

Deutsches Zentrum für
Schienenverkehrsforschung beim



Eisenbahn-Bundesamt

Berichte
des Deutschen Zentrums
für Schienenverkehrsforschung

Bericht 4 (2020)

Emissionsortdetektion im Schienenverkehr mit einer akustischen Kamera

Berichte des Deutschen Zentrums
für Schienenverkehrsforschung, Nr. 4 (2020)
Projektnummer 2018-U-04-1202

Emissionsortdetektion im Schienenverkehr mit einer akustischen Kamera

von

Sebastian Kümritz
gfai tech GmbH, Berlin

Im Auftrag des Deutschen Zentrums für Schienenverkehr beim Eisenbahn-Bundesamt

Impressum

HERAUSGEBER

Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung beim Eisenbahn-Bundesamt

August-Bebel-Straße 10
01219 Dresden

www.dzsf.bund.de

DURCHFÜHRUNG DER STUDIE

gfai tech GmbH
Volmerstraße 3
12489 Berlin

ABSCHLUSS DER STUDIE

Dezember 2019

REDAKTION

Eisenbahn-Bundesamt
Dr. rer. nat. Henning Brammer, Referat Umwelt
Christoph Jöckle, Referat Umwelt

PUBLIKATION ALS PDF

<https://www.dzsf.bund.de/Forschungsergebnisse/Forschungsberichte>

ISSN 2629-7973

[doi: 10.48755/dzsf.210014.01](https://doi.org/10.48755/dzsf.210014.01)

Dresden, Oktober 2020

Inhaltsverzeichnis

Kurzbeschreibung	7
1 Einleitung.....	8
2 Grundlagen	9
2.1 Beamforming	9
2.1.1 Algorithmus.....	9
2.1.2 Dynamik und Hauptkeulenbreite.....	10
2.2 Maskierung.....	11
2.3 Schallquellen im Schienenverkehr.....	12
2.3.1 Rollgeräusche	12
2.3.2 Aerodynamische Geräusche	13
2.3.3 Sonstige Geräusche	14
2.3.4 Vorbeifahrtpegel vs. Geschwindigkeit.....	14
3 Methodik.....	16
3.1 Messungen.....	16
3.2 Akustisches Foto.....	17
3.3 Pass-By Auswertung	17
3.4 Pegeldarstellungen	19
4 Ergebnisse.....	22
4.1 Übersicht.....	22
4.2 Schallquellen im Schienenverkehr.....	23
4.2.1 Rad-Schiene	23
4.2.2 Flachstellen	25
4.2.3 Aerodynamische Geräusche vs. Rollgeräusche	26
4.3 Geräuschquellen an Personenzügen.....	29
4.3.1 Intercity-Express (ICE)	29
4.3.2 Intercity (IC).....	31
4.3.3 Intercity 2 (IC2)	34
4.3.4 DB Regio Baureihe 423/424.....	35
4.3.5 Stadler KISS	36
4.4 Geräuschquellen an Güterzügen.....	37
4.4.1 Akustisch homogene Güterzüge.....	37
4.4.2 Hochfrequente Schallemission an einer Achse	38

4.4.3	Tieffrequente Schallemission an einem Waggon	39
4.4.4	Vergleich unterschiedlicher Bremstypen.....	40
5	Zusammenfassung.....	42
6	Abbildungsverzeichnis	45
7	Quellenverzeichnis	48

Kurzbeschreibung

Am 07.05.2019 und am 10.09.2019 fanden in einem Zeitraum von jeweils etwa acht Stunden zwei Messkampagnen mit akustischen Kameras statt. Ziel der Messungen war es, als Ergänzung zum Lärm-Monitoring des Eisenbahn-Bundesamtes (EBA), die typischen Schallentstehungsorte im Zugverkehr zu überprüfen und grafisch darzustellen. Es wurden insgesamt 157 Züge messtechnisch erfasst, darunter 50 Nahverkehrs-, 51 Fernverkehrs- und 48 Güterzüge.

Den Kern der Analysen bildet der Pass-By Algorithmus, der eine vom DOPPLER-Effekt bereinigte, frequenzabhängige Darstellung aller Schallquellen einer Zugvorbeifahrt in einem Bild ermöglicht. Weiterhin gestattet eine im Rahmen dieses Projektes entwickelte Darstellung der gebeamformten Pegel im Vergleich zur üblichen Messung nach DIN EN ISO 3095 mit nur einem Mikrofon eine tiefergehende Analyse der Akustik von Zugvorbeifahrten. Während sich aus den konventionellen Vorbeifahrtpegel nur eine ungefähre Aussage darüber ableiten lässt, welche Wagen besonders laut oder leise sind, ermöglichen die aus dem Beamforming ermittelten Pegel präzisere Aussagen zum Beitrag der einzelnen Achsen auf die Gesamtemission.

In diesem Bericht werden diverse Quellen von Schienenverkehrsgeräuschen diskutiert. Dazu gehören unter anderem die Schallemission am Rad-Schiene-Kontakt, die Abstrahlung der Biegewelle von der Schiene, die Schallemission durch Flachstellen, eine Diskussion der aeroakustischen Geräusche, die Vorstellung typischer Geräuschquellen an Personenzügen sowie die Betrachtung einiger spezieller Schallquellen an Güterzügen.

Im Großen und Ganzen stellen sich die Lärmquellen wie erwartet dar: Dominiert werden die Emissionen vom Rollgeräusch, vereinzelt lassen sich signifikante Anteile von aerodynamischen Geräuschen sowie Aggregatgeräuschen nachweisen.

1 Einleitung

Der Schutz der Bevölkerung vor Verkehrslärm gehört zu den Kernelementen einer zukunftsfähigen Verkehrspolitik. Ziel der Bundesregierung ist die Reduzierung des Schienenverkehrslärms um 10 dB(A) bis zum Jahr 2020 – ausgehend vom Jahr 2008. Als wichtigste Maßnahme findet derzeit eine umfassende, mit öffentlichen Geldern geförderte, Umrüstung der bestehenden Güterwagenflotten auf emissionsreduzierende Verbundstoffbremssohlen statt, so dass zukünftig keine Wagen mehr mit Graugussbremssohlen betrieben werden.

Um die langfristige Entwicklung der Emissionen aus dem Schienenverkehr zu erfassen, errichtete das Eisenbahn-Bundesamt im Auftrag des BMVI ein deutschlandweites Lärm-Monitoring. Im Rahmen des Lärm-Monitorings werden kontinuierlich Schallmessgrößen an ausgewählten Standorten im Schienennetz erhoben, welche sich aus den Schallemissionen des Gesamtsystems ergeben. Sie charakterisieren somit den ganzen Zug. Aus einer statistischen Auswertung der Messdaten können Rückschlüsse auf die Entwicklung der Schallemissionen der verschiedenen Züge gezogen werden.

Damit lassen sich Züge als ganze schalltechnisch vergleichen ohne eine detaillierte Analyse der Ursachen der Schallemissionen zu ermöglichen. Für eine weitergehende spezifische Beurteilung der einzelnen Schallquellen und für die Beobachtung der Ursachen hoher Schalldruckpegel im Schienenverkehr sind ergänzende Messungen nötig. Eine geeignete Methode sind Messungen mittels einer akustischen Kamera.

Der in vielen Branchen verbreitete Einsatz einer akustischen Kamera erlaubt eine schnelle und genaue Lokalisation von Schallquellen und eine Abschätzung über deren Intensität. Auch im Bereich des Schienenverkehrs findet das Beamforming, so die Bezeichnung der mathematischen Prinzipien auf denen die akustische Kamera beruht, seit vielen Jahren Anwendung (Barsikov (1987), Brühl (1993), Meyer (2014)).

Die Messungen mit der akustischen Kamera ergänzend zum Lärm-Monitoring erlauben eine detaillierte Identifizierung der Schallentstehungsorte. Das Verfahren ermöglicht eine genaue und effektive Analyse der Schallemission durch eine frequenzspezifische visuelle Quellenortung und -darstellung zur präzisen Ermittlung der Charakteristik der Schallemissionen einzelner Wagen und Komponenten. Auf diese Weise lässt sich das Verständnis der Schallentstehungsmechanismen im Schienenverkehr verbessern.

Zu diesem Zweck wurden in zwei Messkampagnen insgesamt 157 Züge mit akustischen Kameras messtechnisch erfasst. Einige der grundlegenden Beobachtungen der Messungen werden in diesem Bericht vorgestellt und diskutiert.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die für eine akustische Kamera grundlegenden physikalischen Konzepte erklärt. Darüber hinaus werden die Mechanismen der Schallentstehung im Schienenverkehr kurz erläutert.

2.1 Beamforming

2.1.1 Algorithmus

Die Grundlage zur Schallquellenortung mittels des sogenannten Beamformings bildet die Auswertung von Laufzeit- bzw. Phasendifferenzen zwischen den Schallquellen und den einzelnen Mikrofonen eines Arrays. Zur Erläuterung der Funktionsweise wird zunächst von stationären Quellen ausgegangen. Das Prinzip basiert auf der rechnerischen Kompensation der relativen Laufzeitdifferenzen des Schalls von jedem Punkt \mathbf{x} einer Bildebene zu den einzelnen Mikrofonen des Arrays (vgl. Abbildung 1). Die Berechnung der zu rekonstruierenden Zeitfunktion des Schalldrucks $\hat{p}(\mathbf{x}, t)$ für einen einzelnen Ort $\mathbf{x} = (x', y', z)^T$ in der Bildebene wird im Zeitbereich mit dem sogenannten Delay-and-Sum Algorithmus vorgenommen:

$$\hat{p}(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M f_i(t + \Delta_i). \quad (1)$$

Dabei bezeichnet t die Zeit, M die Anzahl der Mikrofone im Array, f_i die aufgezeichneten Zeitfunktionen der Schalldrücke der einzelnen Mikrofone an den Positionen \mathbf{x}_i , und Δ_i die entsprechenden relativen Zeitverzögerungen (Laufzeitdifferenzen), welche aus den absoluten Laufzeiten τ_i gemäß $\Delta_i = \tau_i - \min(\tau_i)$ für alle Mikrofone berechnet werden. Die absoluten Laufzeiten τ_i ergeben sich aus der Beziehung $\tau_i = |\mathbf{r}_i|/c$, wobei c die Schallgeschwindigkeit in Luft ($c = 344$ m/s bei 20 °C) ist und $|\mathbf{r}_i| = |\mathbf{x}_i - \mathbf{x}|$ den geometrischen Abstand von Mikrofon Nummer i zum gerade berechneten Quellort \mathbf{x} in der Bildebene bezeichnet. Gleichung (1) wird dabei für alle $m \cdot n$ Punkte der Bildebene gelöst mit m für die Zeilen und n für die Spalten des Bildes. Für jeden Punkt (Pixel) der Bildebene ergibt sich somit eine Zeitfunktion und für jede Zeitfunktion kann beispielsweise der Effektivwert oder der Maximalwert gewählt und entsprechend der Position in der Matrix farbkodiert dargestellt werden. Eine solche Darstellung wird in diesem Zusammenhang als akustische Karte bezeichnet. Die Überlagerung der akustischen Karte mit einem optischen Bild zeigt die Position der dominanten Schallquellen. Eine solche Darstellung wird in diesem Bericht als akustisches Foto bezeichnet.

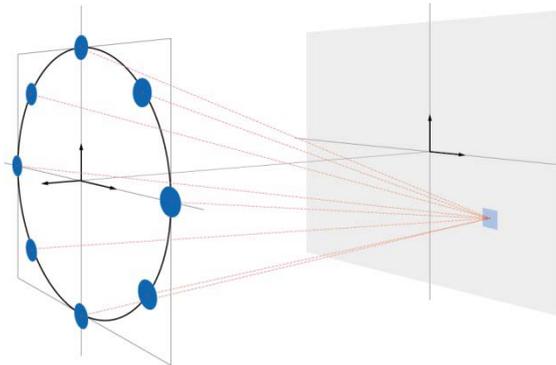


Abbildung 1: Delay-and-Sum Beamforming zur Erstellung einer akustischen Karte auf einer Ebene (graue Fläche rechts im Bild). Links ist ein Array aus Mikrofonen (blaue Punkte) dargestellt. Die Zeitsignale werden so zeitverzögert und überlagert, dass sie sich bei der Anwesenheit einer Quelle am betrachteten Bildpixel (kleines blaues Quadrat) konstruktiv überlagern. Befindet sich an der Stelle keine Quelle, findet destruktive Interferenz statt.

2.1.2 Dynamik und Hauptkeulenbreite

Zwei wesentliche Kenngrößen zur Beschreibung der Qualität des Beamformings sind die Hauptkeulenbreite und der Dynamikbereich. Sie werden hauptsächlich durch das Design des Arrays und der Frequenz der Schallemission bestimmt. Abbildung 2 zeigt dazu die Simulation des Beamformings entlang einer Achse mit einem Ringarray bei der Anwesenheit einer Punktquelle zentral vor dem Array. Beim Beamforming direkt auf die Quelle, ist die Amplitude maximal. Mit zunehmendem Abstand zwischen der Quellposition und dem Ort des Beamformings nimmt die Amplitude nicht kontinuierlich ab, sondern es entstehen lokale Minima und Maxima.

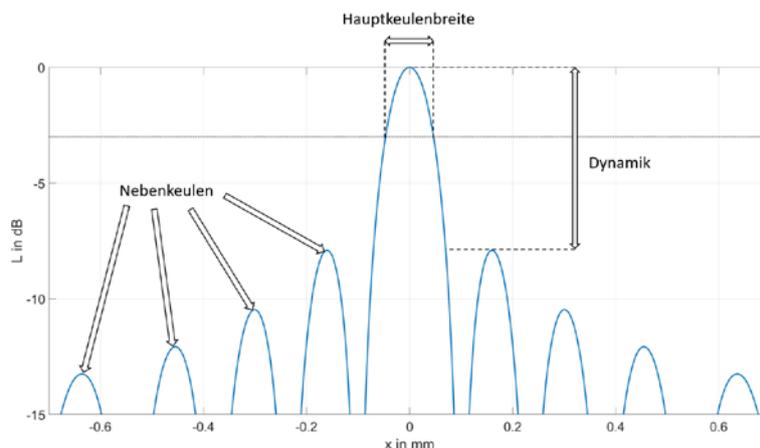


Abbildung 2: Amplitude des gebeamformten Signals entlang einer Achse bei der Anwesenheit einer harmonischen Punktquelle (4 kHz) in einem Meter Abstand zentral vor dem Array (Ringform, Durchmesser 70 cm, 48 Mikrofone).

Der Abstand zwischen der Amplitude der Hauptkeule und der größten Nebenkeule entspricht dem Dynamikbereich bzw. dem Kontrast des Arrays. Ist bei der Anwesenheit mehrerer Quellen der Lautstärkeunterschied zwischen der lautesten und einer leiseren Quelle größer als der Dynamikbereich des Arrays, kann die leiseren Quelle durch eine Nebenkeule verdeckt sein und daher nicht mehr geortet werden.

Die Hauptkeulbreite ist der Bereich, bei dem die Amplitude des gebeamformten Signals um weniger als 3 dB bezogen auf das Maximum abgefallen ist. Sie beschränkt die Ortung zweier beieinanderliegender Schallquellen. Ist die Hauptkeule breiter als der Abstand der Quellen zueinander, erscheinen sie im akustischen Bild als eine einzige Quelle.

Die Breite der Hauptkeule und der mögliche Dynamikbereich wird im Wesentlichen durch die Form des Arrays bestimmt. Nach Sarraj (2015) bieten spiralförmige Arrays einen guten Kompromiss zwischen niedriger Hauptkeulbreite und hoher Dynamik, womit dieser Arraytyp für einen weiten Bereich an Anwendungen geeignet ist.

Neben dem Arraydesign ist die Hauptkeulbreite auch von der Frequenz abhängig. Sie nimmt generell, bei einer vorgegebenen Array-Geometrie, mit steigender Frequenz kontinuierlich ab. Abbildung 3 zeigt dazu beispielhaft die simulierte Hauptkeulbreite einer monofrequenten Quelle in einem Meter Abstand zentral vor dem Array. Bei dem Array handelt es sich um einen Ring mit 48 Mikrofonen und einem Durchmesser von 0,7 m. Während bei der Quelle mit 500 Hz der Durchmesser der Hauptkeule 43 cm beträgt, sind es bei 4 kHz nur noch 5,4 cm.

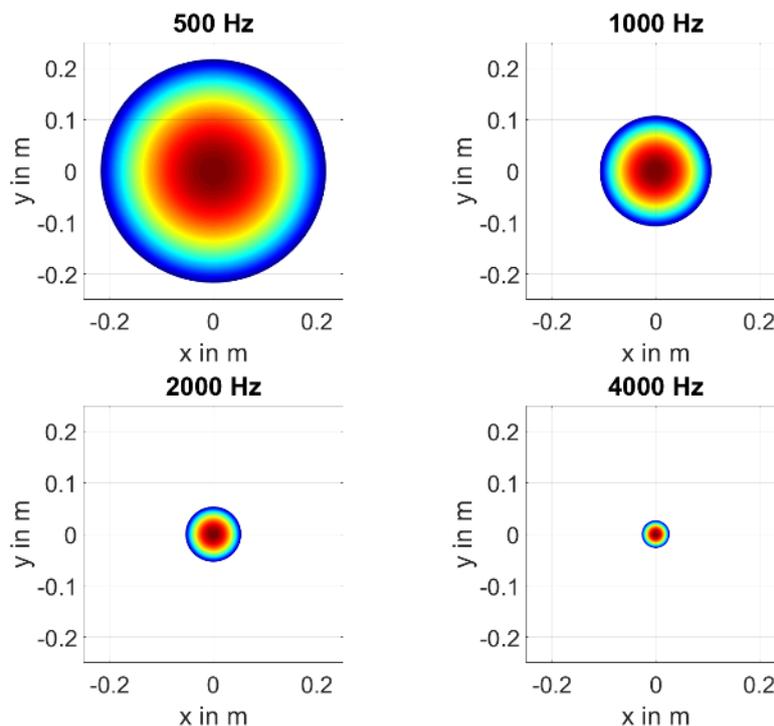


Abbildung 3: Simulierte Hauptkeulbreite von harmonischen Quellen im Abstand von 1 m zum Array (Ringarray mit 48 Mikrofonen; Durchmesser: 0,7 m)

2.2 Maskierung

Unter Maskierung wird die Verdeckung der Schallanteile einer Schallquelle durch eine andere Schallquelle verstanden. Dies tritt beispielsweise im Fall von Zügen bei benachbarten Wagen auf, bei denen einer mit Graugusssohlen und der andere mit Verbundstoffsohlen gebremst wird. In diesem Fall kann der Pegelunterschied zwischen den einzelnen Achsen 18 dB und mehr betragen.

Abbildung 4 veranschaulicht den Einfluss des Maskierungseffektes beim Beamforming. Dargestellt sind zwei akustische Fotos von aufeinander folgenden Wagen (Fahrtrichtung des Zuges von rechts nach links). Beim oberen Foto sind die Achsen, vermutlich mit Graugusssohlen gebremst, deutlich als Quellen zu erkennen. Die Schallabstrahlung der vorderen Achsen des benachbarten Wagens (unteres Foto) wird vom vorherigen Wagen maskiert. Erst bei den hinteren Achsen sind wieder eindeutig Quellen identifizierbar.

