

Müller-BBM Rail Technologies GmbH

Helmut-A.-Müller-Straße 1 - 5
82152 Planegg

www.MuellerBBM-Rail.com

Prof. Dr.-Ing. habil. Stefan Lutzenberger
Telefon +49(172)8903819
Stefan.Lutzenberger@mbbm-rail.com

01. Dezember 2025
R140336/3_V02 LZB

Radunrundheiten und deren Auswirkungen auf Schallemission, Erschütterungsemission und Oberbaudynamik

Fahrbahnlabor

Bericht Nr. R140336/3_V02

Auftraggeber:

Im Auftrag der Schweizerischen
Eidgenossenschaft

Eidgenössisches Departement für Umwelt,
Verkehr, Energie und Kommunikation
UVEK
Bundesamt für Umwelt BAFU
Abteilung Lärm und NIS
Worbentalstrasse 68,
3063 Ittigen

Bearbeitet von:

Prof. Dr.-Ing. habil. Stefan Lutzenberger
Dr. rer. nat. Nathan Isert

Berichtsumfang:

Insgesamt 89 Seiten

Auftraggeberin: Schweizerische Eidgenossenschaft;
Bundesämter für Umwelt (BAFU) und
Verkehr (BAV), CH-3003 Bern.
Das BAFU und das BAV sind Ämter des
Eidg. Departements für Umwelt,
Verkehr, Energie und Kommunikation
(UVEK).

Auftragnehmerin Müller-BBM Rail Technologies GmbH
Helmut-A.-Müller-Straße 1 – 5
82152 Planegg
www.MuellerBBM-Rail.com

Autor/Autorin: Stefan Lutzenberger, Nathan Isert

Begleitung BAFU: Fredy Fischer, Philipp Huber,
Markus Ammann, Franz Kuster,
Christoph Dürig

Hinweis: Dieser Bericht wurde im Auftrag der
Bundesämter für Umwelt (BAFU) und
Verkehr (BAV) verfasst. Für den Inhalt
ist alleine die Auftragnehmerin
verantwortlich.

Version: V2

Datum 01.12.2025

Inhaltsverzeichnis

Executive Summary	5
1 Zusammenfassung	7
2 Aufgabenstellung	11
2.1 Hintergrund	11
2.2 Ziel des Projekts	12
2.3 Methodisches Vorgehen	13
2.4 Wissenslücken und Projektbeiträge	14
3 Radunrundheiten	14
3.1 Klassierung von Radunrundheiten	15
3.2 Messgrößen für Radunrundheiten	21
3.3 Geometrische Grenzwerte	24
4 Schall-/Erschütterungsemission und Oberbaudynamik infolge von Radunrundheiten	25
4.1 Entstehungsmechanismen Schall, Erschütterungen und Oberbaudynamik	25
4.2 Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit	28
4.3 Schallentstehung	29
4.4 Erschütterungsentstehung	30
4.5 Relevanz der Radunrundheiten für Schall, Erschütterungen und Oberbaudynamik	30
5 Literaturrecherche - Zusammenhänge zwischen Radunrundheiten und der Schallemission, Erschütterungsemission und der Oberbaudynamik	31
5.1 Schall	31
5.2 Erschütterungen	33
5.3 Oberbaudynamik	34
6 Messung der Radunrundheiten, der Schall- und Erschütterungsemissionen und der Oberbaudynamik	36
6.1 Das Fahrbahnlabor	36
6.2 Zugverkehr	38
6.3 Fahrwegkenngrößen	38
6.4 Messung der Radunrundheiten	40
7 Zusammenhang zw. Radschaden und Emissionen:	43
7.1 Flachstellen	43

7.2	Radrauheit	53
7.3	Polygone	66
7.4	Kontinuierliche Zustandsüberwachung und Wartungszustand	78
8	Literatur	81
Anhang A		84
1	Kenngößen zur Bewertung von Schall, Erschütterungen und Oberbaudynamik	84
1.1	Akustische Kenngößen	84
1.2	Erschütterung	86
1.3	Oberbaudynamik	88

Executive Summary

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde das Auftreten und die Wirkung von Radunrundheiten auf Eisenbahnlärm, Erschütterungen und die Beanspruchung der Infrastruktur untersucht. Ziel war es, belastbare Daten über die Häufigkeit, Ausprägung und Auswirkungen von Radunrundheiten zu gewinnen und daraus Ansätze für eine effizientere Instandhaltung und einen leiseren Schienenverkehr abzuleiten.

Zu diesem Zweck wurde im Fahrbahnlabor Sempach (Schweiz) ein Wheel Monitoring System (WMS) installiert. Das Fahrbahnlabor, betrieben von BAFU, BAV, SBB, Empa und der Allianz Fahrweg, dient der Optimierung der Bahninfrastruktur mit Fokus auf Lärminderung, Erschütterungsreduktion und Oberbaudynamik. Das WMS überwacht im Realbetrieb Radunrundheiten wie Polygone, Flachstellen und die akustische Radrauheit.

Die Analyse der Messdaten ergab folgende zentrale Erkenntnisse zum Vorkommen von Radunrundheiten an der Messstelle Fahrbahnlabor Sempach:

Personenzüge besitzen insgesamt eine gute Radqualität und eine geringe akustische Rauheit, wenngleich auch ein Teil der Räder hohe bis sehr hohe akustische Radrauheiten aufweisen und damit deutlich rauer sind als die Schiene an der Messstelle. Flachstellen treten nur bei ca. 1% der Personenwagen auf. Polygonbildung wurde bei 40 % der Räder festgestellt und ist bei wenigen Wagen stark ausgeprägt. Die Rundheit der Räder der Personenzüge ist im Durchschnitt gut, allerdings gibt es auch Wägen mit mittleren bis starken Unrundheiten.

Lokomotiven sind sehr häufig von Polygonisierung betroffen: etwa 95 % der Räder zeigen Polygonbildung, davon 19 % stark oder sehr stark. Außerdem weisen rund 90 % der Loks eine hohe akustische Radrauheit auf, überschreiten damit meist die Rauheit der Schiene und sind daher dominant für die Schallanregung. Flachstellen sind eher selten. Die Räder der Loks sind im Durchschnitt unrund.

Güterzugwagen (GZ-Wagen): haben häufig eine hohe Radunrundheit: 25% der Güterwagen haben mindestens eine schwache Flachstellen-Indikation und immerhin ca. 8 % eine stark auffällige Flachstelle. Polygone treten bei 55 % der Wagen auf, davon 7 % stark oder sehr stark. Knapp die Hälfte aller Güterwagen weisen erhöhte akustische Radrauheiten auf.

Die Auswirkungen der Radunrundheiten auf Schall, Erschütterungen und Oberbaudynamik sind:

Flachstellen

- Sehr starke Flachstellen erhöhen den Vorbeifahrtpegel deutlich (z.B. bei Güterwagen von 80 dB auf bis zu 87 dB).
- Verursachen impulsartiges, als besonders störend empfundenes Geräusch.
- Treten Flachstellen auf, so steigt der Beschleunigungspegel im Oberbau um etwa 5 dB an, Erschütterungen um ca. 1,5 dB. Bei Untersuchungen im Projekt RIVAS an einer anderen Messstelle wurden Erhöhungen der Erschütterungspegel um bis zu 10 dB festgestellt.

Akustische Radrauheit:

- Führt zu deutlich erhöhten Schallemissionen: Wagen mit $L_{ACA} > 20$ dB sind an der Messstelle im Mittel 11 dB lauter als solche mit glatten Rädern.

Polygone:

- Bedingen eine stark erhöhte Schotterbeschleunigung (bis zu 17 dB in Zuggruppen, also fast zehnfache Dynamik).
- Im Fahrbahnlabor wurde eine geringe erschütterungserhöhende Wirkung ermittelt (in deutlicheren Fällen Pegelüberhöhungen von knapp 10 dB für denselben Wagen vor und nach einer Radüberarbeitung). Bei anderen Verhältnissen (z. B. im RIVAS-Projekt) wurden hingegen Erhöhungen um bis zu 20 dB festgestellt.

Es wird darauf hingewiesen, dass sich an anderen Messstellen mit anderen Boden- und Oberbaueigenschaften und anderen Radunrundheiten die Schall-, Erschütterungs- und Oberbauauswirkungen anders ausgeprägt sein können.

Schlussfolgerung

Ein guter Radzustand (keine Unrundheiten, geringe Rauheit) ist entscheidend für:

- niedrige Schall- und Erschütterungsemissionen,
- geringere Oberbaudynamik und
- verlängerte Lebensdauer von Fahrzeug und Gleis.

Im Fall eines schlechten Schienenzustands sind die Auswirkungen auf die Örtlichkeit des Auftretens beschränkt. Schlechte Radzustände hingegen betreffen die gesamte, von den betroffenen Fahrzeugen, befahrene Strecke.

Zustandsüberwachungssysteme ermöglichen es, durch eine zustandsabhängige und vorausschauende Instandhaltung, einen guten Radzustand aufrechtzuerhalten. Dadurch verringern sich die Schall- und Erschütterungsemissionen und die Oberbaudynamik und Lebensdauer von Fahrzeug und Gleis verlängert sich, wodurch Effizienz, Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit deutlich verbessert werden.

Die Zustandsüberwachung ist besonders zielführend bei Loks (Polygonisierung und akustische Radrauheit) und Güterwagen (Polygonisierung, akustische Radrauheit und Flachstellen) unterstützt aber auch bei Personenwagen die Identifikation hoher Radunrundheiten um mittels gezielter Wartung einen guten Radzustand zu erhalten.

1 Zusammenfassung

Motivation und Ziele

Ein sicherer, wirtschaftlicher und umweltfreundlicher Eisenbahnbetrieb stellt hohe Anforderungen an die Fahrzeug- und Fahrwegkomponenten. Die Rundheit der Räder ist dabei ein wichtiger Aspekt. Radunrundheiten entstehen durch Verschleiß, Flachstellen oder Fertigungsfehler und führen zu erhöhtem Lärm, Vibrationen und höherer Belastung der Gleise. Derzeit fehlen belastbare Daten über die Häufigkeit von Radunrundheiten und deren Auswirkungen auf den Eisenbahnlärm, die Erschütterungen entlang von Bahnstrecken und die Beanspruchung der Infrastruktur.

Im Projekt sollen durch die Installation eines Radmonitoringsystems WMS im Fahrbahnlabor bei Sempach vorrangig folgende Erkenntnisse gewonnen werden.

- Vorkommen und Aufttrittshäufigkeit von Radunrundheiten an der Messstelle
- Quantifizierung des Einflusses auf Lärm, Erschütterungen und Infrastruktur
- Bewertung von Wartungs- und Überwachungsmaßnahmen zur Reduktion von Radunrundheiten

Radunrundheiten (Kapitel 3) sind Abweichungen von der idealen Radform und beeinflussen maßgeblich **Lärm, Erschütterungen, Fahrkomfort** und **Infrastrukturbelastung**. Sie können im Hinblick auf die Aufgabenstellung in drei Hauptformen unterschieden werden:

- Flachstellen (lokale Defekte)
Entstehen z.B. durch Bremsen mit blockierten Rädern und verursachen impulsartige Belastungen, hohe Geräuschpegel, Vibrationen und Schäden an Rad, Lagern und Gleis.
- Polygone (wellenförmige Rundlaufabweichungen)
Entstehen durch Fertigungseinflüsse, Schwingungen oder Fahrzeug-Fahrweg-Interaktionen und führen zu periodischen Kräften, verstärkten Erschütterungen, tieffrequenten Lärm und Materialermüdung.
- Akustische Radrauheit (kleinskalige Rauheiten)
Entsteht durch Verschleiß, Bremssohlen oder Sandung und trägt hauptsächlich zum Rollgeräusch bei.

Radunrundheiten können durch Rundlaufmessungen, indirekte Messungen oder Messungen der Kontaktkräfte quantifiziert werden.

Für die Themenbereiche Schall, Erschütterungen und Oberbaudynamik existieren derzeit keine spezifischen geometrischen Grenzwerte für Radunrundheiten. Die vorhandenen Grenzwerte aus der Instandhaltung von Schienenfahrzeugen sind für diese Fragestellungen nicht geeignet.

Radunrundheiten und Schienenirregularitäten sind wesentliche Ursachen für **Schall, Erschütterungen** und **Oberbaudynamik (Kapitel 4)**. Sie regen beim Überrollen Schwingungen in Rad, Schiene und Oberbau an. Radunrundheiten haben einen umso stärkeren Einfluss, je größer diese im Vergleich zu den Schienenirregularitäten sind. Dominieren die Radunrundheiten, so haben die Schienenirregularitäten einen geringen Einfluss.

Polygone tragen aufgrund ihrer Wellenlängen besonders zur Anregung von Erschütterungen und Körperschall bei, Radrauheiten vorrangig zur Schallerzeugung wohingegen Flachstellen sowohl Erschütterungen, sekundären Luftschall (über Körperschallpfade) als auch direkten Luftschall anregen können.

Kapitel 5 gibt einen Überblick über den **Stand der Forschung**. Es bestätigt die Bedeutung der drei untersuchten Unrundheiten für die Emissionen und benennt zentrale Einflussgrößen wie Fahrgeschwindigkeit, Radlast und Wartungszustand. Studien belegen z. B., dass eine hohe akustische Radrauheit die Schallpegel um 10 dB und mehr erhöhen kann, Polygone Erschütterungserhöhungen bis zu 20 dB bedingen können oder Flachstellen ebenfalls die Erschütterungen um bis zu 10 dB erhöhen können. Gleichzeitig werden Forschungslücken sichtbar – wie eine fehlende detaillierte Analyse des Auftretens von Radschäden und deren Auswirkung, insbesondere für das Schweizer Schienennetz. Hier setzten die vorliegenden Untersuchungen an.

In **Kapitel 6** wird die **Messung und die Messeinrichtung** am Fahrbahnlabor Sempach beschrieben. Das Fahrbahnlabor in der Schweiz wird von BAFU, BAV, SBB, Empa und der Allianz Fahrweg betrieben und dient der Optimierung der Bahninfrastruktur mit Fokus auf Lärminderung, Erschütterungsreduktion und Oberbaudynamik. Auf einem 1 km langen Abschnitt bei Sempach-Rothenburg wurden sieben Messquerschnitte mit unterschiedlichen Schwellenarten und umfassender Sensortechnik eingerichtet. Zentrales Element ist das Train Monitoring System (TMS) von Müller-BBM Rail Technologies, das bis zu 500 Messkanäle verarbeitet und automatisch Daten zu Schall, Vibrationen, Belastungen und RFID erfasst und speichert. Pro Jahr werden rund 40.500 Zugvorbeifahrten erfasst, davon etwa 38.500 Personenzüge und 1.300 Güterzüge.

