten Werten
- User-Methode: Verwendung von nutzerspezifischen Daten (z.B. Rauheiten) in Kombination mit den von *sonRAIL* bereitgestellten Werten

6.1.1 Definition von Fahrzeugkategorien und Fahrzeugtypen

Im Emissionsmodell sind 11 Fahrzeugkategorien definiert, die zusätzlich in Fahrzeugtypen unterteilt sind. Die Tabelle 6.1 enthält die definierten Fahrzeugkategorien und deren Standardwerte.

Die zusätzliche Unterteilung in Fahrzeugtypen ermöglicht die Anpassung und Erweiterung der zu modellierenden Fahrzeuge, dies ist insbesondere bei Triebfahrzeugen und Güterwagen erforderlich. Triebfahrzeuge können sich vor allem in Achszahl und Sekundärquellenleistungen unterscheiden. Bei Güterwagen bestehen oft Unterschiede in Fahrzeuglänge und Achszahl. Fahrzeuge die nicht in der Auflistung aufgeführt sind oder die mehreren Fahrzeugkategorien zugeordnet werden können (Beispiel: angetriebene Doppelstockzüge der S-Bahn Zürich), sollten der Kategorie der dominierenden Geräuschquelle zugeordnet werden.

6.1.2 Klassifizierte Rad- und Schienenrauheiten

Die im Emissionsmodell implementierten Rauheitsspektren sind in Tabelle 6.3 aufgeführt. Die Radrauheiten $L_{r,veh,i}$ werden als fahrzeugfeste Parameter jeder Fahrzeugkategorie definiert:

1. D-braked: Fahrzeuge mit Rad- oder Wellenbremsscheiben¹

¹Basierend auf den Messergebnissen wird abweichend davon für die scheibengebremsten Mittelwagen der NiNa Züge ein gesondertes Radrauheitsspektren angegeben, vgl. Abschnitt 5.1.3.2.

Tabelle 6.1: Implementierte Fahrzeugkategorien und deren zugeordnete Modellparameter

fzg_id_01	Moderne Triebfahrzeuge und Triebköpfe mit Umrichtertechnik und Drehstromfahrmotoren				
	Radrauheit: D-braked*	Re460		Re481 Re482 Re484 Re485	BR401 
fzg_id_02	Ältere Triebfahrzeuge mit Gleich-/Wechselstromfahrmotoren				
	Radrauheit: Ci-braked†	Re420		Re620 	Ae610 
fzg_id_03	Triebzug mit verteilten Antrieben, Aggregate grösstenteils unterflur				
	Radrauheit: D-braked	ICN		ETR 610 	FLIRT 
fzg_id_04	Triebzug mit verteilten Antrieben, Aggregate grösstenteils auf dem Dach				
	Radrauheit: D-braked‡	NiNa			
fzg_id_05	Scheibengebremste Personenwagen				
	Radrauheit: D-braked	EWIV		NPZ Bt 	ICE Mittelwagen 
fzg_id_06	K-Klotz gebremste Personenwagen				
	Radrauheit: K-braked	EW II		RIC Bpm 	
fzg_id_07	Triebwagen mit GG-Klotz Bremse oder Putzklötzen				
	Radrauheit: D-braked§	NPZ RBD		RBe 4/4 	
fzg_id_08	Scheibengebremste Doppelstockwagen				
	Radrauheit: D-braked	IC2000		S-Bahn Zürich 	
fzg_id_09	GG-Klotz gebremste Güterwagen				
	Radrauheit: Ci-braked				
fzg_id_10	K-Klotz gebremste Güterwagen				
	Radrauheit: K-braked				
fzg_id_11	Fahrzeuge der Rollenden Landstrasse				
	Radrauheit: D-braked	RoLa			

*Davon abweichend werden für Re460/Re465 Fahrzeuge gesonderte Rauheitsspektren für Verbundstoff-Bremsklötzen aus Sintermaterial angegeben.

†Angepasstes Radrauheitsspektrum für Re420/620 und Ae610 Fahrzeuge.

‡Gilt nur für die Triebwagen. Für die scheibengebremsten Mittelwagen der NiNa Züge wird ein gesondertes Radrauheitsspektrum angegeben, vgl. Abschnitt 5.1.3.2.

§Angepasstes Radrauheitsspektrum für NPZ RBD Fahrzeuge mit Verbundstoff-Bremsklötzen aus Sintermaterial.

Tabelle 6.2: Implementierte Schienen- und äquivalente Rauheiten im Emissionsmodell

Rail roughness categories $L_{r,tr,i}$		
id	Kategorie	Definition
01	smooth	glatter Schienenzustand $L_{\lambda,CA} < 4 \text{ dB(A)}$
02	average	durchschnittlicher Schienenzustand $4 \leq L_{\lambda,CA} \leq 10 \text{ dB(A)}$
03	bad	schlechter Schienenzustand $L_{\lambda,CA} > 10 \text{ dB(A)}$
Equivalent wheel roughness categories $L_{r,veh,curve,i}$		
id	Kategorie	Definition
01	smooth	Fahrzeuge, deren Rauheitsspektren im Bogen und in der Geraden nur geringe Abweichungen aufweisen
02	bad	Fahrzeuge, deren Rauheitsspektren im Bogen, insbesondere an der bogenäusseren Schiene, deutlich über den Werten des geraden Gleis liegen

2. K-braked: Fahrzeuge mit Verbundstoff-Bremsklötzen²
3. Ci-braked: Fahrzeuge mit Grauguss-Bremsklötzen³

In Tabelle 6.2 werden die Schienenrauheiten im ungestörten Gleis $L_{r,tr,i}$ anhand des Rauheitspegels $L_{\lambda,CA}$ in 3 Kategorien unterteilt. Die äquivalenten Radrauheiten $L_{r,veh,curve,i}$ beschreiben die Geräuschemission im Gleisbogen und werden in 2 Rauheitskategorien unterteilt. Die äquivalenten Schienenrauheiten $L_{r,tr,impact,i}$ werden für Weichenbereiche mit Holz- und Betonschwellen angegeben.

6.1.3 Sekundäre Quellenleistungen

Die Tabellen 6.4 bis 6.6 enthalten für alle Fahrzeugkategorien die sekundären Quellenleistungen der Quellenhöhen 0,5, 2, 3 und 4 m. Für jede Terzfrequenz zwischen 100 und 8000 Hz wird der Grundwert $L_{W80,hki}$ sowie die Geschwindigkeitsabhängigkeit β_{hki} angegeben. Bei angetriebenen Fahrzeugen wird zusätzlich in durchschnittliche und ausgeprägte Sekundärleistungen unterschieden.

Die Tabelle 6.7 enthält die Grundwerte $L_{W200,hki}$ für die Berechnung von Schalleistungsspektren aerodynamischer Geräuschquellen an Triebfahrzeugen, Steuerwagen sowie Triebzügen.

Durchschnittliche Sekundärquellenleistungen Die Angabe von durchschnittlichen Sekundärquellenleistungen erfasst den energetischen Mittelwert aller gemessenen Fahrzeuge einer Kategorie bei einer Geschwindigkeit. Somit werden die durchschnittlichen Betriebszustände von Aggregaten, Antrieben und aerodynamischen Quellen erfasst. Die Verwendung der durchschnittlichen Sekundärquellenleistungen wird in der Emissionsrechnung als Standardfall angenommen.

Ausgeprägte Sekundärquellenleistungen Sollen Sekundärquellenleistungen von Fahrzeugen modelliert werden, deren Emissionspegel über den Durchschnittswerten liegen, können bei Triebfahrzeugen die Default-Werte für ausgeprägte Sekundärleistungen verwendet werden. Diese Werte basieren auf Messwerten von Fahrzeugen, deren Quellenleistungen deutlich über den Durchschnittswerten dieser Kategorie liegen. Diese Quellenwerte sollten nur zur Berechnung spezieller Betriebszustände verwendet werden.

Auch bei Kesselwagen und gedeckten Güterwagen mit Grauguss-Klotzbremsen⁴ können in den Emissionsrechnungen höhere Sekundärquellenleistungen verwendet werden. Diese basieren auf den durchgeführten Messungen und berücksichtigen die höheren Emissionspegel dieser Bauarten (vgl. Tabelle 4.5).

Ausgeprägte aerodynamische Schallquellen Sollen Fahrzeuge mit ausgeprägten aerodynamischen Quellen modelliert werden, können zusätzliche Quellenleistungen in der Modellrechnung berücksichtigt werden. Diese Werte

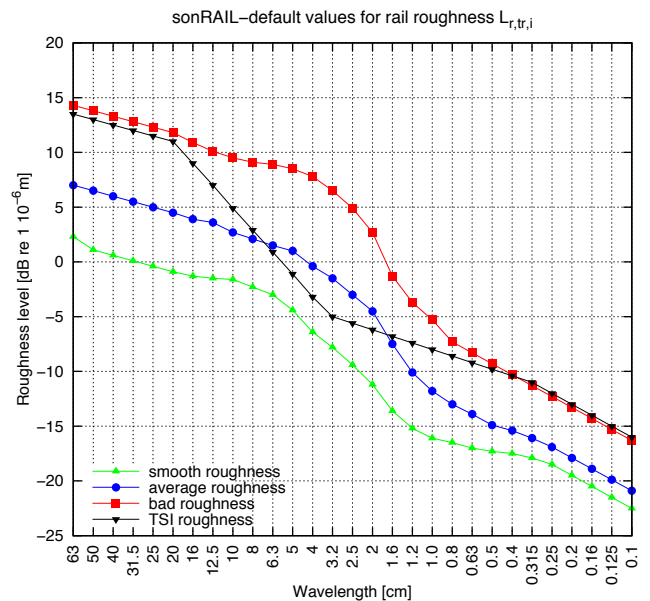
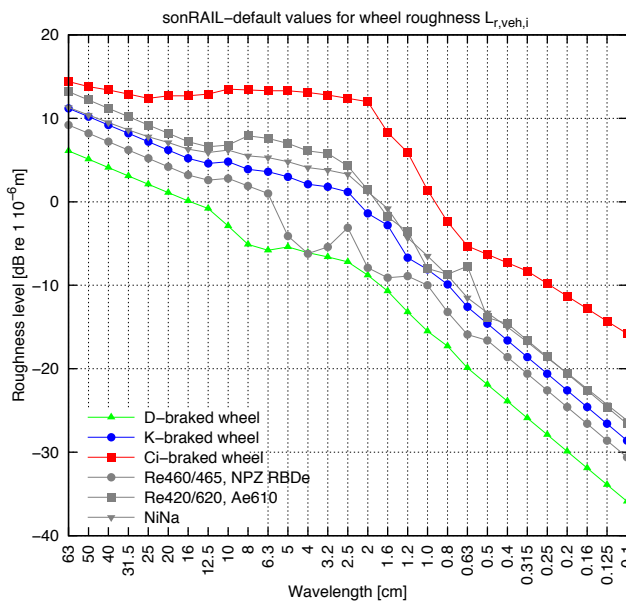
²Gültig für alle Personen- und Güterwagen mit Verbundstoff-Bremsklötzen mit organischen Bremsbelag (Jurid 816M, Cosid 810). Davon abweichend werden für Re460/Re465 Fahrzeuge und NPZ RBD De Triebwagen gesonderte Rauheitsspektren für Verbundstoff-Bremsklötze aus Sintermaterial angegeben.

³Gültig für alle Personen- und Güterwagen mit Grauguss-Bremsklötzen. Davon abweichend werden für Re420, Re620 und Ae610 Fahrzeuge gesonderte Rauheitsspektren angegeben, da diese Fahrzeuge geringere Radrauheiten als GG-Klotz gebremste Güterwagen aufweisen.

⁴Da für Güterwagen mit K-Klotzbremsen noch keine umfassenden Messergebnisse vorliegen, können unterschiedliche Bauarten nicht unterschieden werden. Bei zunehmender Umrüstung der Güterwagen sollte diese Unterscheidung auch für K-Klotz gebremste Fahrzeuge getroffen werden.

Tabelle 6.3: Default-Werte für Rauheitsdaten $L_{r,veh,i}$, $L_{r,tr,i}$, $L_{r,veh,curve,i}$, $L_{r,tr,impact,i}$ [dB re 1 10⁻⁶m]

λ [cm]	Wheel roughness						Rail roughness			Equivalent wheel roughness		Equivalent rail roughness	
	D-braked	K-braked	Ci-braked	Re460 Re465 NPZ RBDDe	Re420 Re620 Ae610	NiNa	smooth	average	bad	smooth	bad	Concrete	Wood-en
63.000	6.1	11.2	14.4	9.2	13.2	11.3	2.3	7.0	14.3	1.8	1.8	23.8	35.6
50.000	5.1	10.2	13.8	8.2	12.2	10.4	1.1	6.5	13.8	0.8	0.8	22.8	35.1
40.000	4.1	9.2	13.4	7.2	11.2	9.5	0.6	6.0	13.3	-0.2	-0.2	21.8	34.1
31.500	3.1	8.2	12.9	6.2	10.2	8.6	0.1	5.5	12.8	-1.2	-1.2	20.8	33.1
25.000	2.1	7.2	12.4	5.2	9.2	7.8	-0.4	5.0	12.3	-2.0	-2.0	19.8	32.1
20.000	1.1	6.2	12.7	4.2	8.2	7.1	-0.9	4.5	11.8	-2.6	-2.6	18.8	31.1
16.000	0.1	5.2	12.7	3.2	7.2	6.3	-1.3	3.9	10.9	-2.1	-2.1	13.5	32.1
12.500	-0.8	4.6	12.9	2.6	6.6	5.9	-1.5	3.6	10.1	-1.8	-1.8	8.9	31.4
10.000	-2.9	4.8	13.5	2.8	6.8	6.2	-1.6	2.7	9.5	-0.7	-0.7	10.6	26.8
8.000	-5.1	3.9	13.4	1.9	7.9	5.5	-2.3	2.1	9.1	-0.2	-0.2	13.5	24.3
6.300	-5.8	3.6	13.3	1.0	7.6	5.3	-3.0	1.5	8.9	-0.2	-0.2	11.0	21.9
5.000	-5.4	3.0	13.3	-4.1	7.0	4.8	-4.4	1.0	8.5	-1.6	-0.6	8.1	17.6
4.000	-6.1	2.1	13.1	-6.2	6.1	4.1	-6.4	-0.4	7.8	-3.1	0.2	4.9	12.6
3.150	-6.6	1.8	12.8	-5.4	5.8	3.8	-7.8	-1.5	6.5	-5.4	0.6	2.1	7.3
2.500	-7.2	1.2	12.4	-3.1	4.3	3.3	-9.4	-3.0	4.9	-4.8	0.7	2.7	5.6
2.000	-8.8	-1.4	12.0	-7.9	1.4	1.2	-11.2	-4.5	2.7	-8.2	0.4	4.5	4.4
1.600	-10.7	-2.8	8.3	-9.1	-1.8	-0.8	-13.6	-7.5	-1.3	-10.7	-2.7	4.0	3.0
1.200	-13.2	-6.7	5.9	-8.9	-3.6	-4.3	-15.2	-10.1	-3.7	-13.3	-3.9	3.6	1.0
1.000	-15.5	-8.1	1.4	-10.0	-8.0	-6.5	-16.1	-11.8	-5.3	-16.2	-6.2	1.7	0.3
0.800	-17.3	-9.9	-2.4	-13.2	-8.7	-8.8	-16.5	-13.0	-7.3	-16.2	-7.0	-1.0	0.2
0.630	-19.9	-12.6	-5.3	-15.9	-7.7	-11.5	-17.0	-13.9	-8.3	-15.9	-5.4	-2.1	-0.6
0.500	-21.9	-14.6	-6.3	-16.6	-13.9	-13.3	-17.3	-14.9	-9.3	-14.8	-5.7	-2.7	-3.0
0.400	-23.9	-16.6	-7.3	-18.6	-14.6	-15.0	-17.5	-15.4	-10.3	-15.0	-6.0	-5.7	-4.7
0.315	-25.9	-18.6	-8.3	-20.6	-16.6	-16.8	-17.9	-16.1	-11.3	-16.0	-6.3	-7.6	-5.7
0.250	-27.9	-20.6	-9.8	-22.6	-18.6	-18.7	-18.5	-16.9	-12.3	-17.0	-6.6	-9.4	-7.7
0.200	-29.9	-22.6	-11.3	-24.6	-20.6	-20.5	-19.5	-17.9	-13.3	-18.0	-6.9	-11.3	-9.7
0.160	-31.9	-24.6	-12.8	-26.6	-22.6	-22.4	-20.5	-18.9	-14.3	-19.0	-7.2	-13.1	-11.7
0.125	-33.9	-26.6	-14.3	-28.6	-24.6	-24.3	-21.5	-19.9	-15.3	-20.0	-7.5	-14.9	-13.7
0.100	-35.9	-28.6	-15.8	-30.6	-26.6	-26.2	-22.5	-20.9	-16.3	-21.0	-7.8	-16.7	-15.7



basieren auf Messungen an Fahrzeugen, deren aerodynamische Quellenleistungen deutlich über den Durchschnittswerten liegen.

Typische Anwendungsfälle sind Emissionsrechnungen an Steuerwagen der Kategorie 05 und 08.

Die Quellenleistungen von ausgeprägten Sekundärquellen und ausgeprägten aerodynamischen Quellen können in der Modellrechnung kombiniert werden.

Verwendung von sekundären Schalleistungen des IMAGINE Modells Ergänzend zu den angegebenen sekundären Schalleistungen können auch die Standardwerte des IMAGINE Modells verwendet werden. In [3], [133]-[136] wird das IMAGINE Modell für Sekundärgeräusche an Schienenfahrzeugen ausführlich erläutert. Diese Daten enthalten auch Werte für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren und weitere Elektrofahrzeuge. Es werden Werte für den Stillstand, bei konstanter Geschwindigkeit und bei Anfahrt unter Last angegeben. Bei der Integration der Daten in das *sonRAIL* Modell muss darauf geachtet werden, dass die in [2] tabellarisch angegebenen Schalldruckpegel L_{peq} in Schalleistungsspegele umzurechnen sind.

6.1.4 Verwendung von Abnahmedaten

Bei einer Fahrzeugzulassung muss die Einhaltung von Aussenschallpegeln nachgewiesen werden. Anhand dieser Messdaten kann ein Fahrzeug als neuer Typ in eine bestehende Kategorie oder als neue Fahrzeugkategorie in das Modell eingefügt werden. Wird nur das Vorbeifahrtgeräusch als A-bewerteter Summenschalldruckpegel erfasst, ist eine Modellintegration nur sehr unzureichend möglich. Eine Trennung von Roll- und Sekundärgeräuschen ist nicht möglich, ebenso fehlen Angaben zur spektralen Zusammensetzung des Vorbeifahrtpegels. Entsprechend der Fahrzeugbauart (angetrieben/nicht angetrieben, Drehstrom/Gleichstrom, etc.) kann das Fahrzeug einer bestehenden Kategorie zugeordnet werden. Die Abbildung 7.67 kann dabei Anhaltspunkte für die Auswahl einer Kategorie geben. Damit diese Zuordnung möglich ist, muss jedoch die Schienenrauheit des Abnahmgleises bekannt oder mindestens abgeschätzt werden.⁵

Bei Stillstandsmessungen sollten die einzelnen Sekundärquellen (wenn möglich) getrennt betrieben und gemessen werden. Die Schalldrucksignale im Frequenzspektrum zwischen 100 und 8000 Hz müssen anschliessend in Schalleistungsspektren zurückgerechnet und einer der fünf Quellenhöhen zugeordnet werden.

Mit Hinblick auf eine Modellintegration von neuen Fahrzeugen sollten folgende Randparameter bei Abnahmemessungen erfasst werden:

1. Schalldruck-/Schalleistungsspektren zwischen 100 und 8000 Hz getrennt für einzelne Sekundärquellen im Stillstand und bei Vorbeifahrten mit 80 km/h
2. Summenschalldruckpegel von Vorbeifahrten
3. Rad-/Schienerauheiten oder effektive Gesamtrauheiten der indirekten Messung

6.1.5 Oberbau- und Brückentypen

Die Tabelle 6.9 enthält die Transferfunktionen für alle Oberbau- und Fahrzeugtypen.⁶ Weitere Transferfunktionen können mit den beschriebenen Messmethoden bestimmt oder mit *TWINS* berechnet werden. Weiterhin können die Transferfunktionen des *IMAGINE* Modells verwendet werden.⁷

Die Tabelle 6.10 enthält die Pegelzuschläge für alle Brückentypen $L_{W,bridge,i}$. Die Zuschläge werden geschwindigkeitsunabhängig vergeben. Die Tabellen 6.11 und 6.12 geben Beispiele von ausgeführten Bauwerken.

⁵Wurden die Abnahmemessungen auf einem TSI konformen Gleis durchgeführt, so müssen die Werte der Schienenrauheitskategorie "average" verwendet werden. Nach Tabelle 4.1 beträgt der Rauheitspegel für ein Gleis mit TSI Rauheit 8.9 dB(A).

⁶Die Beschreibung der akustischen Eigenschaften von unterschiedlichen Oberbautypen erfolgt nicht über die Track Decay Rate, da diese innerhalb des Gesamtmodells *sonRAIL* nicht an jedem Emissionsort als bekannt vorausgesetzt werden. Daher werden die unterschiedlichen Abstrahleigenschaften eines Oberbaus durch die Angabe des Schwellentyps definiert. Bei diesem Vorgehen wird eine "typische" Oberbausteifigkeit pro Oberbautyp angenommen. Diese Annahme wird durch die direkte Messung der TDR für unterschiedliche Schwellentypen bestätigt, vgl. Abbildung 4.7. Unterschiede in der Oberbausteifigkeit innerhalb eines Schwellentyps werden im Modell nicht erfasst. Bei von den Default-Werten abweichenden Steifigkeiten kann jedoch dieser Oberbau als neuer Typ in das Modell eingefügt werden.

⁷Im *IMAGINE* Modell werden die Transferfunktionen bezogen auf Schalldrucksignale angegeben. Daher muss eine Umrechnung der Transferfunktionen auf Schalleistungsspegele erfolgen.

Tabelle 6.5: Parameter $L_{W80,hki}$, β_{hki} zur Berechnung der Schalleistungen $L_{W,hki}$ für die Fahrzeugkategorien 03 bis 07

Fahrzeugkategorie k=3 – Triebzug mit verteilten Antrieben, Aggregate unterflur (ICN RABDe 500)																					
h	f_i	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000
0.5	$L_{W3.05}$	92.6	94.3	92.8	92.1	91.9	92.4	95.8	96.3	97.3	100.4	99.9	92.0	87.6	88.4	87.1	84.5	84.7	84.8	80.3	78.3
	$\beta_{3.05}$	30.5	32.2	29.4	28.9	23.1	20.2	12.3	16.2	16.9	25.9	30.2	35.5	40.2	45.6	44.0	38.4	35.7	30.7	36.4	36.4
2	$L_{W3.2}$	97.1	91.1	87.1	88.4	91.9	87.1	87.2	87.0	88.8	89.4	91.0	87.3	87.9	87.1	85.9	83.3	83.5	83.6	79.1	77.1
	$\beta_{3.2}$	42.1	39.5	42.4	37.5	30.1	27.5	29.2	28.8	27.3	26.3	25.8	27.6	26.5	27.4	28.5	29.1	31.2	29.8	32.1	33.4
3	$L_{W3.3}$	85.2	86.4	88.2	89.0	82.7	82.2	84.9	83.2	81.4	82.1	83.5	83.5	80.4	78.5	77.5	79.5	77.5	75.5	73.5	71.5
	$\beta_{3.3}$	51.2	46.2	40.5	37.4	34.5	30.1	27.2	33.2	34.5	35.3	32.8	30.9	38.4	45.1	42.7	37.2	37.2	37.2	37.2	37.2
4	$L_{W3.4}$	86.1	87.0	86.0	85.3	78.4	83.5	82.2	79.3	80.7	80.4	82.6	83.4	79.7	77.7	77.7	79.2	77.2	75.2	73.2	71.2
	$\beta_{3.4}$	40.3	36.1	33.5	32.5	42.6	33.2	38.0	45.9	42.3	41.7	37.0	36.9	42.2	48.6	45.4	43.4	43.4	43.4	43.4	43.4
Fahrzeugkategorie k=3 – Triebzug mit verteilten Antrieben, Aggregate unterflur, mit ausgeprägten Sekundärquellen (ICN RABDe 500)																					
h	f_i	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000
0.5	$L_{W3.05}$	99.7	97.5	93.7	93.3	93.9	96.2	98.2	97.4	99.4	108.5	105.2	96.3	97.6	99.4	96.4	96.7	92.4	90.1	90.2	88.0
	$\beta_{3.05}$	30.5	32.2	29.4	28.9	23.1	20.2	24.5	30.5	27.9	25.9	30.2	35.5	40.2	46.5	37.4	38.4	35.7	30.7	36.4	36.4
2	$L_{W3.2}$	97.1	91.1	87.1	88.4	91.9	87.1	87.2	87.0	88.8	93.9	94.6	87.3	87.9	87.1	84.8	83.3	82.0	80.1	79.9	80.4
	$\beta_{3.2}$	42.1	39.5	42.4	37.5	30.1	27.5	29.2	28.8	27.3	26.3	25.8	27.6	26.5	46.8	48.1	42.8	35.6	35.4	36.1	32.5
3	$L_{W3.3}$	97.2	98.4	100.2	101	96.7	96.2	98.9	97.2	95.4	96.1	97.5	97.5	94.4	92.5	91.5	93.5	91.5	89.5	87.5	85.5
	$\beta_{3.3}$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	$L_{W3.4}$	98.1	99	98	97.3	90.4	95.5	94.2	91.3	92.7	92.4	94.6	95.4	91.7	89.7	89.7	91.2	89.2	87.2	85.2	83.2
	$\beta_{3.4}$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Fahrzeugkategorie k=4 – Nichtangetriebene Mittelwagen (NINA RABe 525)																					
h	f_i	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000
2	$L_{W4.2}$	88.8	87.4	89.7	93.6	92.8	85.5	88.9	86.2	87.0	84.3	87.0	84.3	81.5	80.0	76.9	76.0	77.5	75.3	75.3	75.9
	$\beta_{4.2}$	53.8	51.3	48.9	44.2	44.6	36.0	25.3	21.3	24.5	27.6	25.4	20.6	28.1	43.6	47.6	39.1	27.5	26.9	28.3	27.2
3	$L_{W4.3}$	88.0	85.0	86.2	87.9	85.0	81.6	84.9	83.5	79.6	80.0	82.4	81.3	77.0	76.6	74.5	76.1	74.1	72.1	70.1	68.1
	$\beta_{4.3}$	56.2	54.0	40.6	44.2	42.4	38.3	23.0	20.5	27.8	31.2	26.2	20.5	30.3	43.4	46.6	37.9	37.9	37.9	37.9	37.9
4	$L_{W4.4}$	86.9	83.8	83.1	83.1	76.5	79.8	78.7	76.4	76.3	75.7	79.6	79.8	73.4	73.7	72.5	74.1	72.1	70.1	68.1	66.1
	$\beta_{4.4}$	50.4	58.2	45.7	43.6	32.9	25.1	11.3	20.0	26.5	30.7	25.5	19.8	19.7	38.1	43.9	33.9	33.9	33.9	33.9	33.9
Fahrzeugkategorie k=4 – Triebwagen, Aggregate auf dem Dach (NINA RABe 525)																					
h	f_i	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000
0.5	$L_{W4.05}$	88.6	87.1	84.7	80.1	91.5	93.5	95.2	96.6	95.3	94.1	94.0	94.4	92.4	94.7	89.6	90.5	87.7	84.9	85.5	83.1
	$\beta_{4.05}$	30.5	32.2	29.4	28.9	23.1	20.2	23.5	25.4	26.1	23.9	23.2	25.5	30.2	35.6	34.0	28.4	25.7	20.7	26.4	26.4
2	$L_{W4.2}$	88.8	87.4	89.7	93.6	92.8	85.5	88.9	86.2	87.0	84.3	87.0	84.3	81.5	80.0	76.9	76.0	77.5	75.3	75.3	75.9
	$\beta_{4.2}$	53.8	51.3	48.9	44.2	44.6	36.0	25.3	21.3	24.5	27.6	25.4	20.6	28.1	43.6	47.6	39.1	27.5	26.9	28.3	27.2
3	$L_{W4.3}$	88.0	85.0	86.2	87.9	85.0	81.6	84.9	83.5	79.6	80.0	82.4	81.3	77.0	76.6	74.5	76.1	74.1	72.1	70.1	68.1
	$\beta_{4.3}$	56.2	54.0	40.6	44.2	42.4	38.3	23.0	20.5	27.8	31.2	26.2	20.5	30.3	43.4	46.6	37.9	37.9	37.9	37.9	37.9
4	$L_{W4.4}$	86.9	83.8	83.1	83.1	76.5	79.8	78.7	76.4	76.3	75.7	79.6	79.8	73.4	73.7	72.5	74.1	72.1	70.1	68.1	66.1
	$\beta_{4.4}$	50.4	58.2	45.7	43.6	32.9	25.1	11.3	20.0	26.5	30.7	25.5	19.8	19.7	38.1	43.9	33.9	33.9	33.9	33.9	33.9
Fahrzeugkategorie k=5 – Reisezugwagen scheinbgebremst (EWIV, nicht angetriebene Mittelwagen von Triebzügen)																					
h	f_i	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000
2	$L_{W5.2}$	88.8	86.5	85.1	87.0	86.4	85.3	88.6	87.3	87.5	85.7	87.7	84.5	83.7	83.2	79.1	78.2	80.6	80.5	79.1	78.9
	$\beta_{5.2}$	39.8	37.3	34.9	30.2	30.6	26	25.8	27.9	27.5	28.2	34.2	37.5	35.2	36.4	37.6	29.1	27.5	26.9	28.3	27.2
3	$L_{W5.3}$	86.8	84.5	83.1	85.0	84.4	83.3	84.6	83.3	83.5	81.7	83.7	80.5	79.7	78.4	77.1	76.2	74.2	72.2	70.2	68.2
	$\beta_{5.3}$	45.1	35.4	27.9	23.2	23.6	21.0	17.8	19.9	19.5	20.2	26.2	29.5	30.3	31.4	32.6	24.1	24.1	24.1	24.1	24.1
4	$L_{W5.4}$	86.4	85.2	81.4	79.6	78.3	80.9	82.5	79.4	77.5	77.0	80.1	82.8	80.1	77.4	74.1	76.4	74.4	72.4	70.4	68.4
	$\beta_{5.4}$	50.4	49.8	45.7	43.6	32.9	25.1	11.3	20.0	26.5	30.7	25.5	19.8	19.7	38.1	43.9	33.9	33.9	33.9	33.9	33.9
Fahrzeugkategorie k=6 – Reisezugwagen K-Klotz gebremst (RIC Bpm, NPZ AB)																					
h	f_i	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000
2	$L_{W6.2}$	83.8	84.7	87.0	91.6	92.8	89.4	92.8	91.2	92.4	92.3	94.6	92.0	91.8	87.6	86.2	85.0	84.4	82.3	81.4	81.5
	$\beta_{6.2}$	53.8	51.3	48.9	44.2	44.6	36.0	25.3	21.3	24.5	27.6	25.4	20.6	28.1	43.6	47.6	39.1	27.5	26.9	28.3	27.2
3	$L_{W6.3}$	84.0	83.7	88.0	89.5	86.8	85.7	86.7	86.9	85.2	86.9	89.3	86.9	83.4	81.5	80.9	80.1	78.1	76.1	74.1	72.1
	$\beta_{6.3}$	56.2	54.0	40.6	44.2	42.4	38.3	23.0	20.5	27.8	31.2	26.2	20.5	30.3	29.7	28.9	30.1	30.1	30.1	30.1	30.1
4	$L_{W6.4}$	83.8	85.8	83.5	83.3	81.3	84.6	85.9	84.6	83.4	84.1	88.9	85.9	81.2	80.7	80.6	79.9	77.9	75.9	73.9	71.9
	$\beta_{6.4}$	50.4	58.2	45.7	43.6	32.9	25.1	11.3	20.0	26.5	30.7	25.5	19.8	19.7	20.3	21.4	20.8	20.8	20.8	20.8	20.8
Fahrzeugkategorie k=7 – NPZ Triebwagen mit Sinter Klotzbremse (NPZ RBDe)																					
h	f_i	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000
0.5	$L_{W7.05}$	99.1	100.8	99.3	98.6	101.4	101.6	106.0	106.0	105.7	106.4	104.6	106.0	104.1	103.2	98.1	93.6	91.2	91.3	86.8	84.8
	$\beta_{7.05}$	28.6	29.4	26.3	29.0	23.4	23.8	24.2	24.2	23.7	19.2	27.0	29.6	33.9	31.6	32.4	27.6	25.4	22.4	30.5	28.9
2	$L_{W7.2}$	89	91.3	93.3	97	96.8	91	98.4	88.8	95.9	94.2	92.3	92.7	87.8	84.2	82.2	81.3	80.9	80.4	80.2	80.2
	$\beta_{7.2}$	18.5	16.7	17.4	12.3	17.5															

Tabelle 6.6: Parameter $L_{W80,hki}$, β_{hki} zur Berechnung der Schallleistungen $L_{W,hki}$ für die Fahrzeugkategorien 08 bis 11

Fahrzeugkategorie k=8 – Doppelstockwagen (IC2000)																					
h	f_i	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000
2	$L_{W8.2}$	88.8	86.5	85.1	87.0	86.4	85.3	88.6	87.3	87.5	85.7	87.7	84.5	83.7	83.2	79.1	78.2	80.6	80.5	79.1	78.9
	$\beta_{8.2}$	39.8	37.3	34.9	30.2	30.6	26.0	25.8	27.9	27.5	28.2	34.2	37.5	35.2	36.4	37.6	29.1	27.5	26.9	28.3	27.2
3	$L_{W8.3}$	86.8	84.5	83.1	85.0	84.4	83.3	84.6	83.3	83.5	81.7	83.7	80.5	79.7	78.4	77.1	76.2	74.2	72.2	70.2	68.2
	$\beta_{8.3}$	45.1	35.4	27.9	23.2	23.6	21.0	17.8	19.9	19.5	20.2	26.2	29.5	30.3	31.4	32.6	24.1	24.1	24.1	24.1	24.1
4	$L_{W8.4}$	86.4	85.2	81.4	77.0	73.5	79.4	83.6	79.1	77.5	78.0	80.4	83.0	78.6	76.8	73.0	75.7	73.7	71.7	69.7	67.7
	$\beta_{8.4}$	50.4	58.2	45.7	44.0	39.7	22.7	11.8	22.9	26.2	26.6	22.7	17.3	21.9	40.4	51.4	38.3	38.3	38.3	38.3	38.3
Fahrzeugkategorie k=9 – Güterwagen (allgemein) GG-Klotz gebremst																					
h	f_i	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000
2	$L_{W9.2}$	83.8	84.7	87.0	91.6	92.8	89.4	92.8	91.2	92.4	92.3	94.6	92.0	91.8	87.6	86.2	85.0	84.4	82.3	81.4	81.5
	$\beta_{9.2}$	35.6	33.8	34.2	31.4	30.1	28.4	25.3	21.3	24.5	27.6	29.6	33.5	38.5	43.6	47.6	39.1	27.5	26.9	28.3	27.2
3	$L_{W9.3}$	93.7	91.1	90.9	92.2	90.9	90.8	94.4	95.2	92.8	95.2	95.8	94.4	88.7	87.9	87.2	88.5	86.5	84.5	82.5	80.5
	$\beta_{9.3}$	35.3	33.0	31.3	29.8	28.4	25.3	23.0	20.5	27.8	31.2	26.2	20.5	30.3	43.4	46.6	37.9	37.9	37.9	37.9	37.9
4	$L_{W9.4}$	91.5	89.1	89.3	88.9	84.7	88.1	89.1	88.2	88.7	90.3	94.4	95.7	86.9	86.7	87.6	90.3	88.3	86.3	84.3	82.3
	$\beta_{9.4}$	34.5	33.1	33.0	31.9	32.9	25.1	11.3	20.0	26.5	30.7	25.5	19.8	19.7	38.1	43.9	33.9	33.9	33.9	33.9	33.9
Fahrzeugkategorie k=9 – Güterwagen (Flach-/Containerwagen) GG-Klotz gebremst																					
h	f_i	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000
2	$L_{W9.2}$	86.9	90.9	89.0	88.7	91.5	87.6	95.2	94.5	97.3	98.6	102.9	99.4	94.6	93.4	92.2	89.9	89.6	86.7	84.7	83.8
	$\beta_{9.2}$	35.6	33.8	34.2	31.4	30.1	28.4	25.3	21.3	24.5	27.6	29.6	33.5	38.5	43.6	47.6	39.1	27.5	26.9	28.3	27.2
3	$L_{W9.3}$	87.2	85.5	83.4	84.2	81.5	79.0	85.2	88.1	86.1	90.1	94.9	93.0	85.0	85.4	84.9	85.9	83.9	81.9	79.9	77.9
	$\beta_{9.3}$	35.3	33.0	31.3	29.8	28.4	25.3	23.0	20.5	27.8	31.2	26.2	20.5	30.3	43.4	46.6	37.9	37.9	37.9	37.9	37.9
4	$L_{W9.4}$	83.6	81.1	80.0	76.9	71.5	75.6	77.8	80.9	82.9	86.0	95.0	95.8	84.1	84.9	86.5	88.3	86.3	84.3	82.3	80.3
	$\beta_{9.4}$	34.5	33.1	33.0	31.9	32.9	25.1	11.3	20.0	26.5	30.7	25.5	19.8	19.7	38.1	43.9	33.9	33.9	33.9	33.9	33.9
Fahrzeugkategorie k=9 – Güterwagen (gedeckte Wagen) GG-Klotz gebremst																					
h	f_i	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000
0.5	$L_{W9.05}$	95.2	93.7	89.8	87.8	96.3	107.3	115.2	110.4	110.2	113.1	111.0	107.4	102.7	104.6	101.3	102.3	98.2	94.9	93.8	90.3
	$\beta_{9.05}$	35.6	33.8	34.2	31.4	30.1	28.4	25.3	21.3	24.5	27.6	29.6	33.5	38.5	43.6	47.6	39.1	27.5	26.9	28.3	27.2
2	$L_{W9.2}$	96.2	97.5	98.0	98.8	101.0	98.3	102.7	98.3	101.5	101.1	101.8	99.6	96.2	94.9	93.1	91.9	91.1	88.4	87.2	86.1
	$\beta_{9.2}$	35.6	33.8	34.2	31.4	30.1	28.4	25.3	21.3	24.5	27.6	29.6	33.5	38.5	43.6	47.6	39.1	27.5	26.9	28.3	27.2
3	$L_{W9.3}$	96.6	92.4	92.3	94.5	91.3	90.5	93.8	93.0	91.0	93.1	94.1	93.0	86.7	86.4	85.6	86.9	84.9	82.9	80.9	78.9
	$\beta_{9.3}$	35.3	33.0	31.3	29.8	28.4	25.3	23.0	20.5	27.8	31.2	26.2	20.5	30.3	43.4	46.6	37.9	37.9	37.9	37.9	37.9
4	$L_{W9.4}$	93.4	88.9	89.5	88.5	81.6	86.4	86.1	84.9	86.6	88.6	93.6	95.3	85.8	85.6	87.0	89.0	87.0	85.0	83.0	81.0
	$\beta_{9.4}$	34.5	33.1	33.0	31.9	32.9	25.1	11.3	20.0	26.5	30.7	25.5	19.8	19.7	38.1	43.9	33.9	33.9	33.9	33.9	33.9
Fahrzeugkategorie k=9 – Güterwagen (Kesselwagen) GG-Klotz gebremst																					
h	f_i	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000
0.5	$L_{W9.05}$	93.5	93.8	90.2	87.2	98.0	107.8	115.8	112.1	112.2	115.0	113.2	108.6	104.8	106.8	102.7	103.5	99.1	96.0	94.6	90.9
	$\beta_{9.05}$	35.6	33.8	34.2	31.4	30.1	28.4	25.3	21.3	24.5	27.6	29.6	33.5	38.5	43.6	47.6	39.1	27.5	26.9	28.3	27.2
2	$L_{W9.2}$	95.1	98.1	98.8	97.9	102.7	100.2	105.5	101.9	105.3	105.5	107.0	102.6	100.7	98.7	96.7	95.8	93.6	90.9	89.1	87.3
	$\beta_{9.2}$	35.6	33.8	34.2	31.4	30.1	28.4	25.3	21.3	24.5	27.6	29.6	33.5	38.5	43.6	47.6	39.1	27.5	26.9	28.3	27.2
3	$L_{W9.3}$	96.2	93.8	94.3	94.5	93.6	93.0	97.1	96.6	94.3	96.7	97.8	94.8	89.6	88.9	87.8	88.7	86.7	84.7	82.7	80.7
	$\beta_{9.3}$	35.3	33.0	31.3	29.8	28.4	25.3	23.0	20.5	27.8	31.2	26.2	20.5	30.3	43.4	46.6	37.9	37.9	37.9	37.9	37.9
4	$L_{W9.4}$	93.8	91.3	93.6	91.6	86.3	91.2	89.8	88.4	89.6	91.1	96.3	95.4	88.2	87.9	88.1	90.3	88.3	86.3	84.3	82.3
	$\beta_{9.4}$	34.5	33.1	33.0	31.9	32.9	25.1	11.3	20.0	26.5	30.7	25.5	19.8	19.7	38.1	43.9	33.9	33.9	33.9	33.9	33.9
Fahrzeugkategorie k=10 – Güterwagen (allgemein) K-Klotz gebremst																					
h	f_i	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000
2	$L_{W10.2}$	93.6	93.0	92.5	92.5	94.8	91.7	94.9	93.2	95.7	95.2	96.0	93.7	93.7	91.0	89.1	87.9	86.9	84.8	84.6	82.1
	$\beta_{10.2}$	35.6	33.8	34.2	31.4	30.1	28.4	25.3	21.3	24.5	27.6	29.6	33.5	38.5	43.6	47.6	39.1	27.5	26.9	28.3	27.2
3	$L_{W10.3}$	93.1	89.5	89.0	90.3	87.9	86.6	90.2	90.8	88.8	90.2	90.6	89.2	85.2	83.3	82.7	82.8	80.8	78.8	76.8	74.8
	$\beta_{10.3}$	35.3	33.0	31.3	29.8	28.4	25.3	23.0	20.5	27.8	31.2	26.2	20.5	30.3	43.4	46.6	37.9	37.9	37.9	37.9	37.9
4	$L_{W10.4}$	90.6	87.0	88.3	87.7	83.2	85.1	84.5	83.9	84.6	84.6	87.1	88.7	81.4	81.3	82.6	83.6	81.6	79.6	77.6	75.6
	$\beta_{10.4}$	34.5	33.1	33.0	31.9	32.9	25.1	11.3	20.0	26.5	30.7	25.5	19.8	19.7	38.1	43.9	33.9	33.9	33.9	33.9	33.9
Fahrzeugkategorie k=11 – RoLa-Fahrzeuge																					
h	f_i	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000
2	$L_{W11.2}$	86.3	91.9	95.4	92.4	89.6	84.2	84.1	86.7	87.7	88.6	89.5	90.6	89.5	85.6	81.1	80.9	80.4	79.5	78.9	78.5
	$\beta_{11.2}$	53.8	51.3	48.9	44.2	44.6	36.0	25.3	21.3	24.5	27.6	25.4	27.3	28.1	43.6	47.6	39.1	27.5	26.9	28.3	27.2
3	$L_{W11.3}$	78.3	87.9	91.4	88.4	85.6	80.2	80.1	82.7	83.7	84.6	85.5	85.5	85.5	81.6	77.1	76.9	74.9	72.9	70.9	68.9
	$\beta_{11.3}$	56.2	54.0	40.6	44.2	42.4	38.3	23.0	20.5	27.8	31.2	26.2	26.4	30.3	43.4	46.6	37.9	37.9	37.9	37.9	37.9
4	$L_{W11.4}$	81.3	86.9	90.4	87.4	84.6	79.2	79.1	81.7	82.7	83.6	84.5	84.5	84.5	80.6	76.1	75.9	73.9	71.9	69.9	67.9
	$\beta_{$																				

Tabelle 6.7: Werte für die Faktoren $L_{W200,hki}$ zur Berechnung der aerodynamischen Schalleistungen $L_{W,aero,hki}$ für die Fahrzeugkategorien 01, 03, 05, 08

Fahrzeugkategorie k=1 – Modernes Triebfahrzeug am Zuganfang (Re460, Re481,482,484, Triebkopf ICE BR401)																					
h	f_i	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000
0.5	$L_{W1.05}$	109.5	107.0	103.5	104.4	104.6	105.1	106.9	103.9	106.9	101.5	99.2	99.1	99.3	101.1	99.9	101.8	98.6	97.4	99.8	97.7
2	$L_{W1.2}$	107.8	102.2	99.6	102.2	105.7	99.9	99.7	96.7	99.1	96.9	95.8	94.8	97.3	94.5	93.8	93.2	92.1	92.4	92.6	92.6
3	$L_{W1.3}$	104.5	101.4	100.8	101.2	99.7	98.0	97.7	98.5	97.3	97.4	96.9	97.6	96.4	95.5	95.0	95.7	93.7	91.7	89.7	87.7
4	$L_{W1.4}$	101.7	100.4	101.4	101.8	100.7	100.4	100.1	99.4	99.9	99.3	98.3	99.4	98.2	98.1	96.8	98.2	96.2	94.2	92.2	90.2
Fahrzeugkategorie k=3 – Triebzug mit verteilten Antrieben, Aggregate unterflur (ICN RABDe 500)																					
h	f_i	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000
0.5	$L_{W3.05}$	100.7	100.1	99.1	99.7	100.1	100.9	102.1	99.1	96.3	95.6	94.5	94.2	93.4	95.5	93.6	90.9	91.4	89.4	88.4	87.4
2	$L_{W3.2}$	97.8	99.1	99.1	99.9	103.0	97.7	97.8	97.1	98.1	97.6	97.3	97.2	96.1	96.9	94.5	93.3	92.4	90.5	90.9	91.4
3	$L_{W3.3}$	98.0	97.4	98.9	100.2	98.0	95.7	99.4	99.1	96.5	96.9	95.5	96.4	94.0	92.8	92.5	93.0	91.0	89.0	87.0	85.0
4	$L_{W3.4}$	99.0	99.8	100.8	101.2	98.0	99.5	101.9	100.1	99.9	100.8	100.9	100.7	96.9	95.4	96.1	98.3	96.3	94.3	92.3	90.3
Fahrzeugkategorie k=5 – Steuerwagen schiebengebremst (EWIV Bt)																					
h	f_i	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000
0.5	$L_{W5.05}$	100.2	107.5	101.2	101.3	102.1	104.5	106.4	104.9	106.6	107.0	103.1	99.7	99.3	98.2	96.4	90.8	89.7	88.7	89.3	85.1
2	$L_{W5.2}$	102.5	102.2	96.1	97.0	102.5	98.3	97.5	97.1	98.4	95.9	95.2	94.8	90.0	89.2	90.2	90.0	89.7	88.6	85.4	86.2
3	$L_{W5.3}$	100.1	96.2	95.3	94.4	94.8	95.0	97.3	98.1	94.9	94.3	93.4	93.2	89.3	91.2	89.1	89.3	87.3	85.3	83.3	81.3
4	$L_{W5.4}$	100.2	99.1	97.4	96.6	93.9	97.6	99.1	99.1	96.5	94.0	91.8	92.7	93.4	94.4	92.3	90.9	88.9	86.9	84.9	82.9
Fahrzeugkategorie k=8 – Doppelstock Steuerwagen (IC2000 Bt)																					
h	f_i	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000
0.5	$L_{W8.05}$	104.9	99.6	100.5	99.7	98.8	100.7	102.0	99.1	100.0	96.6	94.6	95.0	91.5	91.9	90.4	87.7	87.1	86.4	86.5	86.5
2	$L_{W8.2}$	102.8	101.9	101.7	100.6	98.3	94.9	93.4	93.9	95.6	92.3	91.6	91.4	91.3	92.0	90.7	87.7	87.1	86.0	86.5	85.4
3	$L_{W8.3}$	104.9	97.3	107.0	106.3	96.0	95.5	96.5	98.7	96.3	95.6	95.1	95.3	93.0	93.9	92.7	89.7	87.7	85.7	83.7	81.7
4	$L_{W8.4}$	102.8	96.4	110.1	107.6	93.1	97.4	97.0	96.7	93.8	93.2	93.4	95.1	91.1	93.9	91.5	89.7	87.7	85.7	83.7	81.7

Tabelle 6.8: Kontaktfilter $A_{3,i}$ [dB re 1]

Wheel load	50 kN	50 kN	25 kN	100 kN
λ [cm]	920 mm	680 mm	920 mm	920 mm
63.000	0.0	0.0	0.0	0.0
50.000	0.0	0.0	0.0	0.0
40.000	0.0	0.0	0.0	0.0
31.500	0.0	0.0	0.0	0.0
25.000	0.0	0.0	0.0	0.0
20.000	0.0	0.0	0.0	0.0
16.000	0.0	0.0	0.0	0.0
12.500	0.0	0.0	0.0	0.0
10.000	0.0	0.0	0.0	0.0
8.000	-0.2	0.0	0.0	-0.2
6.300	-0.5	-0.2	-0.2	-0.6
5.000	-1.1	-0.4	-0.5	-1.3
4.000	-1.9	-0.7	-0.9	-2.2
3.150	-3.3	-1.5	-1.6	-3.7
2.500	-5.0	-2.8	-2.5	-5.8
2.000	-7.3	-4.5	-3.8	-9.0
1.600	-9.8	-7.0	-5.8	-12.5
1.200	-12.5	-10.3	-8.5	-13.5
1.000	-13.8	-12.9	-11.4	-13.5
0.800	-13.7	-13.6	-12.6	-15.3
0.630	-15.1	-14.5	-13.5	-16.4
0.500	-16.5	-15.5	-14.5	-17.5
0.400	-16.4	-16.0	-16.0	-18.4
0.315	-17.5	-16.5	-16.5	-19.5
0.250	-17.8	-17.0	-17.7	-20.5
0.200	-18.3	-17.5	-18.6	-21.5
0.160	-18.8	-18.0	-19.6	-22.4
0.125	-19.4	-18.5	-20.6	-23.5
0.100	-19.8	-19.0	-21.6	-24.5

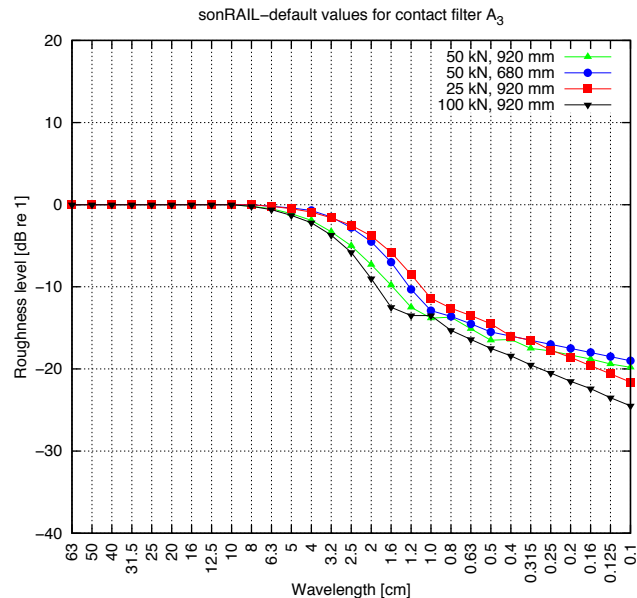


Tabelle 6.9: Gleis- und Fahrzeugtransferfunktionen $L_{HW,tr,i}$, $L_{HW,veh,i}$ [dB re 1 W/m²]

f [Hz]	Track Types						Vehicles	
	Monoblock UIC54	Monoblock UIC60	Bi-Block UIC54	Steel UIC54	Wooden UIC54	Wooden UIC60	920 mm	680 mm
100	77.1	79.9	78.5	72.8	71.3	80.3	78.8	80.9
125	78.3	83.0	81.8	73.4	71.9	81.3	79.8	82.6
160	80.1	86.7	84.4	77.0	73.4	82.9	81.1	84.5
200	80.6	86.8	86.8	82.3	74.3	82.3	81.1	83.2
250	86.6	86.6	89.0	88.5	77.4	83.4	82.3	82.7
315	87.3	88.7	89.4	92.3	78.5	84.5	83.1	82.8
400	86.9	90.3	91.2	94.1	83.8	89.8	84.9	84.2
500	91.5	93.5	93.3	96.0	89.2	94.2	87.1	87.2
630	95.4	96.4	91.5	98.2	91.4	96.4	89.4	88.7
800	96.2	97.2	94.3	101.3	92.8	98.0	91.3	91.3
1000	96.3	97.3	100.2	102.7	95.0	100.0	93.8	92.6
1250	95.1	95.1	97.1	103.4	97.4	101.4	97.0	94.2
1600	101.8	101.8	100.9	105.4	102.5	106.5	104.5	98.5
2000	107.3	107.3	105.2	110.8	105.8	109.8	112.1	103.1
2500	107.8	107.8	107.0	113.4	105.9	109.9	111.4	108.0
3150	111.5	111.5	108.8	114.1	105.2	109.2	113.0	110.3
4000	108.4	108.4	109.2	115.2	106.3	110.3	114.0	113.5
5000	110.3	110.3	109.8	115.3	105.8	109.8	115.0	114.0
6300	110.3	110.3	109.8	115.3	105.8	109.8	116.0	115.0
8000	110.3	110.3	109.8	115.3	105.8	109.8	117.0	116.0

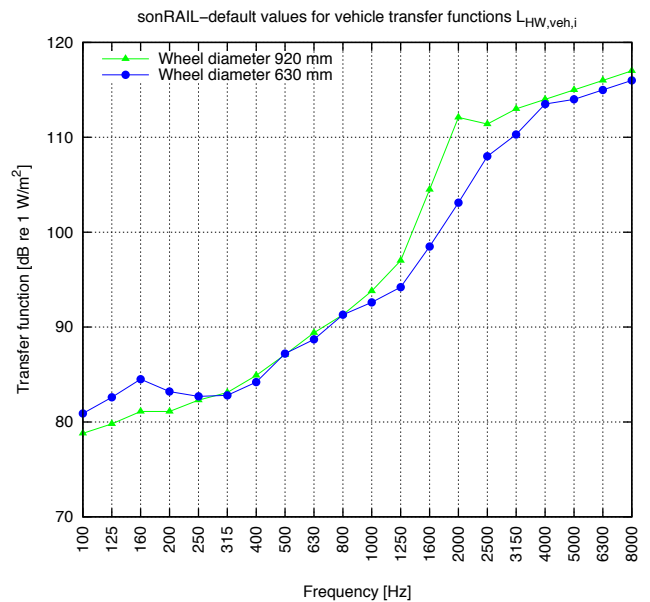
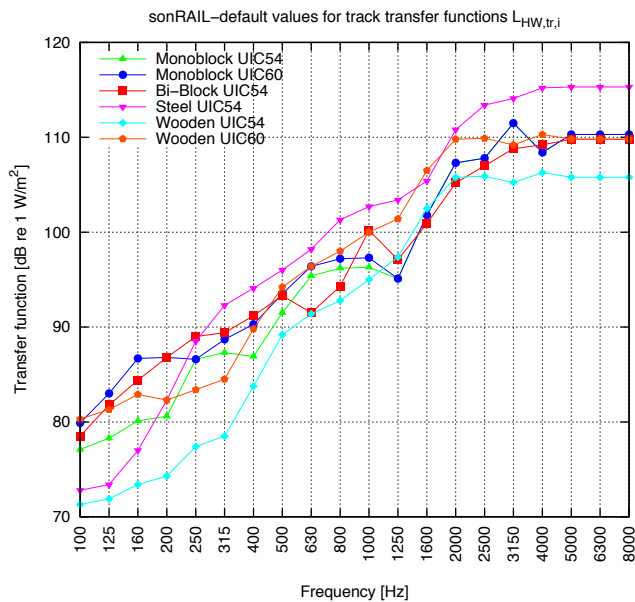


Tabelle 6.10: Pegelzuschläge für Brückentypen $L_{W,bridge,i}$ [dB re 1 W]

f	Concrete bridges (Betonbrücken)			Steel bridges (Stahlbrücken)							
	plate girder (Vollplatte)	Box girder (Hohlkasten)	composite girder (Stahlbeton)	plate girder (Vollplatte)		full wall girder (Vollwandträger)		box girder (Hohlkasten)		Truss (Fachwerk)	
	ballast	ballast	ballast	ballast	direct	ballast	direct	ballast	direct	ballast	direct
63	119.9	109.9	111.5	123.9	122.9	129.0	126.5	117.6	118.2	114.1	115.9
80	114.7	104.9	109.0	119.7	124.2	124.0	123.5	115.1	119.2	114.1	116.2
100	109.8	103.4	107.5	115.8	124.8	120.5	124.5	112.6	117.2	108.6	116.8
125	110.8	101.9	106.0	110.8	122.8	113.0	125.0	114.6	116.2	102.1	119.3
160	110.6	100.9	103.5	109.6	121.6	109.0	124.0	114.1	115.7	101.6	116.6
200	107.6	101.4	104.5	108.6	121.6	109.5	123.0	111.6	115.2	100.6	114.6
250	106.3	102.4	105.0	107.3	121.3	110.5	123.5	110.6	116.7	102.6	112.8
315	106.3	101.9	104.0	108.3	121.8	111.0	129.5	108.6	117.6	102.6	116.3
400	106.5	100.9	105.0	110.5	121.5	113.5	128.0	108.1	118.2	105.1	121.0
500	106.9	101.4	106.0	110.4	121.4	115.0	130.5	108.7	119.6	107.6	123.9
630	105.6	102.9	108.0	111.6	118.6	114.0	129.0	109.7	117.5	106.1	122.6
800	104.0	104.9	108.5	111.5	116.0	111.5	126.0	109.0	118.2	104.6	122.0
1000	103.2	106.4	108.0	111.2	114.7	110.0	122.0	108.9	117.2	103.6	121.2
1250	108.6	107.9	107.5	111.1	113.1	105.0	119.0	110.4	115.2	101.6	118.1
1600	109.2	109.9	109.0	111.2	112.2	106.0	115.0	110.1	110.7	102.6	115.7
2000	109.5	109.9	107.0	111.5	111.5	105.0	111.0	109.6	109.7	103.1	113.5
2500	104.4	109.4	104.5	112.4	106.4	104.0	108.0	109.1	107.2	100.6	109.4
3150	99.5	108.9	103.5	108.5	102.5	102.0	106.0	107.6	105.7	98.6	104.5
4000	95.7	107.9	99.0	106.7	99.7	101.0	104.0	104.6	103.7	96.6	100.7
5000	93.2	102.9	96.5	104.2	96.2	99.0	102.0	102.6	98.2	93.6	97.2
6300	90.8	96.9	93.0	101.8	92.8	97.0	99.0	98.6	94.2	90.6	93.8
8000	88.8	92.9	90.0	100.8	90.3	95.0	97.5	93.6	91.2	87.6	90.3

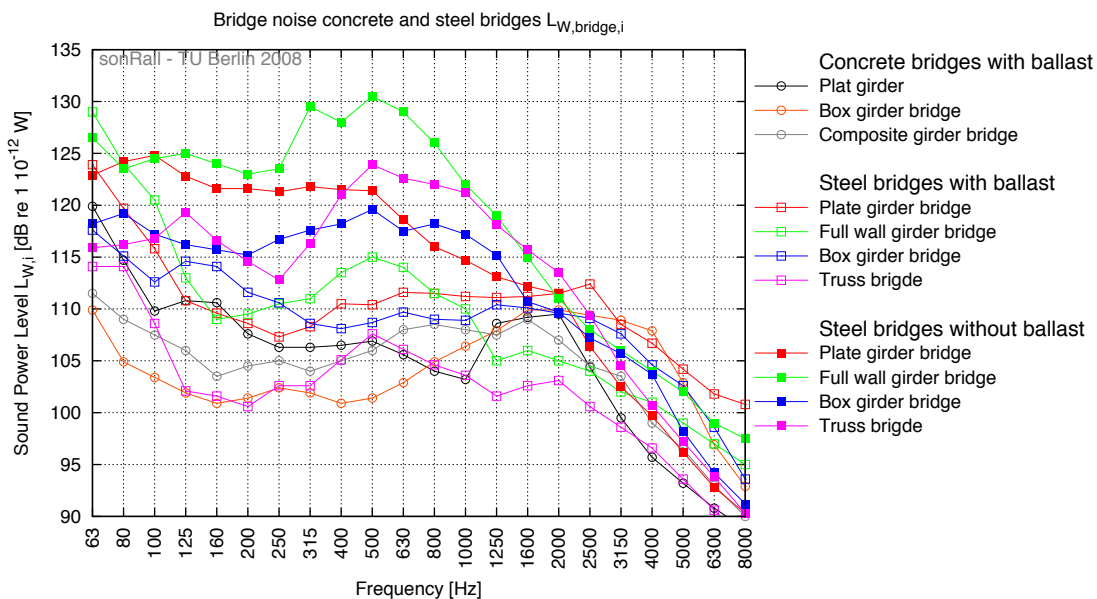
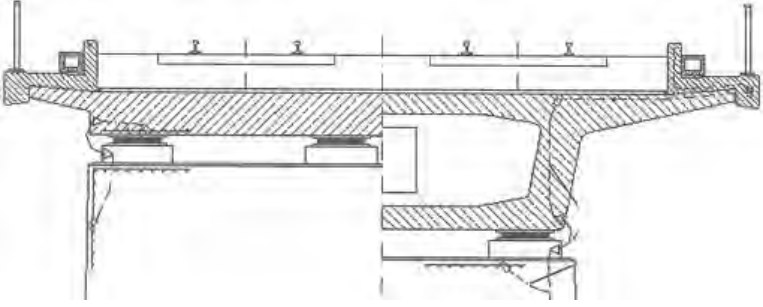


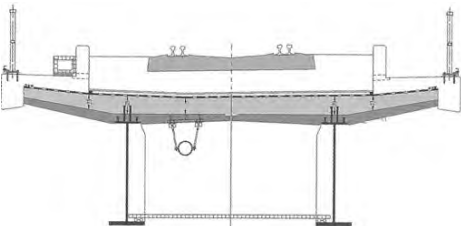

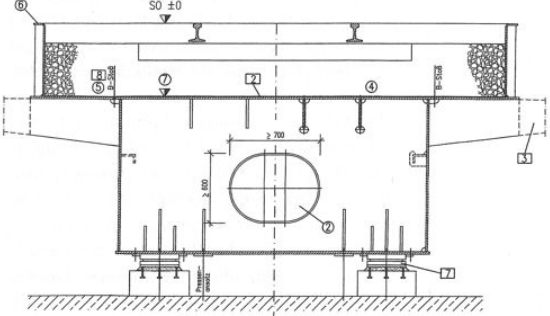



Tabelle 6.11: Übersicht der implementierten Brückenkategorien

Concrete box and plate girder bridge (Betonhohlkasten und Betonplatte)				
Bezeichnung*	Schotter	Fahrbahnlage	Anzahl†	Quelle
BK (Hohlkasten)	ja	oben	683	[127]
BM (Betonplatte)	ja	oben	23	[127]
				
				
Composite plate girder bridge (Stahlbeton Vollwand)				
Bezeichnung	Schotter	Fahrbahnlage	Anzahl	Quelle
BU	ja	oben	184	[127]
				
Steel box girder bridge (Stahl Hohlkastenbrücken)				
Bezeichnung	Schotter	Fahrbahnlage	Anzahl	Quelle
-	ja	oben	-	[127]
-	nein	oben	-	[127]
				

*Die Bezeichnung der Brückentypen richtet sich nach dem Emissionskataster der SBB [132].

†Anzahl der Bauwerke pro Brückentypen nach [132].

Tabelle 6.12: Übersicht der implementierten Brückenkategorien (Fortsetzung)

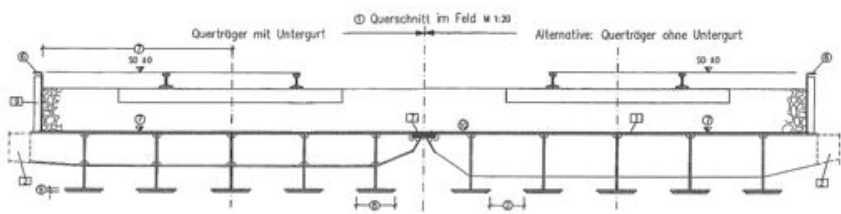

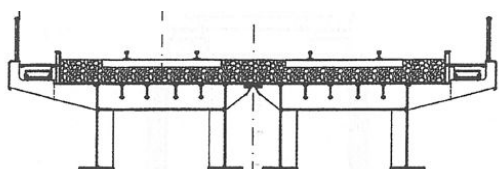

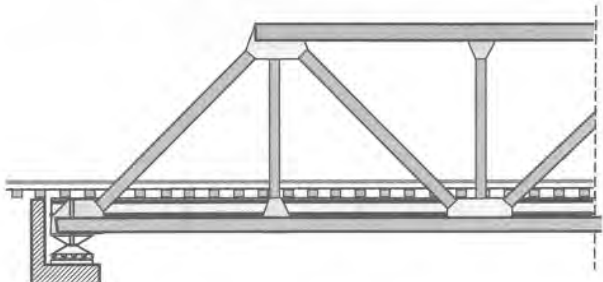

Steel plate girder bridge (Trägerrostbrücke)			Anzahl	Quelle
Bezeichnung	Schotter	Fahrbahnlage		
–	ja	oben	–	[128]
–	nein	oben	–	[128]
				
Steel full wall girder bridge (Vollwandträgerbrücken)			Anzahl	Quelle
Bezeichnung	Schotter	Fahrbahnlage		
BA	ja	oben	27	[127]
–	nein	oben	–	[127]
BC	ja	unten	53	
BD	nein	unten	78	
				
Steel truss bridge (Stahl Fachwerkbrücke)			Anzahl	Quelle
Bezeichnung	Schotter	Fahrbahnlage		
BB	ja	oben	34	[127]
–	nein	oben	–	[128]
				

Tabelle 6.13: Einflussparameter in der Modellrechnung in Anlehnung an [87]

Parameter	Schallleistung	Schalldruck	Tendenz*	Anmerkung
Radrauheit	+++	+++	15...20 dB	nur auf "glatten" Schienen
Schienenrauheit	++	++	10...15 dB	nur bei "glatten" Rädern (D- und K-gebremst)
Gleistransferfunktion	+	+	1...2 dB	nur bei gleichen Rauheitskennwerten
Fahrzeugtransferfunktion	+	+	2...3 dB	beim Übergang von 630 mm zu 920 mm Raddurchmesser
Kontaktfilter	+	+	0.5...1 dB	gültig für Verdoppelung der Radlast
Sekundärschallleistungen	++	++	8...10 dB	gültig bei angetriebenen Fahrzeugen
Achszahl	+	+	2...3 dB	gültig für Achsverdoppelung bei gleicher Radrauheit
Fahrzeuglänge		+	1...1.5 dB	gültig für verdoppelte Fahrzeuglänge
Mikrofonabstand		+	2...3 dB	gültig bei Abstandsverdoppelung
Ausbreitungsdämpfung		+	0.5...1 dB	gültig für Quellenhöhe 0 und 0.5

*Maximal mögliche Pegelzunahme zwischen günstigsten und ungünstigsten Fall.

Tabelle 6.14: Emissionspegel für alle Quellenhöhen und bei reduzierter Quellenhöhe (0 m und 0.5 m) für unterschiedliche Geschwindigkeiten

Fahrzeugkategorie	100 km/h			200 km/h		
	$L_{W,h=0...4}$	$L_{W,h=0...0.5}$	ΔL_W	$L_{W,h=0...4}$	$L_{W,h=0...0.5}$	ΔL_W
fzg_id_01: Re460	115.0 dB	114.4 dB	-0.6 dB	123.7 dB	122.8 dB	-0.9 dB
fzg_id_02: Re420	122.4 dB	122.0 dB	-0.4 dB	-	-	-
fzg_id_03: ICN	113.8 dB	112.9 dB	-0.9 dB	122.8 dB	121.2 dB	-1.6 dB
fzg_id_04: NiNa	114.0 dB	113.2 dB	-0.8 dB	-	-	-
fzg_id_05: EWIV	110.7 dB	109.6 dB	-1.1 dB	120.4 dB	119.0 dB	-1.4 dB
fzg_id_06: NPZ A(B), RIC Bpm	114.8 dB	113.7 dB	-1.1 dB	-	-	-
fzg_id_07: NPZ RBDe	119.4 dB	118.7 dB	-0.7 dB	-	-	-
fzg_id_08: IC2000	110.4 dB	109.3 dB	-1.1 dB	120.2 dB	118.4 dB	-1.8 dB
fzg_id_09: Ci-braked freight wagon	124.1 dB	123.5 dB	-0.6 dB	-	-	-
fzg_id_10: K-braked freight wagon	115.3 dB	113.7 dB	-1.6 dB	-	-	-
fzg_id_11: RoLa	114.2 dB	113.8 dB	-0.4 dB	-	-	-

6.2 Sensitivitätsanalyse des Emissionsmodells

6.2.1 Einflussparameter der Emissionsrechnung

Die Tabelle 6.13 führt die möglichen Einflussparameter in der Berechnung der Schallleistungs- und Schalldruckpegel auf. Es sind die maximalen Pegeländerungen bei Variation dieser Parameter aufgeführt. Diese Werte sind Erfahrungswerte, die sich aus den durchgeführten Modellrechnungen ergeben. Demnach haben Rad- und Schienenrauheiten den grössten Einfluss auf die Genauigkeit der Berechnungen.

6.2.2 Reduzierung der Quellenhöhen zur Rechenzeitoptimierung

Zur Optimierung der Rechenzeit bei Ausbreitungsrechnungen innerhalb des Gesamtmodells *sonRAIL* können einzelne Quellenhöhen von der Emissionsrechnung ausgeschlossen werden. Dieses Vorgehen kann bei Fahrzeugen mit dominierender Rollgeräuschquelle angewandt werden. Der aus dieser Vereinfachung entstehende Fehler in den Emissionspegeln ist in Tabelle 6.14 für zwei verschiedene Geschwindigkeiten angegeben. Die Berechnungen werden für den Oberbautyp B90/UIC60 mit der Schienenrauheitskategorie "smooth" durchgeführt. Im ersten Teil werden die Berechnungen für alle fünf Quellenhöhen durchgeführt, im zweiten Fall sind nur die Quellenhöhen 0 und 0.5 m berücksichtigt. In diesem Fall werden die Emissionspegel um bis zu 1.5 dB zu niedrig berechnet. Der grösste Fehler tritt bei IC2000 Fahrzeugen auf, begründet durch die ausgeprägten aerodynamischen Einflüsse der oberen Quellenhöhen bei hohen Geschwindigkeiten.

Tabelle 6.15: Berechnung der Gesamtschallleistung $L_{W,tot}$ [dB] einer IC2000 Vorbeifahrt mit 200 km/h mit und ohne aerodynamischen Geräuschquellen am vorrausfahrenden IC2000 Bt Steuerwagen, Messwerte nach Tabelle 4.3

	Fall a): IC2000 Bt am Zuanfang		Fall b) IC2000 Bt am Zugende	
	IC2000 Bt	IC2000 A B	IC2000 A B	IC2000 Bt
Messung Zugverband (ohne Re460)	120.3		120.0	
Messung Einzelfahrzeuge	122.2	120.1	120.1	119.8
Rechnung mit aerodynamischen Quellen am 1. Fahrzeug	122.3	120.1	120.1	120.1
Rechnung ohne aerodynamischen Quellen am 1. Fahrzeug	120.1	120.1	120.1	120.1

6.2.3 Hinweise zur Modellierung

6.2.3.1 Emissionsrechnungen bei Triebfahrzeugen

Für die Modellrechnung von angetriebenen Fahrzeugen (ids: 01, 02, 03, 04 und 07) werden sekundäre Schallquellen in der Quellenhöhe 0.5 m auf Grund von Antriebsgeräuschen berücksichtigt (siehe Tabellen 6.4 bis 6.6). Diese Werte geben die mittlere Schallleistung der Sekundärquellen pro Fahrzeugkategorie an.

6.2.3.2 Aerodynamische Effekte

Wenn in den Validierungsprotokollen nicht anders vermerkt, werden die Validierungen ohne ausgeprägte aerodynamische Quellen durchgeführt.

Soll im Einzelfall ein Zugverband genau modelliert werden, so müssen für das 1. Fahrzeug des Zuges die aerodynamischen Quellen berücksichtigt werden. Dieses Vorgehen ist in Tabelle 6.15 gezeigt. Es wird die Vorbeifahrt eines IC2000 Zuges modelliert. Im Fall a) befindet sich der Steuerwagen Bt am Zuanfang, im Fall b) am Zugende. Werden die aerodynamischen Geräuschquellen am Steuerwagen in der Rechnung berücksichtigt, ist der berechnete Werte mit dem gemessenen Wert am Steuerwagen nahezu identisch. Der Gesamtvorbeifahrpegel des Zugverbandes würde jedoch zu hoch berechnet werden. Befindet sich der Steuerwagen am Zugende, werden keine aerodynamischen Quellen berücksichtigt, die Berechnung erfolgt ebenfalls mit hoher Genauigkeit. Dieser Vergleich zeigt, dass bei der Modellierung von Zugverbänden ausgeprägte aerodynamische Quellen nicht berücksichtigt werden müssen.

6.2.3.3 Emissionsberechnungen von Triebzügen (ICN, NiNa)

Bei ICN Zügen wird keine Unterscheidung zwischen angetriebenen und nicht angetriebenen Fahrzeugen vorgenommen. Auf Grund der unterschiedlichen Radrauheiten der NiNa Züge werden Trieb- und Mittelwagen als unterschiedliche Fahrzeugtypen modelliert. Die Triebwagen enthalten zudem sekundäre Geräuschquellen. Die Validierung erfolgt, wenn nicht anders in den Protokollen vermerkt, für die Mittelwagen.

6.2.3.4 Emissionsberechnungen von Triebkopfzügen (ICE, TGV)

Triebzüge mit nicht verteilter Antriebstechnik (Triebkopfzüge) werden wie konventionelle, lokbespannte Personenzüge behandelt. Ein Triebkopfzug wird somit durch je 1 Triebfahrzeug der Kategorie 01 am Zuanfang und -ende, sowie einer bestimmten Anzahl von scheibengebremsten Fahrzeugen der Kategorie 05 modelliert.

6.2.3.5 Emissionsberechnungen von Zugverbänden

Alle Modellrechnungen werden für Einzelfahrzeuge durchgeführt. Soll ein kompletter Zugverband validiert werden, müssen die in Abschnitt 2.1 aufgeführten Formeln verwendet werden. In Tabelle 6.16 wird für die Vorbeifahrt des Messzuges (Zusammensetzung des Zugverbandes nach Abbildung 3.3) der A-bewertete Emissionspegel in 7.5 Meter Entfernung, bezogen auf eine Stunde angegeben (vgl. [1]). Es werden für unterschiedliche Fahrzeugkombinationen die Mess- und Rechenwerte verglichen. Die Abweichungen bei einzelnen Fahrzeugkategorien werden durch das Zusammenfassen aller Fahrzeuge im Zugverband kompensiert. Die Berechnungsgenauigkeit für diese Vorbeifahrt des Messzuges liegt bei 0.5 dB(A).

Tabelle 6.16: Vergleich der berechneten und gemessenen Emissionspegel bezogen auf eine Stunde L_{Aeq} [dB(A)] für die Vorbeifahrt des Messzuges bei $v = 80$ km/h

Kategorie k	$N_{u,k}$	$l_{veh,k}$	Messung	Rechnung	Messung	Rechnung	Messung	Rechnung
Re460	1	14.9	44.8	45.7	46.7	46.1	53.9	53.5
EWIV	3	26.4	47.2	47.5				
RIC Bpm	4	26.4	50.9	51.5	55.9	54.5		
4-axle freight	3	13.2	56.5	58.1				
2-axle freight	3	13.9	57.4	57.0	54.8	55.5		
Re420	1	15.4	52.0	50.0				

6.2.3.6 Emissionsberechnungen von Güterwagen

Bei der Modellierung von Güterwagen haben Achszahl und Fahrzeuglänge einen entscheidenden Einfluss auf die Genauigkeit der Rechnung. Für die Messstellen 01 bis 12 werden die 2-achsigen Güterwagen des Messzuges modelliert und mit den Messpegeln dieser Fahrzeuge verglichen. Dieses Vorgehen soll insbesondere die Genauigkeit der User-Methode bei Verwendung direkt gemessener Radrauheiten bewerten. Für die Messstellen 13 bis 35 werden die durchschnittlichen Rauheiten des Emissionsmodells verwendet. Eine Unterteilung nach Güterwagenbauart wird nicht vorgenommen.

6.2.3.7 Emissionsberechnungen auf Gleisen nach Schleifvorgängen

Bei Anwendung der User-Methode können direkt gemessene Rauheitsspektren in der Modellrechnung verwendet werden. Rauheitsspektren von Schienen nach Schleifvorgängen sind typischerweise durch einen diskreten Rauheitspeak in einem Wellenlängenbereich um 2.5 cm charakterisiert. Bei der Umrechnung des Wellenlängenspektrums in ein Frequenzspektrum kann durch die lineare Interpolation die Rauheitsamplitude nicht in jedem Fall korrekt wiedergegeben werden. Dies ist in Abbildung 6.1 verdeutlicht. Die einer Terzfrequenz f_i zugeordneten Wellenlänge λ_f bei einer Geschwindigkeit v muss nicht mit den vorhandenen Rauheitswerten bei den Wellenlänge λ übereinstimmen. Der gemessene Rauheitspeak $L_r(\lambda_{peak,2.5})$ wird durch die Interpolation zwischen den Rauheiten $L_r(\lambda_{f,1600})$ und $L_r(\lambda_{f,2000})$ mit falscher Amplitude nachgebildet. Daraus ergeben sich zu niedrige Rauheitsamplituden die zu Fehlern in den Emissionsrechnungen führen, siehe Abbildung 6.2.

Im Emissionsmodell kann dieser Sonderfall durch den Wegfall der Interpolation um den Rauheitspeak berücksichtigt werden. Ob eine Berechnung mit dieser Methode durchgeführt werden muss, ist abhängig von der Rauheitsamplitude und deren Differenz zu den benachbarten Rauheitsamplituden:

$$L_r(\lambda_{peak,i}) - \frac{1}{2} [L_r(\lambda_{i-1}) \oplus L_r(\lambda_{i+1})] \begin{cases} < 3 \text{ dB} & : \text{ Fall a) mit Interpolation} \\ \geq 3 \text{ dB} & : \text{ Fall b) ohne Interpolation} \end{cases} \quad (6.1)$$

Der Fall b) muss noch die zusätzliche Forderung erfüllen: $L_r(\lambda_{peak,i}) > L_r(\lambda_{i-1})$ und $L_r(\lambda_{peak,i}) > L_r(\lambda_{i+1})$. Dieses Vorgehen orientiert sich an der Bewertung tonhaltiger Schalldrucksignale [137], [138], da bei einem Rauheitspeak von einer tonalen Geräuschkomponente im Emissionsspektrum ausgegangen wird. Muss nach Gleichung (6.1) eine Berechnung ohne Interpolation durchgeführt werden, erfolgt dies unter Berücksichtigung der Schienenrauheitskategorie:

$$L_r(\lambda_{f,i}) = \begin{cases} L_{\lambda,CA} < 4 \text{ dB} & : \text{ Interpolation zwischen benachbarten Stützstellen} \\ 4 \text{ dB} \leq L_{\lambda,CA} \leq 10 \text{ dB} & : L_r(\lambda_{f,i}) = L_r(\lambda_{f,i+1}) = \frac{1}{2} L_r(\lambda_{peak}) \\ L_{\lambda,CA} > 10 \text{ dB} & : L_r(\lambda_{f,i}) = L_r(\lambda_{f,i+1}) = \frac{1}{2} L_r(\lambda_{peak}) - A_3(\lambda_{peak}) \end{cases} \quad (6.2)$$

Die Wirkung des Kontaktfilters $A_3(\lambda)$ wird bei sehr hohen Rauheitsamplituden ausgesetzt, da angenommen werden muss, dass die hohen Rauheitsamplituden auch bei kurzen Wellenlängen einen Einfluss auf die effektiven Rauheiten haben. Der Vergleich mit den gemessenen Vorbeifahrtsspektren zeigt eine hohe Genauigkeit bei Verwendung des vorgestellten Verfahrens. Das pegelbestimmende Emissionsmaximum wird bei der richtigen Frequenz mit korrekter Amplitude berechnet.