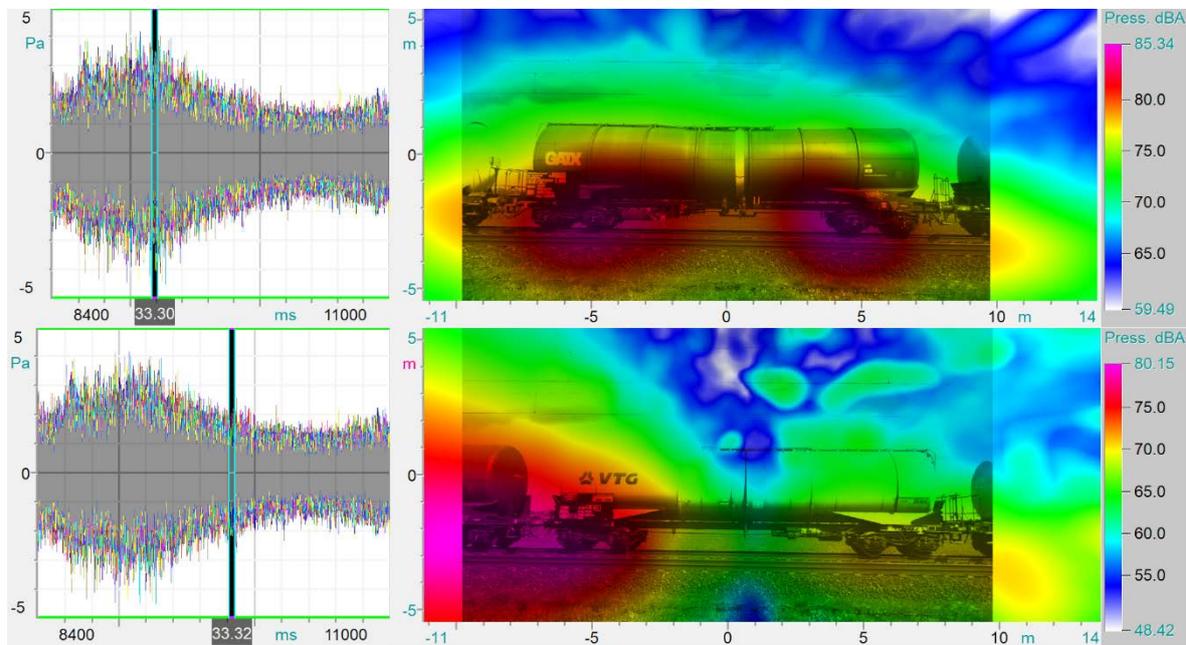


Abbildung 4: Veranschaulichung des Maskierungseffektes an zwei aufeinander folgenden Wagen; links: Zeitsignal mit markierten Zeitbereich; rechts: aus dem markierten Zeitbereich berechnetes akustisches Foto

2.3 Schallquellen im Schienenverkehr

An dieser Stelle erfolgt eine kurze Einführung in die Thematik der Geräusentstehung im Schienenverkehr. Eine umfassende Abhandlung zu der Thematik ist z.B. in Thompson (2008) zu finden.

2.3.1 Rollgeräusche

Die Rollgeräusche machen den Hauptanteil der Schallemission im Schienenverkehr aus. Sie sind nach Möhler (2011) die vorherrschende Ursache der Schallemission bei Geschwindigkeiten zwischen 70 km/h und 300 km/h.

Abbildung 5 zeigt eine Illustration des Schallerzeugungsmechanismus von Rollgeräuschen des Rad-Schiene-Kontaktes nach Lopez Arteaga (2019). Die Ursache für das Rollgeräusch sind die Rauigkeiten der Oberflächen von Rad und Schiene. Diese verursachen beim Abrollen vertikale Anregungen der Radsätze und der Schiene, welche diese zu Schwingungen anregen. Diese Schwingungen breiten sich zum einen entlang der Schiene und zum anderen über das Rad und von dort aus entlang der Achse über den gesamten Wagen aus und werden an verschiedenen Stellen als Luftschall abgestrahlt. Die Rollgeräusche, die über den Körperschall auf den Wagenkasten übertragen werden, können dort beispielsweise zu einem „Dröhnen“ führen. Dies ist z. B. bei leeren Kesselwagen der Fall, wo der Körperschall durch lokale strukturelle Resonanzen verstärkt wird und an den großen Flächen der Wagenwände in Luftschall umwandelt.

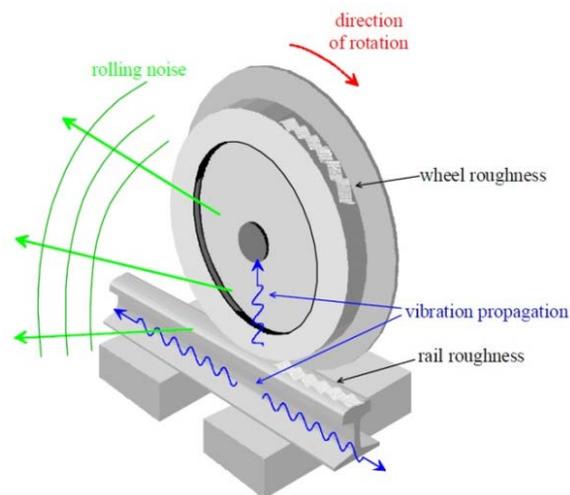


Abbildung 5: Illustration des Schallerzeugungsmechanismus von Rollgeräuschen (Quelle: Lopez Arteaga 2019, S. 3)

Der sich entlang der Schiene in Form einer sogenannten Biegewelle ausbreitende Schall wird kontinuierlich an die umgebende Luft abgestrahlt. Die Abstrahlung erfolgt, wie in Abbildung 6 illustriert, in einem bestimmten Winkel ϕ , welcher von den Wellenlängen von Biegewelle λ_B und Luftschall λ abhängig ist.

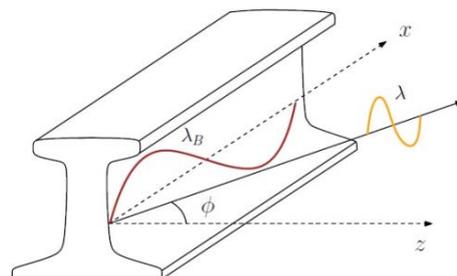


Abbildung 6: Illustration der gerichteten Schallabstrahlung der Biegewelle an der Schiene (Quelle: Lopez Arteaga 2019, S. 14)

Ein weiteres typisches Rollgeräusch, welches häufig im Schienenverkehr auftritt, wird von Flachstellen verursacht. Dabei handelt es sich um unerwünschte Abnutzungserscheinungen an der Radlauffläche. Die Folge ist ein periodisch Auftretendes Schlaggeräusch, welches als „Rattern“ wahrgenommen wird.

2.3.2 Aerodynamische Geräusche

Die aerodynamischen Geräusche resultieren aus einem instabilen Luftstrom über den Zug. Die Intensität der aerodynamischen Geräusche nimmt in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit des Zuges ungefähr mit der sechsten Potenz zu, die des Rollgeräusches hingegen nur mit der dritten Potenz (Jäger (2000), Huber (1998)). Ab ungefähr 300 km/h dominieren die aerodynamischen Geräusche bei Zugvorbeifahrten.

Sowohl breitbandige als auch tonale Geräusche können durch Luftströmung über verschiedene Teile des Zuges erzeugt werden, wobei der Großteil der Schallenergie im tieferen Frequenzbereich konzentriert ist. Das Verständnis über die Ursachen aerodynamischen Schalls hat sich nach Thompson (2008) in den ver-

gangenen Jahren beträchtlich verbessert. Allerdings weist Thompson (2008) darauf hin, dass die Modellierung aeroakustischer Schallquellen viel aufwändiger ist als bei vibroakustischen Problemen und dass sich die Modelle noch in einem relativ frühen Entwicklungsstadium befinden.

2.3.3 Sonstige Geräusche

Zu den weiteren Geräuschen, die im Zusammenhang mit Schienenverkehr auftreten können, zählen

- Boden- und Vibrationsgeräusche,
- Antriebsgeräusche von Dieselmotoren,
- Geräusche von Hilfsaggregaten,
- Warngeräusche (Hupen) sowie
- Geräusche von Lüftern, Pumpen und Abgasanlagen.

Die Geräusentstehung dieser Teilquellen ist jedoch nicht speziell eisenbahnspezifisch.

2.3.4 Vorbeifahrtpegel vs. Geschwindigkeit

Der Gesamtvorbeifahrtpegel $L_{Aeq,T}$ hängt von der Geschwindigkeit des Zuges ab. Abbildung 7, aus Thompson (2008), zeigt die Vorbeifahrtpegel mehrerer Züge eines nicht näher spezifizierten Zugtyps (Mikrofonabstand zur Gleismitte: 7,5 m). Es ist deutlich eine kontinuierliche Zunahme von $L_{Aeq,T}$ mit der Geschwindigkeit zu erkennen.

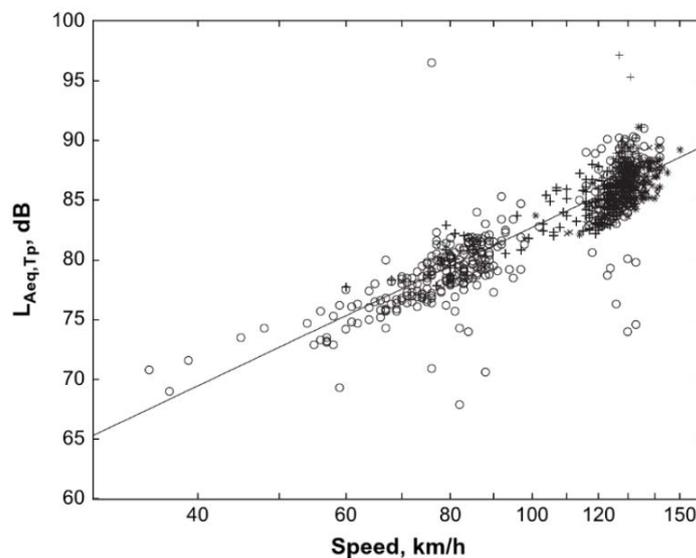


Abbildung 7: Vorbeifahrtpegel eines Zugtyps in 7,5 m Abstand in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit aus Thompson (2008)

Der Zusammenhang zwischen Schallemission und Vorbeifahrtgeschwindigkeit kann durch

$$L = L(v_0) + n \log\left(\frac{v}{v_0}\right) \quad (2)$$

beschrieben werden, wobei es sich bei dem Geschwindigkeitskoeffizienten n um einen empirischen Wert handelt. Typische Werte für den Geschwindigkeitskoeffizienten liegen zwischen $n = 20$ (Buna 1998) und $n = 30$ (Anlage 2 zu § 4 16. BImSchV – Schall03)¹.

¹ Verkehrslärmschutzverordnung - 16. BImSchV, Anlage 2 (zu § 4) Berechnung des Beurteilungspegels für Schienenwege (Schall 03), BGBl. I 2014 S. 2271.

3 Methodik

3.1 Messungen

Die Messreihen wurden an der Eisenbahnstrecke 1700 bei Streckenkilometer 37,8 durchgeführt. Die Züge auf dem aus Sicht der Kameras vorderen Gleis fuhren in Richtung Hannover und die Züge auf dem hinteren Gleis in Richtung Minden. Für die Messung kamen die Arrays „FlexStar120“ und „Fibonacci“ der gfaitech GmbH zum Einsatz, welche zur zeitsynchronen Messung der Zugvorbeifahrten eingesetzt wurden. Das Array „FlexStar120“, ein spiralförmiges Array mit 120 Mikrofonen und einem Durchmesser von 3,4 m, dient zur akustischen Quellkartierung des gesamten Zuges. Es wurde in einem Abstand von 13,2 m zur Gleismitte aufgestellt. Der Aufbau der Messung ist in Abbildung 8 schematisch dargestellt.

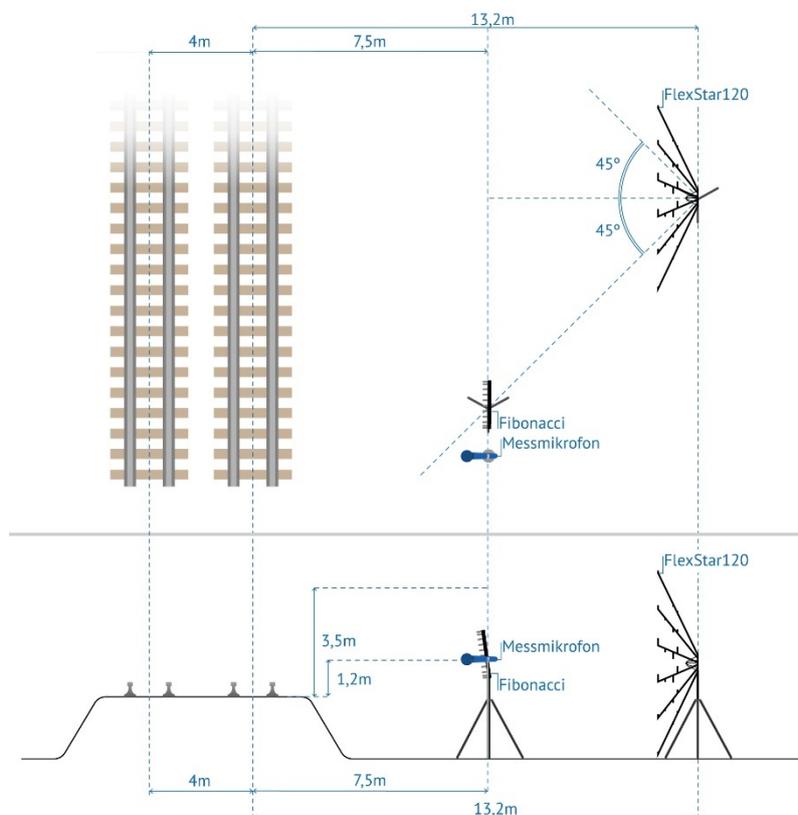


Abbildung 8: Messaufbau

Das Fibonacci-Array war auf den Rad-Schiene-Kontakt zentriert, für eine Detailauswertung der dortigen Schallabstrahlung. Das Array stand in einem Abstand von 7,5 Meter zur Gleismitte des vorderen Gleises. Zur Aufnahme der Vorbeifahrtpegels wurde ein einzelnes Mikrofon des Fibonacci-Array verwendet, welches sich in einer Höhe von 1,2 m über der Schienenoberkante in einem Abstand von 7,5 m zur Gleismitte des vorderen Gleises befand, was der Messposition A für Zugvorbeifahrtmessungen nach DIN EN ISO 3095 entspricht.

Bei der ersten Messkampagne am 07.05.2019 wurden im Zeitraum zwischen 09:51 Uhr und 16:30 Uhr 75 Zugvorbeifahrten erfasst. Bei der zweiten Messkampagne am 10.09.2019 wurden im Zeitraum zwischen 08:53 Uhr bis 16:53 Uhr insgesamt 82 Zugvorbeifahrten erfasst.

3.2 Akustisches Foto

Für die Detailauswertungen werden akustische Fotos mittels der gfaitech Software NoiseImage erstellt. Die Berechnung kann dabei über den Zeit- oder den Frequenzbereich erfolgen. Abbildung 9 zeigt dazu beispielhaft das akustische Foto des Stromabnehmers eines ICEs (01_001_ICE) aus dem Frequenzbereich. Die Abbildung ist aus drei Modulen zusammengesetzt: *Zeitsignal* (oben links), *Spektrum* (oben rechts) und *Akustisches Foto* (unten). Der markierte Bereich im Zeitsignal (rotes Oval) wird ausgewertet. Im Modul *Spektrum* ist das Spektrum des ausgewählten Zeitbereichs zu sehen. Im Spektrum ist das Oktavband mit der Mittenfrequenz 2 kHz markiert, für welches das akustische Foto berechnet wurde. In den Statuszeilen der einzelnen Module stehen zusätzliche Informationen wie: markierter Zeitbereich, Effektivwert des markierten Zeitbereiches, markierter Frequenzbereich, Abtastrate, Fokus, verwendeter Algorithmus, etc.

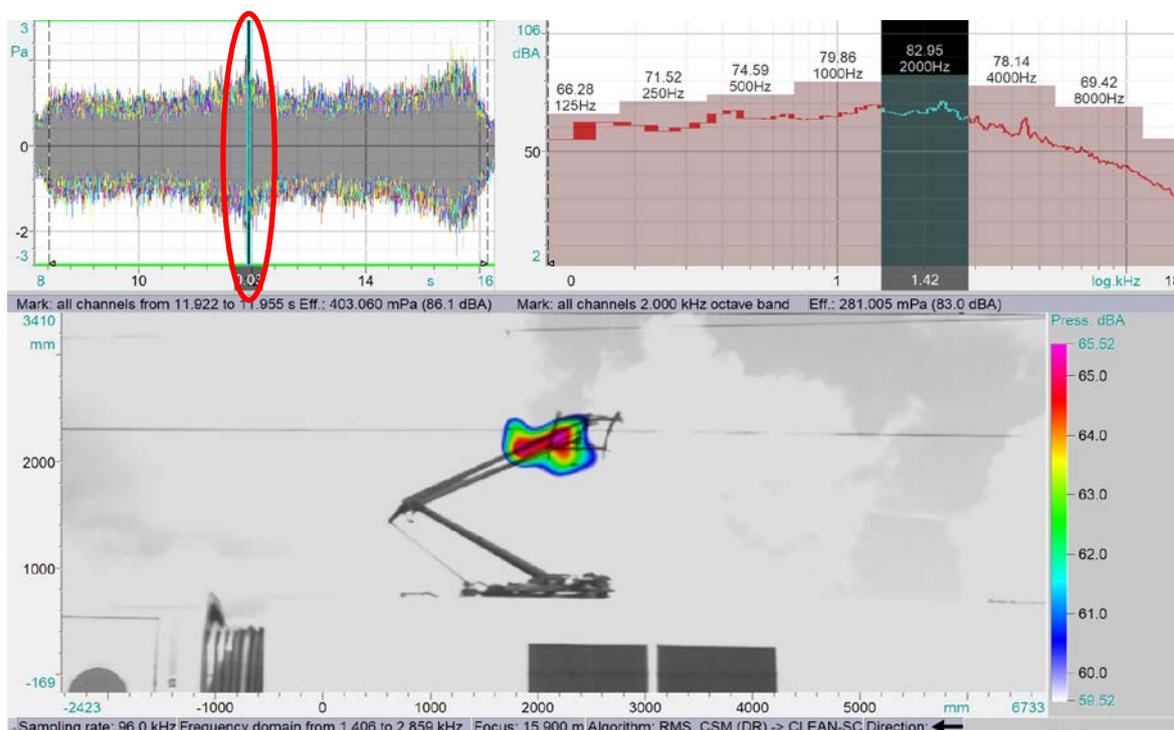


Abbildung 9: Akustisches Foto des Stromabnehmers eines ICEs (Messung 1) aus dem Spektrum. Oben links: Zeitsignal mit ausgewähltem Integrationsbereich (hervorgehoben durch das rote Oval); oben rechts: Spektrum mit ausgewähltem Frequenzbereich für das Beamforming; unten: Akustisches Foto

3.3 Pass-By Auswertung

Das Vorbeifahrt 2D-Modul der gfaitech Software NoiseImage beruht auf dem Delay-and-Sum Beamforming. Bei einer Vorbeifahrt ist der Abstand r_{ij} eines Punktes x_i auf dem Messobjekt zu einem Mikrofon y_j eine Funktion der Zeit. Dies hat zur Folge, dass sich das am Mikrofon empfangene Signal sowohl in seiner Frequenz als auch im zeitlichen Verlauf der Amplitude von dem ausgesandten Signal der bewegten Schallquelle unterscheidet. Dieses Phänomen ist auch als DOPPLER-Effekt bekannt. Für einen objektiven Vergleich von Schallquellen, die sich mit unterschiedlicher Geschwindigkeit im Vergleich zur Messstelle bewegen, sind die Messdaten von diesem Effekt zu bereinigen.

Um das zu vermessende Objekt virtuell verfolgen und gleichzeitig den Einfluss dieses Effekts herausrechnen zu können, muss die Trajektorie des Objekts bezüglich der akustischen Kamera bekannt sein. Zur

Bestimmung dieser wird zunächst aus dem aufgenommenen Video der optischen Kamera mit Hilfe sogenannten Feature-Points ein Panoramabild des Messobjekts erzeugt. Aus der Bewegung dieser Feature-Points zwischen zwei Frames, der Bildrate der optischen Kamera und dem Abstand des Mikrofonarrays zum Objekt kann zusätzlich ein Geschwindigkeitsprofil der Vorbeifahrt errechnet werden. Die benötigte Trajektorie wird anschließend durch Integration des Geschwindigkeitsprofils berechnet.