In einen Messquerschnitt wurde das Wheel Monitoring System (WMS) von Müller-BBM Rail Technologies eingebaut. Das WMS überwacht Radunrundheiten wie Polygone, Flachstellen und akustische Radrauheit im laufenden Betrieb.

Kapitel 7 zeigt die **Untersuchungsergebnisse**. Alle Erkenntnisse in diesem Bericht beziehen sich auf die Messstelle in Sempach.

Flachstellen treten bei Personenzügen nur vereinzelt auf, während sie bei Güterzügen häufiger beobachtet werden; Etwa 1% der Personenzugwagen weisen Flachstellen auf. Im Gegensatz dazu haben 25% der Güterwagen mindestens eine schwache Flachstellen-Indikation und immerhin ca. 8 % eine stark auffällige Flachstelle. Bei Lokomotiven ist der Anteil auffälliger Achsen mit etwa 2 % vergleichsweise gering.

Flachstellen führen zu einer deutlichen Erhöhung des Vorbeifahrtpegels – bei Güterwagen steigt der Median des Vorbeifahrtpegels von 80 dB (glatte Räder) um bis zu 7 dB auf 87 dB bei sehr stark ausgeprägten Flachstellen. Hinzu kommt eine höhere subjektiv empfundene Lästigkeit aufgrund des impulsartigen Geräusches. Auch bei Personenwagen ist diese Zunahme feststellbar, jedoch auf niedrigerem Gesamtniveau. Ebenso steigen die Beschleunigungspegel bei Auftreten von Flachstellen um 5 dB gegenüber Wagen ohne Flachstellen an. Im Hinblick auf Erschütterungen beträgt der ermittelte Anstieg bei Wagen mit Flachstellen 1,5 dB gegenüber Wagen ohne Flachstellen. Dass die Erhöhungen der Erschütterungspegel auch stärker ausfallen können, zeigt das Projekt RIVAS, in welchem Erhöhungen der Erschütterungspegel um bis zu 10 dB nachgewiesen wurden.

Die **akustische Radrauheit** wird anhand des Einzahlwerts L_{ACA} bewertet.

Im Durchschnitt haben Personenzüge eine relativ geringe Radrauheit. Güterwagen sind etwas mehr von erhöhter Radrauheit betroffen. Loks hingegen weisen sehr häufig eine hohe Radrauheit auf. Es gibt jedoch bei allen Fahrzeugtypen Räder mit hohen Rauheiten. An der Messstelle überschreiten daher ca. 29% der Personenzugwagen, 48% der Güterwagen und 90% der Loks die mittlere Rauheit L_{ACA} der Schiene und sind daher dominant für die Schallanregung. Die Überschreitungen betragen bis zu $L_{ACA} = 25$ dB.

Erhöhte akustische Radrauheit hat einen deutlichen Einfluss auf die Schallemission: Wagen (PZ und GZ) mit hoher akustischer Rauheit ($L_{ACA} > 20$ dB) haben eine um ca. 11 dB höhere Schallemission als Wagen mit guten Rädern ($L_{ACA} < 5$ dB). Güterwagen mit auffälligen Rauheiten erreichen Vorbeifahrtpegel von mehr als 90 dB. Besonders auffällig ist, dass laute Güterwagen ($L_{Aeq} > 86$ dB) fast immer erhöhte Rauheitswerte aufweisen, was die zentrale Bedeutung der Radrauheit für die Lärmentstehung bestätigt.

Radrauheiten haben keine Bedeutung für den Beschleunigungspegel im Oberbau (Schotter) und die Erschütterungsemission.

Polygone treten bei allen Fahrzeugtypen in relevantem Umfang auf, am häufigsten jedoch bei Lokomotiven: Hier sind 95 % der Räder betroffen, 19 % der Räder sind dabei hoch/sehr hoch polygonisiert. Bei Güterwagen sind 55 % der Räder betroffen und 7% sind mindestens hoch/sehr hoch polygonisiert. Bei Personenwagen sind es 40% mit einer hohen/sehr hohen Polygonisierung 1 %. Die Ergebnisse zeigen, dass insbesondere Loks und Güterwagen hinsichtlich Polygonbildung einen erhöhten Instandhaltungsbedarf aufweisen.

Polygone haben keinen wesentlichen Einfluss auf die Schallemission, führen aber zu erhöhten Schotterbeschleunigungen. Die Pegelerhöhungen zwischen glatten Rädern (< 5) und Räder mit mindestens starker Polygonisierung (> 15) betragen für die Fahrzeugkategorien ca.8-17 dB. Eine Erhöhung von 20 dB entspricht dabei einem 10-fach erhöhten Beschleunigungspegel.

An der Messstelle liegt das Erschütterungsmaximum meist im Frequenzbereich zwischen 10 Hz und 60 Hz. Bei den vorherrschenden Fahrgeschwindigkeiten sind es daher nur Polygone längerer Wellenlängen (kleinerer Ordnung), welche die Erschütterungsemission wesentlich beeinflussen können. Im Fahrbahnlabor sind es vor allem die häufig verkehrenden Personenwagen die Polygone mit ausgeprägten langwelligen Anteilen zeigen. In den deutlicheren registrierten Fällen werden Pegelüberhöhungen von knapp 10 dB ermittelt für denselben Wagen vor und nach einer Radüberarbeitung.

Im Rahmen des europäischen Forschungsprojekts RIVAS ([27] - [29]) wurden bei einer Übereinstimmung der Polygonanregungsfrequenzen und dem Erschütterungsmaximum an zwei Lokomotiven gleichen Typs mit unterschiedlich stark ausgeprägter Polygonisierung Unterschiede im Erschütterungspegel von bis zu 20 dB festgestellt.

Die Ergebnisse unterstreichen die großen Vorteile eines guten Radzustandes, wie er durch Fahrzeuge ohne Radunrundheiten und/oder kontinuierliche **Radzustandsüberwachung** und zustandsabhängige **Wartung** erreicht werden kann. Durch die systematische Erfassung und Klassierung von Radunrundheiten können gezielte Maßnahmen wie das Überdrehen effizient geplant und deren Erfolg kontrolliert werden – wie etwa beim dokumentierten Fall eines Personenwagens mit deutlich verbesserter Radqualität nach der Wartung.

Anhand der Ergebnisse einer kontinuierlichen Zustandsüberwachung kann eine zustandsabhängige aber auch eine vorausschauende Instandhaltung (Predictive Maintenance) durchgeführt werden: Mithilfe langfristig erfasster Zustandsdaten und intelligenter Analysemodelle lassen sich potenzielle Schäden frühzeitig erkennen und präzise vorhersagen. So können Instandhaltungsmaßnahmen geplant werden, bevor es zu Ausfällen kommt. Dies macht die Wartung planbar, erhöht die Effizienz und die Wirtschaftlichkeit und reduziert gleichzeitig die Schall- und Erschütterungsemission und verbessert die Oberbaudynamik.

2 Aufgabenstellung

2.1 Hintergrund

Ein sicherer, wirtschaftlicher und umweltfreundlicher Eisenbahnbetrieb stellt hohe Anforderungen an die Fahrzeugtechnik, die Infrastruktur sowie die Instandhaltung. Ein wichtiger Faktor dabei sind unrunde Räder, also der Abweichung des Rades von der idealen Kreisform, Diese können unterschiedliche Ursachen haben, darunter Fertigungsfehler, Verschleiß während des Eisenbahnbetriebs, Flachstellen infolge von Bremsvorgängen oder Materialermüdung.

Radunrundheiten verursachen erhöhte Kräfte zwischen Rad und Schiene, die sich in Form von **erhöhten dynamischen Kräften im Oberbau**, einem **erhöhten Rollgeräusch**, und **stärkeren Erschütterungen** äußern. Diese Effekte wirken sich nicht nur belästigend auf die Anwohner aus, sondern können auch beispielsweise eine verstärkte Schädigung des Oberbaus bedingen.

Radunrundheiten an Lokomotiven wurden bereits in Untersuchungen des Projekts RIVAS als Träger von Erschütterungsemissionen identifiziert.

Dass Radunrundheiten bei Radschäden eine relevante Rolle spielen, zeigt eine Erhebung im Meterspurbereich [2]. Diese kommt zu dem Ergebnis, dass sowohl Polygone wie auch Flachstellen zu den 4 wichtigsten auftretenden Radschadensformen gehören:

- 40 % Radverschleiss am Spurkranz
- 27 % Radverschleiss an der Fahrfläche
- 10 % Radpolygonisierung
- 8 % Flachstellen

Ein Radmonitoring mit dem WMS bei der Matterhorn-Gotthard-Bahn ergibt, dass Flachstellen bei den meisten Fahrzeugtypen der häufigste Grund für die Reprofilierung der Räder sind [4].

In den vergangenen Jahren konnten im Schienenverkehr beachtliche Fortschritte bei der Reduktion der Radunrundheiten erreicht werden. Wesentlicher Treiber dieser Entwicklung war das Verbot von Güterwagen mit Graugussbremssohlen in der Schweiz. Der nachweislich positive Effekt der Umrüstung von Güterwagen mit Graugussbremssohlen auf alternative Bremssysteme beruht im Wesentlichen auf der geringeren Aufrauung der Radlaufflächen und damit runderen Rädern. Die positiven Auswirkungen dieser Maßnahme spiegeln sich deutlich in den Ergebnissen der kontinuierlich arbeitenden Schweizer Lärmmessstationen wider. Diese verbesserte Rundheit führt zu einer deutlichen Minderung der Schallemissionen.

Jedoch ist unklar, inwieweit mit der Umrüstung der Güterwagen Radunrundheiten beseitigt sind. Es bleibt offen, ob sämtliche Radsätze inzwischen über gleichmäßig glatte und runde Laufflächen verfügen oder ob nach wie vor in erheblichem Umfang Unrundheiten auftreten, die ihrerseits das Geräusch- und Erschütterungsniveau entlang der Bahnstrecken erhöhen können.

Mit dem Abschluss der Umrüstung auf leisere Bremstechnologien ist nun eine Stagnation der Schallemissionsreduktion zu beobachten. Das Bundesamt für Verkehr (BAV) geht davon aus, dass sich die zukünftige Entwicklung der Schallpegel im Wesentlichen am Verkehrsaufkommen orientieren wird. Ohne zusätzliche lärmreduzierende Maßnahmen ist somit bei wachsendem Bahnverkehr von einem erneuten Anstieg der Lärmemissionen auszugehen [1].

Derzeit werden die von der Weltgesundheitsorganisation (WHO) empfohlenen Grenzwerte für Umgebungslärm teils deutlich überschritten. Eine weitere Reduzierung der Schallemissionen im Schienenverkehr bleibt daher unabdingbar, sowohl aus Gründen des Umwelt- und Gesundheitsschutzes als auch zur gesellschaftlichen Akzeptanz des Verkehrsträgers Schiene.

Motivation und bestehende Wissenslücken.

Trotz der hohen Relevanz von Radunrundheiten für die Betriebsqualität und Umweltwirkungen des Schienenverkehrs bestehen derzeit wesentliche Erkenntnislücken, insbesondere im Kontext des Schweizer Eisenbahnnetzes:

- Es fehlen belastbare und systematisch erhobene Daten zur Häufigkeit, Ausprägung und Verteilung von Radunrundheiten im realen Betrieb, insbesondere für die Regelspur und für den Zeitraum nach Abschluss der Umrüstung des GG-gebremsten Rollmaterials.
- Der Zusammenhang zwischen Radunrundheiten und deren Auswirkungen auf Schall- und Erschütterungsemissionen sowie auf die dynamische Beanspruchung der Infrastruktur ist bislang nicht hinreichend belegt.
- Es existieren keine Langzeitstudien, die die Entwicklung und Progression von Radunrundheiten über die Zeit hinweg dokumentieren und bewerten.

Die vorliegende Studie setzt an diesen Punkten an und zielt darauf ab, die genannten Wissenslücken durch datenbasierte Analysen und praxisnahe Untersuchungen zu schließen. Im Fokus stehen dabei die spezifische Anwendung und Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf die Bedingungen und Anforderungen des Schweizer Schienenverkehrs.

2.2 Ziel des Projekts

Erhebung statistischer Daten zu Radunrundheiten. Ziel ist die systematische Erfassung und Auswertung von Radunrundheiten an schienengebundenen Fahrzeugen unter realen Betriebsbedingungen. Dabei sollen Häufigkeit, Ausprägung, Verteilung und typische Muster der Unrundheiten analysiert und in statistisch belastbarer Form dokumentiert werden. Die Erhebung erfolgt an einer Messstelle bei Sempach.

Untersuchung der Auswirkungen von Radunrundheiten. Es soll untersucht werden, in welchem Umfang Radunrundheiten Einfluss auf relevante Betriebskenngrößen wie Schallemission, Erschütterungsübertragung und dynamische Beanspruchung der Gleisinfrastruktur haben.

Bewertung des Potenzials von Rad-Wartungsmaßnahmen. Ziel ist es, auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse zu bewerten, inwieweit durch gezielte Wartungsmaßnahmen – etwa Rad-Überwachungssysteme und einer zustandsabhängigen Radsatzbearbeitung – Radunrundheiten wirksam reduziert werden können. Damit verbunden ist die Fragestellung, ob sich durch solche Maßnahmen messbare Verbesserungen in Bezug auf Lärm- und Erschütterungsemissionen sowie die dynamische Entlastung des Oberbaus erzielen lassen.

2.3 Methodisches Vorgehen

Das methodische Vorgehen zur Untersuchung des Einflusses von Radunrundheiten auf Schall- und Erschütterungsemissionen sowie die Oberbaudynamik erfolgt in mehreren systematischen Arbeitsschritten:

Literaturrecherche. Zu Beginn wird eine umfassende Analyse der Fachliteratur durchgeführt. Ziel ist die Zusammenstellung des aktuellen Stands der Forschung zu Radunrundheiten sowie deren bekannten und vermuteten Auswirkungen auf Schallemissionen, Erschütterungen und die Dynamik des Oberbaus. Die Ergebnisse der Literaturrecherche sind in [5] dokumentiert und werden in Abschnitt 5 zusammengefasst.

