

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

Herr Franz Kuster
Bundesamt für Umwelt BAFU
Abteilung Lärm und NIS
3003 Bern

Ermittlung des Einflusses einer harten Schwellenbesohlung mittels Vorbeifahrts-Schalldruckpegelmessungen zwischen Sempach und Rothenburg

Untersuchungsbericht: Empa-Nr. 5214.024617
Ihr Auftrag vom: 23.03.2020
Anzahl Seiten inkl. Beilagen: 17

Inhaltsverzeichnis

- 1 Zusammenfassung
- 2 Ausgangslage und Auftrag
- 3 Messkonzept
- 4 Situation
- 5 Messdatenerfassung
- 6 Auswertprozedur
- 7 Ergebnisse

Eidg. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt Empa

Dübendorf, 10.11.2020

Projektleiter:



Dr. Kurt Heutschi

Abteilung Akustik / Lärmminderung

Abteilungsleiter:



Dr. Jean Marc Wunderli

Leiter Abteilung Akustik / Lärmminderung

1 Zusammenfassung

Im Rahmen einer zweitägigen, durch die Empa ausgeführten und von den SBB begleiteten Messkampagne wurde exemplarisch auf der Strecke Rothenburg-Sempach der Einfluss einer harten Schwellenbesohlung auf die Luftschallabstrahlung untersucht. Dazu wurden an sechs Standorten im besohlenen und an sechs Standorten im unbesohlenen Abschnitt jeweils in der Referenzgeometrie 7.5 m / 1.2 m die Ereignispegel von unkontrollierten Zugsvorbeifahrten gemessen. Ergänzend wurden in je einem Querschnitt auf den beiden Abschnitten an jeweils 9 Punkten Schienen- und Schwellenbeschleunigungen erfasst. Die aus diesen Signalen bestimmten Zugsgeschwindigkeiten zeigten keine relevanten Unterschiede auf den beiden Abschnitten. Die Auswertung der abschnittswisen Pegeldifferenzen *besohlt* minus *unbesohlt* ergab über alle gültigen Zugereignisse gesehen einen Mittelwert von +0.1 dB(A) bei einer auf das einzelne Ereignis bezogenen Standardabweichung von 0.8 dB(A). Die messpunktspezifische Auswertung zeigte einen maximalen Unterschied zwischen den Standorten von 2 dB(A). Aufgrund der Tatsache, dass diese Streuung in beiden Abschnitten zu beobachten ist und die spektralen Unterschiede interferenzartige Überhöhungen und Einbrüche zeigen, wird gefolgert, dass diese Differenz auf den Bodeneffekt zurückzuführen ist und nichts mit dem Einfluss der Schwellenbesohlung zu tun hat. Unter Berücksichtigung aller Messunsicherheiten kann gefolgert werden, dass die Aussage: "Der akustische Einfluss der in Sempach eingebauten Schwellenbesohlung ist kleiner als 1 dB(A)" mit grosser Wahrscheinlichkeit zutrifft.

2 Ausgangslage und Auftrag

An der Eisenbahnstrecke zwischen Sempach und Rothenburg wurden Ende 2019 seitens der SBB zwischen Kilometer 80'086 und Kilometer 80'663 unbesohlte B91 Schwellen und zwischen Kilometer 80'663 und Kilometer 80'987 besohlte B91 Schwellen (harte Schwellenbesohlung Typ SLB3007) eingebaut.

Mit Vertrag vom 23.3.2020 beauftragte das BAFU die Empa, Abteilung Akustik/Lärminderung mit der messtechnischen Untersuchung des Einflusses der harten Schwellenbesohlung auf den Vorbeifahrts-Schalldruckpegel durch Vergleich von Zugsvorbeifahrten auf den beiden Abschnitten.

3 Messkonzept

Für die Schalldruckmessung wurde die Referenzgeometrie: 7.5 m Abstand von der Gleismitte und 1.2 m Höhe über Schienenoberkante gewählt. Durch Vergleich des mittleren, über eine Vorbeifahrt aufintegrierten Ereignispegels im besohlenen und unbesohlenen Abschnitt ergibt sich die akustische "Besohlungswirkung". Da vorgängig der Einfluss der harten Schwellenbesohlung auf den Vorbeifahrts-Schalldruckpegel in der Grössenordnung von einem Dezibel oder weniger geschätzt wurde, musste mit der Messanordnung eine Minimierung aller nicht die Besohlung betreffenden Einflüsse auf den Schalldruckpegel angestrebt werden. Dazu gehörte insbesondere der topographieabhängige Bodeneffekt. Um diesbezüglich eine solide statistische Grundlage zu schaffen bzw. diesen Einfluss auszumitteln wurde der Vorbeifahrts-Schalldruckpegel an insgesamt 12 Positionen (sechs im besohlenen und sechs im unbesohlenen Bereich) ermittelt.

Zusätzlich zu den Schalldruckmessungen mit Mikrofonen wurden an je einem Querschnitt in den beiden Abschnitten Beschleunigungssensoren an Schienen und Schwellen befestigt, um Schwingungssignaturen

der vorbeifahrenden Züge zu registrieren. Diese Daten dienen empa-intern der Weiterentwicklung der eigenen Schwingungsmodelle, ermöglichen hier aber auch, sowohl die Einfahrts- als auch die Ausfahrtschwindigkeiten der Kompositionen in den jeweiligen Messabschnitten zu bestimmen. Dies ist eine wichtige Voraussetzung, um die Vergleichbarkeit der gemessenen Vorbeifahrts-Schalldruckpegel zu gewährleisten.

4 Situation

Abbildung 1 zeigt die Situation der beiden untersuchten Abschnitte zwischen Sempach und Rothenburg. Das interessierende Gleis ist das südlich verlaufende, d.h. Fahrtrichtung West (nach Sempach). Die Mikrophone wurden auf der Südseite installiert und erfassten somit Vorbeifahrten auf dem nahen Gleis.

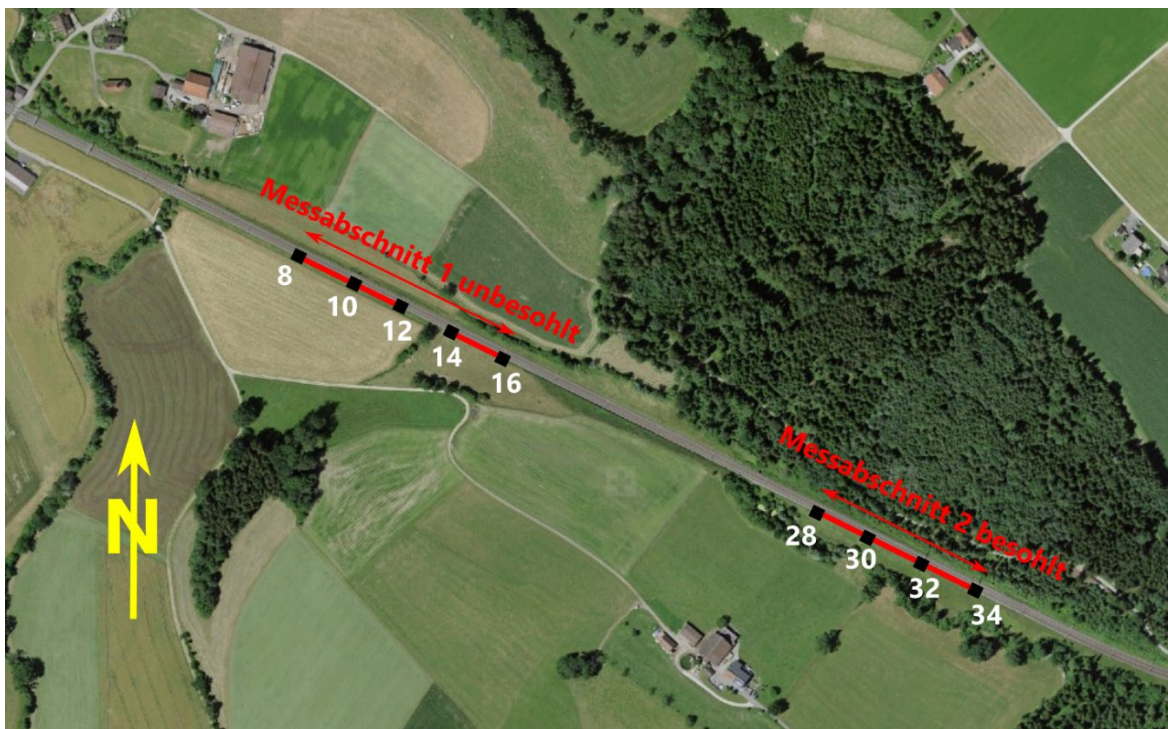


Abbildung 1: Abschnitt der Bahnlinie zwischen Sempach und Rothenburg mit den beiden Messabschnitten 1 und 2 und den Mastnummern.