Mit dieser Information kann nun eine akustische Karte, welche nicht vom DOPPLER-Effekt beeinflusst wird, bestimmt werden. Hierbei werden die potentiellen Schallquellen des Messobjekts während der Vorbeifahrt vor der optischen Kamera eine Zeit τ lang verfolgt und Delay-and-Sum Beamforming entsprechend der Abbildung 10 durchgeführt. Für jeden Zeitpunkt t wird die Laufzeit $\Delta t_{nj,t}$ von der n -ten potentiellen Quellposition $x_n(t)$ zum j -ten Mikrofon $y_j(t)$ berechnet. Anschließend wird der Schalldruck $p_{j,t+\Delta t_{nj,t}}$ über alle Mikrofone gemittelt. Das hieraus resultierende Beamforming-Signal $p_{n,j}(t)$ wird mittels FFT frequenz aufgelöst in der akustischen Karte dargestellt.

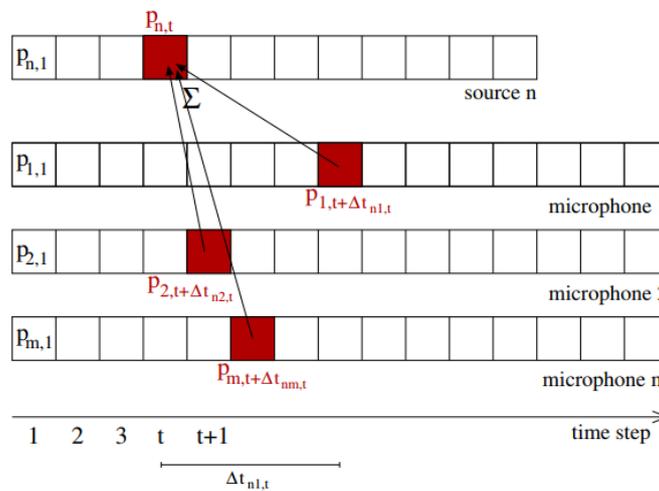


Abbildung 10: Delay-and-Sum Beamforming mit Korrektur des DOPPLER-Effekts (keine Korrektur der Amplitude) nach Zechel (2010)

Für eine frequenzabhängige Betrachtung aller Schallquellen auf einem Blick bietet es sich an, die Pass-By Auswertungen in einzelne Terz- oder Oktavbänder zu unterteilen und untereinander darzustellen. Abbildung 11 zeigt dies beispielhaft für den Triebwagen einer Stadler KISS für vier Terzbänder im tieffrequenten Bereich. Es ist zu beachten, dass bei gleicher Dynamik Quellen bei tieferen Frequenzen aufgrund der größeren Hauptkeulenbreite größer erscheinen, als Quellen bei höheren Frequenzen. Zudem erscheinen Quellen bei sehr tiefen Frequenzen als lange Striche. Dies liegt darin begründet, dass die Quellausdehnung entlang der y -Achse primär von der Hauptkeulenbreite abhängt, während sie entlang der x -Achse durch die Integrationszeit beschränkt wird, also jene Zeitdauer, die der Beamformer die Quelle während der Vorbeifahrt verfolgt.

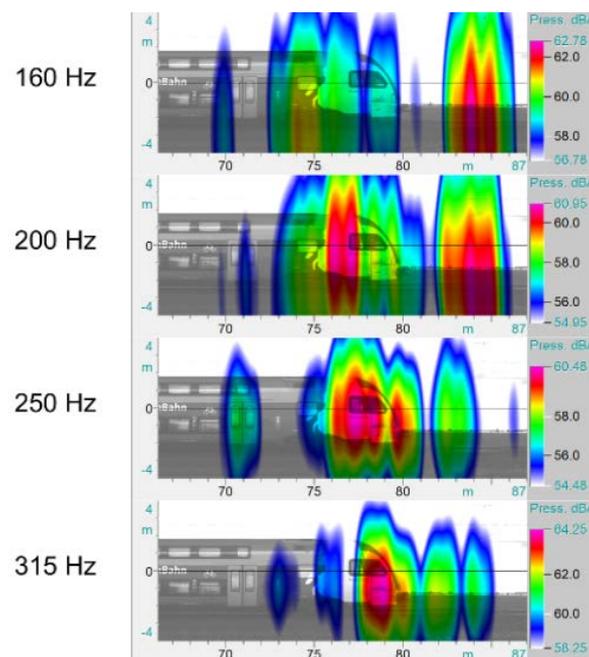


Abbildung 11: Pass-By Auswertung des Triebwagens einer Stadler KISS (Messung 34) für die ersten vier Terzbänder

3.4 Pegeldarstellungen

Die Darstellung der Vorbeifahrtpegel umfasst erstens einen einfachen Pegelschrieb mit einem Mikrofon (Messposition A nach DIN EN ISO 3095) L_{pAF} und zweitens Pegel die aus dem Beamforming ermittelt werden $L_{p,Beam}$. Beide Pegel sind als Funktion der Ortskoordinate x des Zuges dargestellt. Die Umrechnung der Zeitdaten von $L_{pAF}(t)$ nach $L_{pAF}(x)$ erfolgt mit Hilfe des in der Pass-By Auswertung ermittelten Geschwindigkeitskanals.

Die Pegel aus den Beamforming werden aus der akustischen Karte des kompletten Zuges bestimmt, indem für jede Position x der Mittelwert entlang der y -Achse gebildet wird. Abbildung 12 illustriert das Vorgehen. Um den Einfluss der aeroakustischen Geräusche im oberen Bereich des Zuges (zum Beispiel am Pantografen) von den Rollgeräuschen besser zu trennen, sind die Beamformingpegel in $L_{p,Beam,unten}(x)$ für den unteren und $L_{p,Beam,oben}(x)$ für den oberen Teil des Zuges unterteilt. Die Trennung zwischen oben und unten erfolgt in der Mitte der y -Achse der akustischen Karte, welche in etwa der halben Höhe des Zuges entspricht. Es ist zu erkennen, dass trotz der Trennung ein Überschneiden zwischen den getrennten Bereichen stattfindet.

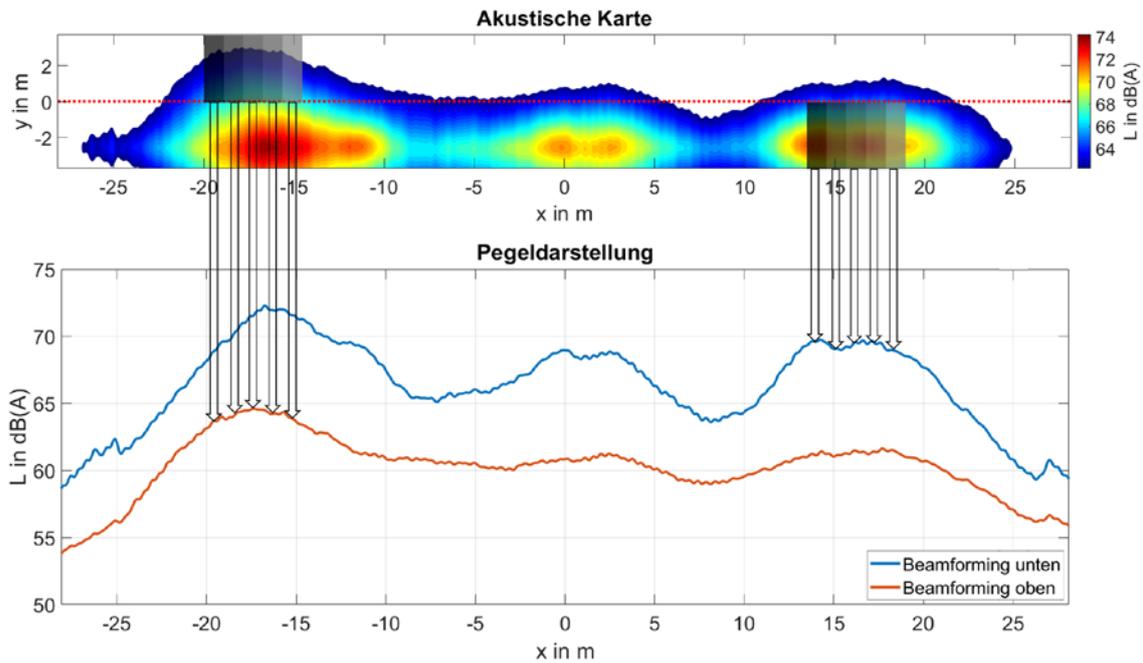


Abbildung 12: Ermittlung des Beamforming Pegels aus der akustischen Karte

Abbildung 13 zeigt beispielhaft das Ergebnis der Vorbeifahrtpegel eines Güterzuges (Messung 02_098_Gueter). Im oberen Teil des Bildes ist zur Orientierung das Pass-By Bild des Zuges dargestellt. Die Übergänge zwischen den einzelnen Wagen sind im Plot durch schwarz gepunktete Striche gekennzeichnet.

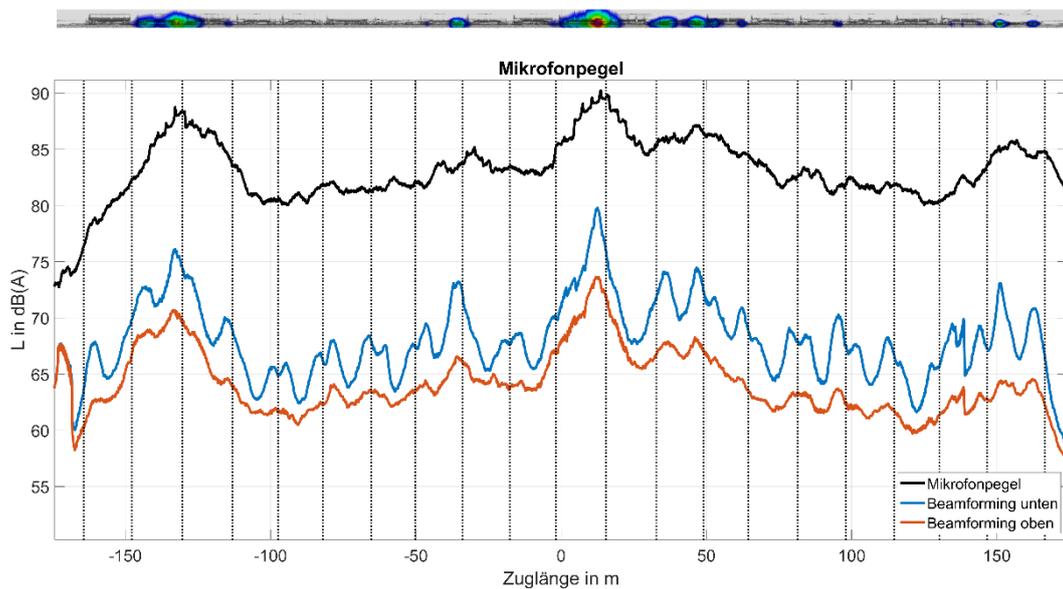


Abbildung 13: Pegeldarstellung für den Güterzug aus Messung 98

Aus $L_{p,Beam,unten}(x)$ ist in Abbildung 13 deutlich die Lage der einzelnen Achsen des Zuges als Pegelspitzen erkennbar. $L_{p,Beam,oben}(x)$ liefert in diesem Beispiel keine zusätzliche Information. $L_{p,Beam,oben}(x)$ ist primär für die Untersuchung von aeroakustischen Quellen beispielsweise am Pantografen von Interesse, welche erst bei höheren Geschwindigkeiten mittels des Beamformings identifizierbar sind. Bei Zügen, an denen keine

eindeutigen Schallquellen im oberen Bereich zu beobachten sind, wird daher lediglich $L_{p,Beam,unten}(x)$ dargestellt.

Die Differenz zwischen $L_{p,Beam,oben}(x)$ bzw. $L_{p,Beam,unten}(x)$ zum L_{pAF} beträgt bis zu 15 dB. Das liegt vor allem an der starken Richtwirkung durch das Beamforming, während das einzelne Messmikrofon nur den integralen Schall von allen Quellen registriert. Zudem war das Mikrofonarray in einem größeren Abstand zum Gleis als das Messmikrofon positioniert, was zu einer höheren abstandsbedingten Pegelabnahme führt. Weiterhin ist es nach Sarradj (2012) mittels Beamforming nicht ohne weiteres möglich die exakten Schallimmisionspegel einzelner Quellen zu bestimmen.

In Abbildung 14 sind $L_{pAF}(x)$ und $L_{p,Beam,unten}(x)$ als Mittelwerte der einzelnen Waggon dargestellt. Dies ermöglicht es jedem einzelnen Wagen einen Pegelwert zuzuordnen. Zur besseren Illustration sind die Unterschiede zwischen den beiden Verläufen mit roten Ovalen gekennzeichnet. Die Verläufe der Pegelwerte sind zwar qualitativ ähnlich, allerdings ermöglichen die gebeamformten Pegel eine bessere Unterscheidung zwischen leisen und lauten Waggon. Insbesondere bei den Wagen Nummer 3 und 12 aber auch bei den Wagen Nummer 6, 8 und 16 zeigen die aus $L_{p,Beam,unten}(x)$ gemittelten Pegel, dass diese Wagen leiser oder lauter sind, als es die Pegel aus $L_{pAF}(x)$ vermuten lassen.

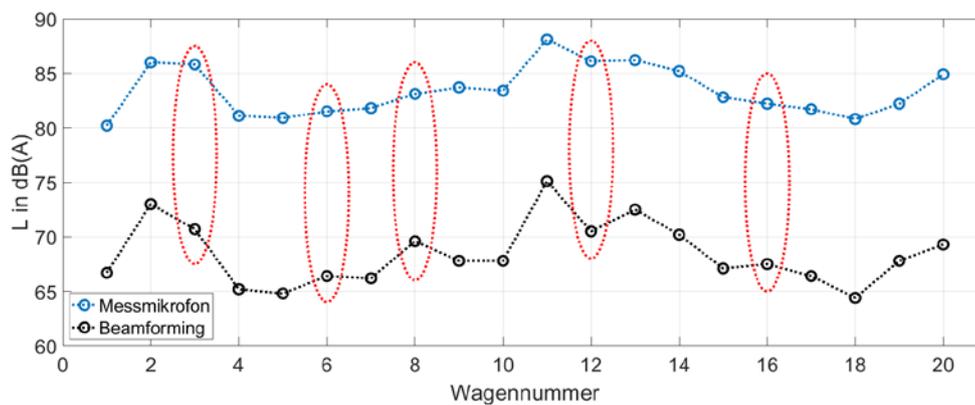


Abbildung 14: Mittelwerte der Pegel pro Wagen für den Vorbeifahrtpegel mit einem einfachen Messmikrofon sowie für das Beamforming (Messung 98; Fahrrichtung von links nach rechts; mittlere Geschwindigkeit: 88,1 km/h)

4 Ergebnisse

4.1 Übersicht

Die in diesem Bericht behandelte Messkampagne umfasst 157 Züge, die nachstehend nach Zugtyp aufgeschlüsselt sind

- 8 Lokomotiven,
- 28 Intercity Express,
- 12 Intercity,
- 11 Intercity 2,
- 50 Regionalbahnen und
- 48 Güterzüge.

Bei der Hälfte der aufgenommenen Regionalbahnen handelt es sich um DB Regio der Baureihen 423 und 424, im Folgenden als DB Regio bezeichnet. Der überwiegende Teil der übrigen aufgenommenen Regionalbahnen bestand aus dem Zugtyp KISS des Herstellers Stadler Rail (im Folgenden als Stadler KISS bezeichnet). Abbildung 15 zeigt die mittleren Vorbeifahrtpegel aller gemessenen Züge, für die auch eine Pass-By Auswertung durchgeführt werden konnte. Für insgesamt 11 der 157 Vorbeifahrten schlug die Pass-By Auswertung infolge einer fehlerhaften Erstellung des Panorambildes, vermutlich aufgrund ungünstiger Lichtverhältnisse, fehl. Die Güterzüge sind in der Abbildung durch Kreuze und die Personenzüge durch Kreise gekennzeichnet. Der linke Graph in Abbildung 15 zeigt die Vorbeifahrten am vorderen Gleis (7,5 m Abstand zwischen Mikrofon und Gleismitte) und der rechte Graph entsprechend die Vorbeifahrten am hinteren Gleis (11,5 m Abstand zwischen Mikrofon und Gleismitte). Für die Personenzüge ist der Zusammenhang erkennbar, dass der Gesamtvorbeifahrtpegel mit der Geschwindigkeit zunimmt. Zur Visualisierung dieses Zusammenhangs ist in Abbildung 15 ein Fit entsprechend Formel 2 eingetragen. Für das vordere Gleis resultiert aus diesem Fit ein Geschwindigkeitskoeffizient von 24,7 und für das hintere Gleis von 30,7.

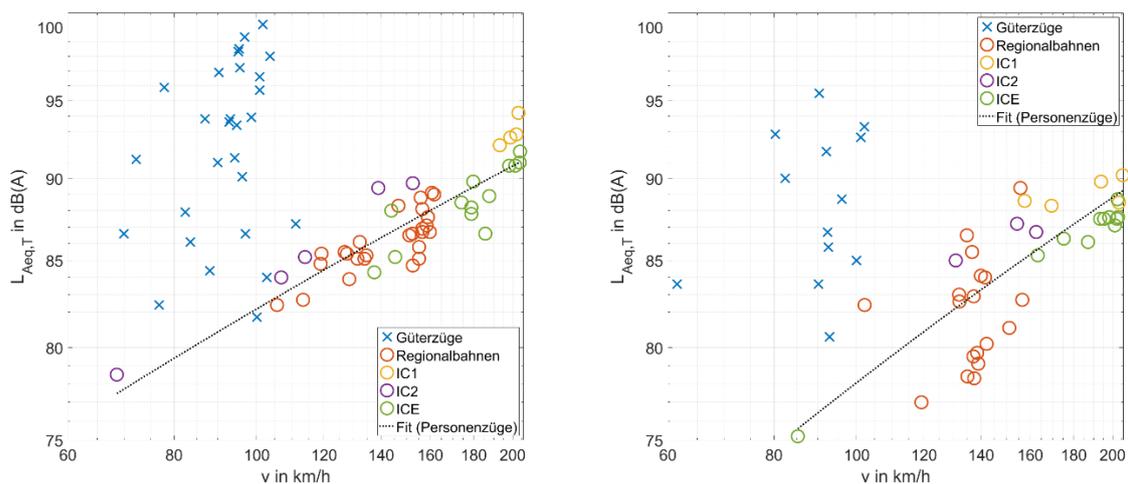


Abbildung 15: Gesamtvorbeifahrtpegel $L_{Aeq,T}$ in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit; links: Vorbeifahrten am vorderen Gleis (7,5 m Abstand zwischen Mikrofon und Gleismitte); rechts: Vorbeifahrten am hinteren Gleis (11,5 m Abstand zwischen Mikrofon und Gleismitte)

Die recht gute Übereinstimmung mit der Formel lässt darauf schließen, dass die akustische Qualität der Fahrzeuge in den Personenzügen sich nicht stark unterscheidet. Für die Güterzüge wurden schon bei geringen Geschwindigkeiten eine breite Streuung der Pegel gemessen, was auf eine große Varianz der akustischen Qualität der Fahrzeuge zurückzuführen ist. Bei den Güterzügen streuen die Vorbeifahrtpegel so stark, dass keine Proportionalität zur Geschwindigkeit erkennbar ist.

4.2 Schallquellen im Schienenverkehr

4.2.1 Rad-Schiene

„Die Frage, ob die Abstrahlung der Rollgeräusche auf das Rad oder die Schiene zurückzuführen sind, ist seit langem Gegenstand von Untersuchungen, oft mit scheinbar widersprüchlichen Ergebnissen. Es ist inzwischen allgemein anerkannt, dass sowohl das Rad als auch die Schiene einen wesentlichen Anteil am Lärm beitragen“ (Thompson, 2008 S. 20 ff.).

Abbildung 16 zeigt am Beispiel der Achsen zweier Waggons einer Stadler KISS den Emissionsort des Rollgeräusches für die Terzbänder von 1,25 kHz bis 16,0 kHz. Es ist hier darauf zu achten, dass sich die Dynamikbereiche der einzelnen Terzbänder unterscheiden. Prinzipiell ist zu beobachten, dass die Schallemission direkt am Rad-Schiene-Kontakt am höchsten ist. Bis zum 4,0 kHz Terzband ist keine eindeutige Zuordnung der Schallemission zum Rad oder zur Schiene möglich. Bei den 12,5 kHz und 16,0 kHz Terzbändern lassen sich eindeutig die Räder als maßgeblicher Schallemissionsort ausmachen. Die Terzbänder 6,3 kHz und 10,0 kHz zeigen hingegen vor allem eine Schallemission der Schiene. Generell sollte angemerkt werden, dass die Schallabstrahlung oberhalb von 5,0 kHz gegenüber dem lautesten Terzband bereits um mehr als 24 dB leiser ist. Auf den Gesamtpegel haben die Schallemissionen oberhalb von 5 kHz daher keinen Einfluss mehr.