Erhebung und Analyse von Messdaten. Im Zentrum der Untersuchung steht die messtechnische Erfassung relevanter Daten unter realen Betriebsbedingungen. Diese erfolgt in mehreren Teilkomponenten:

- Nutzung vorhandener Messtechnik im Fahrbahnlabor zur Erfassung von Luftschall, Erschütterungen sowie dynamischen Reaktionen des Gleisoberbaus.
- Erweiterung der Messinfrastruktur durch den Einbau des Radmonitoringsystems WMS mit hochpräziser Sensorik zur kontinuierlichen Erfassung der Radunrundheiten sämtlicher vorbeifahrender Räder. Dies umfasst insbesondere die Detektion und Klassifikation von Flachstellen, Polygonen sowie den akustischen Radrauheiten.
- Zentralisierte Datenhaltung: Sämtliche erfassten Messdaten werden in Datenbanken gespeichert, die eine systematische und verknüpfte Auswertung ermöglichen.
- Statistische Auswertungen des Auftretens von Radunrundheiten
- Qualitative und quantitative Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Radunrundheiten und den Schall- und Erschütterungs-Emissionen und Beanspruchungen. Hierbei werden sowohl Mittelwerte für Fahrzeugkategorien als auch der Zeitverlauf einzelner Fahrzeuge.

Bewertung der Ergebnisse. Die abschließende Bewertung dient der Einordnung der gewonnenen Erkenntnisse. Sofern Radunrundheiten eine nennenswerte Relevanz besitzen, sollen Handlungsempfehlungen zur Reduktion von Radunrundheiten sowie zur Minderung der daraus resultierenden negativen Auswirkungen auf Lärm, Erschütterungen und die Infrastruktur abgeleitet werden.

2.4 Wissenslücken und Projektbeiträge

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die zu untersuchenden Wissenslücken und die Beiträge dieses Projekts zum Schießen derselben.

Tabelle 1. Wartungen und der Gleismessungen an den Bahnlärmmonitoring-Stationen.

Bestehende Wissenslücke	Projektbeitrag
Fehlende belastbare Daten über Radunrundheiten	Systematische Erhebung und statistische Auswertung realer Radunrundheiten im Schweizer Schienenverkehr an der Messstelle bei Sempach
Keine Quantifizierung des Zusammenhangs zwischen Radunrundheiten und Schall-/Erschütterungsemission sowie Oberbaudynamik	Analyse und Quantifizierung der Auswirkungen von Radunrundheiten auf Schall, Erschütterungen und Oberbau
Fehlende Studien zur Entwicklung von Radunrundheiten	Aufbau und Durchführung von Langzeituntersuchungen zur zeitlichen Entwicklung von Radunrundheiten

3 Radunrundheiten

Radunrundheiten (Abweichungen von der idealen Kreisform eines Rades) stellen eine zentrale Herausforderung im Eisenbahnbetrieb dar, da sie die dynamische Interaktion zwischen Rad und Schiene maßgeblich beeinflussen. Unrundheiten können zu erhöhtem Verschleiß, verstärkten Schwingungen und Lärmemissionen führen und somit die Betriebssicherheit und den Fahrkomfort beeinträchtigen.

Zur Klassifizierung und Bewertung von Radunrundheiten dienen EN 15313 [19] bzw. UIC B 169/DT 405 [20], die einige Kriterien für die Instandhaltung von Radsätzen festlegen. Gemäß dieser Norm wird die Radunrundheit durch die Differenz zwischen der maximalen und der minimalen Amplitude über den Radumfang definiert. Diese Festlegung berücksichtigt nicht, ob es sich um einen lokal begrenzten Defekt oder über den gesamten Umfang verteilten Unregelmäßigkeiten handelt. Auch die Wellenlängen der Defekte, welche für die dynamische Anregung von zentraler Bedeutung sind, bleiben unberücksichtigt.

Für eine fundierte Bewertung der Auswirkungen auf Schall- und Erschütterungsemissionen sowie auf die Oberbaudynamik ist jedoch eine differenziertere Klassifizierung unerlässlich.

3.1 Klassierung von Radunrundheiten

Radunrundheiten führen zu periodischen oder impulsartigen Kräften im Rad-Schiene Kontaktpunkt, die je nach Charakteristik unterschiedliche physikalische Wirkmechanismen auslösen.

Für eine differenzierte Analyse der Ursachen-Wirkungs-Zusammenhänge sowie zur Ableitung geeigneter Maßnahmen zur Minderung der Emissionen ist daher eine Klassifizierung der Radunrundheiten nach physikalischer Wirkung und geometrischer Ausprägung erforderlich:

- Kurzwellige Unregelmäßigkeiten (z. B. akustische Radrauheit) wirken vorrangig auf die Luftschallentstehung (Rollgeräusch),
- Langwellige Formen (z. B. Polygone) beeinflussen primär die Erschütterungsausbreitung sowie die Oberbaudynamik,
- Lokale Defekte (z. B. Flachstellen) erzeugen impulsartige Belastungen, die alle drei Wirkungsbereiche simultan adressieren können.

Für die vorliegende Untersuchung wird daher die folgende Klassierung verwendet:

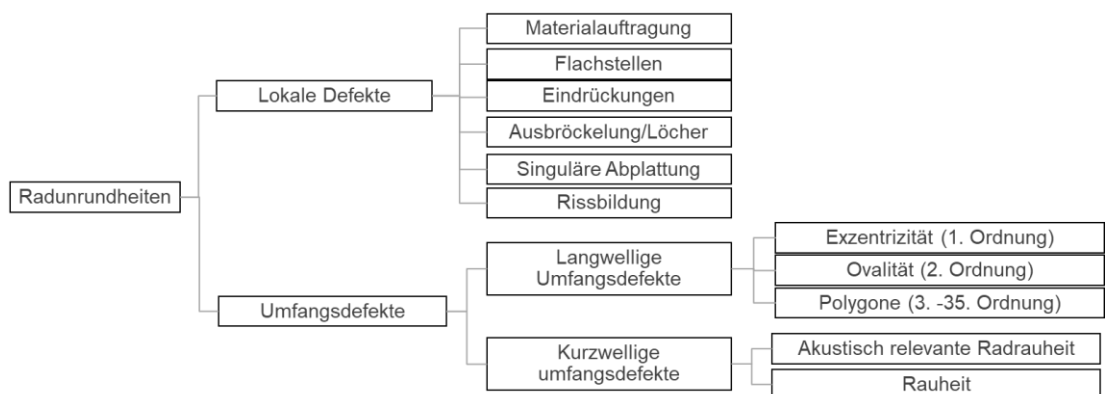


Abbildung 1. Klassierung von Radunrundheiten.

Im Folgenden werden die drei dominanten Formen – Flachstellen, Polygone und akustische Radrauheit – systematisch beschrieben und in Hinblick auf ihre Wirkmechanismen untersucht.

In der vorliegenden Untersuchung werden neben Flachstellen auch weitere lokale Raddefekte wie Ausbröckelungen und Materialauftragungen betrachtet. Diese Defekte führen ebenfalls zu impulsartigen Belastungen im Rad-Schiene-Kontakt und können hinsichtlich ihrer Auswirkungen gemeinsam mit Flachstellen behandelt werden. Im weiteren Verlauf der Untersuchung keine separate Unterscheidung; alle lokalen Effekte werden unter dem Begriff "Flachstellen" subsumiert.

3.1.1 Lokaler Defekt, Flachstelle

3.1.1.1 Definition

Flachstellen stellen eine Form lokaler Radunrundheiten dar. Sie entstehen typischerweise infolge von Gleiten zwischen Rad und Schiene, etwa bei blockierten Bremsen oder durch das Versagen von Gleitschutzsystemen. Akustisch äußern sich Flachstellen als impulsartige Geräusche mit charakteristischem periodischem „Klopfen“, das bei jeder Radumdrehung erneut auftritt. Auf den Radlaufflächen sind ovale Zonen erkennbar

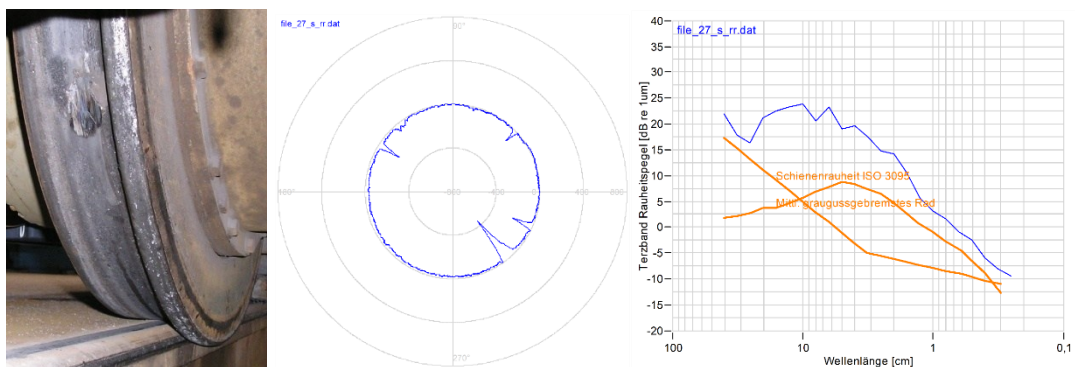


Abbildung 2. Rad mit Flachstelle, Polarplot und Wellenlängen-Terzspektrum.

Ein wesentliches Merkmal von Rädern mit Flachstellen ist die periodisch auftretende Impulsbelastung im Rad-Schiene-Kontakt. Bei jeder Radumdrehung führt die abgeflachte Stelle zu einem hochfrequenten Kraftstoß, der sich in einem charakteristischen, rhythmischen „Klopfgeräusch“ äußert. Je nach Ausprägung der Flachstelle kann dieser Impuls erhebliche dynamische Kräfte erzeugen und sowohl das Fahrzeug als auch die Infrastruktur stark beanspruchen.

Neben den Flachstellen treten in der Praxis auch andere lokale Unregelmäßigkeiten auf, etwa Materialausbröckelungen an der Lauffläche. Auch diese führen zu vergleichbaren Impulsanregungen und werden im Rahmen dieser Betrachtung gleichwertig zu Flachstellen behandelt, da sie hinsichtlich ihrer dynamischen Wirkung auf das Rad-Schiene-System ähnliche Effekte erzeugen.

3.1.1.2 Entstehungsmechanismen

Flachstellen resultieren i.d.R. durch das Gleiten des Rades auf der Schiene infolge:

- festsitzender Bremsen
- Ausfall von Gleitschutz
- Angezogene Handbremsen
- Hemmschuhbremsungen

Im Allgemeinen treten Flachstellen gegenüberliegend an beiden Rädern eines Radsatzes auf. Bisweilen weist nur ein Rad eines Radsatzes Flachstellen auf (Hemmschuhbremsung) UIC B 169/DT 405 [20].

3.1.1.3 Auswirkungen von Flachstellen

Flachstellen auf der Radlaufläche haben eine Vielzahl nachteiliger Auswirkungen auf das Fahrzeug und die Infrastruktur. Zu den wichtigsten Effekten zählen:

- eine verringerte Betriebssicherheit infolge erhöhter mechanischer Belastungen,
- eine verstärkte Beanspruchung und frühzeitige Schädigung von Radsatz, Lagern und Fahrzeugkomponenten,
- die Begünstigung von Ausbröckelungen und die Initiierung von Rissbildungen in der Radoberfläche,
- eine erhöhte Schallemission in Form impulsartiger Geräusche,
- eine zunehmende Erschütterungsausbreitung in die Umgebung durch kurzzeitige Stoßbelastungen,
- sowie eine verstärkte dynamische Beanspruchung des Gleisoberbaus, die zu strukturellen Schäden im Fahrweg führen kann.

In ihrer Gesamtheit stellen Flachstellen damit eine relevante Quelle für betriebliche, akustische und infrastrukturelle Belastungen dar.

3.1.2 Polygone

3.1.2.1 Definition

Polygone bezeichnen regelmäßige Rundlaufabweichungen über den gesamten Radumfang, die sich in Form wellenförmiger Strukturen ausbilden. Die Anzahl dieser Wellen über den Umfang wird als Ordnung bezeichnet. Typischerweise treten Polygone im Bereich der 3. bis 35. Ordnung auf.

Polygone können entweder durch eine dominante Wellenlänge charakterisiert sein oder aus einer Überlagerung mehrerer Wellenanteile bestehen. Die Amplitude dieser Wellen – gemessen als Spitzenwertdifferenz („peak to peak“) – bewegt sich in der Regel zwischen einigen Mikrometern bis zu etwa 0,5 mm. Sie kann entweder gleichmäßig über den Umfang verteilt oder stark variabel sein. Auch die Verteilung über die Breite der Laufläche ist uneinheitlich: das Amplitudenmaximum kann sowohl in der Nähe des Spurrandes als auch im Bereich der Lauflächenmitte oder an den Stirnseiten auftreten.

In der betrieblichen Praxis zeigt sich, dass Polygonbildung meist nur einzelne Räder innerhalb einer Fahrzeugflotte betrifft, sodass eine gezielte Zustandsüberwachung auf Einzelradsatzebene erforderlich ist.