6.2.3.8 Emissionsberechnungen an Störstellen (Weichenherzstücken)

Die Geräuschemission im Weichenbereich setzt sich zusammen aus dem Rollgeräusch ausserhalb des Herzstücks und dem stossartigen Geräuschanteil im Herzstückbereich, Abbildung 6.3. Für die Validierung des Vorbeifahrtpegels eines

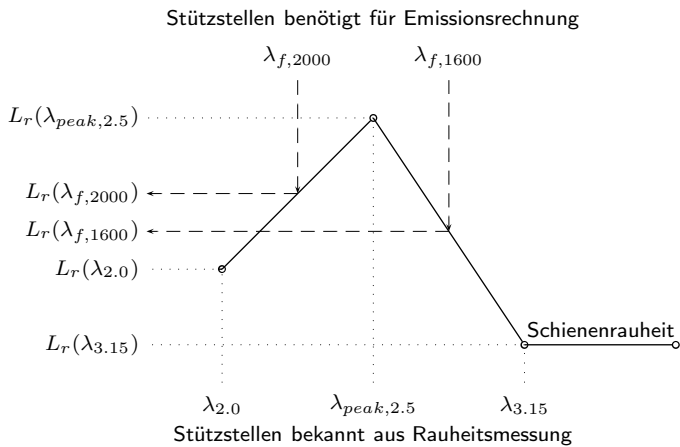


Abbildung 6.1: Darstellung des Verfahrens zur Umrechnung des Wellenlängenspektrums in ein Frequenzspektrum durch lineare Interpolation

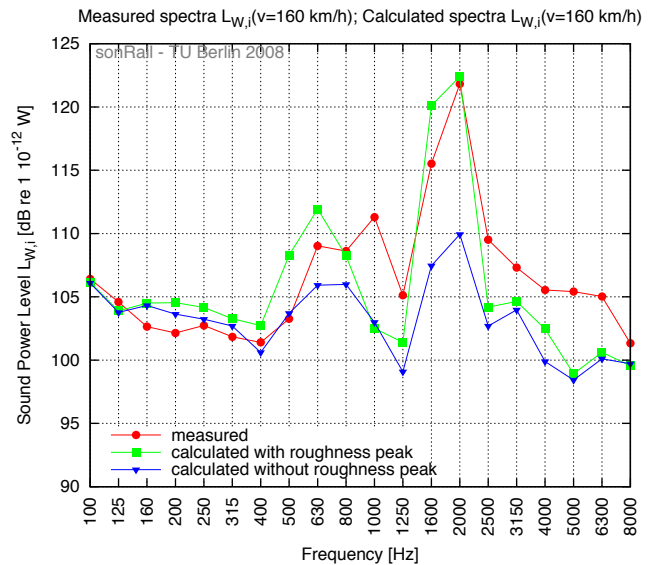


Abbildung 6.2: Vergleich von Rechnung und Messung an Messstelle 13 Nord unter Einbeziehung des Rauheitspeaks nach einem Schienenschleifvorgang

Gesamtfahrzeuginnenlänge $l_{veh,j}$:	26.8 m		
Abschnittslänge $l_{abs,j}$:	12.9 m	1.0 m	12.9 m
Oberbautyp:	Holzschwellen, UIC 60	Herzstück	Holzschwellen, UIC 60
Schienenrauheit Quellenhöhe 0 m $L_{r,tr,i}$:	smooth	impact	smooth
Schienenrauheit Quellenhöhe 0.5 m $L_{r,tr,i}$:	smooth	smooth	smooth
Gleisabschnitt:	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$
Gleis:			
Emissionspegel der Fahrzeugkategorie k $L_{W,hkpi}$:	107.6 dB	116.2 dB	107.6 dB
Längenbezogene Schalleistung $L_{W',i} = L_{W,hkpi} - 10 \lg l_{veh}$:	93.3 dB	116.6 dB ($l_{veh} = 1.0 m$)	93.3 dB
Äquivalente Schalleistung $L_{W,ji} = L_{W',i} + 10 \lg l_{abs}$:	104.4 dB	116.6 dB ($l_{abs} = 1.0 m$)	104.4 dB
Summenpegel TEL (berechnet) $L_{W,k} = \sum L_{W,ji}$:		116.7 dB	
Vorbeifahrtpegel TEL (gemessen) $L_{W,eq}$:		115.9 dB	

Abbildung 6.3: Berechnung des Emissionspegels eines IC2000 Fahrzeuges mit 80 km/h im Weichenbereich der Messstelle 11

Fahrzeugs mit der Länge l_{veh} werden daher 3 Gleisabschnitte mit der Gesamtlänge $\sum l_{abs} = l_{veh}$ definiert, wobei gemäss Emissionsmodell der Gleisabschnitt an der Störstelle $l_{abs} = 1 m$ beträgt. Für die einzelnen Gleisabschnitte werden die längenbezogenen Schalleistungen $L_{W',hji}$ berechnet und anschliessend als äquivalente Emissionspegel dargestellt. Der Vergleich von Messung und Rechnung zeigt eine gute Übereinstimmung dieses Vorgehens. Die Emissionspegel an Störstellen können mit hoher Genauigkeit berechnet werden.

6.3 Programmapplikation für Emissionsberechnungen

Die Berechnung von Emissionsdaten kann in einer eigenständigen Excel-Programmapplikation unabhängig vom Ausbreitungsmodell durchgeführt werden. Die zur Verfügung stehenden Berechnungsmethoden entsprechen denen des

sonRAIL Gesamtmodells und werden nach den in Abschnitt 2.2 vorgestellten Berechnungsalgorithmen durchgeführt. In Abbildung 6.4 ist ein Screenshot des Berechnungsprogrammes gezeigt. Im grau hinterlegten Bereich können alle Eingangsparameter ausgewählt werden, im gelben Bereich werden die Ergebnisse der Emissionsberechnungen grafisch und tabellarisch dargestellt. Die folgenden Eingangsparameter können gewählt werden:

1. Schienenrauheiten: Die nach Gleichung (3.18) definierten Rauheitsklassen smooth, average, bad sowie die TSI Grenzwertkurve können ausgewählt werden.
2. Oberbautyp: Die nach Tabelle 6.9 definierten Oberbautypen können ausgewählt werden.
3. Fahrzeugtyp: Die nach Tabelle 6.1 definierten Fahrzeugtypen können ausgewählt werden. Mit der Auswahl eines Fahrzeuges wird automatisch die entsprechende Radrauheit, Transferfunktion, Fahrzeuglänge, Kontaktfilter sowie die sekundären Quellenleistungen geladen.
4. Geschwindigkeit: Die Geschwindigkeit in [km/h] kann frei im Bereich zwischen 50 und 200 km/h gewählt werden.
5. Flachstelle: Die Emissionsberechnung kann für Fahrzeuge mit Flachstellen durchgeführt werden. Diese Option gilt für alle Achsen eines Fahrzeuges.
6. Anzahl Fahrzeuge: Für die Bestimmung des Beurteilungspegel $L_{re,1m}$ muss die Anzahl Fahrzeuge pro gewählten Beurteilungszeitraum angegeben werden. Der für die Bestimmung von $L_{re,1m}$ benötigte K1-Faktor wird aus der Anzahl der Fahrzeuge pro Beurteilungszeitraum automatisch bestimmt.
7. Beurteilungszeitraum: Entsprechend der Lärmschutzverordnung (LSV) muss für die Bestimmung des Beurteilungspegel $L_{re,1m}$ der Beurteilungszeitraum angegeben werden.
8. Weiche: Wird diese Option gewählt, kann ein nach Tabelle 6.3 definierter Weichentyp ausgewählt werden. Der Emissionspegel gilt für einen Gleisabschnitt von 1 m Länge.
9. Kurve: Wird diese Option gewählt, erfolgt die Emissionsberechnung für den angegebenen Bogenradius in [m]. Die äquivalente Radrauheit ist durch die Angabe des Fahrzeugtyps bereits definiert.
10. Brücke: Wird diese Option gewählt, erfolgt die Emissionsberechnung für einen nach Tabelle 6.11 definierten Brückentyp.
11. Manueller Bereich: In diesem Bereich werden anhand der oben ausgewählten Berechnungsparameter die zugehörigen Rad- und Schienenrauheiten, Kontaktfilter und Transferfunktionen angezeigt. Die dargestellten Werte sind editierbar, so dass eine manuelle Eingabe von nutzerspezifischen Daten möglich ist. Diese manuell eingegebenen Daten verändern nicht die sonRAIL Standardwerte und können nicht gespeichert werden.

Die Ergebnisdarstellung umfasst folgende Punkte:

12. Grafische Darstellung der Emissionspegel als A-bewertete Terzspektren TEL dB(A) der fünf Quellenhöhen nach Abbildung 2.4 in einem seitlichen Abstand zur Gleismitte von 7.5 m, sowie des Gesamtemissionspegels über alle Quellenhöhen $L_{pA,tot}$ und der Rollgeräuschquelle $L_{pA,roll}$. Letztere berücksichtigt nur die Quellenhöhe 0 m sowie die Rollgeräuschanteile der Quellenhöhe 0.5 m.
13. Tabellarische Darstellung der Emissionspegel pro Quellenhöhe und Terzmittenfrequenz
14. Angabe der Gesamtemissionspegel pro Quellenhöhe, der Summenpegel über alle Quellenhöhen und der Rollgeräuschquelle. Zusätzlich wird der gemäß LSV berechnete Beurteilungspegel $L_{re,1m}$ im ausgewählten Beurteilungszeitraum angegeben.

6.4 Anwendungsbeispiele des Emissionsmodells

In diesem Abschnitt werden mögliche Anwendungsbeispiele des erstellten Emissionsmodell anhand von Beispielen zur Lärmprognose und zum Lärmmonitoring gezeigt. Die zur Modellerstellung verwendeten indirekten Messverfahren werden für automatisierte Messungen und Auswertungen im Rahmen des Lärmmonitorings weiterentwickelt. In Abschnitt 7.2.3 wird als weiterführendes Anwendungsbeispiel auf die Reproduktion externer Messdaten eingegangen.

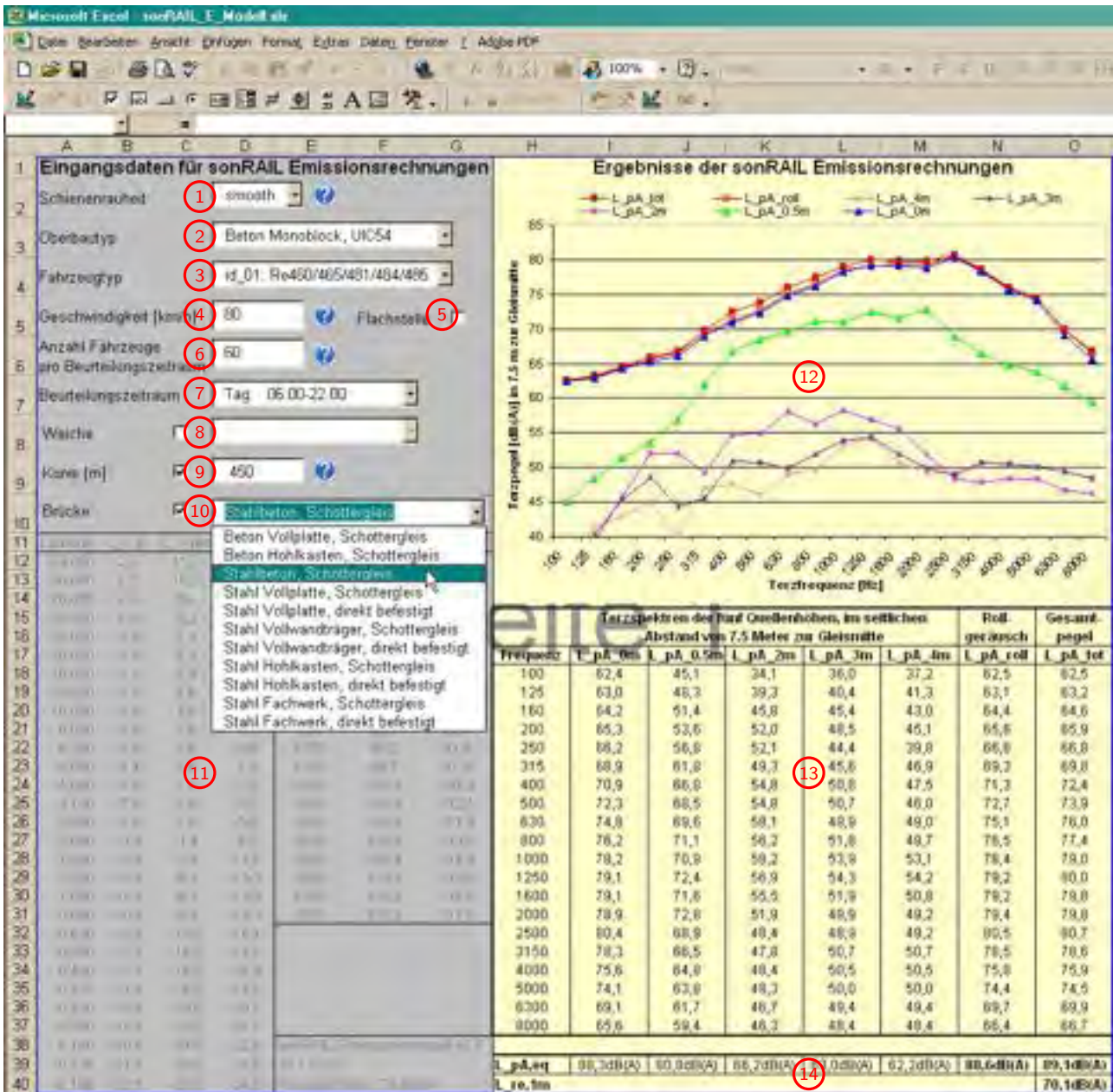


Abbildung 6.4: Screenshot der sonRAIL Programmapplikation zur Durchführung von Emissionsberechnungen

6.4.1 Verteilung der Quellenleistungen am Gesamtgeräusch

In Tabelle 6.17 wird für NPZ RBDe Triebwagen die Verteilung der Quellenleistungen pro Quellenhöhe für drei unterschiedliche Geschwindigkeiten angegeben. Das Rollgeräusch wird in den Quellenhöhen 0 und 0.5 m, die Sekundärquellen in den Quellenhöhen 0.5, 2, 3 und 4 m berechnet. Die Rechnungen werden mit den Ergebnissen der Arraymessungen verglichen. Bei den Messungen ist eine Trennung von Rollgeräusch und Antriebsgeräusch in der untersten Quellenhöhe nicht möglich.

Deutlich ist der dominierende Geräuschanteil der Antriebs- und Aggregatquellen in der Quellenhöhe 0.5 m bei der niedrigen Geschwindigkeit zu erkennen, der Anteil am Gesamtgeräusch beträgt 64%. Der Anteil des Rollgeräusches im Gesamtpegel beträgt bei $v = 80$ km/h 45%, diese Verteilung ändert sich auch nicht bei Erhöhung der Geschwindigkeit. Die Pegelzunahme des Roll- und Antriebsgeräuschs bei $v = 120$ km/h beträgt ca. 5 dB. Die Geräuschquellen der oberen Quellenhöhen haben keinen signifikanten Einfluss auf das Gesamtgeräusch.

Tabelle 6.17: Gemessene und berechnete Emissionswerte $L_{W,tot,h}$ pro Quellenhöhe für die Vorbeifahrt von NPZ Triebwagen RBDs an der Arraymessstelle 03 bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten

	$v = 40 \text{ km/h}$			$v = 80 \text{ km/h}$			$v = 120 \text{ km/h}$		
	Messung	Rechnung	Anteil	Messung	Rechnung	Anteil	Messung	Rechnung	Anteil
$L_{W,tot}$	109.5 dB	109.7 dB	100.0%	–	119.0 dB	100.0%	123.3 dB	123.2 dB	100.0%
$h = 0 \text{ m} : L_{W,0,roll}$		100.0 dB	10.7%		114.9 dB	38.9%		119.0 dB	38.0%
$h = 0.5 \text{ m} : L_{W,0.5,roll}$	107.9 dB	98.0 dB	6.8%	–	107.7 dB	7.4%	123.0 dB	111.4 dB	6.6%
$h = 0.5 \text{ m} : L_{W,0.5,sec}$		107.8 dB	64.0%		115.4 dB	43.9%		120.2 dB	49.6%
$h = 2 \text{ m} : L_{W,2,sec}$	101.7 dB	99.9 dB	10.5%	–	105.4 dB	4.4%	109.9 dB	108.9 dB	3.7%
$h = 3 \text{ m} : L_{W,3,sec}$	98.8 dB	96.2 dB	4.5%	–	102.3 dB	2.1%	104.7 dB	106.3 dB	2.0%
$h = 4 \text{ m} : L_{W,4,sec}$	97.4 dB	96.2 dB	4.5%	–	101.4 dB	1.7%	103.8 dB	104.9 dB	1.5%

<p> Aggregatgeräusche der Quellenhöhen 2, 3 und 4 m Antriebsgeräusche der Quellenhöhe 0.5 m Rollgeräuschanteile der Quellenhöhe 0 und 0.5 m </p>		

6.4.2 Lärmsanierung von Güterwagen unter Berücksichtigung der Schienenrauheit

Bei der Diskussion zur Lärmsanierung von Güterwagen durch Umrüstung der GG-Klotz gebremsten Fahrzeuge auf K- oder LL-Sohle findet die Schienenrauheit in der Betrachtung kaum Bedeutung. Alle Prognosen gehen von einem TSI-konformen Schienenzustand aus. Wie die durchgeführten Messungen zeigen, kann von einem solchen Zustand nicht allgemeingültig ausgegangen werden. Bei abnehmender Radrauheit muss jedoch im verstärkten Mass die Schienenrauheit berücksichtigt werden. Es sollen daher die folgenden drei Szenarien untersucht werden:

1. Umrüstung von GG-Klotz auf K-Klotz bei niedriger Schienenrauheit
2. Umrüstung von GG-Klotz auf K-Klotz bei hoher Schienenrauheit
3. Umrüstung von GG-Klotz auf K-Klotz bei hoher Schienenrauheit mit zusätzlicher Steigerung der Geschwindigkeit von 80 km/h auf 120 km/h

Diese Szenarien werden mit dem entwickelten Emissionsmodell gerechnet, die Ergebnisse sind in Abbildung 6.6 gezeigt. Für das Szenario 1 ergibt sich eine Pegelreduktion von über 8 dB. Dieser Wert wird bei einer 100-prozentigen Umrüstung auf K-Klotz bei gleichzeitig niedriger Schienenrauheit erreicht. In Abbildung 6.5 werden die Emissionsanteile der GG- und K-Klotz gebremsten Fahrzeuge am Gesamtschalldruckpegel in Abhängigkeit vom Fortschritt der Sanierung gezeigt. Bei einer Umrüstung von 50% aller Güterwagen, beträgt der Anteil der GG-Klotz gebremsten Fahrzeuge am Gesamtpegel noch 87%, die Pegelminderung beträgt knapp 2.5 dB! Erst wenn 90% aller Wagen umgerüstet sind, liegt der Anteil der GG-Klotz gebremsten Fahrzeuge unter dem Anteil der K-Klotz gebremsten Fahrzeuge. Im Szenario 2 wird ebenfalls eine 100-prozentige Umrüstung zu Grunde gelegt, die Berechnung erfolgt jedoch auf einem verriffelten Gleis. Gegenüber dem Ausgangszustand reduziert sich die Pegelminderung auf 4 dB. Mit zunehmendem Anteil umgerüsteter Fahrzeuge wird der Minderungseffekt durch die hohe Schienenrauheit ausgeglichen. In Szenario 3 wird zusätzlich die Geschwindigkeit auf 120 km/h angehoben. Gegenüber dem Ausgangszustand (nur GG-Klotz gebremste Fahrzeuge mit 80 km/h) ist die Pegelminderung kleiner 1 dB. Der positive Effekt der Güterwagenumrüstung wird durch die Anhebung der Geschwindigkeit sowie durch die schlechte Schienenrauheit fast vollständig aufgehoben.

6.4.3 Lärmsanierung von Güterwagen unter Berücksichtigung einer Verkehrssteigerung

Im folgenden Beispiel sollen die Auswirkungen der Lärmsanierung bei gleichzeitiger Steigerung des Güterverkehrs um 20% und Erhöhung der Geschwindigkeit auf 120 km/h diskutiert werden, wobei der bestehende Grenzwert $L_{DEN} =$

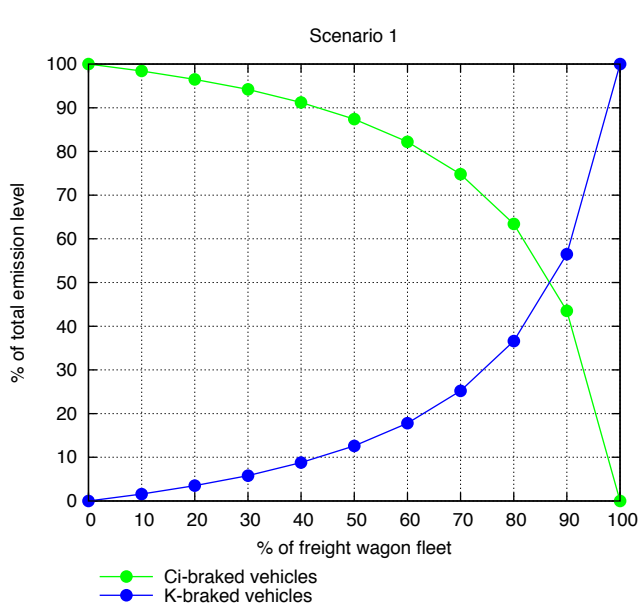


Abbildung 6.5: Emissionsanteile von GG- und K-Klotz gebremsten Fahrzeugen am Gesamtpegel

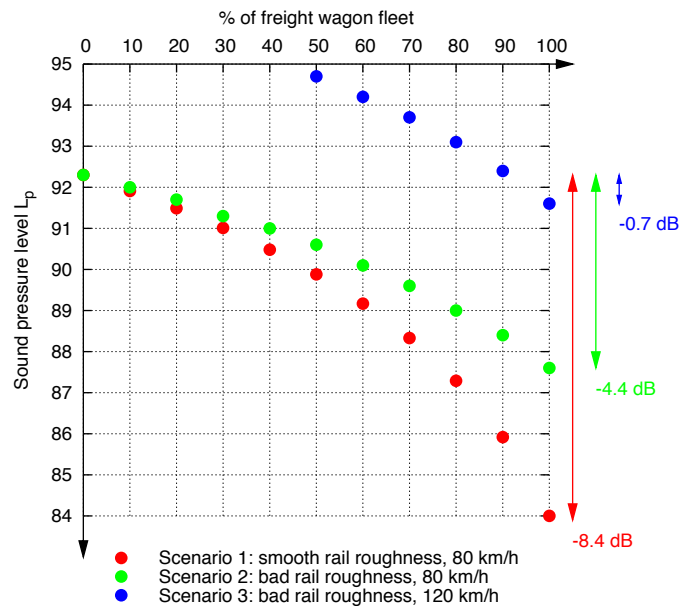


Abbildung 6.6: Reduktion der Emissionspegel von Güterwagen in Abhängigkeit vom Anteil umgerüsteter Güterwagen, sowie von Schienenrauheit und Fahrgeschwindigkeit

55 dB nicht überschritten werden soll. Die Rechnung basiert auf Daten des Lärmmonitoring an der Station Steinen [139]. Die folgenden 5 Szenarien werden untersucht:

1. Ausgangslage bei durchschnittlicher Schienenrauheit
2. Verkehrssteigerung um 20% bei durchschnittlicher Schienenrauheit
3. Verkehrssteigerung um 20% bei glatter Schienenrauheit
4. Verkehrssteigerung um 20% bei durchschnittlicher Schienenrauheit und Anhebung der Geschwindigkeit auf 120 km/h
5. Verkehrssteigerung um 20% bei glatter Schienenrauheit und Anhebung der Geschwindigkeit auf 120 km/h

Für das Szenario 1 wird der Grenzwert nur bei einer 100-prozentigen Umrüstung der verkehrenden Güterwagen auf K-Sohle erreicht, siehe Abbildung 6.7. Legt man die Verkehrssteigerung um 20% des Szenarios 2 zu Grunde, werden entsprechend höhere Emissionswerte erreicht. Selbst bei einer 100-prozentigen Umrüstung wird der Grenzwert minimal überschritten. Stellt man in Szenario 3 eine niedrige Schienenrauheit sicher, so hat dies keine Auswirkungen auf das Emissionsverhalten von Zügen mit ausschliesslich GG-Klotz gebremsten Fahrzeugen. Diese Massnahme wäre demnach nicht zielführend. Bei einem Fahrzeugmix von 50% GG-Klotz und 50% K-Klotz gebremsten Fahrzeugen hat die niedrigere Schienenrauheit ebenfalls einen zu vernachlässigenden Einfluss. Erst bei der kompletten Umrüstung aller verkehrenden Fahrzeuge wird der Emissionspegel signifikant um knapp 6.5 dB gesenkt. Der Grenzwert wird somit selbst bei einer Verkehrssteigerung eingehalten. Im Szenario 4 wird zusätzlich die Geschwindigkeit auf 120 km/h angehoben, dadurch wird der Grenzwert für jeden Fahrzeugmix deutlich überschritten. In Szenario 5 wird eine niedrige Schienenrauheit sichergestellt, so dass bei 100%-iger Umrüstung der Wagen auf K-Sohle die Einhaltung des Grenzwertes trotz Geschwindigkeitserhöhung und Verkehrsteigerung möglich ist.

6.4.4 Indirekte Messung von Radrauheiten an Monitoringstationen

Eine Anwendung des für die Modellerstellung verwendeten Auswertalgorithmus liegt in der automatisierten, indirekten Messung von Radrauheiten an fahrenden Zügen. Damit können an einer Monitoringstation folgende Daten erhoben werden:

1. Die mittleren Radrauheiten der auf einem Streckenabschnitt verkehrenden Fahrzeuge.
2. Die prozentuale Verteilung der Radrauheiten.

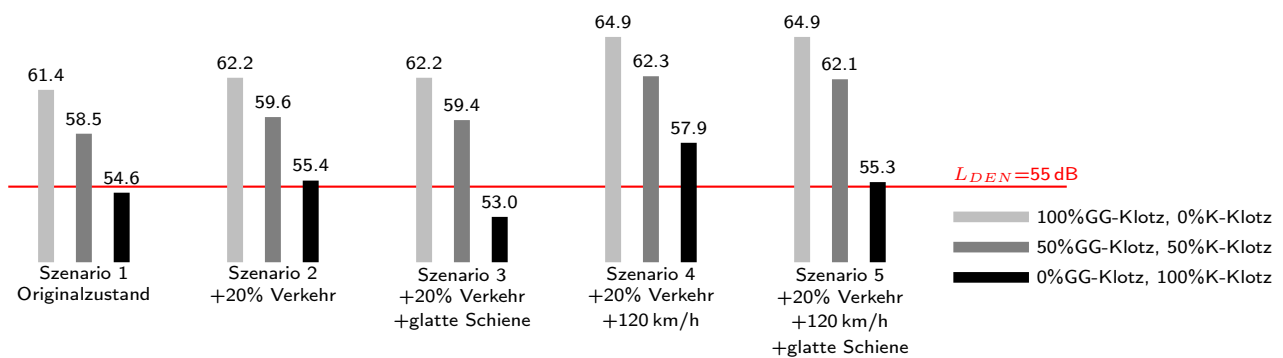


Abbildung 6.7: Entwicklung der Immissionspegel bei einer Verkehrssteigerung um 20% unter Beachtung der Lärmsanierung der Güterwagen und dem Zustand der Schienen

- Die genaue Trennung von unterschiedlichen Fahrzeugen (insbesondere K- und GG-Klotz) innerhalb eines Zugverbandes.
- Die Detektion von schadhafte Rädern (Flachstellen).

Mit diesen Daten können genaue Emissionsrechnungen durchgeführt werden. Weiterhin können diese Daten die Grundlage für ein lärmabhängiges Trassenpreissystem liefern.

In Abschnitt 5.1.3.3 konnte nachgewiesen werden, dass die Berechnung von Rauheiten einzelner Räder innerhalb eines Zugverbandes möglich ist. Der erforderliche Messaufbau einer solchen Monitorstation ist schematisch in Abbildung 6.8 gezeigt. Weiterhin muss die Track Decay Rate und die Schienenrauheit in gewissen zeitlichen Abständen überprüft werden. Es sollte eine möglichst niedrige Schienenrauheit angestrebt werden, um auch die Radrauheiten von scheinbengebremsten Fahrzeugen sicher zu berechnen. Durch den parallelen Einsatz eines Kamerasystems können die Fahrzeugnummern erfasst und den Radrauheiten zugeordnet werden. Die Daten werden in einer Fahrzeugdatenbank hinterlegt. Im *sonRAIL* Modell können diese fahrzeugspezifischen Rauheitsdaten für die Berechnung von Emissionspegeln eines beliebigen Punktes im Streckennetz verwendet werden (vgl. Abschnitt 6.4.6).

In Abbildung 6.9 sind die Schienenfussbeschleunigungen bei Überfahrt eines Güterzuges dargestellt. Anhand der Achssignale können die einzelnen Fahrzeuge im Zugverband identifiziert werden. Die Auswertung der Videoaufzeichnung liefert die zugehörigen Fahrzeugnummern. Für jedes Fahrzeug werden die Rauheiten pro Rad berechnet und mit den Default-Werten von K- und GG-Klotz gebremsten Fahrzeugen verglichen. Anhand dieses Vergleichs erfolgt die Zuordnung der Bremsklotzart. In dem angegebenen Beispiel ist der erste Wagen GG-Klotz gebremst, die Rauheiten aller vier Räder einer Fahrzeugseite werden mit nur geringen Abweichungen bestimmt. Die restlichen Wagen sind alle K-Klotz gebremst, die Radrauheiten liegen etwas unter dem Default-Wert für K-Klotz gebremste Fahrzeuge. Die letzte Achse des letzten Wagens zeigt eine deutlich höhere Radrauheit, begründet durch eine Flachstelle in der Radlaufläche.

In Abbildung 6.10 werden die Ergebnisse von indirekten Radrauheitsmessungen an den BAV Monitoringstationen Itingen (Basel - Olten) und Steinen (Gotthardstrecke) gezeigt. Die Messungen wurden im Frühjahr 2009 im Rahmen des *sonRAIL* Projekts durchgeführt. Für beide Stationen sind die Messwerte der mittleren Radrauheiten von scheinbengebremsten, K- und GG-Klotz gebremsten Fahrzeugen, sowie von Rädern mit Flachstellen angegeben. Insgesamt wurden pro Messstelle 1'500 Achsen gemessen. Beide Stationen liefern für die Radrauheiten vergleichbare Ergebnisse. Unterschiede ergeben sich in der prozentualen Zusammensetzung der Radrauheiten. An der Gotthardstrecke fällt der hohe Anteil von K-Klotz gebremsten Güterwagen auf. Der Anteil von Rädern mit Flachstellen ist an beiden Messstellen gleich hoch.

6.4.5 Indirekte, netzweite Messung von Schienenrauheiten

Eine weitere Anwendung der indirekten Messmethode ist die Berechnung von Schienenrauheiten mit einem Monitoringzug. Dazu werden an einem Messdrehgestell die vertikalen Achslagerbeschleunigungen gemessen. Aus diesen Beschleunigungswerten kann unter Anpassung der Gleichung (3.7) die effektive Gesamtrauheit während der Fahrt bestimmt werden. Die Radrauheiten der Messachsen sollten möglichst gering sein, damit auch niedrige Schienenrauheiten korrekt erfasst werden.⁸ Die Berechnung der Rauheiten erfolgt an allen vier Achslagern für Gleisabschnitte mit

⁸Bei den Messfahrten wurde ein Y25-Drehgestell mit ungebremsten Achsen eingesetzt. Der Vergleich mit den durchschnittlichen Radrauheiten von scheinbengebremsten Rädern zeigt, dass mit diesen eine noch niedrigere Radrauheit erreicht werden kann. Bei weiteren Messfahrten sollten daher scheinbengebremste Achsen verwendet werden.



Abbildung 6.8: Messaufbau einer Monitoringstation zur indirekten Messung der Radrauheiten und Beispiele von Videoaufzeichnungen zur Erfassung der Fahrzeugnummern an Güterwagen mit $v = 80 \dots 90 \text{ km/h}$

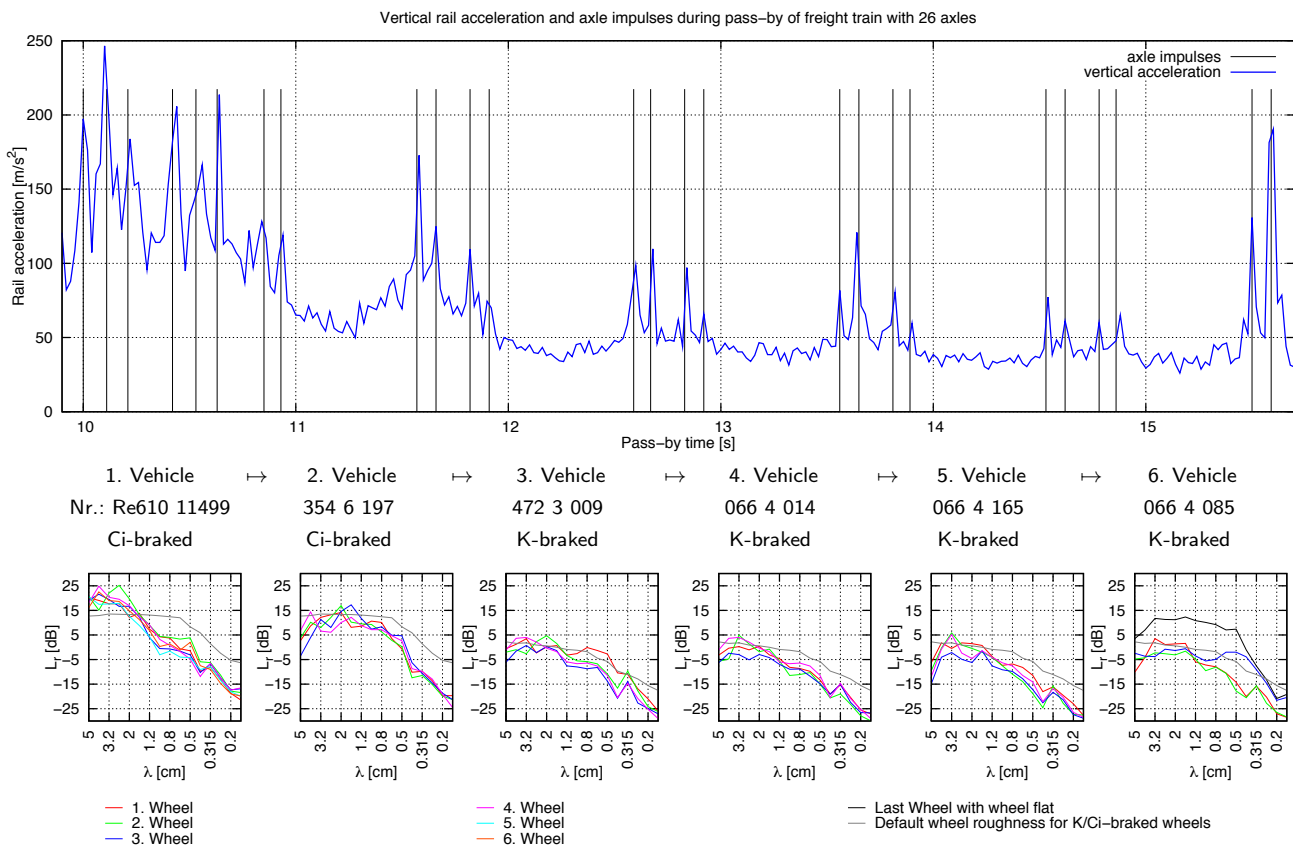
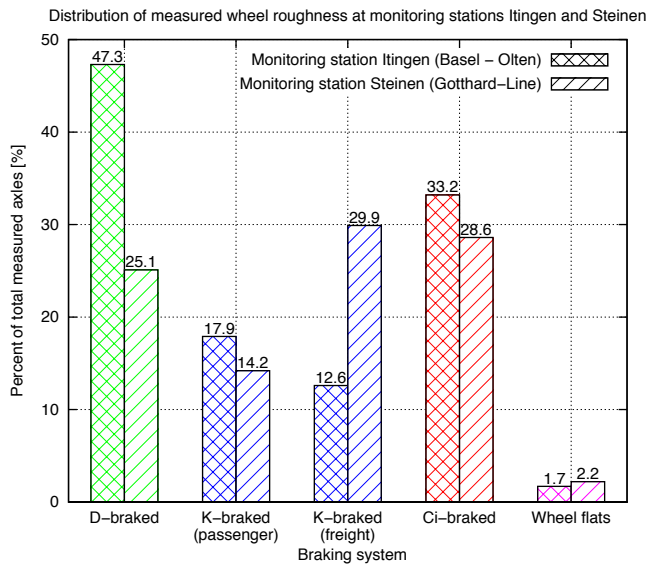
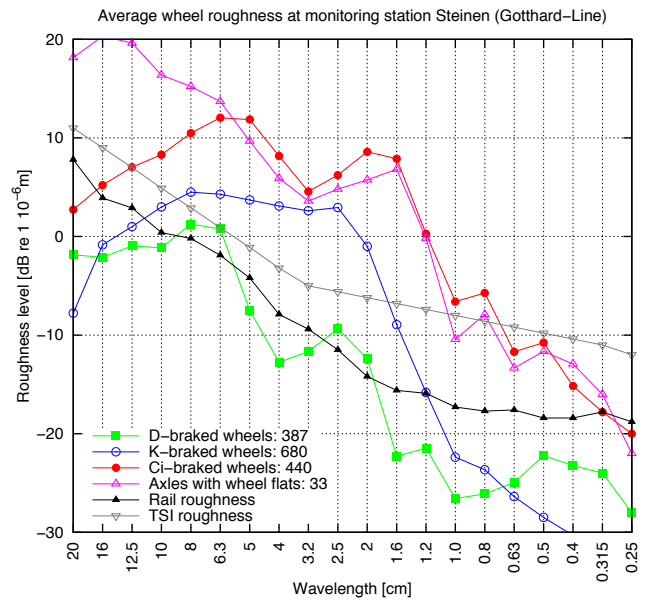
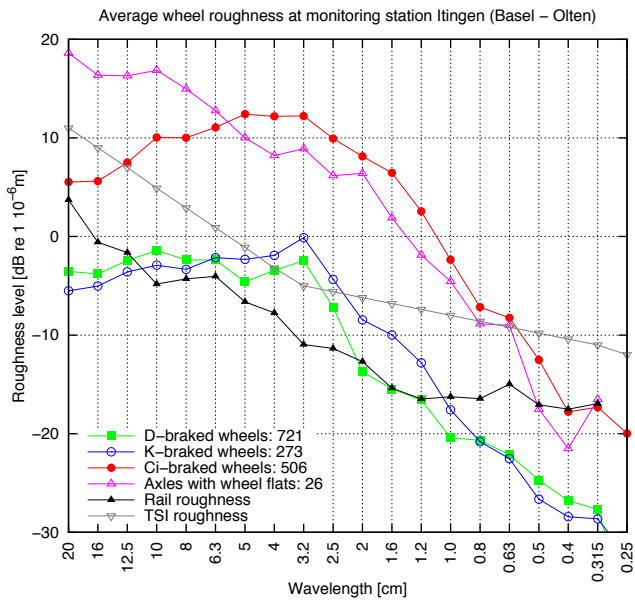


Abbildung 6.9: Beispiel der Berechnung von Rauheiten einzelner Räder eines Zugverbandes an einer Lärmmonitoringstation sowie Zuordnung der Fahrzeugnummer und Bremsklotzart zu jedem Fahrzeug

einer Länge von 1.8 m. Diese Einzelabschnitte werden über einen Bereich von zehn Meter energetisch gemittelt. Von diesen Abschnitten werden anschliessend die Rauheitspegel nach Gleichung (3.18) berechnet.

Im Rahmen des Projektes *sonRAIL* wurden im Frühjahr 2009 Messfahrten mit einem solchen Messdrehgestell durchgeführt. Dabei wurden über 3'000 Streckenkilometer abgefahren. Die Abbildung 6.11 zeigt beispielhaft einige Ergebnisse dieser Messfahrten. Es werden für zwei Messstellen die direkt und indirekt gemessenen Schienenrauheiten verglichen. Die Ergebnisse bei hohen Schienenrauheiten zeigen, dass eine indirekte Messung mit nur geringen Abweichungen möglich ist. Bei niedrigen Schienenrauheiten wird die gemessenen Gesamtrauheit bei kurzen Wellenlängen von den Radrauheiten des Messdrehgestells beeinflusst, die Schienenrauheit wird zu hoch berechnet.

Weiterhin werden in Abbildung 6.11 die indirekt gemessenen Schienenrauheiten zwischen den Stationen Sissach und Liestal angegeben. Für diesen Streckenabschnitt sind deutliche Unterschiede in den Schienenrauheiten zu erkennen. Für einen Ausschnitt werden zusätzlich die Rauheitspegel der 10-Meter Gleisabschnitte angegeben. Auf Grund der Radrauheiten der Messachsen wird ein Rauheitspegel von 4dB(A) nicht unterschritten. Es ist anzunehmen, dass in solchen Fällen die tatsächliche Schienenrauheit noch niedriger ist.



Type	Measured vehicles at	
	Itingen	Steinen
Re460	16	2
Re420	5	10
Re620	0	6
Re485	4	4
Flirt	8	7
ICN	4	9
ICE	3	0
TGV	2	0
EWIV	89	16
Freight	322	171
Measured pass-bys	37	38
Measured axles	1'526	1'549

Abbildung 6.10: Ergebnisse der indirekten Radrauheitsmessungen an den Monitoringstationen Itingen (Strecke Basel - Olten) und Steinen (Gotthardstrecke)

Die Ergebnisse dieser Messfahrten zeigen, dass eine indirekte Messung der Schienenrauheiten mit einem Monitoringzug möglich ist. Als kritischer Punkt werden die Radrauheiten der Messachsen angesehen. Die Räder müssen eine minimale Rauheit aufweisen, um auch Schienenrauheiten der Kategorie "smooth" mit einem geringen Fehler zu erfassen. In Kombination mit den Ergebnissen der indirekten Radrauheitsmessungen an Monitoringstationen können Emissionsrechnungen für grosse Streckenabschnitte durchgeführt werden.

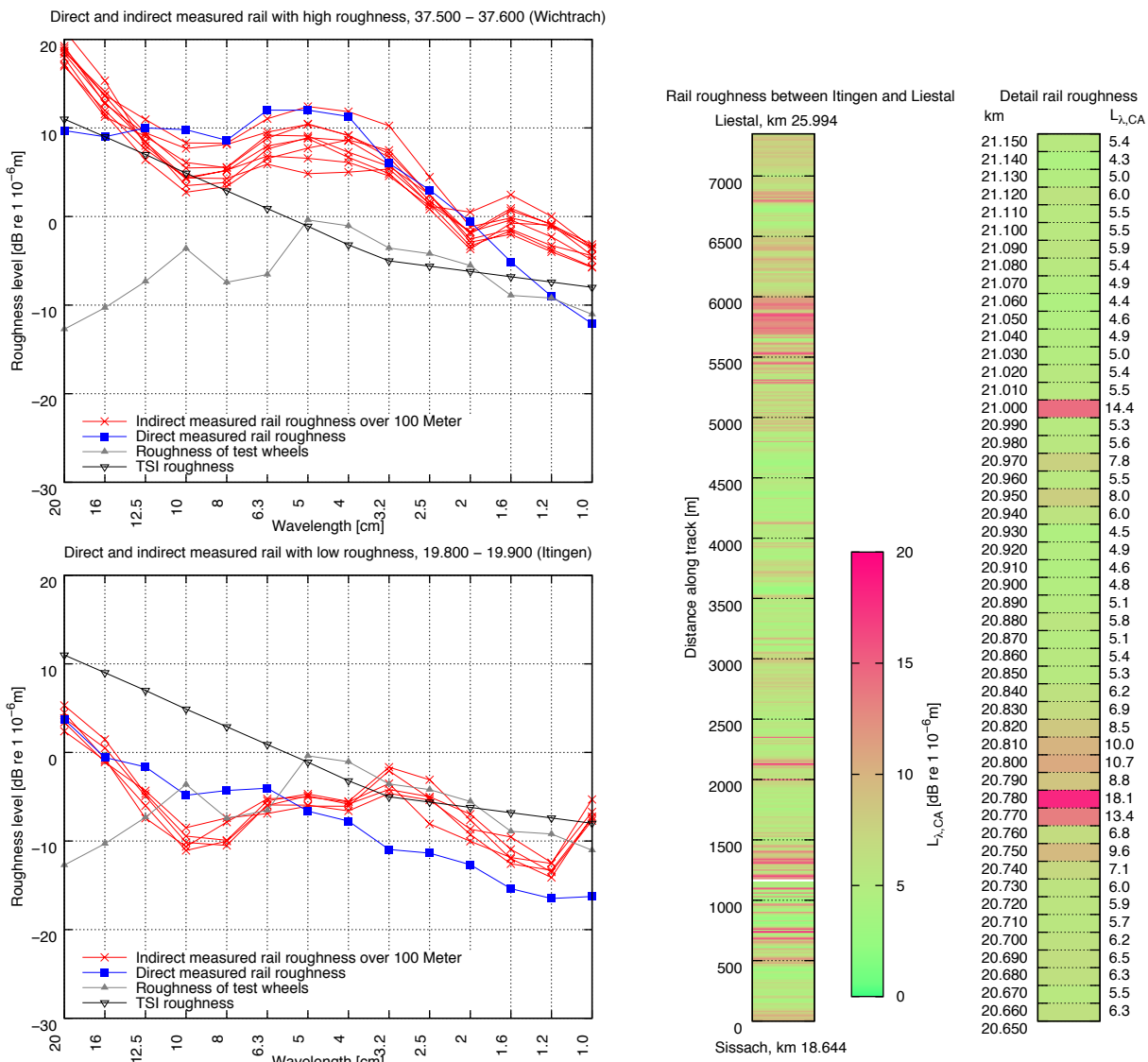


Abbildung 6.11: Ergebnisse einer indirekten Messung der Schienenrauheiten mit einem Monitoringzug; Linke Abbildungen: Vergleich von direkt und indirekt gemessenen Schienenrauheiten; Rechte Abbildungen: Verteilung der Schienenrauheiten zwischen Ittingen und Liestal unter Verwendung des berechneten Rauheitspegel $L_{\lambda,CA}$ nach Gleichung (3.18)

6.4.6 Emissionsrechnungen für die Strecke Bern-Thun-Spiez

Mit der im vorherigen Abschnitt beschriebenen indirekten Messmethode wurden die Schienenrauheiten auf der Strecke Bern-Thun-Spiez für eine Länge von ca. 32 Kilometern berechnet. Die Strecke ist dabei in 3'133 Abschnitte mit je zehn Metern Länge unterteilt. Für jeden dieser Abschnitte werden Schallleistungspegel für unterschiedliche Fahrzeugkategorien in Abhängigkeit von der gemessenen Schienenrauheit berechnet. Die Berechnung der Emissionspegel erfolgt für $v = 80 \text{ km/h}$ unter Verwendung der indirekt gemessenen Rad- und Schienenrauheiten entsprechend dem

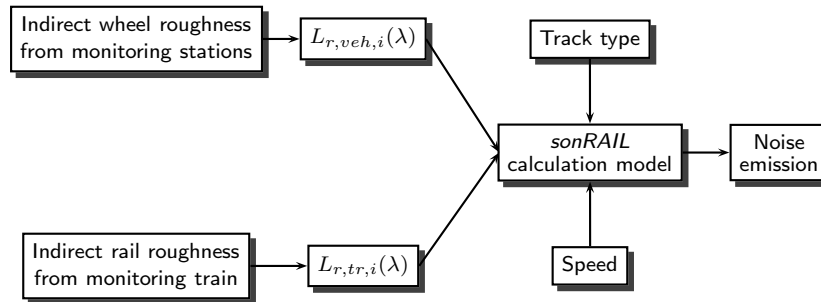
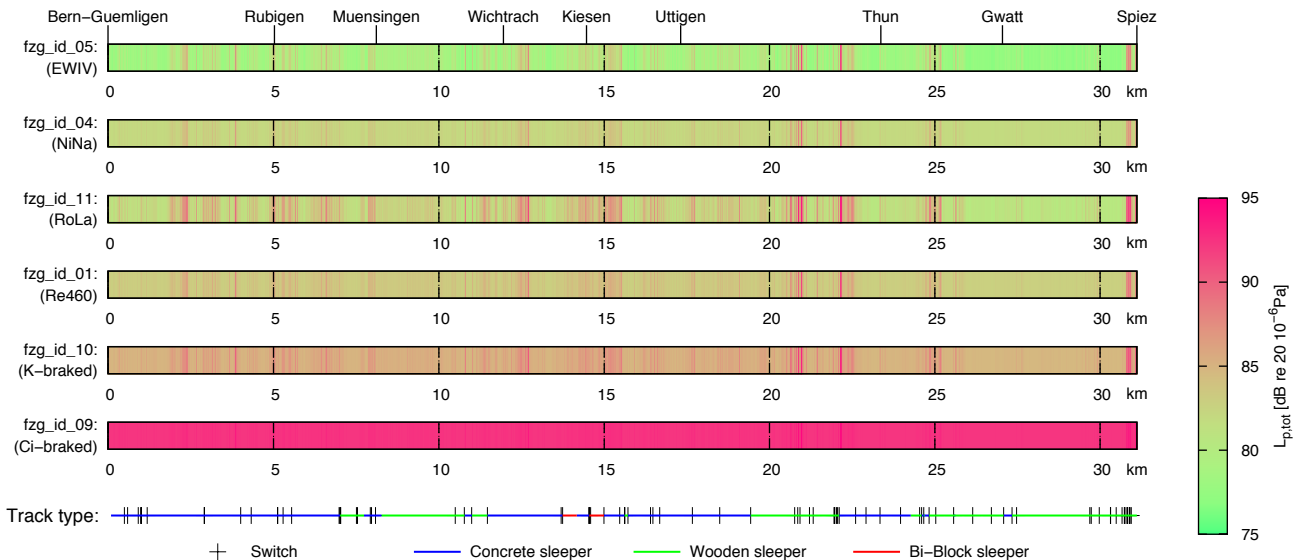


Abbildung 6.12: Berechnung der Emissionspegel unter Verwendung der indirekt gemessenen Rad- und Schienenrauheiten



Vergleich der berechneten Emissionspegel ($L_{pA,tot,7.5m}$) mit den Messwerten der BAV Messstelle in Wichtrach [140]:

	Measured	Calculated
Passenger trains	87.2 dB(A)	87.6 dB(A)
Freight trains	94.6 dB(A)	94.1 dB(A)

Abbildung 6.13: Emissionsrechnungen ($L_{p,tot,7.5m}$) für unterschiedliche Fahrzeugkategorien auf der Strecke Bern-Thun-Spiez unter Verwendung der indirekt gemessenen Schienenrauheiten des Monitoringzuges und den Ergebnissen der indirekten Radrauheitsmessungen an der Monitoringstation Wichtrach

Schema in Abbildung 6.12.

Die Ergebnisse werden anhand der Verteilung der Emissionspegel entlang der Strecke in Abbildung 6.13 dargestellt. Zudem wird der Oberbautyp und die Lage von Weichen angegeben. Entsprechend der gemessenen Schienenrauheiten werden für schiebengebremste Fahrzeuge auf einigen Streckenabschnitte sehr hohe Emissionspegel berechnet. Analog zu den Ergebnissen der Messungen zwischen Lausanne und Freiburg können die Emissionswerte sehr stark streuen. Entsprechend der Radrauheiten werden bei den K-Klotz gebremsten Fahrzeugen höhere Pegel berechnet. Bei den GG-Klotz gebremsten Güterwagen werden gleichbleibend hohe Emissionspegel unabhängig von der Schienenrauheit berechnet. Der Vergleich der Emissionspegel an der BAV Messstelle in Wichtrach zeigt eine sehr gute Übereinstimmung von Messung und Rechnung. Die Verfahren der indirekten Rauheitsmessung in Verbindung mit dem entwickelten Emissionsmodell sind daher für die automatisierte Berechnung von Emissionspegeln über grosse Streckenabschnitte geeignet.

7 Modellvalidierung

7.1 Quellennahe Ausbreitung: Vergleich mit Lautsprechermessungen

Während den Emissions-Messkampagnen wurden mittels Lautsprecherexperimenten die Ausbreitungsdämpfungen im kürzesten Abstand messtechnisch ermittelt. Dazu wurde der Empa Giotto Bauakustik Lautsprecher im Messquerschnitt in einer Höhe von 0.5 m über Schienenoberkante auf allen vier Schienen während rund 30 Sekunden mit Rosa Rauschen betrieben und an allen Mikrofonpositionen aufgezeichnet.

Die folgenden Abbildungen zeigen die Messergebnisse und die entsprechenden Berechnungen der Ausbreitungsdämpfungen mit *sonRAIL* und dem *extended reaction* Ansatz für den Schotterbereich. Die Ausbreitungsdämpfungen gelten für einen Quellenpunkt im kürzesten Abstand und beinhalten noch nicht die Integration über die Vorbeifahrt. Die Ergebnisse sind als Bodeneffekt ausgewiesen, d.h. die zeigen die spektralen Pegelunterschiede der Situation mit Boden im Vergleich zu einer gedachten Situation ohne Boden.

Für die Berechnungen sind die Materialparameter des Schotters gemäss den Angaben im Ausbreitungsmodell gewählt. Die für beste Anpassung an die Messwerte ermittelte Schottertiefe in cm ist in den Tabellen der Geometrieparameter unter dem Stichwort "Schotter" vermerkt. Der Strömungswiderstand für die an das Schotterbett angrenzende Bodenzone ist generell zu 200 kPa s m^{-2} angenommen.

Die verwendete Schienen- und Messpunkt Nummerierung folgt der üblichen Vereinbarung:

Schiene 1 nördliche Schiene des nördlichen Gleis

Schiene 2 südliche Schiene des nördlichen Gleis

Schiene 3 nördliche Schiene des südlichen Gleis

Schiene 4 südliche Schiene des südlichen Gleis

Messpunkt P1 nördlicher Messpunkt, 7.5 m zu Schiene 1

Messpunkt P2 nördlicher Messpunkt, 7.5 m zu Schiene 3

Messpunkt P3 südlicher Messpunkt, 7.5 m zu Schiene 2

Messpunkt P4 südlicher Messpunkt, 7.5 m zu Schiene 4

Die in der Berechnung verwendeten Geometrieparameter entsprechen Abbildung 7.1.

Die in den Frequenzgangplots verwendeten Terzbandnummern übersetzen sich in Frequenzen gemäss Tabelle 7.1.

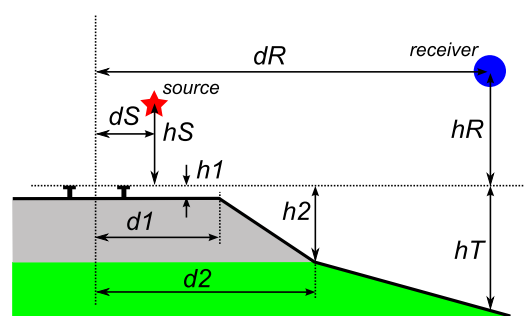


Abbildung 7.1: Parameter zur Beschreibung der Geometrie bei den Emissionsmessungen.

Terznummer	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Frequenz	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630
Terznummer	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Frequenz	800	1000	1250	1600	2000	2500	3200	4000	5000	6300	8000	10000

Tabelle 7.1: Zuordnung der Terznummern zu Terzbandmittenfrequenzen.

7.1.1 Vergleich von Messungen und Berechnungen

In den nachfolgenden Darstellungen werden für sämtliche Emissionsmesspunkte die gemessenen Bodeneffektspektren mit Berechnungen verglichen.

Abgesehen von einzelnen Ausreissern ist eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung festzustellen. Die wesentlichen Bodeneffekteinbrüche werden, sowohl was die Tiefe als auch die frequenzmässige Lage betrifft, korrekt abgebildet. Die verbleibenden, gegen höhere Frequenzen zunehmenden Differenzen sind nicht systematisch sondern zufällig. Bei der Integration über eine ganze Vorbeifahrt ist daher mit einer gewissen Ausmittelung der Differenzen zu rechnen.

Messpunkt 01

Schiene 1 → P1	Schiene 2 → P3	Schiene 3 → P2	Schiene 4 → P4
dR: 7.5	dR: 7.5	dR: 7.5	dR: 7.5
hR: 1.2	hR: 1.2	hR: 1.2	hR: 1.2
hT: 2.8	hT: 0.6	hT: 0.6	hT: 2.8
dS: 0.75	dS: 0.75	dS: 0.75	dS: 0.75
hS: 0.5	hS: 0.5	hS: 0.5	hS: 0.5
d1: 4	d1: 5.1	d1: 5.1	d1: 4
h1: 0.15	h1: 0.15	h1: 0.15	h1: 0.15
d2: 4.1	d2: 5.7	d2: 5.7	d2: 4.1
h2: 0.15	h2: 0.55	h2: 0.55	h2: 0.15
Schotter: 55	Schotter: 55	Schotter: 55	Schotter: 55
Boden: 200	Boden: 200	Boden: 200	Boden: 200

Tabelle 7.2: Verwendete Geometrieparameter für das Rechenmodell (siehe Abbildung 7.1).

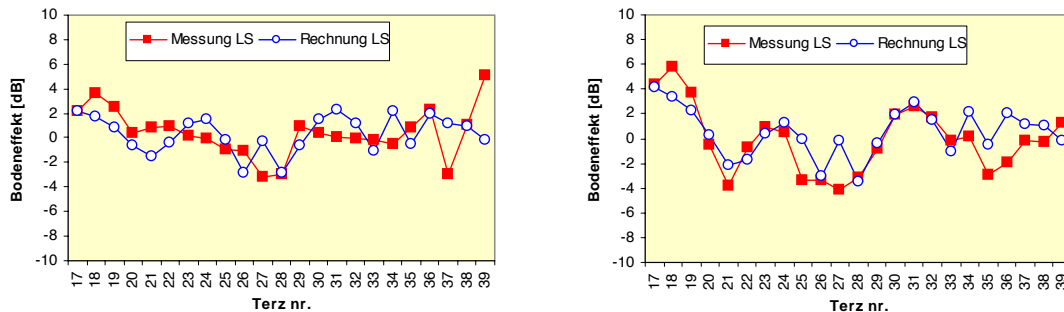


Abbildung 7.2: Gemessener und berechneter Bodeneffekt für Schiene 1 → P1 (links) und Schiene 2 → P3 (rechts).

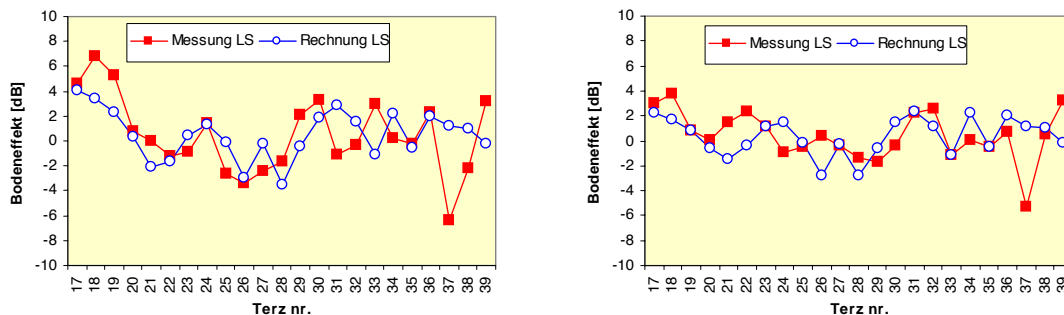


Abbildung 7.3: Gemessener und berechneter Bodeneffekt für Schiene 3 → P2 (links) und Schiene 4 → P4 (rechts).

Messpunkt 02

Schiene 1 → P1	Schiene 2 → P3	Schiene 3 → P2	Schiene 4 → P4
dR: 7.5	dR: 7.5	dR: 7.5	dR: 7.5
hR: 1.2	hR: 1.2	hR: 1.2	hR: 1.2
hT: 2.7	hT: 0.9	hT: 0.9	hT: 2.7
dS: 0.75	dS: 0.75	dS: 0.75	dS: 0.75
hS: 0.5	hS: 0.5	hS: 0.5	hS: 0.5
d1: 1.0	d1: 4.8	d1: 4.8	d1: 1.0
h1: 0.15	h1: 0.15	h1: 0.15	h1: 0.15
d2: 1.5	d2: 5.3	d2: 5.3	d2: 1.5
h2: 0.65	h2: 0.65	h2: 0.65	h2: 0.65
Schotter: 50	Schotter: 65	Schotter: 65	Schotter: 50
Boden: 200	Boden: 200	Boden: 200	Boden: 200

Tabelle 7.3: Verwendete Geometrieparameter für das Rechenmodell (siehe Abbildung 7.1).

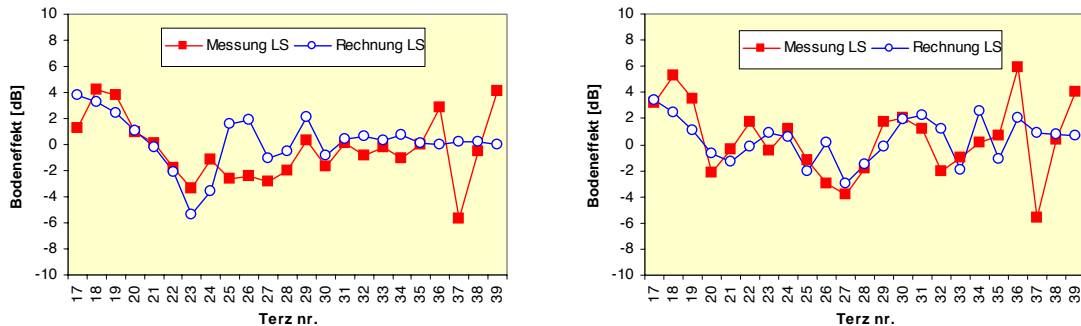


Abbildung 7.4: Gemessener und berechneter Bodeneffekt für Schiene 1 → P1 (links) und Schiene 2 → P3 (rechts).

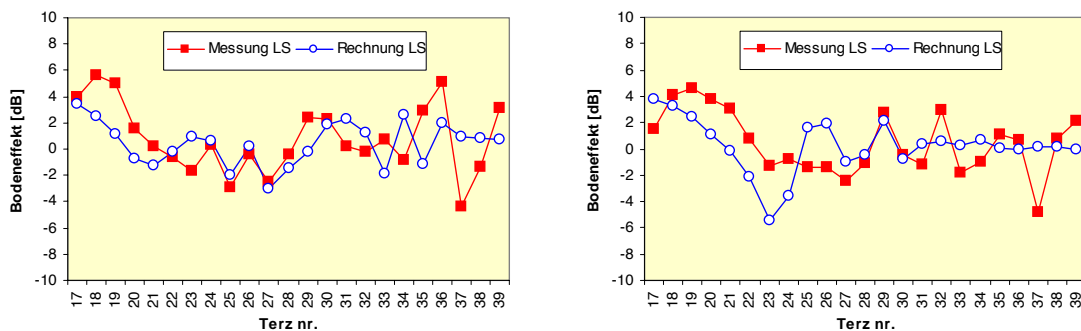


Abbildung 7.5: Gemessener und berechneter Bodeneffekt für Schiene 3 → P2 (links) und Schiene 4 → P4 (rechts).

Messpunkt 03

Schiene 1 → P1	Schiene 2 → P3	Schiene 3 → P2	Schiene 4 → P4
dR: 7.5	dR: 7.5	dR: 7.5	dR: 7.5
hR: 1.2	hR: 1.2	hR: 1.2	hR: 1.2
hT: 2.1	hT: 0.25	hT: 0.25	hT: 0.75
dS: 0.75	dS: 0.75	dS: 0.75	dS: 0.75
hS: 0.5	hS: 0.5	hS: 0.5	hS: 0.5
d1: 2.3	d1: 5.1	d1: 5.1	d1: 2.0
h1: 0.15	h1: 0.15	h1: 0.15	h1: 0.15
d2: 3	d2: 5.7	d2: 5.7	d2: 3.0
h2: 0.85	h2: 0.25	h2: 0.25	h2: 0.75
Schotter: 69	Schotter: 69	Schotter: 69	Schotter: 69
Boden: 200	Boden: 200	Boden: 200	Boden: 200

Tabelle 7.4: Verwendete Geometrieparameter für das Rechenmodell (siehe Abbildung 7.1).

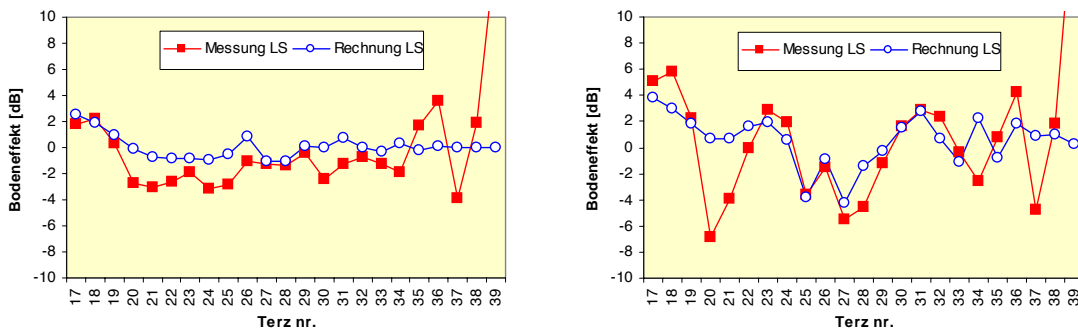


Abbildung 7.6: Gemessener und berechneter Bodeneffekt für Schiene 1 → P1 (links) und Schiene 2 → P3 (rechts).

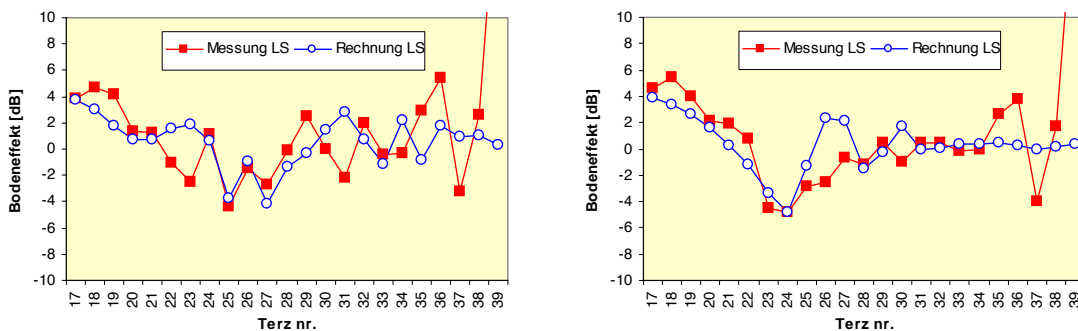


Abbildung 7.7: Gemessener und berechneter Bodeneffekt für Schiene 3 → P2 (links) und Schiene 4 → P4 (rechts).

Messpunkt 04

Schiene 1 → P1	Schiene 2 → P3	Schiene 3 → P2	Schiene 4 → P4
dR: 7.5	dR: 7.5	dR: 7.5	dR: 7.5
hR: 1.2	hR: 1.2	hR: 1.2	hR: 1.2
hT: 1.8	hT: 0.35	hT: 0.55	hT: 0.15
dS: 0.75	dS: 0.75	dS: 0.75	dS: 0.75
hS: 0.5	hS: 0.5	hS: 0.5	hS: 0.5
d1: 1.3	d1: 5.1	d1: 5.1	d1: 1.3
h1: 0.15	h1: 0.15	h1: 0.15	h1: 0.15
d2: 1.9	d2: 5.7	d2: 5.7	d2: 1.9
h2: 1.05	h2: 0.55	h2: 0.55	h2: 0.25
Schotter: 55	Schotter: 65	Schotter: 65	Schotter: 55
Boden: 200	Boden: 200	Boden: 200	Boden: 200

Tabelle 7.5: Verwendete Geometrieparameter für das Rechenmodell (siehe Abbildung 7.1).

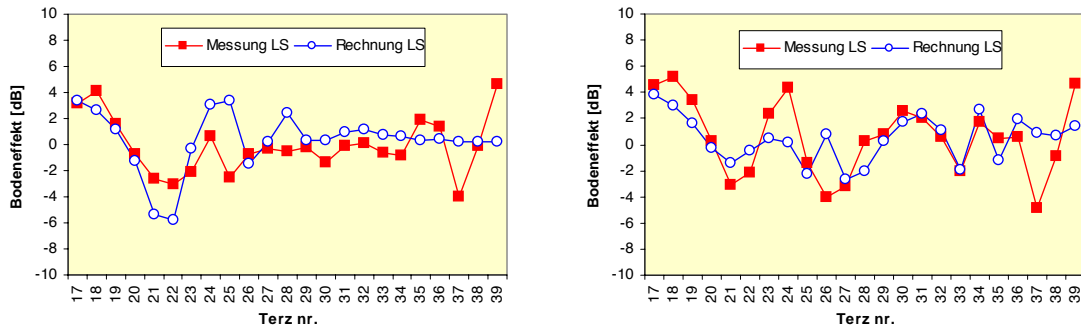


Abbildung 7.8: Gemessener und berechneter Bodeneffekt für Schiene 1 → P1 (links) und Schiene 2 → P3 (rechts).

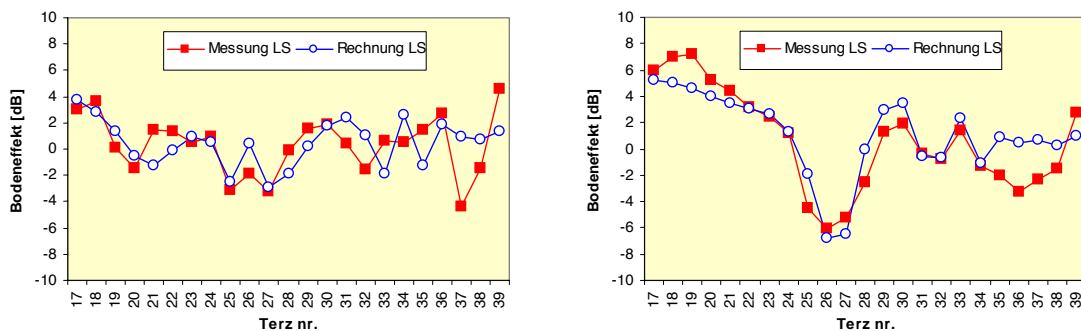


Abbildung 7.9: Gemessener und berechneter Bodeneffekt für Schiene 3 → P2 (links) und Schiene 4 → P4 (rechts).

Messpunkt 05

Schiene 1 → P1	Schiene 2 → P3	Schiene 3 → P2	Schiene 4 → P4
dR: 7.5	dR: 10.8	dR: 12.1	dR: 7.5
hR: 1.2	hR: 1.2	hR: 1.2	hR: 1.2
hT: 0.15	hT: 0.15	hT: 0.15	hT: 0.45
dS: 0.75	dS: 0.75	dS: 0.75	dS: 0.75
hS: 0.5	hS: 0.5	hS: 0.5	hS: 0.5
d1: 7	d1: 10	d1: 12	d1: 5.1
h1: 0.15	h1: 0.15	h1: 0.15	h1: 0.15
d2: 8	d2: 11	d2: 13	d2: 5.7
h2: 0.55	h2: 0.15	h2: 0.15	h2: 0.45
Schotter: 50	Schotter: 50	Schotter: 50	Schotter: 50
Boden: 200	Boden: 200	Boden: 200	Boden: 200

Tabelle 7.6: Verwendete Geometrieparameter für das Rechenmodell (siehe Abbildung 7.1).

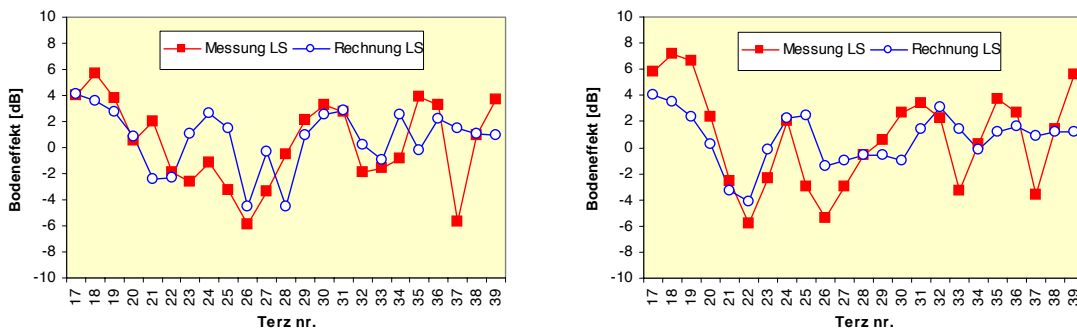


Abbildung 7.10: Gemessener und berechneter Bodeneffekt für Schiene 1 → P1 (links) und Schiene 2 → P3 (rechts).

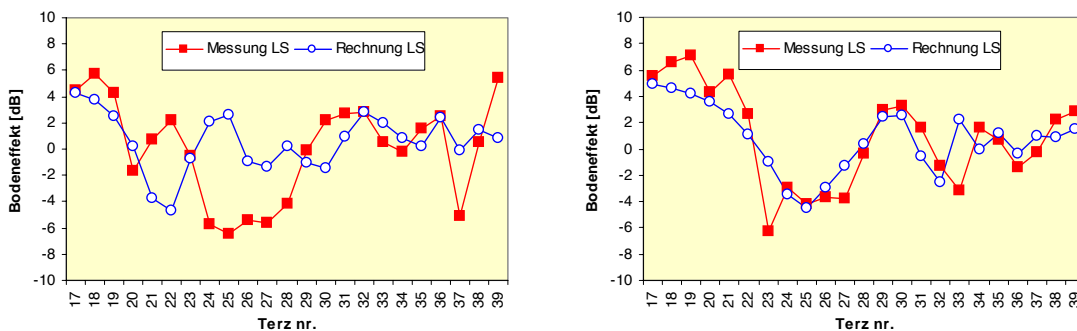


Abbildung 7.11: Gemessener und berechneter Bodeneffekt für Schiene 3 → P2 (links) und Schiene 4 → P4 (rechts).

Messpunkt 06

Schiene 1 → P1	Schiene 2 → P3	Schiene 3 → P2	Schiene 4 → P4
dR: 7.5	dR: 7.5	dR: 7.5	dR: 7.5
hR: 1.2	hR: 1.2	hR: 1.2	hR: 1.2
hT: 2.5	hT: 0.2	hT: 2.7	hT: 0.2
dS: 0.75	dS: 0.75	dS: 0.75	dS: 0.75
hS: 0.5	hS: 0.5	hS: 0.5	hS: 0.5
d1: 1.90	d1: 5.25	d1: 5.1	d1: 1.45
h1: 0.15	h1: 0.15	h1: 0.15	h1: 0.15
d2: 1.91	d2: 5.26	d2: 5.7	d2: 1.46
h2: 0.65	h2: 0.15	h2: 0.8	h2: 0.15
Schotter: 46	Schotter: 46	Schotter: 46	Schotter: 46
Boden: 200	Boden: 200	Boden: 200	Boden: 200

Tabelle 7.7: Verwendete Geometrieparameter für das Rechenmodell (siehe Abbildung 7.1).

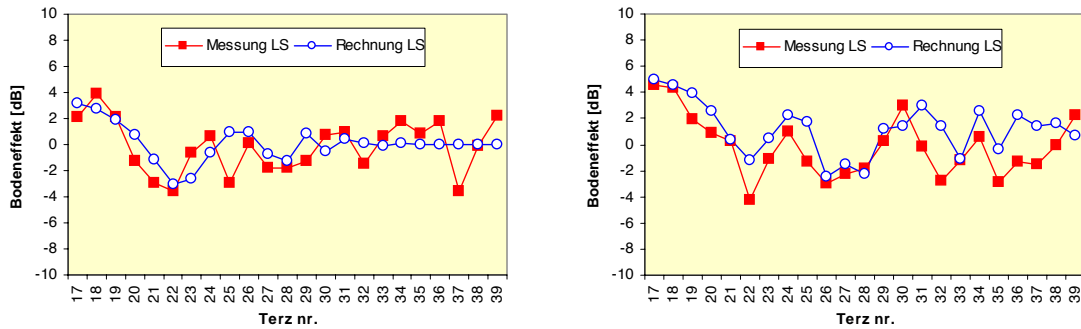


Abbildung 7.12: Gemessener und berechneter Bodeneffekt für Schiene 1 → P1 (links) und Schiene 2 → P3 (rechts).

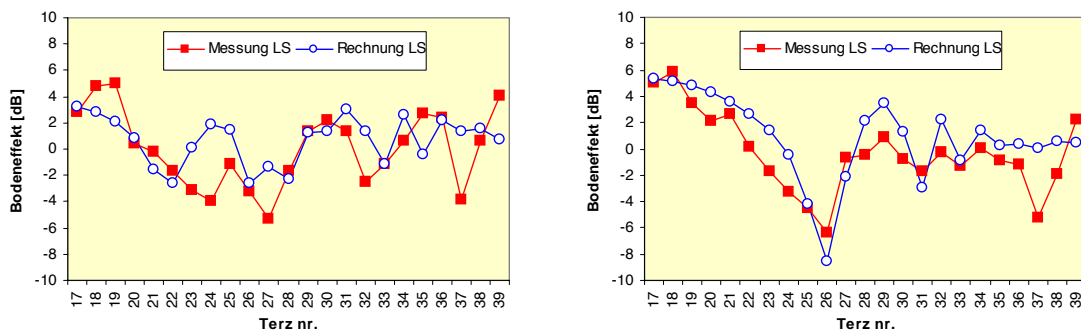


Abbildung 7.13: Gemessener und berechneter Bodeneffekt für Schiene 3 → P2 (links) und Schiene 4 → P4 (rechts).

Messpunkt 07

Schiene 1 → P1	Schiene 2 → P3	Schiene 3 → P2	Schiene 4 → P4
dR: 7.5	dR: 7.5	dR: 7.5	dR: 7.5
hR: 1.2	hR: 1.2	hR: 1.2	hR: 1.2
hT: 0.7	hT: 0.4	hT: 0.6	hT: 0.2
dS: 0.75	dS: 0.75	dS: 0.75	dS: 0.75
hS: 0.5	hS: 0.5	hS: 0.5	hS: 0.5
d1: 1.30	d1: 5.1	d1: 5.1	d1: 1.3
h1: 0.15	h1: 0.15	h1: 0.15	h1: 0.15
d2: 1.90	d2: 5.7	d2: 5.7	d2: 1.9
h2: 0.55	h2: 0.55	h2: 0.55	h2: 0.55
Schotter: 50	Schotter: 50	Schotter: 50	Schotter: 50
Boden: 200	Boden: 200	Boden: 200	Boden: 200

Tabelle 7.8: Verwendete Geometrieparameter für das Rechenmodell (siehe Abbildung 7.1).

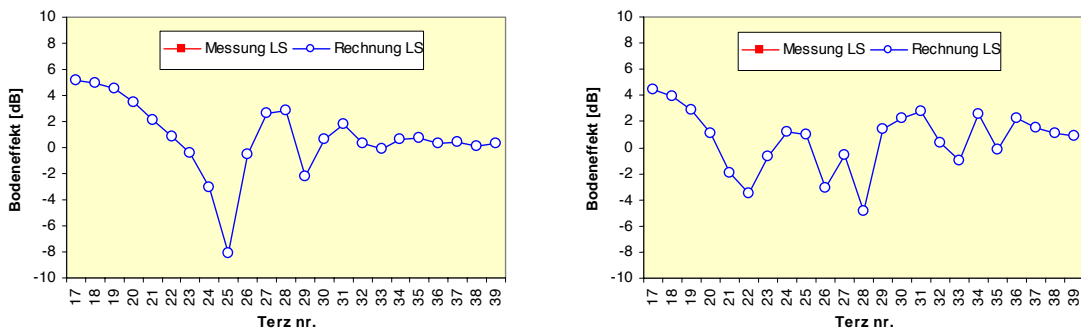


Abbildung 7.14: Gemessener und berechneter Bodeneffekt für Schiene 1 → P1 (links) und Schiene 2 → P3 (rechts).