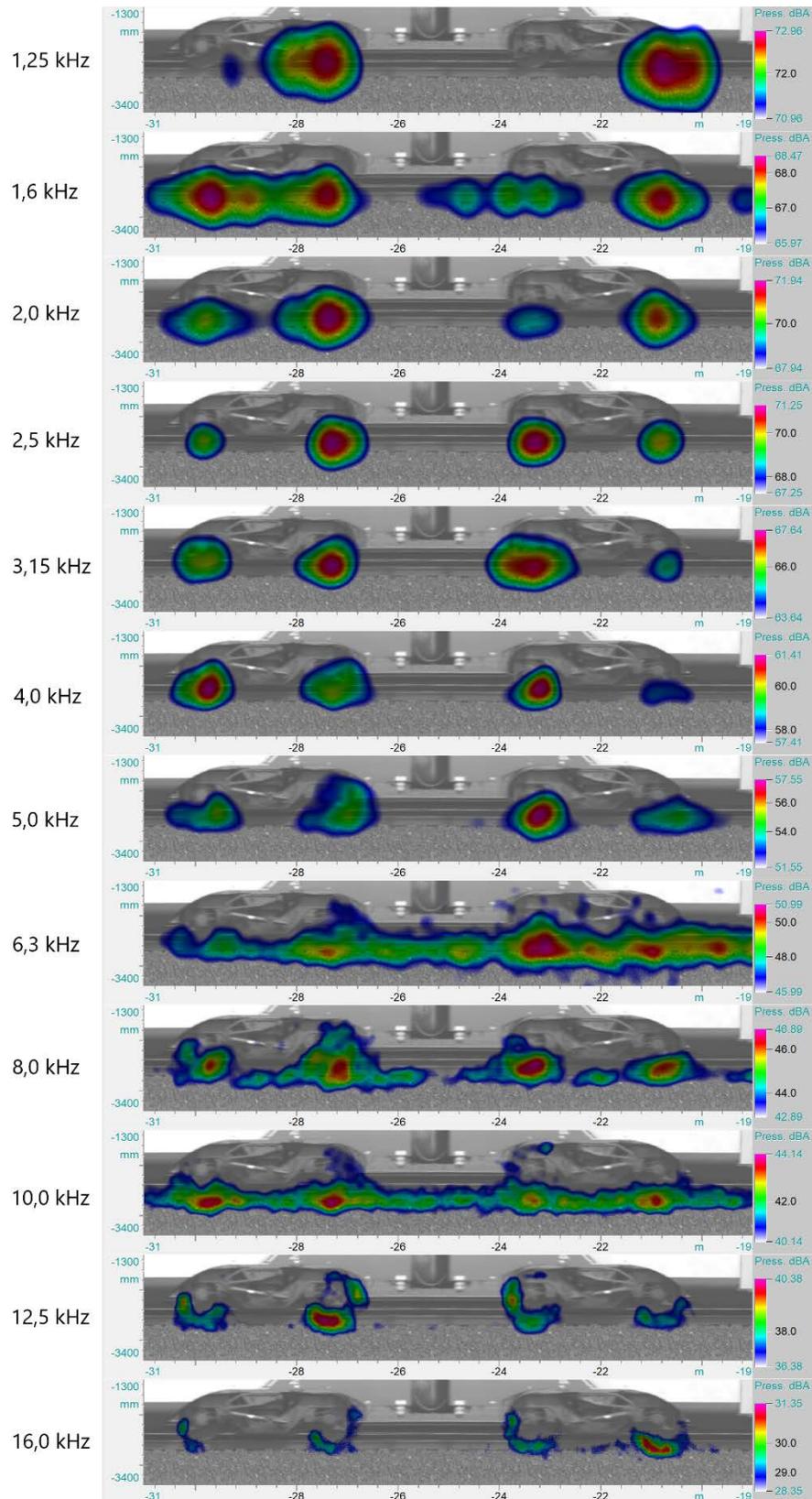


Abbildung 16: Emissionsorte der Rollgeräusche an vier Achsen einer Stadler KISS (Messung 22; Fahrtrichtung von links nach rechts; mittlere Geschwindigkeit: 151,2 km/h) für die Terzbänder von 1,25 kHz bis 16,0 kHz

Ein wesentlicher Aspekt bzgl. der Schallemission der Schienen ist die Abstrahlung der Biegewelle. Biege- wellen können sich in Strukturen ausbreiten, deren Abmessungen kleiner als die Wellenlänge des Schalls sind, was im hörbaren Frequenzbereich auf Schienen zutrifft. Ist die Wellenlänge der Biegewelle λ_B größer als die Wellenlänge des Luftschalls λ_L , findet eine Schallabstrahlung vom Körperschallfeld der Schiene unter dem Winkel

$$\vartheta = \sin^{-1} \frac{\lambda_L}{\lambda_B} \quad (3)$$

ins angrenzende Luftschallfeld statt. Wie die Abbildung 17 (oben und Mitte) zeigt, ist die Abstrahlung der Biegewelle vor allem vor der Zugeinfahrt und nach der Zugausfahrt dominant. Die Biegewelle kann allerdings mit der akustischen Kamera zeitweise auch während der Zugdurchfahrt identifiziert werden, wie im unteren Bild aus Abbildung 17 zu sehen ist.

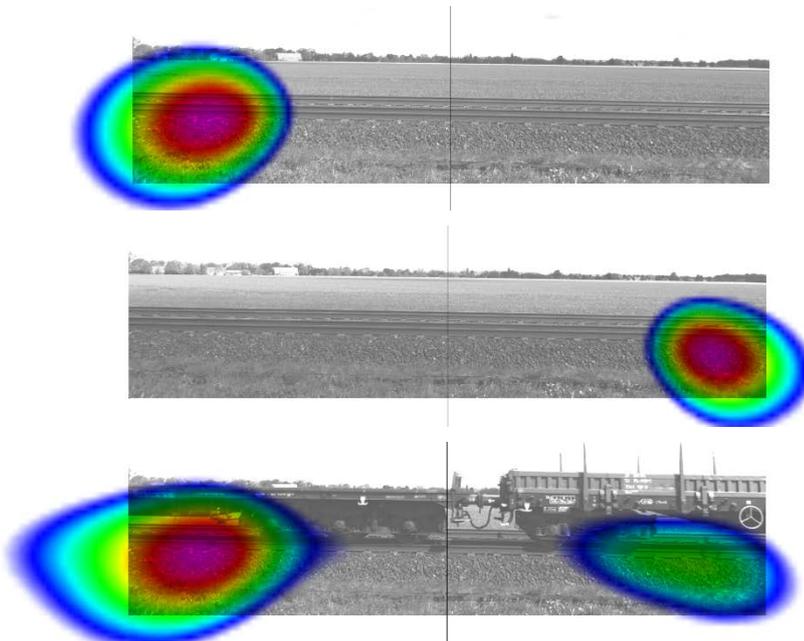


Abbildung 17: Abstrahlung der Biegewelle von der Schiene vor der Zugeinfahrt (Oben), nach der Zugausfahrt (Mitte) und während der Zugdurchfahrt (Unten)

4.2.2 Flachstellen

Flachstellen lassen sich gut im Zeitsignal identifizieren. Flachstellen tauchen im Zeitsignal als periodische Peaks auf. In einem akustischen Video zeigen sich die Flachstellen als periodisch auftauchende Quellen. Abbildung 18 zeigt zwei Frames eines solchen Videos. Oben sind die Zeitsignale der Array-Mikrofone zu sehen. Der schwarze Balken markiert den Zeitbereich, für den die akustischen Fotos berechnet werden. Im Zeitsignal sind bei den einzelnen Perioden zwei sich überlagernde transiente Ereignisse beobachtbar. Die entsprechenden akustischen Bilder zeigen, dass es sich um zwei Achsen mit Flachstellen handelt: der vordersten Achse des rechten Wagens und der hintersten Achse des linken Wagens.

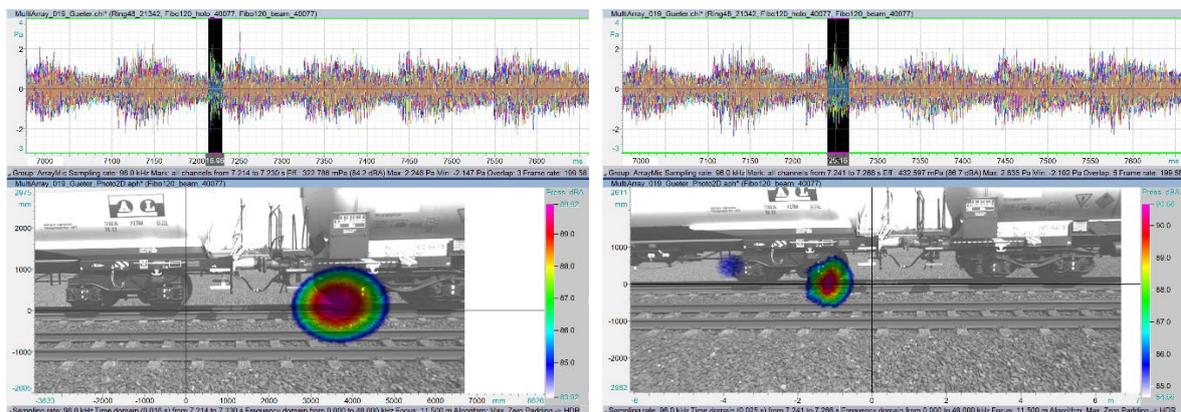


Abbildung 18: Visualisierung der Flachstellen von zwei unterschiedlichen, dicht beieinander liegenden Flachstellen

Gelegentlich ist erst nach der Zugvorbeifahrt das typisch periodische Geräusch einer Flachstelle wahrnehmbar. In Abbildung 19 ist dieses Phänomen am Beispiel der Vorbeifahrt eines IC2 anhand der Pegel-daten zu sehen. Das könnte sich dadurch erklären lassen, dass die übrigen Geräusche während der Vorbeifahrt das Geräusch der Flachstellen maskieren. Die transienten Geräusche der Flachstellen breiten sich entlang der Schiene aus und können nach der Vorbeifahrt, sobald die zuvor maskierenden Quellen nicht mehr anwesend sind, wahrgenommen werden

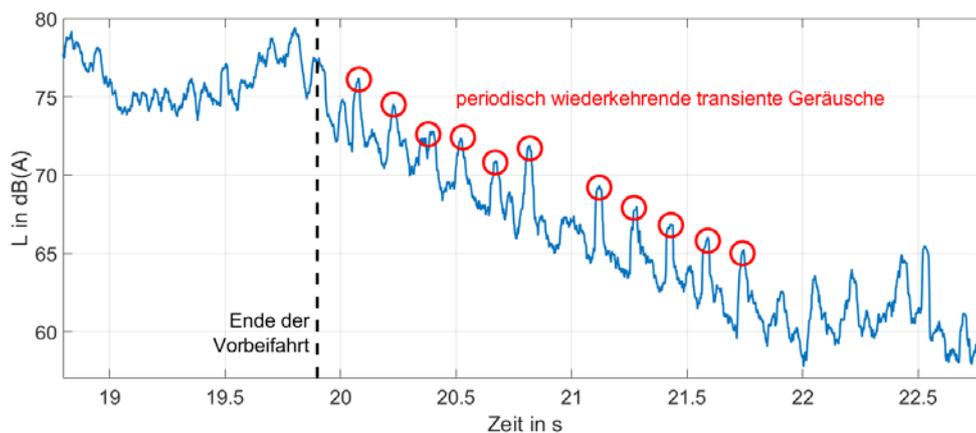


Abbildung 19: Transiente Geräusche nach der Vorbeifahrt, die mutmaßlich durch eine (oder mehrere) Flachstelle(n) verursacht wurden

4.2.3 Aerodynamische Geräusche vs. Rollgeräusche

Die Rollgeräusche des Rad-Schiene-Kontakts stellen nach Möhler (2011) im mittleren Geschwindigkeitsbereich zwischen 70 km/h und circa 300 km/h, bzw. nach Kwasnicki (1998) zwischen 80 km/h und 250 km/h, die wesentliche Schallquelle des Schienenverkehrs dar. Bei vielen der untersuchten Zugvorbeifahrten konnte allerdings schon bei deutlich niedrigeren Geschwindigkeiten ein signifikanter Anteil der Schallemission der aeroakustischen Geräusche am Pantografen beobachtet werden. Um diesen Zusammenhang anhand der vorliegenden Daten zu analysieren, sind in Abbildung 20 zum einen die Pegel der lautesten Quellen am Rad-Schiene-Kontakt und zum anderen (sofern als Quelle identifizierbar) die Pegel der lautesten Quellen an den Pantografen in Abhängigkeit von der Zuggeschwindigkeit für alle ausgewerteten Personenzüge aufgetragen. Zusammengehörige Werte sind durch gestrichelte schwarze Linien miteinander verbunden.

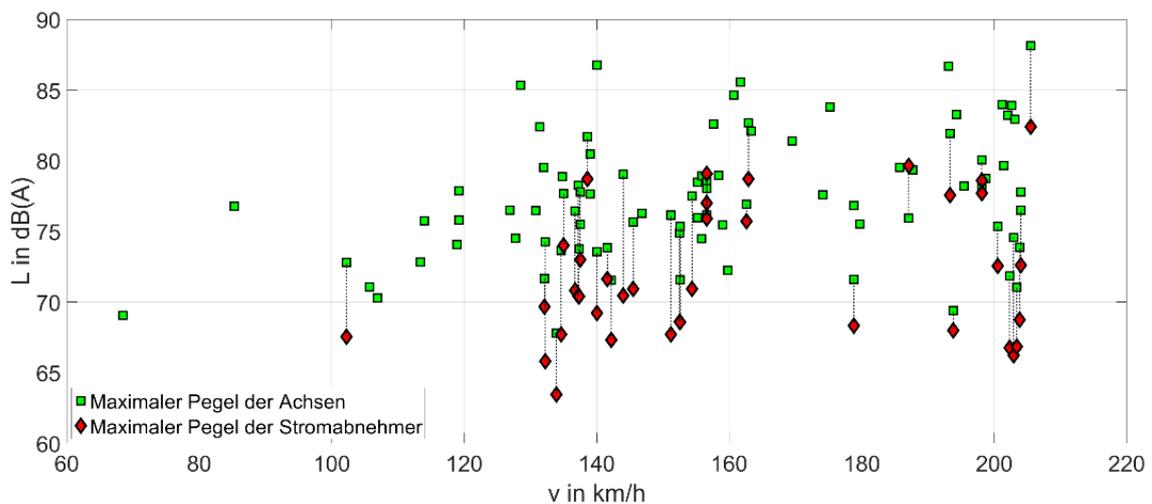


Abbildung 20: Maximaler (Beamforming-)Pegel von den Achsen sowie maximaler (Beamforming-)Pegel der Stromabnehmer (sofern als Quelle identifizierbar); schwarz gepunktete Linien markieren zusammengehörende Werte

Bis auf 3 Ausnahmen sind über den gesamten Geschwindigkeitsbereich die Rollgeräusche lauter als die aeroakustischen Geräusche am Pantografen. Schon bei 102,2 km/h konnte mittels Beamforming am Pantografen eine Schallquelle lokalisiert werden. Ab 130 km/h finden sich bei den meisten Zügen Schallquellen am Stromabnehmer. Prinzipiell wird eine Zunahme des Einflusses der aeroakustischen Geräusche mit der sechsten Potenz erwartet. Dieser Trend lässt sich im untersuchten Geschwindigkeitsbereich aufgrund der hohen Fremdgeräuschpegel nicht nachweisen.

Zur Analyse des Frequenzverhaltens sind in Abbildung 21 (oben) die aus den gebeamformten Zeitsignalen ermittelten Spektren der Quellen vom vorderen Pantografen sowie einer ähnlich lauten Achse eines ICEs dargestellt (Messung Nummer 71; Geschwindigkeit: 179 km/h). In beiden Fällen handelt es sich um in breitbandiges Rauschen. Zur Visualisierung der Unterschiede ist in Abbildung 21 (unten) die Differenz der beiden Spektren zu sehen. Alles oberhalb der 0 dB-Linie des Differenzspektrums entspricht einer lauterem Abstrahlung des Pantografens und alles unterhalb einer lauterem Abstrahlung der Achse. Bis etwa 600 Hz überwiegt das aeroakustische Geräusch am Pantografen (rote Kreise). Zwischen 600 Hz und 3,2 kHz sind beide Quellen bis auf zwei tonale Frequenzanteile bei 1,6 kHz und 2,7 kHz (dunkelblaue Kreise) ähnlich laut. Ab 3,2 kHz dominiert das Rollgeräusch. Es sei jedoch angemerkt, dass der Vergleich lediglich stichprobenartig einzelne Schallquellen eines Zuges umfasst. Für weiterführende Untersuchungen ist es empfehlenswert die Spektren mehrerer Achsen und mehrerer Pantografen unterschiedlicher Züge bei ähnlichen Geschwindigkeiten zu vergleichen.

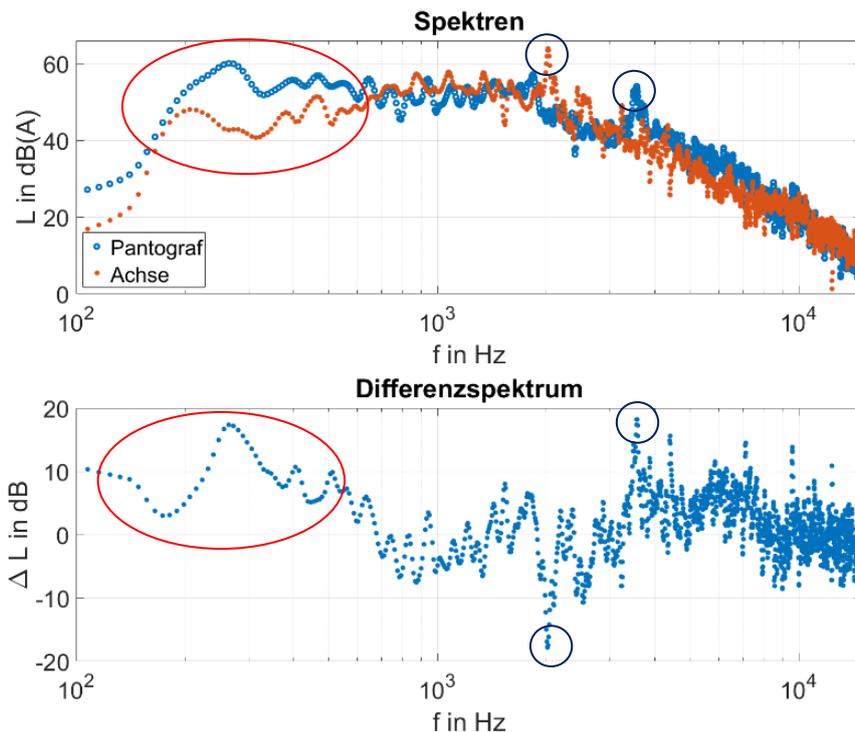


Abbildung 21: Oben: Spektrum der Quelle am Pantografen (bei $x = 190,9$ m) und der Quelle an einer ähnlich lauten Achse (bei $x = 74,6$ m) von Messung Nummer 71 (Fahrtrichtung von links nach rechts, mittlere Geschwindigkeit: $178,8$ km/h); unten: Differenz der Spektren

Neben dem Pantografen treten auch signifikante aeroakustische Geräusche an der Lok, bzw. am Triebwagen auf. In den Pass-By Auswertungen sind diese Geräusche vor allem bei Frequenzen unterhalb von 800 Hz zu finden. Abbildung 22 zeigt die Pass-By Auswertungen der Loks und Triebwagen der unterschiedlichen Personenzüge. Von links nach rechts sind jeweils ein DB Regio, eine Stadler KISS, ein IC2, ein IC und ein ICE dargestellt. Bis auf den ICE lassen sich bei allen Zügen Schallquellen vor der Lok identifizieren. Beim DB Regio gilt dies für die Terzbänder um 250 Hz und 315 Hz, bei der Stadler KISS für die Terzbänder 315 Hz bis 500 Hz und beim IC sowie beim IC2 für alle Terzbänder bis 500 Hz. Beim IC2 ist das Windgeräusch um 400 Hz besonders signifikant. Obwohl der ICE von den gezeigten Beispielen die höchste Geschwindigkeit aufweist, finden sich hier keine eindeutigen Hinweise auf aeroakustische Quellen. Vermutlich ist dies auf die strömungstechnische Optimierung der Form des ICEs zurückzuführen.