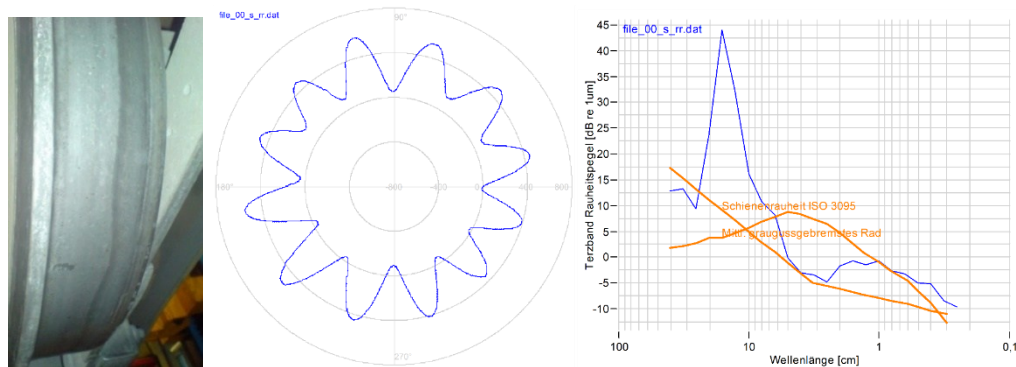


Abbildung 3. Radpolygon, Polarplot, Ordnungsspektrum und Wellenlängen-Terzspektrum

3.1.2.2 Entstehungsmechanismus

Die Ausbildung von Polygonen ist ein komplexer Prozess, der auf verschiedene mechanische, dynamische und fertigungstechnische Einflüsse zurückgeführt werden kann. Die folgenden Mechanismen gelten als mögliche Ursachen:

- **Fertigungseinflüsse:** Bei der Einspannung des Rades mittels Dreibackenfutter zum Überdrehen kommt es zu einer elastischen Verformung des Radkörpers. Nach dem Lösen der Einspannung deformiert sich das Material zurück und die durch die Fixierung induzierte Formabweichung bleibt erhalten.
- **Vibrationen beim Überdrehen (Werkzeugschwingungen),** können wellenförmige Oberflächenprofile erzeugen.
- **Vertikaldynamische Eigenmoden von Radsatz, Drehgestell oder Wagenkasten** können im Fahrbetrieb zu periodischen Schwankungen der Radaufstandskräfte führen. Diese periodischen Lastwechsel begünstigen Materialumlagerungen im Radkörper und können über längere Zeiträume hinweg zur Ausbildung von Polygonen führen.
- **Fahrzeug-Fahrweg Interaktion:** vertikaldynamische Schwingungen des gekoppelten Systems Fahrzeug-Fahrweg
- **Vertikaldynamische Effekte in Verbindung mit Beschleunigen/Bremsen**
- **Stick-slip-Effekt beim Quergleiten bei Kurvenfahrten**
- **Ein Spurfehler der Radsätze** kann zu einem großen Gierwinkel führen. Bei Geradeausfahrt treten seitliche stick-slip Schwingungen auf, welche die Welligkeit auf Rad und Schiene bedingen.
- **Kopieren von Polygonen beim Überdrehen von Rädern,** abhängig von der Bauart der Drehbänke.

Diese Vielfalt an Ursachen verdeutlicht, dass die Entstehung von Polygonen sowohl durch initiale Fertigungsabweichungen als auch durch betriebsinduzierte Schwingungsprozesse bedingt sein kann. Eine präzise Diagnostik und gezielte Instandhaltungsstrategie ist daher essenziell, um die langfristige Geometriequalität von Radsätzen sicherzustellen.

3.1.2.3 Auswirkungen von Polygonen

Die periodische Struktur von Polygonen führt zu einer harmonischen Anregung des Rad-Schiene-Systems bei definierten Frequenzen, die sich aus der Wellenlänge der Polygone und der Fahrzeuggeschwindigkeit ergeben. Aufgrund ihrer typischerweise eher längeren Wellenlängen regen Polygone vorrangig tieffrequente Schwingungen an. Diese wirken sich besonders im Bereich des Körperschalls aus und beeinflussen sowohl das Fahrzeuginnere als auch die Gebäude entlang der Strecke.

Die damit verbundenen Auswirkungen sind vielfältig:

- Sicherheitsrelevante Einschränkungen, insbesondere bei Hochgeschwindigkeitszügen, da periodisch wirkende Kräfte Resonanzeffekte und verstärkte Rad-Schiene-Schwingungen begünstigen können.
- Erhöhte mechanische Beanspruchung und potenzielle Schädigung von Radsatz, Lagern, Fahrwerk und Fahrwegkomponenten infolge zyklischer Belastung.
- Tieffrequente Geräuschphänomene im Fahrzeuginneren – insbesondere ein wahrnehmbares „Dröhnen“ – das den akustischen Komfort erheblich beeinträchtigen kann.
- Verstärkte Erschütterungsemissionen sowie erhöhter sekundärer Luftschall in angrenzenden Gebäuden.
- Zunahme der Oberbaudynamik, etwa durch periodische Zusatzkräfte im Rad-Schiene-Kontakt, die zu Setzungen, Kornverlagerungen im Schotterbett oder der Materialermüdung von Komponenten, wie z.B. Spannklemmen, führen können.

3.1.3 Akustische Radrauheit

3.1.3.1 Definition

Ein zentraler Entstehungsmechanismus des Rollgeräusches im Eisenbahnbetrieb ist die Anregung des Rad-Schiene-Systems durch Oberflächenrauheiten im Kontaktbereich. Besonders bedeutsam ist hierbei die sogenannte akustisch relevante Radrauheit, also jene Form der Rundlaufabweichung, die im akustisch relevanten Bereich der Schallentstehung wirksam ist. Gemeinsam mit der akustischen Schienenrauheit bildet sie die primäre Quelle für die rollgeräuschbedingte Luftschallemission.

Die akustische Radrauheit umfasst Unregelmäßigkeiten mit Wellenlängen von etwa 3 mm bis 10 cm – bei hohen Fahrgeschwindigkeiten wird ein Bereich bis zu 25 cm als relevant betrachtet. Die Amplitude dieser Rauheiten liegt typischerweise im Bereich von wenigen Mikrometern bis in den Sub-Mikrometerbereich. Trotz ihrer geringen Amplituden können diese Rauheiten aufgrund der hohen ungefederten Massen eine signifikante dynamische Anregung erzeugen und damit die Entstehung des typischen Rollgeräuschs maßgeblich bestimmen.

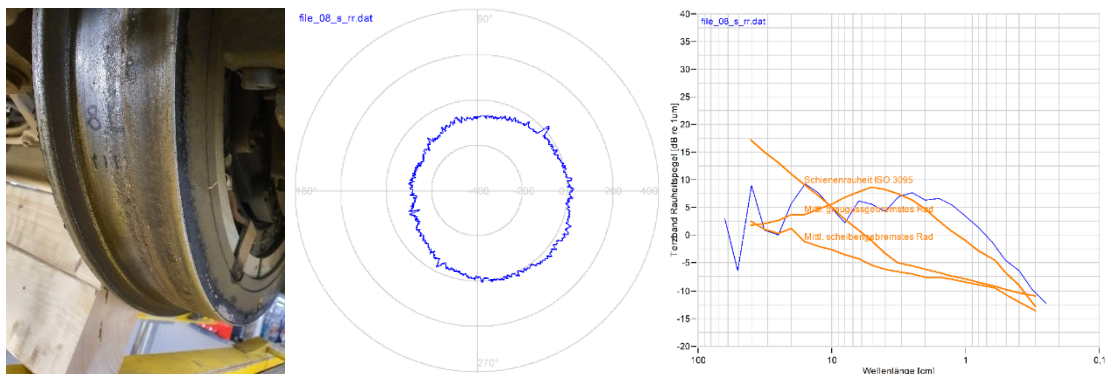


Abbildung 4. Rad mit hoher akustischer Rauheit, Polarplot und Wellenlängen-Terzspektrum (mit der Grenzkurve für die Schienenrauheit bei Typprüfung von Zügen und der Kurve eines typischen graugußgebremsten Rades und eines typischen scheibenbremsten Rades)

Bei Auftreten von Radunrundheiten wie dem gezeigten rauen Rad ist die akustische Radrauheit deutlich höher und damit dominierend für das Rollgeräusch. Die Abbildung zeigt, dass raue Räder akustische Rauheiten wie graugußgebremste Räder (Erhöhung der Schallemission um ca. 10 dB) besitzen können.

3.1.3.2 Entstehungsmechanismus

Die akustische Radrauheit entsteht durch eine Vielzahl betrieblicher und physikalischer Einflüsse im Rad-Schiene-Kontakt. Eine wesentliche Rolle spielt dabei die Mikrostruktur der Kraftübertragung, bei der selbst kleinste Relativbewegungen und Reibprozesse zu materialverändernden Effekten an der Radlauffläche führen können.

Zu den häufigsten Ursachen zählen:

- der generelle mechanische Verschleiß infolge zyklischer Belastung und Kontaktspannungen während des Fahrbetriebs
- das Bremsen mit Klotzbremsen (insbesondere bei Verwendung von LL- oder K-Sohlen), bei dem durch Reibung und thermische Einwirkung eine mikroskopische Aufrauung der Radoberfläche verursacht wird,
- sowie das Eindringen von Fremdstoffen, wie etwa Sand beim Sanden

Diese Prozesse führen zur Ausbildung von kleinskaligen Unregelmäßigkeiten auf der Lauffläche mit kleinen Amplituden.

3.1.3.3 Auswirkungen der akustischen Radrauheit

Die akustische Radrauheit und die akustische Schienenrauheit wirken durch ihre kurzen Wellenlängen als primäre Anregungsquelle für hohe Frequenzen im Rad-Schiene-Kontakt und sind somit maßgeblich für die Entstehung von Rollgeräuschen verantwortlich. Die jeweils höhere Rauheit dominiert dabei die Anregung der Schallentstehung.

Die akustischen Rauheiten führen zur Erzeugung von direktem Luftschall, der insbesondere im Mittel- bis Hochfrequenzbereich (ca. 500 Hz bis > 5 kHz) dominiert und die akustische Wahrnehmbarkeit vorbeifahrender Züge wesentlich beeinflusst.

Im Vergleich dazu sind die Auswirkungen der Radrauheit auf andere Wirkungskategorien – wie Erschütterungsausbreitung, sekundären Luftschall, Oberbaudynamik sowie Wartungs- und Sicherheitsaspekte – deutlich geringer.

3.2 Messgrößen für Radunrundheiten

3.2.1 Radunrundheit

Die Radunrundheit wird durch eine Rundlaufmessung ermittelt beschreibt die Abweichung eines Rades von der idealen Kreisform. Die Radunrundheit wird als Differenz zwischen dem größten und dem kleinsten Radius über den gesamten Radumfang definiert.

Diese einfach gehaltene Klassifizierung wird in EN 15313 [19] als Grundlage für Instandhaltungsentscheidungen verwendet.

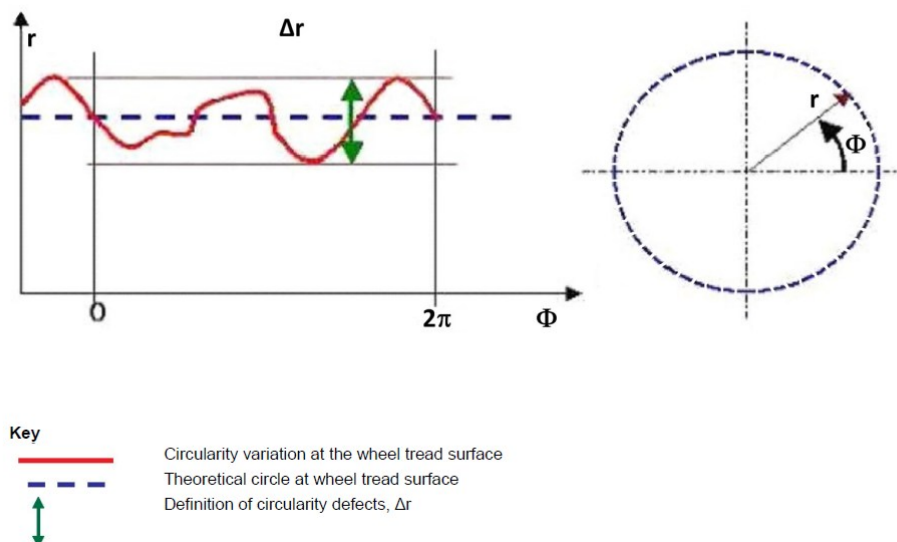


Abbildung 5. Radunrundheit (EN 15313 [19]).

3.2.2 Rauheitspegel Wellenlängen-Terzbandspektrum

Das Rauheitspegel-Wellenlängen-Terzbandspektrum wird in der Schall-emissionsberechnung als charakterisierende Kenngröße für die Anregung verwendet.

Das Rauheitspegel Wellenlängen-Terzbandspektrum wird aus einer direkten Messung gemäß EN 15610 [16] bestimmt oder kann alternativ mittels eines indirekten Messverfahrens gemäß CEN/TR 16891:2016 [18] aus der indirekten Gesamtrauheit ermittelt werden.

Es beschreibt den Rauheitspegel L_r in einem Terzspektrum über der Wellenlänge.

$$L_r = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{r_{RMS}}{1 \mu m} \right) \quad (1)$$

Mit

r_{RMS} : R.M.S. Effektivwert der Rauheit in Mikrometer [μm]

Grenzwerte für die akustischen Eigenschaften von Rädern existieren derzeit nur im Zuge der Zulassung neuer Bremssohlen ([8] Bericht über die dazugehörigen Untersuchungen [22]).

Informativ kann die akustische Radrauheit der zulässigen akustischen Schienenrauheit für die Abnahmeprüfung zur Zulassung neuer Schienenfahrzeuge oder typischen Radrauheiten für Räder mit Graugußbremssohlen, Kompositbremssohlen oder Scheibenbremsen gegenübergestellt werden.

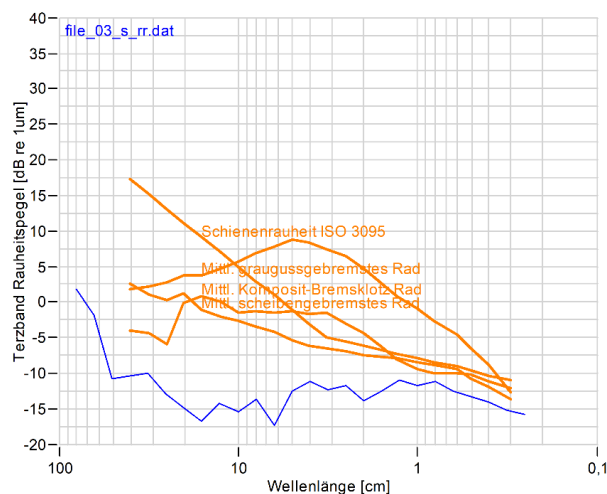


Abbildung 6. Rauheitspegel Wellenlängen-Terzbandspektrum der akustischen Radrauheit des Rades mit geringer akustischer Radrauheit. Zum Vergleich sind die Grenzkurven für die Schienenrauheit bei der Typprüfung von Zügen und die Radrauheiten eines typischen scheibengebremsten Rades, eines Rades mit Kompositebremssohlen und eines Rades mit Graugußbremssohlen eingetragen.