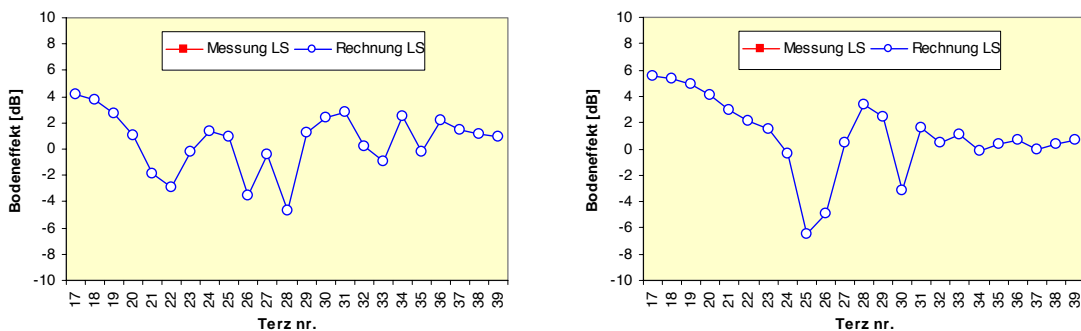


Abbildung 7.15: Gemessener und berechneter Bodeneffekt für Schiene 3 → P2 (links) und Schiene 4 → P4 (rechts).

Für diesen Messpunkt fehlen die Messergebnisse.

Messpunkt 08

Schiene 1 → P1	Schiene 2 → P3	Schiene 3 → P2	Schiene 4 → P4
dR: 7.5	dR: 7.5	dR: 7.5	dR: 7.5
hR: 1.2	hR: 1.2	hR: 1.2	hR: 1.2
hT: 1.2	hT: 0.7	hT: 0.7	hT: 1.7
dS: 0.75	dS: 0.75	dS: 0.75	dS: 0.75
hS: 0.5	hS: 0.5	hS: 0.5	hS: 0.5
d1: 1.3	d1: 5.1	d1: 5.1	d1: 1.3
h1: 0.15	h1: 0.15	h1: 0.15	h1: 0.15
d2: 1.9	d2: 5.7	d2: 5.7	d2: 1.9
h2: 0.15	h2: 0.55	h2: 0.55	h2: 0.15
Schotter: 40	Schotter: 40	Schotter: 40	Schotter: 40
Boden: 200	Boden: 200	Boden: 200	Boden: 200

Tabelle 7.9: Verwendete Geometrieparameter für das Rechenmodell (siehe Abbildung 7.1).

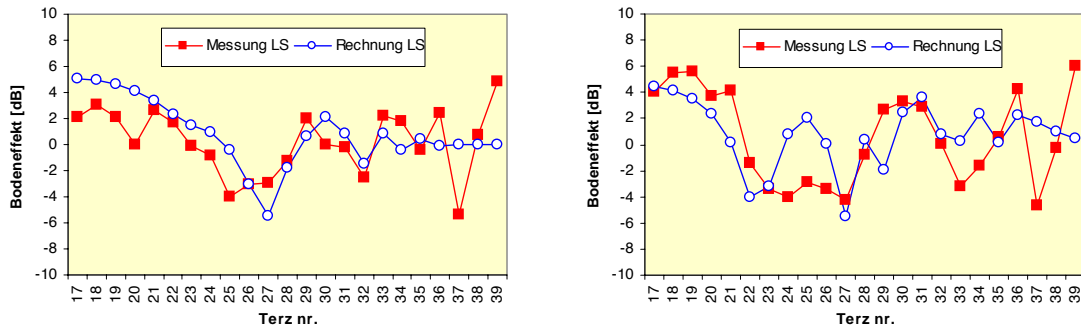


Abbildung 7.16: Gemessener und berechneter Bodeneffekt für Schiene 1 → P1 (links) und Schiene 2 → P3 (rechts).

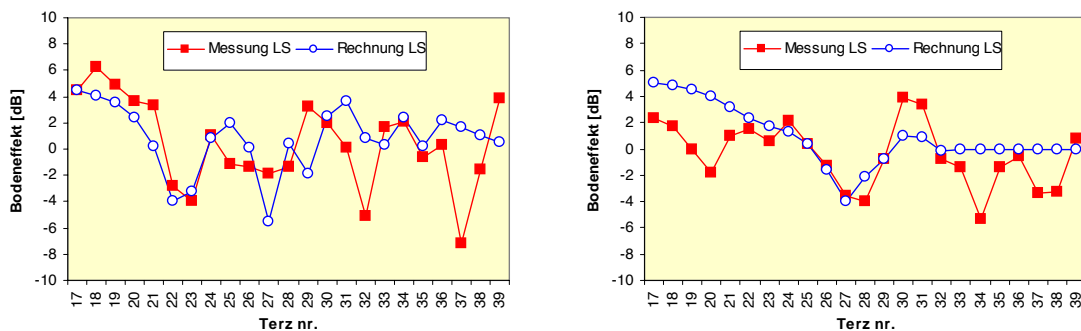


Abbildung 7.17: Gemessener und berechneter Bodeneffekt für Schiene 3 → P2 (links) und Schiene 4 → P4 (rechts).

Messpunkt 09

Schiene 1 → P1	Schiene 2 → P3	Schiene 3 → P2	Schiene 4 → P4
dR: 7.5	dR: 7.5	dR: 7.5	dR: 7.5
hR: 1.2	hR: 1.2	hR: 1.2	hR: 1.2
hT: 1.5	hT: 2	hT: 0.45	hT: 1.5
dS: 0.75	dS: 0.75	dS: 0.75	dS: 0.75
hS: 0.5	hS: 0.5	hS: 0.5	hS: 0.5
d1: 1.3	d1: 5.1	d1: 5.1	d1: 1.3
h1: 0.15	h1: 0.15	h1: 0.15	h1: 0.15
d2: 1.9	d2: 5.7	d2: 5.7	d2: 1.9
h2: 0.35	h2: 0.35	h2: 0.35	h2: 0.8
Schotter: 44	Schotter: 44	Schotter: 44	Schotter: 44
Boden: 200	Boden: 200	Boden: 200	Boden: 200

Tabelle 7.10: Verwendete Geometrieparameter für das Rechenmodell (siehe Abbildung 7.1).

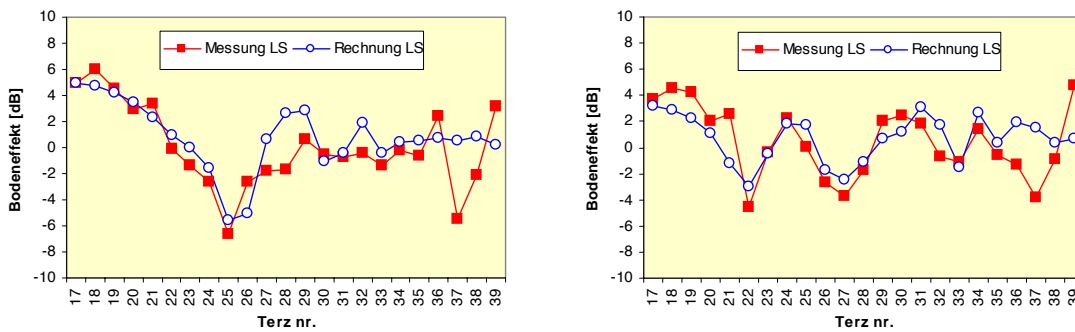


Abbildung 7.18: Gemessener und berechneter Bodeneffekt für Schiene 1 → P1 (links) und Schiene 2 → P3 (rechts).

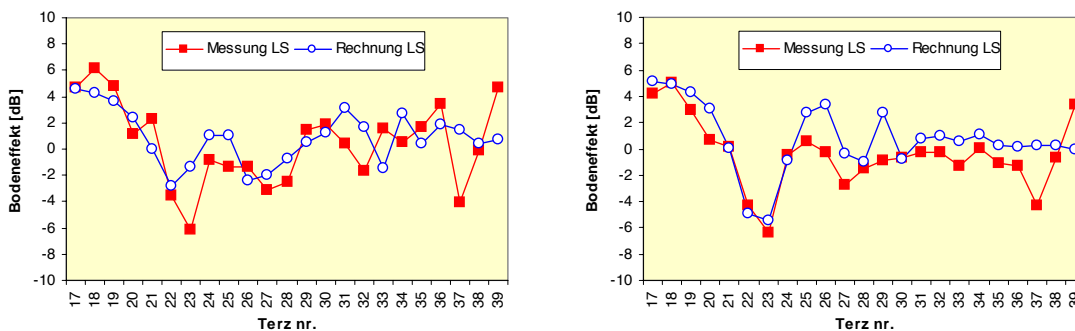


Abbildung 7.19: Gemessener und berechneter Bodeneffekt für Schiene 3 → P2 (links) und Schiene 4 → P4 (rechts).

Messpunkt 10

Schiene 1 → P2	Schiene 1 → P1	Schiene 3 → P1	Schiene 4 → P1
dR: 9.35	dR: 8.6	dR: 4.9	dR: 4.15
hR: 3.05	hR: 3.05	hR: 3.05	hR: 3.05
hT: 0.5	hT: 0.5	hT: 0.5	hT: 0.5
dS: 0	dS: 0.5	dS: 0.0	dS: 0.5
hS: 0.5	hS: 0.5	hS: 0.5	hS: 0.5
d1: 6.7	d1: 5.1	d1: 2.1	d1: 1.3
h1: 0.15	h1: 0.15	h1: 0.15	h1: 0.15
d2: 7.3	d2: 5.7	d2: 2.7	d2: 1.9
h2: 0.55	h2: 0.35	h2: 0.35	h2: 0.35
Schotter: 48	Schotter: 48	Schotter: 48	Schotter: 50
Boden: 200	Boden: 200	Boden: 200	Boden: 200

Tabelle 7.11: Verwendete Geometrieparameter für das Rechenmodell (siehe Abbildung 7.1).

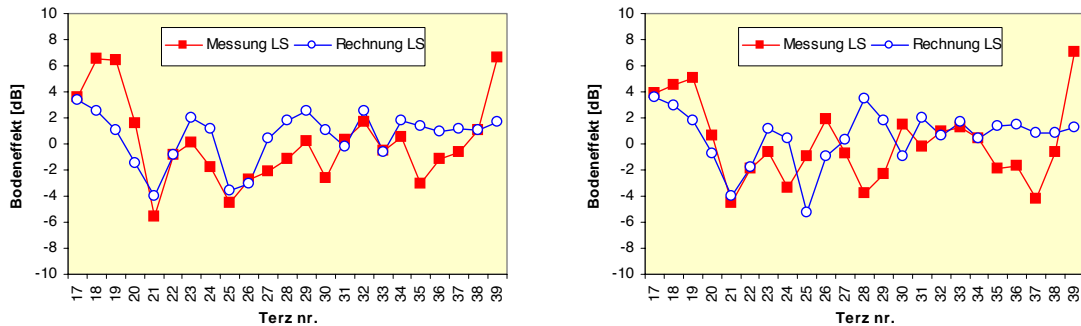


Abbildung 7.20: Gemessener und berechneter Bodeneffekt für Schiene 1 → P1 (links) und Schiene 2 → P3 (rechts).

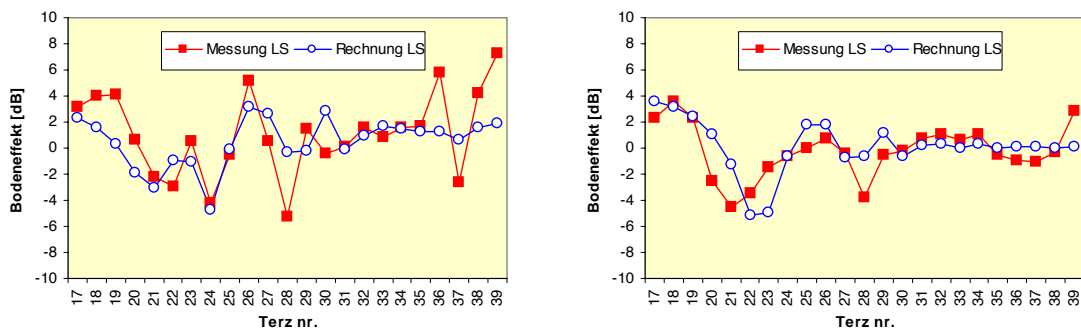


Abbildung 7.21: Gemessener und berechneter Bodeneffekt für Schiene 3 → P2 (links) und Schiene 4 → P4 (rechts).

Messpunkt 11

Schiene 4 → P5	Schiene 2 → P3	-	-
dR: 7.1	dR: 7.1	-	-
hR: 1.2	hR: 1.2	-	-
hT: 0.8	hT: 1.25	-	-
dS: 0.75	dS: 0.75	-	-
hS: 0.5	hS: 0.5	-	-
d1: 1.30	d1: 1.30	-	-
h1: 0.15	h1: 0.15	-	-
d2: 1.90	d2: 1.90	-	-
h2: 0.25	h2: 0.25	-	-
Schotter: 50	Schotter: 50	-	-
Boden: 200	Boden: 200	-	-

Tabelle 7.12: Verwendete Geometrieparameter für das Rechenmodell (siehe Abbildung 7.1).

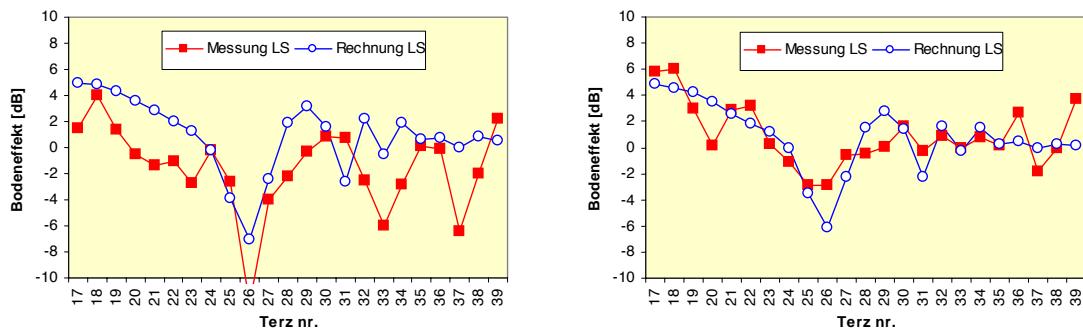


Abbildung 7.22: Gemessener und berechneter Bodeneffekt für Schiene 1 → P1 (links) und Schiene 2 → P3 (rechts).

Messpunkt 12

Schiene 1 → P1	Schiene 2 → P3	Schiene 3 → P2	Schiene 4 → P4
dR: 7.5	dR: 10.4	dR: 7.5	dR: 7.5
hR: 1.2	hR: 1.2	hR: 1.2	hR: 1.2
hT: -0.65	hT: 0.7	hT: -0.1	hT: 1
dS: 0.75	dS: 0.75	dS: 0.75	dS: 0.75
hS: 0.5	hS: 0.5	hS: 0.5	hS: 0.5
d1: 1.30	d1: 9.5	d1: 5.1	d1: 5.1
h1: 0.15	h1: 0.15	h1: 0.15	h1: 0.15
d2: 1.90	d2: 10.1	d2: 5.7	d2: 5.7
h2: 0.55	h2: 0.55	h2: 0.55	h2: 0.55
Schotter: 50	Schotter: 50	Schotter: 50	Schotter: 50
Boden: 200	Boden: 200	Boden: 200	Boden: 200

Tabelle 7.13: Verwendete Geometrieparameter für das Rechenmodell (siehe Abbildung 7.1).

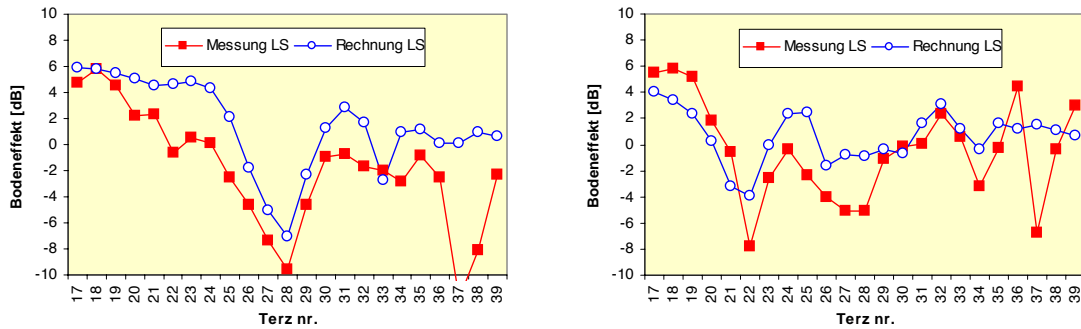


Abbildung 7.23: Gemessener und berechneter Bodeneffekt für Schiene 1 → P1 (links) und Schiene 2 → P3 (rechts).

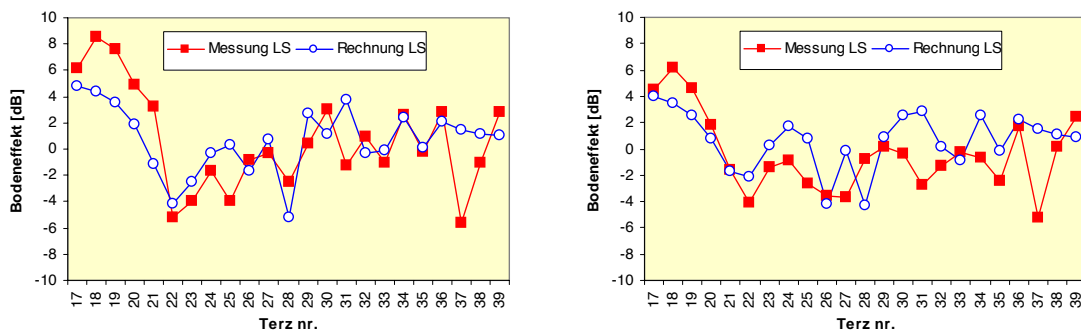


Abbildung 7.24: Gemessener und berechneter Bodeneffekt für Schiene 3 → P2 (links) und Schiene 4 → P4 (rechts).

Messpunkt 13

Schiene 1 → P1	Schiene 2 → P3	Schiene 3 → P2	Schiene 4 → P4
dR: 7.5	dR: 7.5	dR: 7.5	dR: 7.5
hR: 1.2	hR: 1.2	hR: 1.2	hR: 1.2
hT: 0.9	hT: 0.9	hT: 0.9	hT: 1.55
dS: 0.75	dS: 0.75	dS: 0.75	dS: 0.75
hS: 0.5	hS: 0.5	hS: 0.5	hS: 0.5
d1: 1.3	d1: 5.1	d1: 5.1	d1: 1.3
h1: 0.15	h1: 0.15	h1: 0.15	h1: 0.15
d2: 1.9	d2: 5.7	d2: 5.7	d2: 1.9
h2: 0.9	h2: 0.9	h2: 0.9	h2: 0.65
Schotter: 60	Schotter: 60	Schotter: 60	Schotter: 60
Boden: 200	Boden: 200	Boden: 200	Boden: 200

Tabelle 7.14: Verwendete Geometrieparameter für das Rechenmodell (siehe Abbildung 7.1).

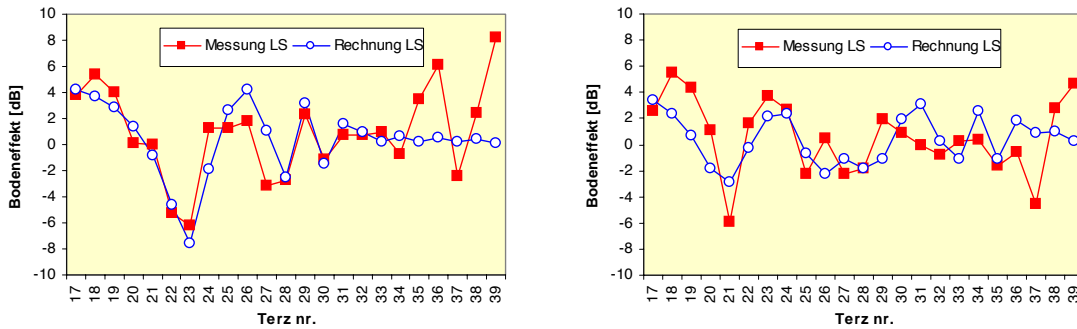


Abbildung 7.25: Gemessener und berechneter Bodeneffekt für Schiene 1 → P1 (links) und Schiene 2 → P3 (rechts).

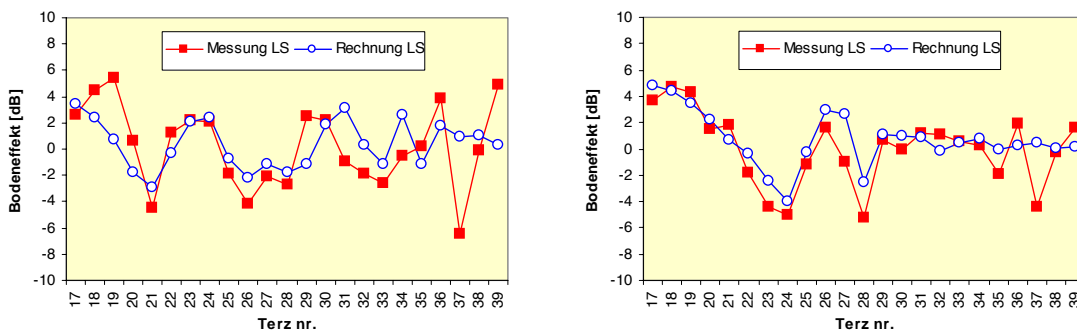


Abbildung 7.26: Gemessener und berechneter Bodeneffekt für Schiene 3 → P2 (links) und Schiene 4 → P4 (rechts).

Messpunkt 33 entspr. 13

Schiene 1 → P1	Schiene 2 → P3	Schiene 3 → P2	Schiene 4 → P4
dR: 7.5	dR: 7.5	dR: 7.5	dR: 7.5
hR: 1.2	hR: 1.2	hR: 1.2	hR: 1.2
hT: 0.9	hT: 0.9	hT: 0.9	hT: 1.55
dS: 0.75	dS: 0.75	dS: 0.75	dS: 0.75
hS: 0.5	hS: 0.5	hS: 0.5	hS: 0.5
d1: 1.3	d1: 5.1	d1: 5.1	d1: 1.3
h1: 0.15	h1: 0.15	h1: 0.15	h1: 0.15
d2: 1.9	d2: 5.7	d2: 5.7	d2: 1.9
h2: 0.9	h2: 0.9	h2: 0.9	h2: 0.65
Schotter: 60	Schotter: 60	Schotter: 60	Schotter: 60
Boden: 200	Boden: 200	Boden: 200	Boden: 200

Tabelle 7.15: Verwendete Geometrieparameter für das Rechenmodell (siehe Abbildung 7.1).

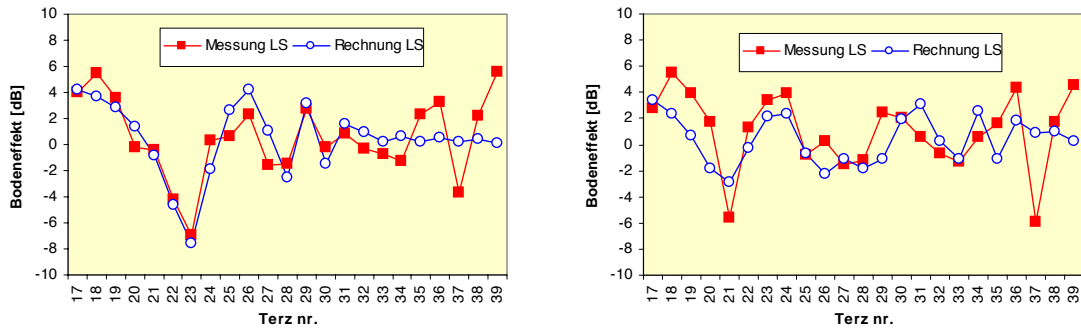


Abbildung 7.27: Gemessener und berechneter Bodeneffekt für Schiene 1 → P1 (links) und Schiene 2 → P3 (rechts).

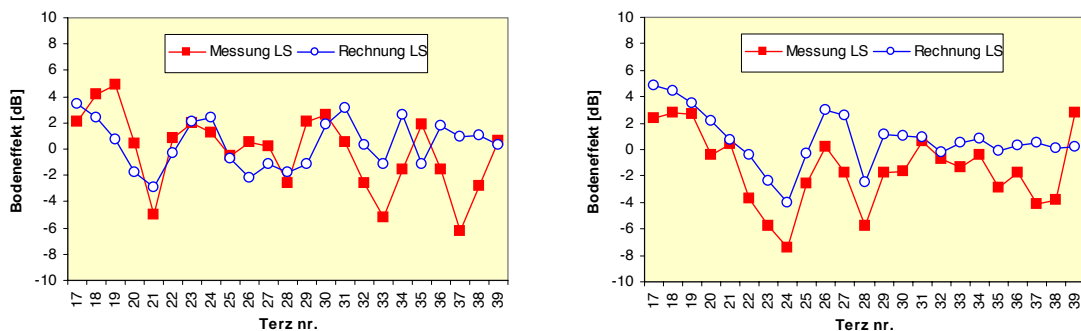


Abbildung 7.28: Gemessener und berechneter Bodeneffekt für Schiene 3 → P2 (links) und Schiene 4 → P4 (rechts).

Messpunkt 14

Schiene 3 → P1	Schiene 4 → P2	-	-
dR: 7.5	dR: 7.5	-	-
hR: 1.2	hR: 1.2	-	-
hT: 0.4	hT: 0.98	-	-
dS: 0.75	dS: 0.75	-	-
hS: 0.5	hS: 0.5	-	-
d1: 5.25	d1: 1.45	-	-
h1: 0.15	h1: 0.15	-	-
d2: 5.85	d2: 2.05	-	-
h2: 0.4	h2: 0.98	-	-
Schotter: 65	Schotter: 65	-	-
Boden: 200	Boden: 200	-	-

Tabelle 7.16: Verwendete Geometrieparameter für das Rechenmodell (siehe Abbildung 7.1).

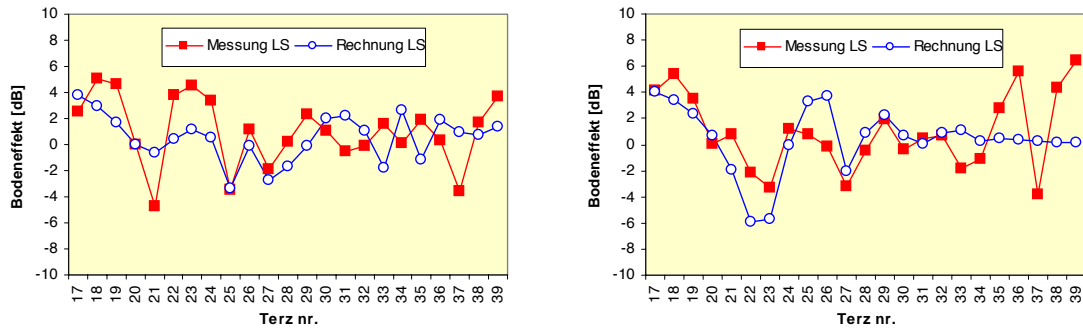


Abbildung 7.29: Gemessener und berechneter Bodeneffekt für Schiene 1 → P1 (links) und Schiene 2 → P3 (rechts).

Messpunkt 34 entspr. 14

Schiene 3 → P1	Schiene 4 → P2	-	-
dR: 7.5	dR: 7.5	-	-
hR: 1.2	hR: 1.2	-	-
hT: 0.4	hT: 0.98	-	-
dS: 0.75	dS: 0.75	-	-
hS: 0.5	hS: 0.5	-	-
d1: 5.25	d1: 1.45	-	-
h1: 0.15	h1: 0.15	-	-
d2: 5.85	d2: 2.05	-	-
h2: 0.4	h2: 0.98	-	-
Schotter: 65	Schotter: 65	-	-
Boden: 200	Boden: 200	-	-

Tabelle 7.17: Verwendete Geometrieparameter für das Rechenmodell (siehe Abbildung 7.1).

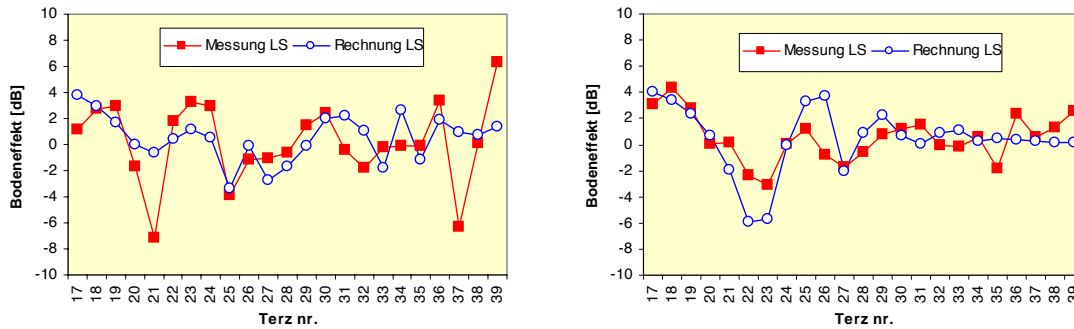


Abbildung 7.30: Gemessener und berechneter Bodeneffekt für Schiene 1 → P1 (links) und Schiene 2 → P3 (rechts).

Messpunkt 15

Schiene 1 → P1	Schiene 2 → P3	Schiene 3 → P2	Schiene 4 → P4
dR: 7.5	dR: 7.5	dR: 7.5	dR: 7.5
hR: 1.2	hR: 1.2	hR: 1.2	hR: 1.2
hT: 1	hT: 1	hT: 1	hT: 1
dS: 0.75	dS: 0.75	dS: 0.75	dS: 0.75
hS: 0.5	hS: 0.5	hS: 0.5	hS: 0.5
d1: 1.45	d1: 5.1	d1: 5.1	d1: 1.3
h1: 0.15	h1: 0.15	h1: 0.15	h1: 0.15
d2: 2.05	d2: 5.7	d2: 5.7	d2: 1.9
h2: 1	h2: 1	h2: 1	h2: 1
Schotter: 59	Schotter: 59	Schotter: 59	Schotter: 59
Boden: 200	Boden: 200	Boden: 200	Boden: 200

Tabelle 7.18: Verwendete Geometrieparameter für das Rechenmodell (siehe Abbildung 7.1).

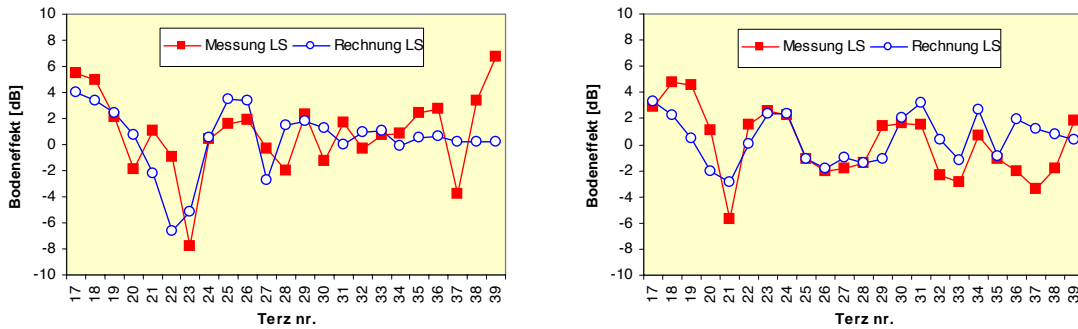


Abbildung 7.31: Gemessener und berechneter Bodeneffekt für Schiene 1 → P1 (links) und Schiene 2 → P3 (rechts).

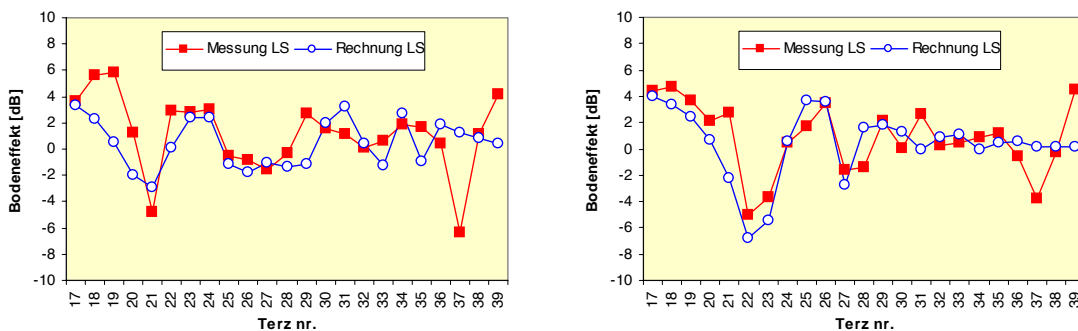


Abbildung 7.32: Gemessener und berechneter Bodeneffekt für Schiene 3 → P2 (links) und Schiene 4 → P4 (rechts).

Messpunkt 35 entspr. 15

Schiene 1 → P1	Schiene 2 → P3	Schiene 3 → P2	Schiene 4 → P4
dR: 7.5	dR: 7.5	dR: 7.5	dR: 7.5
hR: 1.2	hR: 1.2	hR: 1.2	hR: 1.2
hT: 1	hT: 1	hT: 1	hT: 1
dS: 0.75	dS: 0.75	dS: 0.75	dS: 0.75
hS: 0.5	hS: 0.5	hS: 0.5	hS: 0.5
d1: 1.45	d1: 5.1	d1: 5.1	d1: 1.3
h1: 0.15	h1: 0.15	h1: 0.15	h1: 0.15
d2: 2.05	d2: 5.7	d2: 5.7	d2: 1.9
h2: 1	h2: 1	h2: 1	h2: 1
Schotter: 59	Schotter: 59	Schotter: 59	Schotter: 59
Boden: 200	Boden: 200	Boden: 200	Boden: 200

Tabelle 7.19: Verwendete Geometrieparameter für das Rechenmodell (siehe Abbildung 7.1).

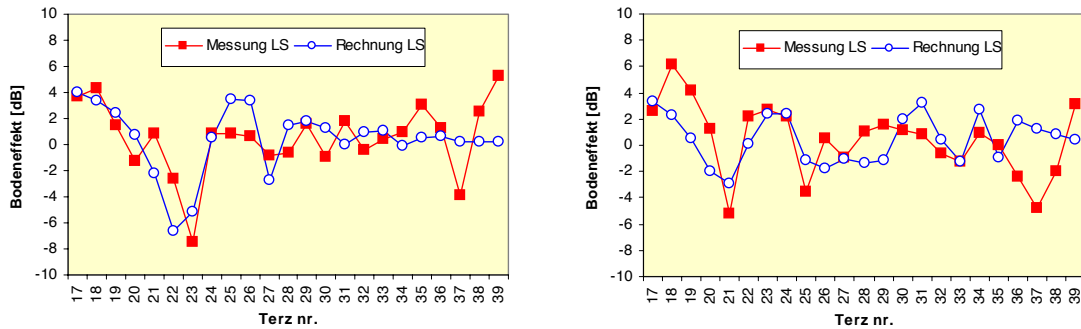


Abbildung 7.33: Gemessener und berechneter Bodeneffekt für Schiene 1 → P1 (links) und Schiene 2 → P3 (rechts).

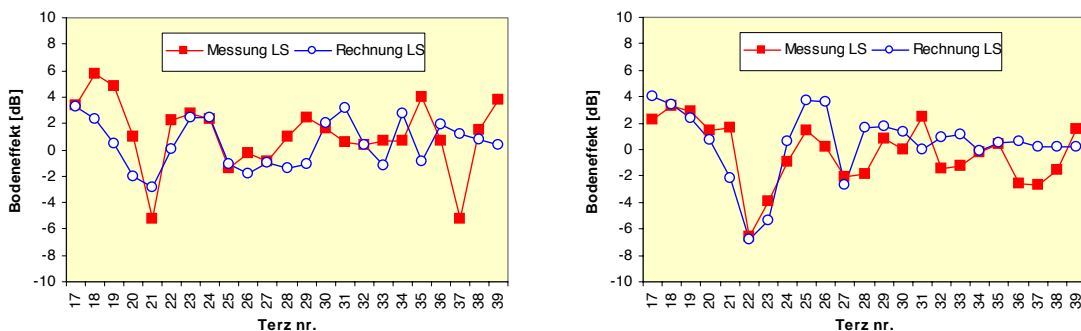


Abbildung 7.34: Gemessener und berechneter Bodeneffekt für Schiene 3 → P2 (links) und Schiene 4 → P4 (rechts).

Tabelle 7.20: Erläuterungen zu den Validierungsprotokollen in Abbildung 7.35

Zeilen	Default-Methode	Zeilen	User-Methode
1-3	Datum, Uhrzeit, Version der Modellrechnung	1-3	Datum, Uhrzeit, Version der Modellrechnung
6	Berechnungsmethode: Default-Methode (indirect)	6	Berechnungsmethode: User-Methode (direct)
7	Rauheiten aus <i>sonRAIL</i> Datenbank	7-8	gemessene Rad- und/oder Schienenrauheiten
9-14	Modelldaten des Fahrzeuges	11-16	Modelldaten des Fahrzeuges
17	Validierte Messstelle und Gleis	19	Validierte Messstelle und Gleis
18-19	Mikrofonabstände	20-21	Mikrofonabstände
20-21	Kategorie der Schienenrauheit der nördlichen und südlichen Schiene		
22	Oberbautyp	22	Oberbautyp
25-26	Gesamtschalleistungspegel auf nördlicher und südlicher Gleisseite	25-26	Gesamtschalleistungspegel auf nördlicher und südlicher Gleisseite
27-33	Schalleistungspegel der einzelnen Quellenhöhen	27-33	Schalleistungspegel der einzelnen Quellenhöhen
35-41	Schalldruckpegel der nördlichen Gleisseite	35-41	Schalldruckpegel der nördlichen Gleisseite
43-48	Schalldruckpegel der südlichen Gleisseite	43-48	Schalldruckpegel der südlichen Gleisseite
		50-80	Verwendete Schienen- und Radrauheiten sowie Kontaktfilter
50-71	Frequenzspektren der Schalleistungspegel pro Quellenhöhe und Gleisseite	82-87	Frequenzspektren der Schalleistungspegel pro Quellenhöhe und Gleisseite
73-94	Frequenzspektren der Schalldruckpegel pro Quellenhöhe und Gleisseite	89-94	Frequenzspektren der Schalleistungspegel pro Quellenhöhe und Gleisseite

7.2 Reproduktion der Emissionsmessdaten

Unter Verwendung der im Abschnitt 6.1 vorgestellten Standardwerte sollen die Messwerte der *sonRAIL* Basismessstellen reproduziert werden. Dazu werden die gemessenen und berechneten Vorbeifahrtpegel $L_{W,tot}$ und $L_{p,tot}$ in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit verglichen. Für den Geschwindigkeitsbereich mit der grössten Anzahl von Messergebnissen werden zudem die Frequenzspektren von Messung und Rechnung angegeben. Die Differenzpegel zwischen Messung und Rechnung werden mit den Standardabweichungen der Messungen pro Fahrzeugkategorie verglichen. Für jede Messstelle wird ein Protokollblatt erstellt. Die Protokollblätter mit einer kurzen Einschätzung der Ergebnisse befinden sich in den Abbildungen 7.36 bis 7.65. Für jede Berechnung wird eine Protokolldatei mit sämtlichen Eingangsparametern und Berechnungsergebnissen erstellt. Die Abbildung 7.35 zeigt den Aufbau der Protokolldateien für beide Berechnungsmethoden. In Tabelle 7.20 ist der Inhalt der Protokolldateien beschrieben. Für die Abschätzung der Genauigkeit einer Berechnung wird der Differenzpegel ΔL zwischen Messung L_{meas} und Rechnung L_{calc} bei der Vergleichsgeschwindigkeit gebildet:

$$\Delta L_{default/user} = L_{meas} - L_{calc,default/user} \quad (7.1)$$

Der Vergleich mit der Standardabweichung p der Fahrzeugkategorie k wird als Indikator für die Genauigkeit der Berechnung an einer Messstelle verwendet:

$$|p_k| - |\Delta L_k| > 0 \quad (7.2)$$

Die sich aus den Emissionsrechnungen ergebenden Unsicherheiten werden im Bezug zum Gesamtmodell in Abschnitt 8.1 behandelt.

```

--- System informations ---
2 Date/Time: 01/16/09 22:47:51
Version 3.3
4
--- Calculation method ---
6 Method: indirect
Total roughness: sonRAIL Database
8
--- Vehicle source datas ---
10 Vehicle category: 05
Vehicle length [m]: 26.4
12 Vehicle nr. of axles: 4
Vehicle speed [km/h]: 80.0
14 Wheel roughness: D-braked
16
--- Track source datas ---
18 Testsite: 03 N
Distance north microphone [m]: 7.5
Distance south microphone [m]: 7.5
20 Rail roughness north rail: smooth
Rail roughness south rail: smooth
22 Track type: Steel, UIC54

24 --- Total Sound power levels [dB] ---
Total: L_W_N=109.2
26 Total: L_W_S=109.2
h=0: L_W_N_0=106.3
h=0: L_W_S_0=106.3
28 h=0.5: L_W_N_05=104.5
h=0.5: L_W_S_05=104.5
30 h=2: L_W_2=98.4
h=2: L_W_S_2=98.4
32 h=3: L_W_3=95.3
h=3: L_W_S_3=95.3
34 h=4: L_W_4=93.5
h=4: L_W_S_4=93.5

--- Total Sound pressure levels [dB] ---
36 Total: L_p_N=78.5
h=0: L_p_N_0=75.7
38 h=0.5: L_p_N_05=73.5
h=2: L_p_N_2=67.8
h=3: L_p_N_3=65.1
h=4: L_p_N_4=64.1
42
Total: L_p_S=78.4
44 h=0: L_p_S_0=75.2
h=0.5: L_p_S_05=74.1
46 h=2: L_p_S_2=67.7
h=3: L_p_S_3=64.5
48 h=4: L_p_S_4=62.2

50 --- Frequency spectra of Sound power levels [dB] ---
f L_W_N0 L_W_S0 L_W_N05 L_W_S05 L_W2 L_W3 L_W4
52 100 81.6 81.6 93.2 93.2 88.8 86.8 86.4
125 81.5 81.5 91.8 91.8 86.5 84.5 85.2
54 160 84.5 84.5 91.3 91.3 85.1 83.1 81.4
200 89.0 89.0 92.0 92.0 87.0 85.0 79.6
56 250 94.0 94.0 93.0 93.0 86.4 84.4 78.3
315 96.7 96.7 90.9 90.9 85.3 83.3 80.9
58 400 97.2 97.2 93.2 93.2 88.6 84.6 82.5
500 97.3 97.3 92.4 92.4 87.3 83.3 79.4
60 630 97.1 97.1 92.6 92.6 87.5 83.5 77.5
800 97.6 97.6 91.2 91.2 85.7 81.7 77.0
62 1000 95.6 95.6 92.2 92.2 87.7 83.7 80.1
1250 92.0 92.0 89.6 89.6 84.5 80.5 82.8
64 1600 89.4 89.4 90.7 90.7 83.7 79.7 80.1
2000 91.2 91.2 93.4 93.4 83.2 78.4 77.4
66 2500 91.7 91.7 90.4 90.4 79.1 77.1 74.1
3150 90.5 90.5 90.0 90.0 78.2 76.2 76.4
68 4000 89.3 89.3 89.4 89.4 80.6 76.2 76.4
5000 88.3 88.3 89.3 89.3 80.5 76.2 76.4
70 6300 87.1 87.1 88.9 88.9 79.1 76.2 76.4
8000 85.8 85.8 88.6 88.6 78.9 76.2 76.4
72
--- Frequency spectra of Sound pressure levels [dB] ---
74 f L_p_N0 L_p_N05 L_p_N2 L_p_N3 L_p_N4 L_p_S0 L_p_S05 L_p_S2 L_p_S3 L_p_S4
100 51.5 62.7 53.9 54.7 57.4 51.6 63.2 57.3 53.9 52.0
76 125 50.9 60.7 53.8 55.4 57.3 51.5 61.7 55.3 51.2 50.3
160 53.7 59.9 55.3 54.7 51.2 55.3 62.1 53.3 47.8 48.3
78 200 58.5 60.5 58.6 53.9 48.1 60.2 63.3 51.8 52.4 51.2
250 63.6 61.2 56.5 53.5 49.6 63.9 63.3 52.6 56.4 51.2
80 315 65.2 59.2 53.3 54.2 50.3 62.2 56.8 55.9 55.1 50.1
400 66.5 63.2 59.2 54.2 52.7 65.6 61.7 59.6 54.4 51.1
82 500 67.7 61.3 56.5 53.2 49.6 62.3 58.0 58.3 52.2 50.5
630 66.8 61.0 57.3 53.5 47.9 65.0 60.5 55.9 53.9 47.1
84 800 66.8 60.2 55.3 51.7 47.1 66.6 59.8 55.6 51.0 46.7
1000 64.8 61.4 57.3 53.4 50.3 66.4 62.2 57.3 53.2 49.8
86 1250 61.1 59.4 54.1 50.4 53.0 64.0 61.1 54.3 49.9 52.5
1600 57.6 60.3 53.2 49.5 50.1 59.3 61.8 53.3 49.0 49.5
88 2000 59.1 62.5 52.6 48.2 47.3 59.4 62.0 52.9 47.9 46.8
2500 59.5 59.8 48.5 46.8 43.9 63.2 60.8 48.7 46.5 43.5
90 3150 58.7 59.3 47.6 45.9 46.1 59.0 60.1 48.0 45.6 45.9
4000 59.3 58.7 50.0 45.8 46.1 60.4 59.8 50.2 45.5 45.9
92 5000 59.8 58.6 49.8 45.8 46.0 58.5 59.4 50.3 45.5 45.9
6300 58.4 58.2 48.5 45.4 45.8 57.4 59.1 49.3 45.5 45.9
94 8000 54.6 57.8 48.4 45.7 45.8 54.6 58.3 48.6 45.5 45.9

```

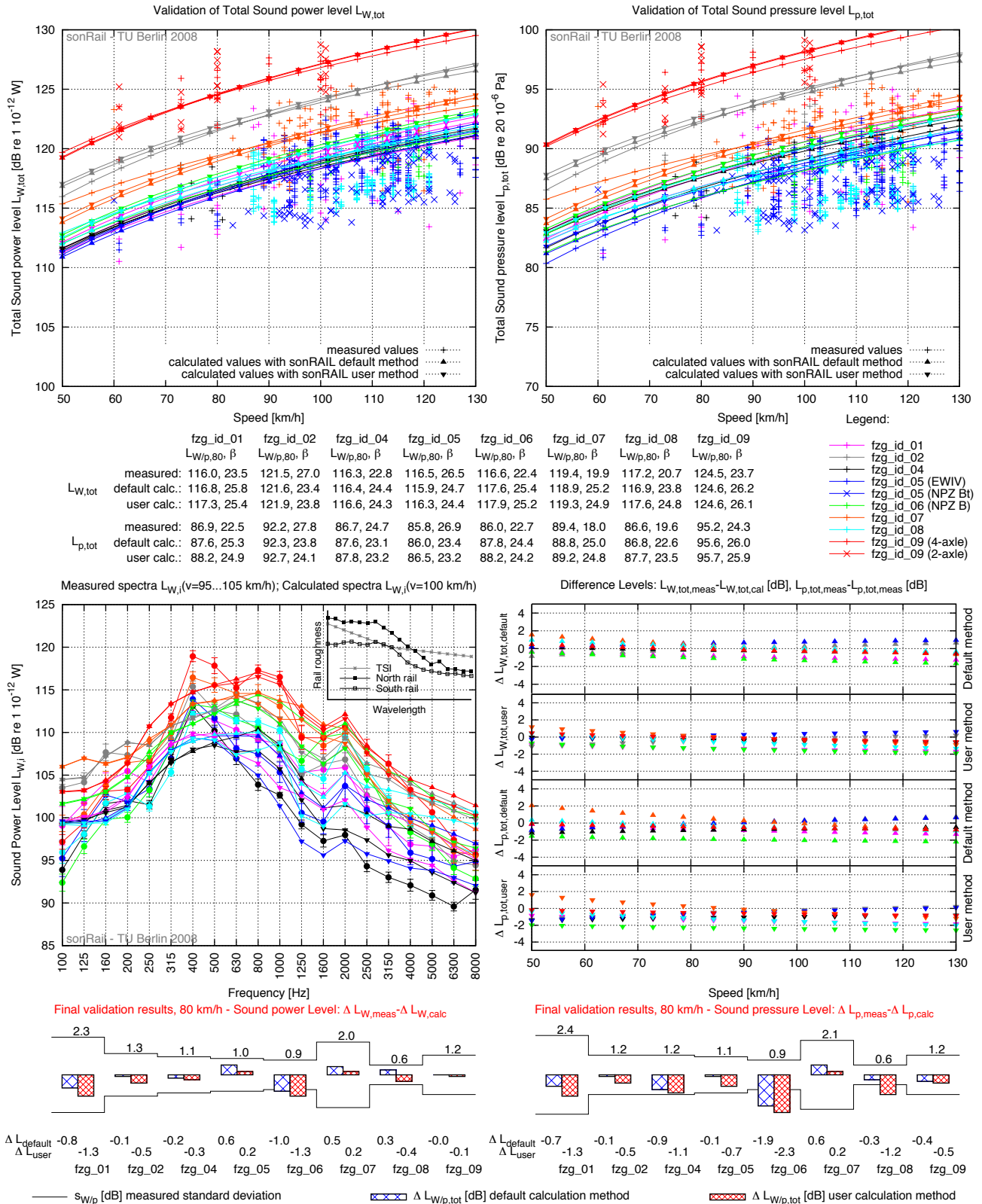
Abbildung 7.35: Beispiele der Validierungsprotokolle der Emissionsrechnungen mit der sonRAIL Default-Methode (linke Darstellung) und mit der User-Methode (rechte Darstellung, verkürzte Darstellung der Schalleistungs- und Schalldruckspektren)

7.2.1 sonRAIL Basismessstellen

7.2.1.1 Detaillierte Validierungsergebnisse

Die Abbildungen 7.36 bis 7.65 enthalten für jede Messstelle die detaillierten Validierungsergebnisse und deren Bewertung.

Messtelle 01 Nordgleis

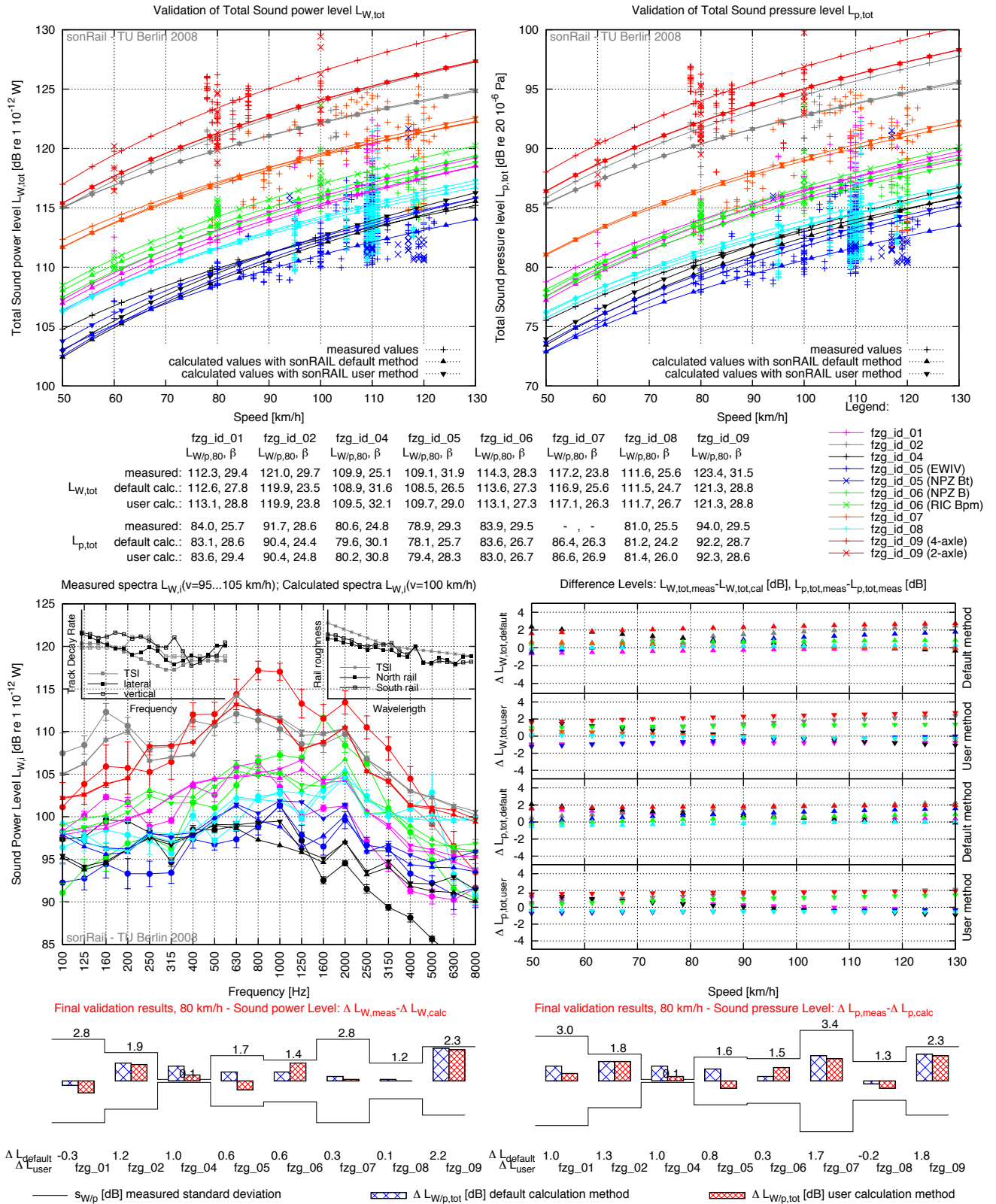


Gesamtgenauigkeit Default-Methode: $\Delta L_W = 0.5 \Delta L_P = 0.7 \text{ dB}$ User-Methode: $\Delta L_W = 0.6 \Delta L_P = 1.0 \text{ dB}$

Bewertung der Ergebnisse Die Messtelle befindet sich in einem 830 Meter Bogen. Nördliche und südliche Schiene zeigen deutliche Rauheitsunterschiede, so dass eine grosse Streuung in der Emissionspegel gemessen wurde. Die Modellrechnung wird daher getrennt für beide Gleisseiten durchgeführt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit in den Darstellungen wird der gemittelte Emissionspegel von beiden Gleisseiten dargestellt. Akustische Effekte die sich aus der Bogenfahrt ergeben, können im Vergleich zum geraden Gleis nicht festgestellt werden. Die Berechnungen werden mit hoher Genauigkeit durchgeführt.

Abbildung 7.36: Validierung der Bogenmesstelle 01, nördliches Gleis

Messstelle 01 Südgleis

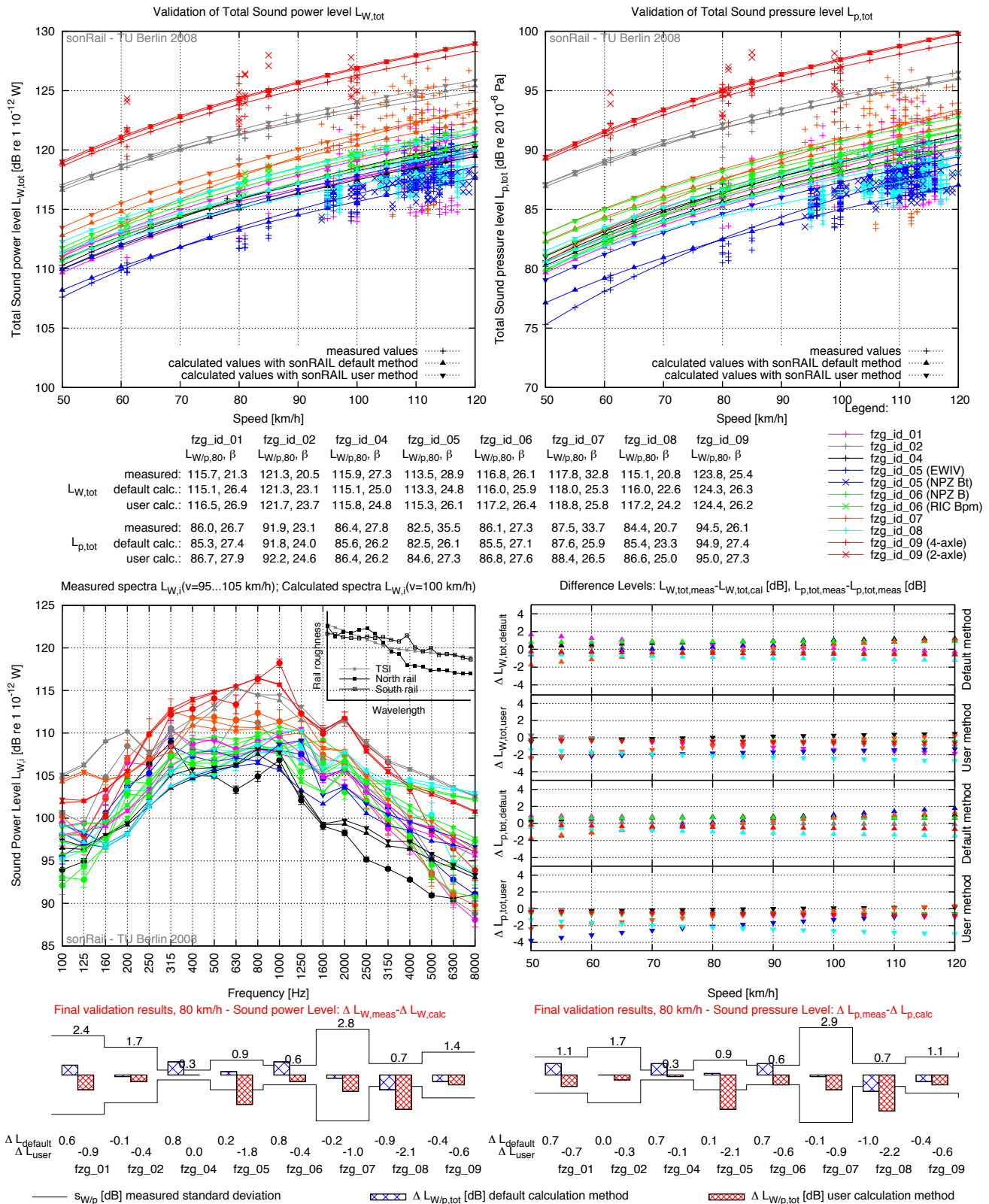


Gesamtgenauigkeit Default-Methode: $\Delta L_W = 0.9 \Delta L_P = 0.9 \text{ dB}$ User-Methode: $\Delta L_W = 0.9 \Delta L_P = 0.8 \text{ dB}$

Bewertung der Ergebnisse Das südliche Gleis der Bogenmessstelle ist durch eine sehr geringe Schienenrauheit charakterisiert, so dass deutliche Unterschiede in den Emissionspegel gemessen und berechnet werden. Die Emissionspegel der GG-Klotz gebremsten Fahrzeuge werden um bis zu 2 dB zu niedrig berechnet. Bei allen anderen Fahrzeugkategorien werden die Messwerte mit hoher Genauigkeit nachgebildet. Der Vergleich der Emissionspegel auf geraden Gleis zeigt insbesondere bei den IC2000 Fahrzeuge eine Pegelerhöhung auf Grund der Bogenfahrt. Dieser Effekt kann durch die Modellrechnung nachgebildet werden.

Abbildung 7.37: Validierung der Bogenmessstelle 01, südliches Gleis

Messstelle 02 Nordgleis

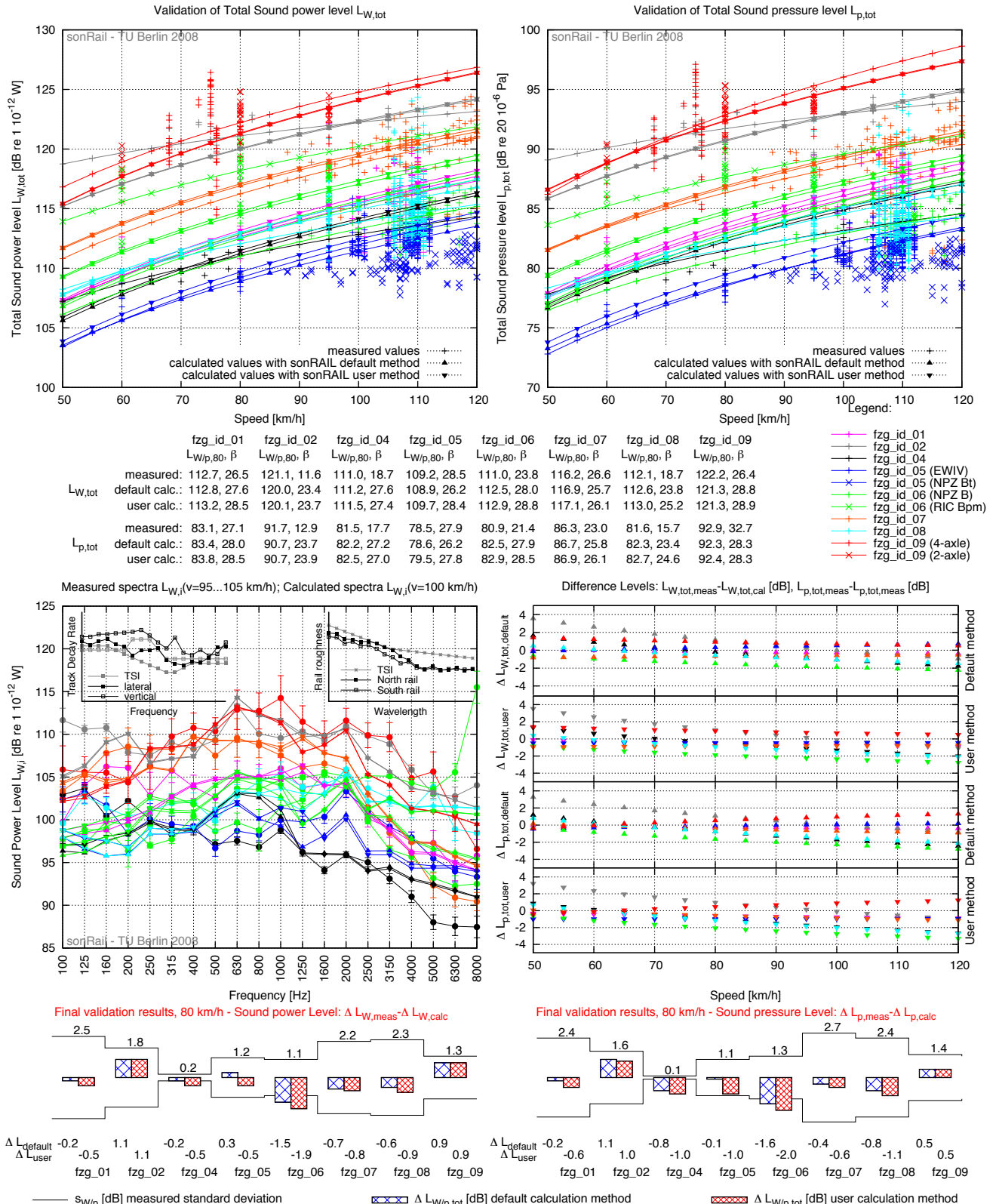


Gesamtgenauigkeit Default-Methode: $\Delta L_W = 0.6$ $\Delta L_p = 0.6$ dB User-Methode: $\Delta L_W = 0.8$ $\Delta L_p = 0.9$ dB

Bewertung der Ergebnisse Die Messstelle befindet sich in einem 460 Meter Gleisbogen. Die Schienenrauheiten zeigen deutliche Unterschiede. Somit überlagern sich insbesondere bei scheibengebremsten Fahrzeugen die Effekte der Bogenfahrt mit dem Rollgeräusch der hohen Schienenrauheiten. Bei den GG-Klotz gebremsten Fahrzeugen dominiert analog zum geraden Gleis die Radrauheit. Auffällig sind die hohen Abweichungen zwischen Messung und Rechnung bei den scheibengebremsten Fahrzeugen bei Verwendung der User-Methode. In Abschnitt 5.1.2.2 wurde auf den Einfluss unterschiedlicher Rauheitsspektren innerhalb eines Fahrspiegels eingegangen.

Abbildung 7.38: Validierung der Bogenmessstelle 02, nördliches Gleis

Messtelle 02 Südgleis

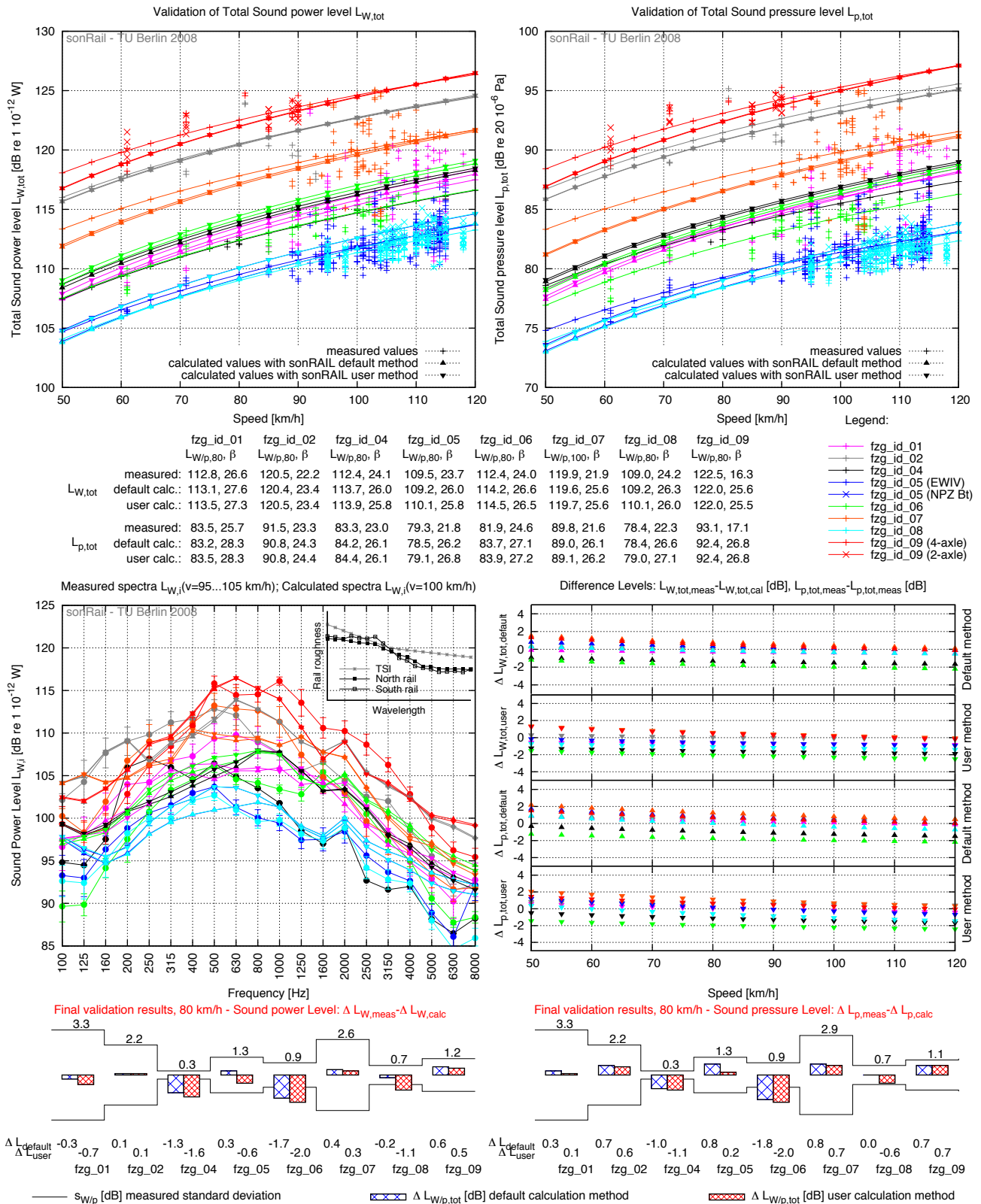


Gesamtgenauigkeit Default-Methode: $\Delta L_W = 0.8 \Delta L_P = 0.8 \text{ dB}$ User-Methode: $\Delta L_W = 0.8 \Delta L_P = 0.9 \text{ dB}$

Bewertung der Ergebnisse Bei den D- und K-Klotz gebremsten Fahrzeugen dominiert der Einfluss der Bogenfahrt, da die Schienenrauheiten an diesem Gleis sehr gering sind. Deutlich sind die unterschiedlichen Emissionspegel der EWIV und IC2000 Fahrzeuge zu erkennen. Durch die Verwendung von 2 äquivalenten Radrauheiten für die Bogenfahrt kann dieser gemessene Effekt nachgebildet werden. Die Werte der RIC Bpm Fahrzeuge werden um bis zu 2 dB zu niedrig berechnet. Das Frequenzspektrum dieser Fahrzeuge zeigt im oberen Frequenzbereich eine starke Pegelzunahme, was auf Ansätze von Kurvenkreischen hindeutet.

Abbildung 7.39: Validierung der Bogenmesstelle 02, südliches Gleis

Messtelle 03 Nordgleis

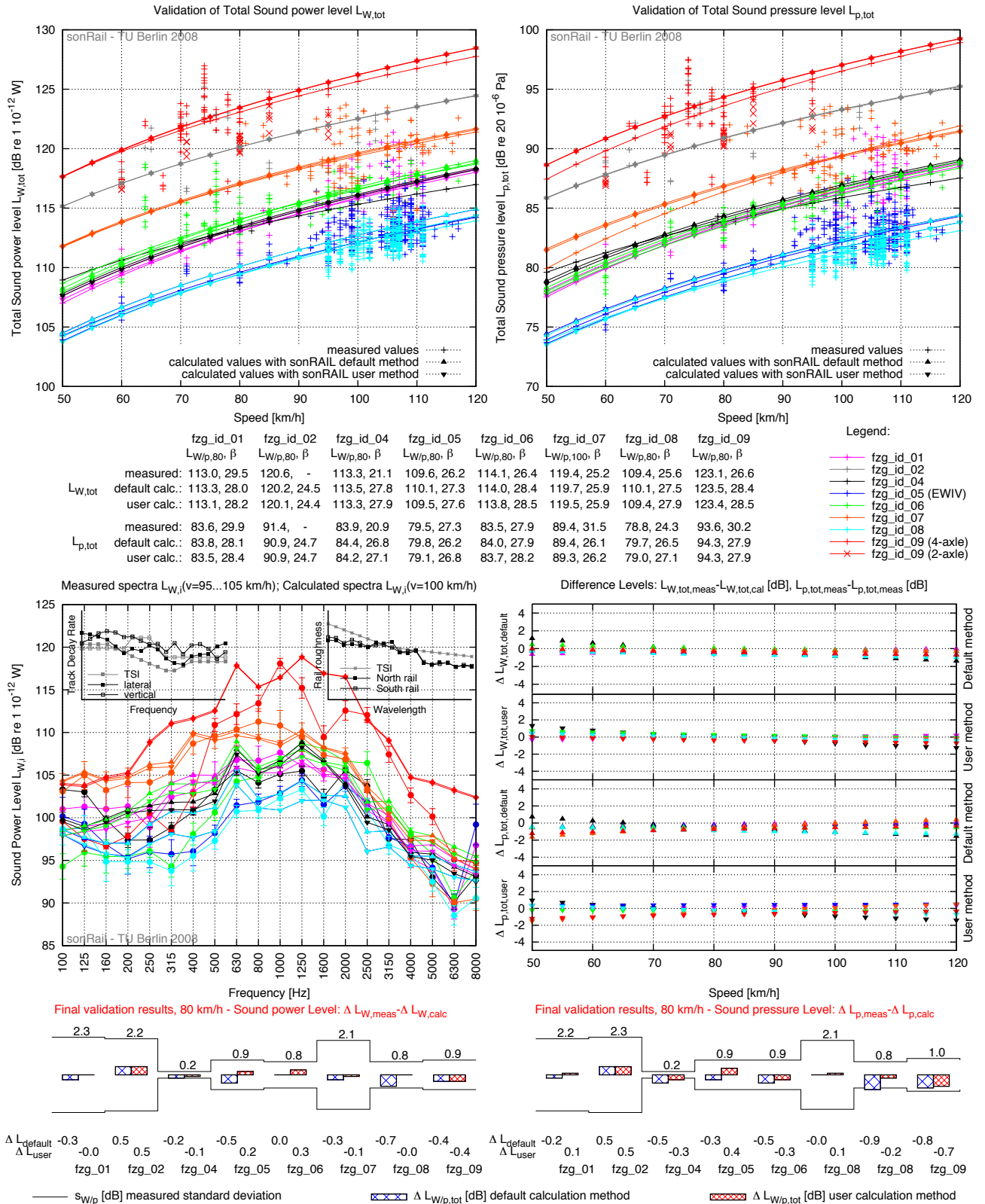


Gesamtgenauigkeit Default-Methode: $\Delta L_W = 0.6$ $\Delta L_p = 0.8$ dB User-Methode: $\Delta L_W = 0.9$ $\Delta L_p = 0.8$ dB

Bewertung der Ergebnisse Auffällig sind die zu hoch berechneten Emissionswerte der Kategorie 04 und 06. Der Vergleich mit den gemessenen effektiven Rauheiten auf diesem Gleis zeigt, dass im Vergleich zu anderen Messtellen auffällig tiefe Rauheitswerte und Vorbeifahrtpegel erreicht werden. Dies führt zu einer Überbewertung des Emissionsverhaltens dieser Fahrzeuge. Für die anderen Fahrzeuge werden die Messpegel mit hoher Genauigkeit berechnet.

Abbildung 7.40: Validierung der Basismesstelle 03, nördliches Gleis

Messtelle 03 Südgleis

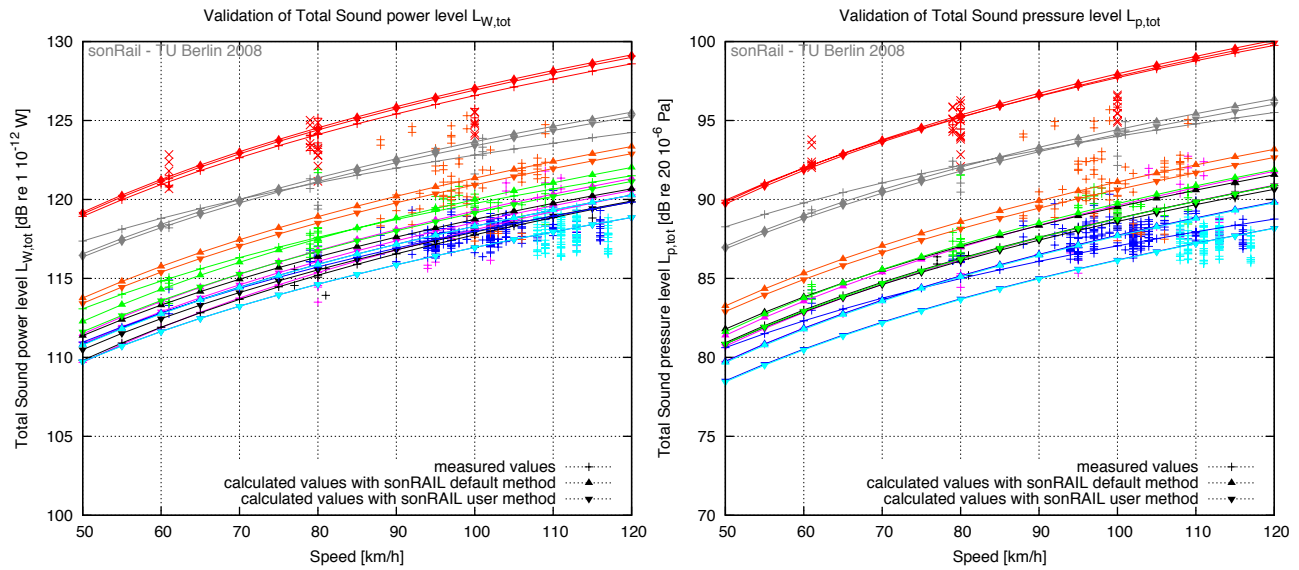


Gesamtgenauigkeit Default-Methode: $\Delta L_W = 0.3 \Delta L_P = 0.4 \text{ dB}$ User-Methode: $\Delta L_W = 0.2 \Delta L_P = 0.3 \text{ dB}$

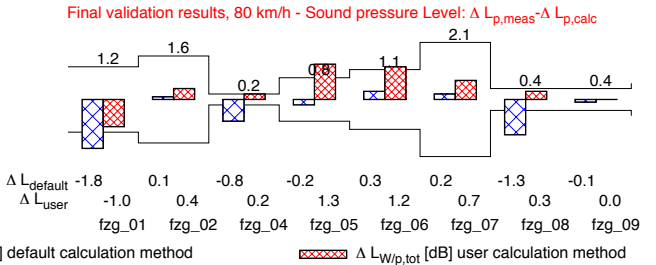
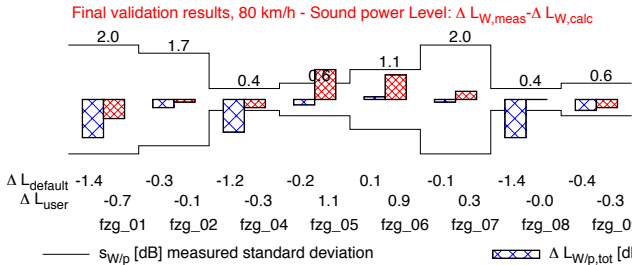
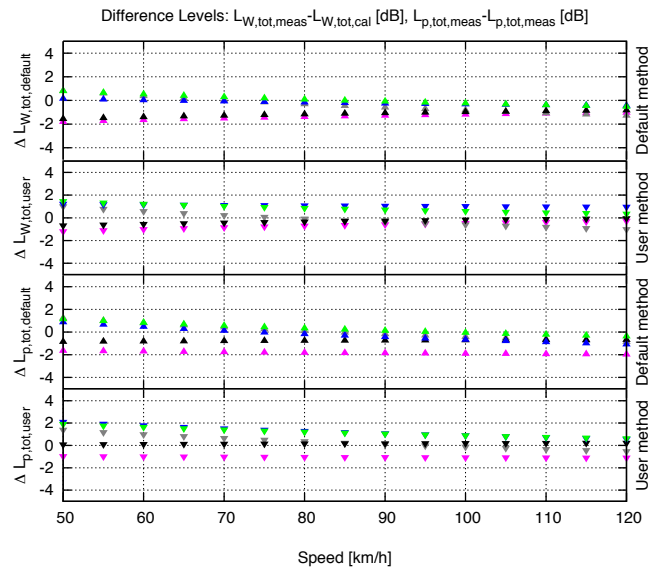
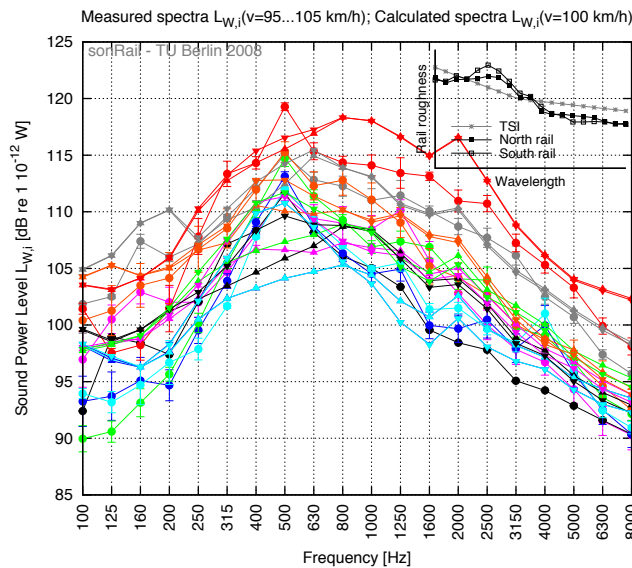
Bewertung der Ergebnisse Die gemessenen Emissionspegel können mit beiden Berechnungsmethoden mit hoher Genauigkeit berechnet werden.