Die Lokalisierung der Schalldruck-Messpunkte orientiert sich an den Masten. Jeweils zwischen den Masten 8-10, 10-12, 14-16 sowie 28-30, 30-32, 32-34 wurden zwei Mikrophone in der Geometrie gemäss Abbildung 2 installiert. Gemäss Angabe von Marc Schmid von den SBB ist zu beachten, dass zwischen den Masten 32 und 34 auf Grund der Nähe zur Kurve die Schienenstahlqualität R350 verlegt ist, wogegen auf den anderen Abschnitten die Standard-Schienenstahlqualität R260 verbaut ist.

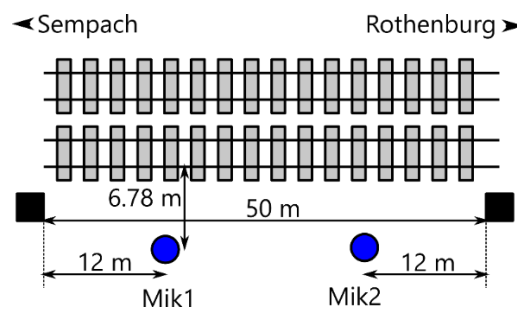


Abbildung 2: Horizontale Vermessung der Mikrophone bzgl. der Masten, wobei jeweils Mik1 in westlicher Richtung (Sempach) und Mik2 in östlicher Richtung (Rothenburg) lag.

Die Installation der Beschleunigungssensoren erfolgte in der Nähe von Mast 14 und in der Mitte zwischen Mast 30 und 32.

Zusätzlich wurden zwei Schalldruck-Messpunkte auf der Nordseite, ebenfalls in der Referenzgeometrie 7.5/1.2 m eingerichtet. Diese beiden Mikrophone erfassten auf dem fernen Gleis die gleichen Zugsfahrten wie die Südpunkte mit dem Unterschied, dass die Schallausbreitung hauptsächlich über Schottergrund erfolgte. Die so gewonnenen Daten dienen internen Zwecken zur Validierung des Bodeneffektmodells im Schotterbereich.

5 Messdatenerfassung

5.1 Messperiode

Die Messungen fanden am 2.9.2020 zwischen 7:30 und 16:00 statt.

5.2 Schalldruck

Die südseitigen Mikrofon-Schalldrucksignale wurden auf Harddisc-Recordern von Sound Devices für die spätere Analyse aufgezeichnet. Dazu wurden jeweils Mik1 und Mik2 zwischen zwei Masten auf ein zweikanaliges Gerät aufgespielt (Tabelle 1). An den beiden nordseitigen Punkten wurden die Signale je mit einem NTI-XL2-Schallpegelmessgerät mit gleichzeitig spektralem Pegelschrieb und Audioaufzeichnung registriert (Tabelle 2). Zusätzlich kamen die Schalldruck-Kalibratoren B&K 4231 Empa Nr. 2 und 3 zum Einsatz.

Messpunkt	Mikrophon	Impedanzwandler	Sound Devices
Mast8_10-Mik1	B&K 4189: 2542921	Microtech Gefell MV220: 160	Empa Nr. 24
Mast8_10-Mik2	B&K 4189: 2294348	Microtech Gefell MV220: 161	Empa Nr. 24
Mast10_12-Mik1	NTI MA220: 6877, Empa Nr. 5		Empa Nr. 11
Mast10_12-Mik2	NTI MA220: 875, Empa Nr. 6		Empa Nr. 11
Mast14_16-Mik1	B&K 4189: 2386111	Microtech Gefell MV220: 171	Empa Nr. 23
Mast14_16-Mik2	B&K 4189: 2887447	Microtech Gefell MV220: 159	Empa Nr. 23

Mast28_30-Mik1	B&K 4189: 2386113	Microtech Gefell MV220: 111	Empa Nr. 21
Mast28_30-Mik2	B&K 4189: 2386109	Microtech Gefell MV220: 110	Empa Nr. 21
Mast30_32-Mik1	B&K 4189: 2695370	Microtech Gefell MV220: 168	Empa Nr. 22
Mast30_32-Mik2	B&K 4189: 3022971	Microtech Gefell MV220: 169	Empa Nr. 22
Mast32_34-Mik1	NTI MA220: 6915, Empa Nr. 3		Empa Nr. 25
Mast32_34-Mik2	NTI MA220: 6906, Empa Nr. 4		Empa Nr. 25

Tabelle 1: Geräteliste der südseitigen Messpunkte.

Messpunkt	Schallpegelmesser
Mast13_15, gegenüber Mast14_16_Mik1	NTI XL2, Empa Nr. 11
Mast31_33, gegenüber Mast32_34_Mik1	NTI XL2, Empa Nr. 9

Tabelle 2: Geräteliste der nordseitigen Messpunkte.

5.3 Gleisbeschleunigungen

Auf beiden Messabschnitten wurden in je einem Querschnitt die strukturellen Beschleunigungen des Oberbaus in 9 Punkten gemessen (Abbildung 3). Die Positionierung der Sensoren wurde so gewählt, dass eine Analyse der vertikalen und lateralen Schwingungspegel möglich ist.

Aus den Beschleunigungssignalen wurden überdies die Zugsgeschwindigkeiten abgeleitet. Dazu wurden in einem ersten Schritt die Zeitsignale der vertikalen Schwingung zwischen 0.1 Hz und 20 Hz bandpass-gefiltert. Das so aufbereitete Signal zeigt eindeutig die Achsüberfahrten während der Vorbeifahrt. Aus der Länge des Wagentyps L_{wag} und der Zeit zwischen 4 Achsen t_4 ergibt sich die Geschwindigkeit via $V = \frac{L_{wag}}{t_4}$ (siehe Abbildung 4).

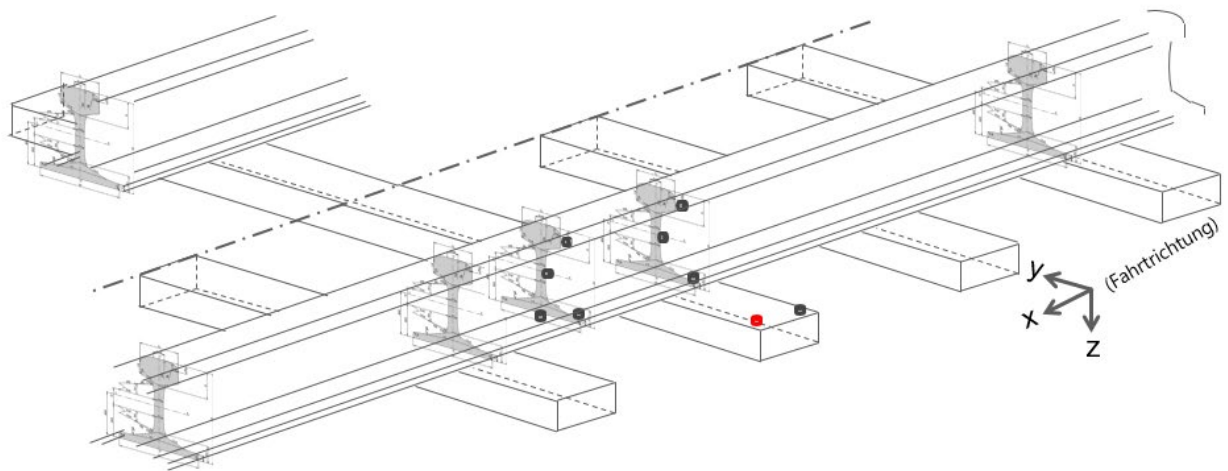


Abbildung 3: Positionierung der Beschleunigungssensoren.