Für eine vereinheitlichende Bewertung kann aus dem Rauheitspegel Wellenlängen-Terzbandspektrum nach HARMONOISEy [23] der Rauheitseinzahlwert $L_{Ac,A}$ bestimmt werden.

3.2.3 Ordnungsspektrum

Der Rauheitspegel kann als Ordnungsspektrums auch über die Radordnungen dargestellt werden. Diese Darstellung wird häufig für Radpolygone verwendet.

Die folgende Abbildung zeigt das Rauheitspegel-Ordnungsspektrum eines polygonisierten Rades.

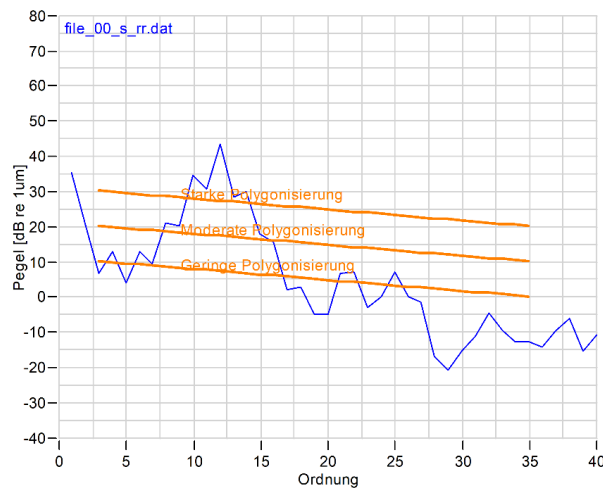


Abbildung 7. Rauheitspegel-Ordnungsspektrum eines polygonisierten Rades.

Die starke Ausprägung der 12. Ordnung zeigt, dass bei diesem Rad Wellen mit 12 Maxima/Minima dominant über den Radumfang vorhanden sind.

Eine Bewertung der Polygonisierung wurde von Müller-BBM Rail Technologies entwickelt. Hierzu wurden auf Basis der Analyse zahlreicher Räder und derer bekannter Problemstellungen Polygon Assessment (PA)-Grenzkurven auf Basis des Ordnungsspektrum bestimmt. Die Räder werden der Zone zugeordnet, deren obere Grenze durch die Ordnungsspektren nicht überschritten wird.

Darauf aufbauend wurden Wartungsempfehlungen für konventionelle und Hochgeschwindigkeitszüge ermittelt.

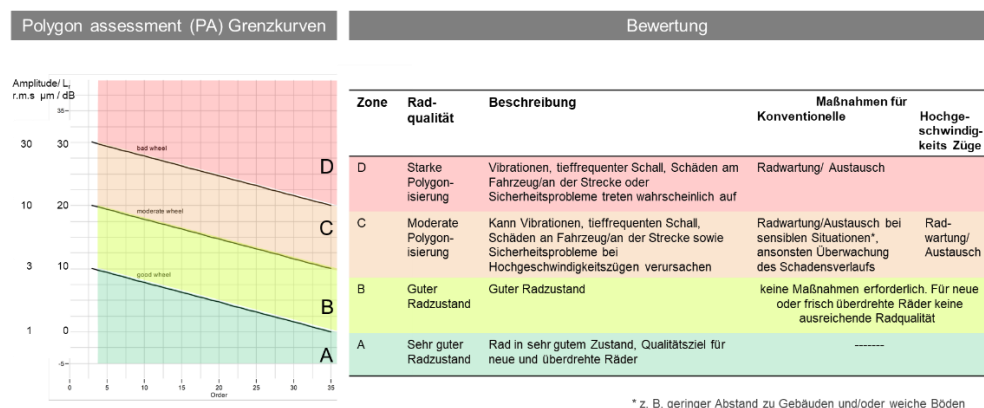


Abbildung 8. Polygon Assessment (PA)-Grenzkurven

3.2.4 Dynamische Radlast

Mittels Messeinrichtungen im Gleis kann der dynamische Radkraftzeitverlauf und damit die maximale und minimale dynamische Radlast im Verhältnis zur statischen Radlast bestimmt werden.

Insbesondere bei Impulsen infolge von Flachstellen ist die dynamische Radlast, im Vergleich zu statischen Radlast, stark überhöht.

Die Zugskontrolleinrichtungen (ZKE) in der Schweiz verwenden als sicherheitsrelevantes Kriterium die dynamische Radaufstandskraft. Maßnahmen werden ergriffen, wenn die dynamische Radaufstandskraft einen bestimmten Prozentsatz der statischen Radaufstandskraft überschreitet.

Hier soll erwähnt werden, dass bislang noch keine umfängliche Untersuchung zur Verknüpfung der relativen Radlast mit der geometrischen Ausprägung der Flachstelle vorliegt. Aufgrund der Vielzahl der beschreibenden Parameter einer Flachstelle (Länge, Breite, Tiefe, Aufwölbung vor/nach der Flachstelle) ist diese Korrelation nicht möglich. Es ist sinnvoller die dynamische Radlast als eigenständigen, beschreibenden Parameter zu verstehen.

3.3 Geometrische Grenzwerte

Geometrische Grenzwerte für Radunrundheiten für die Themenbereiche Schall, Erschütterung und Oberbaudynamik existieren nicht. Hinsichtlich der Wartung von Schienenfahrzeugen können folgende Regelungen herangezogen werden.

3.3.1 Radunrundheit

EN 15313 [19] nennt nach einer Nachprofilierung oder einer Bearbeitung eines Radreifens Grenzwerte für den Rundlauf in Radialrichtung in Abhängigkeit von der für das Fahrzeug zulässigen Höchstgeschwindigkeit. Die maximal zulässigen Werte für den Rundlauf in Radialrichtung von Rädern an derselben Achse in Abhängigkeit von der für das Fahrzeug zulässigen Höchstgeschwindigkeit beträgt

- 0,5 mm bei $v \leq 120$ km/h
- 0,3 mm bei $v > 120$ km/h

Bei festgeklemmten Achslagern bei Überdrehen wird empfohlen, einen Maximalwert von 0,2 mm Radialschlag anzunehmen,

Informativ werden im Anhang G von EN 15313 [19] zulässige Unrundheiten genannt: Konkrete Werte sollen im Instandhaltungsplan festgelegt werden.

Wheel diameter d (mm) Speed range v (km/h)	Permissible circularity defects (Δr) (mm)
d > 840 <ul style="list-style-type: none"> $v_{max} \leq 60$ $60 \text{ km/h} < v_{max} \leq 160$ $160 \text{ km/h} < v_{max} \leq 200$ $v_{max} > 200$ 	1,5 1,0 0,7 0,5
$380 < d \leq 840$ <ul style="list-style-type: none"> $v_{max} \leq 200$ $v_{max} > 200$ 	0,7 0,5
$d \leq 380$	0,3

Abbildung 9. Grenzwerte für Unrundheiten (EN 15313 [19]).

Nach AVV [21] darf die Unrundheit eines Rades max. 0,6 mm betragen. (bei Arbeiten in der Werkstatt an sicherheitsrelevante Komponenten)

3.3.2 Flachstellenlänge

Flachstellen werden aus sicherheitstechnischen Gründen häufig über ihre Länge charakterisiert.

Der Allgemeine Vertrag für die Verwendung von Güterwagen (AVV) [21] benennt folgende Grenzlängen, bei deren Überschreiten der Wagen auszusetzen ist

- bei einem Raddurchmesser über 840 mm als maximal zulässige Länge einer Flachstelle 60 mm
- bei einem Raddurchmesser zwischen 630 mm und 840 mm als maximal zulässige Länge einer Flachstelle 40 mm
- bei einem Raddurchmesser unter 630 mm als maximal zulässige Länge einer Flachstelle 35 mm

Die Länge einer Flachstelle ist jedoch nur eine Größe zur Beschreibung einer Flachstelle. Insbesondere im Hinblick auf die Schall- und Erschütterungsemission. Andere Einflussfaktoren neben der Länge sind Aufwölbungen am Ende der Flachstelle infolge der Materialumlagerung bei deren Entstehung und die Breite der Flachstelle.

4 Schall-/Erschütterungsemission und Oberbaudynamik infolge von Radunrundheiten

4.1 Entstehungsmechanismen Schall, Erschütterungen und Oberbaudynamik

Die Mechanismen der Entstehung von Schall, Erschütterungen und dynamischen Kräften im Oberbau bei Schienenfahrzeugen sind gut bekannt, in Simulationsprogrammen umgesetzt und validiert [6], [7].

Das folgende mechanische Ersatzmodell beschreibt die Anregung und die Entstehung:

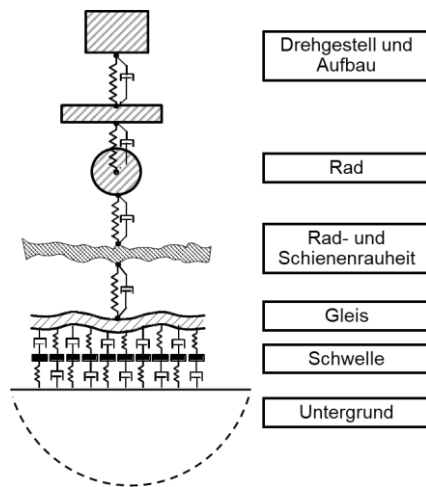


Abbildung 10. Entstehungsmechanismen Schall, Erschütterungen Oberbaudynamik

Anregung: Die dynamischen Kräfte entstehen vor allem aus folgenden Anregemechanismen:

- Radunrundheiten und Irregularitäten der Schienenoberfläche regen beim Rollvorgang Rad und Schiene zu Schwingungen an (Wegerregung). Maßgeblich für die Anregung und damit die Stärke des Rollgeräuschs ist die Summe der Radunrundheiten und Schienenirregularitäten. Radunrundheiten haben einen umso stärkeren Einfluss, je größer diese im Vergleich zu den Schienenirregularitäten sind. Dominieren die Schienenirregularitäten, so haben die Radunrundheiten einen geringen Einfluss. Sind die Radunrundheiten größer als die Schienenirregularitäten so dominieren die Radunrundheiten die Wegerregung. Die relevanten Radunrundheiten sind in diesem Zusammenhang lokale Defekte wie Flachstellen (Abschnitt 3.1.1), Polygone (Abschnitt 3.1.2) und die akustische Radrauheit (Abschnitt 3.1.3). Die gewählte Messstelle des Fahrbahnlabors eignet sich gut für die Untersuchungen der Radunrundheiten, da hier eine sehr geringe Schienenrauheit vorliegt (s. Abschnitt 6.3).
- Die Kontaktfläche zwischen Rad und Schiene wirken als Filter für kurzweilige Anregungen; bei einer Größe der Kontaktfläche von ca. 10 mm x 15 mm sind kurzweilige Anregungen mit einer Wellenlänge < 1 cm nur von geringer Relevanz.
- Periodizitäten im Lastbild des Zuges. Diese können aus einer Fourieranalyse des Lastbildes ermittelt werden.
- Steifigkeitsschwankungen des Gleis-Oberbau-Systems beim Überrollvorgang führen zu einer örtlich wechselnden statisch/dynamischen Einsenkung der Schienenlauffläche. Diese Form der Anregung wird als parametrische Schwingungserregung bezeichnet. Steifigkeitsschwankungen treten an diskreten Übergangsstellen (Auffahrt auf Widerlager einer Brücke von der freien Strecke), periodisch im Schwellenabstand (bedingen die sog.

Schwellenfachfrequenz) und stochastisch (z.B. wechselnde Bettungssteife des Schotters oder des Planums) auf.

- Kräfte aus der Unwucht des drehenden Rades.

Schwingungsentstehung: Die Anregung bedingt Schwingungen und dynamische Kräfte der Radscheiben, des Drehgestells des Wagenkastens und des Oberbaus. Die Amplitude und der Frequenzgehalt der dynamischen Kräfte hängen von der Anregung und den mechanischen Eigenschaften von Fahrzeug und Fahrweg (Impedanzen bzw. dynamische Steifigkeiten und Dämpfungen) ab.

Schwingungsübertragung: Die Schwingungen werden als Körperschall in den Wagenkasten und über den Schotter als Wellen in das umgebende Erdreich weitergeleitet und somit als Erschütterungen spürbar oder in Gebäuden entlang der Strecke als sekundärer Luftschall hörbar.

Schallentstehung: Die Schwingungen werden außerdem, hauptsächlich von den Radscheiben und den Schienen, als Luftschall abgestrahlt. Das Rad strahlt im Wesentlichen im Frequenzbereich über 1000 Hz ab, die Schiene vor allem bis ca. 1000 Hz. Typischerweise sind bei Gleisoberbauten mit steifen Zwischenlagen die Schallemissionen von Rad und Schiene in etwa gleich groß. Einfluss auf den abgestrahlten Schall hat das Abstrahlverhalten von Rad und Schiene, welches u. a. durch deren Geometrie bestimmt ist.

Drehgestell und Wagenkasten sind von den Rädern elastisch entkoppelt, wodurch die Schwingungsamplituden im akustisch relevanten Bereich reduziert werden. Im Allgemeinen ist die Schallabstrahlung von Drehgestell und Aufbau von geringerer Bedeutung. Insbesondere bei Güterwagen darf dieser Effekt aufgrund der dort geringeren Entkopplung des Drehgestells jedoch nicht gänzlich außer Acht gelassen werden.

4.2 Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit

Die Anregungsfrequenz kann mit Hilfe der folgenden Gleichung errechnet werden:

$$f_x = \frac{v_{\text{Zug}}}{x} \quad (2)$$

mit

- f_x Frequenz in Hz,
- v_{Zug} Zuggeschwindigkeit in m/s,
- x Wellenlänge der Radunrundheit bzw. Schienenirregularität,
Wellenlänge der Periodizität im Lastbild des Zuges, Schwellenabstand,
etc. in m

Die folgende Abbildung zeigt den Zusammenhang zwischen verschiedenen Radunrundheiten und Irregularitäten der Schiene und den Erschütterungen und dem Luftschall.