Abbildung 7.41: Validierung der Basismesstelle 03, südliches Gleis

Messtelle 04 Nordgleis



	fzg_id_01	fzg_id_02	fzg_id_04	fzg_id_05	fzg_id_06	fzg_id_07	fzg_id_08	fzg_id_09
$L_{W,80}$	β	β	β	β	β	β	β	β
$L_{W,tot}$	measured: 115.4, 27.9	121.1, 18.1	115.2, 26.4	115.7, 23.3	117.6, 22.2	121.2, -	118.0, -	124.1, 25.4
	default calc.: 116.8, 25.9	121.4, 23.6	116.4, 24.5	115.9, 24.9	117.5, 25.6	121.4, 25.2	119.3, 25.0	124.5, 26.2
	user calc.: 116.1, 25.5	121.1, 23.4	115.5, 24.7	114.6, 24.0	116.7, 25.0	120.9, 24.9	118.0, 24.0	124.4, 26.1
$L_{p,tot}$	measured: 85.1, 26.5	92.2, 19.0	86.3, 26.2	85.0, 21.4	87.5, 23.0	91.3, -	87.5, -	95.2, -
	default calc.: 87.0, 27.3	92.0, 24.5	87.0, 25.7	85.2, 26.5	87.1, 27.0	91.1, 26.1	88.8, 26.6	95.3, 26.9
	user calc.: 86.2, 26.8	91.8, 24.1	86.1, 25.8	83.7, 25.4	86.2, 27.3	90.6, 25.7	87.2, 25.6	95.2, 26.8

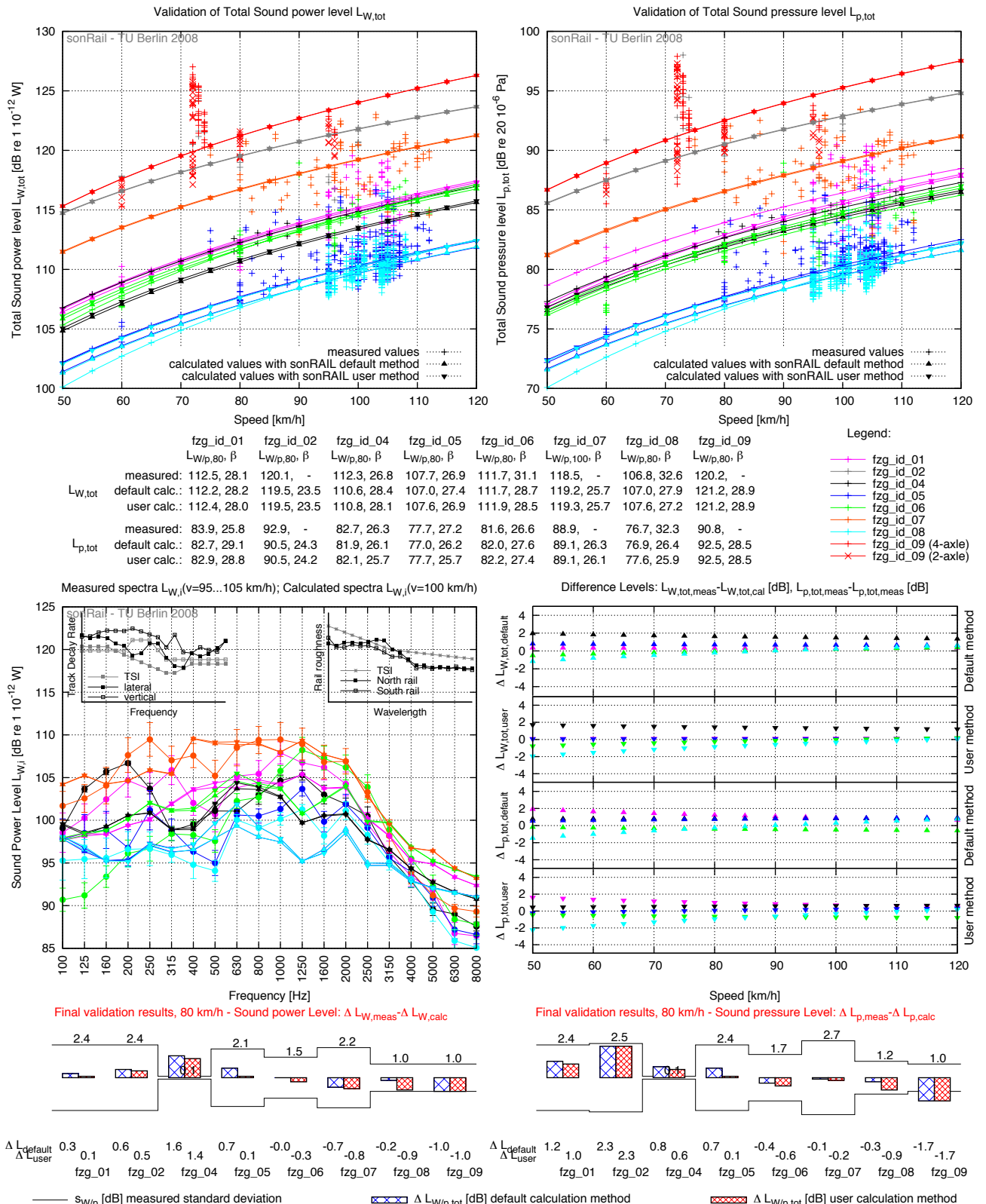


Gesamtgenauigkeit Default-Methode: $\Delta L_W = 0.6$ $\Delta L_P = 0.6$ dB User-Methode: $\Delta L_W = 0.5$ $\Delta L_P = 0.6$ dB

Bewertung der Ergebnisse Das Gleis weist eine sehr schlechte Schienenrauheit bei $\lambda = 5.0 \dots 6.3$ cm auf (vgl. Tabelle 4.1), es werden daher hohe Emissionswerte gemessen und berechnet. Der angegebene Wellenlängenbereich entspricht bei 100 km/h einer Frequenz von 440...550 Hz. Durch Verwendung der real gemessenen Schienenrauheiten in der User-Methode kann das gemessene Pegelmaximum bei 500 Hz in der Berechnung nachgebildet werden.

Abbildung 7.42: Validierung der Basismesstelle 04, nördliches Gleis

Messtelle 04 Südgleis

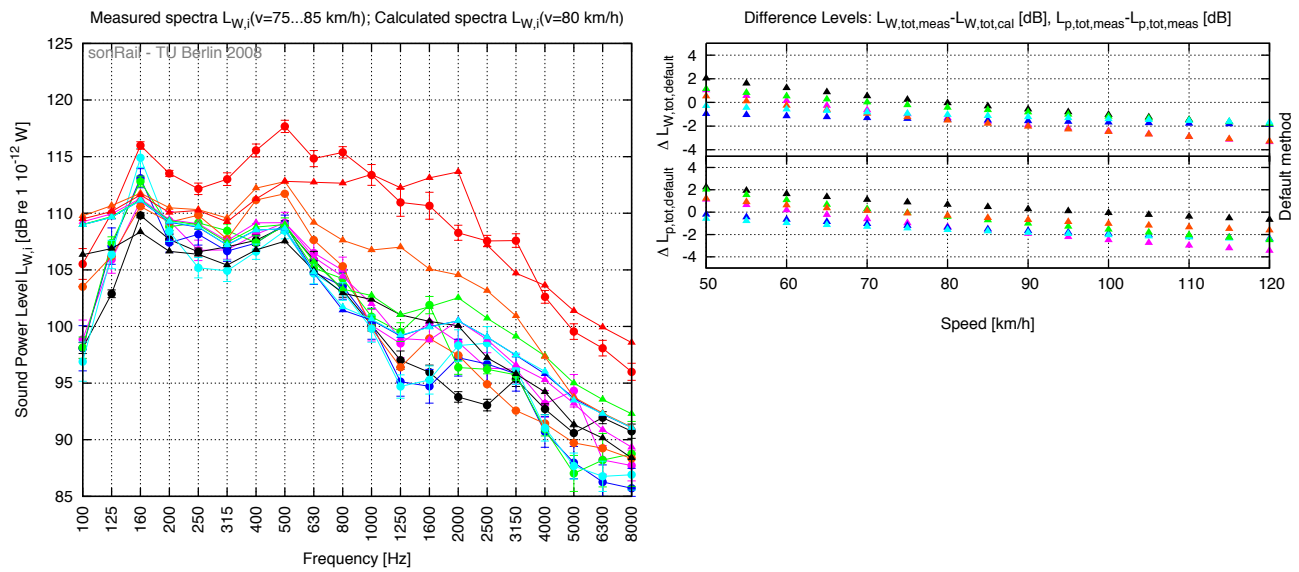
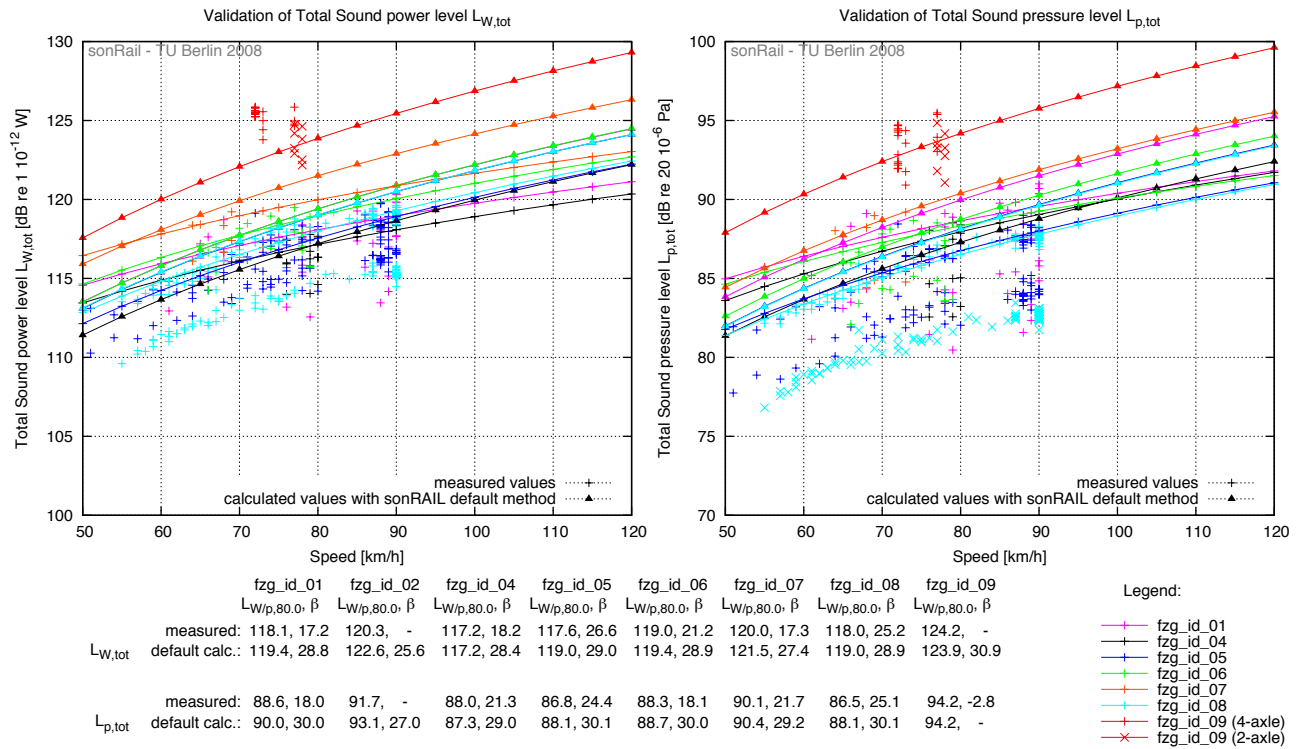


Gesamtgenauigkeit Default-Methode: $\Delta L_W = 0.6 \Delta L_P = 0.9 \text{ dB}$ User-Methode: $\Delta L_W = 0.6 \Delta L_P = 0.9 \text{ dB}$

Bewertung der Ergebnisse Die Schalldruckpegel der angetriebenen Fahrzeuge der Kategorien 01 und 02 werden um bis 1.5 dB zu niedrig berechnet, obwohl die Abweichungen der Schalleistungsspektren deutlich geringer ausfallen. Dies kann auf ausgeprägte Sekundärquellen an den Fahrzeugen hindeuten, deren Einfluss bei der Berechnung der Schalldruckpegel durch die verwendeten Ausbreitungsdämpfungen mit einem Fehler berechnet werden.

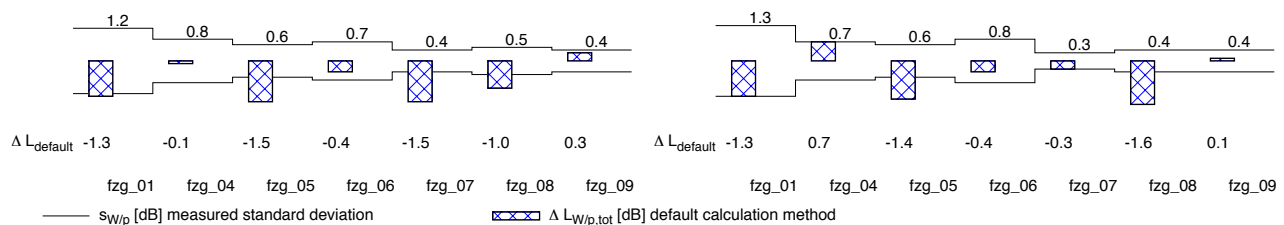
Abbildung 7.43: Validierung der Basismesstelle 04, südliches Gleis

Messstelle 05 Nordgleis



Final validation results, 80.0 km/h - Sound power Level: $\Delta L_{W,meas} - \Delta L_{W,calc}$

Final validation results, 80.0 km/h - Sound pressure Level: $\Delta L_{p,meas} - \Delta L_{p,calc}$

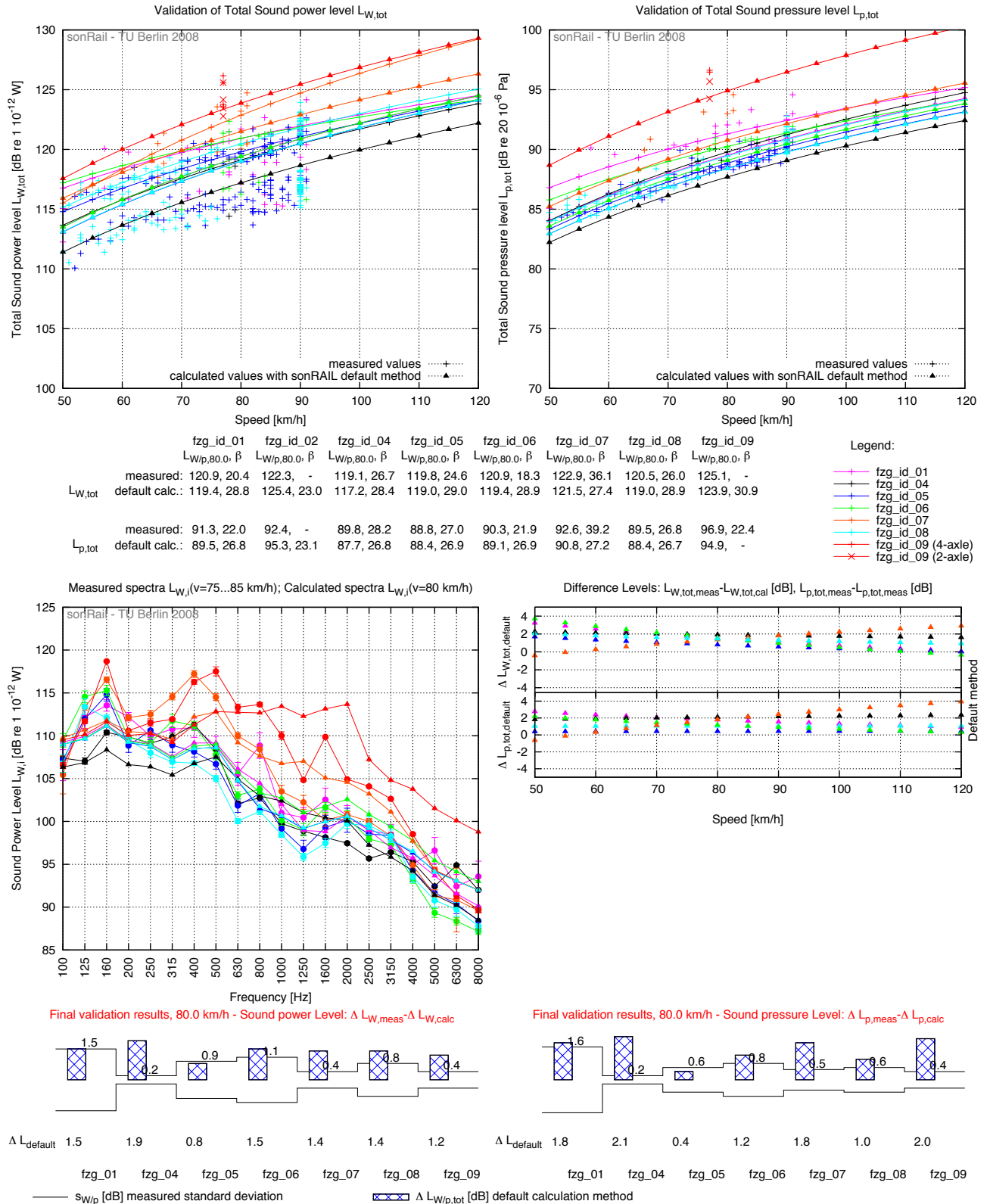


Gesamtgenauigkeit Default-Methode: $\Delta L_W = 0.9$ $\Delta L_P = 0.8$ dB

Bewertung der Ergebnisse Es werden die Werte der Herzstückseite validiert, d.h. die nördlichen Mikrofonsignale. Die Berechnungen werden nur mit der Default-Methode durchgeführt, da für die User-Methode keine Schienenrauheiten angegeben werden können. Die berechneten Emissionswerte liegen um bis 1.5 dB über den gemessenen Werten. Dies ist dadurch begründet, dass im Modell genau ein Weichentyp mit Holzschwellen definiert ist. Die Default-Werte für diesen Typ sind so gewählt worden, dass ein minimaler Fehler zwischen den Messquerschnitten der Weichenmessstelle 05 entsteht. Da die Emissionswerte im südlichen Weichenbereich für alle Fahrzeugkategorien um bis 2 dB über den Werten der nördlichen Weiche liegen, ergibt sich der Fehler in der Emissionsberechnung. Die Gesamtgenauigkeit liegt jedoch unter 1 dB.

Abbildung 7.44: Validierung der Weichenmessstelle 05, nördliches Gleis

Messstelle 05 Südgleis

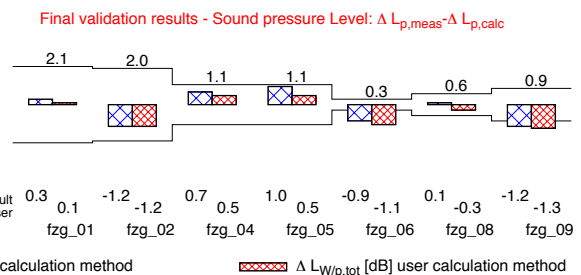
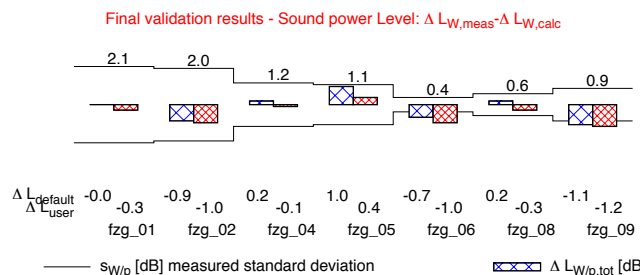
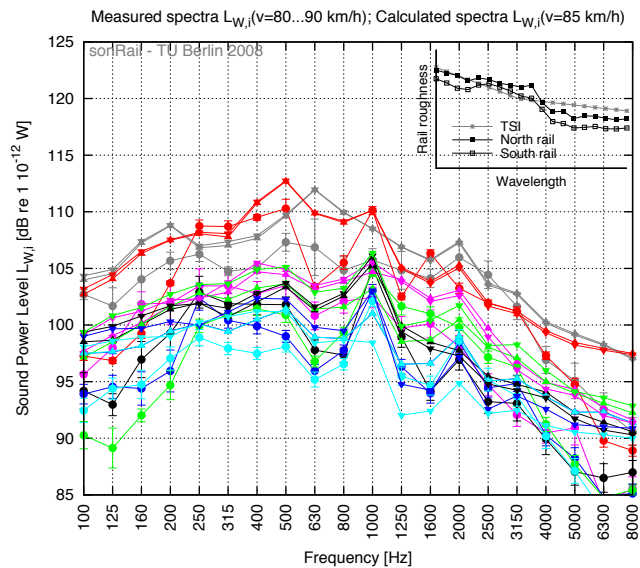
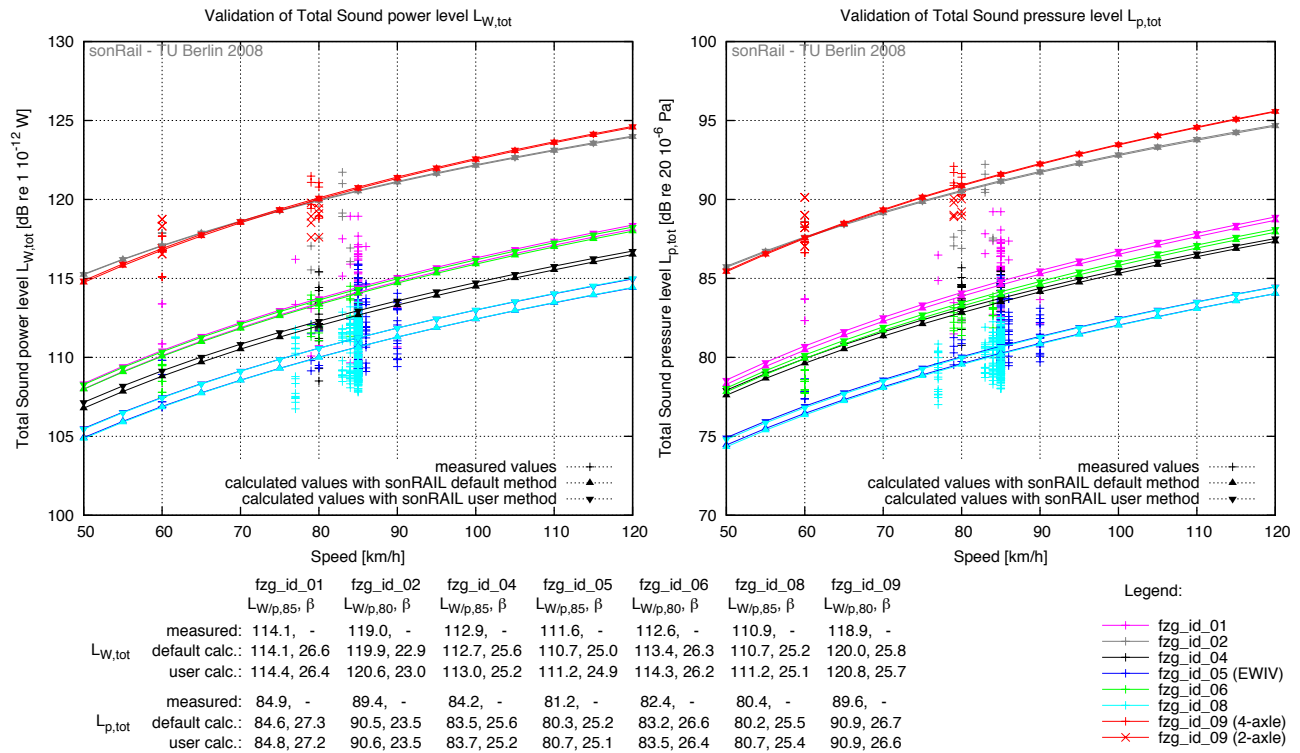


Gesamtgenauigkeit Default-Methode: $\Delta L_W = 1.6 \Delta L_P = 1.4 \text{ dB}$

Bewertung der Ergebnisse Die berechnete Emissionswerte liegen um etwa 1,5 dB unter den gemessenen Werten (vgl. Validierung nördliches Gleis). Die Messstelle befindet sich hinter dem Bahnhof Palezieux-Gare, so dass von einer erhöhten Sekundärleistung der Fahrzeuge im Anfahrvorgang ausgegangen werden kann. Daher streuen die Emissionspegel einer Zugvorbeifahrt über einen grossen Geschwindigkeitsbereich. Diese Geschwindigkeitsabhängigkeit kann durch die Berechnung nachgebildet werden. Die Gesamtgenauigkeit liegt bei 1,5 dB.

Abbildung 7.45: Validierung der Weichenmessstelle 05, südliches Gleis

Messstelle 06 Nordgleis

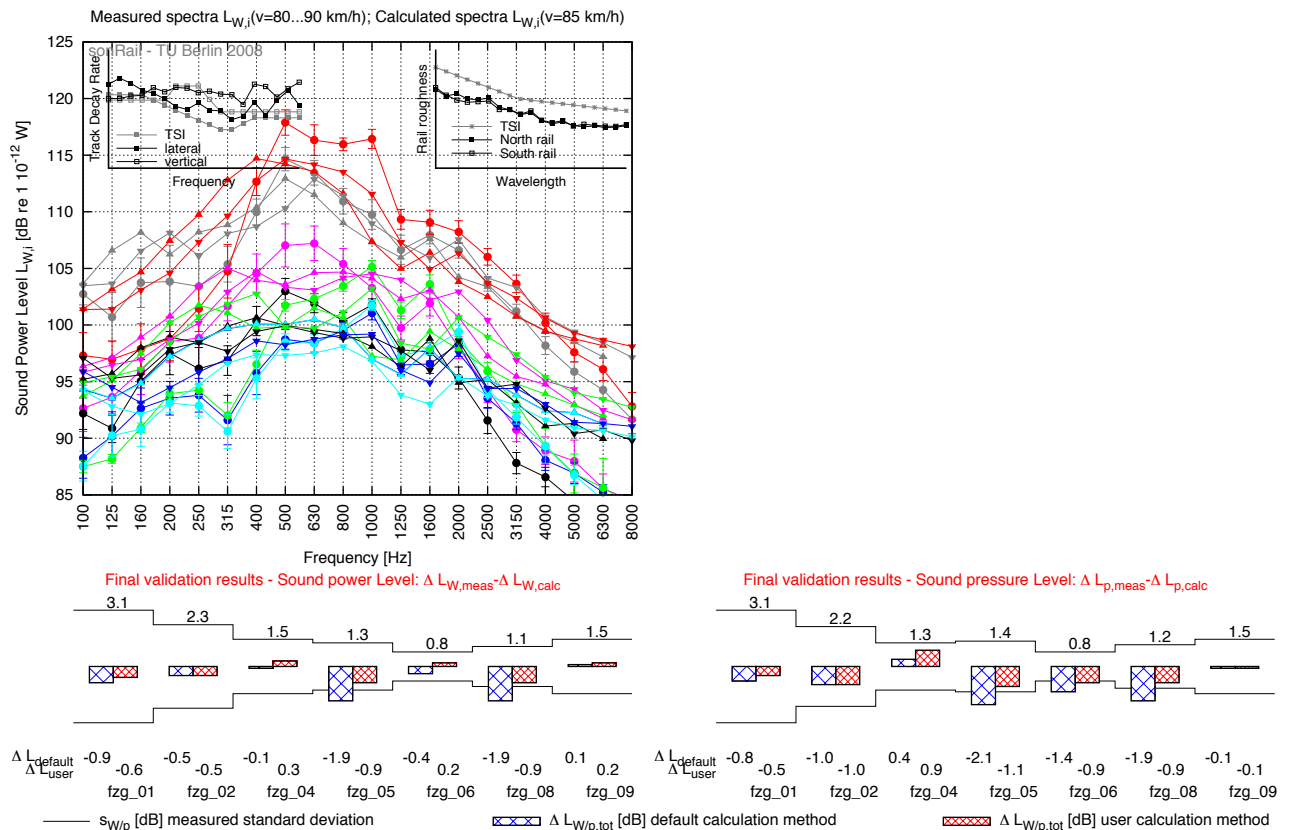
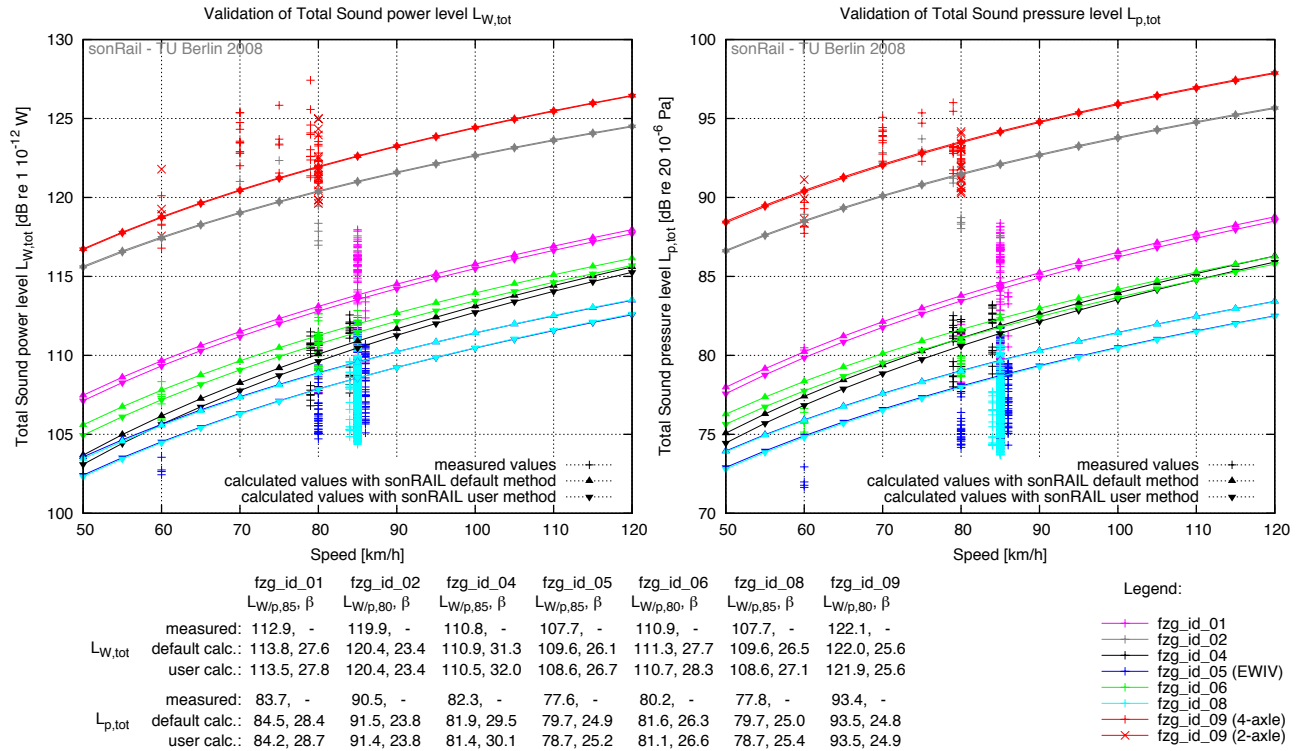


Gesamtgenauigkeit Default-Methode: $\Delta L_W = 0.6 \Delta L_p = 0.8 \text{ dB}$ User-Methode: $\Delta L_W = 0.6 \Delta L_p = 0.7 \text{ dB}$

Bewertung der Ergebnisse Die gemessenen Emissionspegel können mit beiden Berechnungsmethoden mit hoher Genauigkeit berechnet werden. Auf Grund der geringen Geschwindigkeitsstreuung der Messergebnisse, werden für die gemessenen Emissionspegel keine Abhängigkeiten von der Geschwindigkeit angegeben.

Abbildung 7.46: Validierung der Basismessstelle 06, nördliches Gleis

Messtelle 06 Südgleis

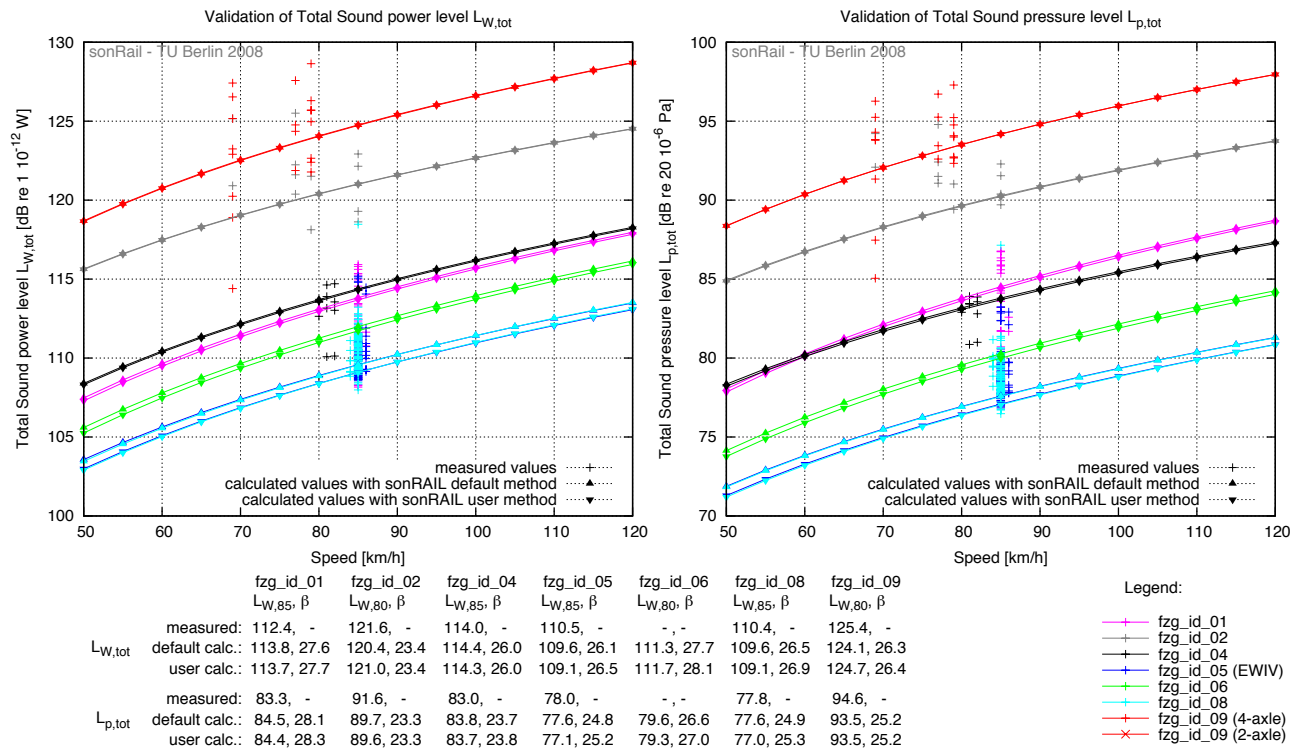
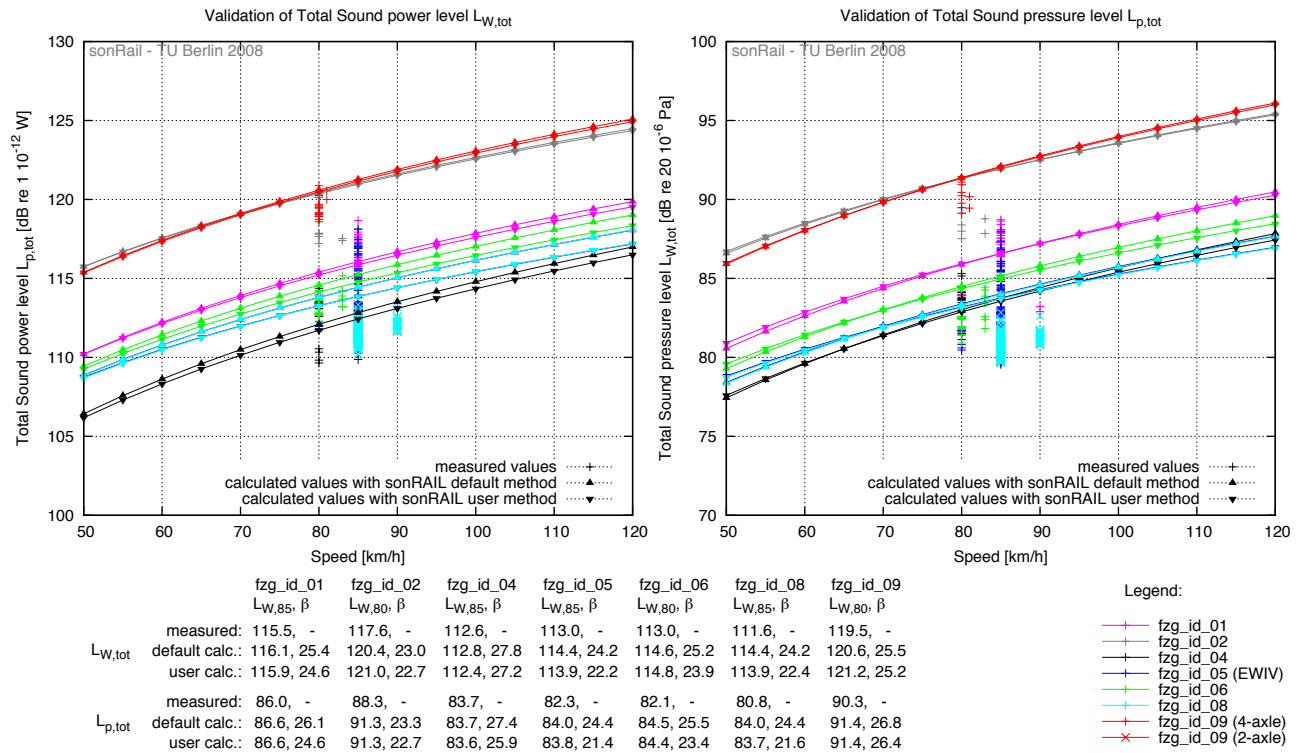


Gesamtgenauigkeit Default-Methode: $\Delta L_W = 0.8 \Delta L_p = 1.1 \text{ dB}$ User-Methode: $\Delta L_W = 0.5 \Delta L_p = 0.8 \text{ dB}$

Bewertung der Ergebnisse Die Emissionspegel werden mit hoher Genauigkeit berechnet. Auf Grund der geringen Geschwindigkeitsstreuung der Messergebnisse, werden für die gemessenen Emissionspegel keine Abhängigkeiten von der Geschwindigkeit angegeben. Entsprechend der sehr niedrigen Schienenrauheit, werden bei der default-Methode für die schiebgebremsten Fahrzeuge die Emissionspegel um bis zu 2 dB zu hoch berechnet, bei der User-Methode beträgt die Differenz 1 dB.

Abbildung 7.47: Validierung der Basismesstelle 06, südliches Gleis

Mesststelle 07 Nord- und Südgleis



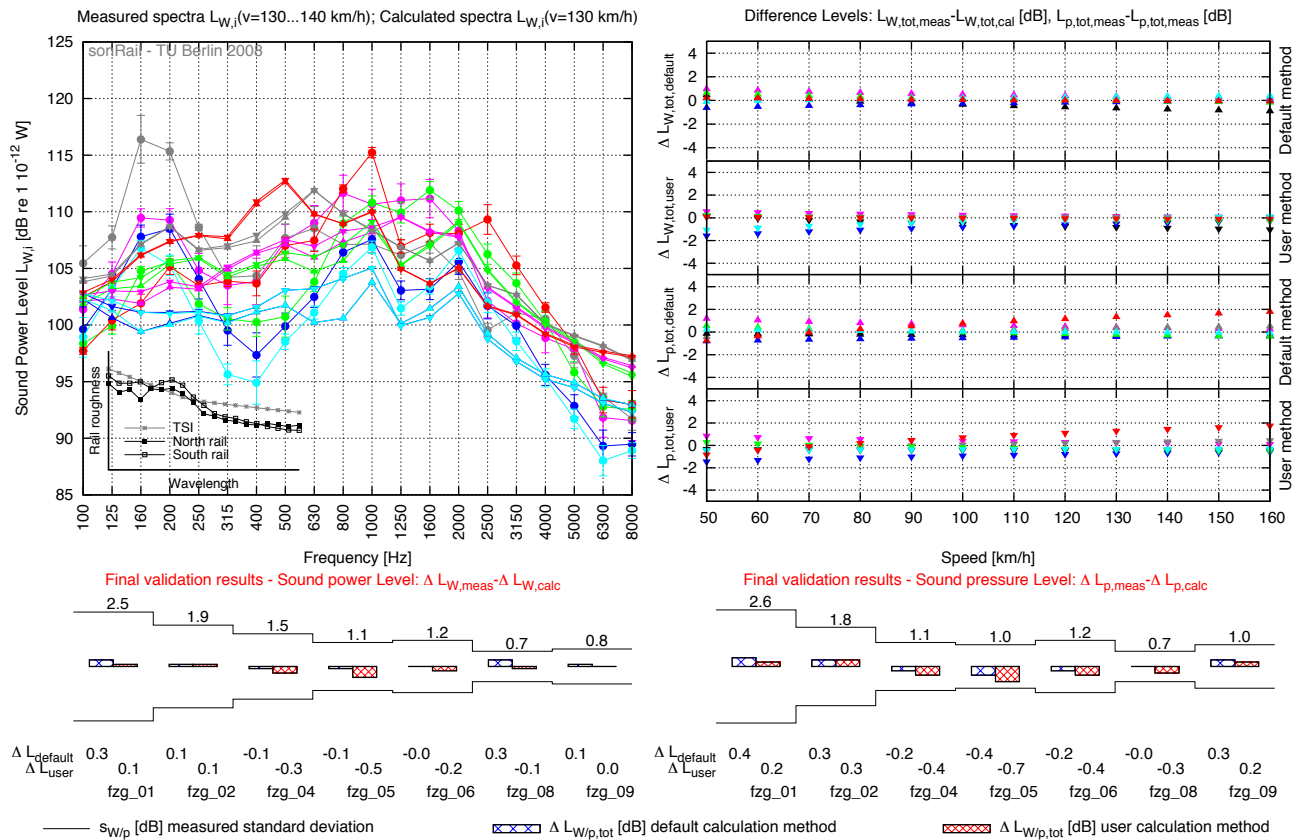
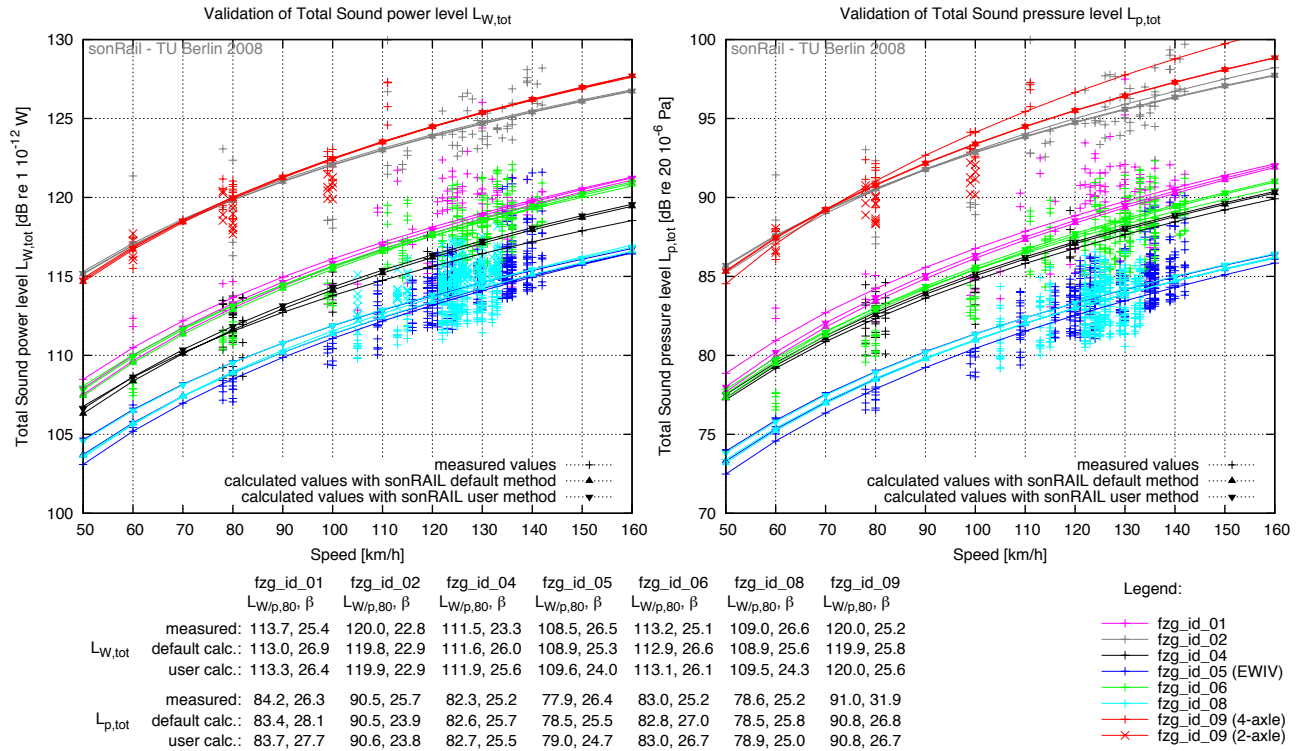
Gesamtgenauigkeit Nordgleis Default-Methode: $\Delta L_W = 0.9$ $\Delta L_p = 0.9$ dB User-Methode: $\Delta L_W = 1.3$ $\Delta L_p = 1.3$ dB

Gesamtgenauigkeit Südgleis Default-Methode: $\Delta L_W = 1.5$ $\Delta L_p = 1.8$ dB User-Methode: $\Delta L_W = 1.2$ $\Delta L_p = 1.5$ dB

Bewertung der Ergebnisse Von dieser Messstellen liegen nur unvollständige Messdaten vor, so dass keine Daten zur Ausbreitungsdämpfung bestimmt werden konnten. Somit wird diese Messstelle von der Berechnung der Gesamtgenauigkeit des E-Modells ausgenommen. Die Validierung erfolgt mit den Ausbreitungsdämpfungen der Messstelle 06. Daraus können Fehler in der Berechnung der Schalldruckpegel resultieren. Bei den Messergebnissen des nördlichen Gleises fallen die deutlich niedrigeren Emissionspegel IC2000 Fahrzeuge im Vergleich zu den IC Zügen auf.

Abbildung 7.48: Validierung der Basismessstelle 07, nördliches Gleis (obere Abbildungen) und südliches Gleis (untere Abbildungen)

Messstelle 08 Nordgleis

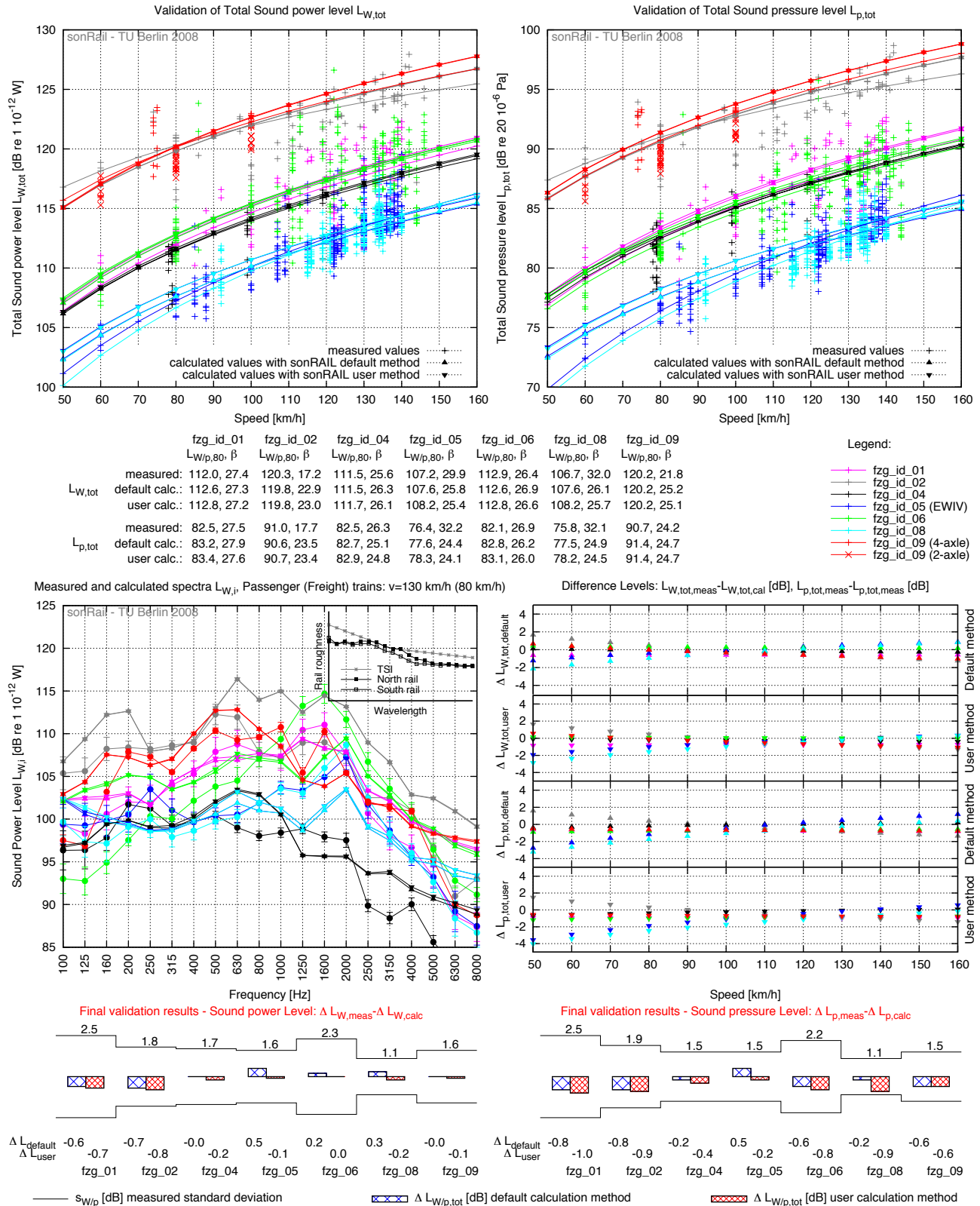


Gesamtgenauigkeit Default-Methode: $\Delta L_W = 0.1 \Delta L_P = 0.3 \text{ dB}$ User-Methode: $\Delta L_W = 0.2 \Delta L_P = 0.4 \text{ dB}$

Bewertung der Ergebnisse Die Messwerte können mit hoher Genauigkeit nachgerechnet werden. Die Messwerte zeigen für die nördliche und südliche Gleisseite deutliche Unterschiede, begründet durch die stark abweichenden Schienenrauheiten. Für beide Rechenmethode wurde die entsprechende Schienenrauheit verwendet, so dass die unterschiedlichen Messpegel nachgerechnet werden können.

Abbildung 7.49: Validierung der Basismessstelle 08, nördliches Gleis

Messstelle 08 Südgleis

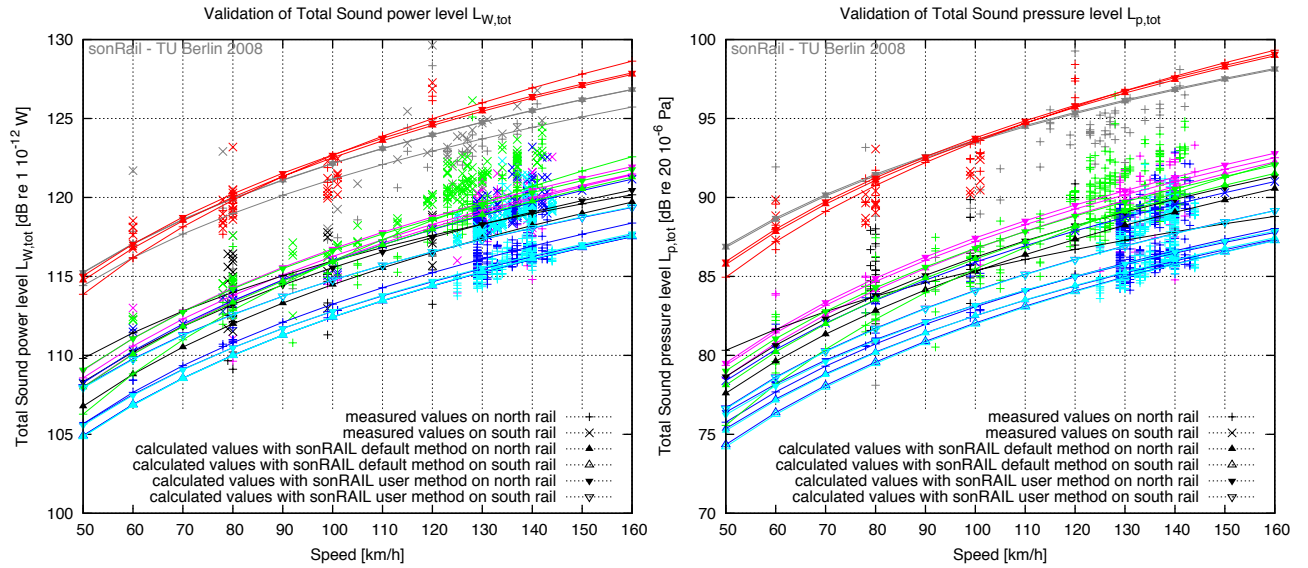


Gesamtgenauigkeit Default-Methode: $\Delta L_W = 0.3$ $\Delta L_P = 0.5$ dB User-Methode: $\Delta L_W = 0.3$ $\Delta L_P = 0.7$ dB

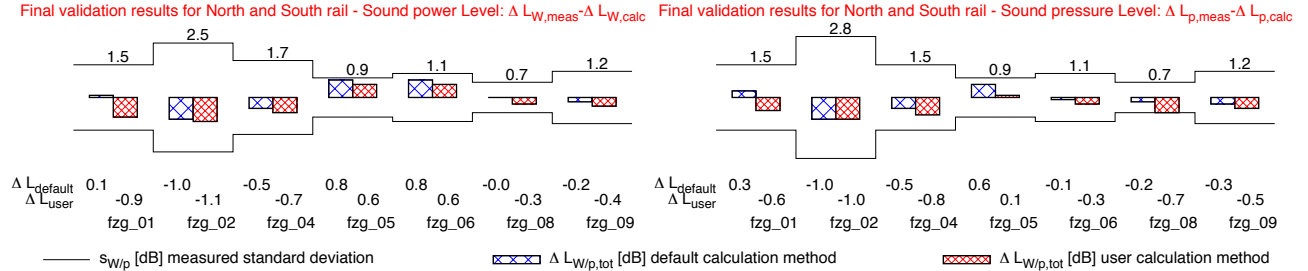
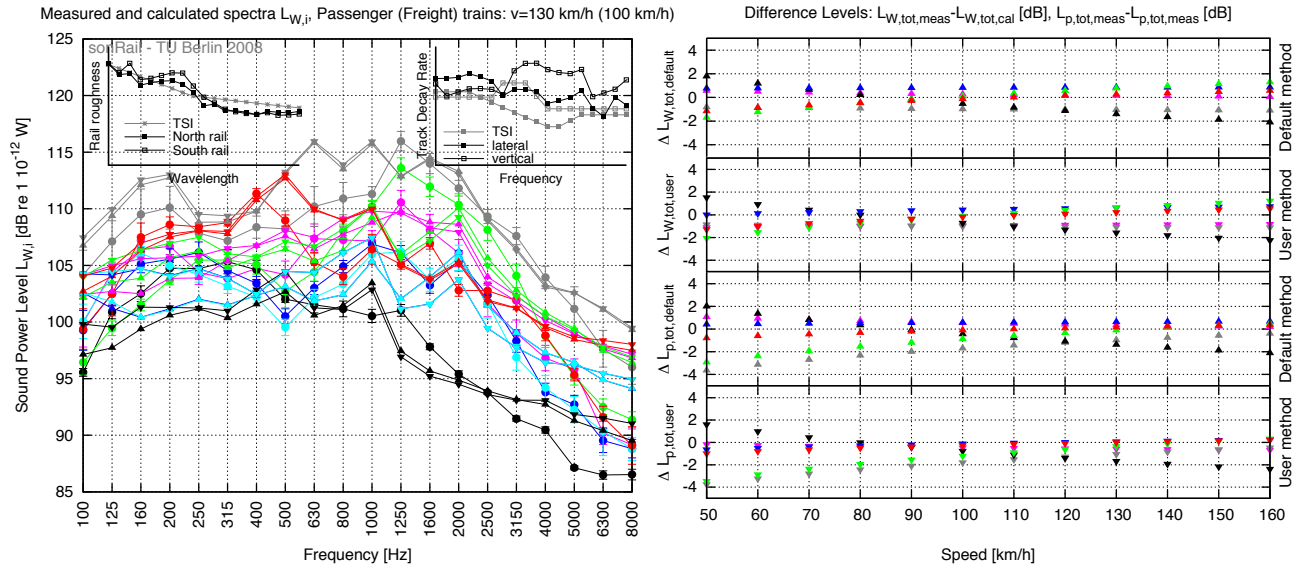
Bewertung der Ergebnisse Die Messwerte können mit hoher Genauigkeit nachgerechnet werden.

Abbildung 7.50: Validierung der Basismessstelle 08, südliches Gleis

Messtelle 09 Nordgleis



	fzg_id_01	fzg_id_02	fzg_id_04	fzg_id_05	fzg_id_06	fzg_id_08	fzg_id_09
$L_{w,p,130, \beta}$	measured: 119.2, 25.6	123.7, 22.4	114.0, 17.9	116.1, 25.1	119.7, 32.3	115.3, -	119.6, 29.2
$L_{w,tot}$	default calc.: 119.0, 26.6	124.8, 22.9	114.5, 25.6	115.3, 25.0	118.9, 26.3	115.3, 25.2	120.0, 25.8
	user calc.: 120.1, 25.0	124.8, 22.9	115.6, 24.1	115.5, 23.7	119.0, 25.8	115.5, 24.0	120.1, 25.6
$L_{p,tot}$	measured: 90.2, 26.0	95.1, 28.7	85.4, 16.8	85.8, 24.3	89.2, 32.9	85.1, -	90.8, 28.5
	default calc.: 89.8, 26.1	96.1, 22.3	85.8, 24.9	85.2, 23.8	89.3, 26.1	85.3, 24.2	91.1, 26.2
	user calc.: 90.1, 25.5	96.2, 22.2	86.1, 24.7	85.8, 22.5	89.6, 25.4	85.8, 23.0	91.3, 26.0

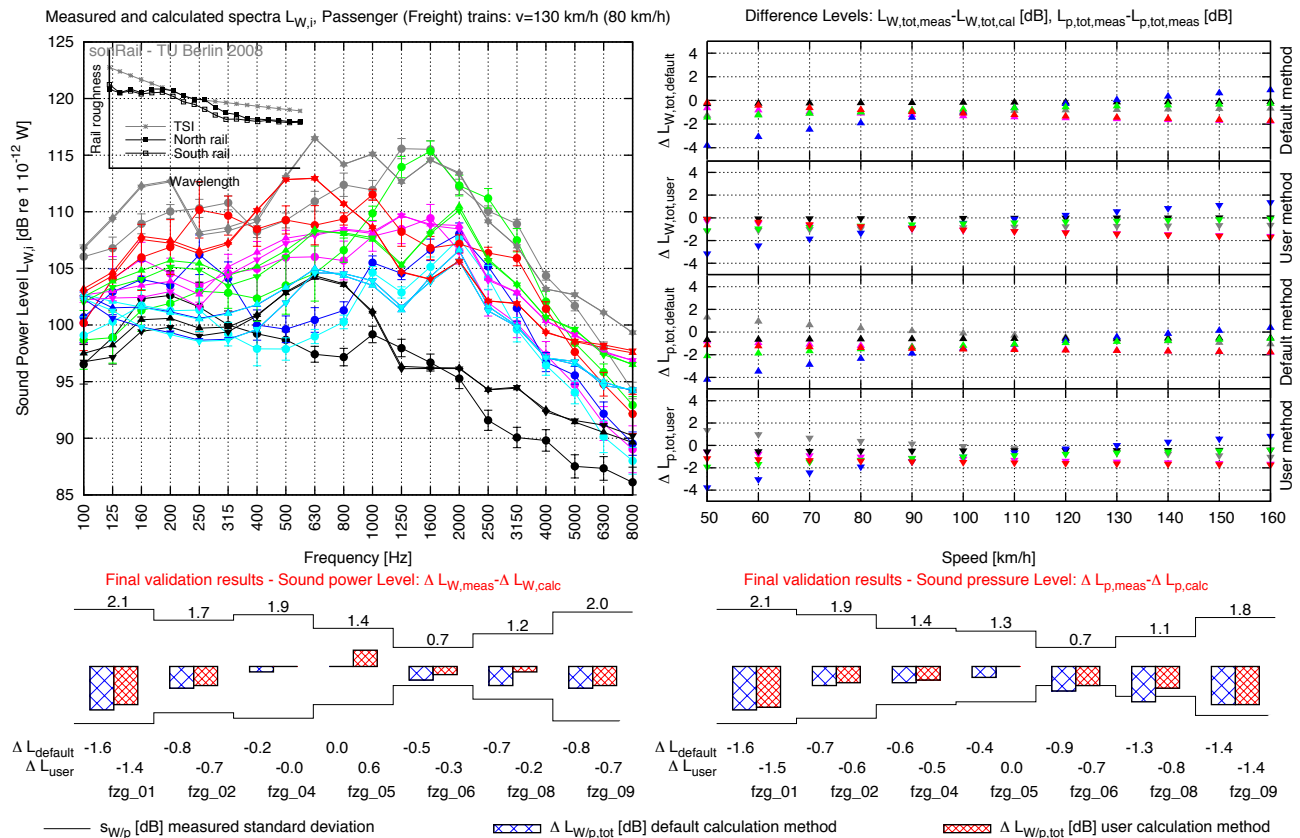
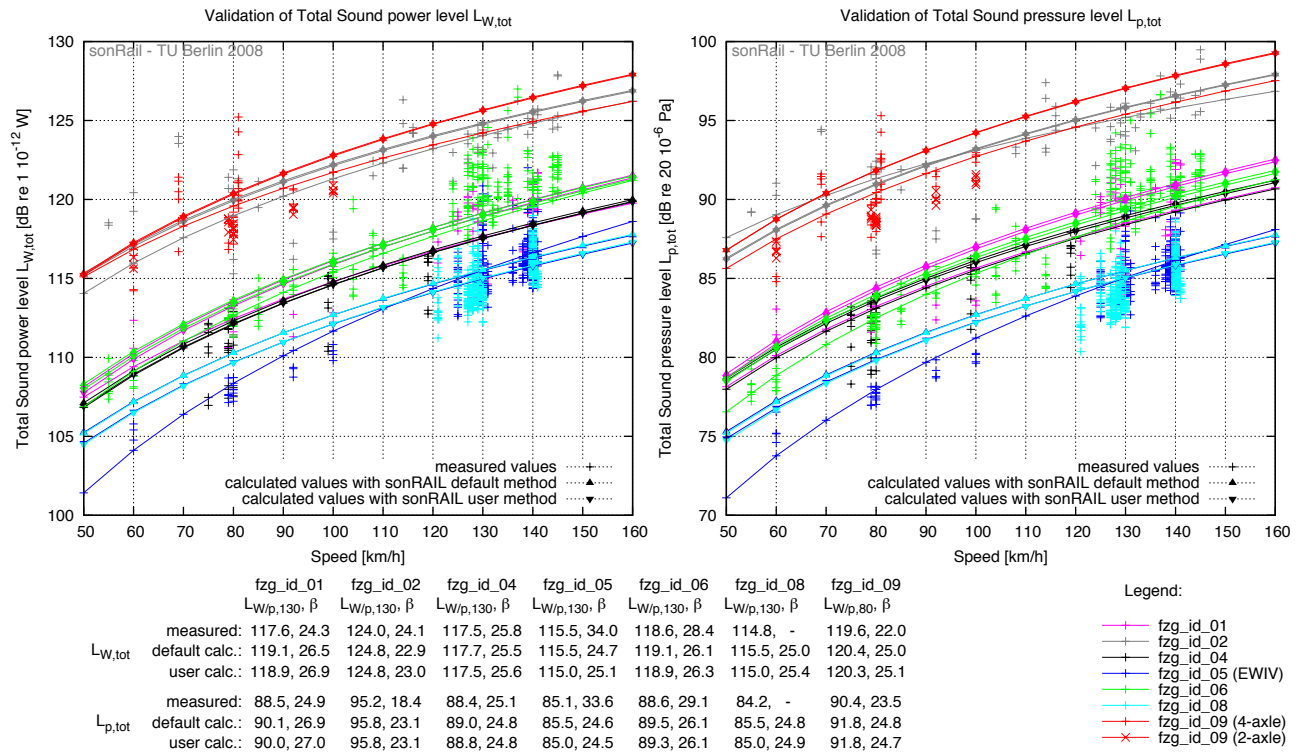


Gesamtgenauigkeit Default-Methode: $\Delta L_W = 0.5$, $\Delta L_P = 0.4$ dB User-Methode: $\Delta L_W = 0.7$ $\Delta L_P = 0.6$ dB

Bewertung der Ergebnisse Die Messwerte können mit hoher Genauigkeit nachgerechnet werden. Die Messwerte zeigen für die nördliche und südliche Gleisseite deutliche Unterschiede, begründet durch die stark abweichenden Schienenrauheiten. Die Emissionspegel unterscheiden sich um bis zu 4 dB pro Fahrzeugseite. Aus diesem Grund werden für Messung und Rechnung die Emissionswerte getrennt nach nördlicher und südlicher Schiene dargestellt. Für beide Rechenmethoden wurde die entsprechende Schienenrauheit verwendet, so dass die unterschiedlichen Messpegel nachgerechnet werden können. Auf der "glatteren" nördlichen Schiene werden die Pegel mit beiden Methoden sehr genau bestimmt (die Kennwerte der Tabelle sind für das nördliche Gleis angegeben), die Messpegel der südlichen Schiene werden nur bei Verwendung der real gemessenen Schienenrauheiten genau berechnet.

Abbildung 7.51: Validierung der Basismesstelle 09, nördliches Gleis

Messtelle 09 Südgleis

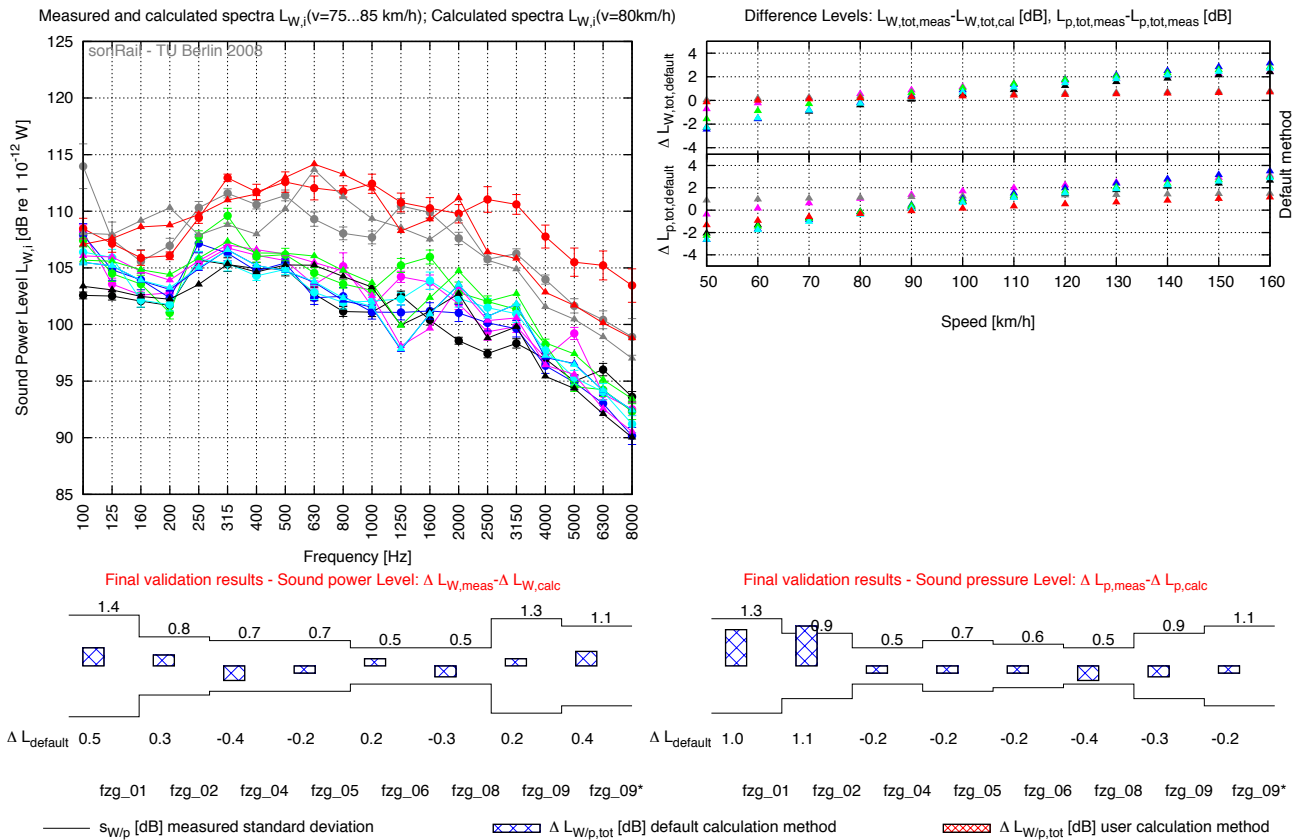
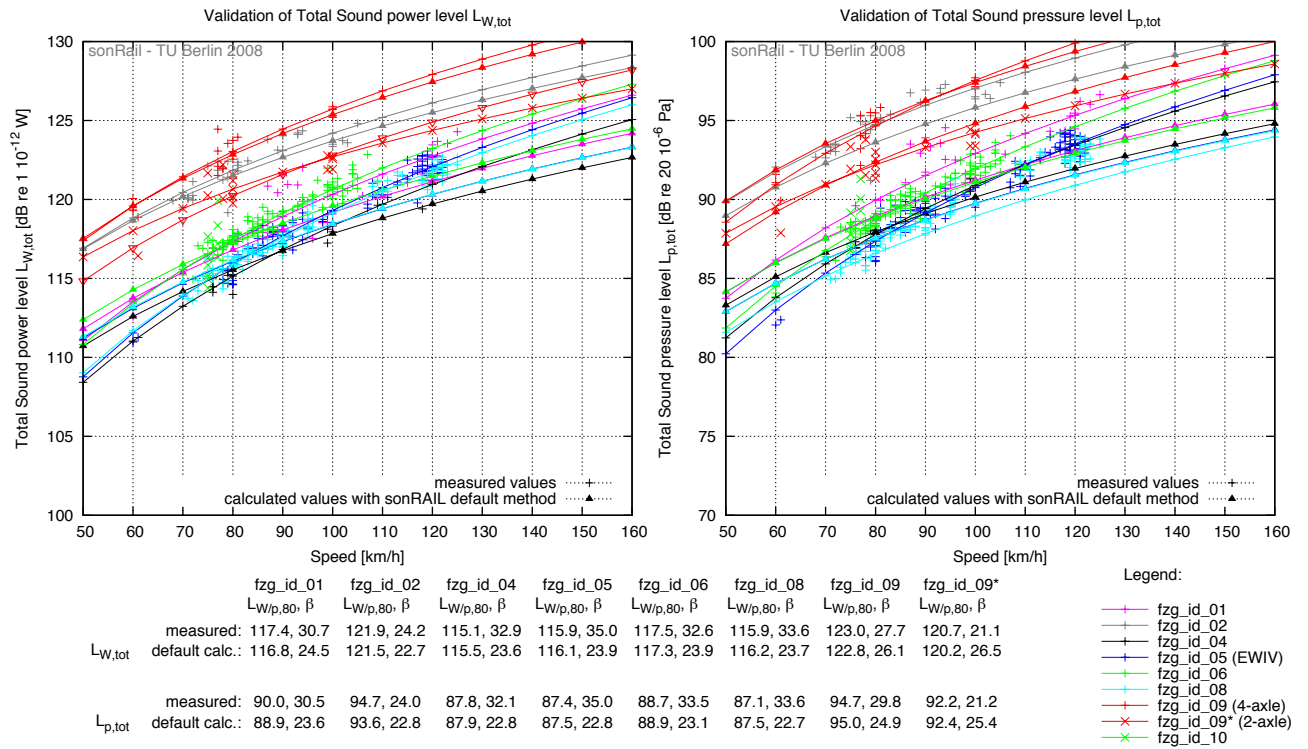


Gesamtgenauigkeit Default-Methode: $\Delta L_W = 0.7$ $\Delta L_p = 1.0$ dB User-Methode: $\Delta L_W = 0.6$ $\Delta L_p = 0.8$ dB

Bewertung der Ergebnisse Die Emissionspegel der nicht angetriebenen Fahrzeuge werden mit hoher Genauigkeit berechnet. Im unteren Geschwindigkeitsbereich werden die Emissionspegel der IC und IC2000 Fahrzeuge zu hoch berechnet, bei diesen Geschwindigkeiten wurden jedoch nur wenige Vorbeifahrten gemessen. Die Emissionspegel der Triebfahrzeuge der Kategorie 01 werden bei hohen Geschwindigkeiten um bis 1 dB zu hoch berechnet.

Abbildung 7.52: Validierung der Basismesstelle 09, südliches Gleis

Messtelle 11 Südgleis

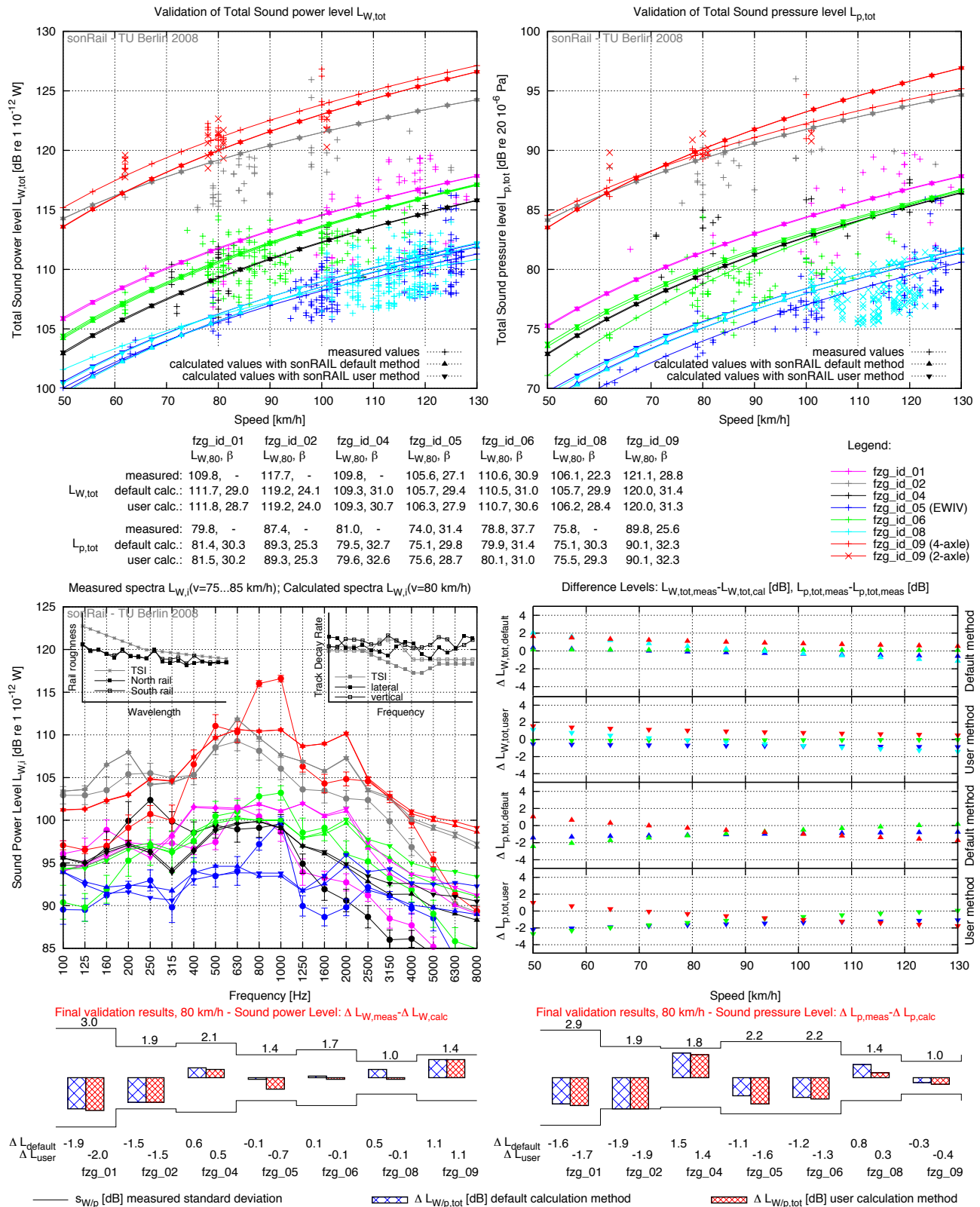


Gesamtgenauigkeit Default-Methode: $\Delta L_W = 0.3 \Delta L_P = 0.5 \text{ dB}$

Bewertung der Ergebnisse Die Rechnung erfolgt ausschliesslich mit default-Methode, da keine gemessenen Rauheitsdaten vorliegen. Nach Abbildung 6.3 werden bei der Berechnung neben dem Abschnitt der Störstelle auch die angrenzenden Gleisabschnitte gemäss der Fahrzeuglänge berücksichtigt. Charakteristisch für die Emission an Störstellen ist die breitbandige Abstrahlung im gesamten Frequenzbereich, insbesondere zu tiefen Frequenzen hin. Dies wird durch die Verwendung der äquivalenten Rauheiten berücksichtigt. Bei den Güterwagen der Kategorie 09 wird unterschieden nach 2- und 4-Achser, da insbesondere an Störstellen die Achszahl einen entscheidenden Einfluss auf die Schallemission ausübt. Die jeweiligen Emissionspegel der Güterwagen werden mit hoher Genauigkeit nachgerechnet.