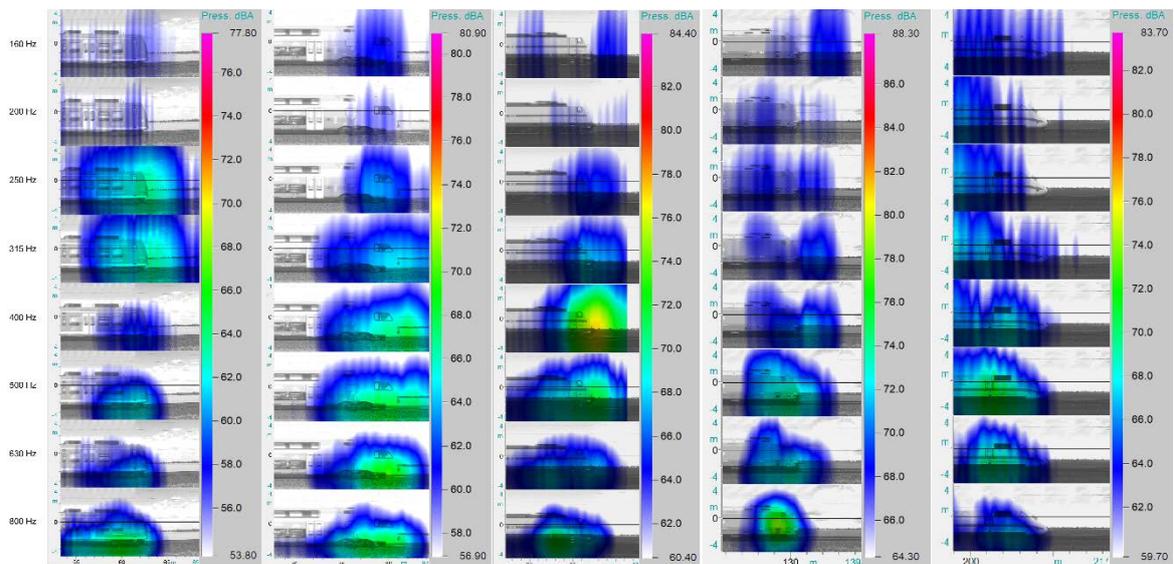


Abbildung 22: Geräusche am Triebwagen für die Terzbänder von 160 Hz bis 800 Hz für unterschiedliche Personenzüge (von links nach rechts: DB Regio aus Messung 115 mit 119 km/h; Stadler KISS aus Messung 89 mit 162 km/h; IC2 aus Messung 28 mit 163 km/h; IC aus Messung 41 mit 199 km/h; ICE aus Messung 57 mit 204 km/h); Fahrrichtung in allen Fällen von links nach rechts

4.3 Geräuschquellen an Personenzügen

4.3.1 Intercity-Express (ICE)

In Abbildung 23 sind die Pegelverläufe eines ICEs (Messung Nummer 71) dargestellt. Die Ergebnisse dieses Zuges sind repräsentativ für einen Großteil der ICE Messungen. Der Zug hatte eine durchschnittliche Geschwindigkeit von 169,5 km/h. Aus der konventionellen Pegelmessung wie auch aus den gebeamformten Pegeln geht hervor, dass die lautesten Schallemissionen von den beiden Triebwagen ausgehen. Der gemittelte Pegel über die Vorbeifahrt der einzelnen Triebwagen liegt bei 92,0 dB(A) für den mittleren und 91,6 dB(A) für den vorderen Triebwagen. Der mittlere Vorbeifahrtpegel der restlichen Wagen beträgt im Schnitt 88,6 dB(A).

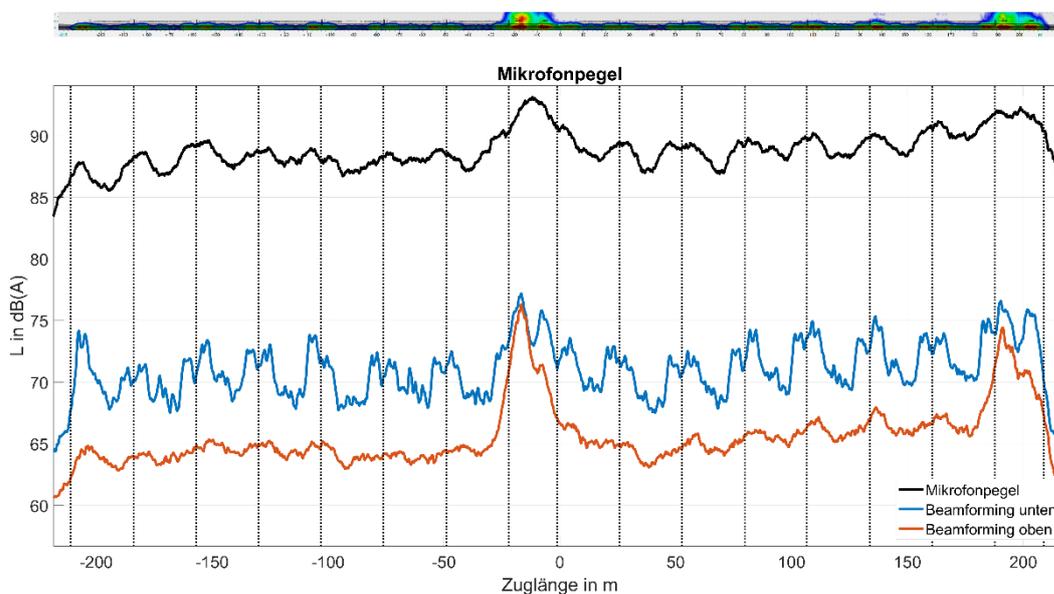


Abbildung 23: Vorbeifahrtpegel ICE aus Messung 071 (Fahrtrichtung von links nach rechts, mittlere Geschwindigkeit: 178,8 km/h)

Die gebeamformten Pegel des unteren Zugbereiches zeigen deutlich die einzelnen Achsen des Zuges. Bei den gebeamformten Pegeln des oberen Zugbereiches sind zwei Ausschläge bei den Triebwagen in Höhe der Pantografen zu erkennen, wobei sich aus der Darstellung der Einfluss des Stromabnehmers aufgrund des Übersprechens nicht von den Antriebsgeräuschen des Triebwagens separieren lässt.

Abbildung 24 zeigt die Ausschnitte der Pass-By Auswertung der beiden Triebwagen und den benachbarten Waggons über den gesamten Frequenzbereich. Beim vorderen Triebwagen ist der Pantograf eindeutig als Quelle zu identifizieren. Beim Triebwagen in der Mitte des Zuges zeigt die Auswertung zudem eine Schallquelle vor dem Stromabnehmer. Hierbei handelt es sich möglicherweise um ein Lüftergeräusch. Weiterhin ergibt sich aus den Pegeldarstellungen wie auch aus der Pass-By Auswertung, dass die Achsen an beiden Triebwagen lauter sind (hier durchschnittlich um 1 dB(A)), als bei den übrigen Waggons. Dieser Effekt kann tendenziell bei allen ICEs beobachtet werden. Für eine detaillierte Auswertung dieses Effektes sind weitergehenden statistische Analysen der Messungen empfehlenswert.

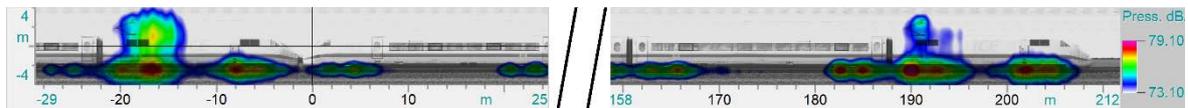


Abbildung 24: Pass-By Ausschnitte des ICEs aus Messung 71 (Fahrrichtung von links nach rechts, mittlere Geschwindigkeit: 178,8 km/h) mit den beiden Triebwagen

Abbildung 25 zeigt die Pass-By Auswertung des Triebwagens und der ersten vier Waggons des bisher diskutierten ICEs für die Terzbänder von 160 Hz bis 4 kHz. Es ist auf den ersten Blick zu erkennen, dass die lautesten Emissionen vom Rollgeräusch im Terzband um 1250 Hz stammen. Insgesamt sind die Rollgeräusche von 1 kHz bis 2,5 kHz dominant. Die Schallemissionen vom Pantografen sind in den Terzbändern von 800 Hz bis 2 kHz sowie im 4 kHz Terzband zu beobachten. Oberhalb von 4 kHz sind mit dem gewählten Dynamikbereich keine Quellen mehr sichtbar weswegen von einer Darstellung abgesehen wird. Weiterhin sind Quellen im Frequenzbereich zwischen 160 Hz und 500 Hz zu beobachten, die sich weder dem Pantografen noch den Rollgeräuschen zuordnen lassen. Hierbei handelt es sich mutmaßlich um die Antriebsgeräusche des Triebwagens.

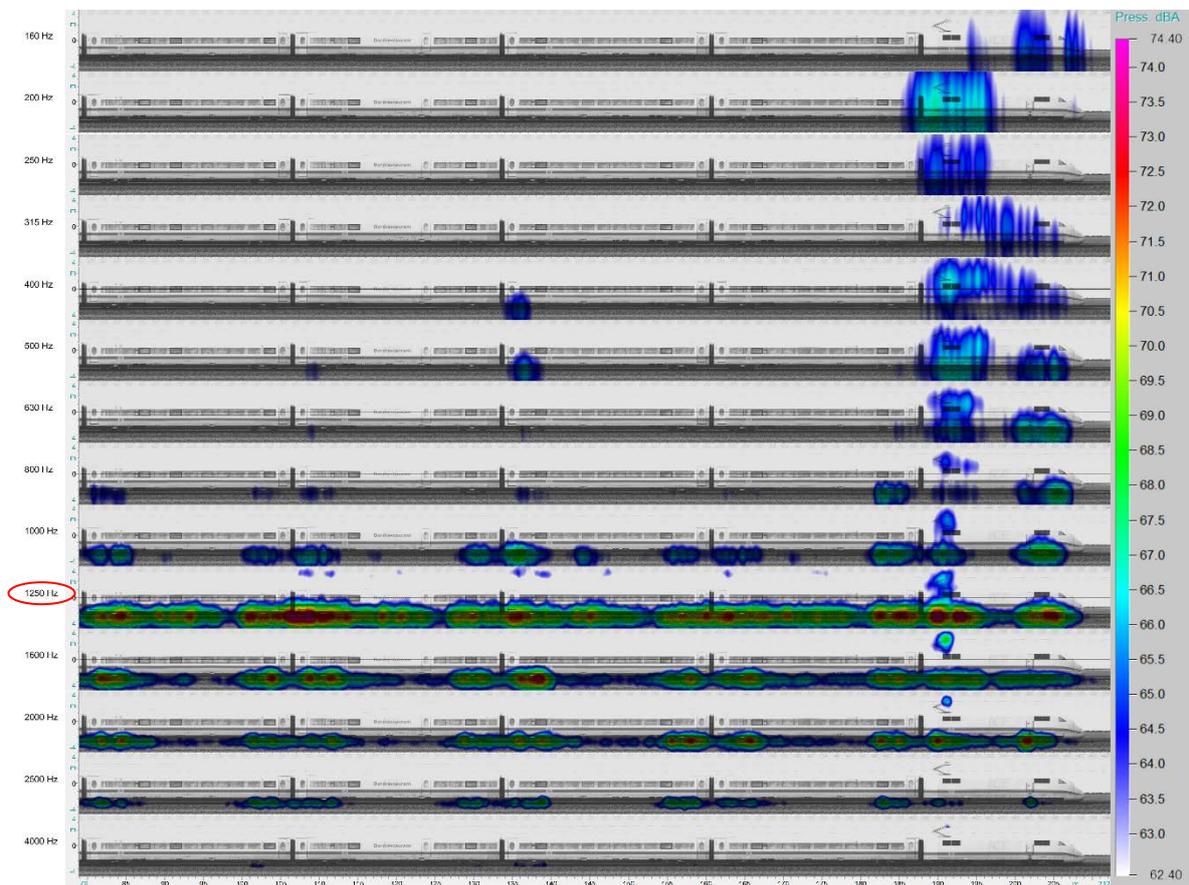


Abbildung 25: Pass-By Auswertung für die einzelnen Terzbänder ICE (Teil) Messung 71 (Fahrrichtung von links nach rechts, mittlere Geschwindigkeit: 178,8 km/h)

4.3.2 Intercity (IC)

Die Ergebnisse von den IC Zügen werden repräsentativ am Beispiel der Messung 137 diskutiert. Abbildung 26 zeigt die Pegeldarstellung. Wie zuvor beim ICE beobachtet wurde, werden die höchsten Pegel von der Lokomotive emittiert. Im Vergleich zu den ICEs fällt die Pegeldifferenz zwischen Lok und Waggons höher

aus. Während der mittlere Vorbeifahrtpegel der Lokomotive bei 91,3 dB(A) liegt, betragen die Vorbeifahrtpegel der einzelnen Reisezugwagen im Schnitt nur 87,6 dB(A). Der deutliche Pegelunterschied zwischen Lok und Reisezugwagen ist wahrscheinlich zum einen auf die bezüglich der Aeroakustik nicht optimale Form der Lok und zum anderen auf lautere Antriebsgeräusche zurück zu führen.

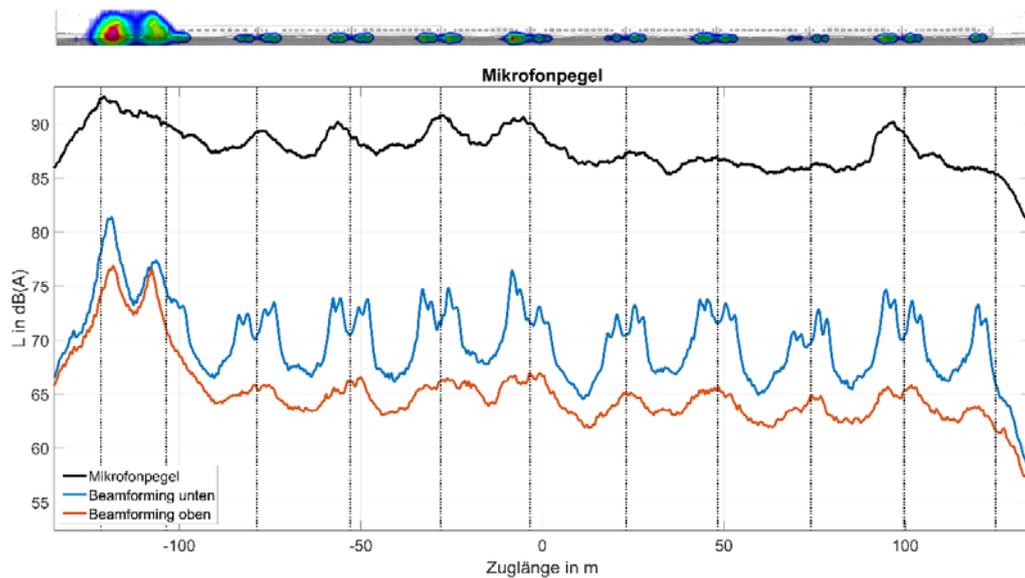


Abbildung 26: Vorbeifahrtpegel eines IC1 (Messung 137; Fahrtrichtung von rechts nach links, mittlere Geschwindigkeit: 169,5 km/h)

Zur weiterführenden Analyse ist in Abbildung 27 eine detaillierte Pass-By Auswertung der Lokomotive und des ersten Waggons dargestellt. Zur eindeutigen Diskussion sind die Quellen gekennzeichnet und nummeriert. Die Schallemissionen an der Lokomotive treten am vorderen Drittel der Lok (Quelle 1) mit einer maximalen Amplitude von 82,9 dB(A) sowie am hinteren Teil der Lok (Quelle 2) mit einer maximalen Amplitude von 79,5 dB(A) auf und lassen sich mutmaßlich auf Antriebsgeräusche zurückführen. Zudem spielen bei der Geschwindigkeit dieses ICs von 170 km/h auch aeroakustische Geräusche eine Rolle was sich an einer deutlich sichtbaren Quelle am Pantografen mit einer maximalen Amplitude von 79,5 dB(A) widerspiegelt (Quelle 3). Die Schallemissionen der Achsen der Waggons (Quellen 4) fallen mit durchschnittlich 76,5 dB(A) vergleichsweise geringer aus als die der Quellen an der Lokomotive.

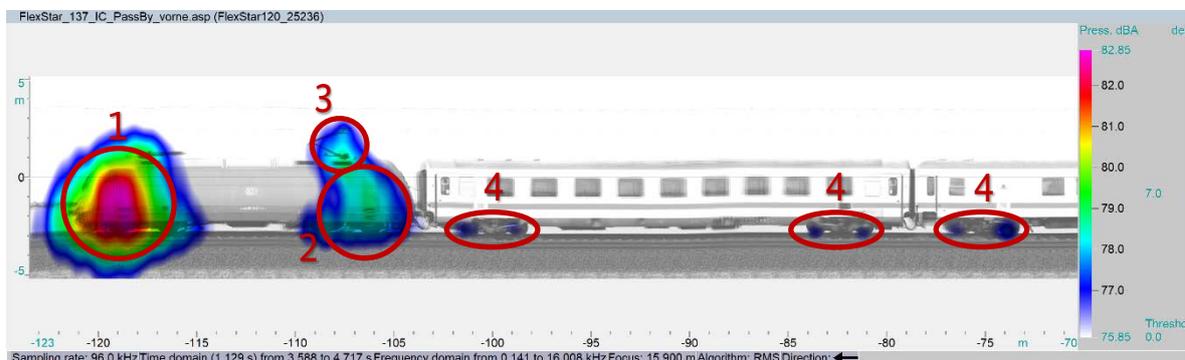


Abbildung 27: Pass-By Auswertung der Lokomotive und des ersten Waggons des IC1 aus Messung 137 (Fahrtrichtung von rechts nach links, mittlere Geschwindigkeit: 169,5 km/h)

Für eine qualitative Beurteilung der unterschiedlichen Quellmechanismen (aerodynamischen Geräusche, Rollgeräusche, Antriebsgeräusche) ist eine frequenzspezifische Betrachtung der Quellen angebracht. Abbildung 28 zeigt die akustischen Quellen des diskutierten ICs aufgeteilt auf die Terzbänder zwischen 315 Hz und 5,0 kHz mit einer festen Dynamik von 24 dB. In den Terzbändern 315 Hz und 400 Hz befinden sich die dominanten Schallquellen am vorderen Teil der Lokomotive, was auf einen merklichen Einfluss der aeroakustischen Geräusche schließen lässt. Ab 500 Hz werden die Quellen zunehmend an der Lokomotive lokalisiert. Insbesondere im Frequenzbereich zwischen 800 Hz und 1,25 kHz bestimmen die Antriebsgeräusche den Pegel. Oberhalb von 1,25 kHz lassen sich Schallemissionen am Pantografen identifizieren. Ab 1,6 kHz ist am vorderen, eingeklappten Pantografen eine Quelle zu beobachten. Die Rollgeräusche der Achsen sind vor allem in den Terzbändern von 1,0 kHz bis 2,5 kHz dominant.