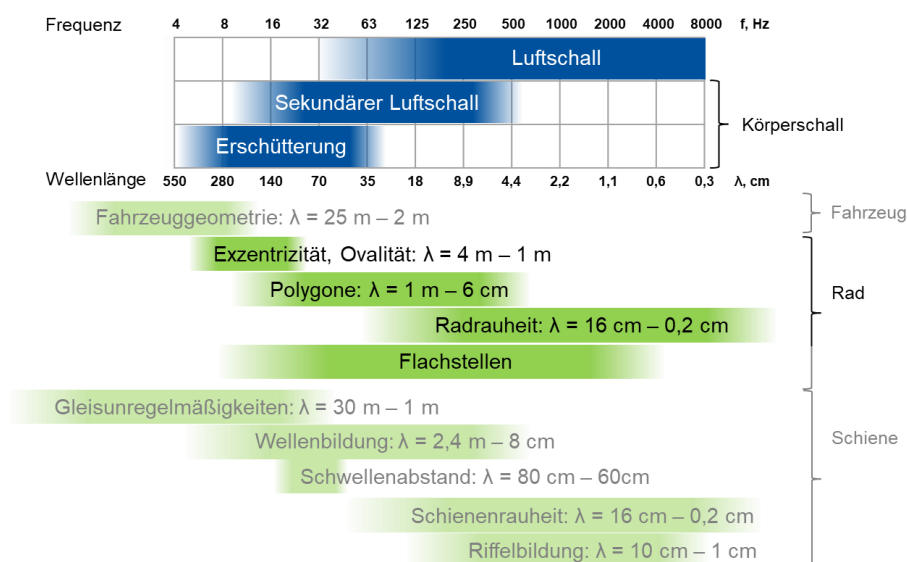


Abbildung 11. Zusammenhang zwischen Radunrundheiten/Schienenirregularitäten und Erschütterungen, sekundärem Luftschall und Luftschall für eine Zuggeschwindigkeit von 80 km/h.

Die dargestellte Abbildung verdeutlicht die maßgeblichen Einflussfaktoren auf die Erzeugung von Erschütterungen sowie primärem und sekundärem Luftschall. Auf radseitiger Ebene tragen insbesondere Exzentrizitäten, Ovalitäten und Polygone zur Anregung von Erschütterungen und Körperschall bei. Auf der Gleisseite sind dies vor allem wellenförmige Fahrflächenunebenheiten und der Schwellenabstand.

Demgegenüber beeinflussen Rauheiten an Rad- und Schienenoberflächen sowie Riffelbildungen vorrangig die direkte Schallerzeugung.

Eine besondere Stellung nehmen Flachstellen ein: Diese stellen diskontinuierliche Unregelmäßigkeiten dar, die in der Lage sind, sowohl Erschütterungen, sekundären Luftschall (über Körperschallpfade) als auch direkten Luftschall anzuregen.

4.3 Schallentstehung

Der Beitrag der Radrundheit – in diesem Kontext als akustische Radrauheit bezeichnet und der Schienenirregularität -akustische Schienenrauheit - am Rollgeräusch kann folgendermaßen dargestellt werden.

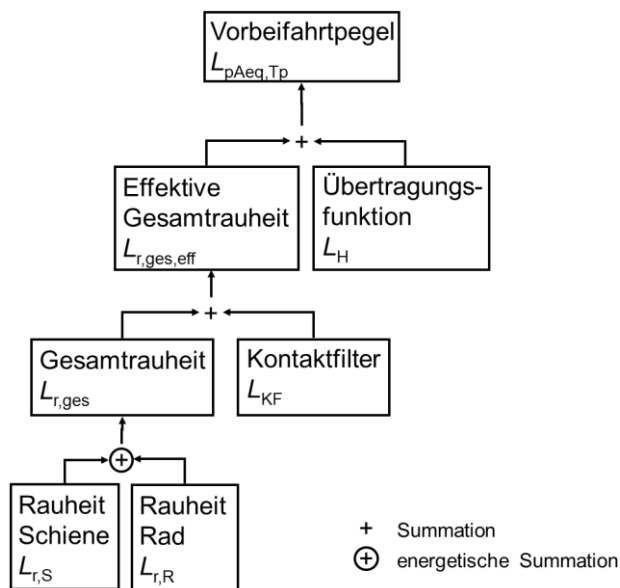


Abbildung 12. Entstehung des Rollgeräusches in Abhängigkeit von Rad-, Schienenrauheit und Transferfunktion.

Die Abbildung zeigt deutlich, dass Rad- und Schienenrauheit die dominanten Anregungsmechanismen für das Rollgeräusch darstellen. Dabei gilt: Die Rauheit mit dem jeweils höheren Amplitudenanteil bestimmt maßgeblich das Geräuschniveau – das heißt, die Komponente mit der größeren Rauheit liefert den überproportionalen Beitrag zur Schallerzeugung im Rad-Schiene-Kontakt.

4.4 Erschütterungsentstehung

Die maßgeblichen Anregungsmechanismen für Schwingungen im Rad-Schiene-System lassen sich verschiedenen geometrischen und fahrwegbezogenen Unregelmäßigkeiten zuordnen. Dazu zählen insbesondere:

- Exzentrizitäten,
- Polygone,
- Flachstellen,
- Regelmäßigkeiten in der Fahrzeuggeometrie (z. B. durch periodische Strukturen),
- sowie gleisseitige Unregelmäßigkeiten wie Wellenbildung an der Schienenoberfläche.

Diese Anregungen induzieren vertikale und horizontale mechanische Schwingungen im Oberbau (Oberbaudynamik). In der Folge entstehen Erschütterungen, die sich in das Umfeld der Bahnstrecke ausbreiten und dort als potenziell störende oder schädliche Einwirkungen auf Gebäude, technische Einrichtungen und Personen wahrgenommen werden können.

4.5 Relevanz der Radunrundheiten für Schall, Erschütterungen und Oberbaudynamik

Aufgrund ihrer charakteristischen Wellenlängen und Frequenzbereiche weisen verschiedene Typen von Radunrundheiten prinzipiell eine jeweils unterschiedliche Relevanz für die Entstehung von Schallemissionen, Erschütterungen und Oberbaudynamik auf (vgl. Abschnitt 3.1). Diese Unterschiede lassen sich systematisch einordnen und sind in der folgenden Abbildung dargestellt. Dunklere Farbnuancen symbolisieren eine höhere Relevanz des jeweiligen Phänomens für den betrachteten Wirkungsbereich. Inwieweit sich die Effekte an einer Messstelle einstellen ist von den dort vorliegenden spezifischen Ausprägungen der Radunrundheiten und den Oberbau- und Bodeneigenschaften abhängig. Es ist daher möglich, dass die Effekte an einer Messstelle in geringerem Maß auftreten. Die Stärke des Auftretens an der Messstelle Fahrbahnlabor wird in diesem Bericht untersucht.

Radunrundheitstyp	Schall	Erschütterungen	Oberbaudynamik
Lokale Defekte / Flachstellen	Hoch	Hoch	Hoch
Polygone	Mittel	Hoch	Hoch
Akustische Radrauheit	Hoch	Gering	Gering

Abbildung 13. Einordnung der Relevanz verschiedener Radunrundheiten für die Wirkungskategorien Schall, Erschütterungen und Oberbaudynamik. Die Einschätzungen basieren auf den typischen Wellenlängen und Anregungsmechanismen der jeweiligen Unregelmäßigkeiten.

5 Literaturrecherche - Zusammenhänge zwischen Radunrundheiten und der Schallemission, Erschütterungsemission und der Oberbaudynamik

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über den aktuellen Stand der wissenschaftlichen und technischen Literatur hinsichtlich der Auswirkungen von Radunrundheiten. Im Fokus stehen die drei wesentlichen Effekte:

- Schallemission (Rollgeräusch),
- Erschütterungsemission, d. h. die über das Gleis und den Oberbau übertragenen Körperschallanteile sowie die
- dynamische Beanspruchung des Oberbaus, die sich in Form erhöhter Schwingungsanregungen und struktureller Belastungen äußert.

Die Darstellung beruht auf einer gezielten Sichtung und Auswertung einschlägiger Fachpublikationen, technischer Regelwerke sowie vorhandener Projektberichte.

Ein Großteil der inhaltlichen Grundlagen wurde bereits in [5] detailliert behandelt. Daher beschränkt sich dieses Kapitel auf eine kompakte Zusammenfassung der dort gewonnenen Erkenntnisse. Für weiterführende methodische und quantitative Details wird auf den vollständigen Bericht [5] verwiesen.

Im Folgenden werden die zentralen Aussagen der Literatur hinsichtlich Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen, relevanter Einflussgrößen sowie bestehender Wissenslücken zusammengefasst.

5.1 Schall

5.1.1 Radrauheit

In Fällen, in denen das Rad besonders rau ist, bestimmt dieses die Schallemission. Dies ist insbesondere dann relevant, wenn infolge von Bremsvorgängen (z. B. bei LL- oder K-Sohlen), Materialverschleiß oder mangelhafter Wartung eine hohe Rauheit an der Radlaufläche entsteht.

Einzelne Räder können deutlich erhöhte Rauheitswerte aufweisen, die vergleichbar mit jenen graugußgebremster Räder sind. In solchen Fällen können Schallemissionen auftreten, die das typische Niveau eines scheidengebremsten Fahrzeugs um bis zu 10 dB oder mehr übersteigen.

Rauhe Räder stellen eine signifikante Schallquelle dar und können das Geräuschniveau entlang der Bahnstrecke erheblich erhöhen. Sie unterlaufen damit den positiven Effekt leiser Bremstechnologien und stellen ein wesentliches Ziel für gezielte Wartungs- und Überwachungsmaßnahmen dar.

5.1.2 Flachstellen

Untersuchungen belegen, dass Flachstellen einen signifikanten Einfluss auf die Schallemission von Schienenfahrzeugen haben:

- Laut einer Studie [24] sind Wagen mit deutlich wahrnehmbaren Flachstellen im Mittel rund 8 dB lauter als solche ohne akustisch auffällige Flachstellen.
- In einer weiteren Erhebung [25] wurde gezeigt, dass 60 % der Fahrzeuge, die den TSI-Grenzwert für Lärmemissionen um mehr als 3 dB überschreiten, Flachstellen aufwiesen – was eine hohe Korrelation zwischen Flachstellen und überhöhten Emissionen nahelegt.
- Weitere Analysen [13] zeigen, dass die akustische Auffälligkeit von Flachstellen vom übrigen Geräuschniveau des Fahrzeugs abhängig ist. Bei bereits lauten Fahrzeugen verursachen Flachstellen nur eine geringe zusätzliche Pegelerhöhung (0–3 dB), während sie bei leisen Fahrzeugen Unterschiede von bis zu 10 dB hervorrufen können.

Modellgestützte Untersuchungen (Thompson [6]) bestätigen den Einfluss verschiedener Parameter auf die Schalleistung flachstellenerzeugter Geräusche und damit der Komplexität der Zusammenhänge:

- Die Schalleistung steigt mit der Fahrgeschwindigkeit um etwa $20 \log_{10}(v)$, während das Rollgeräusch mit $30 \log_{10}(v)$ zunimmt. Somit sind Flachstellengeräusche insbesondere bei niedrigeren Geschwindigkeiten auf glatten Schienen dominant.
- Die Tiefe der Flachstelle wirkt sich deutlich auf den Pegel aus: eine Erhöhung von 1 mm auf 2 mm kann – abhängig von der Geschwindigkeit – eine Pegeldifferenz von 1 bis 5 dB verursachen.
- Auch die Radlast hat einen relevanten Einfluss: Eine Verdopplung der Last von 50 kN auf 100 kN kann eine Schalleistungszunahme von ca. 3 dB bewirken.
- Zudem reduziert sich das Geräuschniveau über die Zeit, da sich scharfe Kanten durch Betriebseffekte „ausfahren“ und geglättet werden.

Flachstellen sind damit eine **zentrale Ursache für erhöhte Schallemissionen**, insbesondere bei langsam fahrenden Zügen und leisen Fahrzeugen. Ihre akustische Wirkung ist stark von Tiefe, Radlast, Geschwindigkeit und Schienenzustand abhängig und kann lokale Lärmbelastungen erheblich verstärken.

5.1.3 Polygone

Im Gegensatz zur akustischen Radrauheit wirken Polygone im tieffrequenten Bereich, der typischerweise unterhalb von 500 Hz liegt. Sie tragen somit insbesondere zur Emission von sekundärem Luftschall und strukturgetragendem Körperschall bei – etwa im Fahrzeug oder in angrenzenden Gebäuden.

Polygone verursachen primär tieffrequente Emissionen im Frequenzbereich des sekundären Luftschalls und Körperschalls. Ihre Wirkung ist besonders relevant für den sekundären Luftschall in Gebäuden und das Innengeräusch in Zügen.

5.2 Erschütterungen

5.2.1 Polygone

Im Rahmen des europäischen Forschungsprojekts RIVAS ([27] - [29]) wurden gezielte Untersuchungen zu Polygonen und deren Auswirkungen auf die Erschütterungsemission durchgeführt:

- Vergleichsmessungen an zwei Lokomotiven gleichen Typs mit unterschiedlich stark ausgeprägter Polygonalisierung zeigten Unterschiede im Erschütterungspegel von bis zu 20 dB, sowohl im Gesamtsignal als auch innerhalb einzelner Frequenzbänder an dem Messquerschnitt.
- Die Terzbandanalyse der Bodenerschütterungen zeigt erhöhte Anregungen im Frequenzbereich von bis 150 Hz (Erschütterungen, sekundärer Luftschall).
- Rundlaufmessungen an zwei Loks zeigten insbesondere Polygone 14. und 28. Ordnung. Die Terzbandspektren zeigen eine breitbandige Überhöhung bei einer Lok mit hohen Radunrundheiten im Vergleich zu einer Lok mit mittleren Radunrundheiten um bis zu 30 dB bei Polygone mit Wellenlängen zwischen 10 cm und 1 m.

Die Emission ist von der Polygonamplitude, der Ordnung (Anzahl der Wellen über den Umfang), der Fahrgeschwindigkeit sowie den fahrweg- und fahrzeugseitigen Impedanzen abhängig.