Abbildung 7.53: Validierung der Weichenmesstelle 11, südliches Gleis

Messstelle 12 Nordgleis

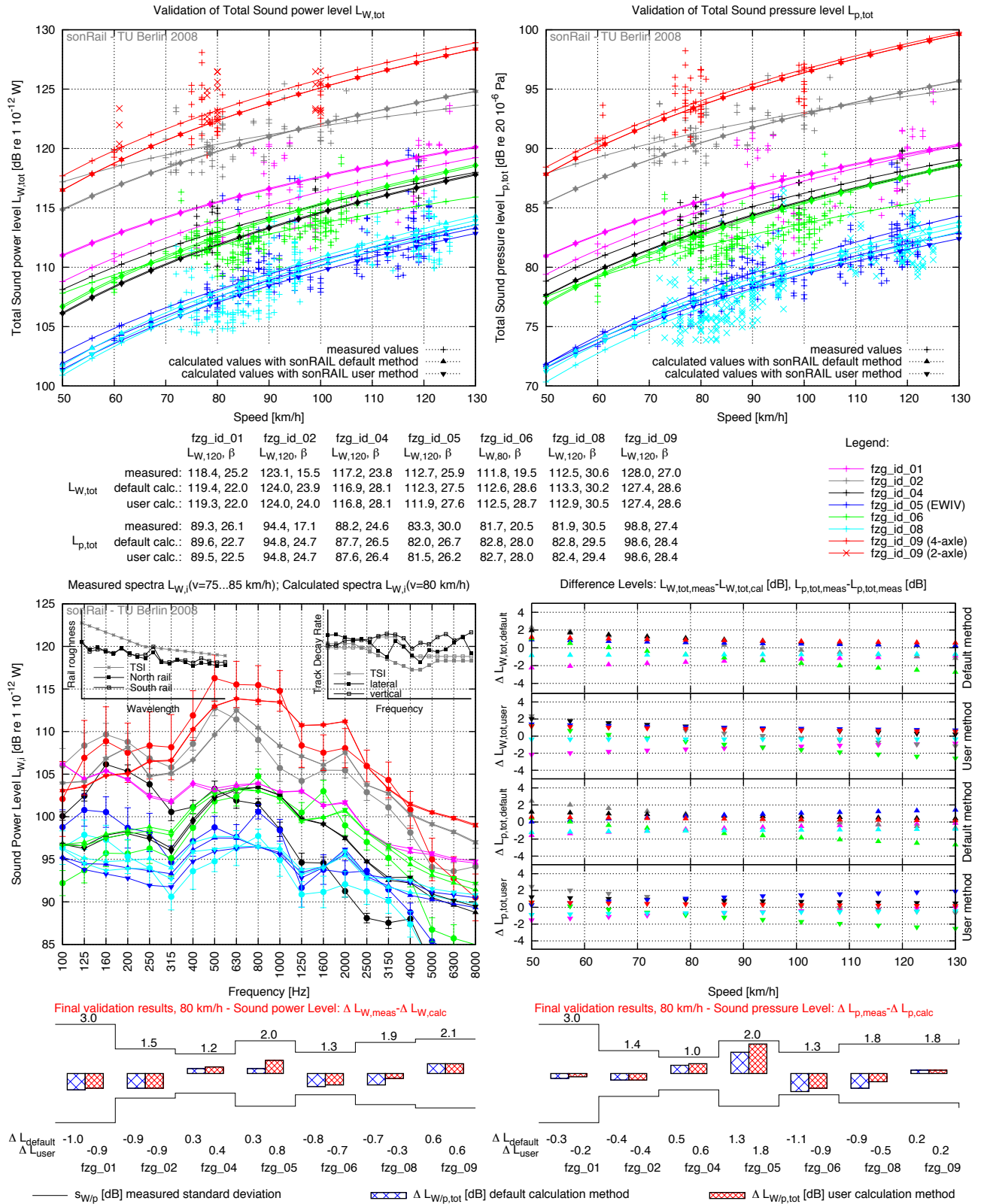


Gesamtgenauigkeit Default-Methode: $\Delta L_W = 0.8$ $\Delta L_p = 1.2$ dB User-Methode: $\Delta L_W = 0.9$ $\Delta L_p = 1.2$ dB

Bewertung der Ergebnisse Bei den angetriebenen Fahrzeugen werden auf Grund der grossen Streuungen der Emissionspegel keine Abhängigkeiten von der Geschwindigkeit angegeben.

Abbildung 7.54: Validierung der Basismessstelle 12, nördliches Gleis

Messtelle 12 Südgleis

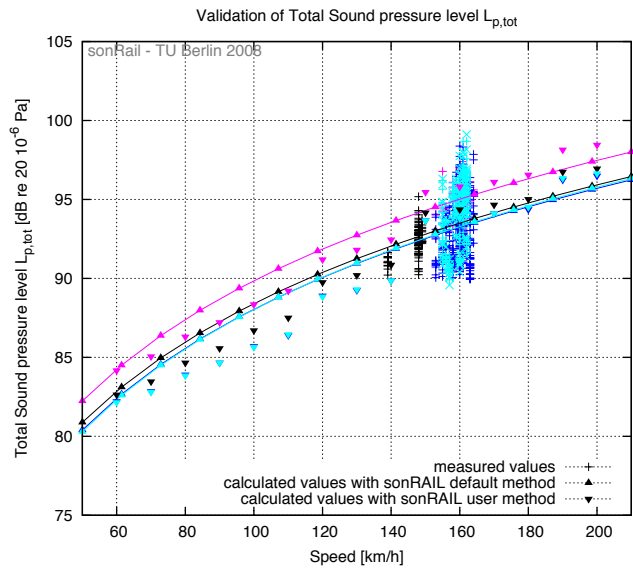
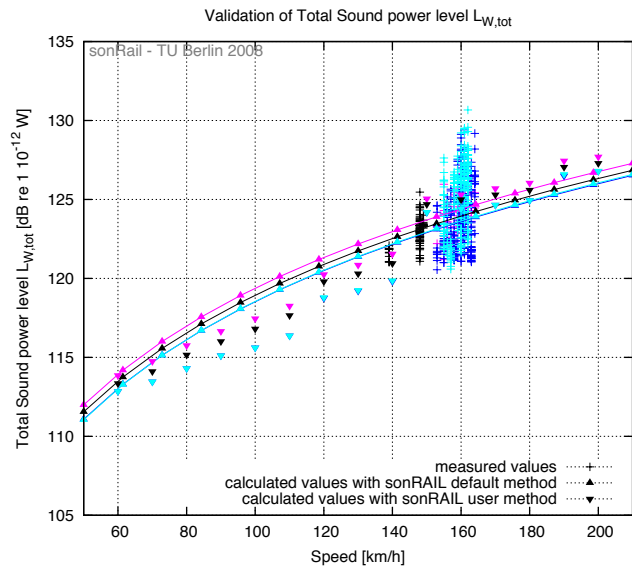


Gesamtgenauigkeit Default-Methode: $\Delta L_W = 0.7 \Delta L_P = 0.7 \text{ dB}$ User-Methode: $\Delta L_W = 0.7 \Delta L_P = 0.7 \text{ dB}$

Bewertung der Ergebnisse Die Messwerte der Fahrzeugkategorie 01 weisen erhebliche Streuungen auf, was auf die Lage der Messstelle zurückgeführt werden kann. Im Bereich vor der Messstelle befand sich eine Langsamfahrstelle, so dass die Fahrzeuge im Bereich der Messstelle teilweise beschleunigten. Daher ist bei einer Vielzahl von Messfahrten eine erhöhte Sekundärleistung gemessen worden. Bei der Kategorie 06 kann der Geschwindigkeitsverlauf bei hohen Geschwindigkeiten nicht korrekt wiedergegeben werden und wird als zu hoch berechnet.

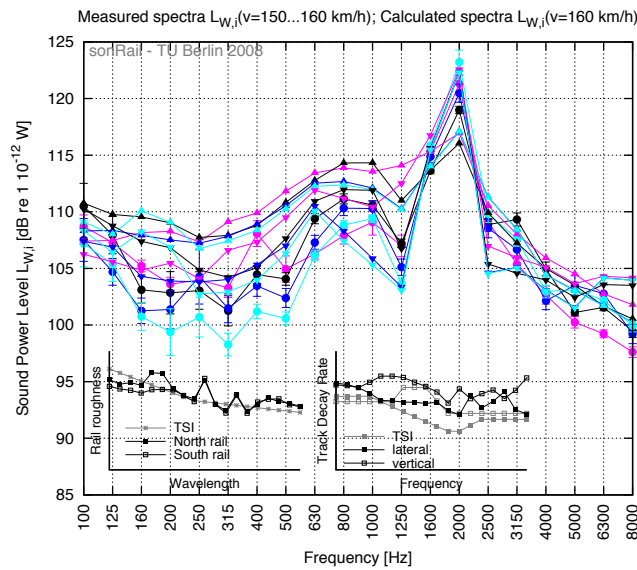
Abbildung 7.55: Validierung der Basismessstelle 12, südliches Gleis

Messstelle 13 Nordgleis



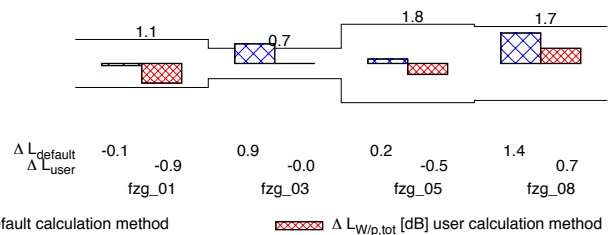
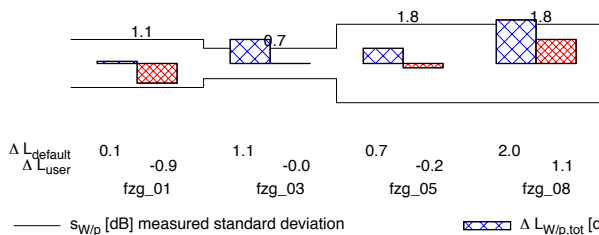
	fgz_id_01	fgz_id_03	fgz_id_05	fgz_id_08
	$L_{W,160}$	$L_{W,160}$	$L_{W,160}$	$L_{W,160}$
$L_{W,tot}$	measured: 124.4	124.9	124.1	125.5
	default calc.: 124.3	123.8	123.5	123.5
	user calc.: 125.3	125.0	124.4	124.4
$L_{p,tot}$	measured: 94.8	94.3	93.3	94.5
	default calc.: 95.0	93.5	93.2	93.3
	user calc.: 95.8	94.4	93.8	93.8

Legend:
 fgz_id_01 (pink line with triangles)
 fgz_id_03 (black line with triangles)
 fgz_id_05 (blue line with triangles)
 fgz_id_08 (cyan line with triangles)



Final validation results, 160 km/h - Sound power Level: $\Delta L_{W,meas} - \Delta L_{W,calc}$

Final validation results, 160 km/h - Sound pressure Level: $\Delta L_{p,meas} - \Delta L_{p,calc}$

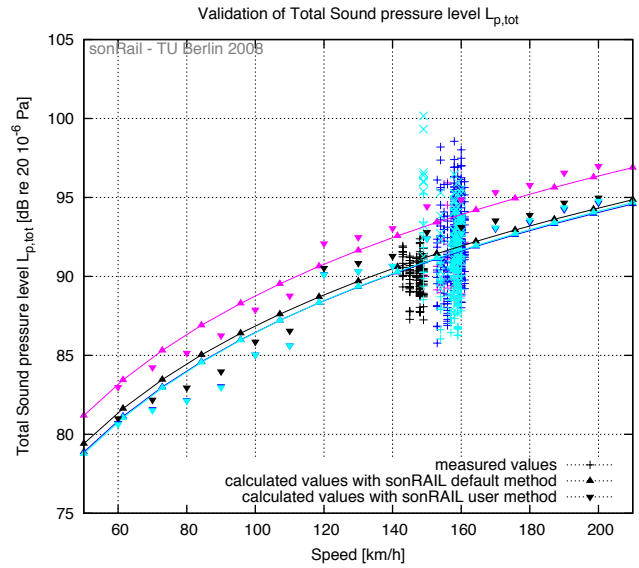
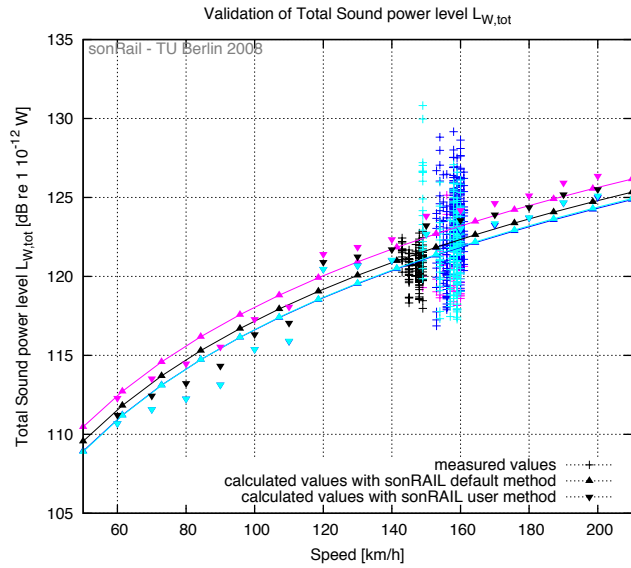


Gesamtgenauigkeit Default-Methode: $\Delta L_W = 1.0 \Delta L_P = 0.7 \text{ dB}$ User-Methode: $\Delta L_W = 0.6 \Delta L_P = 0.5 \text{ dB}$

Bewertung der Ergebnisse Die Emissionspegel der Fahrzeuge sind gekennzeichnet durch die schlechten Schienenrauheiten an dieser Messstelle. Bei der Berechnung der Emissionspegel wird entsprechend Abschnitt 6.2.3.7 vorgegangen. Daher wird das Pegelmaximum bei 2000 Hz mit der User-Methode genau nachgebildet, die Default-Methode berechnet die Pegel um 1 bis 2 dB zu niedrig. Auf die Angabe von Geschwindigkeitsverläufen wird bei der User-Methode verzichtet, da der Rauheitspeak bei 2.5 cm das Emissionsverhalten in der Art dominiert, dass die Emissionspegel sehr stark von der verwendeten Transferfunktion abhängen. Durch die Frequenzverschiebung des Peaks bei zunehmender Geschwindigkeit, dominieren fast ausschliesslich diese Frequenzbereiche der Transferfunktionen das Geräusch. Der Verlauf der Emissionspegel spiegelt somit den Frequenzverlauf der verwendeten Transferfunktion wieder.

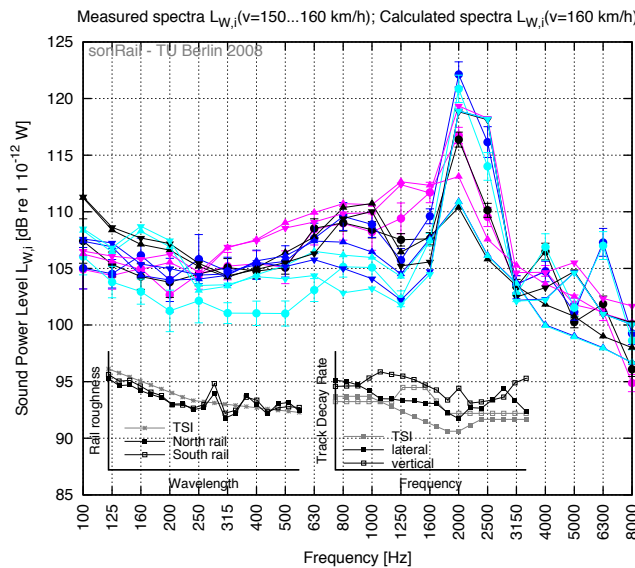
Abbildung 7.56: Validierung der Basismessstelle 13, nördliches Gleis

Messstelle 13 Südgleis



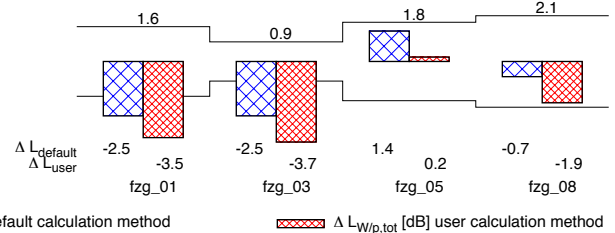
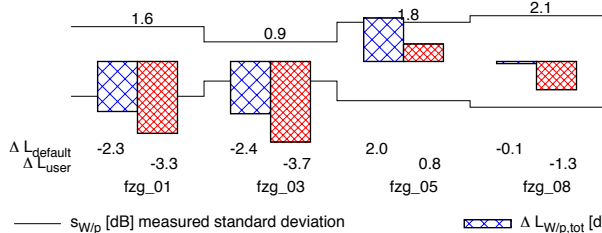
	fzg_id_01	fzg_id_03	fzg_id_05	fzg_id_08
$L_{W,160}$				
measured:	120.8	119.8	123.7	121.7
default calc.:	123.1	122.2	121.7	121.8
user calc.:	124.2	123.6	122.9	123.0
$L_{p,tot}$				
measured:	91.3	89.3	92.8	90.8
default calc.:	93.9	91.9	91.6	91.7
user calc.:	94.9	93.1	92.7	92.7

Legend:
 fzg_id_01 (pink triangles)
 fzg_id_03 (black crosses)
 fzg_id_05 (blue pluses)
 fzg_id_08 (cyan asterisks)



Final validation results, 160 km/h - Sound power Level: $\Delta L_{W,meas} - \Delta L_{W,calc}$

Final validation results, 160 km/h - Sound pressure Level: $\Delta L_{p,meas} - \Delta L_{p,calc}$

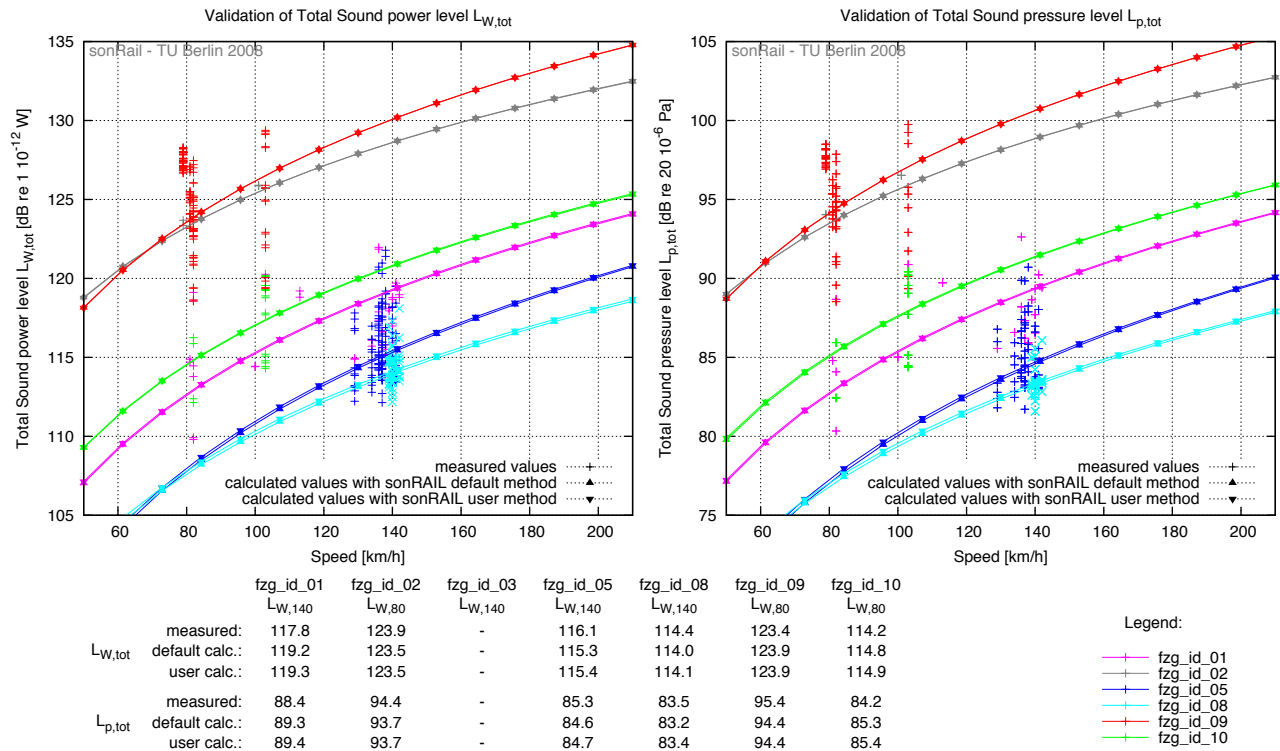


Gesamtgenauigkeit Default-Methode: $\Delta L_W = 1.7 \Delta L_p = 1.8 \text{ dB}$ User-Methode: $\Delta L_W = 2.3 \Delta L_p = 2.3 \text{ dB}$

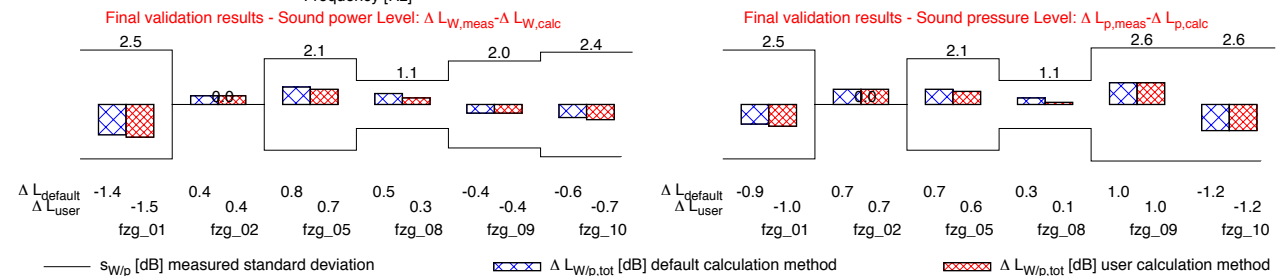
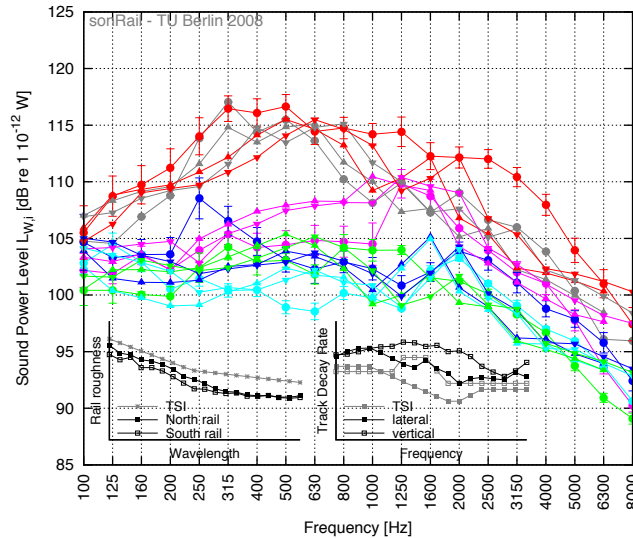
Bewertung der Ergebnisse Die angetriebenen Fahrzeuge werden mit beiden Methoden als zu laut berechnet, dies ist durch die sehr geringen Vorbeifahrtpegel begründet, die unterhalb der Werte der nichtangetriebenen Fahrzeuge liegen. Das Emissionsmaximum der angetriebenen Fahrzeuge bei 2000 Hz liegt $\approx 2 \text{ dB}$ unterhalb der nichtangetriebenen Fahrzeuge, so dass in der Rechnung dieses pegelbestimmende Maximum als zu hoch berechnet wird. Weiterhin liegen die Messwerte im unteren Frequenzbereich für die angetriebenen Fahrzeuge im Vergleich zu den anderen Messstellen mit gleicher Geschwindigkeit sehr tief.

Abbildung 7.57: Validierung der Basismessstelle 13, südliches Gleis

Mesststelle 14 Südgleis



Measured and calculated spectra $L_{W,p}$ Passenger (Freight) trains: $v=140$ km/h (80 km/h)

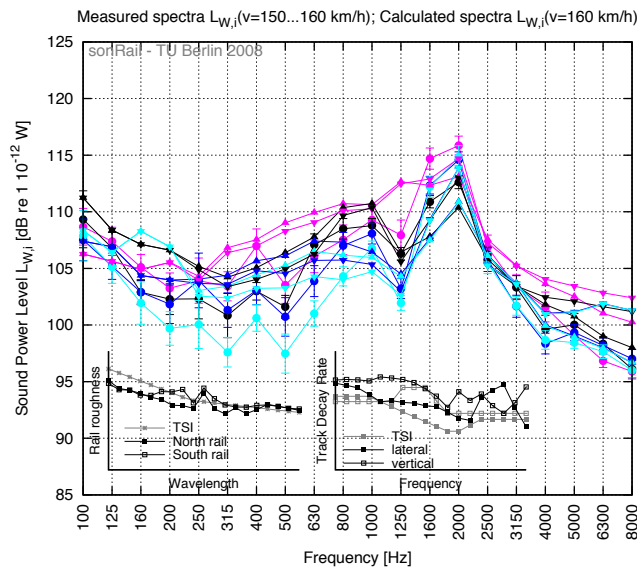
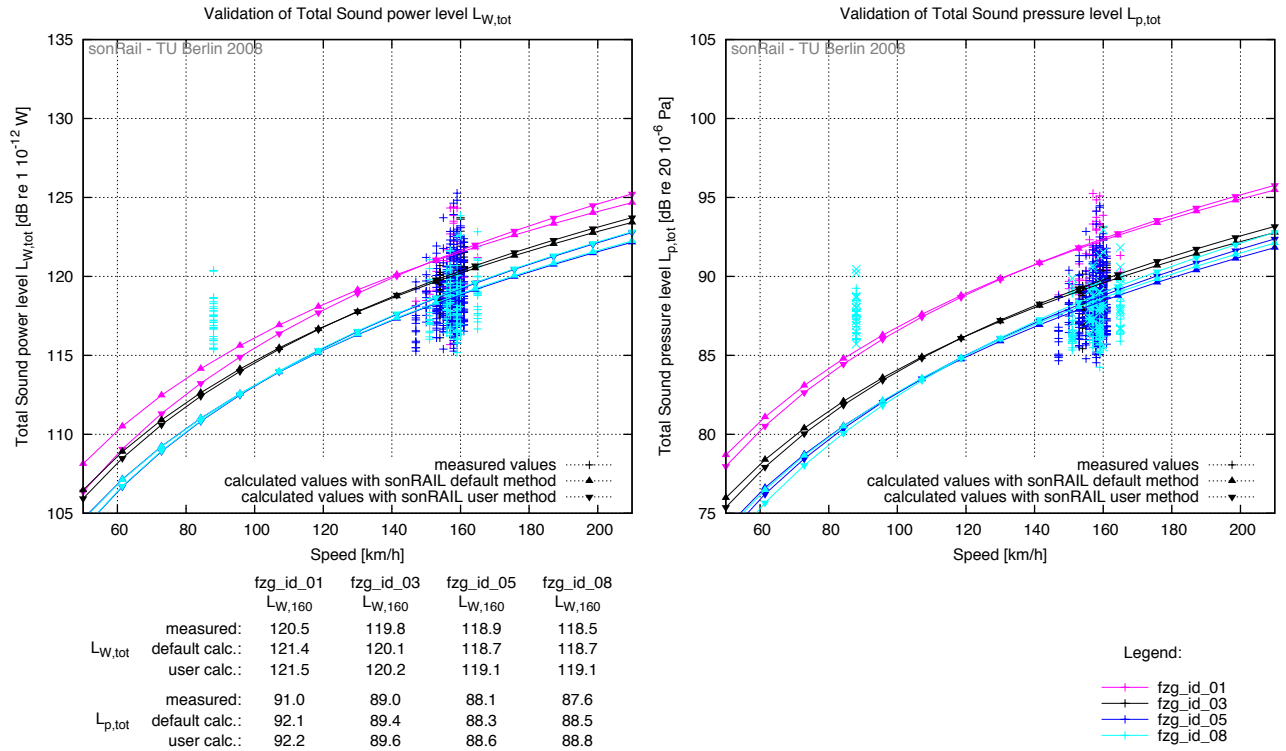


Gesamtgenauigkeit Default-Methode: $\Delta L_W = 0.7$ $\Delta L_p = 0.8$ dB User-Methode: $\Delta L_W = 0.7$ $\Delta L_p = 0.8$ dB

Bewertung der Ergebnisse Die Emissionspegel der Kategorie 01 werden um bis zu 1.5 dB zu hoch berechnet. Die Berechnungen für die Kategorie 02 erfolgt für 6-achsige Fahrzeuge, da an dieser Mesststelle nur Re610 und Ae610 gemessen wurden.

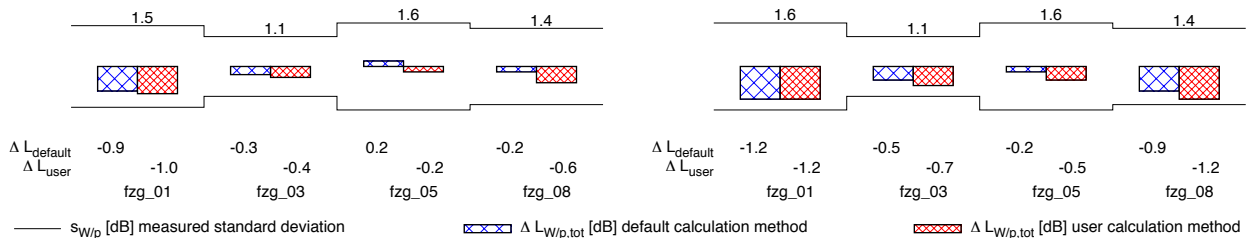
Abbildung 7.58: Validierung der Basismesststelle 14, südliches Gleis

Messstelle 15 Nordgleis



Final validation results, 160 km/h - Sound power Level: $\Delta L_{W,meas} - \Delta L_{W,calc}$

Final validation results, 160 km/h - Sound pressure Level: $\Delta L_{p,meas} - \Delta L_{p,calc}$

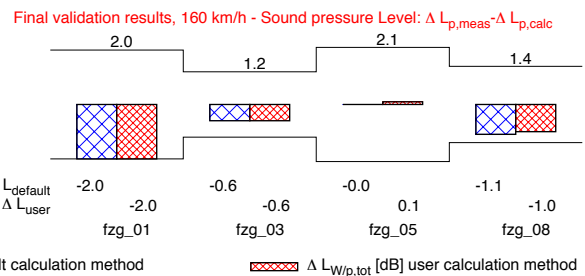
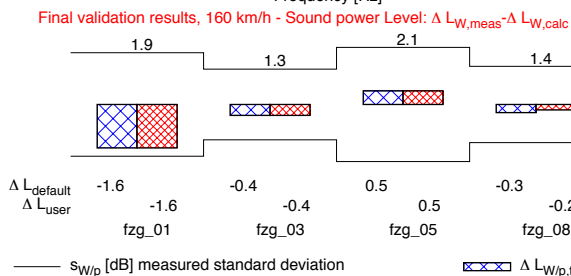
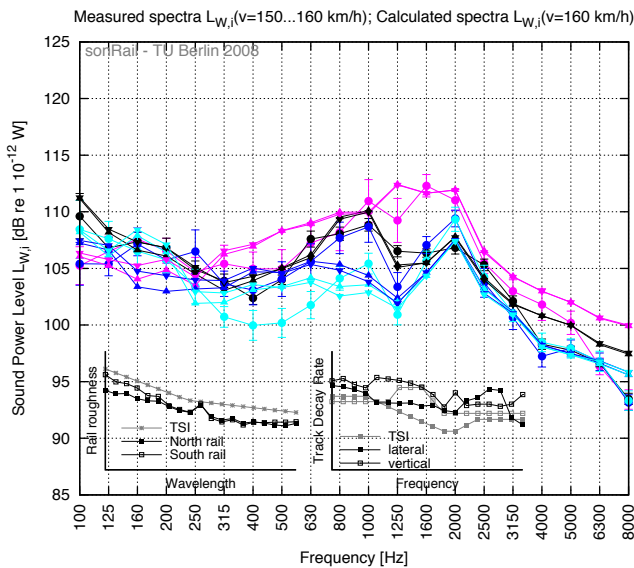
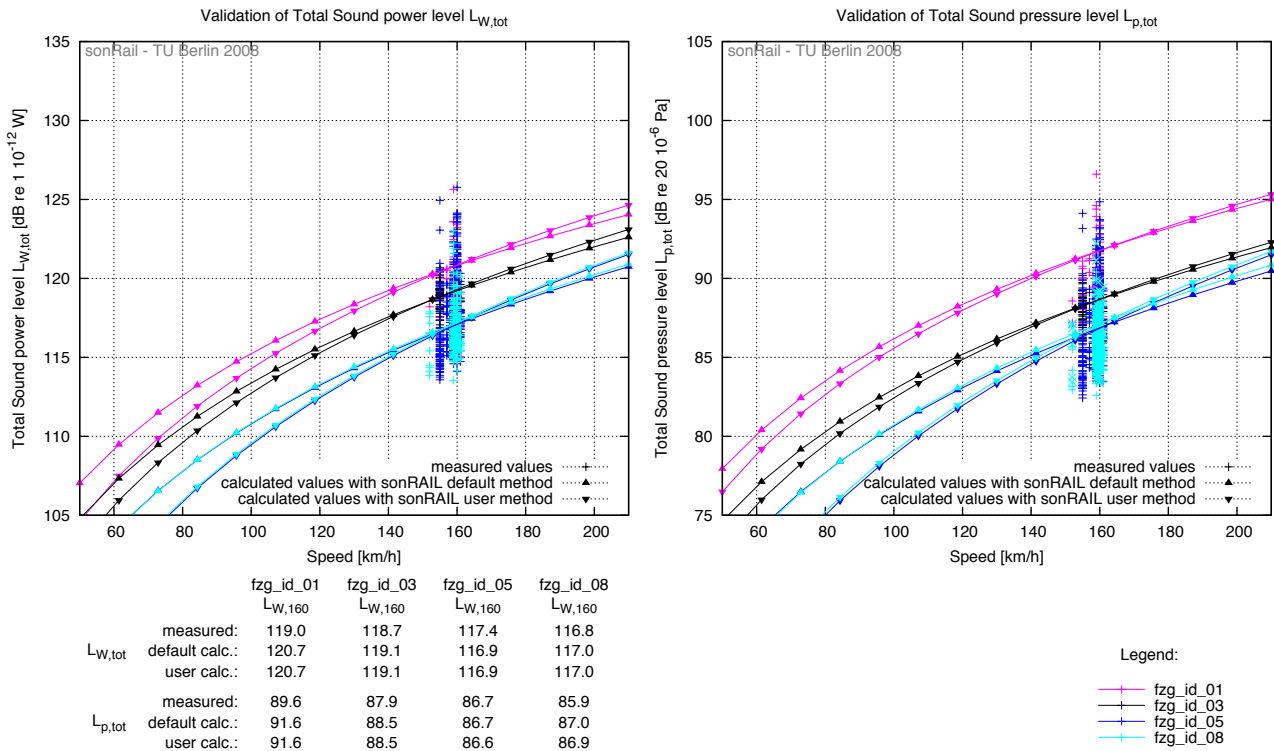


Gesamtgenauigkeit Default-Methode: $\Delta L_W = 0.4 \Delta L_P = 0.7 \text{ dB}$ User-Methode: $\Delta L_W = 0.6 \Delta L_P = 0.9 \text{ dB}$

Bewertung der Ergebnisse Messung und Rechnung zeigen eine sehr gute Übereinstimmung. Die Emissionspegel der Kategorie 01 werden um maximal 1 dB zu hoch berechnet.

Abbildung 7.59: Validierung der Basismessstelle 15, nördliches Gleis

Messtelle 15 Südgleis

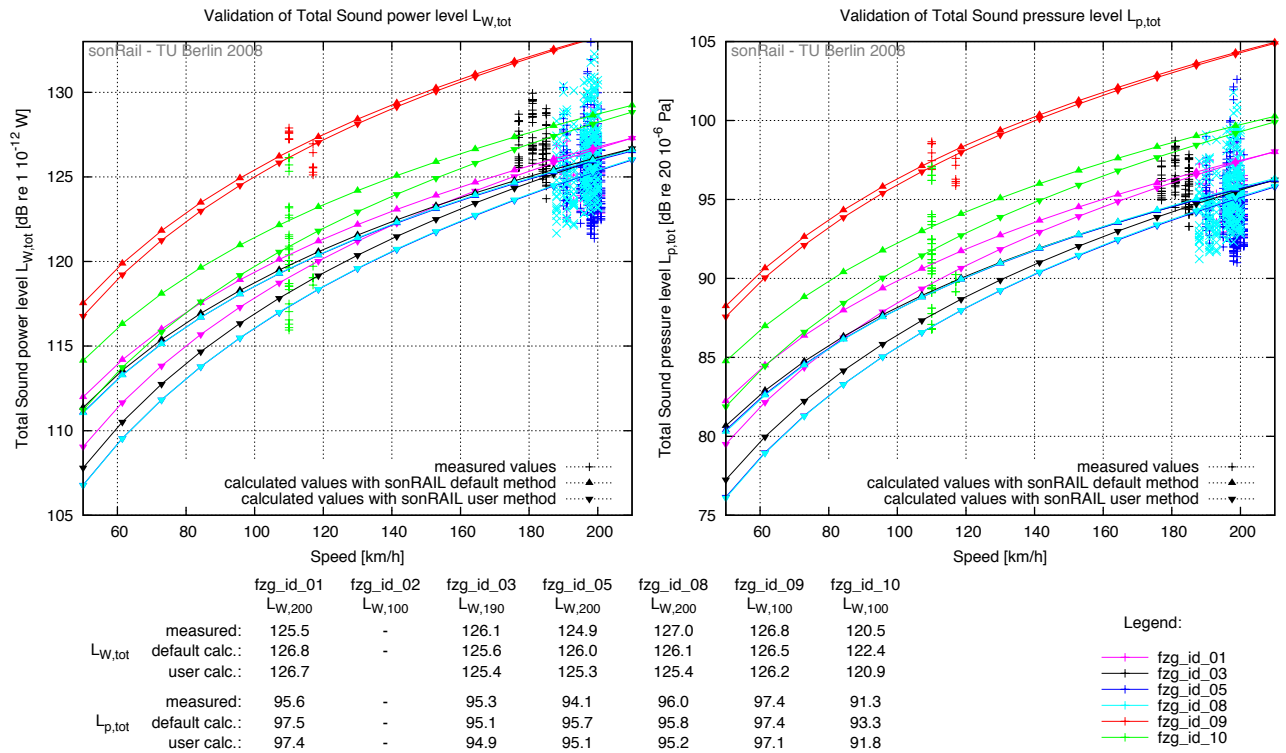


Gesamtgenauigkeit Default-Methode: $\Delta L_W = 0.7$ $\Delta L_P = 0.9$ dB User-Methode: $\Delta L_W = 0.7$ $\Delta L_P = 0.9$ dB

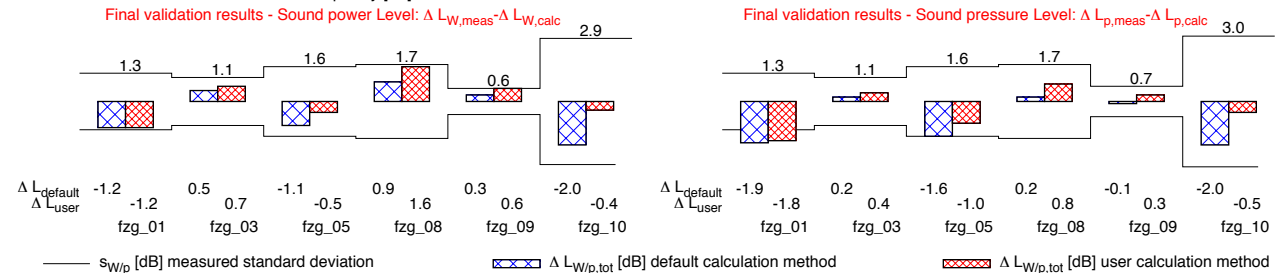
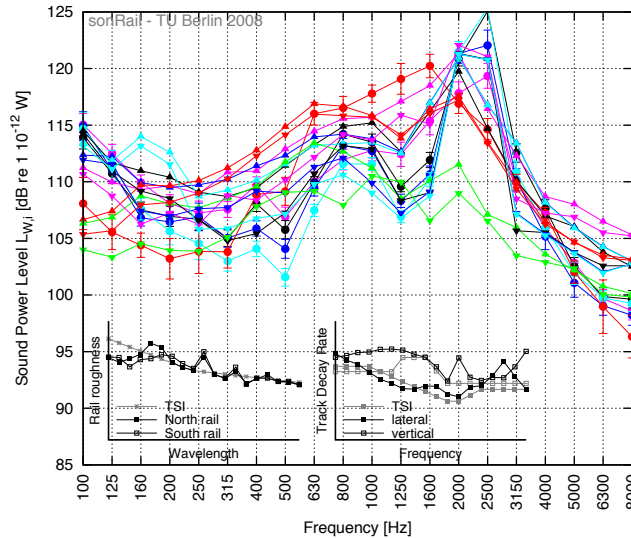
Bewertung der Ergebnisse Messung und Rechnung zeigen eine sehr gute Übereinstimmung. Die Emissionspegel der Kategorie 01 werden um maximal 2 dB zu hoch berechnet. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass auf dem südlichen Gleis der Grossteil dieser Fahrzeuge am Zugende verkehrt und daher aerodynamische Effekte weniger stark ausgeprägt sind.

Abbildung 7.60: Validierung der Basismesstelle 15, südliches Gleis

Messstelle 33 Nordgleis



Measured and calculated spectra $L_{W,i}$ Passenger (Freight) trains: $v=200$ km/h (100 km/h)

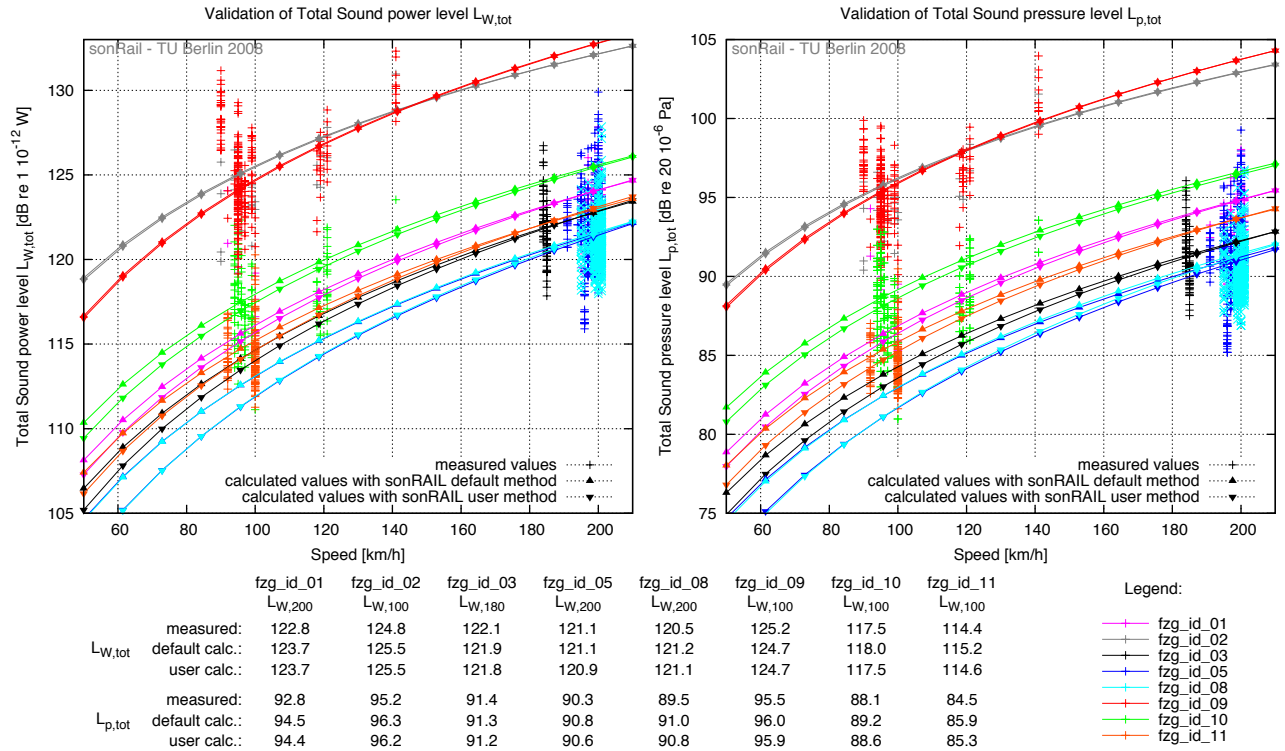


Gesamtgenauigkeit Default-Methode: $\Delta L_W = 1.0$ $\Delta L_P = 1.1$ dB User-Methode: $\Delta L_W = 0.8$ $\Delta L_P = 0.8$ dB

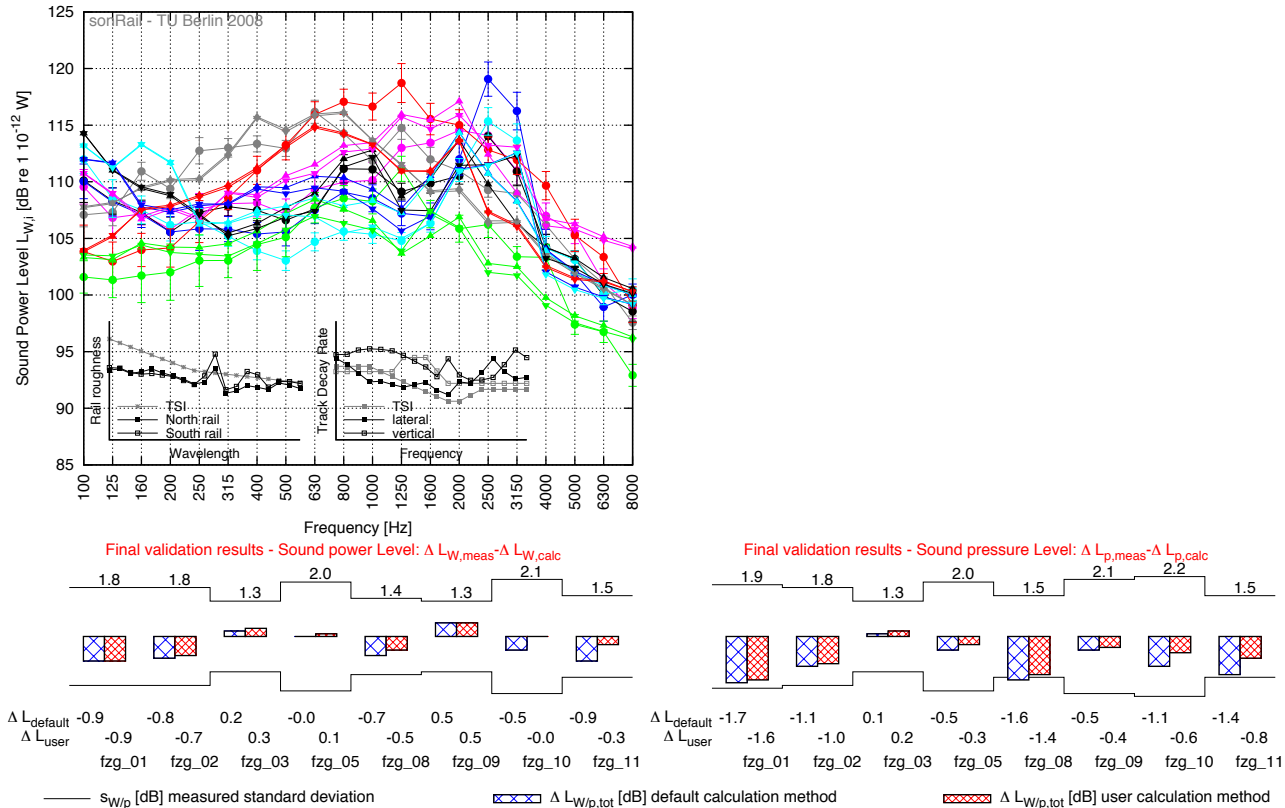
Bewertung der Ergebnisse Das nördliche Gleis der Messstelle 33 ist charakterisiert durch eine Schienenrauheit nach einem Schleifvorgang, mit einer Rauheitsamplitude bei 2.5 cm (vgl. Abbildung 4.3). Die Rechnung wird gemäss dem Abschnitt 6.2.3.7 durchgeführt. Die gemessenen Pegelmaxima durch den Rauheitspeak bei 2.5 cm können mit der User-Methode für alle Fahrzeugkategorien nachgebildet werden, mit der Default-Methode wird durch die Verwendung der Rauheitskategorie "bad" auf beiden Schienen das gesamte Spektrum höher berechnet. Das Pegelmaximum bei 2500 Hz der IC2000 Fahrzeuge wird zu niedrig berechnet, die Abweichung bei der User-Methode beträgt dadurch knapp 2 dB. Die Emissionspegel der K-Klotz gebremsten Fahrzeuge der Kategorie 10 werden mit der Default-Methode zu hoch berechnet, die User-Methode unter Verwendung der real gemessenen Schienenrauheit liefert genauere Werte.

Abbildung 7.01: Validierung der Basismessstelle 33, nördliches Gleis

Messtelle 33 Südgleis



Measured and calculated spectra $L_{W,i}$ Passenger (Freight) trains: $v=200$ km/h (100 km/h)

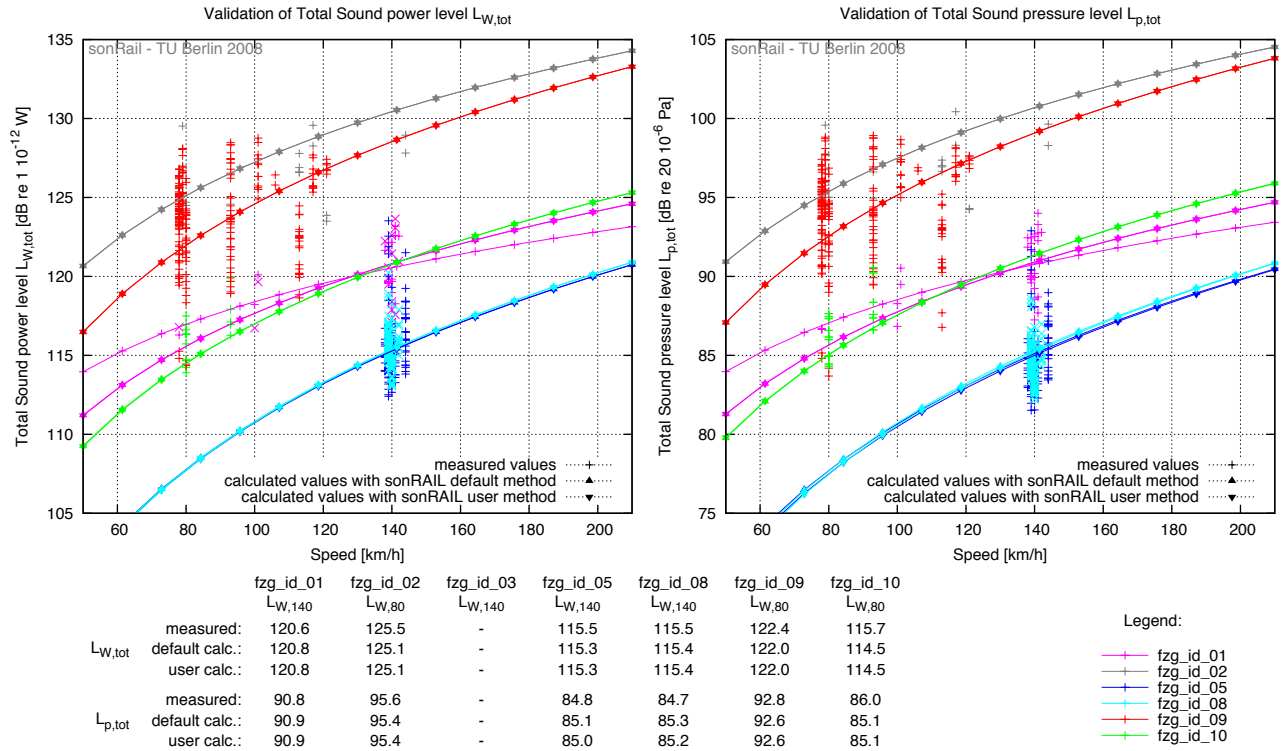


Gesamtgenauigkeit Default-Methode: $\Delta L_W = 0.6$ $\Delta L_p = 1.0$ dB User-Methode: $\Delta L_W = 0.4$ $\Delta L_p = 0.8$ dB

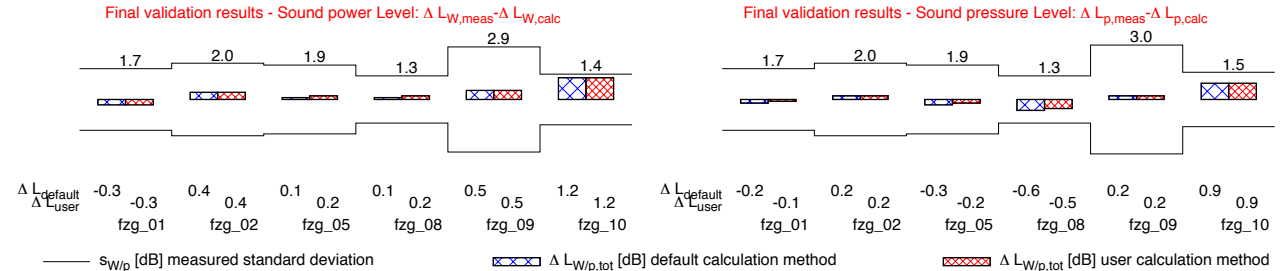
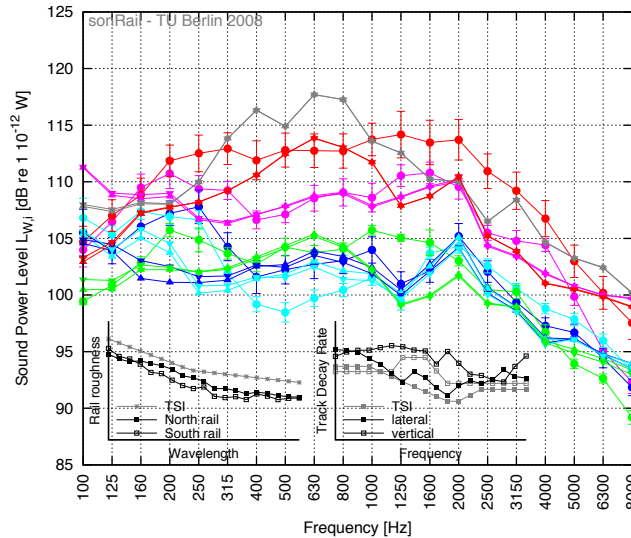
Bewertung der Ergebnisse Das südliche Gleis der Messtelle 33 ist charakterisiert durch eine Schienenrauheit nach einem Schleifvorgang, mit einer Rauheitsamplitude bei 2.5 cm (vgl. Abbildung 4.3). Die Rechnung wird gemäss dem Abschnitt 6.2.3.7 durchgeführt. Bei der Fahrzeugkategorie 02 werden die Sekundärleistungen mit den Standardwerten für Re620/Ae610 Lokomotiven berechnet. Die Messergebnisse werden mit hoher Genauigkeit berechnet.

Abbildung 7.62: Validierung der Basismesstelle 33, südliches Gleis

Messstelle 34 Südgleis



Measured and calculated spectra $L_{w,i}$, Passenger (Freight) trains: $v=140$ km/h (80 km/h)

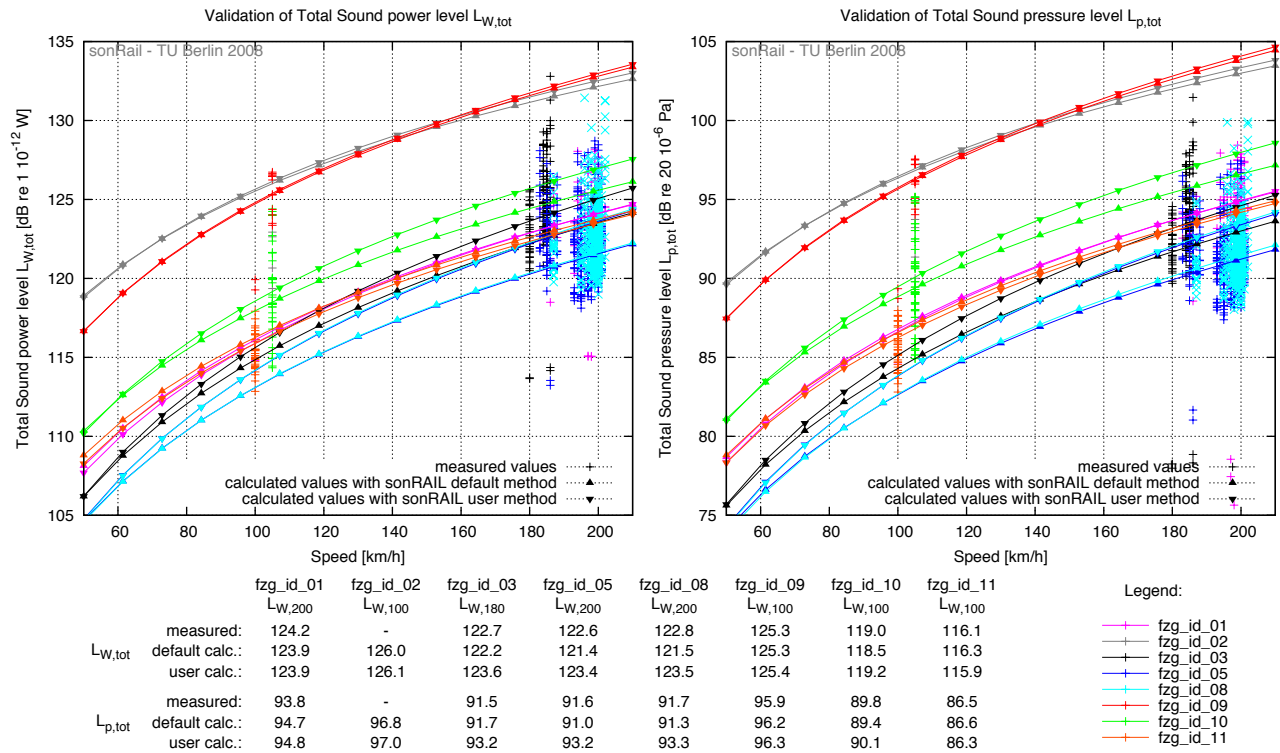


Gesamtgenauigkeit Default-Methode: $\Delta L_W = 0.4$ $\Delta L_P = 0.4$ dB User-Methode: $\Delta L_W = 0.5$ $\Delta L_P = 0.4$ dB

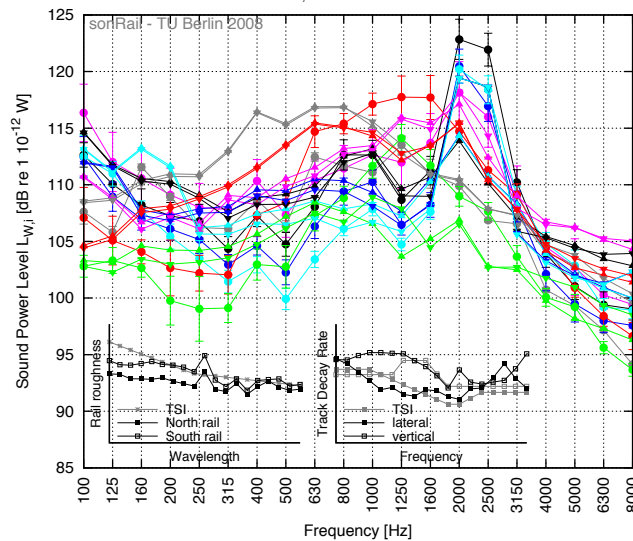
Bewertung der Ergebnisse Bei der Fahrzeugkategorie 02 werden die Sekundärleistungen mit den Standardwerten für Re620/Ae610 Lokomotiven mit ausgeprägter Sekundärleistung berechnet. Die Messergebnisse werden mit hoher Genauigkeit berechnet. Die Berechnungen für die Fahrzeugkategorie 01 werden ebenfalls mit ausgeprägten Sekundärquellen durchgeführt. Dadurch kann die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Messwerte genauer nachgebildet werden. Der Kurvenverlauf hat eine geringere Steigung, da die Sekundärquellen geschwindigkeitsunabhängig sind und dadurch bei niedrigeren Geschwindigkeiten einen dominierenden Einfluss auf das Gesamtgeräusch ausüben.

Abbildung 7.63: Validierung der Basismessstelle 34, südliches Gleis

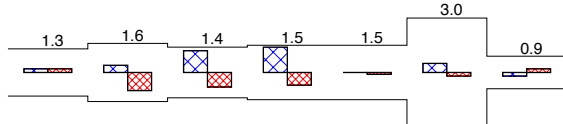
Mesststelle 35 Nordgleis



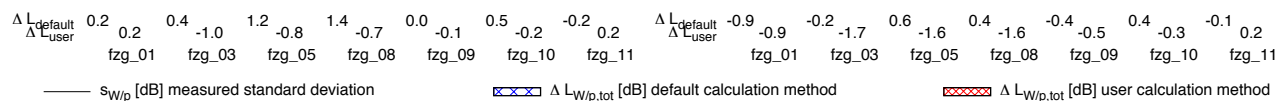
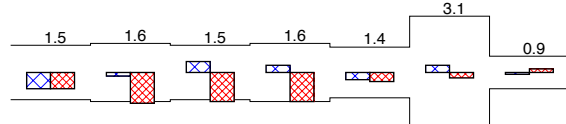
Measured and calculated spectra $L_{W,i}$ Passenger (Freight) trains: $v=200$ km/h (100 km/h)



Final validation results - Sound power Level: $\Delta L_{W,meas} - \Delta L_{W,calc}$



Final validation results - Sound pressure Level: $\Delta L_{p,meas} - \Delta L_{p,calc}$

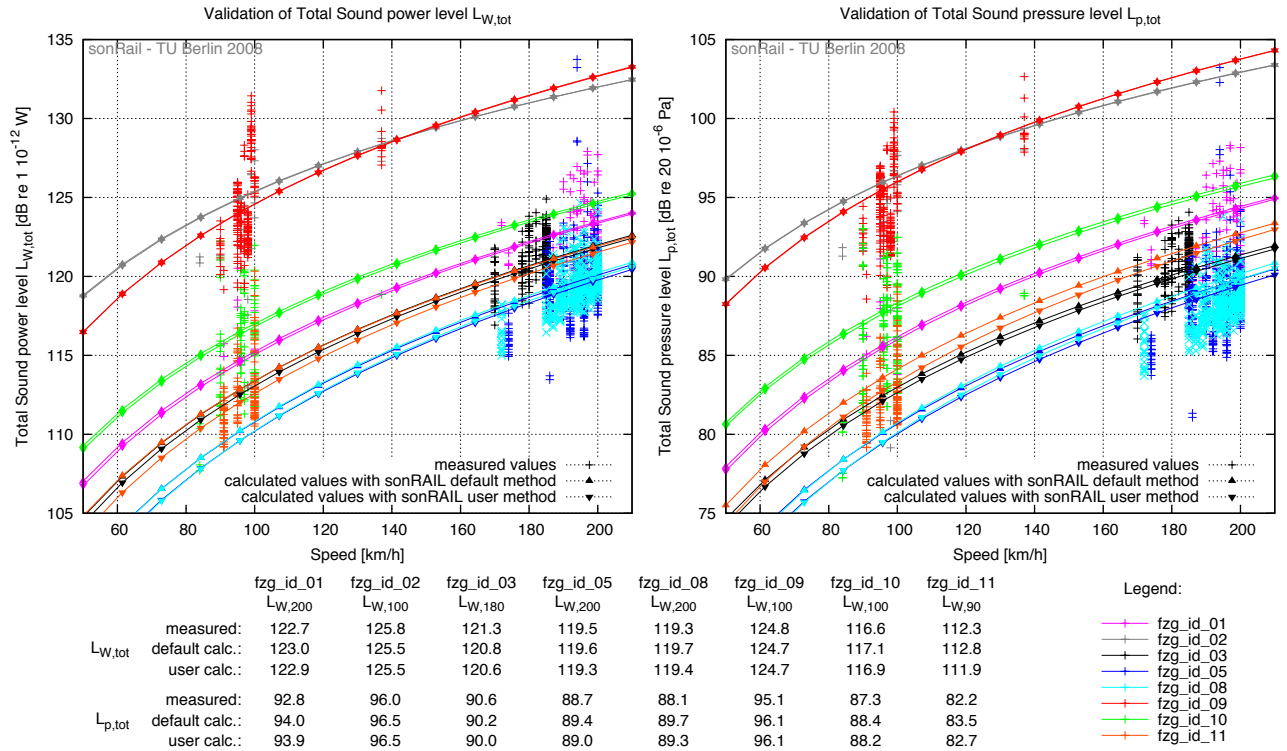


Gesamtgenauigkeit Default-Methode: $\Delta L_W = 0.6$ $\Delta L_p = 0.4$ dB User-Methode: $\Delta L_W = 0.5$ $\Delta L_p = 1.0$ dB

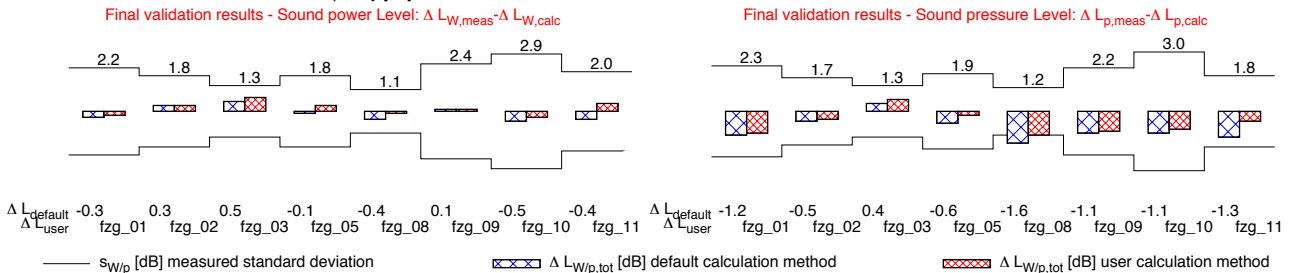
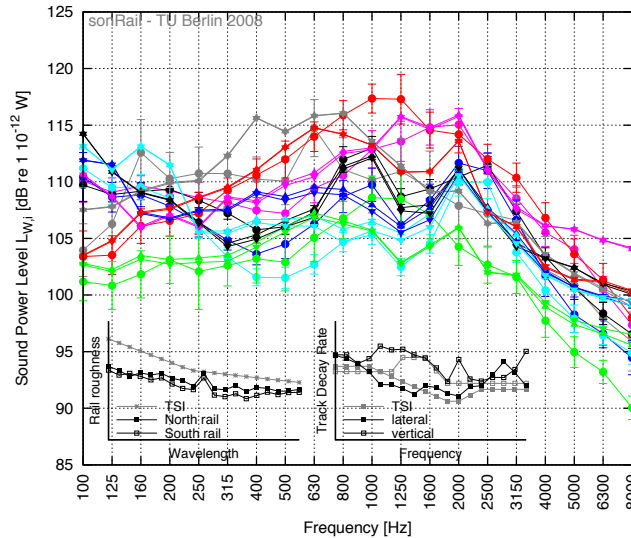
Bewertung der Ergebnisse Das nördliche Gleis der Mesststelle 35 ist charakterisiert durch eine Schienenrauheit nach einem Schleifvorgang, mit einer Rauheitsamplitude bei 2.5 cm (vgl. Abbildung 4.3). Die Rechnung wird gemäss dem Abschnitt 6.2.3.7 durchgeführt. Die gemessenen Pegelmaxima durch den Rauheitspeak bei 2.5 cm können mit der User-Methode für alle Fahrzeugkategorien nachgebildet werden, mit der Default-Methode wird durch die Verwendung der Rauheitskategorie "bad" auf der südlichen Schiene und "average" auf der nördlichen Schiene das gesamte Spektrum höher berechnet. Bei den RoLa Fahrzeugen wurde keine Pegelüberhöhung gemessen, dies wird durch die verwendete Transferfunktion für kleine Räder ebenso in der Rechnung nachgebildet.

Abbildung 7.64: Validierung der Basismesststelle 35, nördliches Gleis

Messstelle 35 Südgleis



Measured and calculated spectra $L_{W,i}$, Passenger (Freight) trains: $v=200$ km/h (100 km/h)



Gesamtgenauigkeit Default-Methode: $\Delta L_W = 0.3$ $\Delta L_p = 1.0$ dB User-Methode: $\Delta L_W = 0.3$ $\Delta L_p = 0.7$ dB

Bewertung der Ergebnisse Die Berechnung für Güterwagen erfolgt für 4-achsige Fahrzeuge mit einer Länge von 14 Meter. Die Fahrzeuge der Kategorie 02 werden mit den Werten für Re620/Ae610 Fahrzeuge ohne ausgeprägten Sekundärquellen durchgeführt. Sowohl mit der Default-Methode als auch mit der User-Methode werden die Emissionspegel mit hoher Genauigkeit berechnet.

Abbildung 7.65: Validierung der Basismessstelle 35, südliches Gleis

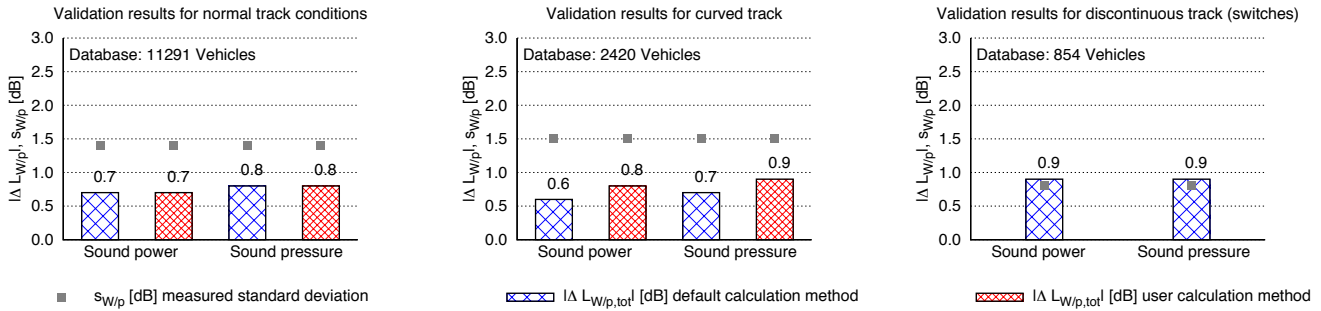


Abbildung 7.66: Genauigkeit des Emissionsmodell als Resultat der Validierungsrechnungen

Die Ergebnisse der Vergleichsbetrachtungen der einzelnen Messstellen werden nach den folgenden Gesichtspunkten zusammengefasst und bewertet:

- die Gesamtgenauigkeit aller sonRAIL Messstellen im geraden Gleis, im Bogen und an Weichen,
- die Genauigkeit pro Fahrzeugkategorie,
- die Genauigkeit pro Oberbautyp und Schienenrauheit

Nach Abbildung 7.66 werden mit beiden Berechnungsmethoden maximale Abweichungen zwischen Messung und Rechnung von 1 dB ermittelt. Damit liegen die Abweichungen an jeder Messstelle innerhalb der Standardabweichungen der Messungen. Diese Aussage gilt für die Vorbeifahrtpegel von einzelnen Fahrzeugen. In Abbildung 7.67 sind für jede Fahrzeug/Oberbau/Rauheitskombination die Mess- und Rechenwerte der A-bewerteten Schalldrucksignale $L_{pA,tot,7.5m}$ angegeben. Diese Darstellung ist eine Erweiterung der Übersicht der Messergebnisse aus Abbildung 4.16 und führt alle Berechnungsergebnisse der Emissionsrechnungen zusammen.

Calculated sound pressure level $L_{pA,tot,7.5m}$ for all vehicle and track types on smooth/average/bad roughness, $v=80$ km/h

Ci-braked	90.7	91.3	91.2	93.8	90.3	91.9	90.8	91.3	91.4	93.9	90.1	92.3	90.8	92.0	91.9	94.5	90.6	92.9
Re420,620 Ae610	88.6	88.7	88.7	89.5	88.5	88.9	88.7	88.9	88.8	89.7	88.5	89.1	89.5	89.9	89.6	91.0	89.1	90.0
NPZ RBDDe	84.7	84.8	84.8	85.1	85.0	85.1	85.0	85.1	85.1	85.6	84.9	85.2	86.3	86.6	86.5	87.8	85.9	86.9
RoLa	78.2	78.7	78.6	82.3	77.4	79.8	80.8	81.5	81.4	84.4	79.7	82.5	86.7	87.5	87.3	90.6	85.3	88.5
Re460	81.3	81.4	81.4	81.8	81.5	81.9	81.9	82.2	82.1	83.3	81.6	82.4	84.5	85.0	84.9	86.9	83.8	85.5
ICN/ETR	77.6	77.8	77.7	78.7	77.1	78.0	78.8	79.1	79.0	80.5	78.3	79.4	82.6	83.2	83.0	85.4	81.6	83.7
NiNa	77.3	77.4	77.3	78.3	77.5	77.4	78.3	78.5	78.5	79.9	77.9	78.9	81.8	82.4	82.2	84.5	81.0	82.9
K-braked	77.8	78.1	78.0	79.7	77.6	78.5	79.3	79.6	79.4	81.5	78.5	80.1	83.4	84.0	83.8	86.4	82.4	84.6
D-braked	74.4	74.8	74.7	76.9	74.1	75.5	76.9	77.4	77.3	79.7	76.0	78.1	82.4	83.1	82.9	85.7	81.3	83.8
	Monoblock UIC54	Monoblock UIC60	Bi-Block UIC54	Steel UIC54	Wooden UIC54	Wooden UIC60	Monoblock UIC54	Monoblock UIC60	Bi-Block UIC54	Steel UIC54	Wooden UIC54	Wooden UIC60	Monoblock UIC54	Monoblock UIC60	Bi-Block UIC54	Steel UIC54	Wooden UIC54	Wooden UIC60
	Smooth rail roughness						Average rail roughness						Bad rail roughness					

Abbildung 7.67: Zusammenstellung der berechneten Schalldruckpegel $L_{pA,tot,7.5m}$ [dB(A)] aller untersuchten Fahrzeugtypen, Oberbautypen und Schienenzustände für die Bezugsgeschwindigkeit $v_0 = 80$ km/h als Erweiterung der Abbildung 4.16

7.2.1.2 Berechnungsgenauigkeit für jede Fahrzeugkategorie

Die Ergebnisse der Validierungsrechnungen sind in Abbildung 7.68 für jede Fahrzeugkategorie dargestellt. Für die Triebfahrzeuge der Kategorie 01 und 02 werden zwischen Messung und Rechnung Differenzen kleiner 1.0 dB erreicht. Damit liegen die Abweichungen bei beiden Fahrzeugkategorien innerhalb der Standardabweichung von 1.8 bis 2.0 dB. Für ICN und NiNa Fahrzeuge erfolgt die Emissionsrechnung mit einem Fehler von 0.5 bis 1.0 dB. Bei den Fahrzeugkategorien 05 und 08 konnten Validierungsrechnungen an über 7'500 Fahrzeugen durchgeführt werden. Die Validierung der Kategorie 05 erfolgt mit einer Genauigkeit von 0.6 dB. In der Kategorie 08 beträgt die maximale

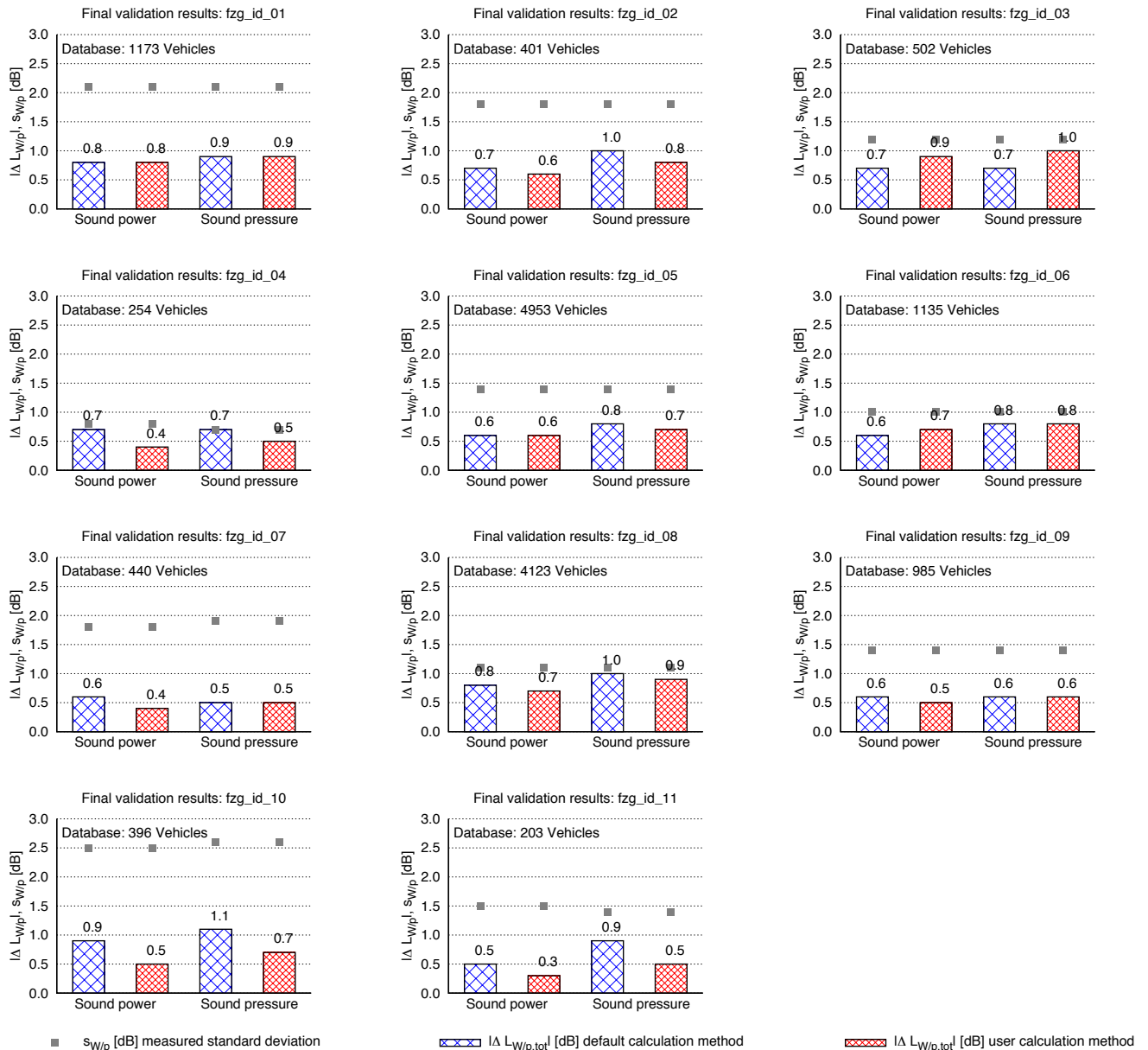


Abbildung 7.68: Vergleich der Differenzpegel zwischen Messung und Rechnung aller Fahrzeugkategorien mit Angabe der Standardabweichung pro Fahrzeugtyp

Abweichung 1.0 dB. Die Genauigkeit in der Berechnung liegt bei beiden Fahrzeugkategorien innerhalb der Standardabweichungen der Messungen. Für die K-Klotz gebremsten Personen- und Güterwagen der Kategorie 06 und 10 wird eine Genauigkeit von 1.0 dB erreicht und liegt somit ebenfalls innerhalb der Standardabweichungen der Messungen. Bei K-Klotz gebremsten Güterwagen wurde eine sehr grosse Streuung der Emissionswerte gemessen, die Standardabweichung liegt bei über 2.5 dB. Die Genauigkeit der Validierungsrechnungen bei GG-Klotz gebremsten Güterwagen der Kategorie 09 und der RoLa Fahrzeuge beträgt 1.0 dB, die Standardabweichungen liegen bei 1.5 dB.

7.2.1.3 Berechnungsgenauigkeit für jeden Oberbautyp

Die Darstellungen in Abbildung 7.69 vergleichen die Genauigkeit der Modellrechnung bei unterschiedlichen Oberbautypen. Für alle untersuchten Oberbautypen werden die Berechnungen mit Abweichungen kleiner 1 dB durchgeführt. Dieser Wert gilt für alle Fahrzeugtypen und Schienenrauheiten.

7.2.1.4 Berechnungsgenauigkeit für jede Schienenrauheitskategorie

Die Abbildungen in 7.70 vergleichen die Genauigkeit der Modellrechnung bei unterschiedlichen Schienenrauheiten. Eine Zunahme der Abweichungen zwischen Messung und Rechnung wird für ansteigende Schienenrauheiten festgestellt. Bei niedriger Schienenrauheit können die Schalleistungspegel, gemittelt über alle Fahrzeugtypen, mit einer Genauigkeit von 0.5 dB berechnet werden. In der Rauheitskategorie "bad" liegt die maximale Abweichung bei knapp 1.0 dB. Dieser Zusammenhang kann damit begründet werden, dass die hohen Schienenrauheiten das Gesamtemissionsverhalten stark beeinflussen. Geringe Abweichungen in der Datengrundlage führen somit zu deutlichen Abweichungen in den Emissionspegeln. Weiterhin wurden bei Messquerschnitten mit hohen Schienenrauheiten starke Unterschiede in den Rauheitsamplituden innerhalb eines Fahrspiegels gemessen womit die Unsicherheit in der Berechnung zunimmt (vgl. Abschnitte 5.1.2.1 und 5.1.2.2).

Die Emissionsrechnungen für Schienenrauheiten nach Schleifvorgängen können mit einer Genauigkeit von 1.0 dB durchgeführt werden.