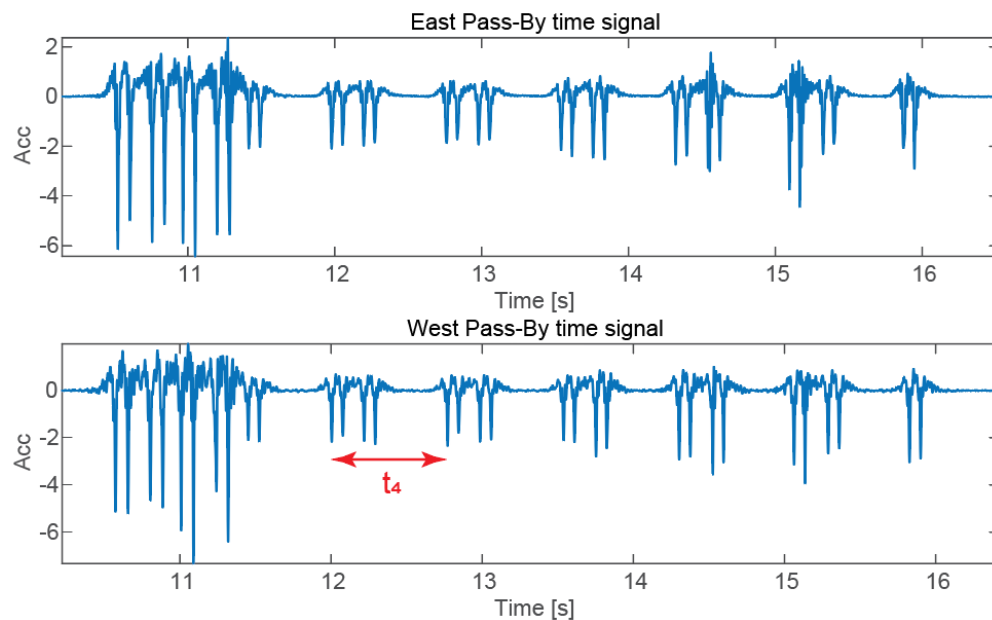


Abbildung 4: Bestimmung der Vorbeifahrtszeit t_4 eines Wagens.

5.4 Lufttemperatur und Luftfeuchte

Die Lufttemperatur und Luftfeuchte wurde einerseits vor Ort periodisch mit einem Handmessgerät von rotronic erfasst und protokolliert und andererseits von der Meteo-Schweiz Station Emmen "EMM" abgefragt.

6 Auswertprozedur

6.1 *Abgleich des Zeitachsenversatzes*

Von den an den 12 südseitigen Mikrofonen gewonnenen Audiosignalen wurden in einem ersten Schritt unbewertete Pegelschriebe in einsekündiger Auflösung erstellt. Der gegenseitige Vergleich der Zugereignismuster ermöglichte so die Bestimmung der auf eine Sekunde genauen Anfangszeiten der Audiosignale.

6.2 *Identifikation der gültigen Ereignisse und der Integrationszeiten*

Anhand der für den Abgleich des Zeitversatzes erstellten unbewerteten Pegelschriebe (Beispiel siehe Abbildung 5) wurden manuell durch visuelle Inspektion die interessierenden Zugereignisse (in Fahrtrichtung Sempach) detektiert. Die Gültigkeit wurde mit der Forderung nach ungestörtem An- und Abschwellen des Pegels an jedem Kanal überprüft. Kreuzende Züge konnten auf diese Weise relativ einfach identifiziert werden, da Zugsvorbeifahrten in Richtung Rothenburg ein gegenläufiges Muster verursachen. Zusätzlich wurden die Ereignis-Start- und -Endzeiten für die spätere Ereignispegelbestimmung abgelesen.

		Abschnitt 2					Abschnitt 1						
		M32_34_2	M32_34_1	M30_32_2	M30_32_1	M28_30_2	M28_30_1	M14_16_2	M14_16_1	M10_12_2	M10_12_1	M08_10_2	M08_10_1
0	06:00:00												
1	06:00:01												
17	08:59:07	51.1	52.1	50.5	47.4	48.1	45.2	46.6	48.2	45.4	46.1	46.0	48.2
18	08:59:08	49.3	51.0	52.4	48.3	48.8	46.6	47.5	48.1	45.9	46.9	45.3	46.9
19	08:59:09	50.8	51.1	50.6	49.6	49.3	46.1	46.7	47.4	45.7	45.8	45.6	48.3
20	08:59:10	51.8	51.7	50.1	49.4	49.7	47.4	47.7	47.3	45.4	45.5	46.2	47.1
51	08:59:11	54.0	52.5	53.7	51.4	50.3	47.8	52.1	48.4	46.0	46.5	43.8	47.8
52	08:59:12	55.7	54.4	55.1	51.6	51.9	49.6	46.5	48.6	46.7	46.2	46.3	47.4
53	08:59:13	55.2	54.5	55.5	52.7	51.7	49.1	46.5	48.7	45.1	46.2	44.9	48.2
54	08:59:14	57.6	56.7	55.3	52.4	52.5	50.3	48.7	51.9	46.2	46.8	45.8	46.1
55	08:59:15	59.6	57.3	56.1	54.2	53.0	50.8	46.4	51.1	47.2	47.3	45.1	48.8
56	08:59:16	66.7	61.2	56.9	55.1	53.7	52.1	46.5	53.7	45.6	46.5	45.5	52.2
57	08:59:17	84.7	67.7	61.1	58.2	57.2	54.6	46.5	50.6	45.9	45.7	45.6	49.1
58	08:59:18	77.0	84.9	66.0	60.9	59.4	56.1	47.6	48.0	46.7	46.1	45.1	51.9
59	08:59:19	79.1	78.2	85.7	68.1	64.5	60.1	47.4	47.4	46.7	46.0	47.0	50.6
60	08:59:20	74.9	79.8	80.0	85.7	83.4	65.9	47.0	48.5	46.1	46.3	46.3	48.5
61	08:59:21	60.9	73.2	79.6	78.8	83.7	78.4	48.7	48.6	46.5	47.1	46.3	47.5
62	08:59:22	57.6	60.9	77.6	80.3	77.6	76.1	47.6	49.2	48.5	47.6	46.2	48.1
63	08:59:23	55.5	56.9	62.0	76.5	78.7	76.7	48.8	48.8	47.3	46.6	49.1	49.6
64	08:59:24	54.3	54.8	58.8	61.2	61.8	68.2	49.0	49.8	47.7	47.5	46.6	46.7
65	08:59:25	52.8	54.8	56.8	57.7	59.7	61.4	49.7	49.3	47.1	47.4	47.1	48.6
66	08:59:26	55.3	56.0	57.3	58.9	58.6	59.4	50.4	50.3	48.4	48.5	48.2	53.7
67	08:59:27	53.0	53.9	55.4	55.8	56.3	56.7	52.8	52.4	48.9	48.1	47.7	47.9
68	08:59:28	55.0	52.9	56.4	55.6	55.9	55.0	53.2	53.8	49.3	48.5	48.1	49.2
69	08:59:29	55.2	54.4	55.7	54.6	55.1	55.3	55.3	55.2	49.9	50.1	49.0	49.9
70	08:59:30	59.3	65.9	54.8	69.9	57.7	55.2	56.2	56.1	52.3	51.2	49.2	51.0
71	08:59:31	53.4	66.9	61.8	70.0	56.9	52.0	57.9	57.3	51.2	51.5	50.4	51.6
72	08:59:32	65.6	57.8	58.0	60.5	56.3	53.3	60.8	59.4	53.7	53.0	49.9	50.6
73	08:59:33	59.0	59.8	66.4	53.5	55.6	52.8	64.9	62.1	55.3	53.7	52.3	51.7
74	08:59:34	62.9	59.5	72.0	50.2	55.3	48.4	85.1	67.5	54.8	54.3	53.4	54.0
75	08:59:35	62.9	57.1	69.6	48.2	53.3	47.4	89.9	88.1	58.8	57.2	53.8	53.0
76	08:59:36	61.8	49.9	66.7	48.1	49.4	46.5	79.5	86.5	61.7	58.7	55.7	53.4
77	08:59:37	56.4	55.9	68.7	49.2	46.9	45.9	85.3	81.4	67.3	62.1	56.5	54.1
78	08:59:38	61.5	53.1	61.7	47.9	48.7	46.1	66.0	83.3	84.7	70.5	59.0	56.0
79	08:59:39	66.1	58.9	56.3	48.2	50.9	47.9	58.0	62.5	76.5	84.9	63.8	59.8
80	08:59:40	62.7	55.5	60.3	48.9	54.7	47.9	57.4	59.4	80.6	76.4	75.4	63.1
81	08:59:41	63.8	57.7	64.0	48.6	59.8	46.8	57.8	59.5	71.1	80.9	86.8	80.1
82	08:59:42	58.0	62.0	59.3	47.6	54.6	46.0	57.3	58.8	61.6	67.6	77.3	81.0
83	08:59:43	58.6	63.1	65.3	48.7	50.2	46.1	55.2	67.0	57.4	59.7	80.7	78.5
84	08:59:44	59.8	65.3	61.4	48.4	53.4	46.3	53.6	73.2	55.4	56.7	64.5	77.1
85	08:59:45	63.9	55.8	60.3	48.5	52.3	45.6	52.3	73.8	54.5	56.0	58.4	61.9
86	08:59:46	61.5	56.1	60.4	47.8	47.1	46.0	52.9	73.5	53.4	55.1	56.7	58.3
87	08:59:47	60.2	59.0	59.1	49.3	49.3	44.3	51.7	71.1	52.6	53.3	56.2	57.4
88	08:59:48	60.8	56.8	60.6	50.1	55.1	43.9	50.7	67.0	51.6	52.0	54.7	55.9
89	08:59:49	57.8	58.3	59.8	50.5	53.2	45.8	50.2	57.5	49.8	50.0	52.9	54.0
90	08:59:50	54.7	57.8	56.9	49.6	48.0	44.4	50.5	52.6	49.4	50.2	51.0	53.2
91	08:59:51	55.0	57.4	60.0	46.8	47.2	44.7	50.7	56.2	51.4	51.1	51.1	53.6
92	08:59:52	57.6	56.9	63.3	47.1	49.3	44.4	51.2	62.5	50.9	50.4	51.5	57.2
93	08:59:53	54.8	57.2	62.5	49.6	48.0	43.4	54.1	59.9	49.6	49.3	52.0	51.9
94	08:59:54	56.8	55.8	60.6	46.7	49.0	44.4	57.9	60.4	48.8	49.6	50.2	50.0
95	08:59:55	59.6	53.4	61.3	46.6	46.8	42.8	50.6	57.6	47.9	48.3	50.0	51.0