Auswirkungen der Wartung. Die Studie dokumentiert ebenfalls, dass die Wartung polygonisierter Räder durch Überdrehen eine spürbare Reduktion der Erschütterungspegel um bis zu 12 dB zur Folge hat. Dies unterstreicht die hohe Bedeutung einer kontinuierlichen Zustandsüberwachung und gezielter Instandhaltungsmaßnahmen für die Begrenzung der Emissionsbelastung.

Polygone sind daher eine wesentliche Anregungsursachen für Erschütterungen im Bereich des Eisenbahnbetriebs. Eine konsequente Wartung ist daher essenziell zur Reduktion der Erschütterungsemissionen entlang von Bahnstrecken.

5.2.2 Flachstellen

Auch Flachstellen wurden im Rahmen der Messkampagnen mit dem im RIVAS-Projekt eingesetzten Testzug systematisch untersucht. Dabei erfolgte ein gezielter Vergleich der Erschütterungsspektren zweier Drehgestelle desselben Typs, die hinsichtlich ihrer allgemeinen Rundheitsabweichung vergleichbar waren. Nur eines der Drehgestelle wies eine ausgeprägte Flachstelle auf, das andere nicht.

Die Auswertung der Terzband-Erschütterungsspektren ergab signifikante Pegelunterschiede während der Zugvorbeifahrt. Insbesondere zeigten sich Erhöhungen der Erschütterungspegel um bis zu 10 dB im Vergleich der beiden Drehgestelle. Diese Unterschiede traten vor allem im Frequenzbereich oberhalb von 30 Hz (relevant für die menschliche Wahrnehmung von Erschütterungen und für sekundären Luftschall in Gebäuden).

Diese Ergebnisse belegen den Einfluss lokaler Radunregelmäßigkeiten auf die Erschütterungsbelastung der Umgebung und unterstreichen die Notwendigkeit einer gezielten Überwachung und Wartung zur Minimierung flachstellenbedingter Anregungen.

5.3 Oberbaudynamik

5.3.1 Allgemeines

Dynamische Zusatzbelastungen und deren Auswirkungen. Radunrundheiten können, abhängig von der Art der Radunrundheit, zyklische oder impulsartige Kräfte im Rad-Schiene-Kontakt bedingen. Diese dynamischen Zusatzbelastungen erzeugen Spannungen im Tragsystem des Oberbaus, die über das Maß der statischen Beanspruchung hinausgehen. In der Folge können:

- mechanischer Abrieb an Schotterkörnern,
- Kornzertrümmerungen und Umlagerungen,
- sowie Setzungen im Schotterbett auftreten [30].

Besonders anfällig sind Bereiche mit plötzlichen Steifigkeitssprüngen, wie sie etwa beim Übergang von freier Strecke auf Brückenbauwerke auftreten.

Resonanzbereiche und Schotterstabilität. Der Schotter als elastischer Bestandteil des Oberbaus reagiert nach Nottbeck besonders empfindlich im Bereich seiner Eigenfrequenzen, die typischerweise zwischen 25 Hz und 45 Hz liegen [31], [32]. Sun [33] ermittelt anhand von Prüfstandversuchen besonders hohe plastische Verformungen bei Frequenzen $f > 60$ Hz. Gall stellt in [34] wird mit Bezug auf Eisenmann [35] fest: „Das Schottergerüst reagiert insbesondere auf mittelfrequente Schwingungen im Bereich von 50-150 Hz empfindlich und zeigt als Folge solcher Vibrationen verstärkte Tendenzen einer „Verflüssigung“ und einer damit verbundenen Instabilität“.

In diesem Frequenzbereich kann es zu:

- Resonanzphänomenen mit überproportionalen Beschleunigungsantworten,
- und daraus resultierend zu starken plastischen Verformungen (Schotterverflüssigung) kommen.

Diese Frequenzen können insbesondere bei typischen Betriebsgeschwindigkeiten von 80–100 km/h (Güterverkehr) sowie 140–160 km/h (Personenverkehr) durch den regelmäßigen Schwellenabstand (z. B. 600 mm) oder Polygone (vgl. Abbildung 11) angeregt werden.

5.3.2 Flachstellen

Flachstellen wirken sich auch deutlich auf die dynamische Belastung des Gleisoberbaus aus. Durch ihre hohen lokalen Geometrieabweichungen erzeugen sie impulsartige Kontaktkräfte zwischen Rad und Schiene, die insbesondere bei höheren Fahrgeschwindigkeiten zu erheblichen Beanspruchungen der Gleiskomponenten führen.

Ergebnisse numerischer Analysen. In einer numerischen Studie [38] wurden die dynamischen Auswirkungen von Flachstellen auf den klassischen Schotteroberbau systematisch untersucht. Dabei wurden unterschiedliche Radkonfigurationen und Zuggeschwindigkeiten modelliert. Die Analyse ergab folgende zentrale Erkenntnisse:

- Die dynamische Stoßbelastung auf den Oberbau nimmt mit steigender Fahrzeuggeschwindigkeit deutlich zu. Schneller fahrende Fahrzeuge übertragen höhere Impulsenergien auf das Gleisbett, was zu einer erhöhten Materialbeanspruchung führt.
- Die Größe der Stoßbelastungen hängt maßgeblich von zwei Faktoren ab: der Zuggeschwindigkeit und der Gesamtsteifigkeit des Gleissystems. Gering gedämpfte oder unzureichend abgestützte Gleisstrukturen reagieren empfindlicher auf kurzzeitigen Lastspitzen.
- Besonders auffällig ist der dynamische Überhöhungsfaktor für die vertikale Schienendurchsenkung: Bei Rädern mit Flachstellen kann dieser bis zum Doppelten im Vergleich zur Durchbiegung eines runden Rades betragen. Dies bedeutet eine signifikant höhere mechanische Belastung für Schwellen, Befestigungssysteme und den Schotterkörper.

Technische Relevanz. Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass Flachstellen ein kritischer Faktor für die strukturelle Integrität des Oberbaus sind. Die durch sie ausgelösten stoßartigen Zusatzbelastungen können zu:

- Lokalen Schäden an Schienenbefestigungen,
- Überbeanspruchung und Bruch von Schwellen,
- sowie Setzungs- und Kornzertrümmerungsprozessen im Schotter führen.

Darüber hinaus erhöhen sie das Risiko für Langzeitschäden durch Materialermüdung und fördern die Entstehung von instationären Wellenformen im Fahrweg.

6 Messung der Radunrundheiten, der Schall- und Erschütterungsemissionen und der Oberbaudynamik

Die im Rahmen dieser Untersuchung durchgeführten Messungen fanden an einer technisch erweiterten Messstelle des Fahrbahnlabor – zur Messung der Schall- und Erschütterungsemissionen und der Oberbaudynamik - in der Nähe von Sempach statt. In das Fahrbahnlabor wurde ein Wheel Monitoring System (WMS) [3] integriert, das eine präzise Erfassung der Radunrundheiten ermöglicht. Die Integration des WMS erlaubt die systematische und synchronisierte Nutzung der Vielzahl an im Fahrbahnlabor installierten Sensoren, wodurch ein umfassenderes und qualitativ hochwertigeres Datenbild generiert werden kann.

6.1 Das Fahrbahnlabor

Funktion und Zielsetzung. Das **Fahrbahnlabor** [39] ist eine hochmoderne Teststrecke in der Schweiz, die vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) und dem Bundesamt für Verkehr (BAV) gemeinsam mit den SBB, der Empa und der Allianz Fahrweg betrieben wird. Es dient der umfassenden Erforschung und Optimierung der Bahninfrastruktur, insbesondere im Hinblick auf Lärminderung, Erschütterungsreduktion und der Optimierung der Oberbaudynamik.

Aufbau und Ausstattung. Auf einem etwa 1 km langen Abschnitt der SBB-Strecke zwischen Sempach und Rothenburg wurden sieben Messquerschnitte eingerichtet. Diese sind mit einer Vielzahl von Sensoren ausgestattet, darunter

- Beschleunigungsaufnehmer an Schiene, Schwelle und im Schotterbett
- **Mikrofone** zur Erfassung von Schallpegeln
- **Erschütterungssensoren** zur Messung von Bodenerschütterungen
- **Wetterstationen** zur kontinuierlichen Aufzeichnung von Umgebungsbedingungen wie Lufttemperatur, Schientemperatur, Schwellentemperatur, Feuchtigkeit und Niederschlag
- **RFID-Reader** zur Identifikation vorbeifahrender Züge

Die Messquerschnitte variieren in ihrer Bauweise: Drei Querschnitte verfügen über besohlte Betonschwellen, drei über unbesohlte Betonschwellen, und ein Referenzquerschnitt ist mit Holzschwellen ausgestattet. Diese Vielfalt ermöglicht den Vergleich unterschiedlicher Oberbaukonstruktionen unter realen Betriebsbedingungen.

Das Fahrbahnlabor nutzt zur **Messdatenerfassung** des Bahnlärmmonitorings (**Train Monitoring System (TMS)**) von Müller-BBM Rail Technologies [40]. Das TMS ist eine hochmoderne, modulare Messplattform, die speziell für den ganzjährigen Einsatz an Bahnstrecken entwickelt wurde. Mit seiner robusten Bauweise und der Fähigkeit, bis zu 500 Messkanäle zu integrieren, bietet das TMS eine umfassende Lösung für die kontinuierliche Überwachung des Schienenverkehrs.

Vielseitige Messgrößen und hohe Präzision. Das TMS erfasst eine Vielzahl von Messgrößen, darunter Schall, Beschleunigung, Schwingschnelle, Spannung, Dehnung, Last und RFID-Daten. Mit einer Abtastrate von bis zu 50 kHz pro Kanal gewährleistet das System eine hohe zeitliche Auflösung und Flexibilität. Die Schallpegelmessung erfolgt gemäß IEC 61672-3 [11], Klasse 1, mit rückführbarer, akkreditierter Kalibrierung.

Modularer Aufbau und Erweiterbarkeit. Dank seines modularen Designs lässt sich das TMS problemlos an spezifische Anforderungen anpassen. Zusätzliche Sensoren können je nach Bedarf integriert werden, um beispielsweise Radunrundheiten wie Flachstellen oder Polygonisierungen zu detektieren. Diese Flexibilität ermöglicht eine maßgeschneiderte Überwachungslösung für verschiedene Einsatzszenarien.

Qualitätssicherung und Zuverlässigkeit. Die Messgeräte des TMS werden kontinuierlich auf ihre einwandfreie Funktion überprüft. Vor dem Einbau erfolgt eine Kalibrierung im Rahmen des hauseigenen Qualitätssicherungssystems, um höchste Messgenauigkeit und Zuverlässigkeit zu gewährleisten.

Die Messaufzeichnung sämtlicher Messdaten erfolgt autonom bei Zugvorbeifahrt. Das Messprogramm m|track startet selbständig eine Messung und speichert die Daten ab. Die Messdaten werden übertragen, analysiert und in einer Datenbank gespeichert

Messgrößen. Das TMS ermittelt automatisch eine Vielzahl an vibroakustischen Kenngrößen aller vorbeifahrenden Züge. Dazu gehören unter anderem:

- **Schallpegel** (z. B. Vorbeifahrtschalldruckpegel $L_{pAeq, Tp}$)
- **Erschütterungspegel**
- **Beschleunigungsdaten** von Schiene, Schwelle und Schotter
- **Achslasten** und **akustische Radrauheit** mittels indirekter Verfahren

Dabei werden Kenngrößen, wie:

- energetische Mittelungspegel
- Terzband-Frequenzspektren
- Expositionspegel
- Maximalpegel.

für die Vorbeifahrt der gesamten Züge bzw. wagen- und achsspezifisch erhoben.

Die gesammelten Daten werden standardisiert ausgewertet und in einer zentralen Datenbank gespeichert. Dies ermöglicht eine detaillierte Analyse des Zustands der Fahrbahn und der Fahrzeuge sowie die Bewertung von Instandhaltungsmaßnahmen.

Bedeutung für Forschung und Praxis. Das Fahrbahnlabor stellt eine einzigartige Plattform für die Forschung und Entwicklung im Bahnwesen dar. Es ermöglicht:

- **Langzeitstudien** zur Alterung und zum Verschleiß von Fahrbahnelementen
- **Vergleichsstudien zwischen verschiedenen Oberbaukonstruktionen**
- **Validierung von Modellen** zur Lärm- und Erschütterungsprognose
- **Entwicklung und Testung** neuer Technologien und Materialien

Die gewonnenen Erkenntnisse tragen maßgeblich zur Verbesserung der Betriebssicherheit, zur Reduktion von Lärm- und Erschütterungsbelastungen und zur Optimierung der Instandhaltungsstrategien bei.

Weiterführende Informationen sind auf der offiziellen Website des Fahrbahnlabors: www.fahrbahnlabor.ch [39] enthalten.

6.2 Zugverkehr

Im Zeitraum zwischen dem 1. Januar und dem 31. Dezember 2024 wurden ca. 40.500 Zugvorbeifahrten auf dem Messgleis an jeder Messstation autonom erfasst und ausgewertet. Überwiegend verkehren mit ca. 38500 Zugvorbeifahrten Personenzüge während die Anzahl an Güterzügen mit 1300 relativ gering ist.

6.3 Fahrwegkenngößen

Der Fahrweg weit an der Messstelle des WMS eine gute Schienenrauheit und Abklingrate auf.