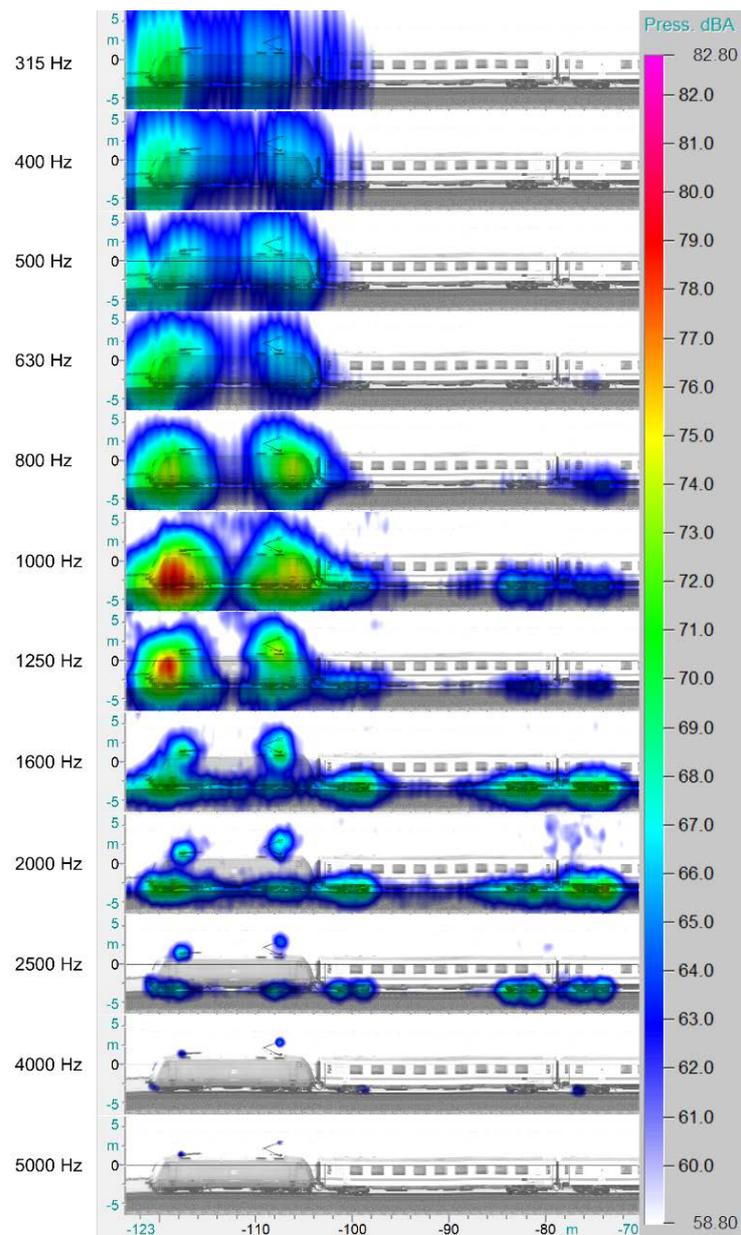


Abbildung 28: Quelldarstellung aufgeteilt auf die einzelnen Terzbänder IC Messung 137 (Fahrrichtung von rechts nach links, mittlere Geschwindigkeit: 169,5 km/h)

Für eine Reduzierung der Schallimmissionen der ICs, ist der Fokus auf die Lokomotive als lauteste Quelle zu richten. Die aeroakustischen Quellen am eingeklappten Pantografen können möglicherweise durch Modifikation oder Designänderungen reduziert werden.

4.3.3 Intercity 2 (IC2)

Abbildung 29 zeigt exemplarisch den Vorbeifahrtpegel eines IC2 (Messung 148). Bei dieser Messung dominieren die Rollgeräusche. Die Rollgeräusche der Achsen der einzelnen Reisezugwagen $L_{p,Beam,unten}$ weisen mit durchschnittlich 70,5 dB(A) vergleichbare Pegel auf, während die Achsen an der Lokomotive mit 75,5 bzw. 75,9 dB(A) mehr als 5 dB lauter sind. Es ist zwar der Fall, dass aufgrund der zu niedrigen Frequenzen zunehmenden Hauptkeulenbreite in diesen Pegelwerten auch tieffrequente Anteile der Antriebsgeräusche der Lokomotive enthalten sind. Allerdings zeigt ebenfalls der Blick auf die Oktavbänder um 1,0 kHz wie auch um 4,0 kHz in Abbildung 30 eine, verglichen mit den übrigen Achsen, deutlich höhere Schallemissionen der Achsen an der Lok.

Neben den Rollgeräuschen lassen sich bei dieser Messung auch aeroakustischen Geräusche am Steuerwagen sowie die Antriebsgeräusche der Lokomotive lokalisieren. Im Vergleich zu den vorherigen Beispielen ist ihr Beitrag am Gesamtpegel allerdings gering.

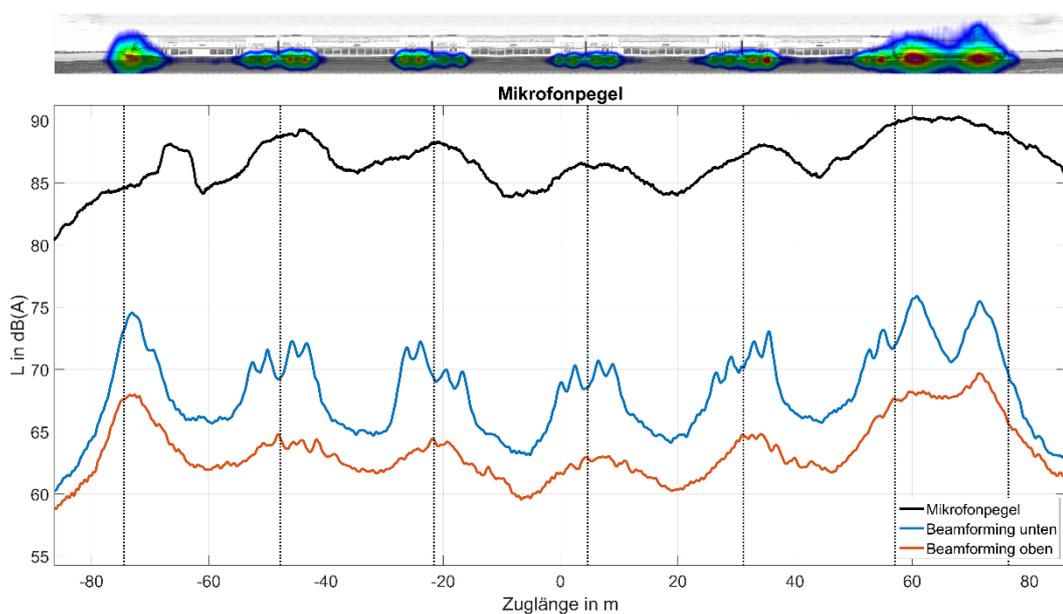


Abbildung 29: Vorbeifahrtpegel eines IC2 (Messung 148; Fahrtrichtung von rechts nach links, mittlere Geschwindigkeit: 154,4 km/h)

Bei der Zugvorbeifahrt des betrachteten IC2s befindet sich die Lokomotive am Ende und der Steuerwagen am Anfang des Zuges (Fahrtrichtung von rechts nach links). In der Darstellung der akustischen Karten unterteilt in die einzelnen Oktaven (Abbildung 30) ist gut zu erkennen, dass das aeroakustische Fahrtgeräusch am Steuerwagen besonders bei tieferen Frequenzen unterhalb 1 kHz dominant ist. Die Rollgeräusche sind bei diesem Zug zwischen 800 Hz und 4 kHz vorherrschend. Im 500 Hz Oktavband sind zudem signifikante Schallemissionen von der Lokomotive zu beobachten, die offenbar auf die Antriebsgeräusche zurückzuführen sind.

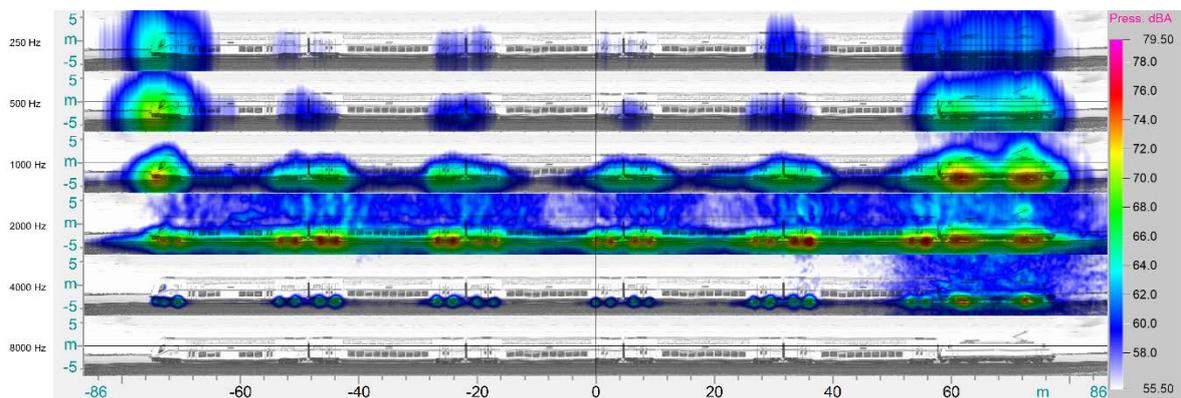


Abbildung 30: Quellendarstellung aufgeteilt auf die einzelnen Oktavbänder IC2 Messung 148 (Fahrtrichtung von rechts nach links, mittlere Geschwindigkeit: 154,4 km/h)

Die schalltechnischen Ergebnisse für die weiteren untersuchten IC2 Züge sind mit dem präsentierten Beispiel vergleichbar. Als Auffälligkeit wird an dieser Stelle jedoch noch Messung 128 diskutiert. Dieser IC2 hatte mit durchschnittlich 69 km/h die geringste Geschwindigkeit aller Personenzüge. Tatsächlich befand sich der Zug während der Vorbeifahrt im Bremsvorgang. Es kann in der Oktavbanddarstellung in Abbildung 31 beobachtet werden, dass sich der pegeldominierende Frequenzbereich nach unten verschiebt. Die Schallemission im Oktavband bei 500 Hz ist hier vorherrschend, wohingegen beim IC2 aus Messung 148 in Abbildung 30 die Schallemissionen in den Oktavbändern bei 1 und 2 kHz überwiegen. Die Verschiebung der maßgeblichen Schallemission zu tieferen Frequenzen dürfte in diesem Fall auf die insgesamt niedrigere Geschwindigkeit zurückzuführen sein.

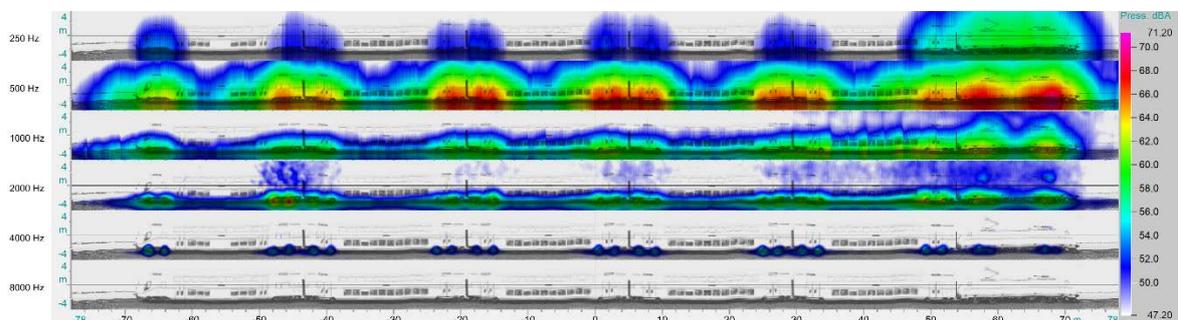


Abbildung 31: Pass-By Auswertung für unterschiedliche Oktavbänder eines sich im Bremsvorgang befindlichen IC2 Zuges (mittlere Geschwindigkeit: 68,5 km/h; Fahrtrichtung von links nach rechts)

4.3.4 DB Regio Baureihe 423/424

Abbildung 32 zeigt die Pegeldarstellung einer repräsentativen Vorbeifahrtmessung (Messung 102) eines DB Regio (Fahrtrichtung von links nach rechts). Die hier beobachteten Quellen lassen sich den einzelnen Achsen zuordnen und sind bei allen Wagen vergleichbar. Bei der Vorbeifahrtgeschwindigkeit von 119 km/h ist der Einfluss aeroakustischer Geräusche auf die Gesamtemission gering. Lediglich am vorderen Pantografen ist in diesem Beispiel eine Schallquelle identifizierbar, die allerdings um fast 12 dB leiser als das Rollgeräusch ist.

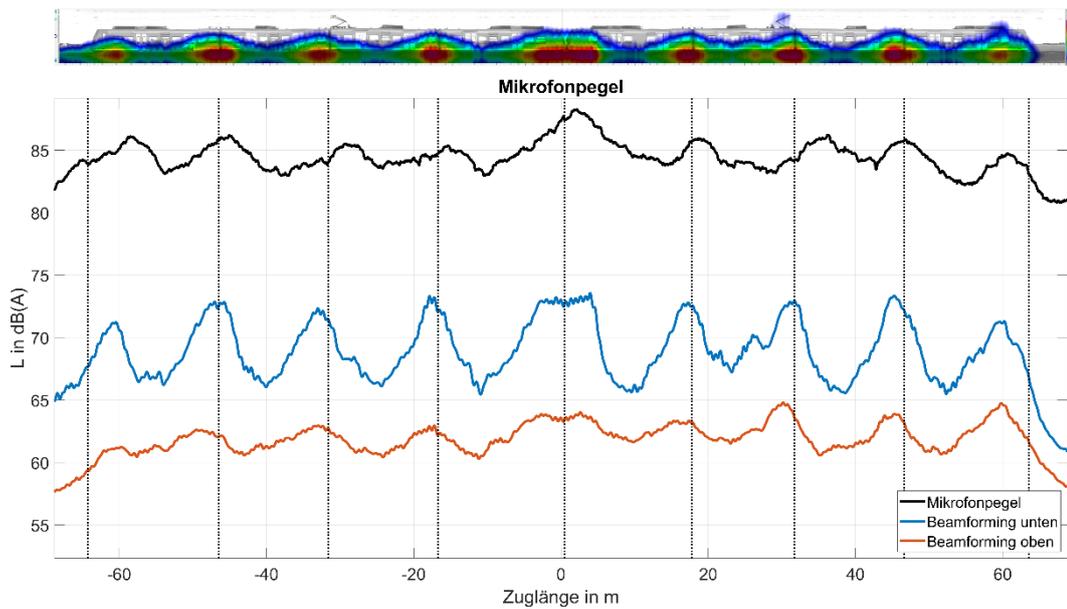


Abbildung 32: Vorbeifahrtpegel einer DB Regio (Messung 102; Fahrtrichtung von links nach rechts; mittlere Geschwindigkeit: 118,9 km/h)

4.3.5 Stadler KISS

Abbildung 33 zeigt beispielhaft die Pegeldarstellung der Zugvorbeifahrt Nummer 132 einer Stadler KISS mit 142 km/h. Die Ergebnisse sind prinzipiell vergleichbar, mit denen der DB Regio: die lautesten Quellen sind an den einzelnen Achsen zu finden, wobei die aeroakustische Quelle am Pantografen ebenfalls einen hörbaren Einfluss auf die Gesamtemission hat. Zudem ist am Pass-By Bild im oberen Teil von Abbildung 33 eine ausgedehntere Quelle zu erkennen, was auf die Windgeräusche und ggf. auf Antriebsgeräusche des Triebwagens zurückzuführen ist.

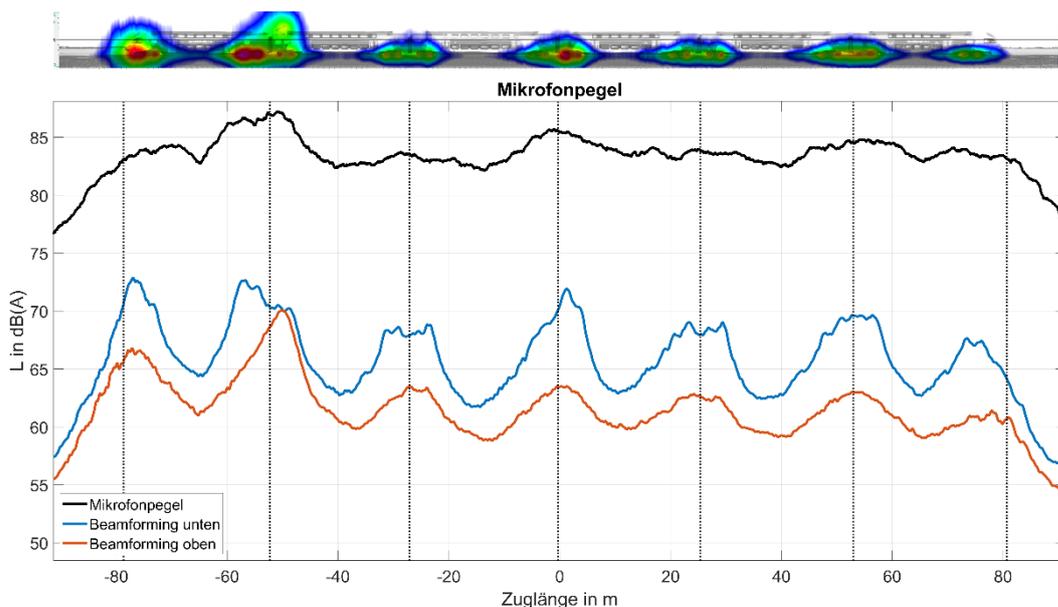


Abbildung 33: Vorbeifahrtpegel einer Stadler KISS (Messung 132; Fahrtrichtung von rechts nach links; mittlere Geschwindigkeit: 141,6 km/h)

Prinzipiell verhalten sich alle untersuchten Personenzüge ähnlich. Die lautesten Emissionen finden im Frequenzbereich zwischen 800 Hz und 2 kHz statt. Bei den beobachteten Geschwindigkeiten sind bei allen Messungen die Rollgeräusche dominant. Aeroakustische Schallemissionen am Pantografen und an den Triebwagen können jedoch ebenfalls schon bei Geschwindigkeiten ab 130 km/h beobachtet werden.

4.4 Geräuschquellen an Güterzügen

Es wurden bei den durchgeführten Messkampagnen 48 Güterzüge mit insgesamt 1770 Waggons erfasst. Durch die extreme Heterogenität der einzelnen Züge (Waggon-Typen, Beladungszustände, Bremstypen, Geschwindigkeiten) treten eine Vielzahl akustischer Phänomene auf. Die folgenden Beispiele stellen eine Auswahl der interessanten Effekte dar.

4.4.1 Akustisch homogene Güterzüge

Zunächst werden zwei Beispiele von Güterzügen diskutiert, bei denen zwischen den einzelnen Waggons nur geringe akustische Unterschiede festzustellen sind. Abbildung 34 zeigt die Quellen der ersten Wagen des Güterzuges aus Messung 81 für die Oktavbänder von 250 Hz bis 4,0 kHz. In diesem Fall handelt es sich bei einem Gesamtvorbeifahrtpegel von 80,6 dB(A) um die zweitleiseste Güterzugmessung. In der Abbildung sind vor allem die einzelnen Achsen an den Waggons sowie die Antriebsgeräusche der Lok zu sehen.

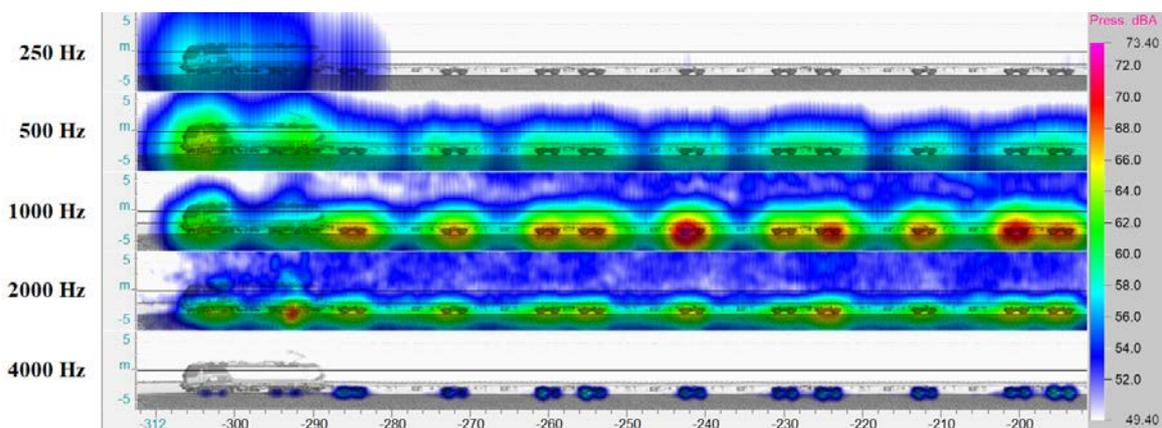


Abbildung 34: Schallquellen für die einzelnen Oktavbänder des Güterzuges aus Messung 81 (zweitleisester Güterzug, alle Wagen ähnlich laut; Fahrtrichtung von rechts nach links; mittlere Geschwindigkeit: 93,0 km/h)

In Abbildung 35 sind die Quellen der ersten Wagen des Güterzuges aus Messung 47 für unterschiedliche Oktavbänder dargestellt. Der Zug besteht ausschließlich aus FCS-Schüttwagen. Mit einem mittleren Vorbeifahrtpegel von 99,3 dB(A) handelt es sich um den zweitlautesten Zug beider Messkampagnen. Die dominanten Schallquellen lassen sich in den Oktavbändern zwischen 500 Hz und 4 kHz den einzelnen Achsen des Zuges zuordnen. Die Abbildung ist qualitativ mit Abbildung 34 vergleichbar mit dem Unterschied deutlich geringerer Schallemissionen der Lokomotive.