Abbildung 5: Auszug der Darstellung der Mikrophonpegelschriebe für die manuelle Ereigniserkennung und Überprüfung der Gültigkeit. Die eingefärbten Spalten zeigen die Pegel für die Kanäle M32_34_2 bis M08_10_1 (von links nach rechts).

6.3 Implementierung der Audiosignalanalyse

Die zwölf Mikrophonsignale wurden sequenziell in Matlab eingelesen und ereignisbezogen ausgeschnitten. Von den entsprechenden Zeitfenstern wurde ein A- und Terzbandpegelschrieb in einsekündiger Auflösung erstellt. Die Korrektheit der gewählten Ereignisfenster wurde ergänzend anhand der A-Pegelschriebe visuell kontrolliert (siehe Abbildung 6).

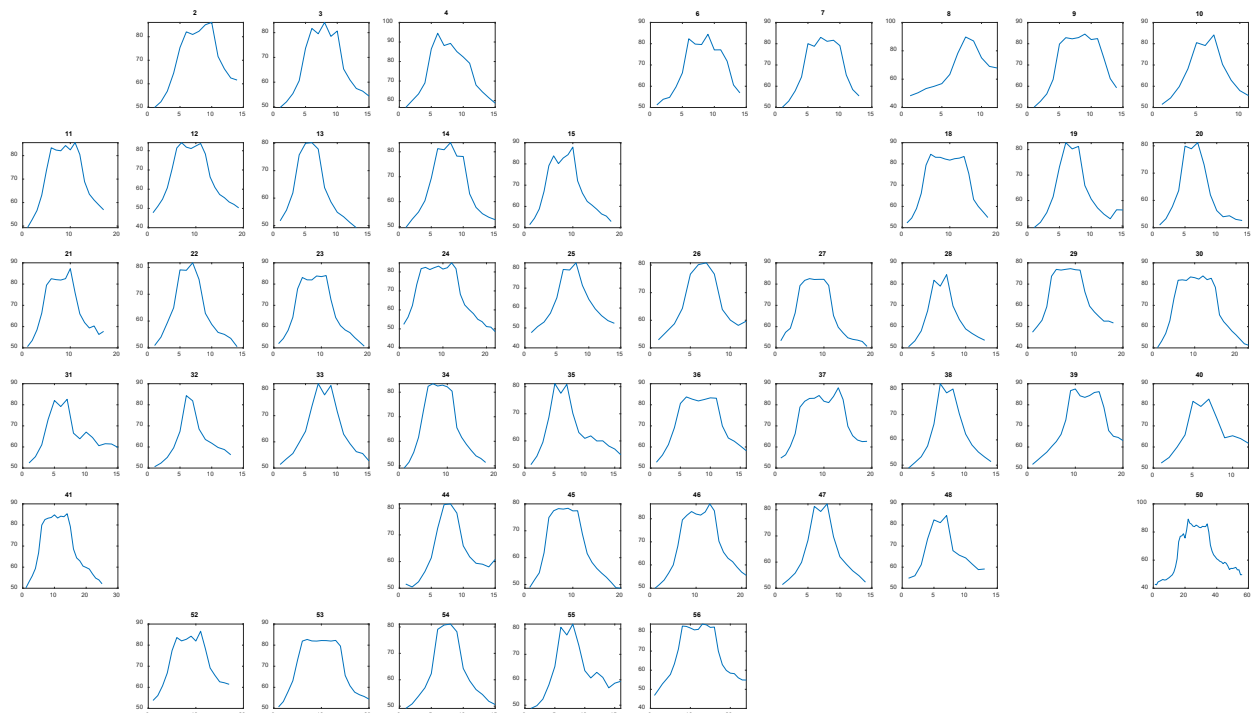


Abbildung 6: A-Pegelschrieb-Ausschnitte für die Bestimmung der Ereignisenergie am Beispiel des Messpunkts 08_10-1.

6.4 Validierung des Matlabcodes

Für die Validierung des Matlabcodes zur Bestimmung des A-bewerteten und terzbandweisen Ereignispegels von Zugsvorbeifahrten aus dem Audiofile wurden am Messpunkt *Mast31_33*, gegenüber *Mast32_34_Mik1* vier zufällig ausgewählte Ereignisse herangezogen. An diesem Messpunkt wurde der Schalldruck mit einem NTI XL2 Schallpegelmesser erfasst, der gleichzeitig das Audiosignal aufzeichnete und auch einen Terzbandpegelschrieb protokollierte. Das aufgezeichnete Audiosignal wurde mit dem eigenen Matlabcode analysiert und die resultierenden Ereignispegelspektren mit den vom Schallpegelmesser direkt gelieferten Spektren verglichen. Abbildung 7 zeigt die mittleren gefundenen Differenzen und die Standardabweichungen. Im A-Pegel beträgt die mittlere Differenz weniger als 0.1 dB. Spektral gesehen zeigt sich unterhalb von 200 Hz systematisch eine leicht negative Differenz, die aber ein halbes dB nicht überschreitet. Insgesamt kann damit die Matlab-Analyse der Audiofiles als valide eingestuft werden.