7.2.2 sonRAIL Arraymessstellen

Zur Überprüfung der Genauigkeit der Berechnungen in den einzelnen Quellenhöhen werden die Ergebnisse der Arraymessungen validiert. In den Abbildung 7.71 bis 7.74 werden für die Arraymessstellen 03 und 35 die Messergebnisse der Quellenhöhen 1 bis 4 mit den Modellrechnungen verglichen.

Messstelle 03 An Messstelle 03 beträgt die mittlere Geschwindigkeit 90...100 km/h, die Berechnungen werden ohne ausgeprägte aerodynamische Geräuschquellen durchgeführt. Bei Triebfahrzeugen werden die Berechnungen mit und ohne ausgeprägten Sekundärquellen durchgeführt.

Bei den Triebfahrzeugen der Kategorie 01 und 02 werden in der Quellenhöhe 1 keine signifikanten Pegelunterschiede in Abhängigkeit vom befahrenen Gleis festgestellt. Dies gilt ebenso für die Triebfahrzeuge der NPZ Züge, die Emissionspegel der unteren Quellenhöhen unterscheiden sich trotz abweichenden Oberbautyps (Nordgleis: Stahlschwellen/UIC54, Südgaleis: B70/UIC54) und Schienenrauheit nicht signifikant. Das Emissionsgeräusch wird demnach überwiegend von Sekundärquellen des Antriebs dominiert. Diese Messergebnisse können durch die Berechnungen der Quellenhöhen 0 und 0.5 m nachvollzogen werden.

Der Vergleich mit den nicht angetriebenen Fahrzeugen der Kategorien 05, 06 und 08 zeigt, dass bei diesen Fahrzeugen deutliche Unterschiede in der unteren Quellenhöhe auftreten. Das Rollgeräusch dominiert hier die Emissionspegel und ist damit abhängig von Schienenrauheit und Oberbautyp. Zwischen den K-Klotz gebremsten Fahrzeugen NPZ A(B) und RIC Bpm wurden keine Unterschiede in den Emissionspegeln gemessen. Auch für die nicht angetriebenen Fahrzeuge werden die Emissionsspektren der verschiedenen Quellenhöhen genau abgebildet.

Messstelle 35 An Messstelle 35 beträgt die mittlere Geschwindigkeit 190...200 km/h für Personenzüge incl. Re460 und ICN, für die Güterzüge und RoLa Züge gilt 90...100 km/h. Die Berechnungen werden mit und ohne ausgeprägten Sekundärquellenleistungen durchgeführt. Weiterhin erfolgt für die Fahrzeugkategorien mit hohen Geschwindigkeiten die Berechnung mit ausgeprägten Sekundärquellen und aerodynamischen Quellen.

Auf dem nördlichen Gleis ist die Quellenhöhe 1 bei allen Fahrzeugen geprägt von der Schienenrauheit.

Die Messwerte der angetriebenen Fahrzeuge der Kategorien 01 und 02 können durch die Verwendung der unterschiedlichen Sekundärleistungen gut nachgebildet werden. Bei den Re460 Fahrzeugen werden die aerodynamischen Geräuschquellen in der Validierung berücksichtigt. Bei den Fahrzeugen der Kategorie 02 werden die Pegelunterschiede zwischen Fahrzeugen mit durchschnittlichen und ausgeprägten Sekundärquellen genau berechnet. Bei den ICN Fahrzeugen sind die Antriebsgeräusche der Quellenhöhe 1 zwischen 800 und 1000 Hz unter Verwendung der ausgeprägten Sekundärquellen berücksichtigt. Die Pegelmaxima bei 2000 Hz sind dem Rollgeräusch zugeordnet. Durch die Verwendung der aerodynamischen Zusatzquellen können die gemessenen Pegelmaxima der Fahrzeuge am Zugangfang und der Fahrzeuge mit Stromabnehmer genau nachgebildet werden. Bei den EWIV und IC2000 Fahrzeugen werden die höheren Emissionspegel an den Steuerwagen durch aerodynamische Quellen berücksichtigt. Bei den GG-Klotz gebremsten Güterwagen ist die Quellenhöhe 1 dominiert vom Rollgeräusch. Die unterschiedlichen Schienenrauheiten zwischen Nord- und Südgaleis haben sowohl bei der Messung als auch bei der Rechnungen keinen signifikanten Einfluss auf das Emissionsverhalten. Bei den K-Klotz gebremsten Güterwagen nimmt der Einfluss der Schienenrauheit auf Grund der geringeren Radrauheiten zu, auf dem nördlichen Gleis werden entsprechend höhere Emissionspegel berechnet. Gleiches gilt auch für die RoLa Fahrzeuge, entsprechend der Schienenrauheit und der Fahrgeschwindigkeit liegt das Pegelmaximum des Rollgeräusches bei 1000 Hz.

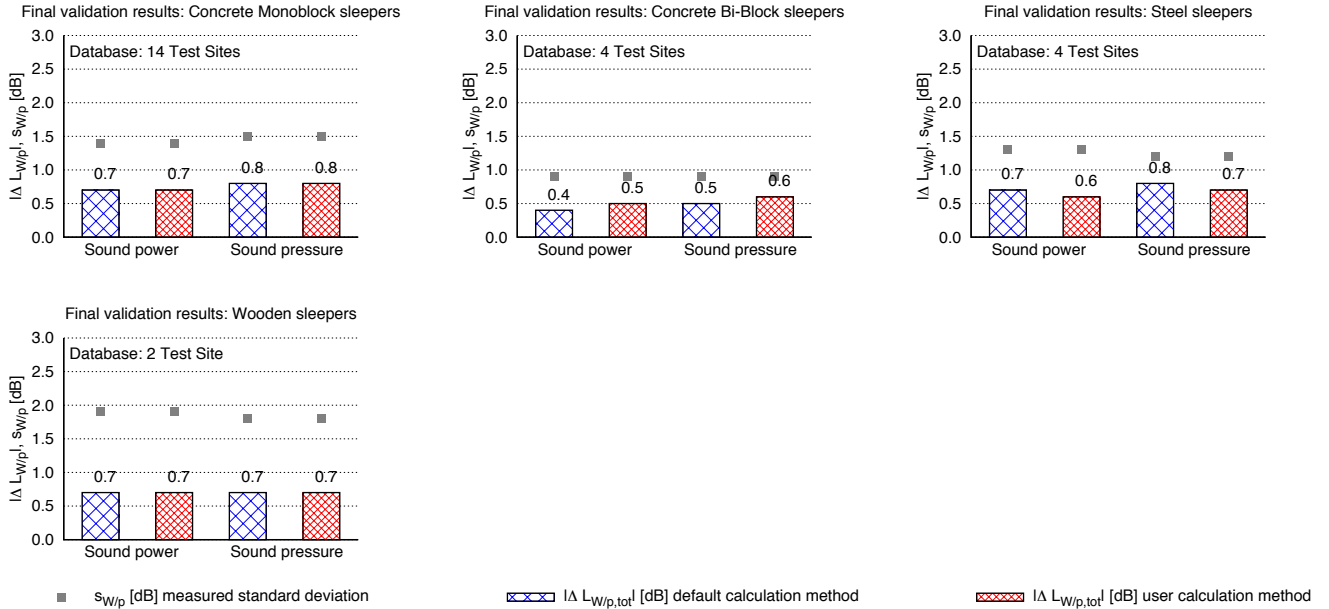


Abbildung 7.69: Vergleich der Differenzpegel zwischen Messung und Rechnung in Abhängigkeit vom Oberbautyp mit Angabe der Standardabweichung pro Oberbautyp

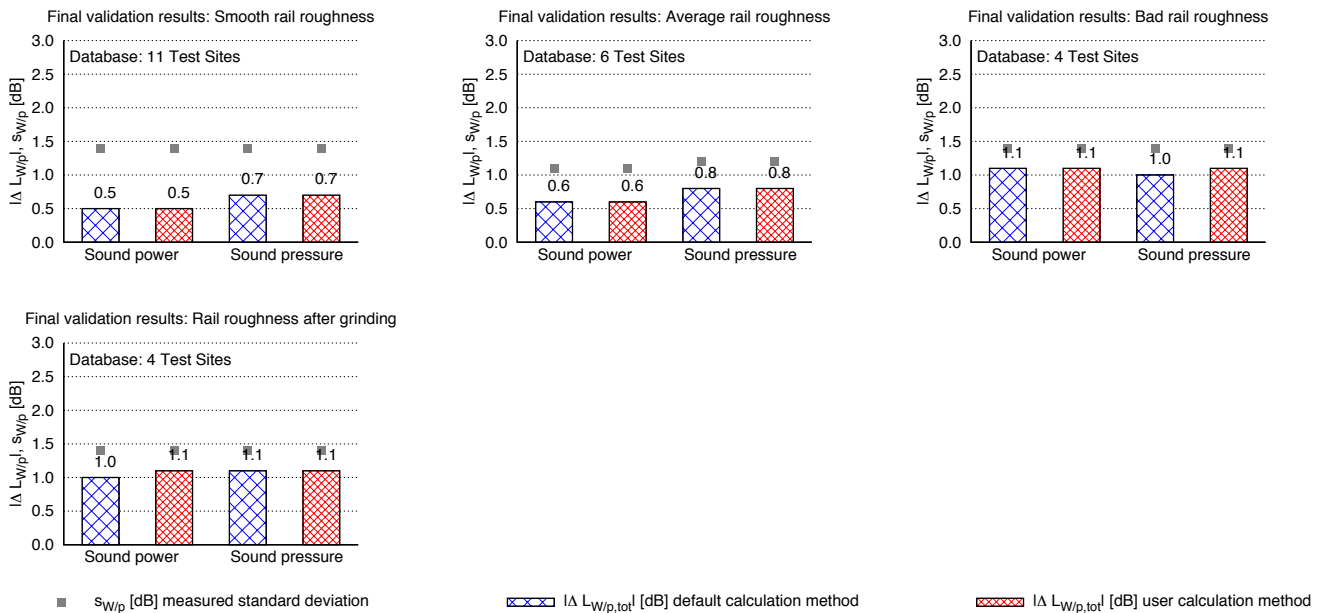


Abbildung 7.70: Vergleich der Differenzpegel zwischen Messung und Rechnung in Abhängigkeit von der Schienenrauheit mit Angabe der Standardabweichung pro Rauheitskategorie

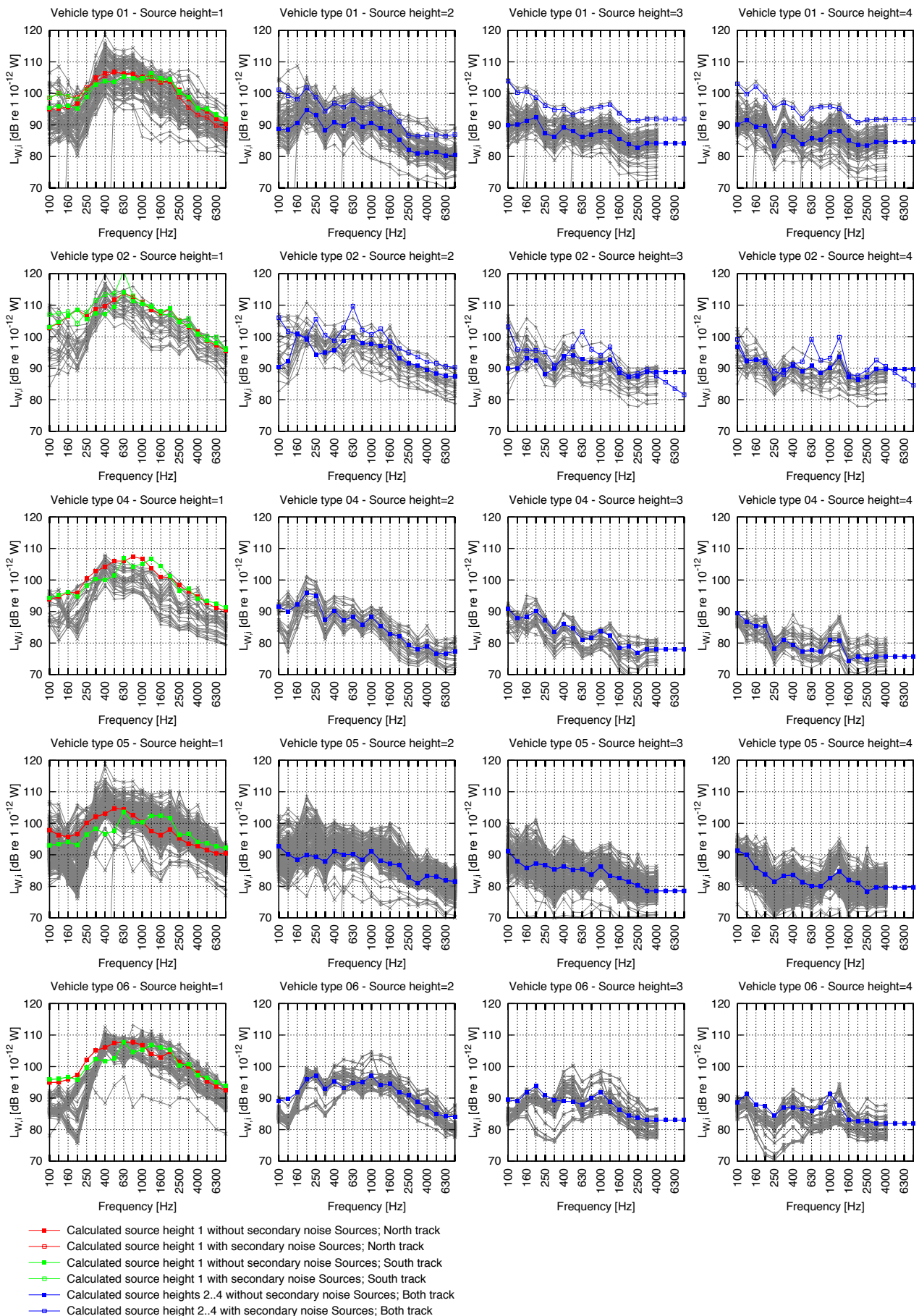


Abbildung 7.71: Validierung der Arraymessstelle 03 in 4 Quellenhöhen für die Fahrzeugtypen 01 bis 06

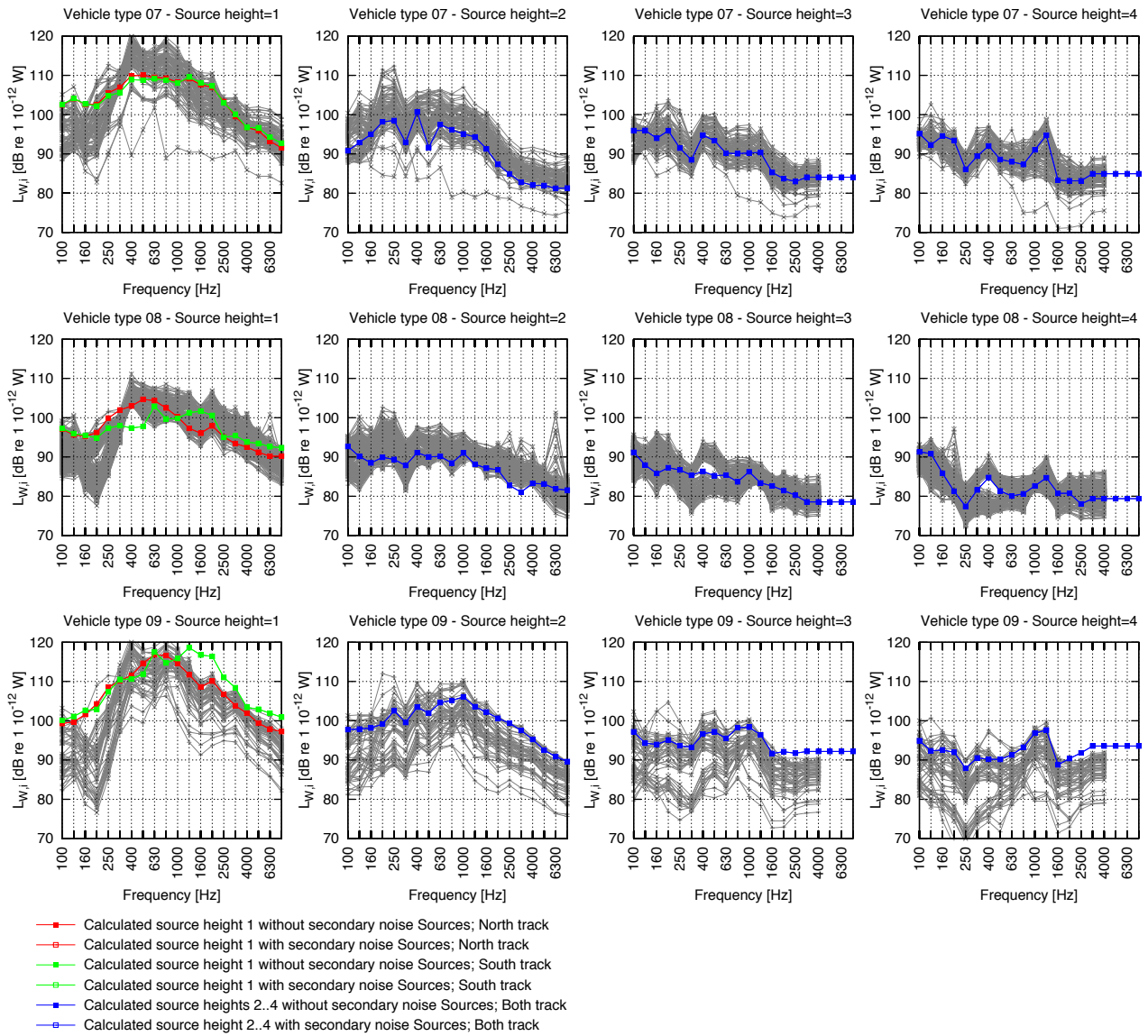


Abbildung 7.72: Validierung der Arraymessstelle 03 in 4 Quellenhöhen für die Fahrzeugtypen 07 bis 09

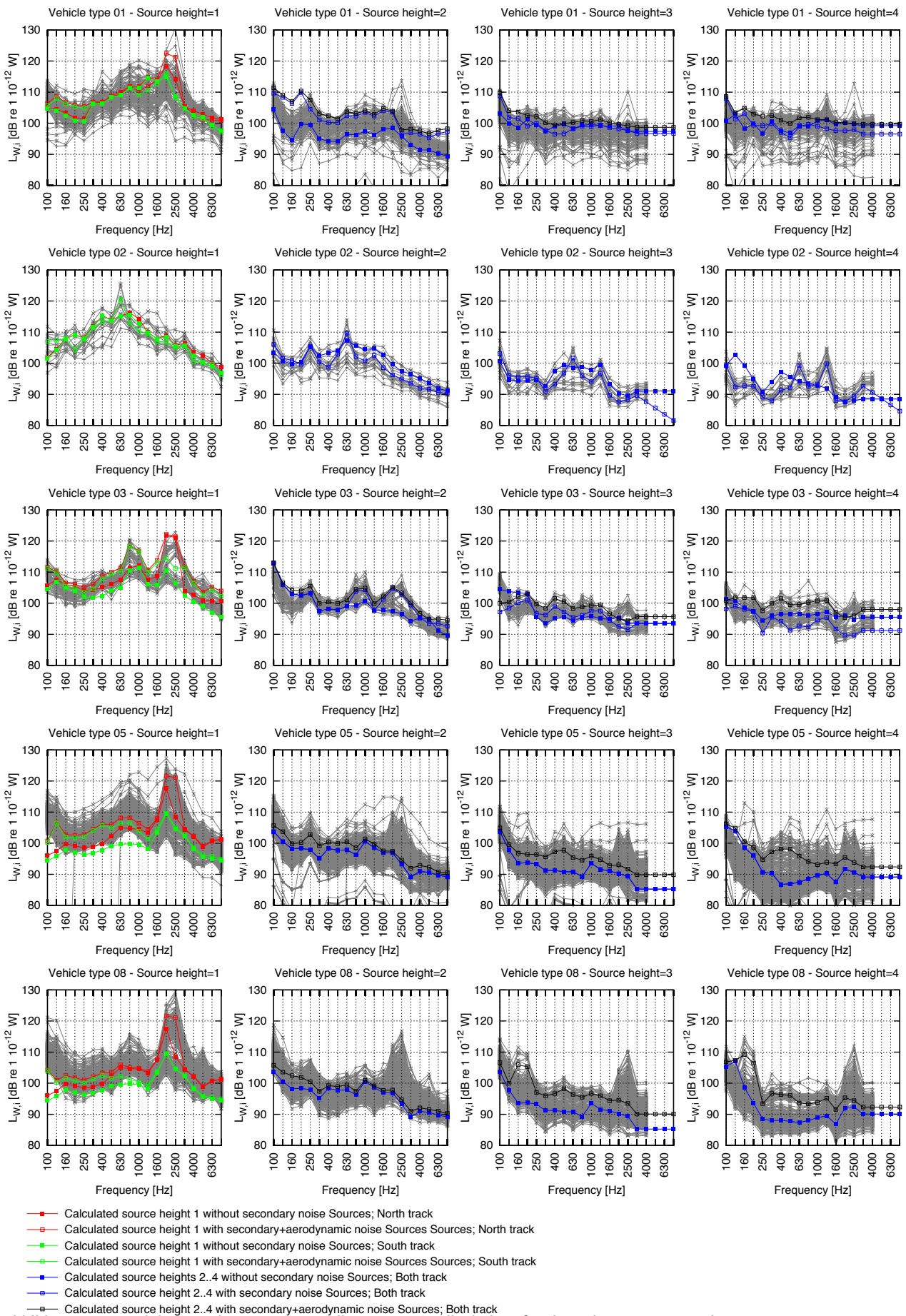


Abbildung 7.73: Validierung der Arraymessstelle 35 in 4 Quellenhöhen für die Fahrzeugtypen 01 bis 08

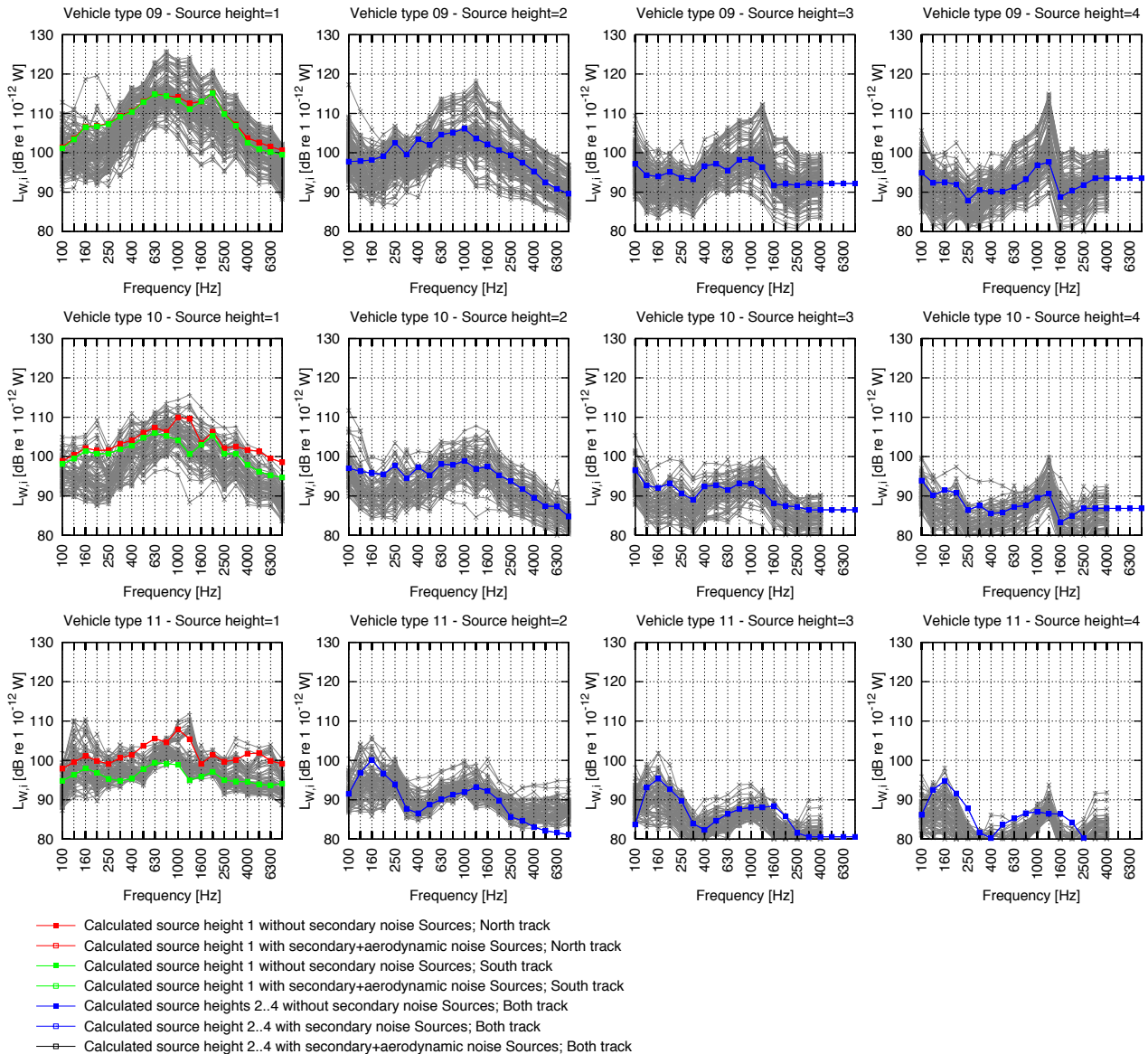


Abbildung 7.74: Validierung der Arraymessstelle 35 in 4 Quellenhöhen für die Fahrzeugtypen 09 bis 11

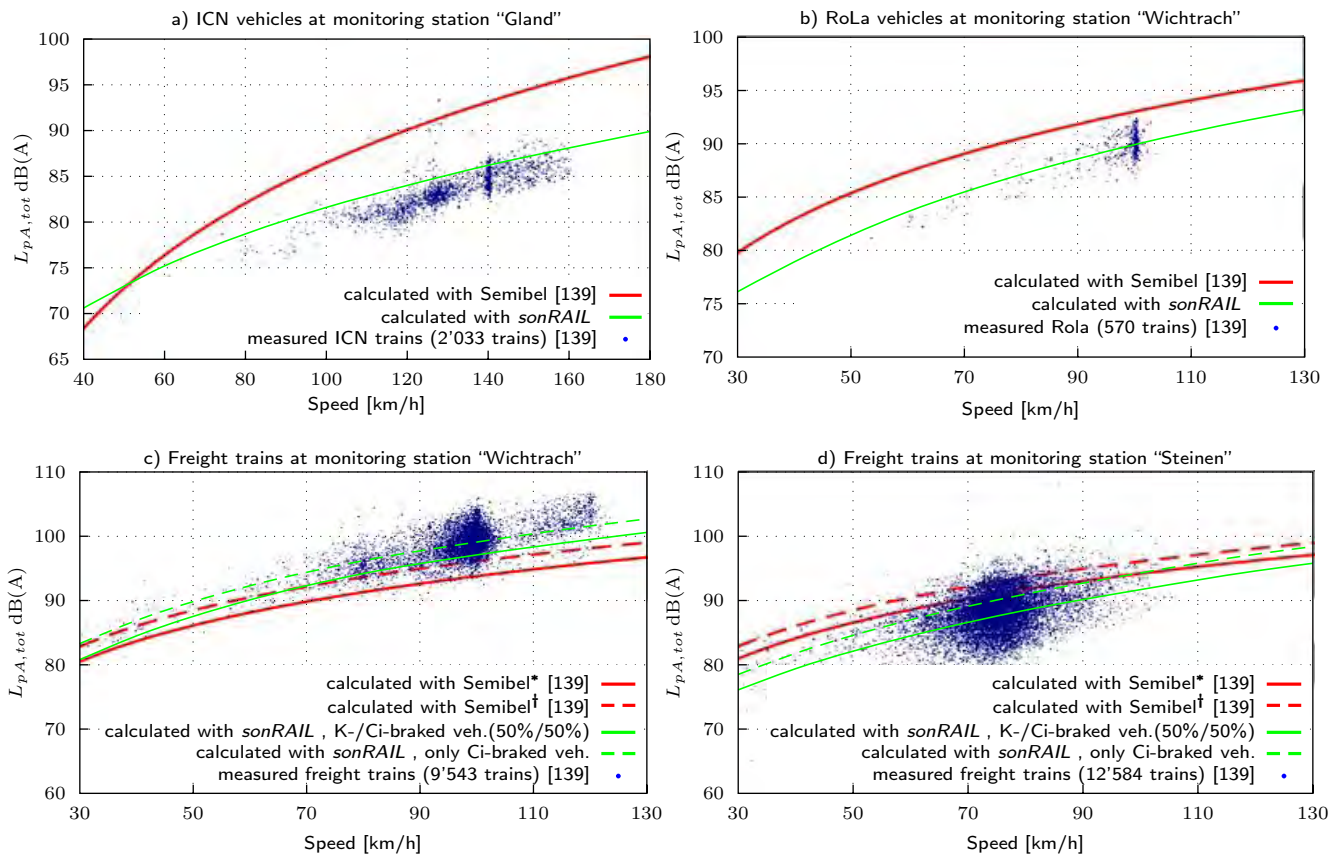
7.2.3 Externe Emissionsdaten

7.2.3.1 Verwendung von Emissionsdaten aus “Lärmmonitoring Schweiz”

In den Grafiken der Abbildung 7.75 werden die Messdaten von drei Messstationen des “Lärmmonitoring Schweiz” mit den Berechnungsergebnissen von Semibel und *sonRAIL* verglichen. Messdaten und Semibelberechnungen sind dem Jahresbericht 2007 des Bundesamtes für Verkehr (BAV) [139] entnommen. Die Auswahl des Oberbautyps und der Schienenrauheitskategorie basiert auf den in [141] und [139] angegebenen Rauheitspegeln $L_{\lambda,CA}$. Für die Berechnung wird der mittlere Rauheitspegel aus beiden Messjahren verwendet.¹ Analysiert werden die folgenden Situationen:

a) ICN Fahrzeuge an der Station Gland (Strecke Genf-Lausanne, Gleis 221) Der Rauheitspegel beträgt $L_{\lambda,CA} = 6.9 \text{ dB(A)}$, die Berechnungen werden für die Rauheitskategorie “average” durchgeführt. Der Vergleich mit den Messwerten zeigt eine sehr gute Übereinstimmung. Über den gesamten Geschwindigkeitsbereich werden die Emissionspegel mit hoher Genauigkeit berechnet. Die mit Semibel berechneten Vorbeifahrtpegel liegen deutlich über den Messwerten, wobei die maximale Differenz von bis zu 10 dB(A) auch bei hohen Geschwindigkeiten auftritt.

¹Dieses Vorgehen wird dadurch begründet, dass die Emissionswerte über einen Zeitraum von einem Jahr erfasst worden sind.



* Rollmaterial Emissionsplan 2015, incl. Schienenzuschlag
† nur GG-Klotz gebremste Fahrzeuge, incl. Schienenzuschlag

* Rollmaterial Emissionsplan 2015, incl. Schienenzuschlag
† nur GG-Klotz gebremste Fahrzeuge, incl. Schienenzuschlag

Abbildung 7.75: Vergleich der im "Lärmmonitoring Schweiz" (2007) [139] gemessenen und mit Semibel, *sonRAIL* berechneten Vorbeifahrtpegel: a) ICN Fahrzeuge an der Station Gland; b) RoLa Fahrzeuge an der Station Wichtrach; c) Güterwagen an der Station Wichtrach; d) Güterwagen an der Station Steinen

b) RoLa Fahrzeuge an der Station Wichtrach (Strecke Bern-Thun, Gleis 317) Der mittlere Rauheitspegel beträgt $L_{\lambda,CA} = 18.1 \text{ dB(A)}$, die Berechnungen werden für die Kategorie "bad" durchgeführt. Die Messwerte können mit hoher Genauigkeit durch die *sonRAIL* Berechnungen nachgebildet werden. Die mit Semibel berechneten Emissionswerte wurden nach [139] für einen Fahrzeugmix von 40% GG-Klotz und 60% K-Klotz Wagen durchgeführt.² Die berechneten Werte liegen daher deutlich über den Messwerten.

c) Güterwagen an der Station Wichtrach (Strecke Bern-Thun, Gleis 417) Der mittlere Rauheitspegel beträgt $L_{\lambda,CA} = 9.6 \text{ dB(A)}$, die Berechnungen werden mit dem in [139] Anhang 6 angegebenen Rauheitsspektrum durchgeführt. Da der tatsächliche Fahrzeugmix der gemessenen Güterzüge nicht bekannt ist, werden die Berechnungen für reine GG-Klotz gebremste Züge und für Züge mit 50% GG-Klotz und 50% K-Klotz gebremste Fahrzeuge durchgeführt (vgl. Abbildung 6.10). Die höchste Genauigkeit ergibt sich bei Verwendung von ausschliesslich GG-Klotz gebremsten Züge. Die Ergebnisse der Semibel Berechnungen liegen unterhalb der Messwerte, trotz der Berücksichtigung des Schienenzuschlags von 2 dB für verriffelte Schienen³.

d) Güterwagen an der Station Steinen (Gotthardstrecke, Gleis 115) Der mittlere Rauheitspegel beträgt $L_{\lambda,CA} = 4.3 \text{ dB(A)}$. Die Ergebnisse der Semibel Rechnungen liegen etwas über den Messwerten. Mit den *sonRAIL* Rechnungen können die Messwerte genau nachgebildet werden.

²Diese Annahme wird für die ausschliesslich scheibengebremsten RoLa Fahrzeuge getroffen. Dieses Vorgehen wird durch das BAV dadurch begründet, dass auf Grund der schlechten Schienenrauheit die Emissionspegel der RoLa Fahrzeuge sonst deutlich unterschätzt würden. [139]

³Bei Semibel kann für verriffelte Gleise eine Pegelzuschlag von 2 dB(A) vergeben werden.

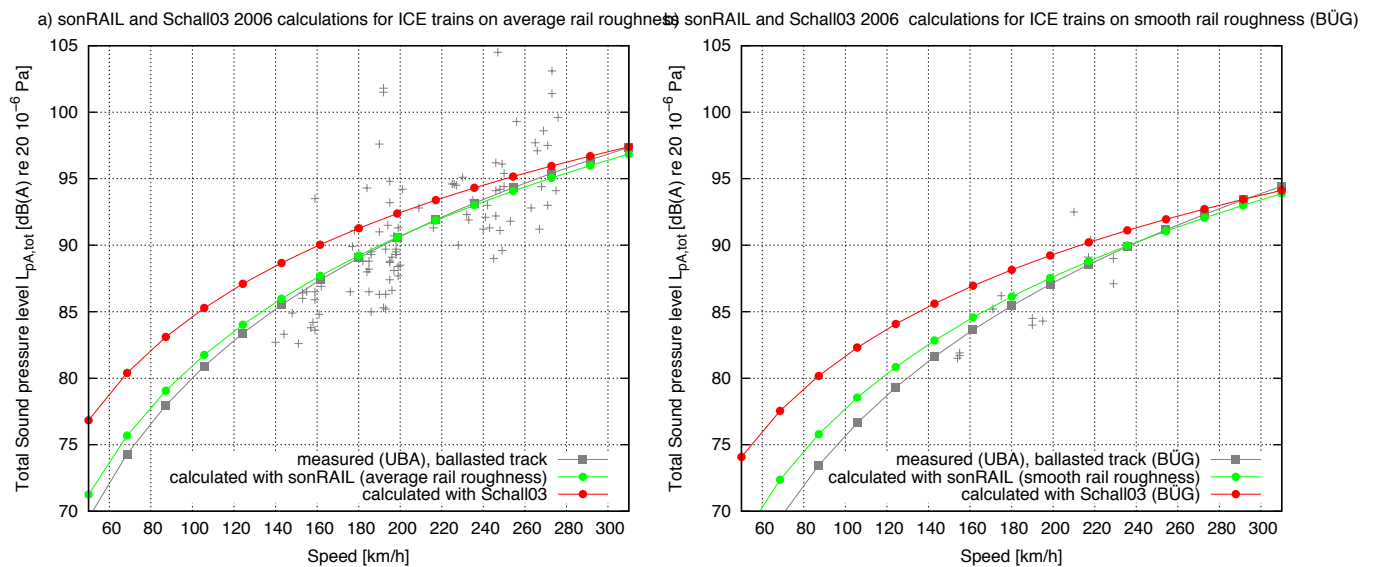


Abbildung 7.76: Vergleich der Messwerte von ICE 1/2 Zügen des UBA [144] mit Schall03 2006 [143] und *sonRAIL* auf Schottergleis mit a) durchschnittlicher Schienenrauheit und b) Schottergleis als Besonders Überwachtes Gleis (BÜG)

7.2.3.2 Verwendung von Emissionsdaten des Umweltbundesamtes

In Abbildung 7.76 werden für ICE 1 Fahrzeuge Messwerte des Umweltbundesamtes (UBA) mit den Berechnungsergebnissen der Schall03 2006 [142], [143] und mit *sonRAIL* Berechnungen verglichen. Es werden die A-bewerteten Schalldruckpegel in 7.5 Meter Entfernung für Schottergleis mit durchschnittlicher Schienenrauheit und für Schottergleis als Besonders Überwachtes Gleis (BÜG) untersucht. Die Berechnungen werden entsprechend [142] für den Mittelungspegel von 2 Triebköpfen und 12 Mittelwagen durchgeführt.

Der Vergleich mit den *sonRAIL* Berechnungsergebnissen zeigt eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten des UBA. Der Geschwindigkeitsverlauf der Messungen kann genau nachgebildet werden. Auf Grund fehlender Daten zu den Schienenrauheiten ergibt sich jedoch eine Unsicherheit in der Berechnung. Die maximalen Abweichungen zwischen Messung und Rechnung liegen unter 1 dB(A). Die Berechnung mit der Schall03 2006 liefert bei hohen Geschwindigkeiten ebenfalls sehr genaue Ergebnisse. Im unteren Geschwindigkeitsbereich werden die Pegel um bis zu 5 dB(A) zu hoch berechnet.

Die Messwerte des BÜG können durch die Verwendung der Schienenrauheitskategorie "smooth" im gesamten Geschwindigkeitsbereich genau berechnet werden. Mit der Schall03 2006 [143] werden im unteren Geschwindigkeit deutlich zu hohe Emissionspegel berechnet, die Differenz beträgt bei 100 km/h bis zu 7 dB.

7.2.3.3 Verwendung von Emissionsdaten aus ÖBB Messstellen in Österreich

Die Österreichische Bundesbahn (ÖBB) betreibt an der Nordbahn in Deutsch Wagram eine Lärmmonitoringstation [145]. Für diese sollen anhand ausgewählter Fahrzeugkategorien die gemessenen Vorbeifahrtpegel [146] mit den berechneten Pegeln der Semibel, Schall03 2006 und *sonRAIL* Emissionsmodelle verglichen werden. Die Messstelle erfüllt die TSI Lärm Anforderungen bezüglich Track Decay Rate und Schienenrauheit, die Emissionsrechnungen werden daher mit der Rauheitskategorie "average" berechnet.

Die Darstellungen in Abbildungen 7.77 zeigen folgende Vergleichsrechnungen:

a) Scheibengebremste Personenwagen Mit den *sonRAIL* Standardwerten dieser Fahrzeugkategorie können die Messungen mit hoher Genauigkeit nachgerechnet werden, das Modell ist auf österreichische Fahrzeuge dieser Kategorie übertragbar. Die Schall03 berechnet auf Grund der niedrigen Schienenrauheit zu hohe Emissionspegel, insbesondere bei geringen Geschwindigkeiten. Mit Semibel werden vor allem bei hohen Geschwindigkeiten eindeutig zu grosse Emissionspegel berechnet. Die Differenz der Semibel Rechnung gegenüber den Messwerten bei $v = 160$ km/h beträgt 6.5 dB(A).

b) GG-Klotz gebremste Güterwagen Die maximale Abweichung der *sonRAIL* Rechnungen gegenüber den Messwerten beträgt 1 dB(A), somit lassen sich die *sonRAIL* Standardwerte auch auf Fahrzeuge in Österreich übertragen.

Die Berechnungen der Schall03 2006 führen zu einer Geschwindigkeitsabhängigkeit, welche nicht mit den Messwerten übereinstimmt. Die Berechnungen mit Semibel führen nur zu geringen Abweichungen von maximal 2 dB(A) im mittleren Geschwindigkeitsbereich. Dies kann durch den geringeren Einfluss der Schienenrauheit begründet werden.

c) Elektrischer Niederflurtriebswagen "Talent" Dieser Fahrzeugtyp wurde nicht während der *sonRAIL* Messungen erfasst, kann jedoch der Fahrzeugkategorie 4 zugeordnet werden. Analog zu NiNa- oder Flirt-Fahrzeugen besitzen die Talent Fahrzeuge angetriebene Endwagen und Mittelwagen mit Jakobsdrehgestellen. Unter Verwendung der Standardwerte der Kategorie 4 können auch für dieses Fahrzeug die Messwerte mit sehr hoher Genauigkeit nachgerechnet werden. Die Schall03 2006 Berechnungen liefern analog zu den Fahrzeugen aus a) im unteren Geschwindigkeitsbereich deutlich zu hohe Pegel. In Semibel sind derzeit keine Standardwerte für diese Fahrzeugkategorie angegeben, so dass auf die BAV Berechnungen für ICN Züge zurückgegriffen werden muss [139]. Die damit berechneten Pegel liegen jedoch erheblich über den gemessenen Werten.

d) Modernes Triebfahrzeug "Taurus" Der Vergleich mit den *sonRAIL* Berechnungen zeigt, dass die Messwerte insbesondere bei grossen Geschwindigkeit zu hoch berechnet werden. Daraus wird ersichtlich, dass vor allem bei Triebfahrzeugen die fahrzeugspezifischen Kennwerte (sekundäre Geräuschquellen) für eine genaue Modellrechnung bekannt sein müssen. Daher ist bei der Integration neuer Fahrzeugtypen in das *sonRAIL* Modell die Angabe von sekundären Quellenleistungen anzustreben.

7.2.4 Modellerweiterung für höhere Geschwindigkeiten

Anhand von Literaturangaben soll die Genauigkeit des Emissionsmodells für Geschwindigkeiten grösser 200 km/h abgeschätzt werden. Die Abbildung 7.78 enthält Messwerte von ICE und TGV Zügen für Geschwindigkeiten bis 450 km/h. Die Messwerte für ICE 1/2 Züge sind sowohl während der *sonRAIL* Messungen auf der Strecke Mattstetten-Rothrist, als auch vom Umweltbundesamt in Deutschland an einer Vielzahl von Messquerschnitten⁴ ermittelt worden. Die Messwerte sind dem Bericht "Geräuschemissionen von Eisenbahnen" [144] entnommen. Die Messwerte der ICE 3 Züge wurden von der EMPA im Jahre 2006 an der Neubaustrecke Köln-Rhein/Main erhoben [147]. Die Daten der TGV Fahrzeuge sind [148] entnommen und wurden am Fahrzeugtyp "Atlantique" gemessen.

Die Berechnungsergebnisse von *sonRAIL* liefern eine hohe Genauigkeit über den gesamten Geschwindigkeitsbereich. Die Steigung der Geschwindigkeitsabhängigkeit mit aerodynamischen Quellen beträgt $56.5 \lg v$. Werden ausschliesslich Antriebs- und Rollgeräuschquellen betrachtet, liegt die Steigung bei $33.9 \lg v$. Der Schnittpunkt beider Geraden gibt die Geschwindigkeit an, bei der Rollgeräusch und aerodynamische Quellenanteile gleich gross sind. Die mit *sonRAIL* berechneten Emissionswerte liegen auf den entsprechenden Geradenabschnitten und sind in der Abbildung 7.78 durch schwarze Rechtecke markiert. Im Geschwindigkeitsbereich zwischen 300 und 350 km/h werden zu hohe Emissionspegel berechnet. Dies deutet darauf hin, dass die aerodynamischen Anteile bei diesen Geschwindigkeiten zu hoch berechnet werden. Es sollte daher überprüft werden, ob die Bezugsgeschwindigkeit von 200 km/h als zu niedrig angesetzt wurde. Der Vergleich mit den Emissionspegeln ohne aerodynamische Quellen liefert in diesem Geschwindigkeitsbereich genauere Berechnungsergebnisse.

Die Messwerte der ICE 3 Züge liegen auf Grund des höheren Anteils angetriebener Achsen über den Messergebnissen der ICE 1 Fahrzeuge. Die *sonRAIL* Rechnungen werden mit den Werten für ICN Züge durchgeführt. Auf Grund der grösseren Anzahl angetriebener Achsen der ICE 3 Fahrzeuge werden 50% der Wagen mit ausgeprägten Sekundärquellen nach Tabelle 6.5 gerechnet. Die Messwerte werden mit hoher Genauigkeit reproduziert. Der Einfluss von Antriebsquellen ist im unteren Geschwindigkeitsbereich stärker ausgeprägt, es werden im Vergleich zu den ICE 1 Zügen um bis zu 5 dB(A) höhere Emissionswerte berechnet. Bei hohen Geschwindigkeit dominieren aerodynamische Quellen, die Emissionspegel gleichen sich den Triebkopffügen ICE 1 und TGV an.

⁴Die genauen Streckenabschnitte sind in [144] angegeben. Die hier verwendeten Daten wurden auf den Neubaustrecken Hannover-Würzburg, Berlin-Hannover sowie den Ausbaustrecken Hannover-Hamburg und Karlsruhe-Basel in den Jahren 1993-2001 gemessen.

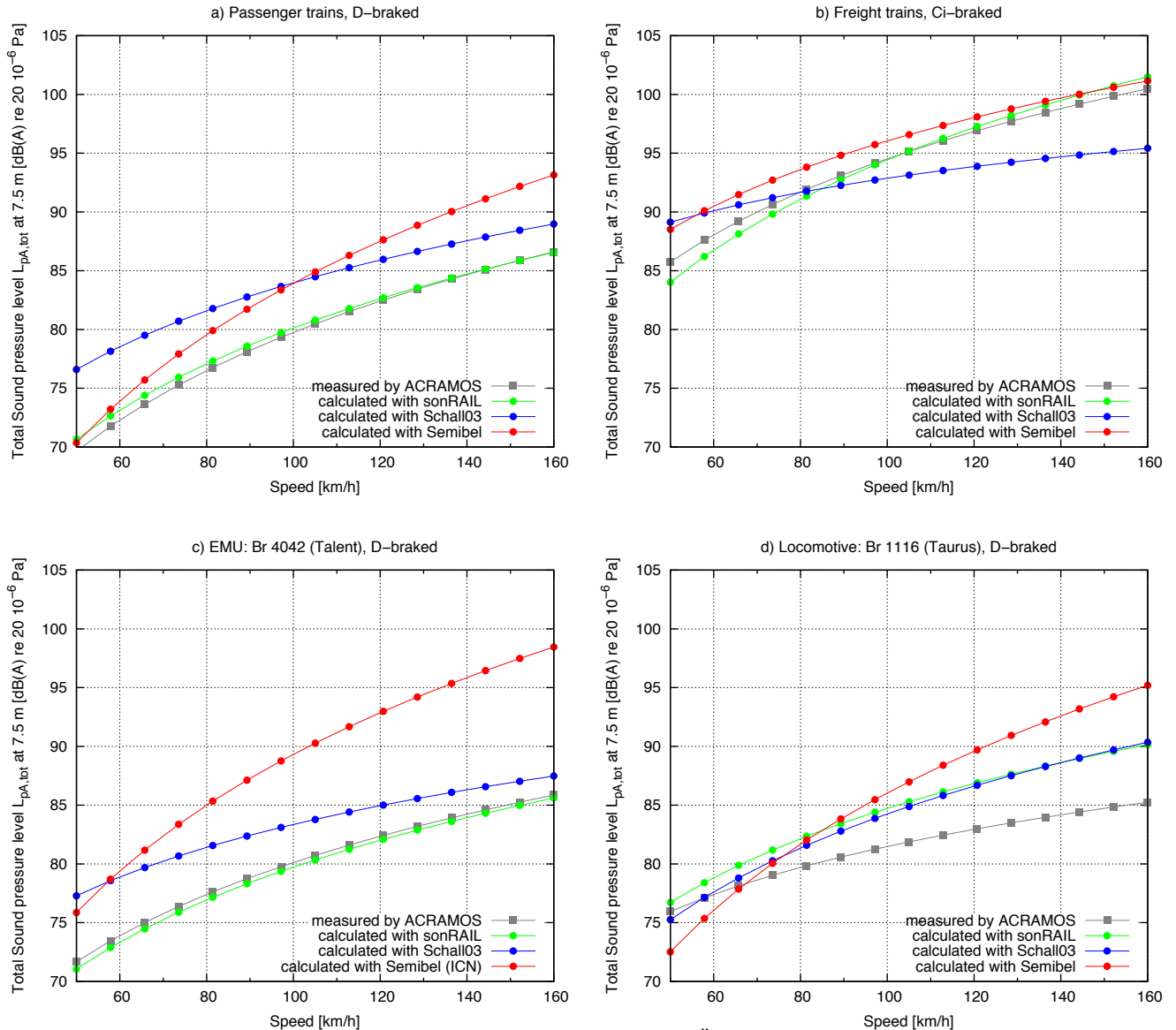


Abbildung 7.77: Vergleich der Messwerte an den Lärmmonitoringstation der ÖBB in D. Wagram [146] mit Berechnungen von Semibel, Schall03 2006 und sonRAIL

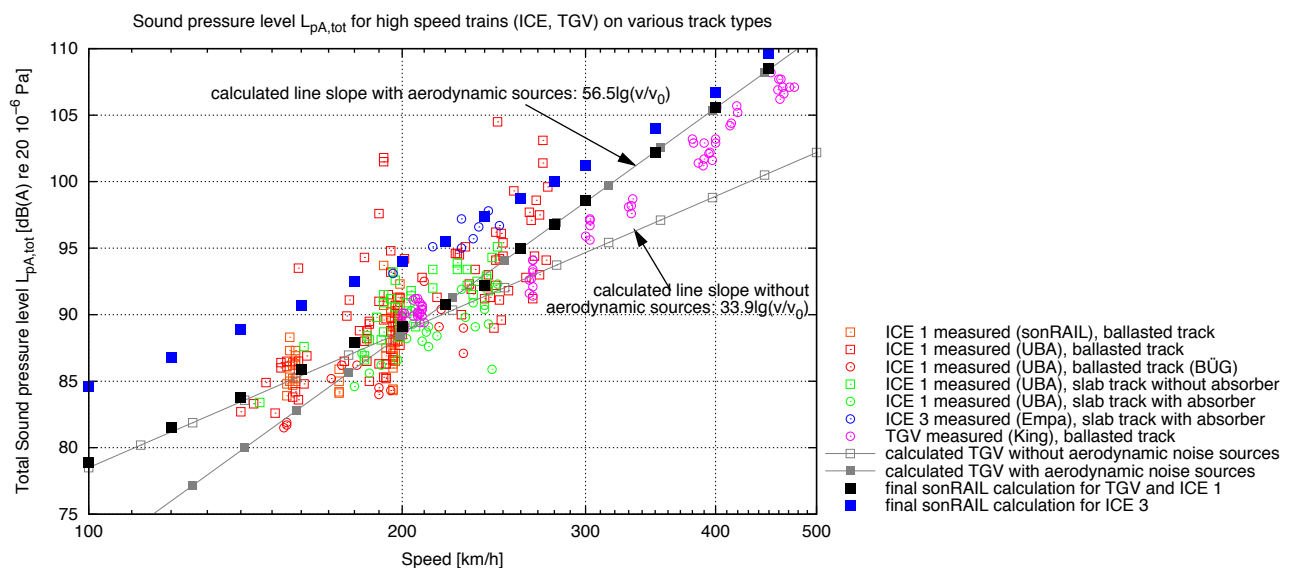


Abbildung 7.78: Vergleich der Emissionspegel im Abstand von 7.5 m von ICE [144], [147] und TGV Zügen [148] bei hohen Geschwindigkeiten auf unterschiedlichen Oberbautypen mit den Ergebnissen von sonRAIL Berechnungen

7.3 Validierung des Basis- und Meteo-Ausbreitungsmodells

Die Validierungen der Rechenmodule *Basis* und *Meteo* erfolgen anhand einer Palette von Referenzdaten. Diese stammen aus eigenen Messungen, Simulationen mit Referenzmodellen und in der Literatur dokumentierten Resultaten. Die folgenden Abschnitte beleuchten sämtliche relevanten Ausbreitungsaspekte in den beiden Modulen *Basis* und *Meteo* mit Ausnahme der alleine auf dem Abstand basierenden Effekte *geometrische Verdünnung* und *Luftdämpfung*. Die geometrische Verdünnung ist analytisch exakt beschreibbar, die Berechnung der Luftdämpfung folgt streng der ISO Norm 9613-1.

7.3.1 Bodeneffektberechnung bei homogener Atmosphäre und flachem Boden

7.3.1.1 Kurze Abstände

Die Validierung der Bodeneffektberechnung in kurzen Abständen bei flachem homogenem Boden prüft die korrekte Bestimmung des Kugelwellenreflexionskoeffizienten und die Implementierung der Interferenzberechnung. Als Referenz wird hier die Berechnung für den Testfall 1005 aus [149] bzw. [150] herangezogen.

Quellen-Empfänger-Abstand	20.0 m
Quellenhöhe	0.5 m
Empfängerhöhe	1.5 m
Bodengeometrie	flach
Strömungswiderstand	100'000 Rayl

Tabelle 7.21: Geometrie für den Test *Kurze Abstände*.

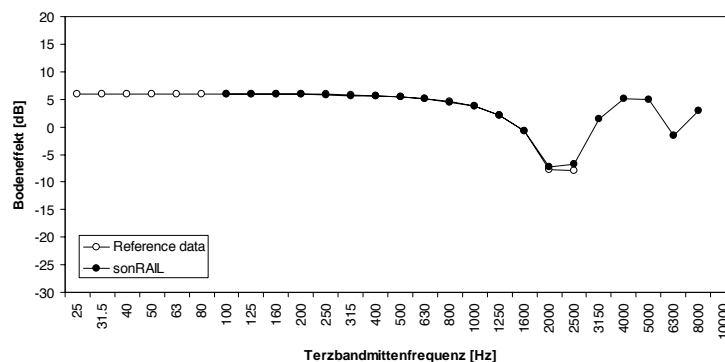


Abbildung 7.79: Vergleich der Bodeneffektrechnung mit Referenzdaten für Ausbreitung über flachem Boden.

Der Vergleich in Abbildung 7.79 zeigt exzellente Übereinstimmung im Bodeneffekt-Interferenzmuster.

7.3.1.2 Grosse Abstände

Gegenüber obigem Fall kommt bei grösseren Abständen die Berücksichtigung des Kohärenzverlustes hinzu. Dadurch wird die zunehmende frequenzabhängige Dekorrelation des Direktschalls und der Bodenreflexion abgebildet. Für die Validierung werden hier die Schallausbreitungsmessungen von Parkin und Scholes [151] bzw. die darauf basierenden Auswertungen von Daigle [26] herangezogen. Dabei wurden die Ergebnisse für neutrale Atmosphäre und Windstille verwendet. Der flache Boden wurde in der Rechnung aus je 5 m langen Segmenten zusammengesetzt.

Die Abbildung 7.80 zeigt die gute Reproduktion der Messergebnisse durch die *sonRAIL* -Berechnung mit Kohärenzverlust.

Quellen-Empfänger-Abstand	100 bis 600 m
Quellenhöhe	1.8 m
Empfängerhöhe	1.5 m
Bodengeometrie	flach
Strömungswiderstand	300 Rayl

Tabelle 7.22: Geometrie für den Test *Grosse Abstände*.

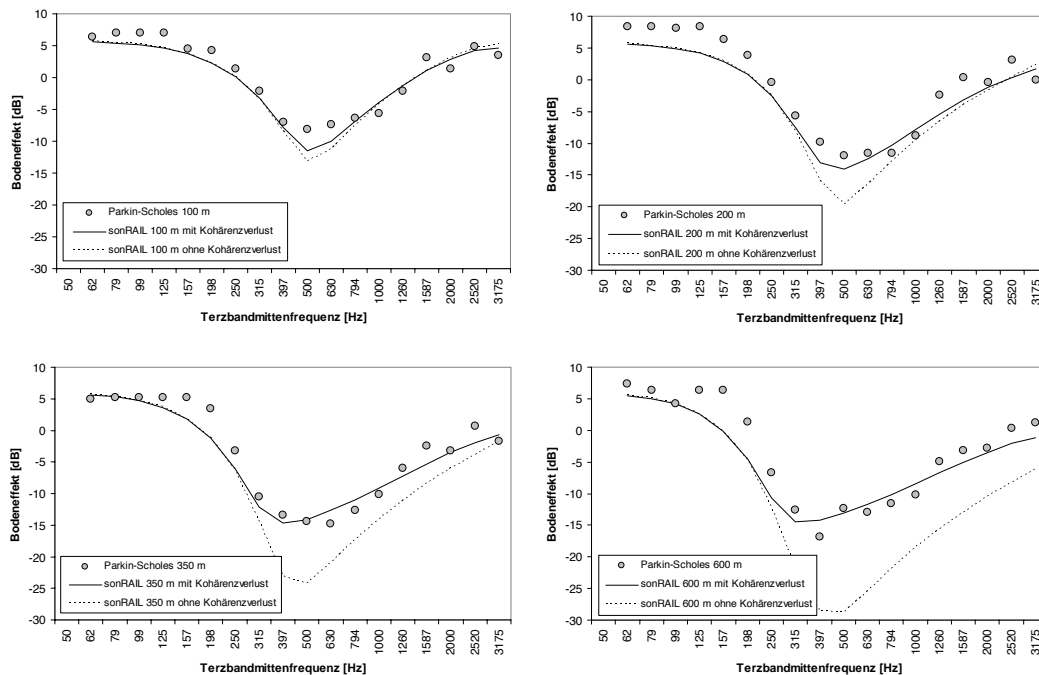


Abbildung 7.80: Vergleich der Messdaten des Bodeneffekts nach Parkin und Scholes mit der Berechnung nach *sonRAIL* mit und ohne Berücksichtigung des Kohärenzverlusts für die Abstände 100 m, 200 m, 350 m und 600 m. Alle Werte entsprechen Terzbandpegeln.

7.3.2 Bodeneffektberechnung bei homogener Atmosphäre und unebenem Boden

Die bisherigen Testfälle verwendeten alle ebenen Boden. Der Übergang zum realen Gelände mit unebenem Boden hat zur Folge, dass die reflektierenden Bodenflächen nicht mehr in jedem Fall gross sind. Als Folge davon ergeben sich Reflexionspfade, die je nur noch unvollständige, von einer Fresnelzonengewichtung abhängige Reflexionen erzeugen. Als Referenz wird der auf einer Messung basierende Testfall 1 aus [149] bzw. [150] herangezogen.

Quellen-Empfänger-Abstand	200.0 m
Quellenhöhe	1.0 m
Empfängerhöhe	1.5 m
Bodengeometrie	uneben, mit mehreren reflektierenden Segmenten
Strömungswiderstand	500 Rayl

Tabelle 7.23: Geometrie für den Test *unebener Boden*.

Die Gegenüberstellung in Abbildung 7.81 zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen *sonRAIL* -Rechnung und Messung.

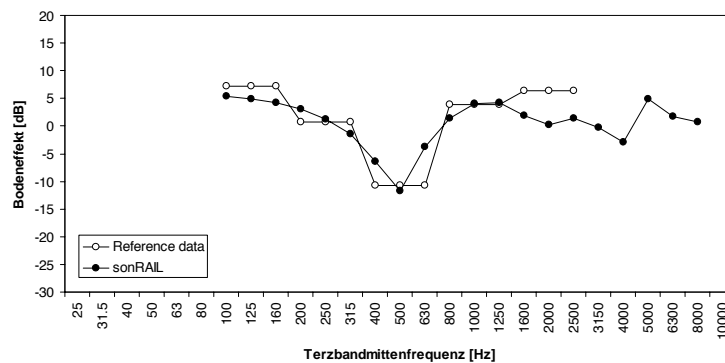


Abbildung 7.81: Vergleich der Bodeneffektrechnung mit Referenzdaten für Ausbreitung über unebenem Boden.

7.3.3 Hindernisberechnung bei homogener Atmosphäre

Bei den bisherigen Testfällen bestand direkte Sicht zwischen Quelle und Empfänger. Hier wird eine Ausbreitungssituation mit sperrendem Hindernis untersucht. Als Referenz wird die Berechnung für den Testfall 2024 aus [149] bzw. [150] verwendet.

Quellen-Empfänger-Abstand	20.0 m
Quellenhöhe	1.25 m
Empfängerhöhe	1.25 m
Bodengeometrie	flach mit 2 m hohem Hindernis ab Laufmeter 14 bis 15
Strömungswiderstand	100'000 Rayl

Tabelle 7.24: Geometrie für den Test *Hindernis*.

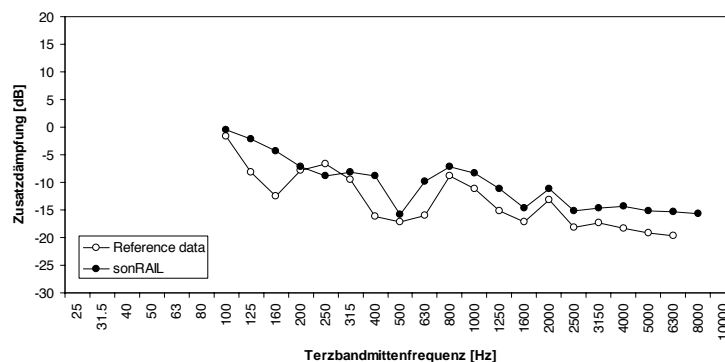


Abbildung 7.82: Vergleich der Zusatzdämpfung (Ausbreitungsdämpfung ohne geometrische Verdünnung) mit Referenzdaten im Fall mit Hindernis.

Der Vergleich zwischen *sonRAIL* -Berechnung und Referenz in Abbildung 7.82 zeigt eine gute Übereinstimmung.

7.3.4 Berechnung von Schallschattenzonen

Im Falle von sich ausbildenden Schallschattenzonen liefert die ray tracing Prozedur keine direkten Aussagen zu Empfängerpegeln. In diesen Fällen kommt ein empirisches Modell zur Anwendung, das aus bestimmten ray tracing Ergebnissen eine Abschätzung innerhalb der Schattenzonen erlaubt. Die Validierung dieses Modellteils erfolgt mittels

Vergleich von wellentheoretischen Simulationsergebnissen (FDTD) [152], [153]. Die Detail-Ergebnisse sind in [47] dokumentiert.

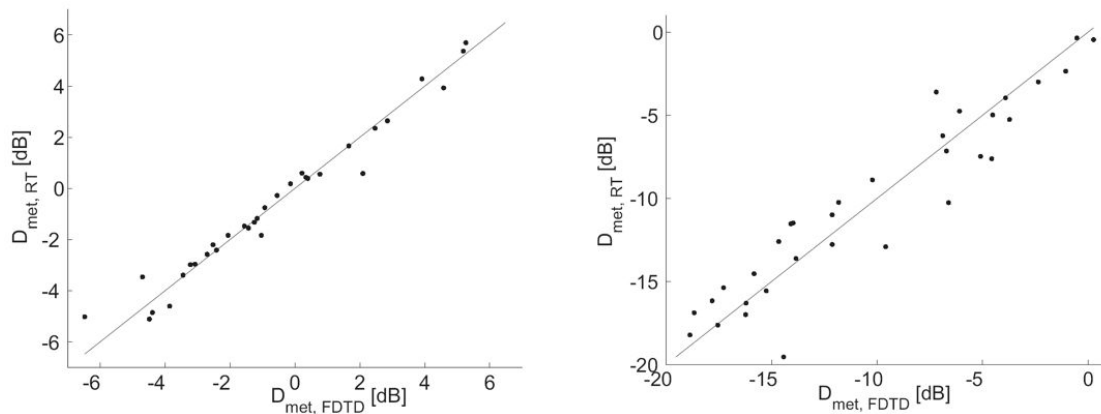


Abbildung 7.83: Mit dem empirischen Schallschattenmodell berechneter Meteeffekt $D_{met,RT}$ im Vergleich zum wellentheoretischen Referenzmodell $D_{met,FDTD}$ für 250 Hz (links) und 1600 Hz (rechts).

Die Gegenüberstellung der *sonRAIL* -Berechnung mit den wellentheoretischen Simulationen in Abbildung 7.83 zeigt eine gute Übereinstimmung.

Als weiterer Testfall werden eigene Lautsprechermessungen herangezogen, die auf der Thuner Allmend am 27. Juni 2002 durchgeführt wurden. Dazu wurde über flachem Grasboden das von einem Lautsprecher abgestrahlte Signal in den Abständen 102 m (R1), 198 m (R2) und 376 m (R3) aufgezeichnet und ausgewertet. Der Lautsprecher war 1 m über Boden und die Mikrofone 4 m über Boden platziert. Die Messungen fanden am Morgen zwischen 9:30 und 10:30 bei klarem Himmel und starker Einstrahlung statt. Der Wind wurde auf 4 m Höhe erfasst und blies im Mittel mit 0.7 m/s aus 80°, was einer Gegenwindssituation entspricht. In Kombination mit der sehr labilen Schichtung resultierten stark hinderliche Messbedingungen. Die Abbildungen 7.84 bis 7.84 zeigen die gemessenen Zusatzdämpfungen im Vergleich zu den Berechnungen.

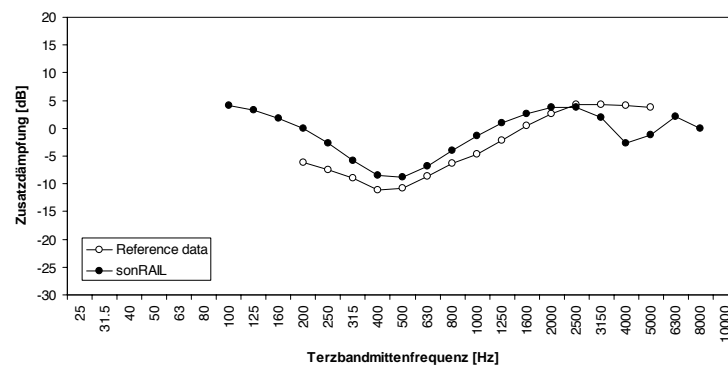


Abbildung 7.84: Vergleich der Zusatzdämpfung (Ausbreitungsdämpfung ohne geometrische Verdünnung) mit Referenzdaten anhand von Lautsprechermessungen für die Empfängerposition R1.

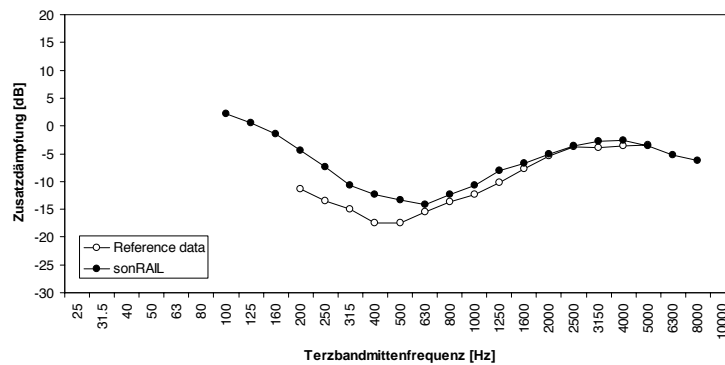


Abbildung 7.85: Vergleich der Zusatzdämpfung (Ausbreitungsdämpfung ohne geometrische Verdünnung) mit Referenzdaten anhand von Lautsprechermessungen für die Empfängerposition R2.

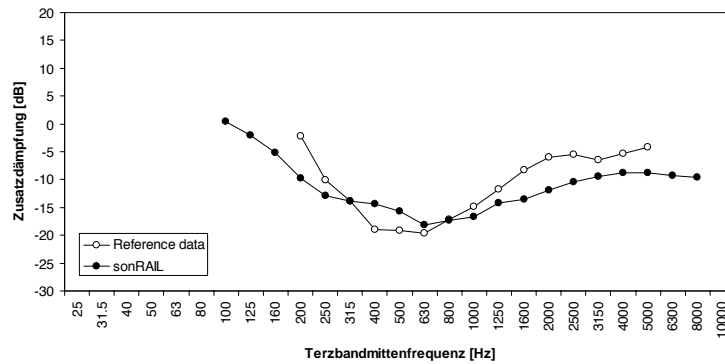


Abbildung 7.86: Vergleich der Zusatzdämpfung (Ausbreitungsdämpfung ohne geometrische Verdünnung) mit Referenzdaten anhand von Lautsprechermessungen für die Empfängerposition R3.

7.4 Validierung des Reflexionsmodells (überbautes Gebiet und künstliche Hindernisse)

Zur Validierung des kohärenten Reflexionsmodells wurden Vergleiche mit Massstabsmodellexperimenten und numerischen, wellentheoretischen Simulationen mit einem FDTD [153] Ansatz durchgeführt. Die Berechnungen erfolgten für die diskreten Frequenzen 250, 500 und 1000 Hz bei einer fixen Diskretisierung der Reflektorflächen von $\Delta x = \Delta y = 0.2$ m. Der an einer Empfängerposition gültige Schalldruck wurde als Mittelwert über eine Kreisfläche mit Radius 1.0 m bestimmt. Durch diese Mittelung wurde die Empfindlichkeit gegenüber lokalen Interferenzmustern reduziert, vergleichbar mit der Mittelung über ein Oktavband. Die in der Folge ausgewiesenen Immissionspegel sind relativ zum von der Quelle in 1 m Abstand erzeugten Schalldruck zu verstehen.

Das physikalische Modell wurde im Massstab 1:16 aufgebaut. Als Quelle wurde ein in eine kleine Kavität eingebautes Piezo-Hochtonhorn verwendet. Die Kavität war mit einem Konus mit rund 2 mm grosser Öffnung für die Abstrahlung versehen (Abbildung 7.87). Mit dieser Anordnung wurde eine weitgehend runde Abstrahlcharakteristik erreicht, allerdings zum Preis einer bedeutenden zeitlichen Verschmierung der Quellenimpulsantwort. Da das ganze zu untersuchende System als linear betrachtet werden kann, führt diese Verschmierung aber lediglich zu einer entsprechenden Faltung mit der Systemimpulsantwort. Der Frequenzumfang des Lautsprechers erstreckt sich von 3 kHz bis 40 kHz. Dies übersetzt sich in eine Spanne von 190 Hz bis 2.5 kHz im 1:16 Massstab. Damit ist die Auswertung der 250, 500, 1000 und 2000 Hz Oktaven möglich. Empfängerseitig wurde der Schalldruck mit einem 1/4" B&K Mikrofon vom Typ 4135 aufgenommen. Zwischen Lautsprecher und Mikrofon wurde mit einem MLSSA System die Impulsantwort bestimmt. Die im Modellfrequenzbereich besonders hoch ausfallende Luftdämpfung wurde rechnerisch kompensiert. Dazu wurde jeweils die Lufttemperatur und -feuchte gemessen und daraus die Dämpfungskonstante α [dB/km] mit ISO 9613-1 berechnet. Die gemessene und mit dem Oktavband n gefilterte Impulsantwort $h_n(t)$ wurde dann mit Gleichung (7.3) in die um die Luftdämpfung bereinigte Impulsantwort $h'_n(t)$ überführt.

$$h'_n(t) = h_n(t) 10^{\left(\frac{\alpha_n \cdot t}{29.4172}\right)} \quad (7.3)$$



Abbildung 7.87: Quelle für die Massstabsmodellexperimente. Die Abstrahlöffnung ist am unteren Ende des schwarzen Konusses und hat einen Durchmesser von 2 mm.

Die untersuchten Geometrien bestanden aus jeweils drei quaderförmigen Gebäuden der Abmessungen $10 \times 8 \times 9$ m (Länge \times Breite \times Höhe im Originalmassstab). Die Oberflächen waren glatt und akustisch hart. Die Quader standen alle auf einer Ebene mit der z -Koordinate $= 0$ und hatten immer die gleiche Ausrichtung, wobei die grösste Ausdehnung in y -Richtung zeigte. Das Mikrofon war auf einer Höhe von 4.0 m direkt auf der Oberfläche eines der Gebäude installiert. Diese Grenzflächenmontage führt zu einer Schalldruckverdopplung gegenüber Freifeld. Für jede Gebäudeanordnung wurden jeweils fünf identische Quellenpositionen mit Höhe $z = 0$ gewählt.

Situation A

Abbildung 7.88 zeigt die Geometrie für die Situation A. Für die Quellenpositionen a und b existiert eine gültige Spiegelreflexion. Die Tabelle 7.25 zeigt die gemessenen und mit dem Modell berechneten Empfangspunktpegel.

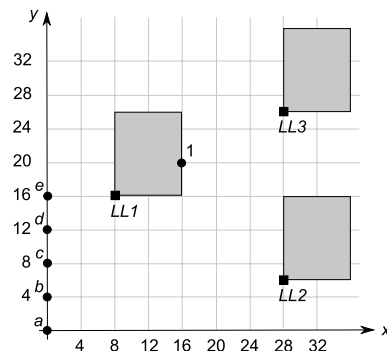


Abbildung 7.88: Geometrie für die Situation A, bestehend aus fünf Quellenpositionen a bis e , drei Gebäuden mit den Eckpunkten unten links $LL1$ bis $LL3$ sowie der Empfängerposition 1. Die Achsbeschriftung ist in Meter im 1:1 Masstab.

	M:250	R-M:250	M:500	R-M:500	M:1000	R-M:1000
a	-27.1	1.0	-25.4	-0.2	-24.9	0.3
b	-29.5	1.1	-29.2	0.5	-27.4	0.2
c	-32.7	0.7	-33.4	-0.4	-34.4	-0.1
d	-33.9	-1.9	-36.8	-2.3	-39.8	-1.7
e	-39.8	0.7	-41.5	-1.6	-45.0	-0.9

Tabelle 7.25: Gemessene (M) Schalldruckpegel in [dB] an der Empfängerposition 1 für die fünf Quellenpositionen a bis e in den drei Oktavbändern 250, 500 und 1000 Hz. Die Spalten ($R-M$) beschreiben die Pegeldifferenz Rechnung minus Messung.

Situation B

Abbildung 7.89 zeigt die Geometrie für die Situation B. Es gibt keine Quellenposition mit einer gültigen Spiegelreflexion. Die Tabelle 7.26 zeigt die gemessenen und mit dem Modell berechneten Empfangspunktpegel.

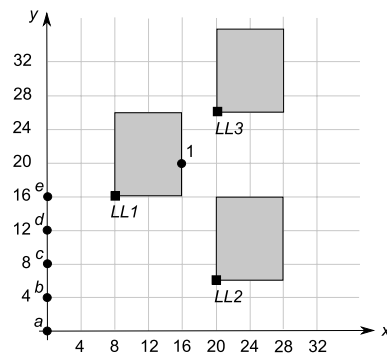


Abbildung 7.89: Geometrie für die Situation B, bestehend aus fünf Quellenpositionen a bis e , drei Gebäuden mit den Eckpunkten unten links $LL1$ bis $LL3$ sowie der Empfängerposition 1.

	M:250	R-M:250	M:500	R-M:500	M:1000	R-M:1000
a	-30.6	-2.7	-33.3	-0.2	-36.2	3.1
b	-33.4	-2.3	-35.6	-1.1	-39.1	0.5
c	-36.4	-1.2	-37.1	-3.2	-41.1	-1.3
d	-35.7	-5.2	-37.9	-4.8	-41.8	-3.0
e	-41.6	-1.9	-42.4	-2.6	-45.1	-1.0

Tabelle 7.26: Gemessene (M) Schalldruckpegel in [dB] an der Empfängerposition 1 für die fünf Quellenpositionen a bis e in den drei Oktavbändern 250, 500 und 1000 Hz. Die Spalten ($R-M$) beschreiben die Pegeldifferenz Rechnung minus Messung.

Situation C

Abbildung 7.90 zeigt die Geometrie für die Situation C. Für die Quellenpositionen a, b, c existiert eine gültige Spiegelreflexion. Die Tabelle 7.27 zeigt die gemessenen und mit dem Modell berechneten Empfangspunktpegel.

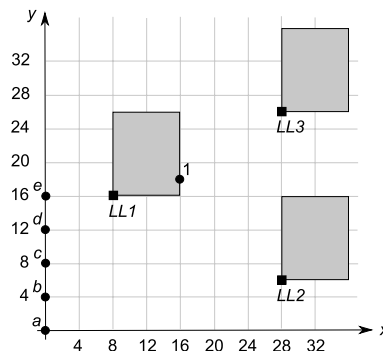


Abbildung 7.90: Geometrie für die Situation B, bestehend aus fünf Quellenpositionen a bis e , drei Gebäuden mit den Eckpunkten unten links $LL1$ bis $LL3$ sowie der Empfängerposition 1.

	M:250	R-M:250	M:500	R-M:500	M:1000	R-M:1000
a	-24.2	0.5	-25.1	-2.2	-24.3	-1.3
b	-25.3	0.2	-24.4	-1.0	-23.8	-1.1
c	-28.2	0.2	-28.2	0.7	-26.0	0.2
d	-30.3	-1.7	-32.7	0.0	-33.8	0.8
e	-36.9	0.9	-39.1	1.1	-42.1	2.1

Tabelle 7.27: Gemessene (M) Schalldruckpegel in [dB] an der Empfängerposition 1 für die fünf Quellenpositionen a bis e in den drei Oktavbändern 250, 500 und 1000 Hz. Die Spalten ($R-M$) beschreiben die Pegeldifferenz Rechnung minus Messung.

Situation D

Abbildung 7.91 zeigt die Geometrie für die Situation D. Für die Quellenpositionen a, b, c, d existiert eine gültige Spiegelreflexion. Die Tabelle 7.28 zeigt die gemessenen und mit dem Modell berechneten Empfangspunktpegel.

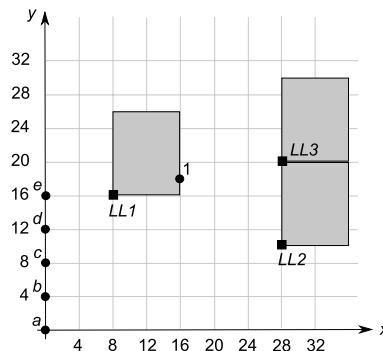


Abbildung 7.91: Geometrie für die Situation B, bestehend aus fünf Quellenpositionen a bis e , drei Gebäuden mit den Eckpunkten unten links $LL1$ bis $LL3$ sowie der Empfängerposition 1.

	M:250	R-M:250	M:500	R-M:500	M:1000	R-M:1000
a	-25.6	1.4	-24.2	-1.1	-25.6	-1.7
b	-24.6	0.7	-25.4	-2.8	-24.6	-1.4
c	-25.7	-0.6	-24.9	-2.4	-24.2	-2.2
d	-23.9	-0.9	-24.6	-0.1	-23.5	0.1
e	-31.3	-7.0	-32.0	-3.4	-33.0	-2.9

Tabelle 7.28: Gemessene (M) Schalldruckpegel in [dB] an der Empfängerposition 1 für die fünf Quellenpositionen a bis e in den drei Oktavbändern 250, 500 und 1000 Hz. Die Spalten ($R-M$) beschreiben die Pegeldifferenz Rechnung minus Messung.

Vier weitere Referenz-Testfälle wurden mit einer wellentheoretischen Simulation generiert. Dazu wurde ein 2D FDTD-Algorithmus mit einer räumlichen Diskretisierung von 0.02 m verwendet [152],[153]. Der Algorithmus wurde mit einem lokal begrenzten Druckpuls als Anfangsbedingung gestartet. Durch Verfolgen der zeitlichen Evolution des Schallfeldes konnte an einem beliebigen Gitterpunkt eine Impulsantwort ermittelt werden. Die mit der 2D Berechnung gefundenen Impulsantworten wurden durch Gewichtung mit $1/\sqrt{r}$ ($r = ct$ und $c =$ Schallgeschwindigkeit) auf den dreidimensionalen Fall umgerechnet. Dabei wurde vorausgesetzt, dass die Gebäude wesentlich höher sind als die ersten Fresnelzonen auf den Fassadenflächen. Die Überführung der Zeitbereichsergebnisse in den Frequenzbereich erfolgte mittels Fouriertransformation.