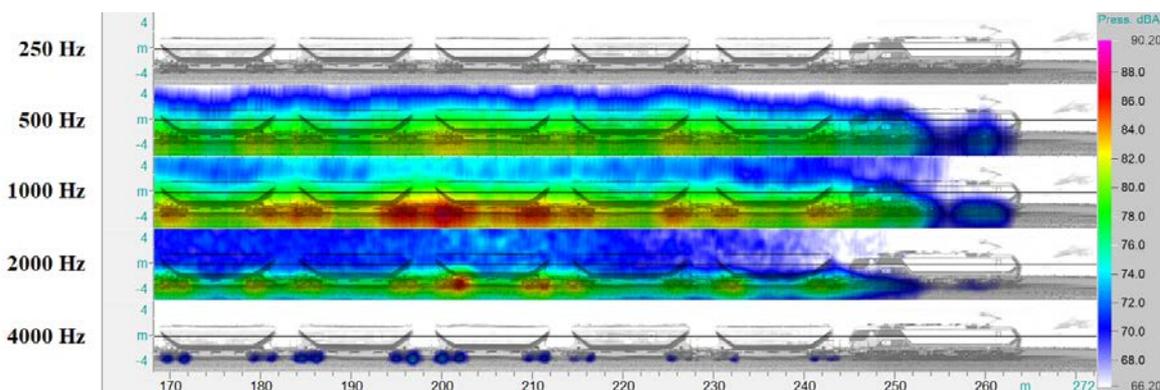


Abbildung 35: Schallquellen für die einzelnen Oktavbänder des Güterzuges aus Messung 47 (zweitlautester Zug; alle Wagen ähnlich laut; Fahrtrichtung von links nach rechts; mittlere Geschwindigkeit: 96,8 km/h)

Abbildung 36 zeigt das aus allen Mikrofondaten (FlexStar120) gemittelte Spektrum der gesamten Vorbeifahrt des Zuges aus Abbildung 35 (Messung 47). Der Bereich, innerhalb dessen die Amplitude um weniger als 12 dB gegenüber dem Maximum abgefallen ist (das entspricht 99,3% der gesamten Schallemission bezogen auf die gesamte Vorbeifahrt), erstreckt sich von 420 Hz bis 2,14 kHz. Bei diesem Spektrum sind vor allem die deutlichen Pegelspitzen bei hohen Frequenzen ungewöhnlich.

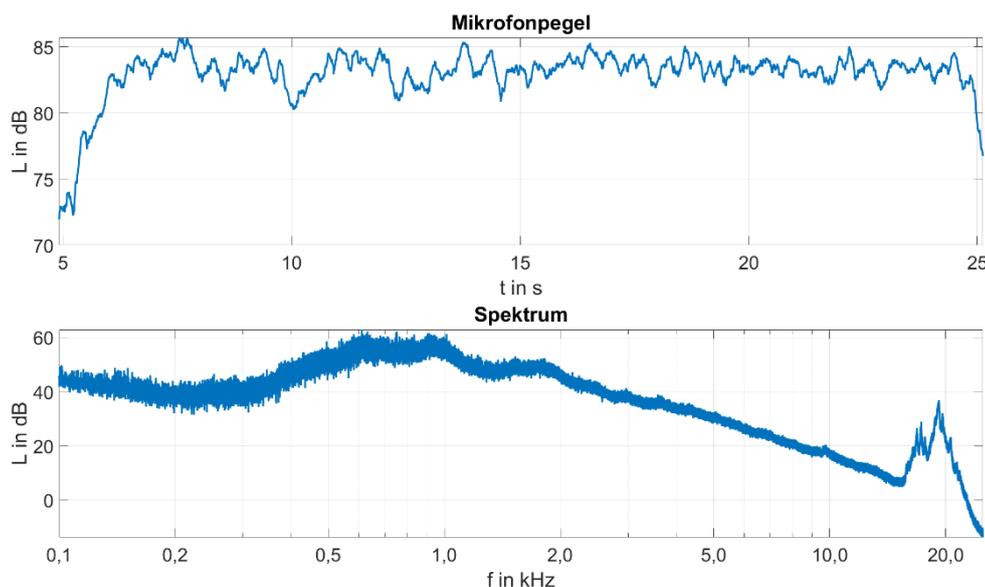


Abbildung 36: Mittelwert der Einhüllenden aller Mikrofone (oben) und Mittelwert der Spektren aller Mikrofone (unten) des Arrays FlexStar120 von Messung Nummer 47 (Fahrtrichtung von links nach rechts; mittlere Geschwindigkeit: 96,8 km/h)

4.4.2 Hochfrequente Schallemission an einer Achse

Auffällig in dem in Abbildung 36 gezeigten Spektrum ist die Frequenzkomponente zwischen 15 und 22 kHz. Für eine bessere Darstellung dieser Anomalie wurde hier auf die A-Bewertung verzichtet. Dieser Frequenzanteil lässt sich örtlich einer Achse von Waggon Nummer 13 zuordnen. Abbildung 37 zeigt die Schallquelle. Innerhalb des Frequenzbereiches von 14,7 - 22,4 kHz beträgt der Pegel dieser Komponente (über die Dauer von 60 ms der Vorbeifahrt) 94,4 dB während der Gesamtpegel 100,6 dB beträgt. Aufgrund

der hohen Frequenzen trägt diese Komponente zwar nicht signifikant zum A-bewerteten Schalldruckpegel bei, die Ursache dieser Schallemission könnte allerdings Hinweis auf einen bereits bestehenden oder sich anbahnenden Schaden sein.

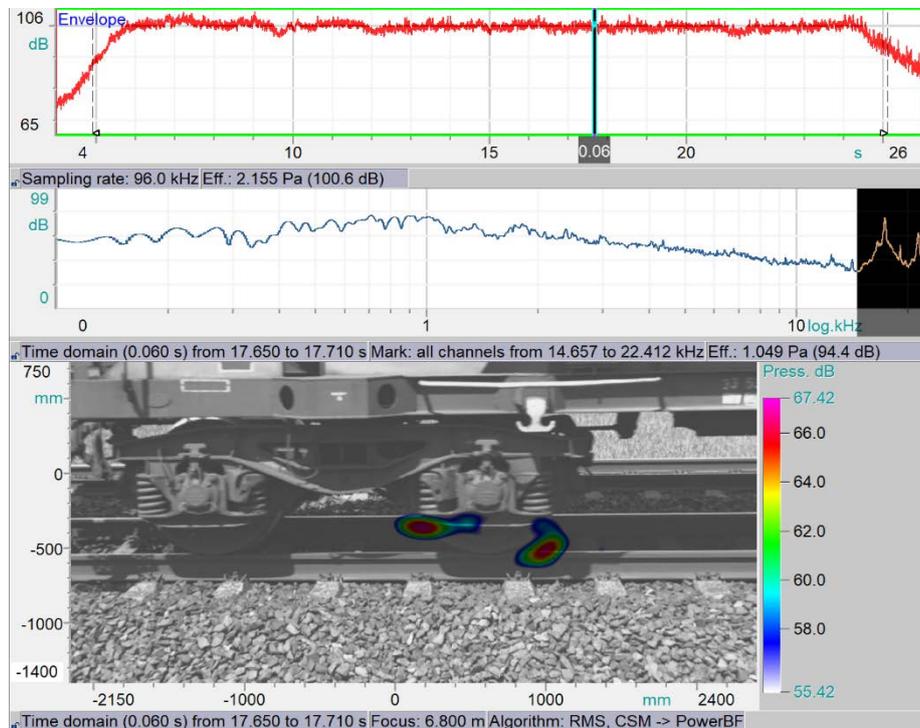


Abbildung 37: Hochfrequente Quelle an der Achse eines Waggons des Zuges aus Messung Nummer 47 (Fahrtrichtung von links nach rechts; mittlere Geschwindigkeit: 96,8 km/h) ausgewertet mit dem Fibonacci Array

4.4.3 Tieffrequente Schallemission an einem Waggon

Bei mehreren Güterzügen wurden an einzelnen Waggons deutlich hervortretende tieffrequente Schallkomponenten beobachtet. Eine Detailbetrachtung einer derartigen Auffälligkeit aus Messung 98 ist in Abbildung 38 dargestellt. Hier zeigen sich Schallemissionen an der Außenwand eines Kesselwagens im Frequenzbereich zwischen 26 und 404 Hz (Quellen 1.1 und 1.2). Die periodisch wiederkehrenden Transienten im Zeitsignal (oben links, dargestellt als Einhüllende mit einer Integrationszeit von 30 ms) deuten auf eine Flachstelle hin. Diese Flachstelle scheint sich an der linken Achse des Drehgestells rechts im akustischen Foto zu befinden (Quelle 2). Die Flachstelle könnte in diesem Fall eine breitbandige Anregung von Eigenfrequenzen in der Kesselwand verursachen, die zu der tieffrequenten Schallemission führt. Bei der Schallquelle auf dem Schotterbett (Quelle 3) handelt es sich um eine Reflexion.

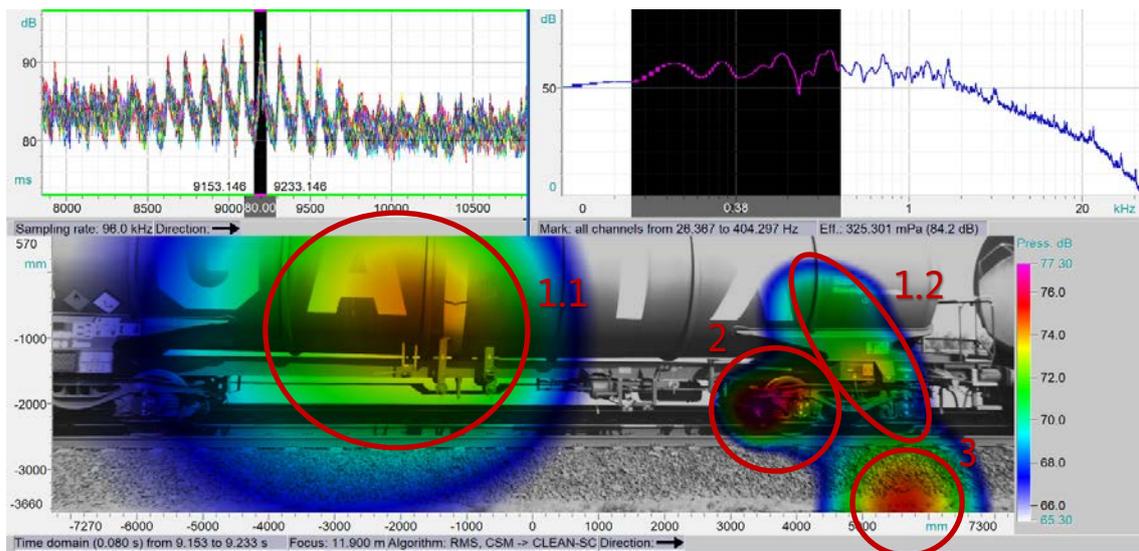


Abbildung 38: Tieffrequente Abstrahlung von der Wagenwand und von der Achse; Quelle am Gleisbett vermutlich Reflexion (Messung 98; Fahrtrichtung von links nach rechts; Geschwindigkeit: 88,1 km/h)

4.4.4 Vergleich unterschiedlicher Bremstypen

Die Bundesregierung strebt bis zum Jahr 2020 eine Reduzierung des Schienenverkehrslärms um 10 dB(A) an, ausgehend vom Jahr 2008. Als eine der lautesten Schallquellen im Schienenverkehr gelten mit Graugusssohlen gebremste Achsen. Die Umrüstung der bestehenden Güterwagenflotten von Graugussbremssohlen auf emissionsreduzierende Verbundstoffbremssohlen ist somit die wesentliche Maßnahme um das Ziel der Lärmreduzierung zu erreichen.

Der Pegelunterschied zwischen mit Graugusssohlen gebremsten Achsen und mit Kompositsohlen gebremsten Achsen lässt sich mit der akustischen Kamera sehr gut visualisieren. So zeigen die aus dem Beamforming ermittelten Pegel von Messung 43 in Abbildung 39 einen Unterschied von bis zu 23 dB(A) zwischen der lautesten und der leisesten Achse.

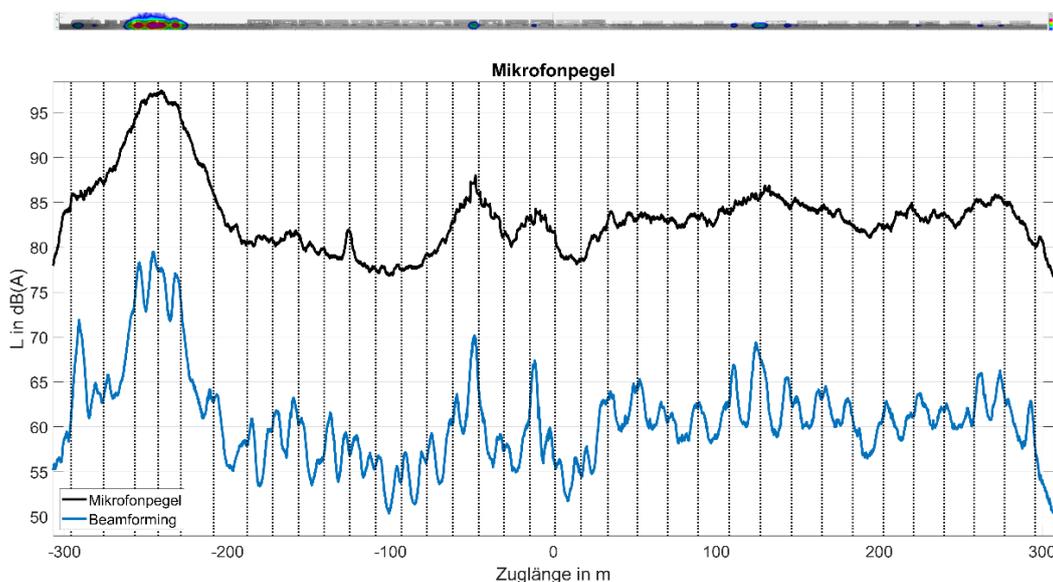


Abbildung 39: Vorbeifahrtpegel eines Güterzuges (Messung 43; Fahrtrichtung von rechts nach links; Geschwindigkeit: 92,5 km/h)

Besonders informativ ist in diesem Zusammenhang neben der Pegelreduktion vor allem der spektrale Unterschied zwischen den beiden Bremstypen. Nach dem Vergleich der Pass-By Bilder der Güterzüge aus den Messungen 47 und 81 in Abbildung 35 und Abbildung 38 zeigt sich anhand der Schallemissionen der einzelnen Oktavbänder kein signifikanter Unterschied der Frequenzcharakteristik zwischen den Achsen eines lauten und eines leisen Zuges. Durch die unterschiedlichen Geschwindigkeiten der Züge sind die Ergebnisse allerdings nur bedingt vergleichbar. Für die Betrachtung der spektralen Unterschiede zwischen einer grauguss- und einer kompositgebremsten Achse ist es daher sinnvoll, zwei Achsen desselben Zuges zu untersuchen. Dazu sind in Abbildung 40 die Spektren einer sehr leisen und der lautesten Achse aus Messung 43 dargestellt. Es wird davon ausgegangen, dass es die laute Achse mit Graugusssohlen und die leisere Achse mit Kompositsohlen bestückt ist. Die laute Achse weist in der gebeamformten akustischen Karte einen Pegel von 85,5 dB(A) auf, während die leise Achse mit 63,9 dB(A) um 21,6 dB leiser ist. Es ist zu sehen, dass bei der lauten Achse die Schallemission von 300 Hz an zunimmt. Im Frequenzbereich zwischen 500 Hz und 2 kHz treten die höchsten Schallemissionen auf. Bei der leiseren Achse hingegen ist zu erkennen, dass das Spektrum zwischen 200 Hz und 2 kHz deutlich flacher ist.

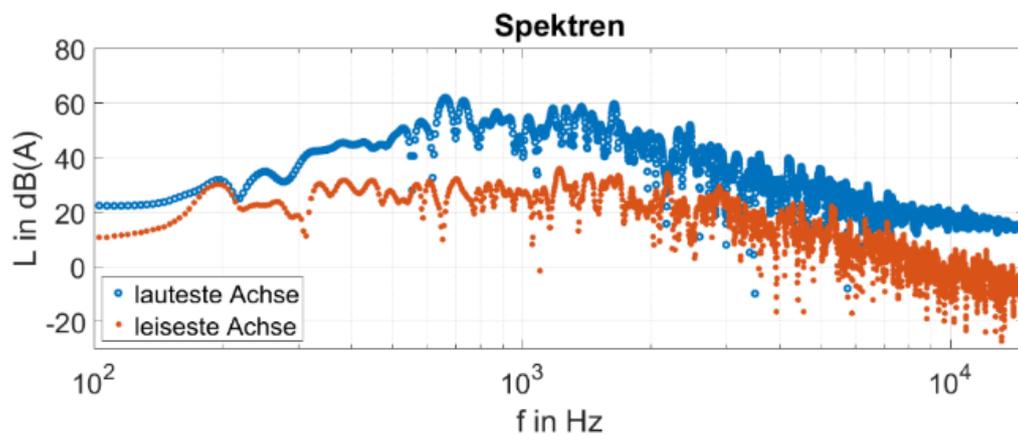


Abbildung 40: Spektren der lautesten (bei $x = -245,7$ m) und der leiseren Achse (bei $x = -91,1$ m) des Güterzuges aus Messung 43 (Fahrrichtung von rechts nach links; mittlere Geschwindigkeit: 92,5 km/h)

5 Zusammenfassung

Am 07.05.2019 und 10.09.2019 wurden insgesamt 157 Zugvorbeifahrten an der Hauptstrecke 1700 bei Streckenkilometer 37,8 mit akustischen Kameras messtechnisch erfasst. Die Vorbeifahrten umfassten dabei diverse Güter-, Nah- und Fernverkehrszüge. Ziel dieser Messungen war es, als Ergänzung zum Lärm-Monitoring des EBA, die typischen Schallentstehungsorte im Zugverkehr zu überprüfen und grafisch darzustellen. Dabei kamen zwei Spiralarrays der Firma gfai tech mit jeweils 120 Mikrofonen zum Einsatz. Ein Array mit einem Durchmesser von 3,4 m diente zur Erfassung der Züge als Ganzes, das zweite Array mit einem Durchmesser von 95 cm Fibonacci120 (Durchmesser: 95 cm), welches auf den Rad-Schiene Kontakt ausgerichtet war, wurde für Detailauswertungen verwendet.

Den Kern der Auswertungen bildet der Pass-By Algorithmus der gfai tech (vgl. Abschnitt 3.3). Er ermöglicht eine Darstellung der vom DOPPLER-Effekt kompensierten Schallquellen einer Zugvorbeifahrt in einem Bild. Die vertikale Anordnung verschiedener Pass-By Bilder für die einzelnen Terz- bzw. Oktavbänder ergibt eine frequenzabhängige Veranschaulichung der jeweils dominanten Schallquellen auf einen Blick.