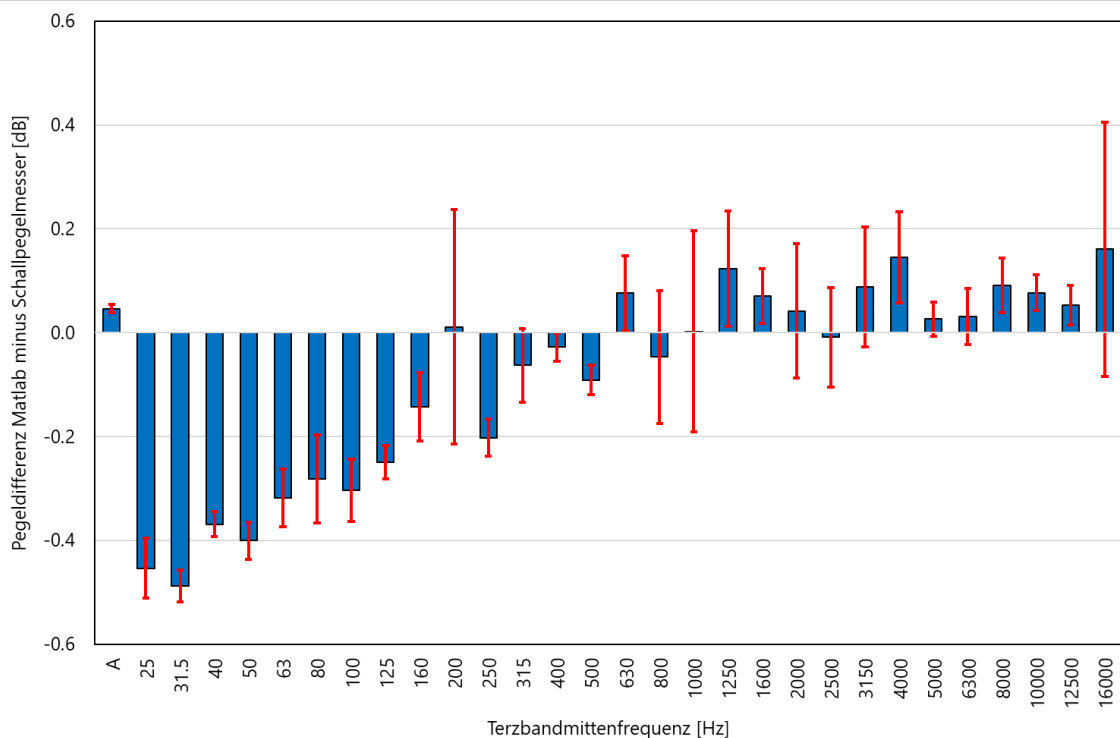


Abbildung 7: Analyse der Differenzen der mit Matlab aus dem Audiofile ausgewerteten Pegel und den direkt vom Schallpegelmessers bezogenen Werten. Die blauen Balken zeigen die mittlere Abweichung, die roten Fehlerbalken spannen die Standardabweichung der Differenzen der einzelnen Messungen auf.

6.5 Auswertung der Pegeldifferenzen

Die Primärdatenanalyse stellt jede Zugsvorbeifahrt an allen zwölf Messpunkten als A-bewerteten und spektralen Ereignispegel dar.

In einer ersten Analyse wurde für jede Zugsfahrt durch energetische Mittelung über die jeweils sechs zu einem Abschnitt gehörenden Messpunkte je ein Ereignispegel "Abschnitt besohlt" und "Abschnitt unbesohlt" gebildet. Für jede gültige Vorbeifahrt wurde dann die Differenz "besohlt – unbesohlt" gebildet und über die entsprechenden Ereignisse der Mittelwert und die Standardabweichung bestimmt.

In einer zweiten, messpunktspezifischen Analyse wurde durch arithmetische Mittelung über die zwölf Messpunkte pro Zugereignis ein "mittleres" Ereignisspektrum als Referenz bestimmt. Anschliessend wurden für jeden Messpunkt die Pegeldifferenzen jedes Zugereignisses bezogen auf die Referenz ermittelt. Über diese Liste der Pegeldifferenzen wurden dann die arithmetischen Mittelwerte und die Standardabweichungen berechnet.

7 Ergebnisse

7.1 Erfasste Ereignisse

Von den im Messzeitraum erfassten 56 Ereignissen mussten auf Grund von Kreuzungen 8 als ungültig klassiert und von der weiteren Auswertung ausgeschlossen werden. Die 48 weiterverarbeiteten Ereignisse schlüsseln sich wie in Tabelle 3 gezeigt auf. Die Tabelle stellt ebenfalls die anhand der Beschleunigungssignale für die Kategorien *S-Bahn* und *InterRegio-Zug* ermittelten mittleren Zugsgeschwindigkeiten v_{mittel} dar. Für die anderen Kategorien war die Stichprobe zu klein, bzw. fehlten Angaben zur Zuglänge. Die Geschwindigkeitsdifferenzen auf den beiden Abschnitten betrug maximal 3 km/h.

Zugskategorie	Anzahl Ereignisse	v_{mittel}
S-Bahn-Zug	14	116 km/h
InterRegio-Zug	28	119 km/h
InterCity-Zug	2	-
Güter-Zug	3	-
Dienst-Zug	1	-

Tabelle 3: Verteilung der gültigen Ereignisse auf die verschiedenen Zugskategorien und beobachtete mittlere Zugsgeschwindigkeiten v_{mittel} .

7.2 Lufttemperatur und Luftfeuchte

Abbildung 8 zeigt die erfassten Wetterdaten in Form der Lufttemperatur und –feuchte.

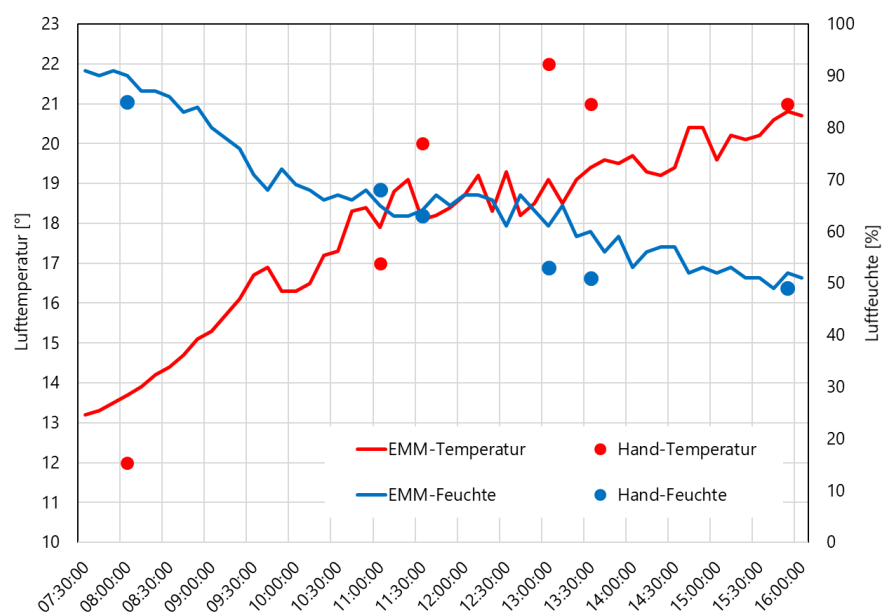


Abbildung 8: Lufttemperatur und Luftfeuchte während der Messung am 2.9.2020 (ausgezogene Linien: nahegelegene MeteoSchweiz Station Emmen "EMM", Punkte: Handmessung vor Ort).