Wie schon bei den Masstabsmodellexperimenten setzte sich die Situation aus drei quaderförmigen Gebäuden K, L, M mit glatten und akustisch harten Oberflächen zusammen (Abbildung. 7.92). Wiederum standen die 9 m hohen Gebäude auf der Ebene mit $z = 0$. Die vier Empfänger wurden in einer Höhe von 4 m unmittelbar auf der Fassade in Grenzfliächenanordnung angenommen (Schalldruckverdopplung). Für jeden Empfängerpunkt wurden die gleichen fünf Quellenpunkte auf der Höhe $z = 0$ untersucht.

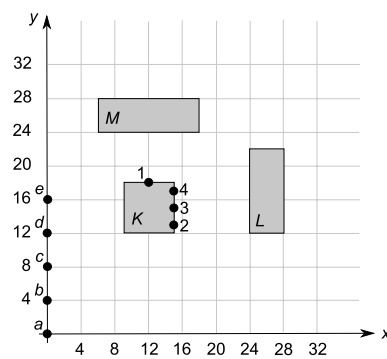


Abbildung 7.92: Geometrie für das FDTD Modell.

Situation E: Empfängerposition 1

Für die Quellenpositionen a, b, c, d, e existiert eine gültige Spiegelreflexion. Die Tabelle 7.29 zeigt die gemessenen und mit dem Modell berechneten Empfangspunktpegel.

	F:250	R-F:250	F:500	R-F:500	F:1000	R-F:000
a	-24.0	0.6	-23.3	-1.7	-24.5	0.9
b	-21.7	0.4	-22.8	-1.6	-24.1	1.6
c	-20.0	0.4	-22.3	0.6	-22.8	1.2
d	-19.6	0.5	-19.3	-0.7	-21.8	1.1
e	-20.3	-0.8	-20.0	-1.3	-19.3	-0.8

Tabelle 7.29: Mit dem FDTD Modell simulierte (F) Schalldruckpegel in [dB] an der Empfängerposition 1 für die fünf Quellenpositionen a bis e in den drei Oktavbändern 250, 500 und 1000 Hz. Die Spalten ($R-F$) beschreiben die Pegeldifferenz Rechnung minus FDTD Simulation.

Situation F: Empfängerposition 2

Für die Quellenpositionen d, e existiert eine gültige Spiegelreflexion. Die Tabelle 7.30 zeigt die gemessenen und mit dem Modell berechneten Empfangspunktpegel.

	F:250	R-F:250	F:500	R-F:500	F:1000	R-F:000
a	-30.4	-4.3	-32.6	-3.9	-36.0	7.0
b	-30.4	-0.9	-31.8	-4.2	-35.2	-2.7
c	-27.4	1.9	-29.0	-2.9	-32.0	-0.4
d	-29.5	-1.0	-30.0	0.7	-31.0	1.6
e	-24.9	-2.3	-23.5	0.9	-26.5	1.5

Tabelle 7.30: Mit dem FDTD Modell simulierte (F) Schalldruckpegel in [dB] an der Empfängerposition 2 für die fünf Quellenpositionen a bis e in den drei Oktavbändern 250, 500 und 1000 Hz. Die Spalten ($R-F$) beschreiben die Pegeldifferenz Rechnung minus FDTD Simulation.

Situation G: Empfängerposition 3

Für die Quellenpositionen b, c existiert eine gültige Spiegelreflexion, Position e erzeugt eine Reflexion 2. Ordnung. Die Tabelle 7.31 zeigt die gemessenen und mit dem Modell berechneten Empfangspunktpegel.

	F:250	R-F:250	F:500	R-F:500	F:1000	R-F:000
a	-31.6	1.8	-34.4	1.6	-36.4	8.6
b	-28.4	0.7	-30.0	1.1	-31.1	1.0
c	-25.9	3.2	-25.8	3.4	-25.4	2.9
d	-29.7	-2.5	-30.7	-2.4	-34.8	-1.8
e	-25.5	-2.8	-25.7	1.4	-25.6	1.5

Tabelle 7.31: Mit dem FDTD Modell simulierte (F) Schalldruckpegel in [dB] an der Empfängerposition 3 für die fünf Quellenpositionen a bis e in den drei Oktavbändern 250, 500 und 1000 Hz. Die Spalten ($R-F$) beschreiben die Pegeldifferenz Rechnung minus FDTD Simulation.

Situation H: Empfängerposition 4

Für die Quellenpositionen a, b existiert eine gültige Spiegelreflexion, Positionen a, b, c erzeugen eine Reflexion 3. Ordnung. Die Tabelle 7.32 zeigt die gemessenen und mit dem Modell berechneten Empfangspunktpegel.

	F:250	R-F:250	F:500	R-F:500	F:1000	R-F:1000
a	-28.6	0.3	-28.4	-0.1	-29.2	2.2
b	-25.9	1.4	-23.4	-2.2	-24.5	0.4
c	-25.7	-0.4	-27.4	-1.5	-29.9	1.2
d	-29.6	-3.3	-32.8	-0.5	-34.4	-6.5
e	-27.2	-0.5	-28.6	-0.3	-29.8	1.2

Tabelle 7.32: Mit dem FDTD Modell simulierte (*F*) Schalldruckpegel in [dB] an der Empfängerposition 4 für die fünf Quellenpositionen *a* bis *e* in den drei Oktavbändern 250, 500 und 1000 Hz. Die Spalten (*R-F*) beschreiben die Pegeldifferenz Rechnung minus FDTD Simulation.

7.4.0.1 Diskussion

Die Testfälle A bis H zeigen, dass der von einer Reflexion stammende Schalldruck am Empfänger relativ sanft abnimmt, wenn die Quelle so verschoben wird, dass - geometrisch betrachtet - keine Spiegelreflexion mehr stattfindet. Dieser Übergang wird durch das vorgestellte Rechenmodell mit guter Genauigkeit nachgebildet. Bei rein geometrischen Modelle wie ray tracing oder Spiegelquellenansätzen schaltet dagegen die Schalldruckprognose für den Schattenbereich unmittelbar auf 0. Diese Modelle unterschätzen die Reflexionen in Situationen ohne gültige Spiegelquellen ganz deutlich.

Unter Berücksichtigung aller Vergleiche ergibt sich die in Tabelle 7.33 gezeigte Statistik. Die Abbildung 7.93 zeigt die entsprechenden XY Plots. Die grössten Abweichungen finden sich bei 1 kHz für die Quellenposition *a* in den Situationen F und G. In beiden Fällen sind die Reflexionen schwach und werden durch das Modell für kohärente Reflexionen gegenüber den FDTD Simulationen überschätzt. Da die Differenzen frequenzabhängig sind, liegt die Vermutung nahe, dass bei 1 kHz im Falle der FDTD Simulation Interferenzeffekte zu einer Abschwächung geführt haben. Abgesehen von diesen Ausreissern findet sich eine gute Übereinstimmung zwischen dem neuen Modell und den Referenzdaten. Im Mittel liegen die Differenzen unter 1 dB, die Standardabweichungen sind etwas grösser. Die Unsicherheit reduziert sich weiter bei bewegten Quellen auf Grund der Ausmittelung über verschiedene Quellenpositionen deutlich.

	250 Hz	500 Hz	1000 Hz
Durchschnitt [dB]	0.6	1.0	-0.3
Standardabweichung [dB]	2.0	1.8	2.6

Tabelle 7.33: Statistik der Modellabweichungen gegenüber Masstabsmodellmessungen und FDTD Simulationen.

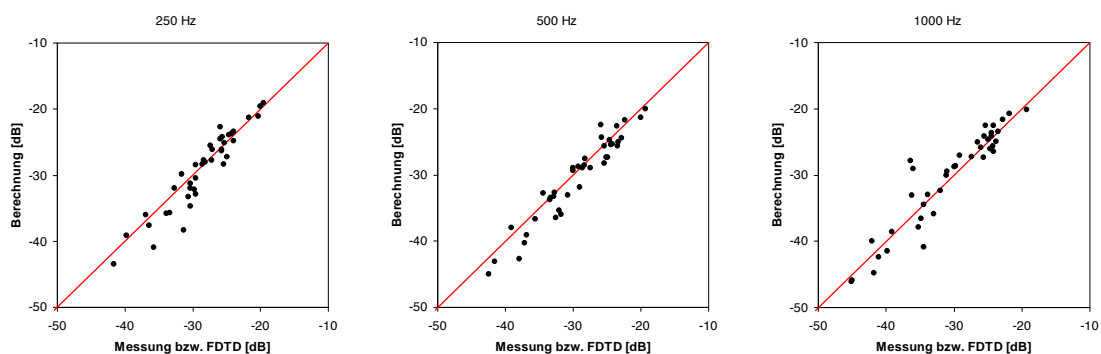


Abbildung 7.93: XY Plots der Gegenüberstellung der Berechnungen und der Masstabsmodell- und FDTD Resultate. Alle dB Werte sind als Empfängerpegel bezogen auf 1 m Abstand unter Freifeldbedingungen zu verstehen.

7.5 Validierung des Modells für Waldreflexionen

Die Validierung des Waldreflexionsmodells wird basierend auf Messungen an vier Standorten vorgenommen. Die Messsituationen von Thun und Dinhard befanden sich in flachem Gelände und die Situationen von Eglisau und Wald an Hanglagen.

Die Messungen in Dinhard, Eglisau und Wald fanden in kurzen Abständen vom Waldrand statt, so dass meteorologische Einflüsse auf die Schallausbreitung vernachlässigt werden können. In Thun wurden während mehrerer Messkampagnen verschiedene Messgeometrien vermessen, mit Quellen welche bis zu 500 m vom Waldrand entfernt lagen und Empfänger mit Abständen bis zu 300 m. Bei diesen Distanzen spielt das Wetter eine bedeutende Rolle auf die Immissionspegel, weshalb die Wetterbedingungen an den einzelnen Tagen separat diskutiert werden.

7.5.1 Beschreibung der Messsituationen

Die Messungen in Thun wurden entlang eines geraden Waldrandes von 650 m Länge auf flachem Gelände durchgeführt. Der Baumbestand wies mehrheitlich Laubbäume auf (siehe Abbildung 7.94). Die Waldtiefe betrug zwischen 80 und 120 m.

Als Quelle dienten jeweils 5 bis 10 Sprengungen ab Stahlplatte, entweder von 200 g TNT oder von 50 g Plastit. Die Emissionsdaten der Quellen wurden rechnerisch gemäss der Theorie von Weber bestimmt (siehe [154], [155]), wobei die Pegelerhöhung aufgrund des Untergrundes sowie die Quellenhöhen von 1.15 m resp. 0.70 m gemäss [156] ermittelt wurden. Die resultierenden Schallleistungsspektren sind, zusammen mit den weiteren verwendeten Schallquellen, in Tabelle 7.37 aufgeführt.

Die verschiedenen Messgeometrien sind in Tabelle 7.34 zusammengestellt. Abbildung 7.95 zeigt zur Illustration eine Skizze der Messsituation aus dem Jahr 2007. Generell waren die Mikrofone in einer Höhe von 4 m eingerichtet.

Die meteorologischen Bedingungen wurden entweder mit einer konventionellen Wetterstation vom Typ Reinhardt MWS 9 auf einer Höhe von 10 m oder mit einem dreidimensionalen Ultraschall-Anemometer vom Typ Metek USA1 auf Höhen von 3 bzw. 4 m erfasst. Im Jahr 2007 wurden zusätzlich Temperaturmessungen auf Höhen von 1, 3 und 10 m durchgeführt.

Die Messungen im Jahr 2002 wurden an drei separaten Tagen durchgeführt. Tag 1 war hochsommerlich warm bei leichter Bewölkung und geringem Wind zwischen 0 und 2 m/s. Die Hauptwindrichtung betrug 26°, was einem Wind von Quelle in Richtung Empfänger entspricht. Am zweiten Tag war der Himmel klar. Es blies ein böiger Wind mit Geschwindigkeiten zwischen 2 und 6 m/s. Die mittlere Windrichtung betrug 328°, was ebenfalls eine Mitwindrichtung darstellt. Die dritte Durchführung fand an einem Morgen im Oktober statt. Anfänglich war es windstill und es zeigte sich, dass die nächtliche Bodeninversion noch präsent war. Im Laufe der Messungen kam ein Gegenwind von 2 bis 4 m/s aus Richtung 136° auf, welcher zusammen mit der stärkeren Einstrahlung die Inversion zum verschwinden brachte.

Die Messkampagne 2003 fand im September an einem sonnigen Tag statt, mit 1 bis 2 m/s Wind aus einer mittleren Richtung von 133°.

Im Jahr 2007 wurde die Messgeometrie von 2003 nochmals repetiert. Dieses mal allerdings bei Dunkelheit, nahezu windstillen Verhältnissen und klarem Himmel. Diese Messsituation war mit dem Ziel gewählt worden, eine nächtliche Inversionslage zu erfassen und damit in alle Ausbreitungsrichtungen förderliche Bedingungen anzutreffen. Die Auswertungen der Temperatursensoren bestätigen, dass sich während den Messungen eine bodennahe Inversion ausgebildet hatte.

Die Messdaten der Jahre 2002 und 2003 wurden mit Schallpegelmessern vom Typ Brüel & Kjaer 2230 erfasst und auf DAT-Recordern vom Typ Sony TCD D-10 PRO aufgezeichnet. Direktschall und Waldreflexion wurden durch eine zeitliche Fensterung getrennt. Die spektrale Analyse wurde für Oktavbänder von 31.5 Hz bis 4 kHz durchgeführt. Im Jahr 2007 wurden die Messdaten mit Schallpegelmessern vom Typ Brüel & Kjaer 2238 erfasst und auf portablen Audiorecordern vom Typ Sound Device 702T bzw. 744T aufgezeichnet. Exemplarisch zeigt Abbildung 7.96 den A-bewerteten Pegel-Zeit-Verlauf für zwei Messgeometrien. Direktschall und Waldreflexion wurden wiederum zeitlich gefenstert und es wurden für beide Anteile Terzbandspektren von 10 Hz bis 10 kHz bestimmt.

Die Messungen in Thun wurden durch eine weitere Situation mit Waldreflexionsmessungen in der Ebene ergänzt, welche im Rahmen früherer Aktivitäten der Empa zu diesem Thema 1993 erfolgt waren. Dabei wurden an einem geraden Waldstück in der Nähe der Ortschaft Dinhard Messungen mit einer Quellenposition in 50 m Abstand vor dem Waldrand sowie drei Mikrofonpositionen in kürzeren Abständen durchgeführt. Die Messgeometrie ist in Tabelle 7.35 aufgeführt. Als Quelle diente eine Ordonanz-Pistole Jahrgang 1949, mit welcher zehn Schuss Markiermunition abgefeuert wurden. Das entsprechende Schallleistungsspektrum kann Tabelle 7.37 entnommen werden. Der Wald



Abbildung 7.94: Abbildung des Waldrandes am Messort Thun.

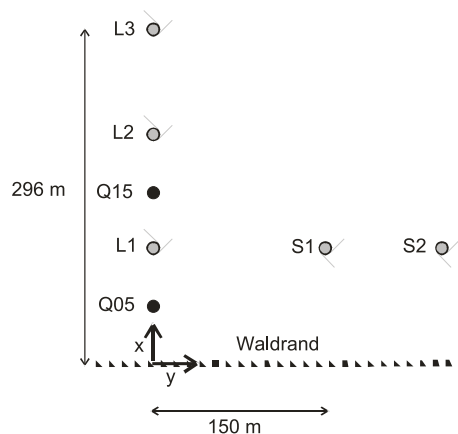


Abbildung 7.95: Graphische Darstellung der Messsituation in Thun des Jahres 2007.

bestand mehrheitlich aus Nadelbäumen mit einem bedeutenden Anteil an Laubbäumen (siehe Abbildung 7.97). Auf eine Aufzeichnung von Wetterdaten wurde aufgrund der kurzen Abstände verzichtet.

Die Messdaten wurden mit Schallpegelmessern vom Typ Brüel & Kjaer 2230 erfasst und auf DAT-Recordern vom Typ Sony TCD D-10 PRO aufgezeichnet. In Abbildung 7.98 sind die gemittelten Pegel-Zeit-Verläufe der drei Mikrofonpositionen dargestellt. Direktschall und Waldreflexion wurden wiederum durch eine zeitliche Fensterung getrennt. Die spektrale Analyse wurde für Oktavbänder von 63 Hz bis 4 kHz durchgeführt.

Ergänzend zu den Messsituationen über flachem Gelände wurden an zwei Situation Messungen in Hanglagen durchgeführt. Ein Standort befand sich bei Eglisau, am Rand eines Nadelwaldes mit einer mittleren Geländeneigung von 27 %. Der zweite Standort war in der Nähe der Ortschaft Wald mit einem Gefälle von rund 50 %. Der Wald bestand dort aus Laubbäumen mit ausladenden, tief herunter reichenden Ästen. In beiden Situationen wurden verschiedene Quellen- und Empfängergeometrien mit dem Ziel gemessen, einen umfangreichen Satz an vertikalen Reflexionswinkeln zu erfassen. Vier Mikrofone wurden dazu an einem 12 m hohen Mast in jeweils 3 m Abstand

Datum	Uhrzeit	Quelle	Typ	X	Y	Empfänger	X	Y
2002-06-27	9:15 - 10:45	Q50	200 g TNT	505 m	0 m	W1	173 m	0 m
						W2	79 m	0 m
2002-07-04	8:30 - 11:00	Q50	200 g TNT	505 m	0 m	W1	173 m	0 m
						W2	79 m	0 m
2002-10-31	8:30 - 11:00	Q50	200 g TNT	505 m	0 m	W2	79 m	0 m
						W3	29 m	0 m
2003-09-05	10:45 - 11:15	Q05	50 g Plastit	47 m	0 m	L1	97 m	0 m
						L2	197 m	0 m
						L3	296 m	0 m
						S2	100 m	150 m
						S3	100 m	250 m
2003-09-05	11:20 - 11:50	Q15	50 g Plastit	147 m	0 m	L1	97 m	0 m
						L2	197 m	0 m
						L3	296 m	0 m
						S2	100 m	150 m
						S3	100 m	250 m
2007-11-06	20:00 - 20:50	Q05	50 g Plastit	47 m	0 m	L1	97 m	0 m
						L2	197 m	0 m
						L3	296 m	0 m
						S1	100 m	75 m
						S2	100 m	150 m
2007-11-06	21:00 - 21:40	Q15	50 g Plastit	147 m	0 m	L1	97 m	0 m
						L2	197 m	0 m
						L3	296 m	0 m
						S1	100 m	75 m
						S2	100 m	150 m

Tabelle 7.34: Messgeometrie der Messsituation in Thun. (Bemerkung: Der Nullpunkt des Koordinatensystems ist am Waldrand festgelegt mit mindestens 250 m Wald zu beiden Seiten. X bezeichnet die Distanz zum Waldrand, Y den Abstand parallel dazu.)

Empfänger	X	H	Quelle	X	H
M1	5 m	4.0 m	Q	50 m	1.9 m
M2	15 m	4.0 m			
M3	30 m	4.0 m			

Tabelle 7.35: Messgeometrie der Messsituation in Dinhard. (Bemerkung: Der Nullpunkt des Koordinatensystems ist am Waldrand festgelegt mit mindestens 100 m Wald zu beiden Seiten. X bezeichnet die Distanz zum Waldrand, H die Höhe über Terrain.)

platziert. Als Quelle wurde eine Signalpistole vom Typ WBAG 94 verwendet, wobei für jede Situation mindestens 5 Schuss aufgezeichnet wurden. Das Schallleistungsspektrum der Signalpistole kann ebenfalls Tabelle 7.37 entnommen werden. In Tabelle 7.36 sind die Positionen der Quelle und des untersten Mikrofons für die verschiedenen Messgeometrien zusammengestellt. Die Abbildungen 7.99 und 7.100 zeigen zusätzlich eine Ansicht im Schnitt, welche für die beiden Messorte den Geländeverlauf und die Lage der Quelle und der Mikrofone relativ zum Waldrand darstellt.

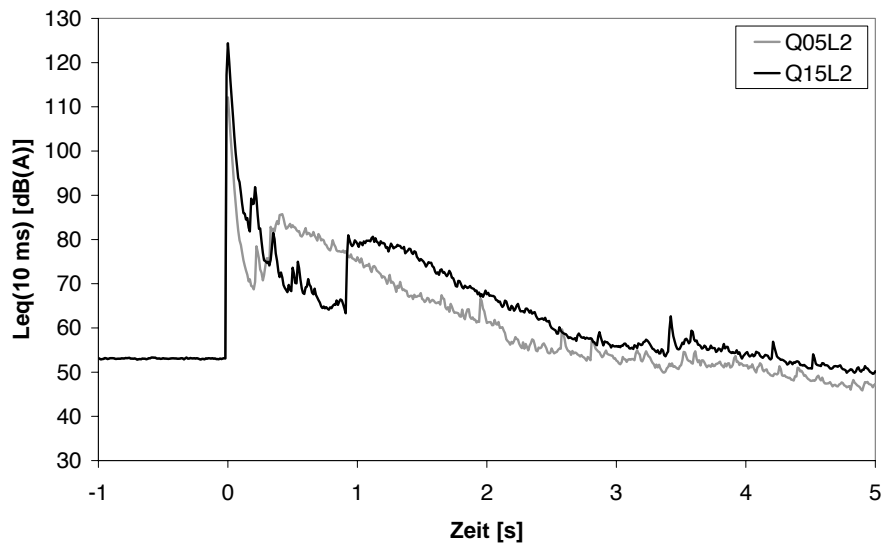


Abbildung 7.96: A-bewerteter Pegel-Zeit-Verlauf der Messungen in Thun aus dem Jahr 2007 mit einer Auflösung von 10 ms für beide Quellenpositionen und Mikrofon L2. Die Kurven zeigen Mittelwerte über jeweils 10 Sprengungen. Für Quelle Q05 treten erste Reflexionen nach 0.3 s und für Quelle Q15 nach 0.9 s auf.



Abbildung 7.97: Abbildung des Waldrandes am Messort Dinhard.

Die verschiedenen Geometrien wurden durch unterschiedliche Quellenpositionen und durch Höhenanpassungen bei Quelle und Mikrofonen erreicht. Die Abbildungen 7.101 und 7.102 zeigen die Situationen, wobei auf der Fotografie von Eglisau zusätzlich der Schütze sowie der Mikrofonmast zu sehen sind. Die Messungen wurden in Eglisau am 10. September 2008 und in Wald am 24. Oktober 2008 durchgeführt. Analog zu Dinhard wurde aufgrund der kurzen Abstände auf eine Aufzeichnung von Wetterdaten verzichtet.

Die Messdaten wurden mit Schallpegelmessern vom Typ Brüel & Kjaer 2238 erfasst und auf einem portablen Audiorecorder vom Typ Sound Device 744T aufgezeichnet. Die Abbildungen 7.103 und 7.104 zeigen als Beispiel die A-bewerteten Pegel-Zeit-Verläufe der Serie 1a aus Eglisau und der Serie 2a aus Wald, jeweils für die unterste Mikrofonposition. Direktschall und Waldreflexion wurden wiederum durch eine zeitliche Fensterung getrennt und es

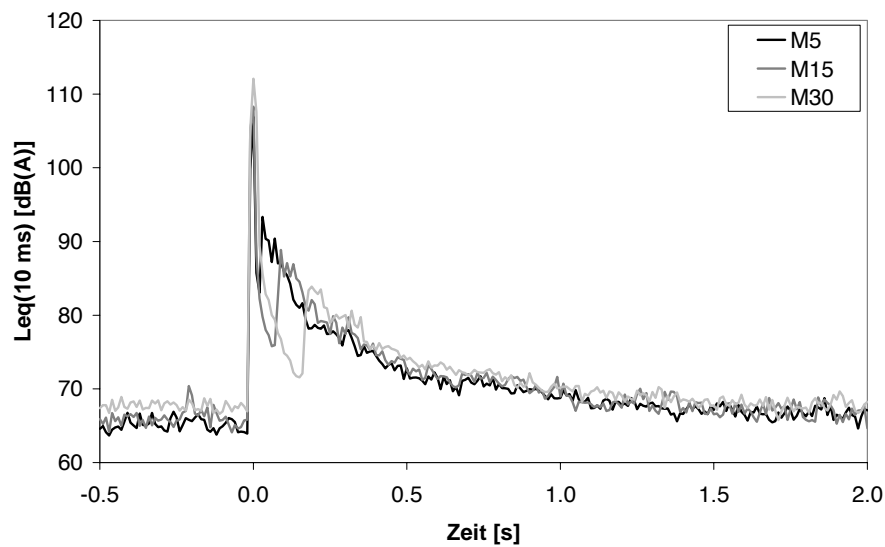


Abbildung 7.98: A-bewerteter Pegel-Zeit-Verlauf mit einer Auflösung von 10 ms für die drei Mikrofonpositionen der Messreihe in Dinhard. Die dargestellten Pegel-Zeit-Verläufe stellen energetische Mittelwerte über 10 Einzelschüsse dar.

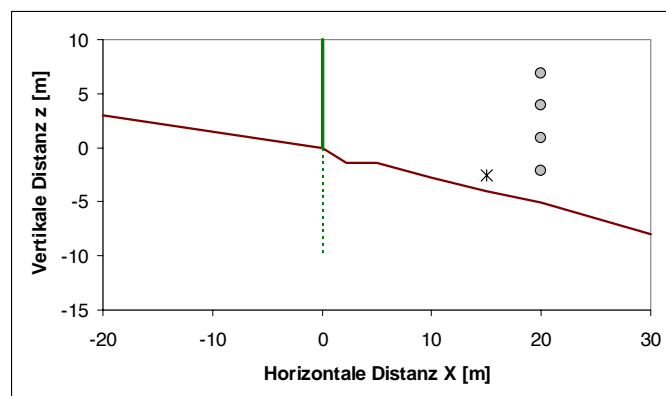


Abbildung 7.99: Seitliche Ansicht der Messgeometrie 5a in Eglisau.

wurden für beide Anteile Terzbandspektren von 50 Hz bis 10 kHz bestimmt.

Eglisau					Wald				
Geometrie	Quelle		Mikrofone		Geometrie	Quelle		Mikrofone	
	X	Z	X	Z		X	Z	X	Z
5a	15 m	-2.52 m	20 m	-2.10 m	6a	10 m	-0.75 m	20 m	-5.80 m
5b	30 m	-6.50 m	20 m	-2.10 m	6b	15 m	-4.05 m	20 m	-5.80 m
5c	30 m	-6.50 m	20 m	-3.60 m	6c	15 m	-6.05 m	20 m	-5.80 m
5d	15 m	-2.52 m	20 m	-3.60 m	6d	25 m	-10.40 m	20 m	-5.80 m
					6e	30 m	-13.50 m	20 m	-5.80 m

Tabelle 7.36: Messgeometrie der Messsituationen in Eglisau und Wald. Es ist die Position des untersten Mikrofons angegeben. Darüber befanden sich jeweils drei weitere Mikrofone in je 3 m Abstand. (Bemerkung: Der Nullpunkt des Koordinatensystems ist am Waldrand festgelegt. X bezeichnet die Distanz zum Waldrand, Z die Höhe relativ zum Waldrand-Fusspunkt.)

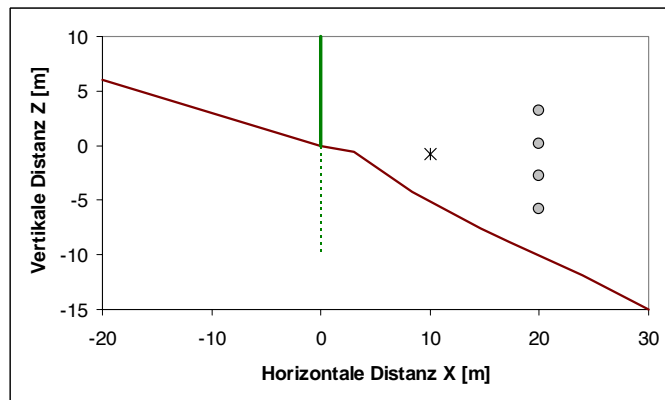


Abbildung 7.100: Seitliche Ansicht der Messgeometrie 6a in Wald.



Abbildung 7.101: Abbildung des Waldrandes am Messort Eglisau. Zusätzlich ist die Position des Schützen sowie des 12 m hohen Mastes mit 4 Mikrofonhöhen zu sehen.



Abbildung 7.102: Abbildung des Waldrandes am Messort Wald.

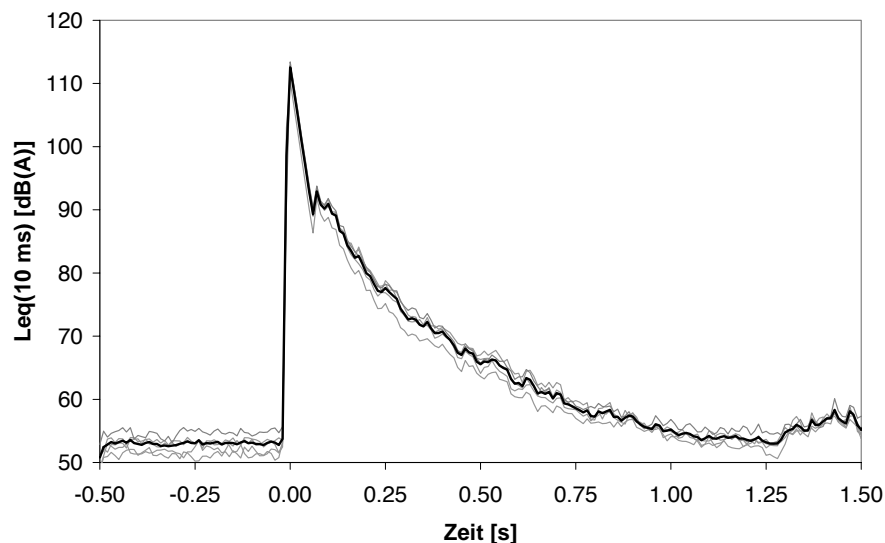


Abbildung 7.103: A-bewerteter Pegel-Zeit-Verlauf mit einer Auflösung von 10 ms für Geometrie 5a der Messsituation in Eglisau, aufgenommen beim untersten Mikrofon. Die fünf Einzelschüsse sind in grau und der energetische Mittelwert in schwarz dargestellt. Reflexionen wurden von 0.07 bis 1.2 s ausgewertet.

7.5.2 Vergleich von Messungen und Berechnungen

In den Abbildungen 7.105 bis 7.115 sind Terzbandspektren sämtlicher Messungen den entsprechenden Berechnungen gegenübergestellt. Bei der Mehrzahl der Fälle ist die spektrale Übereinstimmung ansprechend. Bei einigen Situationen, namentlich bei Messdaten aus Thun der Jahre 2002 und 2003 sind aber grössere Abweichungen festzustellen. In Thun können diese Abweichungen mehrheitlich durch meteorologische Effekte erklärt werden. Während den besagten Messungen herrschten für die Schallausbreitung hinderliche Bedingungen, welche zur Ausbildung akustischer Schattenzonen und somit tieferen Messpegeln führten. Auf eine Nachbildung dieser Einflüsse wird im

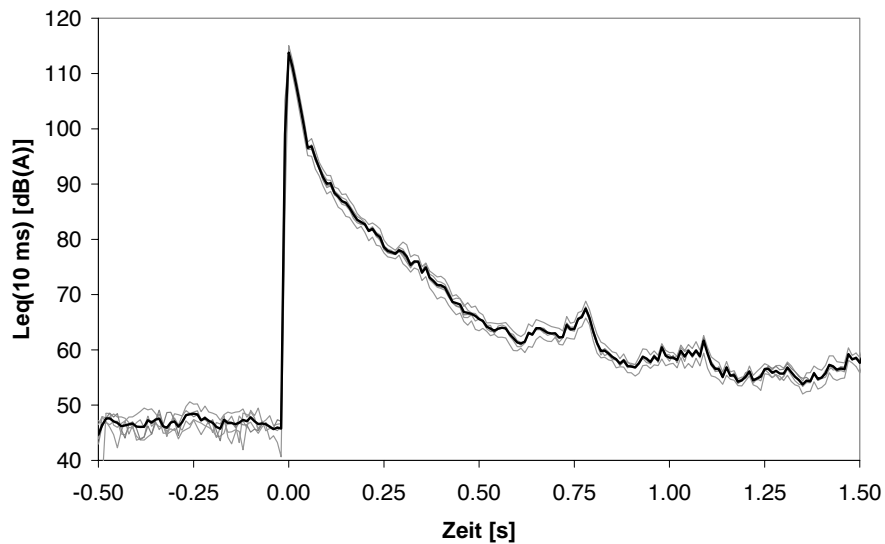


Abbildung 7.104: A-bewerteter Pegel-Zeit-Verlauf mit einer Auflösung von 10 ms für Geometrie 6a der Messsituation in Wald, aufgenommen beim untersten Mikrofon. Die fünf Einzelschüsse sind in grau und der energetische Mittelwert in schwarz dargestellt. Reflexionen wurden von 0.05 bis 1.2 s ausgewertet.

Quelle	31.5 Hz	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	A
200 g TNT	158.1	160.1	159.5	157.4	154.6	151.6	148.6	145.7	157.2
50 g Plastit	146.1	150.1	151.1	149.9	147.4	144.6	141.6	138.6	150.0
SignalPistole	89.5	100.7	111.4	117.3	122.1	124.4	123.3	118.4	128.6
Pist49(MarkPat)	83.0	95.2	109.6	117.6	124.1	127.5	124.0	118.6	130.5
EUHG85	155.4	158.1	158.0	156.0	153.3	150.4	147.4	144.4	155.9

Tabelle 7.37: Schallleistungsspektren der bei den Messkampagnen für Wald- und Felsreflexionen eingesetzten Schallquellen.

Modell aus Gründen der Rechenzeit-Optimierung bewusst verzichtet. Entsprechend muss in solchen Situationen eine systematische Überschätzung der Immissionspegel in Kauf genommen werden.

Die Messungen in Eglisau und Wald waren mit dem Ziel durchgeführt worden, den Einfluss des vertikalen Abstrahlwinkels auf die Waldreflexion abzuklären. Wie sich zeigt, besteht ein Einfluss des vertikalen Streuwinkels auf die Messpegel. So weisen die unteren Mikrofone systematisch tiefere Pegel auf als die höher am Messmast platzierten. Die festgestellten Pegeldifferenzen weichen zwischen den beiden Standorten aber deutlich ab. In Eglisau ist der Pegelabfall hin zu tieferen Mikrofonpositionen deutlich ausgeprägter als beim Standort Wald. Die Erklärung dieses Verhaltens kann beim Verhältnis der Baumkrone zum Stamm gefunden werden. Die Nadelbäume in Eglisau besitzen vergleichsweise dünne Äste, die zusätzlich nur im oberen Bereich des Baumes zu finden sind. Diese Baumart entspricht der Modellvorstellung des stehenden Zylinders deutlich besser als die Laubbäume am Standort Wald, welche praktisch ab Boden weite, ausladende Äste aufweisen. Entsprechend bedeutender war der Beitrag der Äste zur Gesamtreflexion in Wald.

Das Berechnungsmodell verzichtet auf eine explizite Nachbildung einer vertikalen Richtwirkung. Die Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung ist aber gleichwohl recht ansprechend, so dass sich eine entsprechende Erweiterung nicht aufdrängt.

In Abbildung 7.116 ist eine Zusammenstellung sämtlicher Messdaten aufgeführt, wobei gemessene und berechnete Ausbreitungsdämpfungen in dB(A) verglichen werden. Es zeigen sich die bereits besprochenen Abweichungen zwischen Modell und Messung aufgrund meteorologischer Einflüsse bei grossen Ausbreitungsdämpfungen sowie aufgrund lokaler Waldeigenschaften. Die mittlere Abweichung über alle Situationen beträgt 0.0 dB(A), die Standardabweichung 3.2 dB(A). Vor dem Hintergrund, dass das Modell wesentliche Phänomene der Schallausbreitung nur in vereinfachter Form abbildet und dass die lokalen Waldeigenschaften nicht berücksichtigt werden, ist dieses Resultat sehr ansprechend.

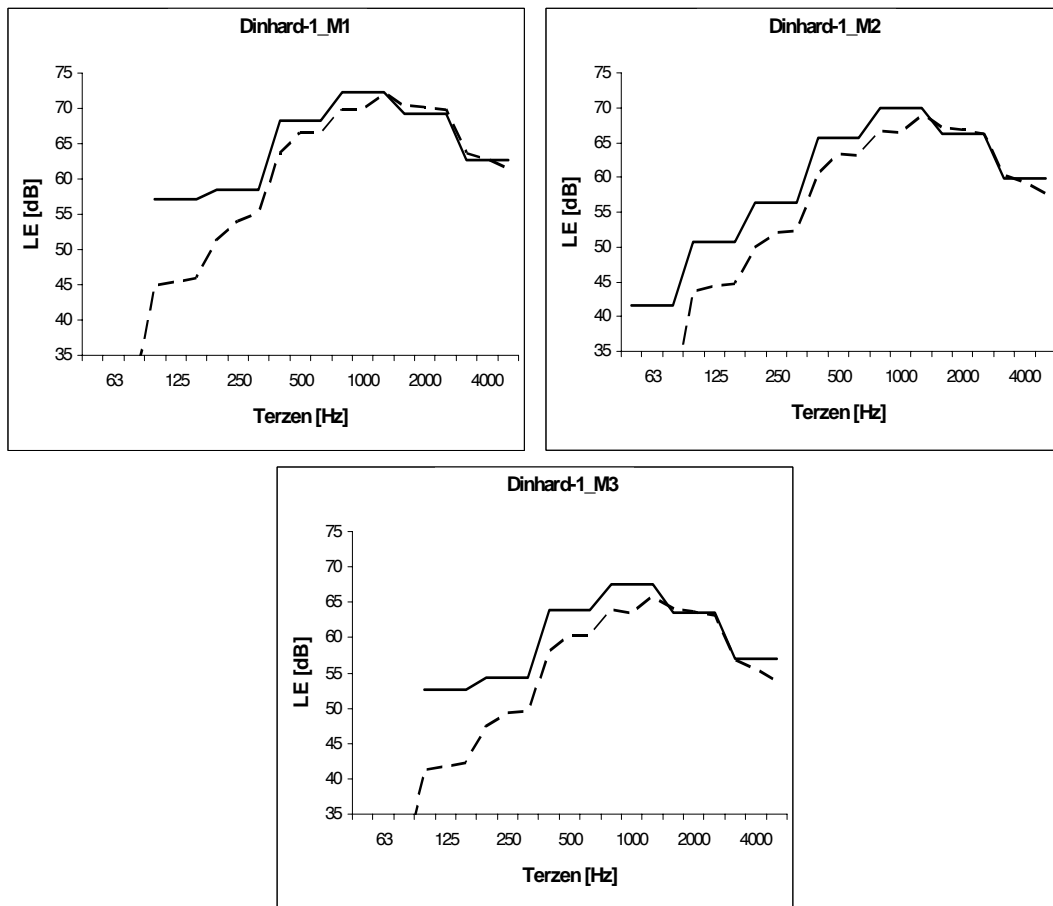


Abbildung 7.105: Gemessene (ausgezogene Linien) und berechnete (gestrichelte Linien) Waldreflexions-Spektren der Messungen in Dinhard 1993.

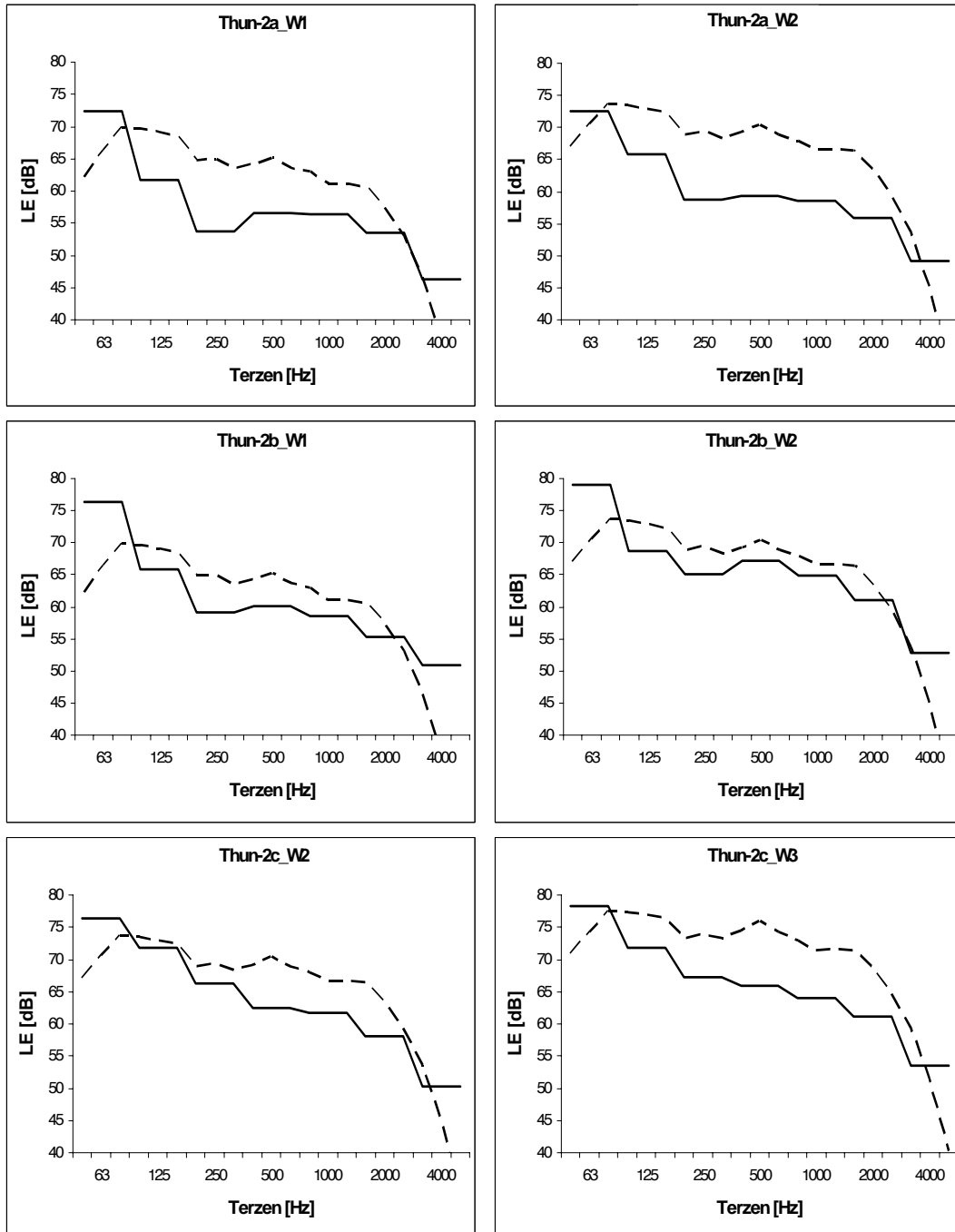


Abbildung 7.106: Gemessene (ausgezogene Linien) und berechnete (gestrichelte Linien) Waldreflexions-Spektren der Messungen in Thun 2002.

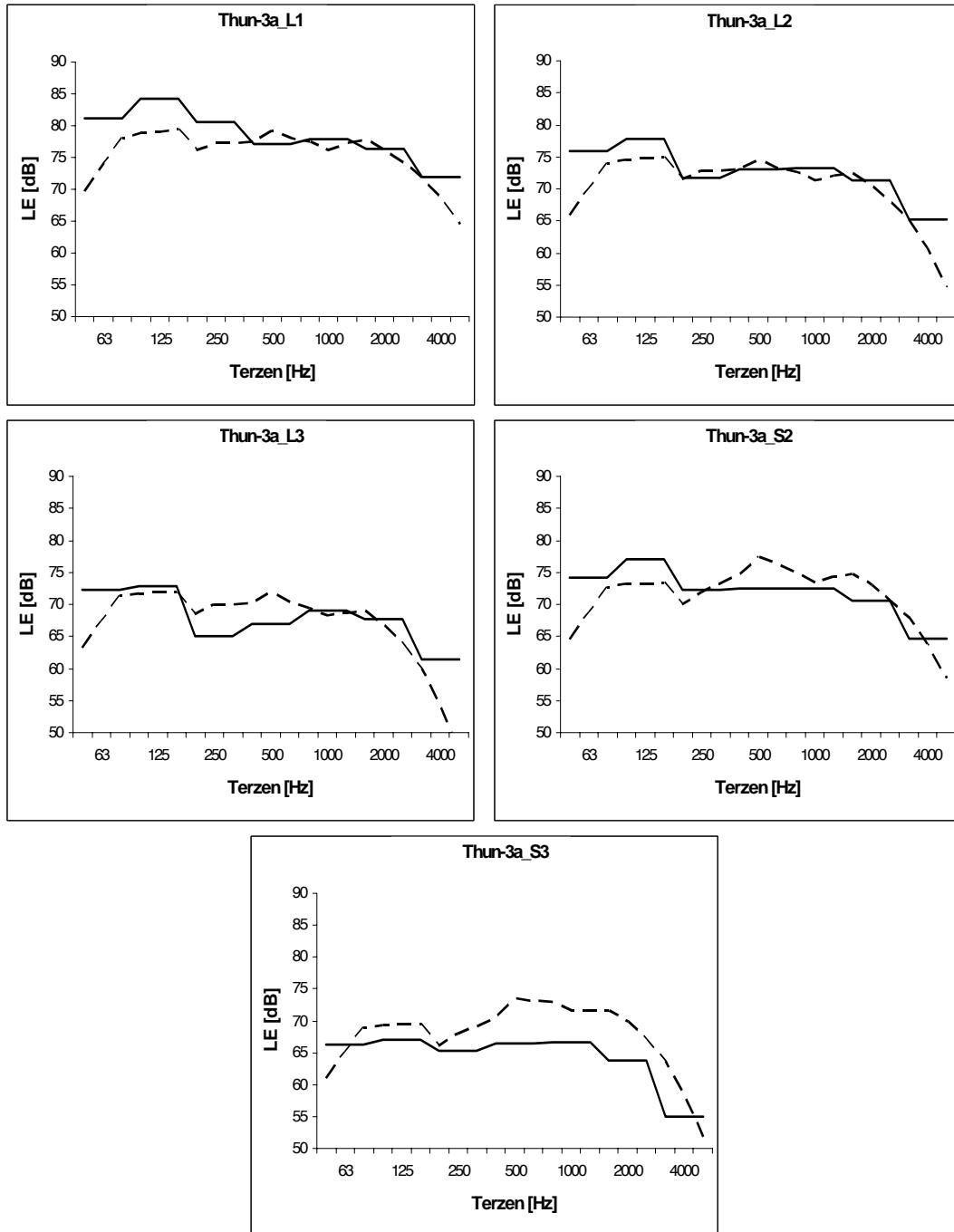


Abbildung 7.107: Gemessene (ausgezogene Linien) und berechnete (gestrichelte Linien) Waldreflexions-Spektren der Messungen in Thun 2003, Quelle Q05.

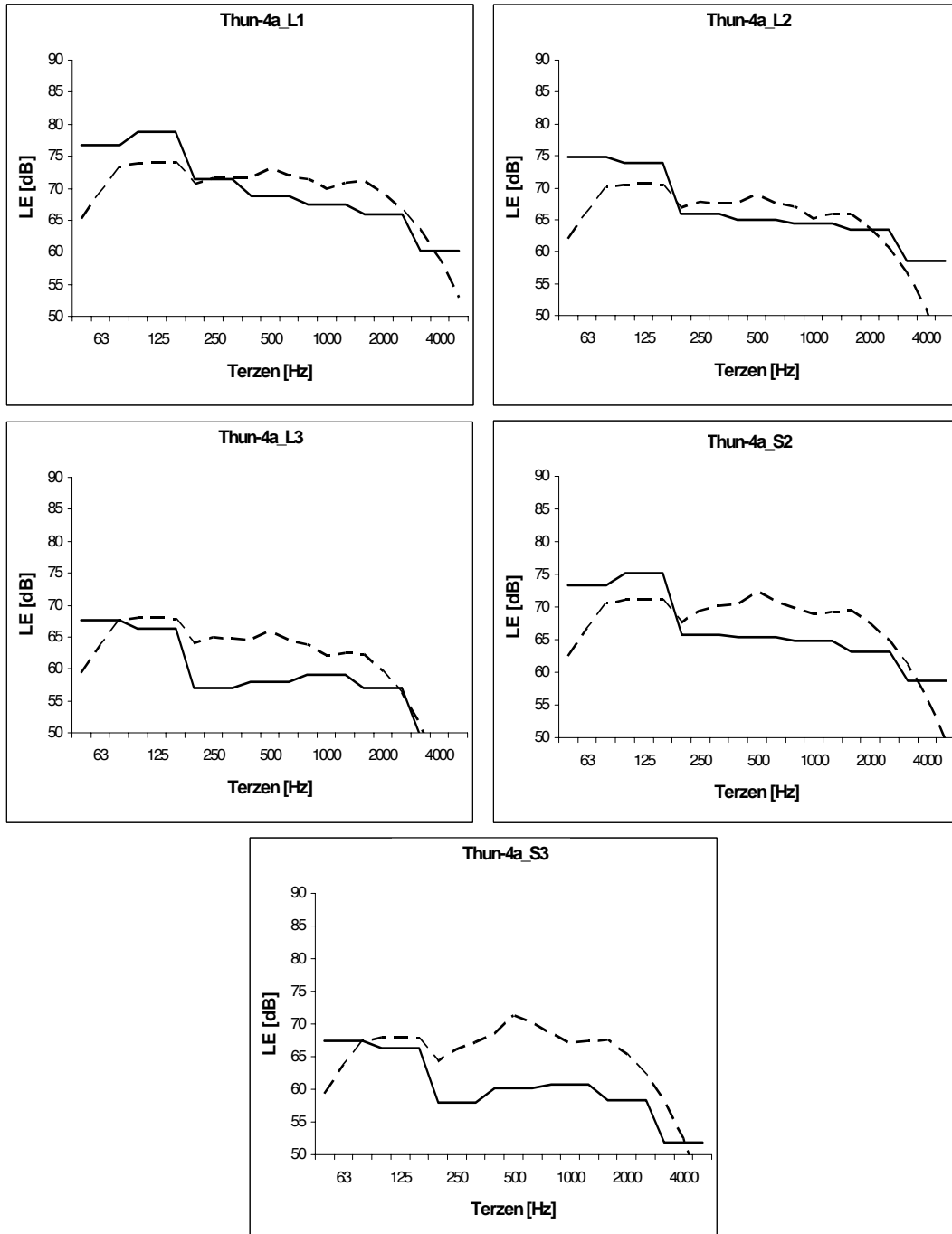


Abbildung 7.108: Gemessene (ausgezogene Linien) und berechnete (gestrichelte Linien) Waldreflexions-Spektren der Messungen in Thun 2003, Quelle Q15.

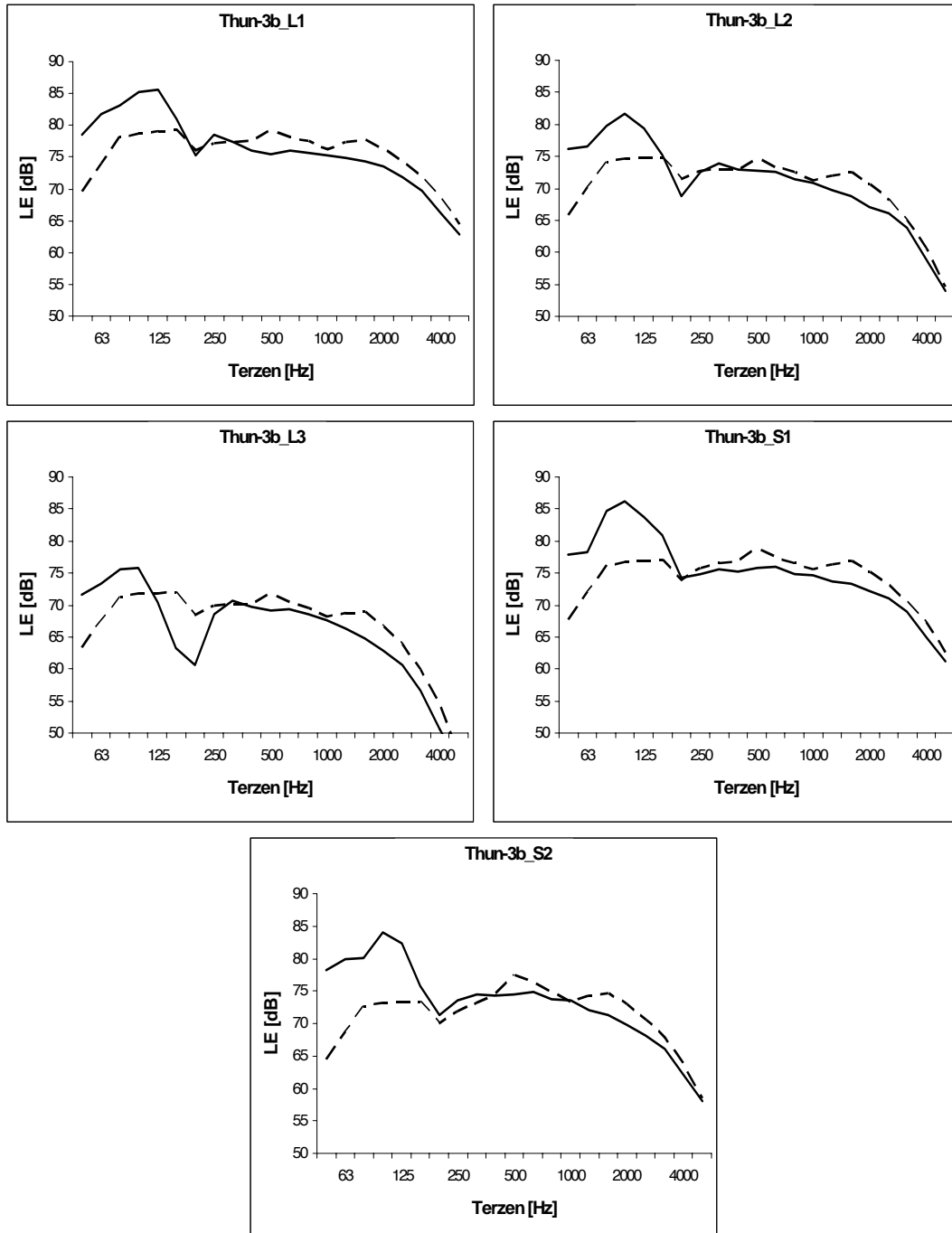


Abbildung 7.109: Gemessene (ausgezogene Linien) und berechnete (gestrichelte Linien) Waldreflexions-Spektren der Messungen in Thun 2007, Quelle Q05.

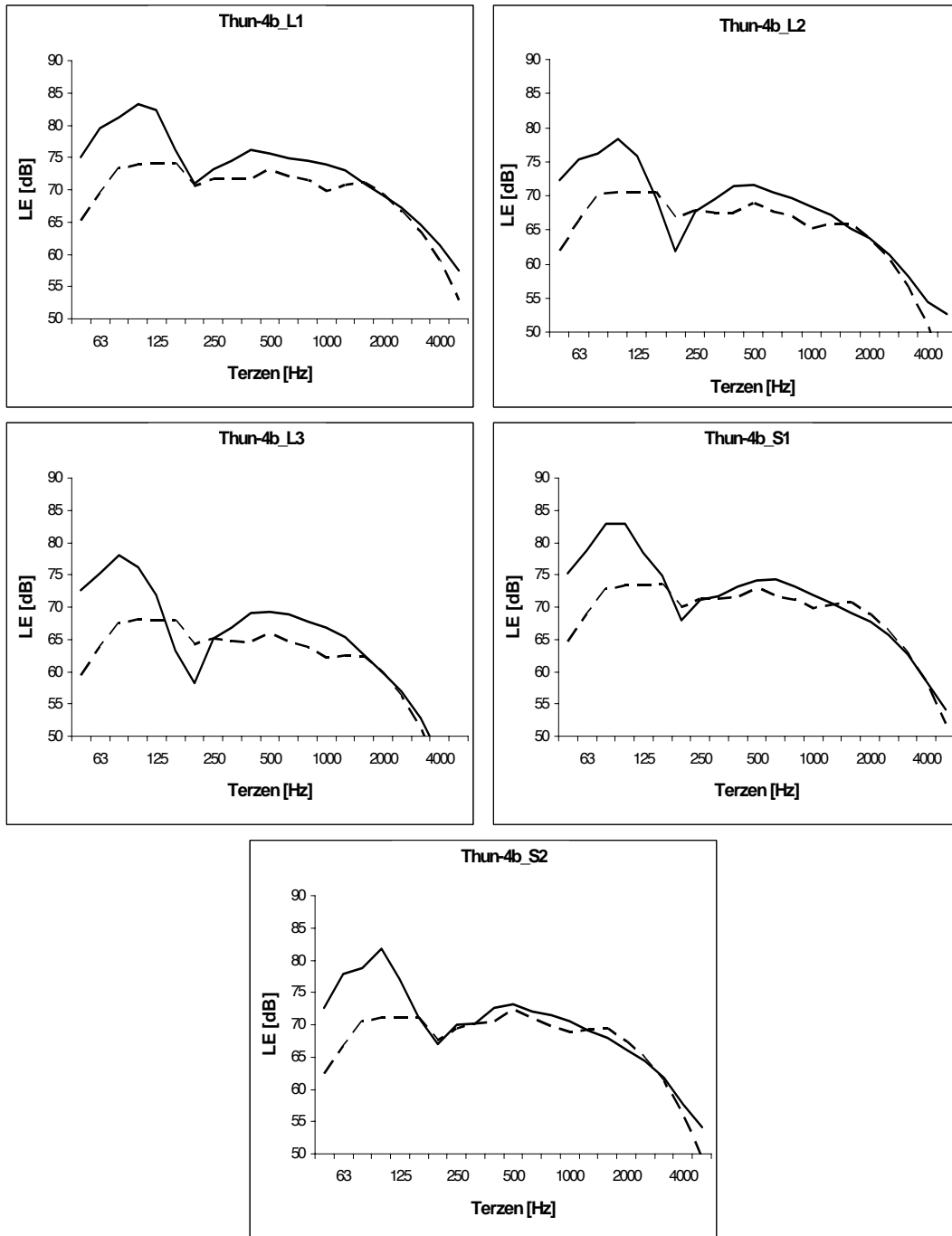


Abbildung 7.110: Gemessene (ausgezogene Linien) und berechnete (gestrichelte Linien) Waldreflexions-Spektren der Messungen in Thun 2007, Quelle Q15.

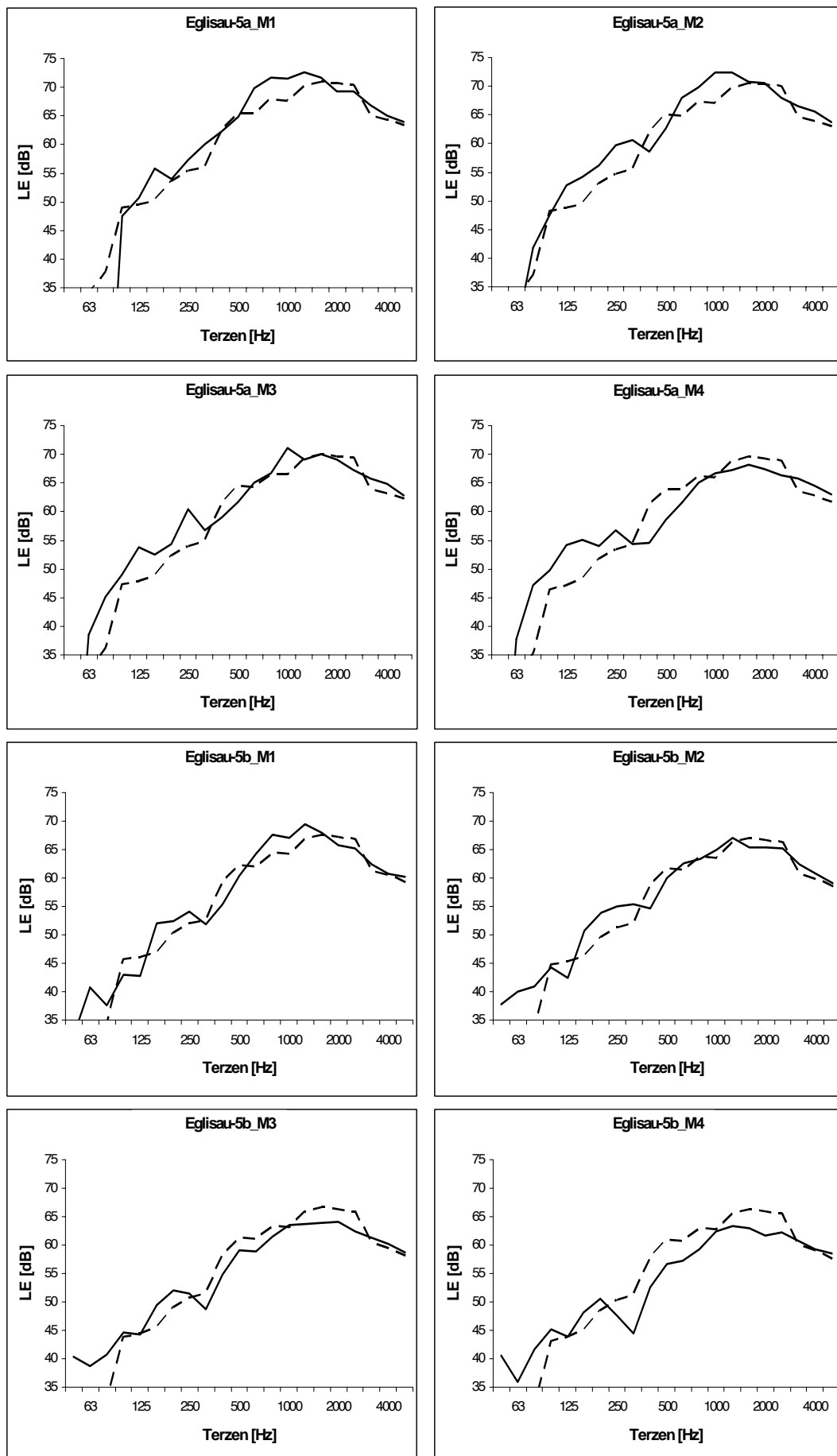


Abbildung 7.111: Gemessene (ausgezogene Linien) und berechnete (gestrichelte Linien) Waldreflexions-Spektren der Messungen in Eglisau 2009, Messgeometrien a) und b).

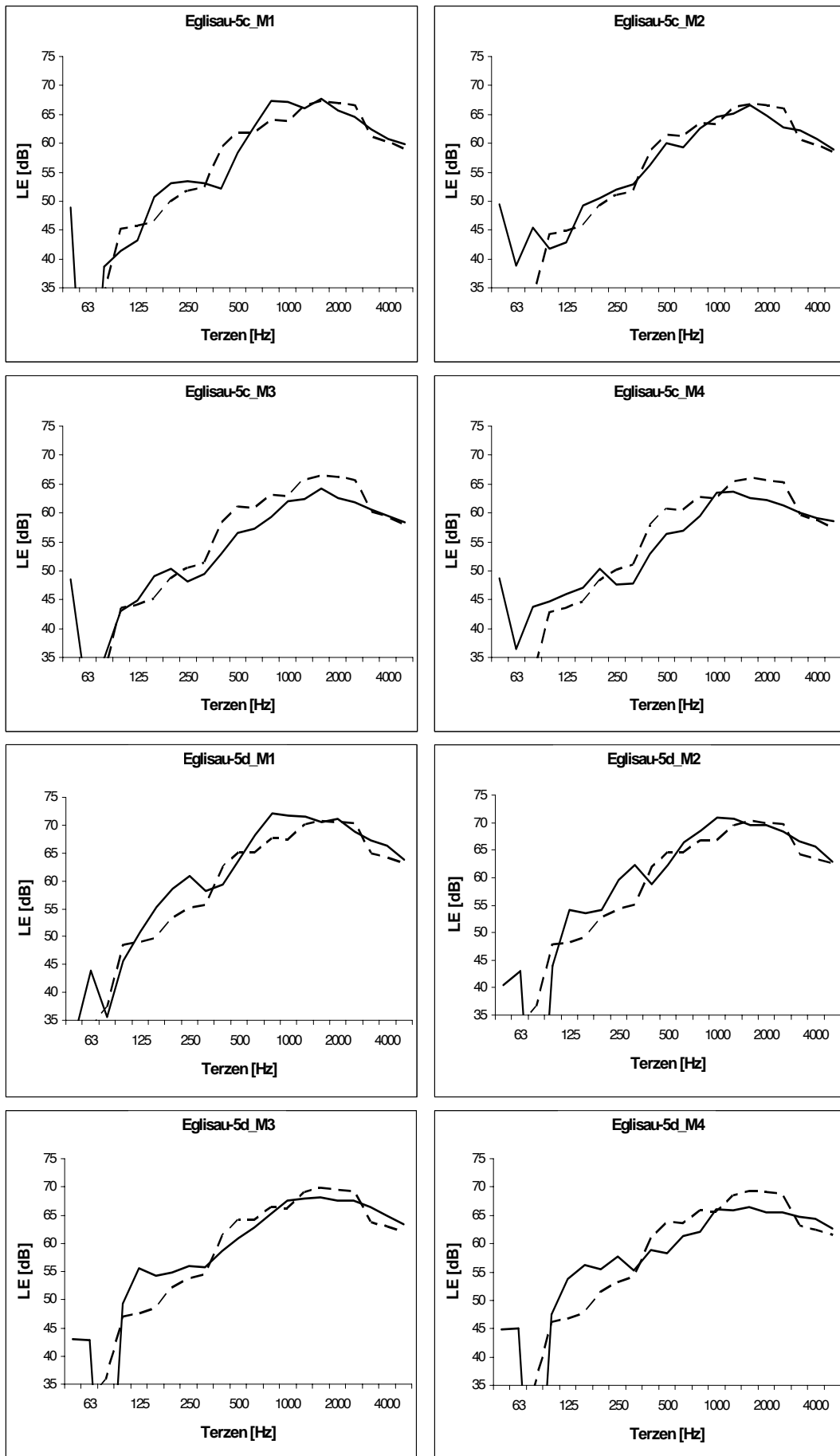


Abbildung 7.112: Gemessene (ausgezogene Linien) und berechnete (gestrichelte Linien) Waldreflexions-Spektren der Messung an Eglisau 2009, Messgeometrien c) und d). 7.5 Validierung des Modells für Waldreflexionen

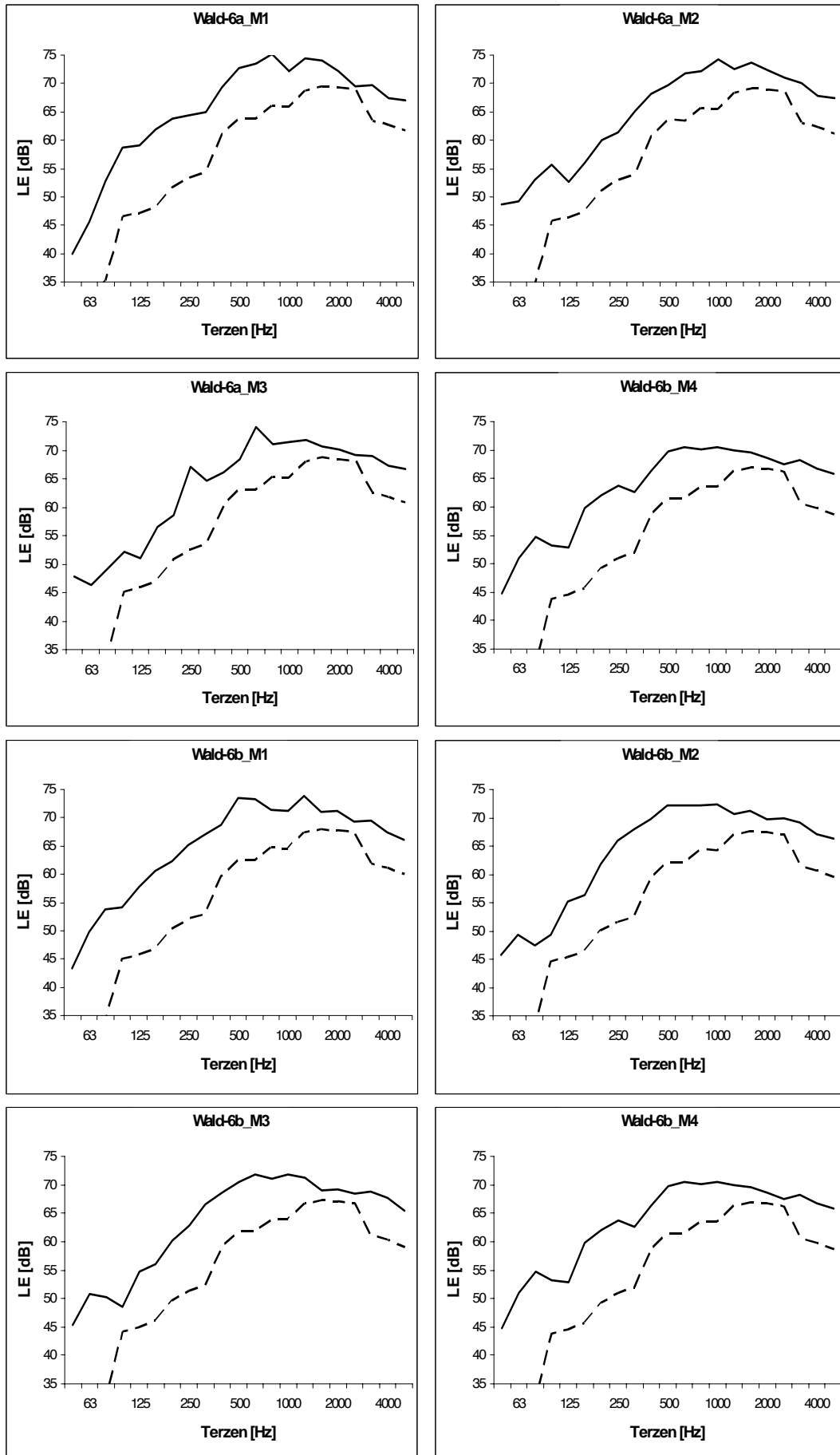


Abbildung 7.113: Gemessene (ausgezogene Linien) und berechnete (gestrichelte Linien) Waldreflexions-Spektren der Messung an Wald 2009, Messgeometrien a und b.

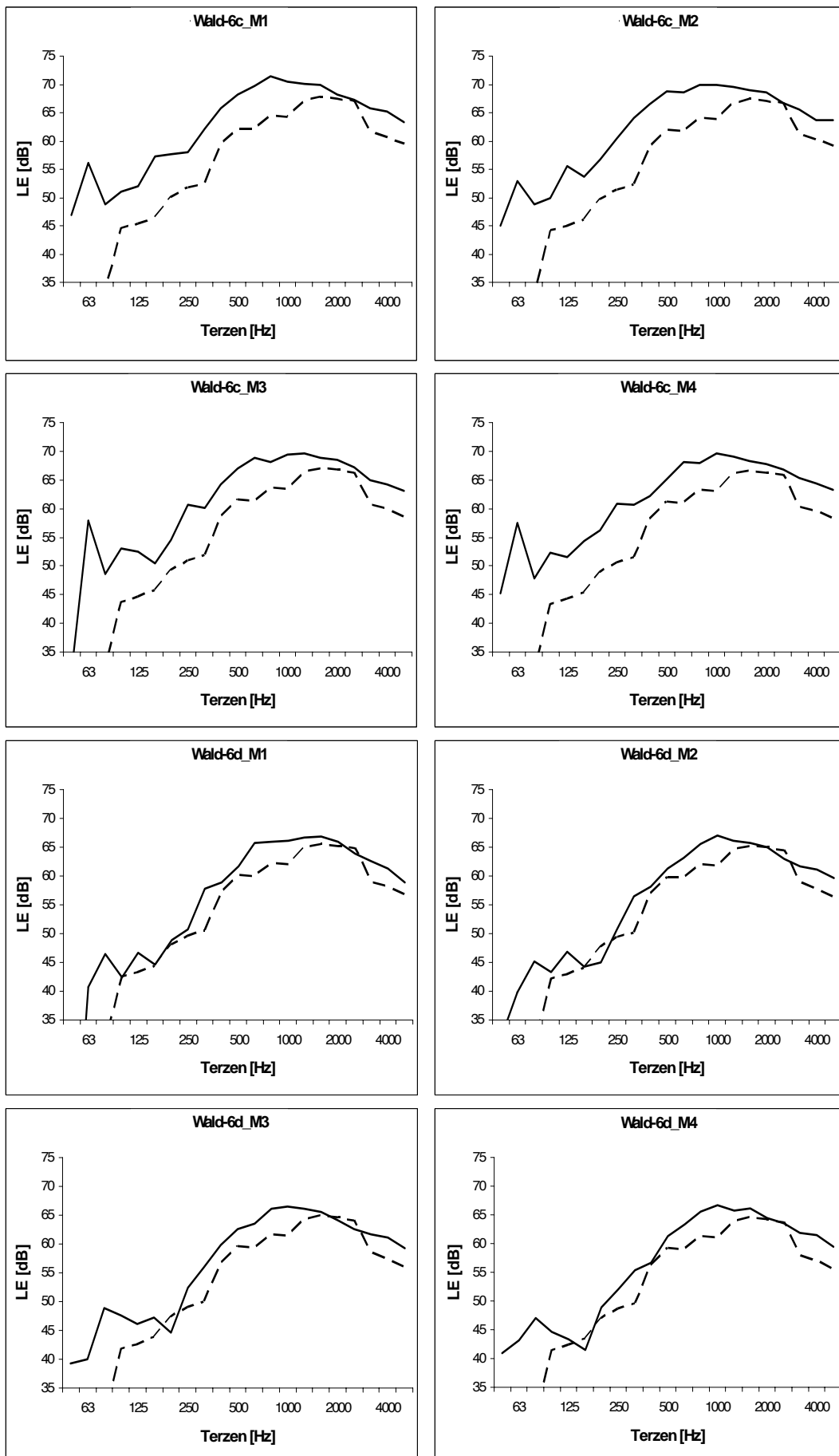


Abbildung 7.114: Gemessene (ausgezogene Linien) und berechnete (gestrichelte Linien) Waldreflexions-Spektren der Messungen im Wald 2009, Messgeometrien c) und d).

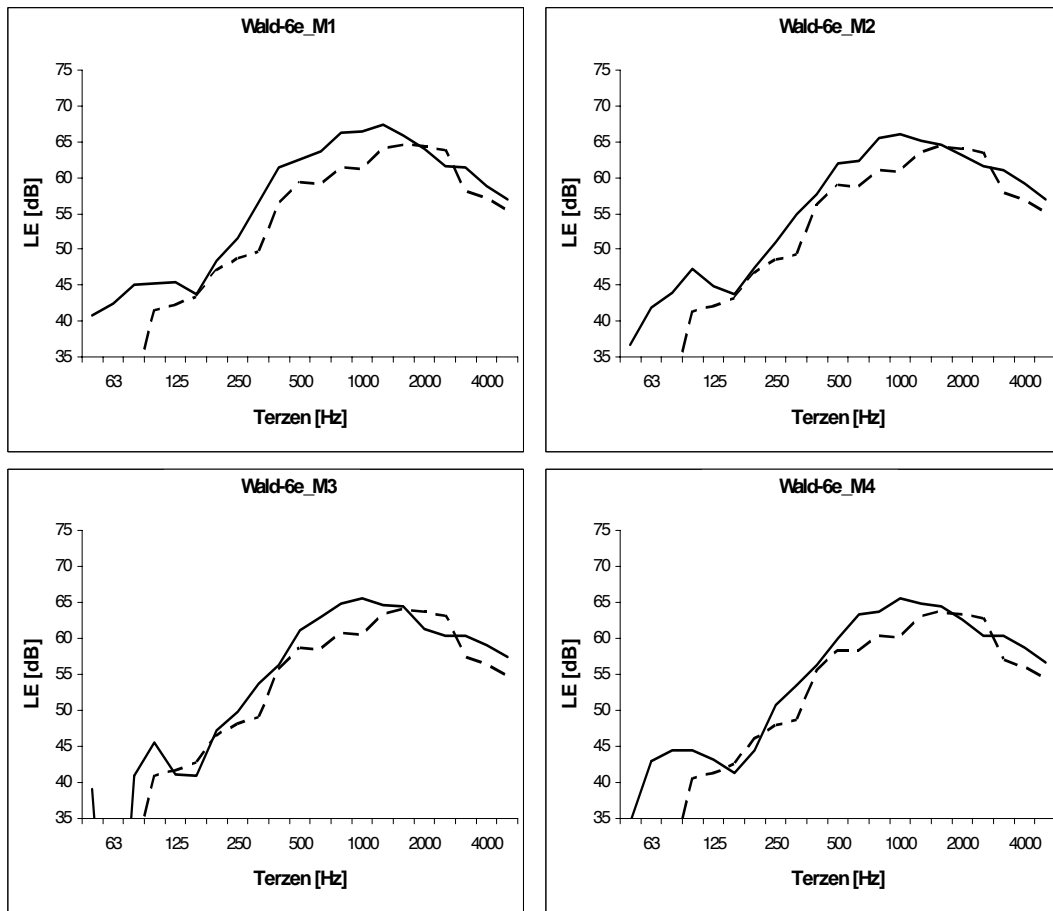


Abbildung 7.115: Gemessene (ausgezogene Linien) und berechnete (gestrichelte Linien) Waldreflexions-Spektren der Messungen in Wald 2009, Messgeometrie e).

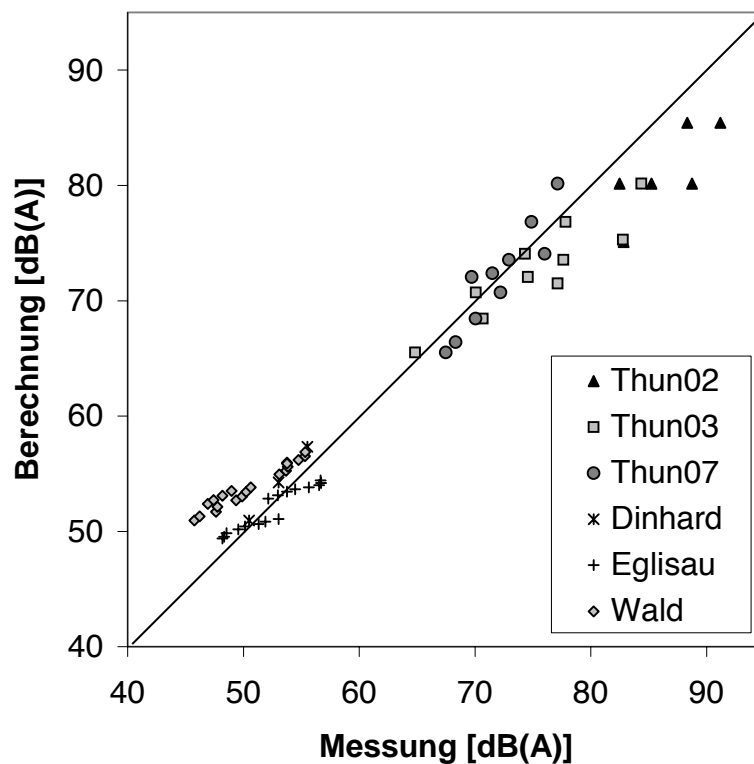


Abbildung 7.116: Gemessene und berechnete Ausbreitungsdämpfungen in dB(A) der Waldreflexionen für sämtliche Messungen. Die Ausbreitungsdämpfung ist dabei definiert als Differenz des A-bewerteten Schalleistungspegels gemäss Tabelle 7.37 und den Immissionsdaten.



Abbildung 7.117: Sicht auf die Felswand auf dem Waffenplatz Chur von Quellposition S6 aus.

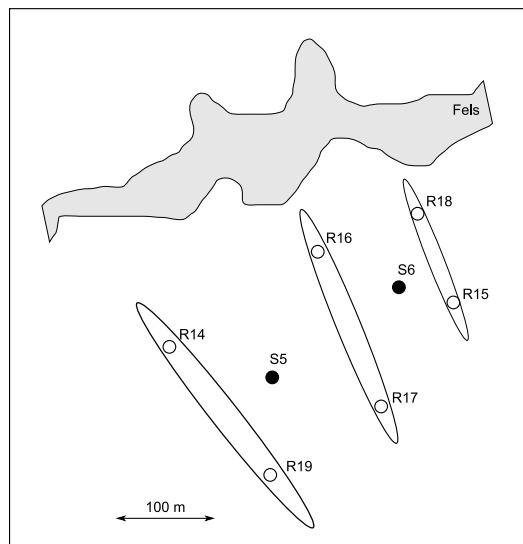


Abbildung 7.118: Skizze der Messsituation in Chur. Gezeigt werden 6 Empfänger R14 - R19, welche auf Wällen (eingezeichnet als Ellipsen) positioniert wurden, zwei Quellenpositionen sowie die Felsformation.