Weiterhin wurde eine neue Pegeldarstellung eingeführt. Sie ermöglicht die Gegenüberstellung der üblichen Vorbeifahrtpegel, wie sie nach DIN EN ISO 3095 ermittelt werden, mit gebeamformten Pegeln. Die gebeamformten Pegel berechnen sich durch die Mittelung der Pegelwerte der aus der Pass-By Auswertung gewonnenen akustischen Karte entlang der y-Achse für alle Ortskoordinaten x des Zuges. Eine Unterteilung der akustischen Karte in unten und oben ermöglicht zudem eine gezielte Unterscheidung zwischen den Rollgeräuschen und den aeroakustischen Geräuschen beispielsweise an den Pantografen. Der große Vorteil dieser Darstellung ist, dass die Pegel der einzelnen Achsen quantitativ bestimmt werden können. Während sich aus den konventionellen Vorbeifahrtpegeln nur ungefähre Aussagen darüber ableiten lassen, welche Wagen besonders laut / leise sind, ermöglichen die Pegel aus dem Beamforming eine quantitative Aussage über den Emissionspegel der einzelnen Achsen.

Für 146 der 157 gemessenen Zugvorbeifahrten wurden die beschriebenen Pegeldarstellungen sowie die akustischen Vorbeifahrtbilder für alle relevanten Terz- und Oktavbänder bei unterschiedlichen Dynamiken erstellt.

In diesem Bericht wurden diverse Aspekte von Schienenverkehrsgeräuschen diskutiert. Prinzipiell kann festgehalten werden, dass die dominierende Schallquelle beim Zugverkehr erwartungsgemäß auf den Rad-Schiene-Kontakt zurückzuführen ist. Das größte Potential zur Reduzierung der Schallemissionen im Zugverkehr bietet daher die bereits laufende Umrüstung der bestehenden Güterwagenflotten auf emissionsreduzierende Verbundstoffbremssohlen. So waren unter den gemessenen Güterzügen Beispiele zu finden, mit Pegeldifferenzen von bis zu 20 dB(A) zwischen verschiedenen Achsen, was auf die unterschiedlichen Bremstypen zurückgeführt wird.

Die in diesem Bericht diskutierten Ergebnisse umfassen:

- **Die Schallemission am Rad-Schiene Kontakt** – Die Komponenten des Rad-Schiene Kontaktes wurden analysiert. Im relevanten Frequenzbereich bis 4 kHz findet die dominante Schallemission direkt im Kontaktbereich statt. Bei höheren Frequenzbändern konnten die Emissionen teilweise der Schiene oder dem Rad zugeordnet werden. Weiterhin wurde die Abstrahlung der Biegevelle von der Schiene vorgestellt.
- **Flachstellen** – Es wurden die Schallemissionen typischer Flachstellen betrachtet. Im untersuchten Beispiel eines Güterzuges war auffällig, dass es sich um zwei unterschiedliche Flachstellen an zwei benachbarten Achsen handelte, was sich aus einkanaligen Vorbeifahrtmessungen nicht hätte ableiten lassen. Zudem wurde das Phänomen diskutiert, dass die typischen Flachstellengeräusche gelegentlich erst nach der Zugvorbeifahrt auftauchen.

- **Aeroakustische Geräusche** – Die Diskussion der aeroakustischen Geräusche umfasste
 - Einen Vergleich der Amplitude der Schallquellen an den Pantografen mit der mittleren Amplitude der Schallemissionen am Rad-Schiene-Kontakt in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit – für die betrachteten Geschwindigkeiten konnte kein eindeutiger Trend nachgewiesen werden.
 - Einen spektralen Vergleich der Schallemission am Pantografen mit der Schallemission am Rad-Schiene-Kontakt – das Rauschen am Pantografen zeigt gegenüber dem Rad-Schiene-Kontakt eine tieffrequenteren Charakteristik.
 - Einen Vergleich der aeroakustischen Geräusche an den Triebwagen / Lokomotiven verschiedener Personenzüge – die ICEs zeigen trotz höherer Geschwindigkeiten im Vergleich zu anderen Personenzügen, die geringsten Schallemissionen aufgrund von aeroakustischen Geräuschen an der Lok, was sich vor allem auf die strömungsoptimiertere Form der Triebwagen zurückführen lässt.
- **Geräuschquellen an Personenzügen** – Es wurden die typischen Geräuschquellen unterschiedlicher Nah- und Fernverkehrszüge gezeigt und diskutiert. Allgemein lässt sich hier festhalten, dass zu hohen Geschwindigkeiten hin die Schallemissionen der Triebwagen bzw. der Lokomotiven lauter als die Schallemissionen der Rollgeräusche der Reisezugwagen sind. Bei Zügen vom Typ IC2 konnte beobachtet werden, dass die Rollgeräusche der Achsen der Lokomotiven lauter als die der Reisezugwagen sind.
- **Geräuschquellen an Güterzügen** – Aufgrund der starken Heterogenität der Güterzüge (Waggon-Typen, Beladungszustände, Bremstypen, Geschwindigkeiten) wurden besonders interessante Effekte untersucht. Dazu zählte beispielsweise die ungewöhnliche Schallemission einer Achse im Frequenzbereich oberhalb von 15 kHz, welche möglicherweise auf einen Defekt hindeutet. Außerdem wurde die Abstrahlung einer tieffrequenten Schallkomponente an einem Güterwaggon untersucht. Auffällig war hier, dass diese Schallemission in der Nähe einer Achse mit einer Flachstelle stattfand. Es wird angenommen, dass die Flachstelle die Anregung von Eigenmoden im Waggon begünstigt, welche zu Schallabstrahlungen der schwingenden Oberflächen führen. Weiterhin fand ein Vergleich der Spektren einer Graugussbremse und einer Kompositbremse statt. Neben der deutlichen Pegeldifferenz unterscheiden sich die beiden Bremstypen vor allem darin, dass die Frequenzcharakteristik der mit Graugusssohlen gebremsten Achse im Frequenzbereich 300 Hz bis 2 kHz gegenüber den mit Kompositsohlen gebremsten Achsen breitbandig erhöht ist.

Die im Rahmen dieses Berichtes betrachteten akustischen Effekte stellen nur einen Überblick möglicher weiterführender Analysen auf Basis der durchgeführten Messungen dar. So traten, neben den in Abschnitt 4.4.3 diskutierten Fall noch bei weiteren Güterwaggons tieffrequente Schallemissionen auf, deren Analyse noch weitere Erkenntnisse hervorbringen könnte. Weiterhin wurde in Abschnitt 4.2.1 die Frage diskutiert, ob die Schallemission am Rad-Schiene-Kontakt vom Rad von der Schiene oder von beiden Komponenten verursacht wird. Dazu wurde lediglich das Beispiel zweier Achsen eines einzelnen Zuges analysiert. Es ist anzunehmen, dass Faktoren wie Zuggeschwindigkeit, Gewicht und Rauigkeit von Schiene / Rad die Emissionsorte und -charakteristik beeinflussen. Die vorliegenden Messungen würden eine detailliertere Betrachtung dieser Fragestellung erlauben.

Eine weitere Untersuchung könnte eine statistische Analyse einzelner Achsen der Güterzüge darstellen. Dazu würde die aus dem Beamforming berechnete Amplitude für die Achsen aller Waggons in Abhängigkeit von Wagengattung und Zuggeschwindigkeit aus den Ergebnissen der Auswertungen ausgelesen werden. Im Ergebnis erhielte man dadurch beispielsweise eine statistische Verteilung der Lautstärke der Achsen.

Weitere potentielle Fragestellungen für zusätzliche Auswertungen der vorhandenen Messungen:

- Gibt es Unterschiede in den Ergebnissen zwischen der ersten und der zweiten Messkampagne, beispielsweise aufgrund von Abnutzungserscheinungen der Schiene?

- Welchen Einfluss hat der Abstand des Arrays zum Zug auf die Pass-By Auswertung? Diese Fragestellung könnte auf Basis eines Vergleichs der Zugvorbeifahrten am vorderen und hinteren Gleis untersucht werden.
- Im Abschnitt 4.2.3 wurde das Spektrum der Schallquelle eines Pantografen mit dem Spektrum der Schallquelle an einer ähnlich lauten Achse verglichen. Inwieweit sind diese Ergebnisse repräsentativ? Hier sollte eine Auswertung der Schallquellen von verschiedenen Pantografen und verschiedenen Achsen durchgeführt werden. Auch der Einfluss der Geschwindigkeit ist hier sicherlich von Interesse.

6 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Delay-and-Sum Beamforming zur Erstellung einer akustischen Karte auf einer Ebene (graue Fläche rechts im Bild). Links ist ein Array aus Mikrofonen (blaue Punkte) dargestellt. Die Zeitsignale werden so zeitverzögert und überlagert, dass sie sich bei der Anwesenheit einer Quelle am betrachteten Bildpixel (kleines blaues Quadrat) konstruktiv überlagern. Befindet sich an der Stelle keine Quelle, findet destruktive Interferenz statt.....	10
Abbildung 2: Amplitude des gebeamformten Signals entlang einer Achse bei der Anwesenheit einer harmonischen Punktquelle (4 kHz) in einem Meter Abstand zentral vor dem Array (Ringform, Durchmesser 70 cm, 48 Mikrofone).....	10
Abbildung 3: Simulierte Hauptkeulenbreite von harmonischen Quellen im Abstand von 1 m zum Array (Ringarray mit 48 Mikrofonen; Durchmesser: 0,7 m)	11
Abbildung 4: Veranschaulichung des Maskierungseffektes an zwei aufeinander folgenden Wagen; links: Zeitsignal mit markierten Zeitbereich; rechts: aus dem markierten Zeitbereich berechnetes akustisches Foto	12
Abbildung 5: Illustration des Schallerzeugungsmechanismus von Rollgeräuschen (Quelle: Lopez Arteaga 2019, S. 3).....	13
Abbildung 6: Illustration der gerichteten Schallabstrahlung der Biegevelle an der Schiene (Quelle: Lopez Arteaga 2019, S. 14).....	13
Abbildung 7: Vorbeifahrtpegel eines Zugtyps in 7,5 m Abstand in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit aus Thompson (2008).....	14
Abbildung 8: Messaufbau	16
Abbildung 9: Akustisches Foto des Stromabnehmers eines ICEs (Messung 1) aus dem Spektrum. Oben links: Zeitsignal mit ausgewähltem Integrationsbereich (hervorgehoben durch das rote Oval); oben rechts: Spektrum mit ausgewähltem Frequenzbereich für das Beamforming; unten: Akustisches Foto	17
Abbildung 10: Delay-and-Sum Beamforming mit Korrektur des DOPPLER-Effekts (keine Korrektur der Amplitude) nach Zechel (2010).....	18
Abbildung 11: Pass-By Auswertung des Triebwagens einer Stadler KISS (Messung 34) für die ersten vier Terzbänder	19
Abbildung 12: Ermittlung des Beamforming Pegels aus der akustischen Karte.....	20
Abbildung 13: Pegeldarstellung für den Güterzug aus Messung 98	20
Abbildung 14: Mittelwerte der Pegel pro Wagen für den Vorbeifahrtpegel mit einem einfachen Messmikrofon sowie für das Beamforming (Messung 98; Fahrtrichtung von links nach rechts; mittlere Geschwindigkeit: 88,1 km/h).....	21
Abbildung 15: Gesamtvorbeifahrtpegel $L_{Aeq,T}$ in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit; links: Vorbeifahrten am vorderen Gleis (7,5 m Abstand zwischen Mikrofon und Gleismitte); rechts: Vorbeifahrten am vorderen Gleis (11,5 m Abstand zwischen Mikrofon und Gleismitte).....	22
Abbildung 16: Emissionsorte der Rollgeräusche an vier Achsen einer Stadler KISS (Messung 22; Fahrtrichtung von links nach rechts; mittlere Geschwindigkeit: 151,2 km/h) für die Terzbänder von 1,25 kHz bis 16,0 kHz.....	24

Abbildung 17: Abstrahlung der Biegewelle von der Schiene vor der Zugeinfahrt (Oben), nach der Zugausfahrt (Mitte) und während der Zugdurchfahrt (Unten)	25
Abbildung 18: Visualisierung der Flachstellen von zwei unterschiedlichen, dicht beieinander liegenden Flachstellen	26
Abbildung 19: Transiente Geräusche nach der Vorbeifahrt, die mutmaßlich durch eine (oder mehrere) Flachstelle(n) verursacht wurden	26
Abbildung 20: Maximaler (Beamforming-)Pegel von den Achsen sowie maximaler (Beamforming-)Pegel der Stromabnehmer (sofern als Quelle identifizierbar); schwarz gepunktete Linien markieren zusammengehörende Werte.....	27
Abbildung 21: Oben: Spektrum der Quelle am Pantografen (bei $x = 190,9$ m) und der Quelle an einer ähnlich lauten Achse (bei $x = 74,6$ m) von Messung Nummer 71 (Fahrtrichtung von links nach rechts, mittlere Geschwindigkeit: 178,8 km/h); unten: Differenz der Spektren	28
Abbildung 22: Geräusche am Triebwagen für die Terzbänder von 160 Hz bis 800 Hz für unterschiedliche Personenzüge (von links nach rechts: DB Regio aus Messung 115 mit 119 km/h; Stadler KISS aus Messung 89 mit 162 km/h; IC2 aus Messung 28 mit 163 km/h; IC aus Messung 41 mit 199 km/h; ICE aus Messung 57 mit 204 km/h); Fahrtrichtung in allen Fällen von links nach rechts	29
Abbildung 23: Vorbeifahrtpegel ICE aus Messung 071 (Fahrtrichtung von links nach rechts, mittlere Geschwindigkeit: 178,8 km/h)	30
Abbildung 24: Pass-By Ausschnitte des ICEs aus Messung 71 (Fahrtrichtung von links nach rechts, mittlere Geschwindigkeit: 178,8 km/h) mit den beiden Triebwagen.....	31
Abbildung 25: Pass-By Auswertung für die einzelnen Terzbänder ICE (Teil) Messung 71 (Fahrtrichtung von links nach rechts, mittlere Geschwindigkeit: 178,8 km/h).....	31
Abbildung 26: Vorbeifahrtpegel eines IC1 (Messung 137; Fahrtrichtung von rechts nach links, mittlere Geschwindigkeit: 169,5 km/h)	32
Abbildung 27: Pass-By Auswertung der Lokomotive und des ersten Waggons des IC1 aus Messung 137 (Fahrtrichtung von rechts nach links, mittlere Geschwindigkeit: 169,5 km/h).....	32
Abbildung 28: Quelldarstellung aufgeteilt auf die einzelnen Terzbänder IC Messung 137 (Fahrtrichtung von rechts nach links, mittlere Geschwindigkeit: 169,5 km/h).....	33
Abbildung 29: Vorbeifahrtpegel eines IC2 (Messung 148; Fahrtrichtung von rechts nach links, mittlere Geschwindigkeit: 154,4 km/h)	34
Abbildung 30: Quelldarstellung aufgeteilt auf die einzelnen Oktavbänder IC2 Messung 148 (Fahrtrichtung von rechts nach links, mittlere Geschwindigkeit: 154,4 km/h).....	35
Abbildung 31: Pass-By Auswertung für unterschiedliche Oktavbänder eines sich im Bremsvorgang befindlichen IC2 Zuges (mittlere Geschwindigkeit: 68,5 km/h; Fahrtrichtung von links nach rechts)	35
Abbildung 32: Vorbeifahrtpegel einer DB Regio (Messung 102; Fahrtrichtung von links nach rechts; mittlere Geschwindigkeit: 118,9 km/h)	36
Abbildung 33: Vorbeifahrtpegel einer Stadler KISS (Messung 132; Fahrtrichtung von rechts nach links; mittlere Geschwindigkeit: 141,6 km/h)	36
Abbildung 34: Schallquellen für die einzelnen Oktavbänder des Güterzuges aus Messung 81 (zweit leisester Güterzug, alle Wagen ähnlich laut; Fahrtrichtung von rechts nach links; mittlere Geschwindigkeit: 93,0 km/h).....	37

Abbildung 35: Schallquellen für die einzelnen Oktavbänder des Güterzuges aus Messung 47
(zweitlautester Zug; alle Wagen ähnlich laut; Fahrtrichtung von links nach rechts;
mittlere Geschwindigkeit: 96,8 km/h)..... 38

Abbildung 36: Mittelwert der Einhüllenden aller Mikrofone (oben) und Mittelwert der Spektren
aller Mikrofone (unten) des Arrays FlexStar120 von Messung Nummer 47
(Fahrtrichtung von links nach rechts; mittlere Geschwindigkeit: 96,8 km/h)..... 38

Abbildung 37: Hochfrequente Quelle an der Achse eines Waggons des Zuges aus Messung
Nummer 47 (Fahrtrichtung von links nach rechts; mittlere Geschwindigkeit: 96,8 km/h)
ausgewertet mit dem Fibonacci Array 39

Abbildung 38: Tieffrequente Abstrahlung von der Wagenwand und von der Achse; Quelle am
Gleisbett vermutlich Reflexion (Messung 98; Fahrtrichtung von links nach rechts;
Geschwindigkeit: 88,1 km/h)..... 40

Abbildung 39: Vorbeifahrtpegel eines Güterzuges (Messung 43; Fahrtrichtung von rechts nach
links; Geschwindigkeit: 92,5 km/h)..... 40

Abbildung 40: Spektren der lautesten (bei $x = -245,7$ m) und der leisesten Achse (bei $x = -91,1$ m)
des Güterzuges aus Messung 43 (Fahrtrichtung von rechts nach links; mittlere
Geschwindigkeit: 92,5 km/h)..... 41

7 Quellenverzeichnis

- Barsikov, B.;** King III, W. F.; Pfizenmeier, E. (1987): Wheel/rail noise generated by a high-speed train investigated with a line array of microphones, in: *Journal of Sound and Vibration*, Jg. 118, Nr. 1, S. 99-122.
- Brühl, S.;** Schmitz, K.-P. (1993): Noise source localization on high-speed trains using different array types, in: *Proceedings of Internoise*, Jg. 93, S. 1311-1314.
- Buna, Bela** (1998): *Verminderung des Verkehrslärms*, Springer: Berlin Heidelberg.
- Huber, Thomas;** Lölgen, Thomas; Matschke, Gerd; Schulte-Werning, Burkhard; Willenbrink, Ludger (1998): Umweltverträglicher Hochgeschwindigkeitsverkehr auf der Schiene - eine Gemeinschaftsaufgabe von Aerodynamik und Aeroakustik, in: *Eisenbahntechnische Rundschau*, Jg. 1998., Nr. 8+9, S. 541-545.
- Jäger, Klaus;** Onnich, Johannes (2000): Fortschritte und Besonderheiten bei der Reduzierung des Schienenverkehrslärms, in: *Zeitschrift für Lärmbekämpfung*, Jg. 2000, Nr. 47, S. 206-210.
- Lopez Arteaga, Ines** (2019): Rolling noise in road and rail transportation systems, in: *Proceedings of the Internoise*, Madrid, 16. bis 19. Juni 2019.
- Kwasnicki, Elias** (1998): Lärmreduktion durch gesteuerte Radsätze, in: *Der Eisenbahningenieur*, 1998, Nr. 1, S. 62-68.
- Meyer, A.;** Döbler, D.; Gräser, M. (2014): Efficient methods for the analysis of moving sound sources with high channel microphone arrays, in: *Proceedings of the 5th Berlin Beamforming Conference*, 19-20. Februar 2014, Jg. 2014, Nr. 19.
- Möhler, U.** (2011): Grundlagen des Lärmschutzes an Schienenwegen, in: *Der Eisenbahningenieur*, Jg. 2011, Nr. 5, S. 22-26.
- Sarradj, Ennes** (2012): Three-Dimensional Acoustic Source Mapping with Different Beamforming Steering Vector Formulations, in: *Advances in Acoustics and Vibration*, Jg. 2012.
- Sarradj, Ennes** (2015): Optimal planar microphone array arrangements, in: *Tagungsband DAGA 2015 – 41. Jahrestagung für Akustik*, S. 220-223.
- Thompson, David** (2008): *Railway Noise and Vibration*, Elsevier Science.
- Zechel, G.;** Zeibig, A.; Beitelschmidt, M. (2010): Time-domain beamforming on moving objects with known trajectories, in: *Proceedings of the 3rd Berlin Beamforming Conference*, 24-25 Februar 2010, Jg. 2010, Nr. 12.