7.3 Abschnittweise Pegeldifferenzen

In Abbildung 9 sind die arithmetischen Mittelwerte und Standardabweichungen der Differenzen der abschnittsweise gebildeten A-bewerteten Ereignispegel gezeigt. Über alle Züge gesehen beträgt diese Differenz lediglich 0.1 dB(A), d.h. der Luftschall auf dem besohnten Abschnitt liegt 0.1 dB(A) höher als auf dem unbesohnten Abschnitt. Die Auswertung in einzelnen Zugsklassen ergibt leicht andere Differenzen wobei der höchste Wert von 0.6 dB(A) in der Kategorie der Güterzüge erreicht wird. Allerdings muss mit Verweis auf Tabelle 3 darauf hingewiesen werden, dass bei den Zugskategorien Intercity-Zug und Güter-Zug lediglich zwei bzw. drei Ereignisse erfasst wurden. Aufgrund der Samplegrösse weisen die Mittelwerte in diesen Kategorien deshalb eine grössere Unsicherheit auf.

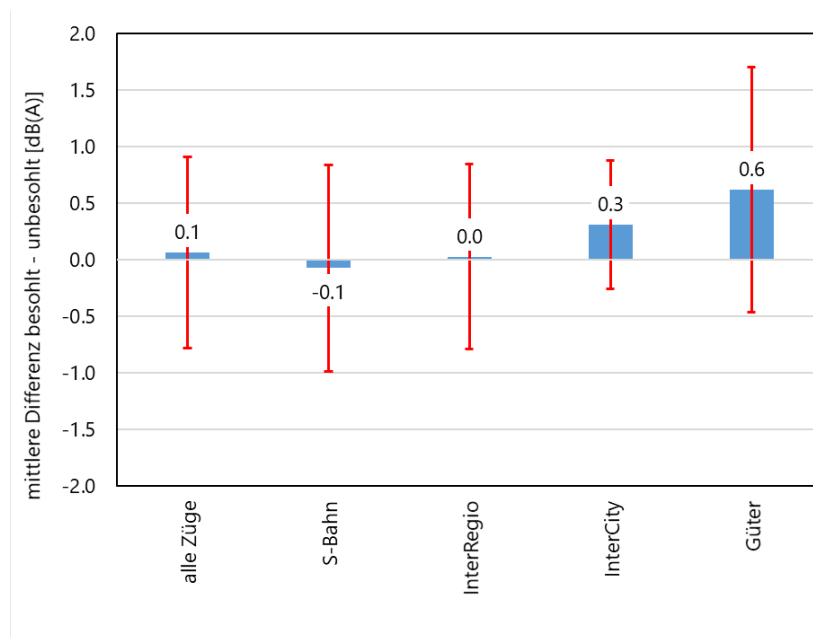


Abbildung 9: Abschnittsweise mittlere Differenzen der A-bewerteten Ereignispegel besohlt - unbesohlt und Standardabweichungen für die entsprechenden Zugereignissammlungen.

7.4 Messpunktspezifische Pegeldifferenzen

Abbildung 10 zeigt die über alle Zugereignisse gemittelten Differenzen und Standardabweichungen der A-bewerteten Ereignispegel. Als ereignisspezifische Bezugsgrösse wurde der arithmetische Mittelwerte über alle Messpunkte verwendet. An 10 von 12 Messpunkten sind die mittleren Abweichungen zur Referenz mit klar weniger als 1 dB(A) sehr klein. An einem Messpunkt im unbesohnten Abschnitt (14_16-2) und im besohnten Abschnitt (28_30-2) weichen die mittleren Differenzen mit je +1.2 dB(A) leicht mehr ab. Der Übergang zur anderen Stahlqualität zwischen den Masten 32 und 34 findet keinen Niederschlag in den Messwerten. Über alles gesehen können zwischen den beiden Abschnitten keine systematischen Unterschiede festgestellt werden, d.h. im A-Pegel ist kein Einfluss der Schwellenbesohlung nachweisbar. In Abbildung 11 bis Abbildung 14 sind die messpunktspezifischen A-Pegel-Differenzen nach Zugskategorien auf-

geschlüsselt. Hier zeigen sich leicht abweichende Muster, wobei zu beachten ist, dass die Kategorien Inter-City und Güterzug nur sehr kleine Stichproben darstellen und somit in ihrer Aussagekraft eingeschränkt sind. Abbildung 15 und Abbildung 16 schliesslich zeigen die terzbandweisen mittleren Differenzen über alle Zugereignisse. Im unbesohlenen Abschnitt (Abbildung 15) fällt auf, dass die vier Messpunkte in den Mastfeldern 08_10 und 10_12 und dann die beiden Messpunkte im Mastfeld 14_16 je eine Gruppe bilden. In der Nähe des Messpunktes 14_16_1 ist während der Messung das Fehlen einer Schienenbefestigung aufgefallen. Da am deutlich entfernt liegenden Messpunkt 14_16_2 das spektrale Muster noch ausgeprägter ist, wird als Grund für die Abweichung nicht die Fehlstelle sondern die je unterschiedliche Topographie vermutet. Im besohlenen Abschnitt (Abbildung 16) ist die Clusterbildung weniger ausgeprägt, hier fällt aber für den Messpunkt 28_30-2 die Spitze von +2.9 dB bei 2.5 kHz auf. Eine Erklärung dazu fehlt.

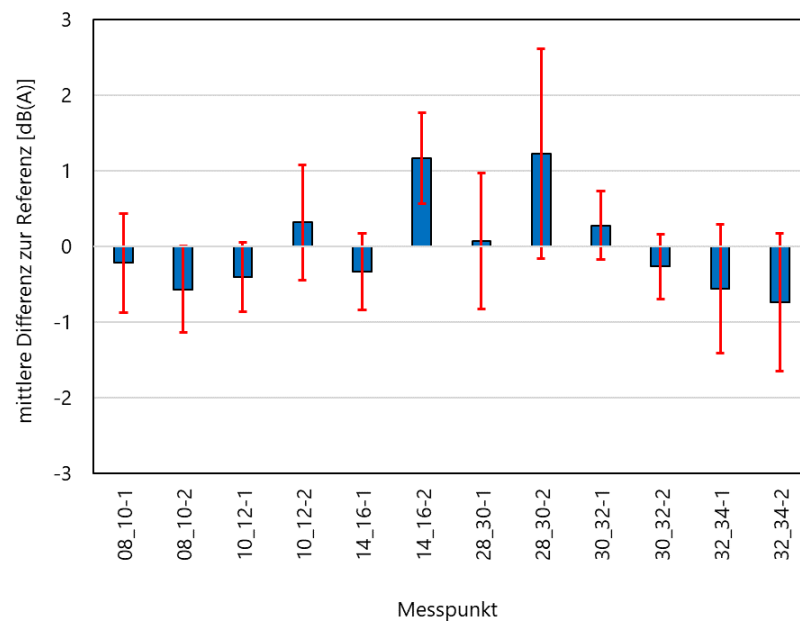


Abbildung 10: Messpunktspezifische mittlere Differenzen der A-bewerteten Ereignispegel bezogen auf die Referenz und Standardabweichungen für alle Zugereignisse.