7.6 Validierung des Modells für Felsreflexionen

Zur Validierung des Felsreflexionsmodells wurden Messungen an zwei Standorten durchgeführt. Eine erste Messumgebung bildete eine grosse exponierte Felswandstruktur beim Waffenplatz Chur. Die zweite Messreihe fand im Val Crastallina statt, welches eine typische alpine Talsituation mit ausgedehnten Felsformationen und Geröllflächen bildet.

In diesem Kapitel werden die Felsreflexionsmessungen beschrieben und die ermittelten Ereignispegel der Reflexionen gezeigt. Den Messwerten werden die mit dem Felsreflexionsmodell berechneten Werte gegenübergestellt.

7.6.1 Beschreibung der Messsituationen

Auf dem Waffenplatz Chur wurden zwischen dem Rhein und der grossen, prominenten Felsformation Calanda Messungen durchgeführt. Die Messsituation ist in einer auf einer Karte basierenden Übersichtsskizze in Abbildung 7.118 dargestellt. Neben der Felsformation sind die Positionen der Quellen S5 und S6 und die Messpositionen R14 - R19, welche mit GPS-Empfängern ermittelt wurden, eingezeichnet. Die Empfangspunkte wurden auf Wällen von rund 4 m Höhe (dargestellt als Ellipsen) mit einer Mikrofonhöhe von 4 m über Boden gewählt. Die Distanzen der Empfangspunkte zu den Quellen betragen zwischen 60 und 260 m. Die Felsformation ist ungefähr 1 km lang und hat

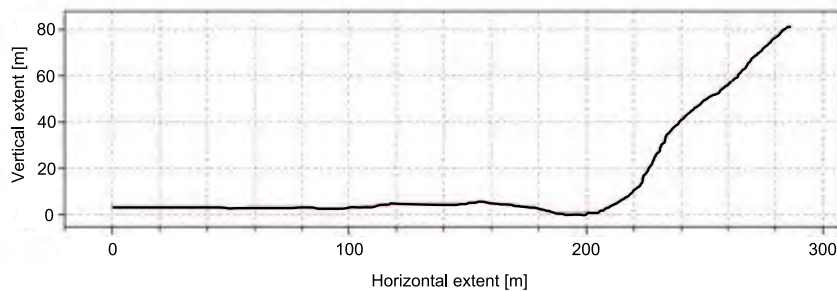


Abbildung 7.119: Vertikaler Terrainschnitt durch die Quellenposition S5 senkrecht zur Felswand. Die Quelle befindet sich bei $x = 0$ m. Ab einer Distanz von rund 200 m steigt die 55° geneigte Felswand an.



Abbildung 7.120: Das Val Cristallina mit grossen Felsformationen im Hintergrund und Geröllflächen im Talgrund (von der Messposition R3 aus gesehen).

eine Höhe von rund 80 m. Die Neigung der Felswand beträgt zwischen 50 und 60%. Abbildung 7.117 zeigt eine 180° Panorama-Ansicht der Felswand von der Quellenposition S5 aus gesehen. Abbildung 7.119 zeigt einen vertikalen Geländeschnitt von dieser Position senkrecht zur Felswand. In Tabelle 7.38 sind die mittels GPS-Empfängern gemessenen Landeskoordinaten der Messpositionen aufgelistet.

Die zweite Messumgebung bildete das alpine Tal Val Cristallina in der Nähe von Disentis. Die Abbildungen 7.120 und 7.121 illustrieren die typische Talgeometrie des Val Cristallina und die grossen Felsformationen gemischt mit Geröllfeldern im Talgrund und an den Talhängen sowie kleinen Waldflächen. Die Quellenpositionen lagen im Talgrund. Die Empfangspositionen wurden primär an den Talhängen in Abständen von 120 bis 620 m von den Quellen gewählt. Abbildung 7.123 zeigt einen Vertikalschnitt durch das Tal senkrecht zum Talverlauf. Insgesamt vier Quellenpositionen (S1 - S4) und 13 Empfangspositionen (R1 - R13) lieferten im Val Cristallina total 18 gemessene Ausbreitungspfade. In Tabelle 7.38 sind die mittels GPS-Empfängern gemessenen Landeskoordinaten der Messpositionen aufgelistet und in einer Grundrisssskizze in Abbildung 7.122 eingezeichnet.

In Chur kamen Übungshandgranaten vom Typ EUHG85 der Schweizer Armee als Quellen zum Einsatz. Im Val Cristallina wurden Detonationen von 50 g Plastik-Sprengstoff verwendet, welche jeweils auf einer Steinplatte gezündet wurden. Die Emissionsdaten der Quellen wurden analog zu den Waldreflexionsmessungen rechnerisch gemäss der Theorie von Weber bestimmt (siehe [154], [155], [156]). Die resultierenden Schalleistungsspektren sind in Tabelle 7.37 aufgeführt.



Abbildung 7.121: Felsformation im Val Cristallina gemischt mit Geröllflächen und Bäumen.

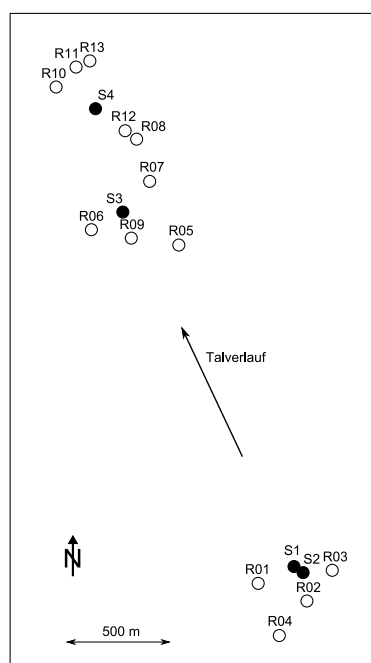


Abbildung 7.122: Skizze der Messsituation in Val Cristallina. Gezeigt werden die 13 Empfängerpositionen R01 - R13 und vier Quellenpositionen S1 - S4.

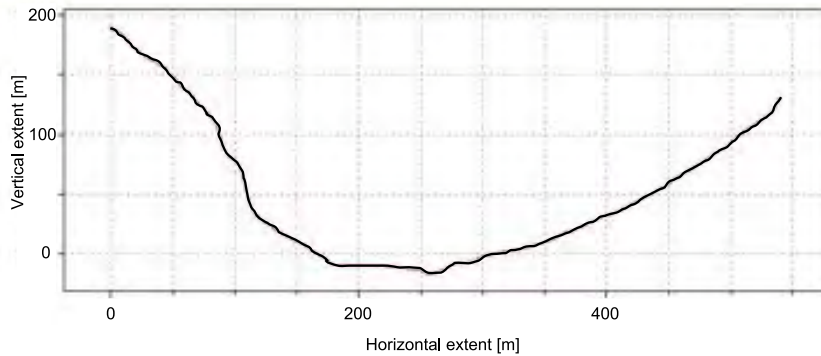


Abbildung 7.123: Vertikaler Geländeschnitt durch das Val Cristallina senkrecht zum Talverlauf und durch den Messpunkt R13. Zwischen $x = 50$ m und $x = 125$ m befindet sich eine Felsformation mit rund 70° Steigung. Die Empfangsposition R13 liegt bei $x = 400$ m.

Messposition	Landeskoordinaten	Messposition	Landeskoordinaten
S1	708605 / 161962	R8	707859 / 163968
S2	708634 / 161942	R9	707840 / 163508
S3	707797 / 163620	R10	707490 / 164210
S4	707669 / 164104	R11	707581 / 164304
S5	756652 / 191432	R12	707817 / 164001
S6	756791 / 191529	R13	707647 / 164331
R1	708429 / 161893	R14	756535 / 191466
R2	708661 / 161809	R15	756850 / 191516
R3	708779 / 161952	R16	756703 / 191572
R4	708528 / 161644	R17	756772 / 191400
R5	708063 / 163469	R18	756811 / 191613
R6	707655 / 163540	R19	756647 / 191326
R7	707924 / 163776		

Tabelle 7.38: Landeskoordinaten der Messpositionen in Chur und Val Cristallina.

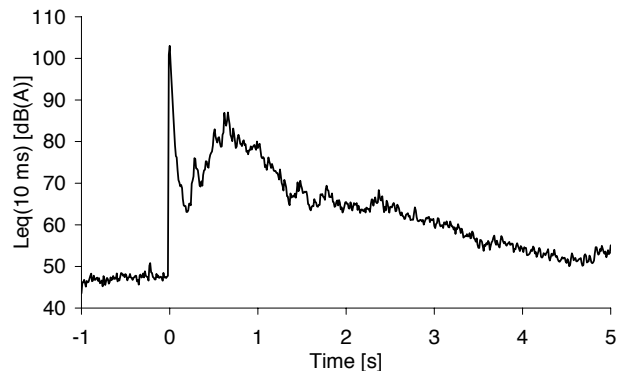


Abbildung 7.124: Pegel-Zeit-Verlauf in dB(A) mit 10 ms Auflösung für Quellenposition S6 und Empfängerposition R14 der Messungen im Val Cristallina.

Die Churer Messungen fanden am 10. Juli 2009 zwischen 10:00 und 11:00 Uhr morgens bei Vollbewölkung und leichtem Regen statt. Die mittlere Temperatur betrug 15 °C und die relative Luftfeuchtigkeit rund 85%. Während den Messungen blies ein Wind von rund 1 m/s aus Richtung 74°, was einem Ost-Nord-Ost-Wind entspricht. Die Windmessungen wurden mit einem Ultraschall-Anemometer durchgeführt, welcher in Chur auf einer Höhe von 10 m und im Val Cristallina auf 6 m Höhe installiert war und zusätzlich Informationen zur Turbulenz lieferte. Eine erste Messreihe im Val Cristallina fand am 1. Juli 2009 zwischen 16:30 und 17:10 abends bei Teilbewölkung und leichtem Regen statt. Die mittlere Temperatur betrug 20 °C, die relative Luftfeuchtigkeit rund 47% und die mittlere Windrichtung 334° bei 4.2 m/s Windgeschwindigkeit. Eine zweite Messreihe im Val Cristallina fand am 2. Juli 2009 zwischen 9:00 und 10:40 morgens bei wolkenfreiem Himmel statt. Die Temperatur stieg während der Messdauer von 13 auf 17 °C an, die relative Luftfeuchtigkeit sank von 75% auf 53%. Die mittlere Windrichtung betrug 134° bei 0.6 m/s Windgeschwindigkeit.

An jeder Quellenposition wurden 5 bis 10 Explosionen ausgelöst. Die Ereignisse wurden jeweils an vier bis fünf Empfangspositionen mit Schallpegelmessern vom Typ Brüel & Kjaer 2238 erfasst und auf portablen Audiorecordern vom Typ Sound Device 702T bzw. 744T aufgezeichnet. Abbildung 7.124 zeigt exemplarisch einen Pegel-Zeit-Verlauf für die Quellenposition S5 und die Empfangsposition R14 aus dem Val Cristallina.

Für den Direktschall und die Felsreflexionen wurden Ereignisspektren in Terzbändern von 25 Hz bis 5 kHz ausgewertet und über die Einzelereignisse einer Serie energetisch gemittelt. Die Ereignispegel wurden einer Hintergrundgeräusch-Korrektur unterzogen. In den Churer Messungen lag der äquivalente Dauerschallpegel des Hintergrundgeräuschs je zwischen 45 und 59 dB(A), wobei dieses durch das Eigen- und Quantisierungsrauschen der Messvorrichtung verursacht wurde. Die unterschiedlich hohen Eigenrauschen der Messketten ergaben sich dadurch, dass bei den Messpunkten in unmittelbarer Quellennähe Viertel-Zoll Mikrofone eingesetzt wurden und bei den weiter entfernten Punkten auf Halb-Zoll Mikrofone gewechselt werden konnte. Im Val Cristallina kamen einheitliche Messketten zum Einsatz, welche generell mit Halb-Zoll Mikrofone ausgerüstet waren. Bei diesen Messungen lagen die äquivalenten Dauerschallpegel des Hintergrundgeräuschs zwischen 51 und 62 dB(A), wobei hier das Hintergrundgeräusch durch nahegelegene Bäche dominiert wurde.

Die Separation von Direktschall (inklusive Bodenreflexionen) und Felsreflexionen wurde mit einer zeitlichen Fensterung der aufgezeichneten Daten realisiert. Es kamen Rechteck-Fenster mit variabler Länge zum Einsatz. In Chur wurden die Fensterlängen abhängig von der geometrischen Situation bestimmt. Massgebend für die Fensterlängenwahl waren die Laufzeitunterschiede zwischen Direktschall und erster Felsreflexion, welche zwischen 200 und 1050 ms lagen. Bei Fensterlängen unterhalb von 400 ms wurde für die Auswertung der Felsreflexionen der Frequenzbereich tieffrequent eingeschränkt (siehe Abbildung 7.125). Aufgrund starker Reflexionen von Geröllflächen war im Val Cristallina eine geometrieabhängige Separation nicht möglich. Für die Auswertung der Daten des Val Cristallina wurde daher ein konstantes Zeitfenster von 400 ms Länge für den Direktschallanteil gewählt.

Die gemessenen Spektren sind in Abbildung 7.125 für Chur und Abbildung 7.126 für Val Cristallina gezeigt.

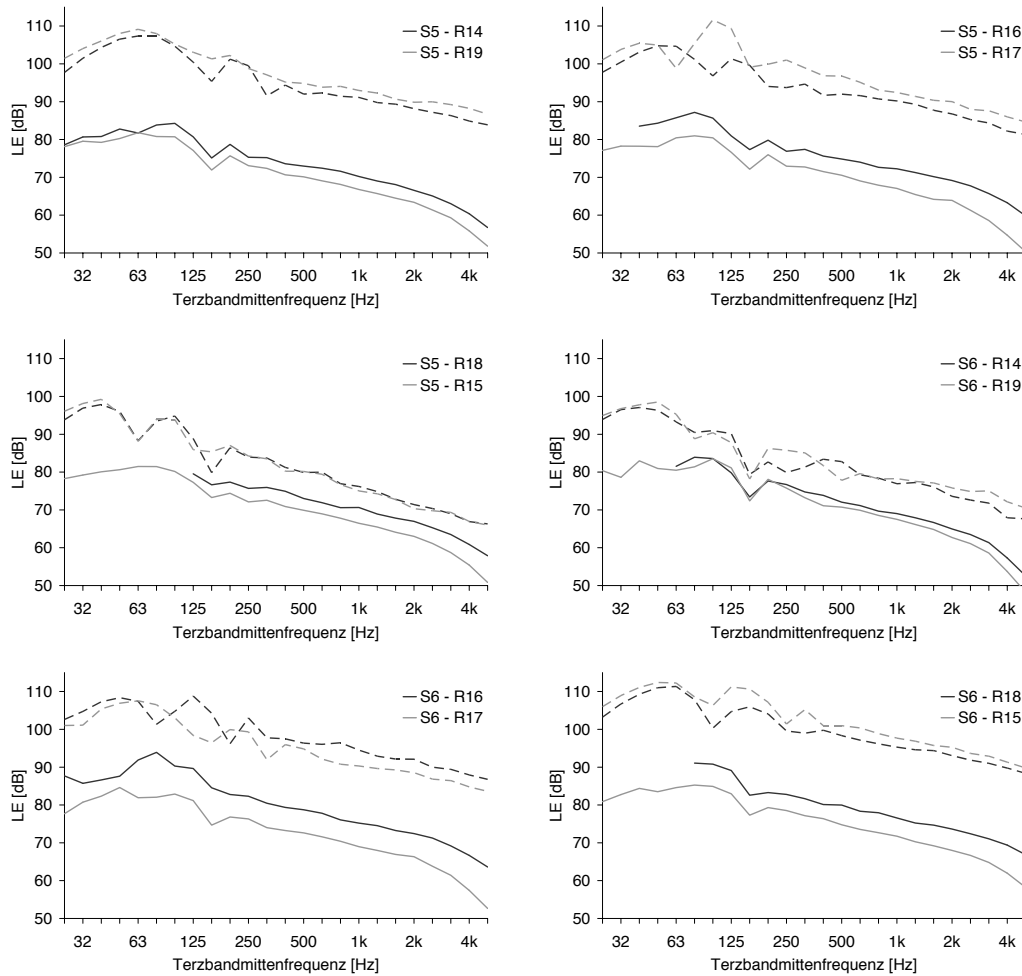


Abbildung 7.125: Gemessene Ereignispegel von Felsreflexionen (durchgezogene Linien) und Direktschall (gestrichelte Linien) in Terzbändern für verschiedene Quellen- und Empfängerpositionen in Chur.

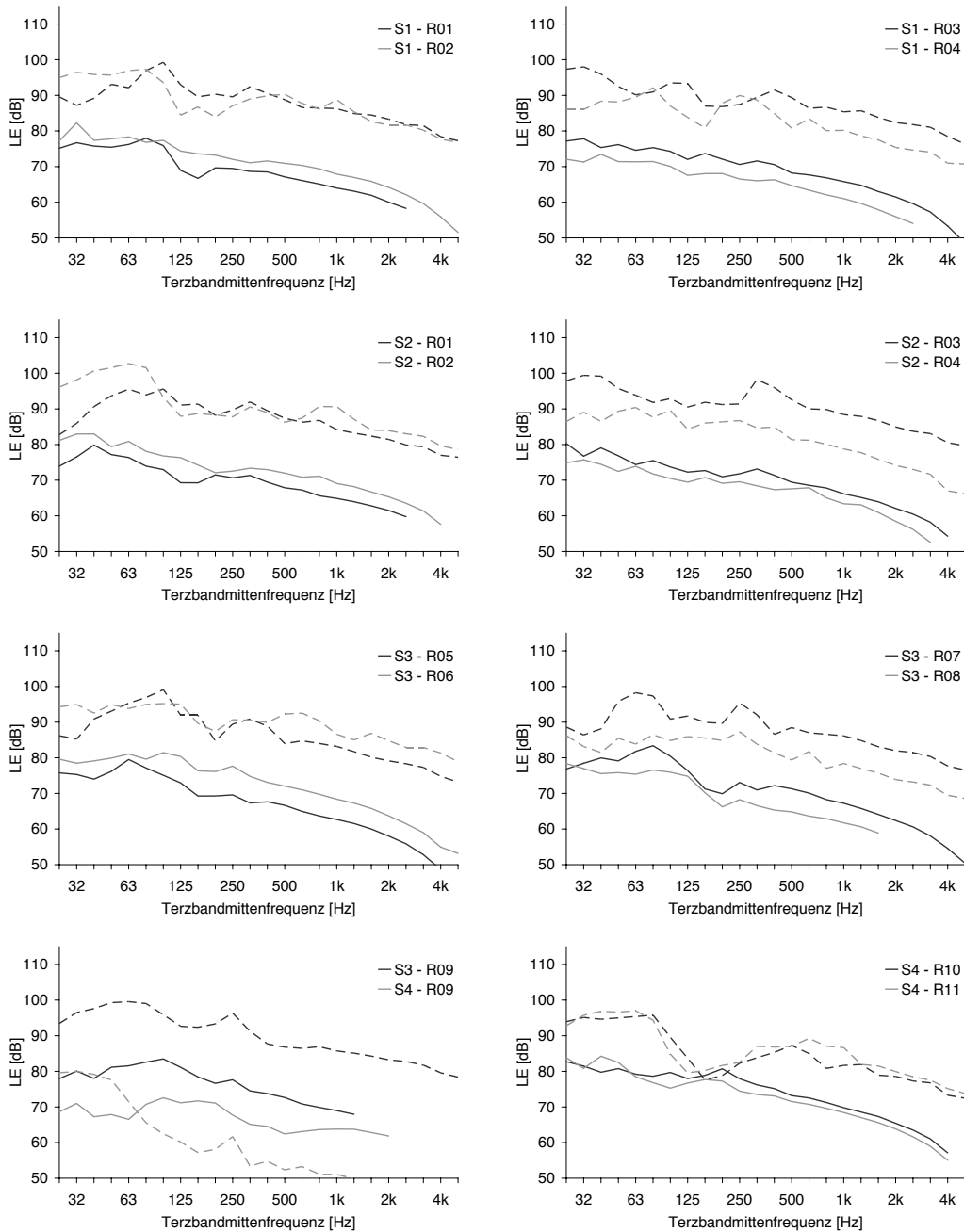


Abbildung 7.126: Gemessene Ereignispegel von Felsreflexionen (durchgezogene Linien) und Direktschall (gestrichelte Linien) in Terzbändern für verschiedene Quellen- und Empfängerpositionen im Val Crisallina.

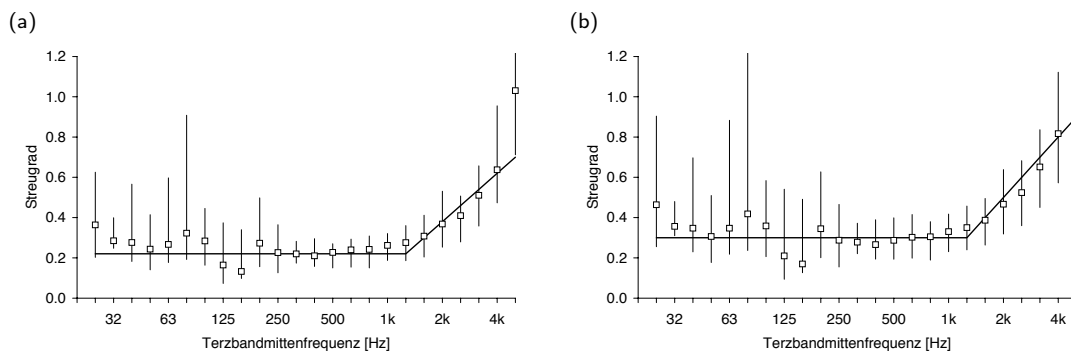


Abbildung 7.127: Aus den Churer Messungen indirekt bestimmter Streugrad der Felsflächen in Terzen für zwei Felsflächendiskretisierungen. Quadrate repräsentieren den Mittelwert mit dem Minimal- und Maximalwert der 12 Situationen. Die dicke Kurve zeigt den daraus idealisierten Streugrad. Die Graphiken zeigen die Streugrade aus Berechnungen mit einer Felsflächendiskretisierung von 5 m (a) und 20 m (b).

7.6.2 Ermittlung des idealisierten Streugrades

Der Streugrad der Felsflächen stellt den einzigen freien Parameter des Felsreflexionsmodells dar. Mit einer Methode, bei der alle Felsreflexionen einer Situation integral betrachtet werden, kann durch Vergleich von Berechnung und Messung der Streugrad indirekt bestimmt werden. Aus den in Abbildung 7.125 gezeigten Messwerten aus Chur wurde so der Streugrad der Felsflächen ermittelt und schliesslich mit einer idealisierten Streugradkurve approximiert. Abbildung 7.127 zeigt die Mittel-, Minimal- und Maximalwerte der berechneten Streugrade für zwei unterschiedliche Felsflächendiskretisierungen. Der aus diesen Daten abgeleitete idealisierte Streugrad ist als dicke Kurve eingezeichnet.

7.6.3 Vergleich von Messungen und Berechnungen

Für die in Chur und Val Crastallina gemessenen Quellen-Empfänger-Kombinationen wurden mit dem Felsreflexionsmodell Ausbreitungsrechnungen durchgeführt. Die Felsflächendiskretisierung wurde auf 5 m gesetzt und der entsprechende idealisierte Streugrad aus Abbildung 7.127(a) verwendet.

Die Reflexionsberechnungen für Chur beinhalteten ausschliesslich Reflexionen von Felsflächen. In der näheren Umgebung der Messpunkte sind keine Geröllflächen vorhanden. Abbildung 7.128 zeigt Differenzkurven von Messung und Berechnung der Felsreflexionsereignispegel für die 12 Situationen in Chur in Terzbändern. Die dick eingezeichnete Kurve entspricht dem Mittelwert der 12 Einzelkurven. Der absolute mittlere Fehler der Berechnungen liegt im Bereich von 200 Hz bis 4 kHz unterhalb von 1 dB. Der Einbruch der Fehlerkurven um 160 Hz lässt sich durch das stark vereinfachte Bodeneffektmodell erklären.

In Val Crastallina wurden 18 Ausbreitungssituation gemessen und berechnet. Bei den Berechnungen wurden Reflexionen von Felswänden, Geröllflächen sowie Waldrändern berücksichtigt. Letztere führten bei fünf Empfangspunkten zu relevanten zusätzlichen Reflexionen. Die drei Anteile werden vom Modell energetisch zu einem Ereignispegel aufsummiert. Abbildung 7.129 zeigt die Differenzkurven von Messung und Berechnung in Val Crastallina für die 18 Situationen in Terzbändern. Die dick eingezeichnete Kurve entspricht dem Mittelwert der 18 Einzelkurven. Oberhalb von 100 Hz zeigt sich analog zu Chur eine gute Übereinstimmung. Unterhalb von 100 Hz werden die gemessenen Ereignispegel aber systematisch unterschätzt. Der Grund für diese Abweichungen liegt im vereinfachten Bodeneffektmodell, welches in der Talsituation, in der Mehrfachbodenreflexionen auftreten, zu konservativ ist.

Abbildung 7.130 zeigt die in Chur und Val Crastallina gemessenen und berechneten Ausbreitungsdämpfungen in dB(A). Die A-bewerteten Ausbreitungsdämpfungen wurden aus den Terzbändern 125 Hz bis 2 kHz berechnet und weisen in Chur eine mittlere Abweichung von 0.1 dB(A) und eine Standardabweichung von 0.9 dB(A) auf. In Val Crastallina liegt die mittlere Abweichung bei -0.1 dB(A) und die Standardabweichung bei 2.1 dB(A).

Abschliessend kann festgestellt werden, dass die Differenzen zwischen den berechneten Felsreflexionen und den entsprechenden Messungen erstaunlich gering ausfallen. Für die gezeigten Situationen sind die Abweichungen im Mittel sogar kleiner als beim Direktschallanteil. Die geringe Streuung lässt sich dem räumlichen, durch die Felsflächen

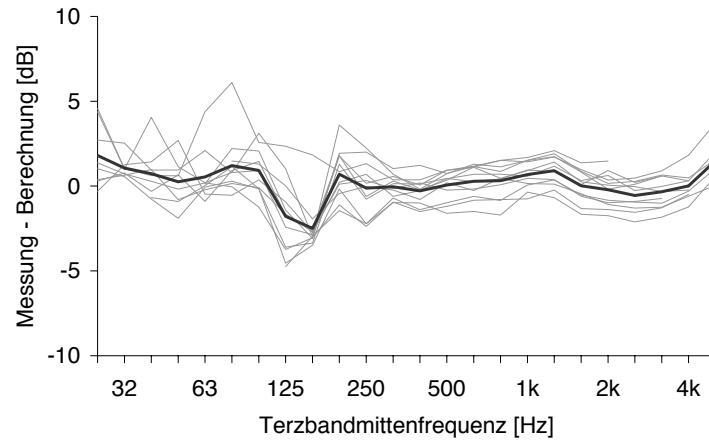


Abbildung 7.128: Differenz der gemessenen und berechneten Ereignispegel der Felsreflexionen für die 12 Situationen in Chur in Terzbändern. Die Berechnungen wurden mit einer Felsflächendiskretisierung von 5 m durchgeführt.

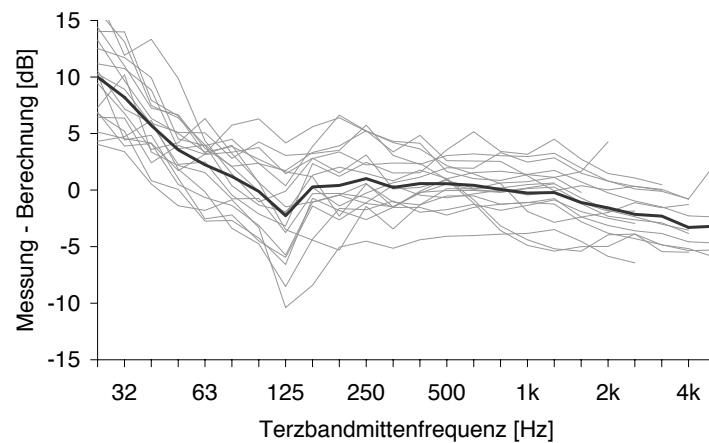


Abbildung 7.129: Differenz der gemessenen und berechneten Ereignispegel der Fels- und Geröllreflexionen für 18 Situationen im Val Crillina. Die Berechnungen wurden mit einer Felsflächendiskretisierung von 5m durchgeführt.

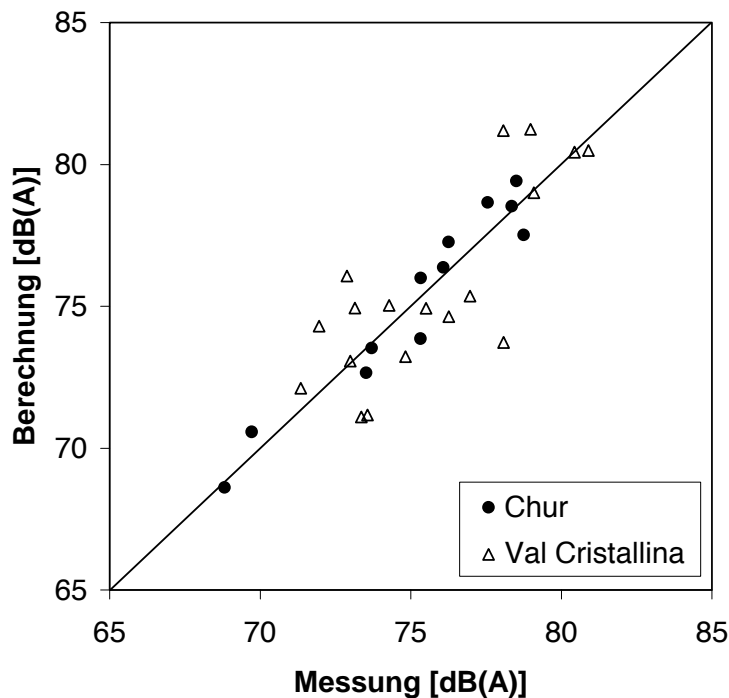


Abbildung 7.130: Gemessene und berechnete Ausbreitungsdämpfungen in dB(A) von Felsreflexionen für 12 Situationen in Chur und gemischten Fels- und Geröllreflexionen für 18 Situationen im Val Cristallina. Die Berechnungen wurden mit einer Felsflächendiskretisierung von 5 m durchgeführt.

induzierten Verschmierungseffekt zuschreiben, welcher lokale Ausbreitungseffekte ausmittelt.

Die Verwendung eines idealisierten Bodeneffektspektrums zur rechenzeitsparenden Berechnung des Bodeneffektes zeigt auf den A-bewerteten Pegel nur einen geringen Einfluss. Bei der Betrachtung in Terzbändern können sich durch diese Vereinfachung jedoch im Einzelfall bedeutende Abweichungen ergeben.

Der idealisierte Streugrad wurde ursprünglich für reine Felsflächen bestimmt. Es hat sich aber gezeigt, dass sich dieser Streugrad auch für die Berechnung von Reflexionen an Geröllflächen eignet. Diese Tatsache kann als ein Hinweis für die allgemeine Gültigkeit dieses Streugrades für felsartige Strukturen gedeutet werden. Diese Vermutung muss jedoch durch weitere Experimenten mit Reflexionen an Fels- und Geröllflächen gestützt werden.

8 Modellunsicherheit

In diesem Kapitel wird die Genauigkeit des Gesamtmodells abgeschätzt. Diese setzt sich je aus einem Unsicherheits-Term des Emissionsmodells und des Ausbreitungsmodells zusammen. Die Unsicherheitsbetrachtung geht dabei von der Annahme aus, dass alle relevanten Einflussgrößen soweit bekannt sind, wie dies unter realen Bedingungen der Fall sein kann. Es gilt aber zu beachten, dass zumindest ein Teil der resultierenden Unsicherheit gleichwohl nicht bekannten oder nur ungenügend abgebildeten Einflussgrößen zuzuschreiben ist. Emissionsseitig wird u.a. der Zustand der Antriebs- und der Fahrzeugkühlung nicht vorausgesetzt und beim Ausbreitungsmodell kann beispielsweise die Wetterlage in aller Regel nur pauschal und nicht räumlich und zeitlich fein aufgelöst beschrieben werden.

Werden allerdings Berechnungen für Situationen durchgeführt, in welchen elementare Modellparameter nicht bekannt sind, so ist mit einer deutlich grösseren Unsicherheit zu rechnen als in diesem Kapitel quantifiziert. Wie in der Sensitivitätsanalyse in Abschnitt 6.2 ausgewiesen, sind beim Emissionsmodell speziell die Rauigkeiten von Rad- und Schiene von zentraler Bedeutung. Beim Ausbreitungsmodell ist die Genauigkeit mit welcher das Gelände abgebildet wird sowie die Lage, Höhe und Ausrichtung von Gebäuden und weiteren künstlichen Hindernissen bzw. Reflektoren entscheidend. Ebenfalls nicht zu unterschätzen ist der Einfluss der Oberflächeneigenschaften sowie der Meteorologie.

Die Genauigkeit des Modells wird anhand der Abweichungen von Vorbeifahrtseignissen als kleinster Einheit diskutiert. Die Abweichung wird als A-Pegel-Differenz einer Berechnung mit *sonRAIL* und einer Messung oder einer wellentheoretischen Referenzberechnung bestimmt. Ein Vorbeifahrtseignis entspricht einem Immissions-Ereignispegel an einem Empfangspunkt für eine Zugfahrt. Dabei ergibt sich für das Emissionsmodell eine Mittelung über mehrere Wagen bzw. Lokomotiven und für das Emissions- und Ausbreitungsmodell eine Mittelung über alle Quellenpositionen der betrachteten Linienquelle. Es wird ausdrücklich nicht über unterschiedliche Meteosituationen gemittelt, da das Modell den Anspruch erhebt, bei Kenntnis aller Eingangsgrößen den Einzelfall möglichst genau abzubilden.

Die Genauigkeit des Modells kann durch zwei Größen charakterisiert werden. Neben der systematischen Abweichung von einem Referenzwert, welche als Modellfehler interpretiert werden kann, ist auch die stochastische Abweichung von Interesse, da letztere eine Aussage zur erwarteten Streuung im Einzelfall erlaubt. Diese beiden Aspekte werden durch den mittleren quadratischen Fehler gemäss nachfolgender Definition abgebildet.

$$\Psi = \sqrt{\frac{1}{n} \sum x_i^2} \quad (8.1)$$

wobei x_i die i -te von gesamthaft n Stichproben der Testgrösse x darstellt.

Die angestrebte Genauigkeit wird für die beiden Teilmodelle sowie für das Gesamtmodell als Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehler (Quadratwurzelfehler) für die nachfolgend definierten Testgrößen definiert.

8.1 Genauigkeit der Emissionsberechnung

Testgrösse für die Genauigkeit des Emissionsmodells sind die Differenzen zwischen gemäss ISO/DIS 3095.2 messtechnisch ermittelten und mit dem Emissionsmodell prognostizierten Vorbeifahrtspegeln ganzer Züge aus Situationen, in denen sämtliche Modellparameter bekannt sind. Bei Projektstart wurde als Zielgrösse festgelegt, dass der Quadratwurzelfehler aller Stichproben x weniger als 0.5 dB(A) betragen soll.

$$x_i = L_{Ri} - L_{Mi} \quad (8.2)$$

wobei L_{Ri} und L_{Mi} die Pegel der Referenz bzw. der Modellrechnung bezeichnen.

Für die Abschätzung der Genauigkeit der Emissionsberechnungen werden die vier folgenden Fälle untersucht:

1. glattes Rad, glatte Schiene
2. glattes Rad, rauhe Schiene

Schienenrauheit	Radrauheit	Stichproben	Mittelwert μ	Standardabweichung σ	Quadratwurzelfehler Ψ
glatt	glatt	8	0.489	0.120	0.504
glatt	rau	7	0.518	0.075	0.523
rau	glatt	4	0.379	0.033	0.380
rau	rau	9	-0.148	0.131	0.198

Tabelle 8.1: Zusammenstellung der nach Gleichung (8.2) berechneten Abweichungen zwischen Messung und Berechnung für vier unterschiedlichen Emissionsfälle

3. rauhes Rad, glatte Schiene
4. rauhes Rad, rauhe Schiene

Als Berechnungsgrundlage für den Fall "glatte Räder" werden IC Zugkompositionen bestehend aus einem Re460 Triebfahrzeug und acht EWIV Wagen ausgewählt. Die Berechnungen für den Fall "rauhe Räder" werden stellvertretend für eine Güterzugskomposition bestehend aus einem Re420 Triebfahrzeug und 20 GG-Klotz gebremsten, 4-achsigen Güterwagen durchgeführt. Es werden die durchschnittlichen, gemessenen Emissionspegel der jeweiligen Zugkompositionen bei $v = 80 \text{ km/h}$ mit den Berechnungsergebnissen verglichen. Bei den Berechnungen wird die an den jeweiligen Messstellen gemessene Schienenrauheit und Ausbreitungsdämpfung berücksichtigt. Die Berechnungen für den Fall "glatte Schiene" werden exemplarisch anhand der Messstelle 03 nördliches Gleis durchgeführt, für den Fall "rauhe Schiene" anhand der Messstelle 04 nördliches Gleis. Für die jeweiligen Radrauheiten wird die durchschnittliche Radrauheit aus allen Messungen je Fahrzeugkategorie verwendet. In Tabelle 8.1 werden die nach Gleichung (8.2) berechneten Abweichungen zwischen Messung und Berechnung für die vier unterschiedlichen Emissionsfälle aufgeführt. Der sich daraus ergebende Quadratwurzelfehler Ψ beträgt 0.401 dB(A) und liegt damit in der geforderten Genauigkeit der Emissionsberechnung von 0.5 dB(A) . Diese Genauigkeit wird bei einem hohen Grad an bekannten Modellparametern erreicht. Nimmt der Grad zuverlässiger Modellparameter ab, muss von einer Zunahme des Fehlers in den Emissionsberechnungen ausgegangen werden.

Im Folgenden soll die Genauigkeit der Emissionsberechnungen bei einem geringeren Grad an bekannten Modellparametern untersucht werden. Dazu werden die Berechnungsergebnisse der default-Methode mit den Messergebnissen pro Messstelle verglichen. Für die Betrachtungen werden die mittleren Schalldruckpegel ($TEL \text{ dB(A)}$ in 7.5 m) pro Fahrzeugkategorie für alle Vorbeifahrten an allen *sonRAIL* Messstellen verwendet. Der Vergleich mit den Berechnungsergebnissen erfolgt für eine definierte Vergleichsgeschwindigkeit. Im Vergleich zu den Ergebnissen in Tabelle 8.1 ist eine Zunahme der Ungenauigkeit in den Emissionsberechnungen zu erwarten, da der Grad an bekannten Modellparametern, insbesondere der fahrzeugseitigen Einflussparameter, deutlich abnimmt. Die Berechnungen werden unter Verwendung der in Abschnitt 6.1 aufgeführten Standardwerte des Emissionsmodells durchgeführt, für die Schienenrauheiten wurden die in Tabelle 4.1 ermittelten Rauheitsklassen verwendet.

8.2 Genauigkeit der Ausbreitungsrechnung

Zur Beurteilung der Genauigkeit des Ausbreitungsmodells werden für eine Vielzahl von Einzelsituationen Ausbreitungsdämpfungen mit dem Ausbreitungsmodell bestimmt und mit einer Referenz verglichen. Die Ausbreitungsdämpfungen sind dabei als Differenz der Quellenpegel in einem Meter Abstand und der A-bewerteten Pegel beim Empfangspunkt zu interpretieren. Als Referenz werden entweder Messungen oder Berechnungen mit einem wellentheoretisch korrekten Berechnungsmodell herangezogen. Als Testgrösse werden die Differenzen der Ausbreitungsdämpfungen von Modell und Referenz, geteilt durch die Ausbreitungsdämpfung der Referenz ermittelt. Diese Normierung über den Betrag der Dämpfung erlaubt es, ein Genauigkeitskriterium zu definieren, welches unabhängig von der Messdistanz oder den Ausbreitungsbedingungen angewendet werden kann. Bei Projektstart wurde als Zielgrösse festgelegt, dass der Quadratwurzelfehler aller Stichproben x_i weniger als 0.1 betragen soll.

Als Unsicherheiten bei der Ausbreitungsrechnung sind folgende Aspekte relevant:

1. Bodeneffekt und Hinderniswirkung bei homogener Atmosphäre
2. Reflexionen an Fels- und Waldelementen
3. Reflexionen an künstlichen Objekten (überbautes Gebiet)

4. Schattenzonen bei meteorologisch bedingten hinderlichen Ausbreitungsbedingungen
5. Abschwächung der Hinderniswirkung bei meteorologisch bedingten förderlichen Ausbreitungsbedingungen

Zur Gewinnung einer quantitativen Unsicherheitsaussage werden alle oben diskutierten Validierungsfälle herangezogen. Es wird vorausgesetzt, dass eine Ausbreitungssituation jeweils durch einen Ausbreitungsaspekt dominiert wird. So wird beispielsweise angenommen, dass in den Validierungsfällen für Reflexionen der Direktschall vernachlässigt werden kann. Dies stellt eine *worst case* Betrachtung dar, da in der Regel der mit kleinerer Unsicherheit berechenbare Direktschall ebenfalls einen relevanten Beitrag an die Immission beisteuert.

Insgesamt ergibt sich ein Set von 119 Ausbreitungssituationen. Viele dieser Fälle basieren auf einer Punkt → Punkt Ausbreitung. Da für die Diskussion die *sonRAIL* -Modellabweichungen in Beziehung zur Ausbreitungsdämpfung zu setzen sind, ist eine Umrechnung auf eine gleichwertige Linienquellensituation vorzunehmen. In einer Punkt-Punkt Situation wird die Quellenposition als ein Quellenpunkt unter 45° bzgl. des kürzesten Abstandes der entsprechenden Linienquelle interpretiert. Die Punkt-Punkt Ausbreitungsdämpfung (mit geometrischem Abstand d) wird zuerst durch eine $20 \log(d)$ [dB] Korrektur vom geometrischen Einfluss befreit und dann durch eine $10 \log(d/\sqrt{2})$ [dB] Anpassung auf die Linienquellen Ausbreitungsdämpfung umgerechnet. Diese Grösse ist als Ausbreitungsdämpfung bzgl. eines Linienquellenabstandes von 1 m zu verstehen.

Um die Diskussion im A-Pegel führen zu können, sind die von *sonRAIL* gelieferten spektralen Dämpfungen entsprechend zusammengefasst worden. Dazu ist das in Tabelle 8.2 gezeigte A-bewertete Referenz-Eisenbahnlärmspektrum zu Grunde gelegt worden.

Terz [Hz]	Pegel [dB]
200	-23.5
250	-20.5
315	-18.5
400	-16.5
500	-14.4
630	-13.0
800	-11.6
1000	-10.1
1250	-9.0
1600	-7.8
2000	-6.7
2500	-9.2
3150	-11.6

Tabelle 8.2: Für die Validierung verwendetes A-bewertetes Referenz-Eisenbahnlärmspektrum.

Die Abbildung 8.1 zeigt für alle 119 untersuchten Ausbreitungssituationen den relativen Fehler in Form des Quotienten

$$x_i = \frac{D_{R,i} - D_{M,i}}{D_{R,i}} \quad \text{mit } i = 1 \dots 119 \quad (8.3)$$

wobei $D_{R,i}$ und $D_{M,i}$ der auf 1 m bezogenen Ausbreitungsdämpfungen in dB(A) der für die Validierung verwendeten Referenz und des Modells *sonRAIL* entsprechen. Tabelle 8.3 zeigt die resultierenden Quadratwurzelfehler Ψ , welche sich für unterschiedliche Ausbreitungssituationen ergeben. Wie zu erkennen ist, gelingt es die Reflexionen an Gebäuden und an Felswänden mit einer Genauigkeit zu reproduzieren, welche den Direktschallberechnungen vergleichbar ist. Lediglich das Waldreflexionsmodell erreicht nicht die gleiche Genauigkeit wie die übrigen Modellteile. Aufgrund der absolut gesehen tiefen resultierenden Immissionspegel kann diese etwas grössere Unsicherheit aber in Kauf genommen werden.

8.3 Genauigkeit der resultierenden Immissionsprognose

Entsprechend dem Projektziel, Beurteilungen gemäss der Schweizerischen Lärmschutzverordnung vorzunehmen, soll die Genauigkeit des Gesamtmodells im Hinblick auf die Ermittlung von Beurteilungspegeln spezifiziert werden. Als

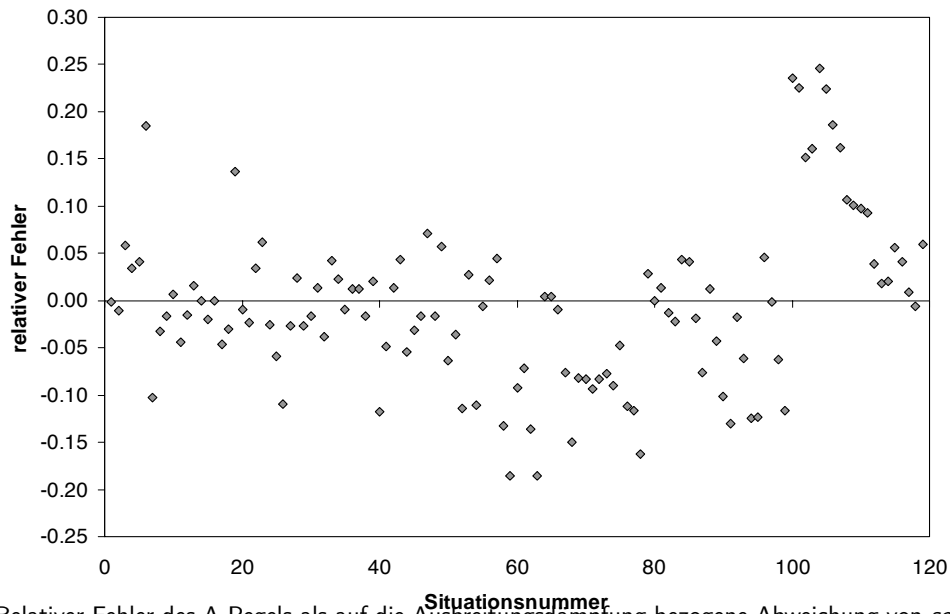


Abbildung 8.1: Relativer Fehler des A-Pegels als auf die Ausbreitungsdämpfung bezogene Abweichung von *sonRAIL* zur Referenz.

Situationen	Ausbreitung	Mittelwert μ	Standardabweichung σ	Quadratwurzelfehler Ψ
1 - 19	Direktschall	0.008	0.065	0.065
20 - 27	Gebäude-Reflexionen	-0.020	0.053	0.056
28 - 54	Fels-Reflexionen	-0.013	0.050	0.052
55 - 119	Wald-Reflexionen	-0.006	0.106	0.106

Tabelle 8.3: Zusammenstellung der resultierenden Quadratwurzelfehler Ψ gemäss Abbildung 8.1 für unterschiedliche Ausbreitungssituationen.

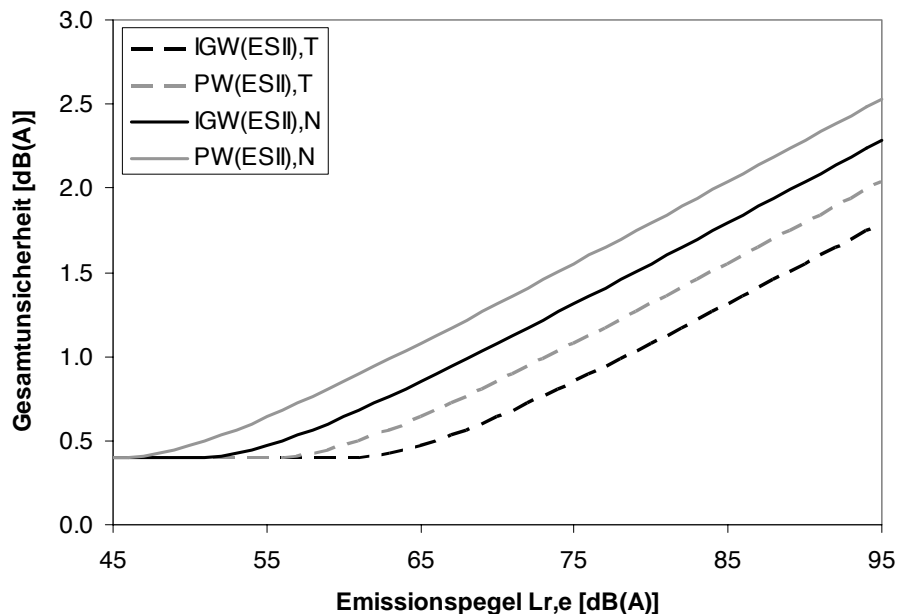


Abbildung 8.2: Gesamtunsicherheit in Abhängigkeit des Emissionspegels in einem Referenzabstand von 1 m für vier Grenzwerte der Empfindlichkeitsstufe II: Immissionsgrenzwerte in schwarz und Planungswerte in grau, Nachtgrenzwerte als ausgezogene und Tagesgrenzwerte als gestrichelte Linien.

Vergleichsgrösse sollen Pegeldifferenzen zwischen messtechnisch und rechnerisch ermittelten Beurteilungspegeln aus Situationen verwendet werden, in denen sämtliche Einflussgrössen bekannt sind, wobei auf eine korrekte Abbildung der meteorologischen Einflüsse bei der Bildung des Jahresmittelwertes geachtet werden muss. Gemäss Pflichtenheft darf der Quadratwurzelfehler dieser Pegeldifferenzen im Bereich der Immissionsgrenzwerte und darüber weniger als 2.0 dB und im Bereich der Planungswerte weniger als 3.0 dB betragen.

Die Genauigkeit einer Immissionsprognose setzt sich wie erwähnt aus den Teilunsicherheiten des Emissions- und des Ausbreitungsmodells zusammen. Die beiden Terme werden nach den Regeln der Fehlerfortpflanzung addiert, da die Unsicherheiten der Emissionsberechnung als unabhängig von den Unsicherheiten der Ausbreitungsrechnung angesehen werden können. Abbildung 8.2 zeigt die resultierende Gesamtunsicherheit von *sonRAIL* in Abhängigkeit des Emissionspegels in einem Referenzabstand von 1 m, welche sich im Bereich der Immissionsgrenzwerte und der Planungswerte am Tag und in der Nacht in der Empfindlichkeitsstufe II ergibt. Für die Genauigkeit des Emissionsmodell wurde $\Psi = 0.4 \text{ dB(A)}$ eingesetzt und für das Ausbreitungsmodell wird pauschal von einer Unsicherheit von 5 % der Ausbreitungsdämpfung ausgegangen. Dieser Wert entspricht den Quadratwurzelfehlern, welche für die Reflexionsmodelle für Gebäude und Felswände ermittelt wurden. Er kann aber auch für die Direktschall-Berechnung als repräsentativ angesehen werden, da die Zielgrösse des Jahresmittelwertes eine Mittellung über sehr viele Wetterlagen darstellt und sich entsprechend meteorologische Einflüsse zumindest teilweise ausmitteln. Die höhere Unsicherheit beim Waldreflexionsmodell kann in diesem Zusammenhang vernachlässigt werden, da im Bereich der Grenzwerte kaum von dominierenden Waldreflexionen ausgegangen werden muss.

Wie der Vergleich mit den Anforderungen des Pflichtenheftes zeigt, werden diese im Bereich der Planungswerte deutlich eingehalten. Bei den Immissionsgrenzwerten am Tag ist dies ebenfalls bei sämtlichen Belastungen der Fall. In der Nacht wird das Kriterium von einem maximalen Quadratwurzelfehler von 2.0 dB(A) bis zu einem Emissionswert von 90 dB(A) ebenfalls eingehalten. Lediglich bei noch höheren Emissionswerten, welche gemäss Emissionsplan nur an wenigen, ausgesuchten Strecken erreicht werden, resultieren Unsicherheiten grösser 2.0 dB(A). Somit kann gefolgert werden, dass die angestrebte Genauigkeit im Hinblick auf die Immissionsprognose in der überwiegenden Mehrzahl der Fälle eingehalten wird.

Literaturverzeichnis

- [1] *Messung von Verkehrsgeräuschen*. DIN 45642, 2004.
- [2] DITTRICH, M. G.: *Work Package 6: IMAGINE railway noise source model, default source data and measurement protocol*. imagine, TNO, 2005.
- [3] DITTRICH, M. G.: *The IMAGINE Source Model for Railway Noise Prediction*. Acta Acustica united with Acustica, 93:185–200, 1997.
- [4] REMINGTON, P. J.: *Wheel/rail noise, part I: characterization of the wheel/rail dynamic system*. Journal of Sound and Vibration, 46:359–380, 1976.
- [5] REMINGTON, P. J.: *Wheel/rail noise, part IV: rolling noise*. Journal of Sound and Vibration, 46:419–436, 1976.
- [6] REMINGTON, P. J.: *Wheel/rail rolling noise I: theoretical analysis*. Journal of the Acoustical Society of America, 81:1805–1823, 1987.
- [7] REMINGTON, P. J.: *Wheel/rail rolling noise II: validation of the theory*. Journal of the Acoustical Society of America, 81:1824–1832, 1987.
- [8] THOMPSON, D. J.: *Wheel-rail noise generation, part I: Introduction and Interaction Model*. Journal of Sound and Vibration, 161:387–400, 1993.
- [9] THOMPSON, D. J.: *Wheel-rail noise generation, part III: Rail Vibration*. Journal of Sound and Vibration, 161:421–446, 1993.
- [10] THOMPSON, D. J.: *Wheel-rail noise generation, part II: Wheel Vibration*. Journal of Sound and Vibration, 161:401–419, 1993.
- [11] THOMPSON, D. J.: *Wheel-rail noise generation, part IV: Contact zone and Results*. Journal of Sound and Vibration, 161:447–466, 1993.
- [12] *Classification of rolling stock and track, 2nd draft*. STAIRRS project, 2000.
- [13] WIRNSBERGER, M. und DITTRICH, M. G.: *The METARAIL Project - Final Report*. Technischer Bericht Project No. RA-97-SC.1080, METARAIL Consortium, 1999.
- [14] DE BEER, F. G. et al.: *STAIRRS Level 2 Measurement Methods: Indirect Roughness and Transfer Function*. (TNO-RPT-020079), 7 2002.
- [15] THOMPSON, D. J.: *The influence of the contact zone on the excitation of wheel/rail noise*. Journal of Sound and Vibration, 267:523–535, 2003.
- [16] FORD, R. A. J. und THOMPSON, D. J.: *Simplified contact filters in wheel/rail noise prediction*. Journal of Sound and Vibration, (293):807–818, 2006.
- [17] ARBEITSGRUPPE SCHIENENVERKEHRLÄRM DER EUROPÄISCHEN KOMMISSION: *Positionspapier über die europäischen Strategien und Prioritäten zur Bekämpfung des Schienenverkehrslärms*. Downloadable from: <http://ec.europa.eu/environment/noise/pdf/>, 2003.
- [18] *sonRAIL : ein neues Eisenbahnlärmberechnungsmodell für die Schweiz*, RAIL-n.o.i.s.e 2007: Geräuschemission und Lärminderung. D. Sehu, 2007.
- [19] *Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors - Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere*. ISO 9613-1, 1996.

- [20] *Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors - Part 2: General method of calculation.* ISO 9613-2, 1996.
- [21] CHESSEL, C. I.: *Propagation of noise along a finite impedance boundary.* Journal Acoustical Society of America, 62:825–834, 1977.
- [22] CHIEN, C. F. und SOROKA, W. W.: *A note on the calculation of sound propagation along an impedance surface.* Journal of Sound and Vibration, 69:340–343, 1980.
- [23] ABRAMOWITZ, M. und STEGUN, J. A.: *Handbook of Mathematical Functions.*
- [24] GAUTSCHI, W.: *Efficient Computation of the Complex Error Function.* SIAM J. Numer. Anal., 7:187–198, 1970.
- [25] DELANY, M. E. und BAZLEY, E. N.: *Acoustical properties of fibrous absorbent materials.* Applied Acoustics, 3:105–116, 1970.
- [26] DAIGLE, G. A. et al.: *Some comments on the literature of propagation near boundaries of finite acoustical impedance.* Journal Acoustical Society of America, 66:918–919, 1979.
- [27] HOTHERSALL, D. C. und HARRIOTT, J. B. N.: *Approximate models for sound propagation above multi-impedance plane boundaries.* Journal Acoustical Society of America, 97:918–926, 1995.
- [28] N.N.: *Nord2000: Comprehensive Outdoor Sound Propagation Model.* Technischer Bericht, DELTA, Danish Electronics, Light & Acoustics, 2001.
- [29] N.N.: *Harmonoise WP 3 Engineering method for road traffic and railway noise after validation and fine-tuning.* Technischer Bericht HAR32TR-040922-DGMR20, Deliverable 18, 2005.
- [30] HEUTSCHI, K.: *Ground effect calculations for micro structured terrain.* In: *Proceedings of the International Congress on Acoustics ICA, 2007.*
- [31] HEUTSCHI, K.: *Sound propagation over ballast surfaces.* submitted to Acta Acustica united with Acustica, 2009.
- [32] ATTENBOROUGH, K.: *Acoustical characteristics of rigid fibrous absorbents and granular materials.* Journal Acoustical Society of America, 73:785–799, 1983.
- [33] MORSE, R. W.: *Acoustic Propagation in Granular Media.* Journal Acoustical Society of America, 24:696–700, 1952.
- [34] SMITH, P. G. und GREENKORN, R. A.: *Theory of Acoustical Wave Propagation in Porous Media.* Journal Acoustical Society of America, 52:247–253, 1971.
- [35] UTSUNO, H. et al.: *Transfer function method for measuring characteristic impedance and propagation constant of porous materials.* Journal Acoustical Society of America, 86:637–643, 1989.
- [36] LI, K. M. L. et al.: *Sound propagation from a point source over extended-reaction ground.* Journal Acoustical Society of America, 104:679–685, 1998.
- [37] CHIEN, C. F. und SOROKA, W. W.: *Sound propagation along an impedance plane.* Journal of Sound and Vibration, 43:9–20, 1975.
- [38] BAYER, R. und HEUTSCHI, K.: *Schallabstrahlung von Eisenbahntunnelportalen.* Technischer Bericht, Bericht für das BUWAL, 16.11.2004.
- [39] HEUTSCHI, K. und BAYER, R.: *Sound radiation from railway tunnel openings.* Acta Acustica united with Acustica, 92:567–573, 2006.
- [40] HEUTSCHI, K.: *Schallausbreitung in Eisenbahneinschnitten.* Technischer Bericht, Bericht für das BUWAL, 12.10.2006.
- [41] HEUTSCHI, K.: *Sound propagation in railway line cuttings.* Applied Acoustics, 69:1189–1194, 2008.

- [42] PIERCE, A. D.: *Acoustics an introduction to its physical principals and applications*. Acoustical Society of America, Woodbury, 1989.
- [43] WALTON E. MCBRIDE et al.: *Scattering of sound by atmospheric turbulence: Predictions in a refractive shadow zone*. Journal Acoustical Society of America, 91:1336–1340, 1992.
- [44] BERRY, A. und DAIGLE, G. A.: *Controlled experiments of the diffraction of sound by a curved surface*. Journal Acoustical Society of America, 83:2047–2058, 1988.
- [45] HEIMANN, D. und GROSS, G.: *Coupled simulation of meteorological parameters and sound level in a narrow valley*. Applied Acoustics, 56:73–100, 1999.
- [46] ATTENBOROUGH, K. et al.: *Benchmark cases for outdoor sound propagation models*. Journal Acoustical Society of America, 97:173–191, 1995.
- [47] HOFMANN, J. und HEUTSCHI, K.: *An Engineering Model for Sound Pressure in Shadow Zones Based on Numerical Simulations*. Acta Acustica united with Acustica, 91:661–670, 2005.
- [48] *Umweltmeteorologie - Physikalische Modellierung von Strömungs- und Ausbreitungsvorgängen in der atmosphärischen Grenzschicht*. VDI-Richtlinie 3783 Blatt 12.
- [49] PICAUT, J. und SIMON, L.: *A scale model experiment for the study of sound propagation in urban areas*. Applied Acoustics, 62:327–340, 2001.
- [50] ISMAIL, M. R. und OLDHAM, D. J.: *Computer Modelling of Urban Noise Propagation*. Building Acoustics, 10:221–253, 2003.
- [51] KANG, J. (Herausgeber): *Urban Sound Environment*. Spon Press, 2006.
- [52] HEUTSCHI, K.: *A Simple Method to Evaluate the Increase of Traffic Noise Emission Level Due to Buildings, for a Long Straight Street*. Applied Acoustics, 44:259–274, 1995.
- [53] HEUTSCHI, K.: *Parameter Study of the Insertion Loss Reduction in Case of a Building Facade Parallel to a Noise Barrier*. Acta Acustica united with Acustica, 89:908–912, 2003.
- [54] MAKAREWICZ, R. und KRASNOWSKA, I.: *Traffic Noise Attenuation in an Urban Area in Terms of A-Weighted Sound Exposure Level*. JApplied Acoustics, 37:65–74, 1991.
- [55] HEUTSCHI, K.: *Computermmodell zur Berechnung von Bebauungszuschlägen bei Strassenverkehrslärm*. Acustica, 81:26–35, 1995.
- [56] LEE, K. P. und DAVIES, H. G.: *Nomogram for estimating noise propagation in urban areas*. Journal Acoustical Society of America, 57:1477–1480, 1975.
- [57] IU, K. K. und LI, K. M.: *The propagation of sound in narrow street canyons*. Journal Acoustical Society of America, 112:537–550, 2002.
- [58] PICAUT, J. et al.: *Sound field modeling in streets with a diffusion equation*. Journal Acoustical Society of America, 106:2638–2645, 1999.
- [59] PICAUT, J.: *Numerical modeling of urban sound fields by a diffusion process*. Applied Acoustics, 63:965–991, 2002.
- [60] KANG, J.: *Sound propagation in street canyons: Comparison between diffusely and geometrically reflecting boundaries*. Journal Acoustical Society of America, 107:1394–1404, 2000.
- [61] HEUTSCHI, K.: *Calculation of reflections in an urban environment*. submitted to Acta Acustica united with Acustica, 2009.
- [62] WUNDERLI, J. M. und SALOMONS, E. M.: *A Model to Predict the Sound Reflection from Forests*. Acta Acustica united with Acustica, 95:76–85, 2009.
- [63] BOWMAN, J. J. et al.: *Electromagnetic and acoustic scattering*. North-Holland, Amsterdam, 1969.
- [64] MORSE, P. M. und INGARD, K. U.: *Theoretical Acoustics*. McGraw-Hill, New York, 1986.

- [65] WAIT, J. R.: *Electromagnetic radiation from cylindrical structures*. Pergamon, London, 1989.
- [66] SALOMONS, E. M.: *A model for calculating specular and diffuse reflections in outdoor sound propagation*. In: *The Thirteenth International Congress on Sound and Vibration (ICSV13)*, Vienna, Austria, July 2-6 2006.
- [67] ULMER, U.: *Schweizerisches Landesforstinventar LFI. Spezialauswertung der Erhebung 1993-95 vom 24. Februar 2003*. Technischer Bericht, Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape, 2003.
- [68] N.N.: *Validation of the Harmonoise models, Harmonoise Technical Report D21*. Technischer Bericht, www.harmonoise.org HAR28TR-041109-TNO11.doc, 2005.
- [69] STULL, R. B.: *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic Publishers, 1994.
- [70] ROEDEL, W.: *Physik unserer Umwelt: Die Atmosphäre*. Springer, 2000.
- [71] HANNA, JS. R. und CHANG, J. C.: *Hybrid Plume Dispersion Model (HPDM), Improvements and Testing at Three Field Sites*. *Atmospheric Environment*, 27A(9):1491–1508, 1993.
- [72] *VDI 3789 Blatt 2: Umweltmeteorologie - Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Oberflächen, Berechnung der kurz- und der langwelligen Strahlung*. VDI-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 1., 1994.
- [73] BUSINGER, J. A. et al.: *Flux-Profile Relationships in the Atmospheric Surface Layer*. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 28:181–189, 1971.
- [74] FORRER, J. und ROTACH, M. W.: *On the Turbulence Structure in the Stable Boundary Layer over the Greenland Ice Sheet*. *Boundary Layer Meteorology*, 85:111–136, 1997.
- [75] HÖGSTRÖM, U.: *Non-dimensional Wind and Temperature Profiles in the Atmospheric Surface Layer: A Re-evaluation*. *Boundary Layer Meteorology*, 42:55–78, 1988.
- [76] MELLERT, V. und SILL, A. (Herausgeber): *Meteorologische Einflüsse auf die Schallausbreitung*, Ergebnisse des Vorkolloquiums zur DAGA '86, 1986.
- [77] SUGITA, M. und BRUTSAERT, W.: *How similar are Temperature and Humidity Profiles in the Unstable Boundary Layer?* *Journal Applied Meteorology*, 29:489–497, 1990.
- [78] BELJAARS, A. C. M. und HOLTSLAG, A. A. M.: *Flux Parametrization over Land Surfaces for Atmospheric Models*. *Journal Applied Meteorology*, 30:327–341, 1991.
- [79] HEIMANN, D. und SALOMONS, E. M.: *Testing meteorological classifications for the prediction of long-term average sound levels*. *Applied Acoustics*, 65:925–950, 2004.
- [80] J. DEFRANCE et al.: *Outdoor Sound Propagation Reference Model Developed in the European Harmonoise Project*. *Acta Acustica united with Acustica*, 93:213–227, 2007.
- [81] HEIMANN, D.: *Vertical Sound Speed Profiles Determined from Meteorological Measurements Near the Ground*. *Acta Acustica united with Acustica*, 93:228–240, 2007.
- [82] ROTACH, M. W. und CALANCA, P.: *Microclimate*. *Encyclopaedia of Atmospheric Sciences*, (1301-1307):489–497, 2002.
- [83] OKE, T.P.: *Boundary Layer Climates*. Methuen and Co. Ltd., 1978.
- [84] KAUFMANN, P.: *Bodennahe regionale Windfelder über komplexer Topographie*. Doktorarbeit, ETH Zürich, 1996.
- [85] POLSTER, G.: *Erfahrungen mit Strahlungs-, Temperaturgradient- und Windmessungen als Bestimmungsgrößen der Diffusionskategorien*. *Meteorologische Rundschau*, (6), 1969.
- [86] ROHRBECK, A. und SCHEINER, A.: *Bericht 2-293 sonRAIL – Messungen an den Basismessstellen – Spezifikation*. Spezifikation 2-293, PROSE, 3 2007.
- [87] *Railway Application – Acoustic – Measurement of noise emitted by railbound vehicles*. EN ISO 3095, 2005.

- [88] ROHRBECK, A. und THRON, T.: *sonRAIL – Die Erweiterung des schweizerischen Lärmmodells für den Schienenverkehr*. ZEVrail Gl. Ann., 132:95–105, 11 2008.
- [89] SCHEINER, D.: *Datenablage und Datenorganisation sonRAIL*. MEMO, PROSE, 2007-03-19.
- [90] *Railway Application – Noise emission – Rail roughness measurement related to rolling noise generation*. prEN 15610, 2009.
- [91] *Geräuschmessung an Maschinen; Luftschallemission, Körperschallmessung; Rahmenverfahren*. DIN 45635-8, 1985.
- [92] STAP, P. VAN DER et al.: *HARMONOISE project Practical datacollection for the Harmonoise source model: measurement guidelines and analysis*. Technical report HAR12TR-031203-AEAT12 (D13p2), 2004.
- [93] JANSSENS, M. H. A. und DITTRICH, M. G.: *Railway noise measurement method for pass-by noise, total effective roughness, transfer functions and track spatial decay*. Journal of Sound and Vibration, 293:1007–1028, 2006.
- [94] LIER, A.A. VON: *The measurement, analysis and presentation of wheel and rail roughness*. AEAT report NSTO/97/9571011/005, AEAT, 8 1997.
- [95] THRON, T. und HECHT, M.: *Messbericht sonRAIL – Decay Rate und Schienenrauheiten an den Messstellen 13, 14 und 15*. Messbericht 0708, Technische Universität Berlin, Fachgebiet Schienenfahrzeuge, 6 2007.
- [96] THRON, T. und HECHT, M.: *Messbericht sonRAIL – Decay Rate der Messstellen 01 bis 12; Schienenrauheiten der Messstellen 01 bis 12; Radrauheiten der Güterwagen des Messzuges*. Messbericht 0713, Technische Universität Berlin, Fachgebiet Schienenfahrzeuge, 9 2007.
- [97] RUTISHAUSER, G.: *Erfahrungen mit besohlenen Schwellen*. In: *OVE-Schriftenreihe Nr. 52*, Seiten 111–116, 2009.
- [98] KNOTHE, K. und WU, Y.: *Einfluß der Elastizitätsanordnung im Gleis auf die Beanspruchung durch Radrundheiten*. ETR - Eisenbahntechnische Rundschau, 49:1029–1040, 3 2000.
- [99] *Die Neubaustrecke Mattstetten-Rothrist*. SBB.
- [100] MÜLLER-BORUTTAU, F. H. und BREITSAMTER, N.: *Elastische Elemente im Gleis verringern die Fahrwegbeanspruchung*. ETR – Eisenbahntechnische Rundschau, 49:587–596, 9 2000.
- [101] *Technische Spezifikation für die Interoperabilität (TSI) zum Teilsystem "Fahrzeuge – Lärm" des konventionellen transeuropäischen Bahnsystems*, 2005.
- [102] BÜTIKOFER, R.: *sonRAIL Beschleunigungsmessungen: Zur Problematik von Übersteuerungen*. Untersuchungsbericht 445403-1, EMPA, 12 2007.
- [103] BRONŠTEIN, I. N. und SEMENDJAEV, K. A.: *Taschenbuch der Mathematik*, Band 5. Auflage. Verlag Harri Deutsch, Thun und Frankfurt am Main, 2001.
- [104] BAUMGARTNER, W.: *Die Neuen Pendelzüge (NPZ) der schweizerischen Bundesbahnen in der Serienausführung*. Schweizer Eisenbahnrevue, Seiten 87–95, 3 1987.
- [105] GRAF, H. R.: *Auswertung der Array-Messungen sonRAIL*. Report SWA TB07 0576.1, Sulzer Innotec, 7 2008.
- [106] THOMPSON, D. J.: *Railway Noise and Vibration – Mechanisms, Modelling and Means of Control*. Elsevier, 2009.
- [107] GERBER, M. et al.: *Locomotive 2000 - Series 460 - of the Swiss Federal Railways*. Schweizer Eisenbahn-Revue, Seiten 1–47, 10 1991.
- [108] HECHT, M. und DRABEK, E.: *Lärminderung im Führerraum der Re 4/4 II*. Schweizer Eisenbahn-Revue, Seiten 19–22, 1-2 1992.
- [109] FEIERABEND, J. et al.: *Einsatz der Akustischen Kamera für die Untersuchung von Lärmmissionen von Schienenfahrzeugen*. In: *RAIL-noise*, Seiten 49–64, 2009.

- [110] JONES, C. J. C. und THOMPSON, D. J.: *The use of decay rates to analyse the performance of railway track in rolling noise generation*. Journal of Sound and Vibration, 293:485–495, 2006.
- [111] THOMPSON, D. J. und JONES, C. J. C.: *The influence of the nonlinear stiffness behaviour of rail pads on the track component of rolling noise*. Proceedings of the I.Mech.E. Journal of Rail and Rapid Transit, 213F:233–241, 1999.
- [112] KNOTHE, K.: *Dynamische Eigenschaften von Gummi-Zwischenlagen*. ZEVrail Glasers Annalen, 126:496–501, 11 2002.
- [113] VINCENT, N. et al.: *Theoretical optimization of track components to reduce rolling noise*. Journal of Sound and Vibration, 193:161–171, 1996.
- [114] COENRAAD, E.: *Modern Railway Track*, Band 2. Auflage. MRT-Productions, Zaltbommel, 2001.
- [115] MAN, A. P. DE: *Pin-pin resonance as a reference in determining ballasted railway track vibration behaviour*. HERON, 45(1):35–51, 2000.
- [116] KNOTHE, K.: *Gleisdynamik*. Ernst&Sohn, 2001.
- [117] THOMPSON, D. J.: *Experimental analysis of wave propagation in railway tracks*. Journal of Sound and Vibration, 203:867–888, 1997.
- [118] *Bahnanwendungen – Schallemission – Charakterisierung der dynamischen Eigenschaften von Gleisabschnitten für Vorbeifahrtgeräuschemessungen*. DIN EN 15461, 2008.
- [119] DITTRICH, M. G.: *Track Decay Rate measurements using the PBA technique*. Euronoise, 2006.
- [120] VINCENT, N. et al.: *Curve squeal of urban rolling stock – Part 1: State of the art and field measurements*. Journal of Sound and Vibration, 293:691–700, 2006.
- [121] REMINGTON, P. J.: *Wheel/rail squeal and impact noise: what do we know ? What don't we know ? Where do we go from here?* Journal of Sound and Vibration, 116:339–353, 1986.
- [122] BRACCIALI, A. (Herausgeber): *10th International SAVOIR Course – Noise and Vibration from Rail Transport Systems*. The Institute of Sound and Vibration Research, University of Southampton, 2006.
- [123] VER, I. L. und VENTRES, C. S.: *Wheel/rail noise, Part II: Impact Noise generation by wheel and rail discontinuities*. Journal of Sound and Vibration, 46:395–417, 1976.
- [124] WU, T. X. und THOMPSON, D. J.: *A hybrid model for the noise generation due to railway wheel flats*. Journal of Sound and Vibration, 251:115–139, 2002.
- [125] WU, T. X. und THOMPSON, D. J.: *On the impact noise generation due to a wheel passing over rail joints*. Journal of Sound and Vibration, 267:485–496, 2003.
- [126] JANSSENS, M. H. A. und THOMPSON, D. J.: *A calculation model for the noise from steel railway bridges*. Journal of Sound and Vibration, 193:295–305, 1996.
- [127] MÜLLER, G. und MÖSER, M. (Herausgeber): *Taschenbuch der Technischen Akustik*, Band 3. Auflage. Springer Verlag, 2004.
- [128] TUKKER, J. C. und VERHEIJ, J. W.: *Geluidemissie stalen spoorbruggen. Rekenmodel voor geluidverminderende maatregelen Noise emission of steel railway bridges. Calculation model for noise reduction measures*. report TPD-HAG-RPT -89-0065, TNO, 11 1989.
- [129] WALKER, J. G. et al.: *An Investigation of noise from trains on bridges*. Journal of Sound and Vibration, 193:307–314, 1996.
- [130] KURZWEIL, L. G.: *Prediction and control of noise from railway bridges and tracked transit elevated structures*. Journal of Sound and Vibration, 51:419–439, 1977.
- [131] KÖSTLI, K. P. und JONES, C. J. C.: *Experimental and Theoretical Analysis of Railway Bridge Noise Reduction Using Resilient Rail Fasteners in Burgdorf, Switzerland*. Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems, 99:208–214, 2007.

- [132] *Handbuch Emissionskataster SBB CFF FFS*. Bau GD-Ib-U: A079, 1997.
- [133] TALOTTE, C. et al.: *Railway Source Models for Integration in the New European Noise Prediction Method proposed in Harmonoise*. Journal of Sound and Vibration, 293:975–985, 2006.
- [134] DITTRICH, M. G. und ZHANG, X.: *The Harmonoise/IMAGINE model for traction noise of powered railway vehicles*. Journal of Sound and Vibration, (293):986–994, 2006.
- [135] NOTA, R. et al.: *Harmonoise WP3 Engineering method for road traffic and railway noise after validation and fine-tuning*. Harmonoise report HAR32TR-040922-DGMR10, DGMR, 2004.
- [136] TALOTTE, C.: *Harmonoise WP1.2 Rail Sources – Railway source model and user manual of the database (D13p1)*. Harmonoise report HAR12TR-040112-SNCF10, SNCF, 2004.
- [137] *Bestimmung der Tonhaltigkeit von Geräuschen und Ermittlung eines Tonzuschlages für die Beurteilung von Geräuschemissionen*. DIN 45681, 2005.
- [138] SALZ, D.: *Terzspektrenbasierte Bewertung der Tonhaltigkeit von Schienenfahrzeugen*. Doktorarbeit, TU Berlin, 2006.
- [139] BAV - BUNDESAMT FÜR VERKEHR (Herausgeber): *Monitoring Eisenbahnlärm: Jahresbericht 2007*. <http://www.bav.admin.ch>, 2007.
- [140] BAV - BUNDESAMT FÜR VERKEHR (Herausgeber): *Monitoring Eisenbahnlärm: Jahresbericht 2008*. <http://www.bav.admin.ch>, 2008.
- [141] BAV - BUNDESAMT FÜR VERKEHR (Herausgeber): *Monitoring Eisenbahnlärm: Jahresbericht 2006*. <http://www.bav.admin.ch>, 2006.
- [142] *Richtlinie zur Berechnung der Schallimmissionen von Eisenbahnen und Straßenbahnen, Schall 03, Ausgabe 2006*, 12 2006.
- [143] MOEHLER, U. et al.: *The new German prediction model for railway noise "Schall 03 2006" – Potentials of the new calculation method for noise mitigation of planned rail traffic*. In: *Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems*, Seiten 186–192, 2007.
- [144] UBA - UMWELTBUNDESAMT (Herausgeber): *Geräuschemissionen von Eisenbahnen*, Nummer 61/03. <http://www.umweltbundesamt.de>, 2003.
- [145] KALIVODA, M.: *acramos – das System zur automatischen, fahrzeugelektiven Erfassung der Geräusch- und Erschütterungsemission von Schienenfahrzeugen des Regelbetriebs*. In: *Fortschritte der Akustik – DAGA 2007*. Deutsche Gesellschaft für Akustik, 2007.
- [146] KALIVODA, M.: *Arbeitskonzept update, ÖAL30/ON Regel 305011*. Technischer Bericht, psiA-Consult, 2007.
- [147] WUNDERLI, J. M.: *Quellenseparation bei fahrenden Zügen mit Hilfe von Schalldruck- und Schallschnellemessungen*. Doktorarbeit, TU Berlin, 2006.
- [148] KING, W. F.: *The components of wayside noise generated by high-speed tracked vehicles*. In: *Proceedings Inter Noise 90*, Seiten 375–378, 1990.
- [149] JONSSON, G. B. und JACOBSEN, F.: *A Comparison of Two Engineering Models for Outdoor Sound Propagation: Harmonoise and Nord2000*. Acta Acustica united with Acustica, 94:282–289, 2008.
- [150] JONSSON, G. B.: *A comparison of two numerical models for outdoor sound propagation*. Masters Thesis, Acoustic Technology Ürsted, DTU, 2007.
- [151] PARKIN, P. H. und SHOLES, W. F.: *The Horizontal Propagation of Sound from a Jet Engine Close to the Ground at Hatfield*. Journal of Sound and Vibration, 2:353–374, 1965.
- [152] ATTENBOROUGH, K. et al.: *Finite-difference time-domain simulation of low-frequency room acoustic problems*. Journal Acoustical Society of America, 98:3302–3308, 1995.
- [153] HEUTSCHI, K. et al.: *Simulation of Ground Impedance in Finite Difference Time Domain Calculations of Outdoor Sound Propagation*. Acta Acustica united with Acustica, 91:35–40, 2005.

- [154] *Acoustics – Framework for calculating a distribution of sound exposure levels for impulsive sound events for the purposes of environmental noise assessment*, 2009.
- [155] *Acoustics – Noise from shooting ranges – Part 2: Estimation of muzzle blast and projectile sound by calculation*, 2006.
- [156] WUNDERLI, J. M.: *Modelling the Source Strength of Explosions under Consideration of the Ground Influence*. Acta Acustica united with Acustica, 90:690–701, 2004.