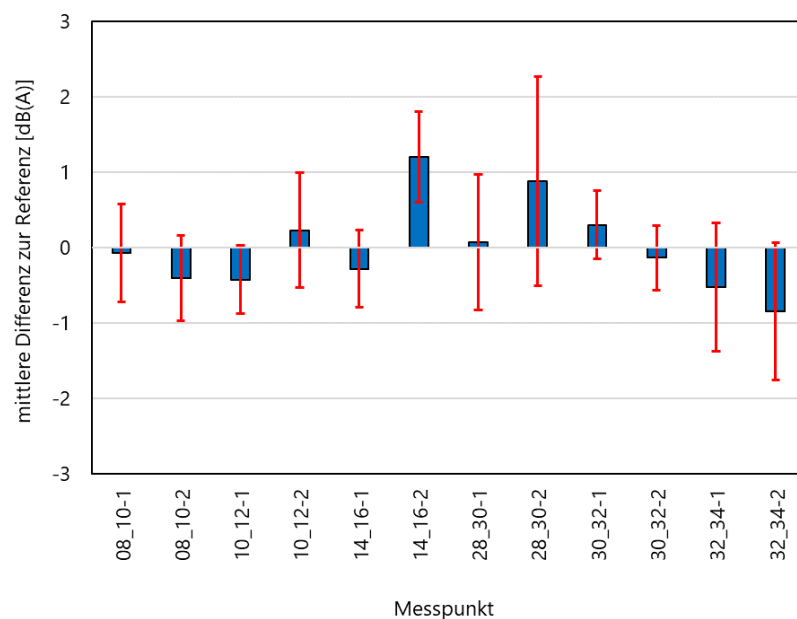


Abbildung 11: Messpunktspezifische mittlere Differenzen der A-bewerteten Ereignispegel bezogen auf die Referenz und Standardabweichungen für die S-Bahn Zugereignisse.

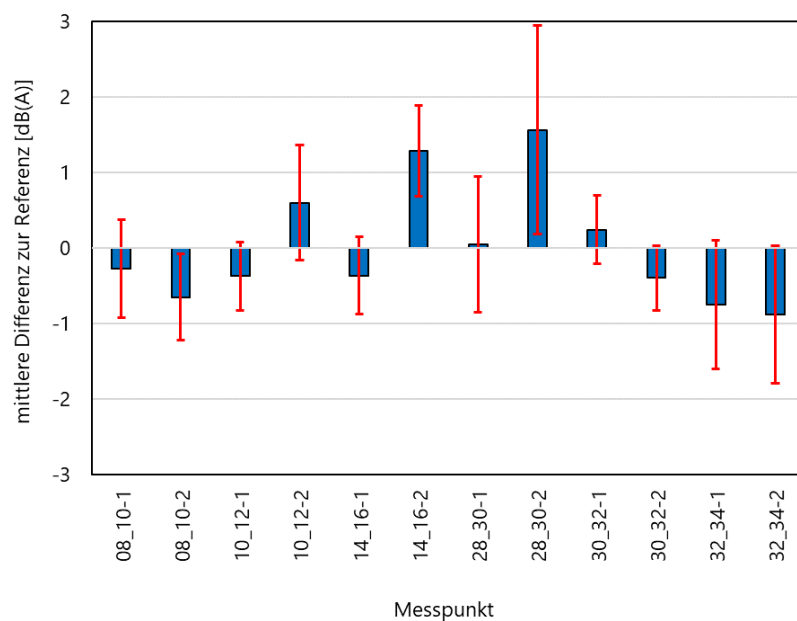


Abbildung 12: Messpunktspezifische mittlere Differenzen der A-bewerteten Ereignispegel bezogen auf die Referenz und Standardabweichungen für die InterRegio Zugereignisse.

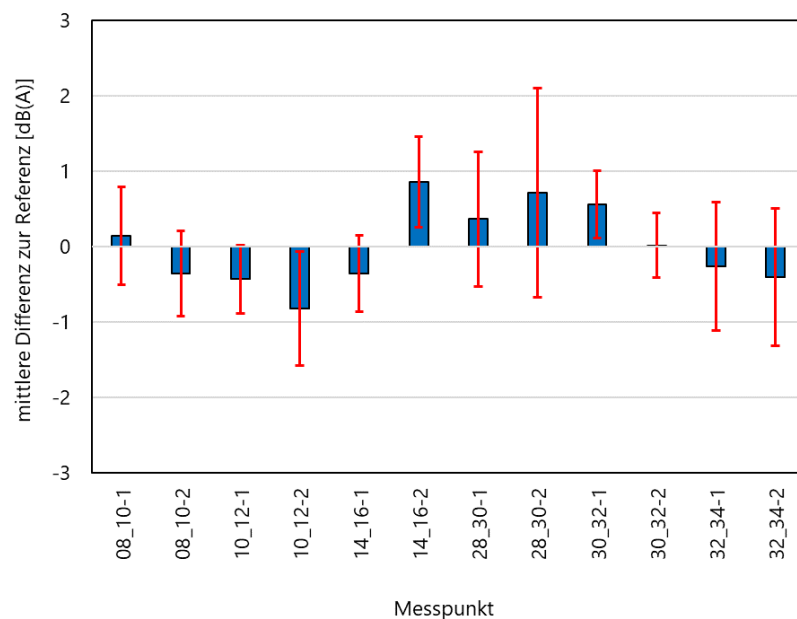


Abbildung 13: Messpunktspezifische mittlere Differenzen der A-bewerteten Ereignispegel bezogen auf die Referenz und Standardabweichungen für die InterCity Zugereignisse.

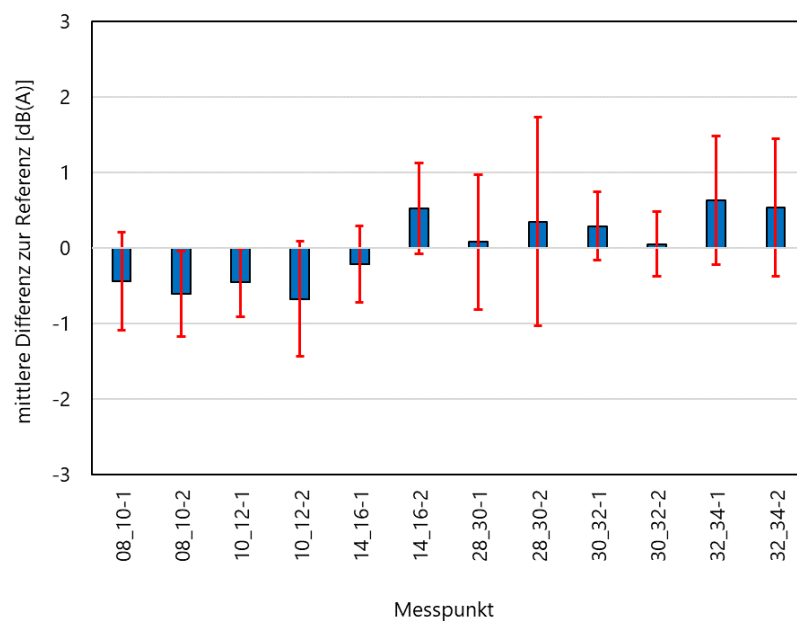


Abbildung 14: Messpunktspezifische mittlere Differenzen der A-bewerteten Ereignispegel bezogen auf die Referenz und Standardabweichungen für die Güter Zugereignisse.

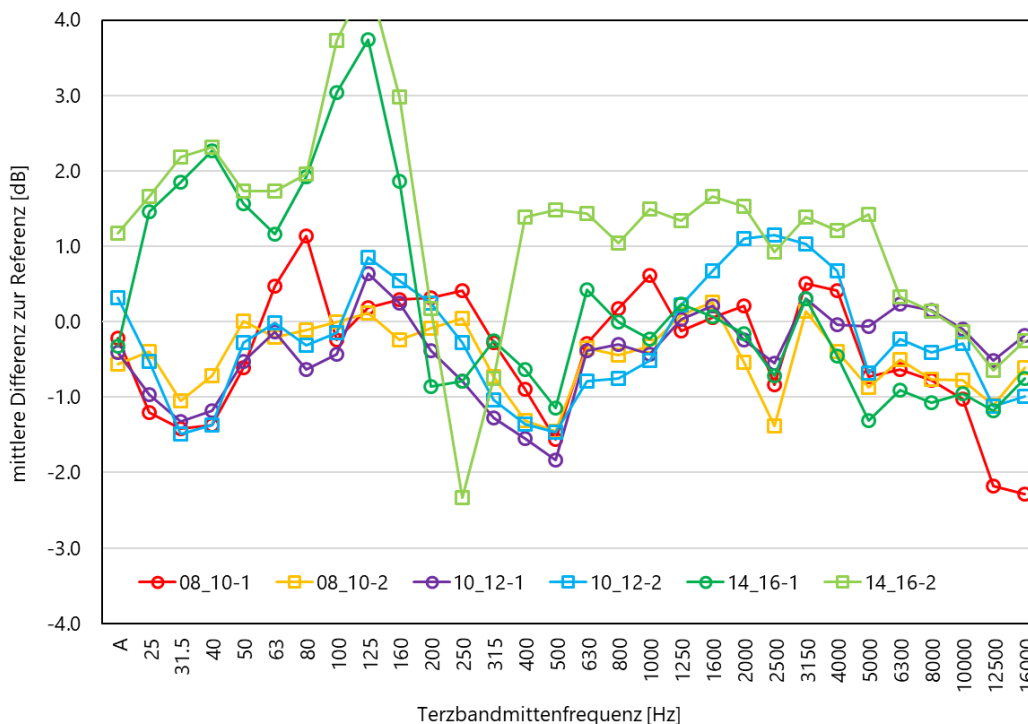


Abbildung 15: Messpunktspezifische mittlere Differenzen der spektralen Ereignispegel im unbesohlenen Abschnitt bezogen auf die Referenz für alle Zugereignisse.

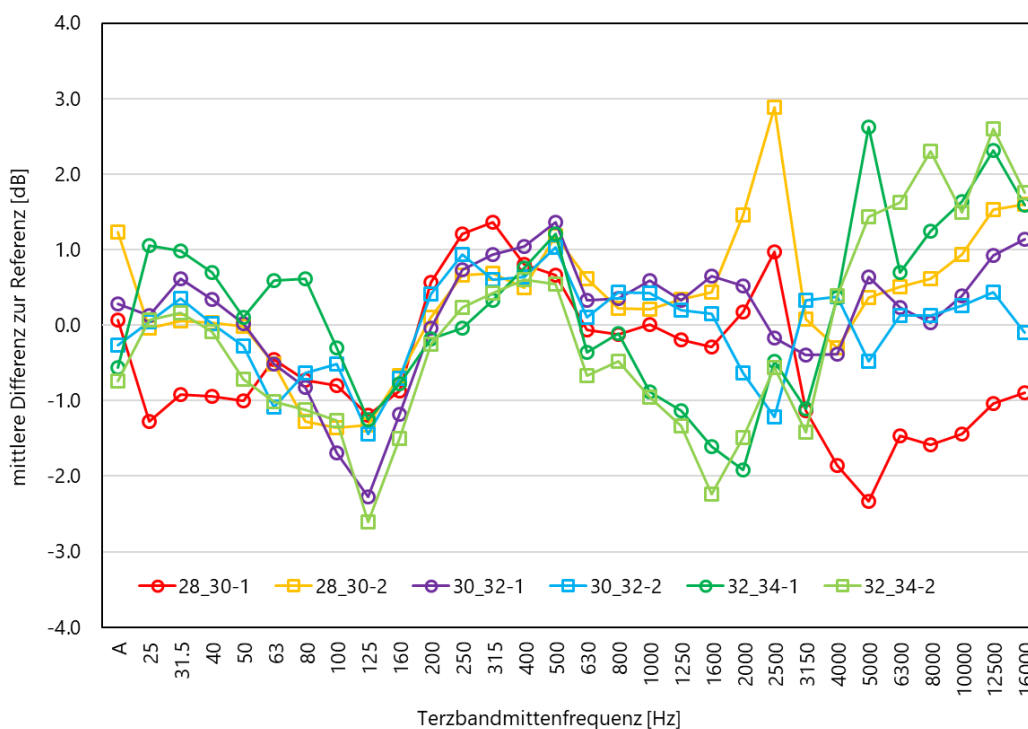


Abbildung 16: Messpunktspezifische mittlere Differenzen der spektralen Ereignispegel im besohlenen Abschnitt bezogen auf die Referenz für alle Zugereignisse.

7.5 Messunsicherheit

Die folgenden Aussagen zur Messunsicherheit beziehen sich auf die messpunktspezifischen, mittleren Differenzen der Zugereignispegel zur jeweiligen Referenz als arithmetisches Mittel über alle Messpunkte:

- **Geometrie der Mikrofoninstallationen:** die Vermessung der Mikrofonpositionen erfolgte mit einer Genauigkeit besser als 0.1 m. Auf den Abstand von 7.5 m bezogen resultiert dadurch eine vernachlässigbare Unsicherheit von deutlich weniger als 0.1 dB.
- **Kalibration:** für die Kalibrationskorrektur kann gemäss Spezifikation der Kalibratoren von einer Unsicherheit von 0.3 dB ausgegangen werden.
- **Betriebszustand der Quelle:** da die Messungen jeweils den Unterschied an den verschiedenen Standorten für eine Vorbeifahrt der gleichen Zugkompositionen auswerten, bleibt als Unsicherheit hinsichtlich der Quelle nur ein möglicher Geschwindigkeitsunterschied. Die aus den Beschleunigungssignalen abgeleiteten Geschwindigkeiten haben vernachlässigbare Unterschiede auf den beiden Abschnitten ergeben.

Zusammenfassend kann die messpunktspezifische Unsicherheit mit 0.5 dB abgeschätzt werden. Für die hier im Zentrum stehende Frage des Einflusses der Schwellenbesohlung, d.h. die abschnittsweise mittlere Differenz der Zugereignispegel müssen weitere Unsicherheiten berücksichtigt werden:

- **Messpunktspezifischer Einfluss der Bodenreflexion auf den Messpegel:** da sich das Mikrofon-signal aus der Überlagerung zwischen Direkt- und bodenreflektiertem Schall zusammensetzt, spielt die Topographie zwischen Gleis und Messpunkt eine wichtige Rolle. Um diesen schwer quantifizierbaren Einfluss zu berücksichtigen, wurden in beiden Abschnitten je sechs Messpunkte in unterschiedlichem Gelände verteilt und angenommen, dass sich dieser Effekt ausmittelt.
- **Lokal ändernde Schienenrauheit:** die akustische Emission einer gegebenen Zugkomposition hängt nebst der Geschwindigkeit von der Schienenrauheit ab. Zur Beurteilung dieses Einflussfaktors liegen für beide Abschnitte junge Messungen der SBB vor.
- **Oberbaueigenschaften:** nebst der Schienenrauheit und der Schwellenbesohlung können weitere Eigenschaften des Oberbaus (Zwischenlagen, Schienenbefestigung, Schotterbett) die Schallabstrahlung beeinflussen. Hier wird angenommen, dass diese Eigenschaften in den beiden Abschnitten nicht systematisch differieren.

7.6 Fazit

Mit der Mittelung über die verschiedenen Messpunkte kann gefolgert werden, dass die Aussage: "Der akustische Einfluss der in Sempach eingebauten Schwellenbesohlung ist kleiner als 1 dB(A)" mit grosser Wahrscheinlichkeit zutrifft. Im Rahmen der Projekts "Rail Track Noise Emission: Influence of Under Sleeper Pads on Railway Rolling Noise Emissions" (siehe Empa Bericht Nr. 5211.01578.100.01) wurde der Einfluss der Schwellenbesohlung rechnerisch zu 0.2 bis 0.3 dB(A) bestimmt. Diese Prognose wird durch die hier gefundenen Ergebnisse sehr schön bestätigt. Schliesslich zeigen die Messungen, dass innerhalb der Abschnitte bedeutende standortspezifische Unterschiede auftreten können, weshalb ein Abschnitts-Vergleich lediglich mit je einem Messpunkt nicht ausreichend belastbare Resultate liefert, um so kleine durch die Oberbaukonstruktion verursachte Pegeldifferenzen zu identifizieren.