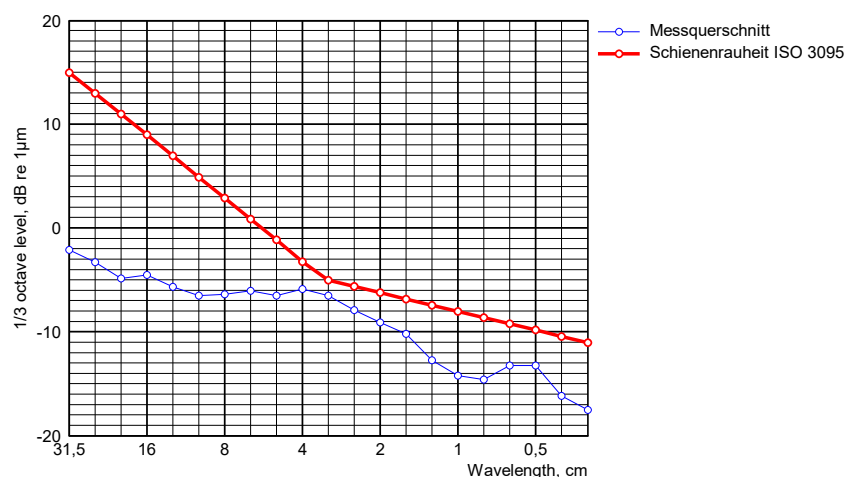


Abbildung 14. Akustische Schienenrauheit an der WMS Messstelle für Radunrundheiten

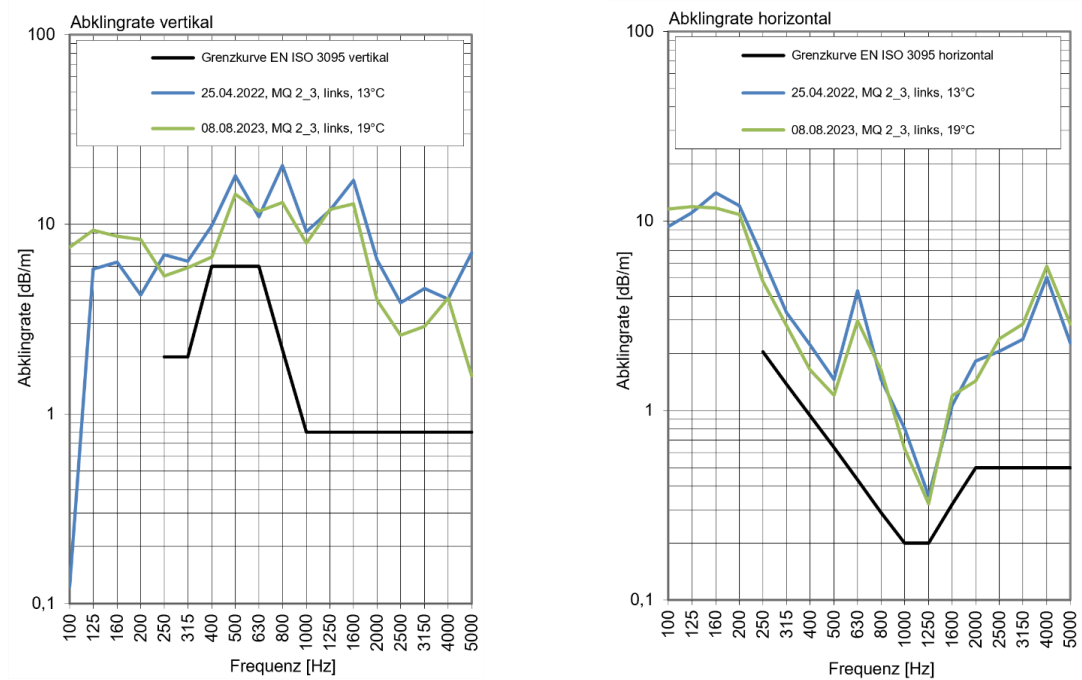


Abbildung 15. Abklingrate (TDR) an der WMS Messstelle für Radunrundheiten

In Abbildung 16 ist das mittlere Erschütterungsspektrum für Personen- und Güterzüge abgebildet und deren mittlere Geschwindigkeiten. Es sind im Wesentlichen die Frequenzen 10 – 63 Hz die das Spektrum dominieren.

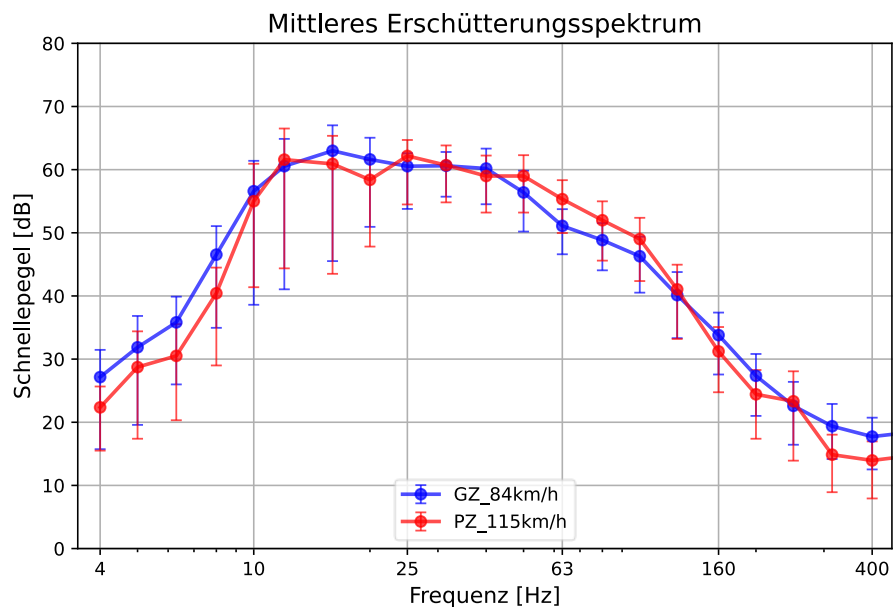


Abbildung 16 Mittleres Erschütterungsspektrum für Güterzüge (GZ) und Personenzüge (PZ)

6.4 Messung der Radunrundheiten

6.4.1 Wheel Monitoring System - WMS

Das Wheel Monitoring System (WMS) [3] ist ein autonomes Messsystem zur Überwachung von Radunrundheiten an Schienenfahrzeugen im regulären Fahrbetrieb. Die folgende Abbildung zeigt den typischen Aufbau eines WMS

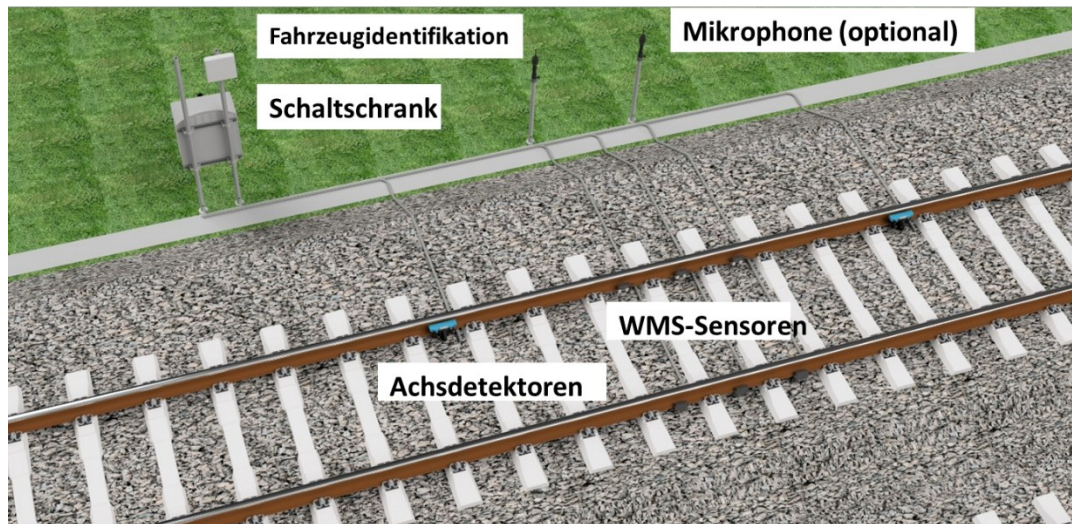


Abbildung 17. Typischer Aufbau des Wheel Monitoring Systems WMS

Das WMS erkennt zuverlässig die Radunrundheiten

- Polygone,
- Flachstellen und
- akustische Radrauheit.

Das WMS inspiziert autonom alle Räder im laufenden Betrieb und erkennt selbst kleinste Radunrundheiten und deren Entwicklung zuverlässig und bewertet jedes Rad mittels eines präzisen Einzahlindikators und dokumentiert deren Entwicklung lückenlos im Zeitverlauf.

Das WMS optimiert die Wartung von Schienenfahrzeugen durch eine zustandsabhängige Wartung und ermöglicht eine Erfolgskontrolle durchgeführter Wartungen. Materialverlust wird reduziert, unnötige Wartungen werden vermieden, Wartungskosten gesenkt und die Fahrzeugverfügbarkeit erhöht.

Das WMS verringert durch die bessere Radqualität Beanspruchungen und Schäden an Fahrzeugen und Fahrwegen, Sicherheitsprobleme sowie Schall-/Erschütterungsbeschwerden von Fahrgästen und Anwohnern.

6.4.2 Messgrößen der Radformfehler

Das WMS ermittelt aussagekräftige und präzise Einzahlwerte der Radunrundheiten:

- **Radrauheit.** Es wird der Rauheits-Einzahlwerte L_{ACA} in dB für die Bezugs-Geschwindigkeit 80 km/h ermittelt [23]. Der rauheitseinzahlwert ist ein Maß für die akustisch Radrauheit. Je größer der Rauheits-Einzahlwert ist, desto größer ist die akustische Radrauheit.
- **Polygone.** Darüber hinaus wird ein Polygonindikator gebildet, welcher den Grad der Polygonisierung angibt. Je größer der Polygon-Indikator ist, desto größer ist die Polygonisierung des Rades.
- **Flachstellen.** Flachstellen werden über das Verhältnis von dynamischer/statischer Radlast über eine typische Flachstellenlänge charakterisiert.

6.4.3 Messbeginn

Die Rad-Kontrollstation wurde am 8./9. April 2024 installiert. Die Messaufzeichnung wurde nach Validierung aller Signale am 15. Mai 2024 gestartet.

6.4.4 Kalibrierung

Die WMS-Sensoren wurden vor Einbau rückführbar kalibriert.

6.4.5 Validierung durch Radmessungen

Am 7./8. Mai 2024 verkehrte ein Testzug das Fahrbahnlabor und damit das neu installierte WMS. Es fanden 23 Testfahrten mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten (40-110 km/h) statt. Für den Testzug wurden direkte Radrauheitsmessungen aus einer Unterflurdrehbank für jedes Rad zur Verfügung gestellt. In Abbildung 18 werden mittlere Wellenlängen-Terzspektren des Testzugs (durch das WMS im Fahrbahnlabor (grün/blau) ermittelt) den direkten Rauheitsmessungen von einer Unterflurdrehbank (rot) gegenübergestellt.

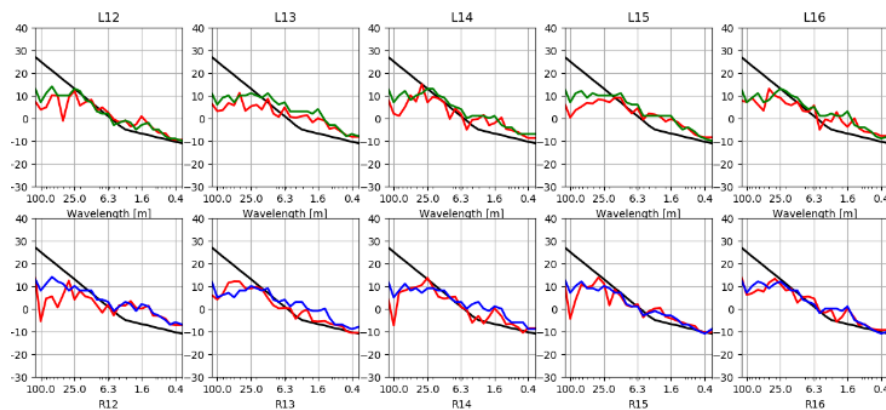


Abbildung 18 Vergleich der Wellenlängenterzspektren der Radrauheit aus direkten Messungen an einer Unterflurdrehbank (rot) und indirekt gemessen im WMS des Fahrbahnlabor (grün/blau) gemittelt aus 5 Überfahrten des Testzugs, Achsen 12-16.

Die hohe Messgenauigkeit des WMS wurde damit erfolgreich validiert.

6.4.6 Validierung durch Betriebskontrollen

In Deutschland wurde das WMS an zwei Standorten des bestehenden Bahnlärmmonitorings, zusätzlich zur bestehenden Sensorik, eingebaut. Ein Vergleich der Radrundheitsmessung des WMS (Raddefekte/Flachstellen) erfolgte durch das deutsche Eisenbahnbundesamt (EBA) über Zugkontrollen.

Das Eisenbahnbundesamt kommt dabei zu dem Ergebnis: „Mittels der zusätzlichen Sensorik zur Messung des Verhältnisses von dynamischer Kraft zur statischen Kraft konnten Flachstellen an den vorbeifahrenden Zügen radscharf erfasst werden. Dies wurde durch Kontrollen im Rahmen der Eisenbahnaufsicht des Eisenbahnbundesamts verifiziert“ [41].

Das WMS wird durch das Eisenbahnbundesamt in Deutschland aufgrund der erfolgreichen Validierung für das Monitoring von Flachstellen im Deutschen Schienennetz verwendet,

7 Zusammenhang zw. Radschaden und Emissionen:

Im nachfolgenden werden eine Reihe exemplarischer Auswertungen aus den Ergebnissen des Wheel Monitoring Systems WMS und des Fahrbahnlabors gezeigt. Ziel ist es die Radrundheiten der verkehrenden Flotte zu ermitteln und mit den schall- und erschütterungstechnischen Kenngrößen des Fahrbahnlabors zu verknüpfen.

Die Auswertungen erfolgen für die

- Achsen,
- Wagen sowie für die
- ganzen Züge.

Der für die Auswertung relevant Zeitraum läuft von Mai 2024 bis Mai 2025. Aufgrund des vollständigen Rückbaus der Gleis-Sensorik im Sommer 2024, bedingt durch eine Gleiswartung der SBB, und eines kurzzeitigen Ausfalls des RFID-Readers liegen Daten von knapp einem Jahr vor. Insgesamt wurden rund

- 30.000 Personenzüge und 1.500 Güterzüge gemessen mit fast
- 250.000 Wageneinheiten zugehörig zu Personenzügen, 17.000 Güterwagen und 4.300 Loks bestehend aus
- 1.600.000 Räder von Personenwagen, 125.000 von Güterwagen und 37.000 von Lokomotiven

Die WMS-Erweiterung läuft in einer separaten Auswertung zu dem Fahrbahnlabor und speichert ihre Ergebnisse in einer eigenen Datenbank ab. Um Messgrößen des Fahrbahnlabors nutzen zu können müssen Daten aus beiden Datenbanken miteinander verknüpft werden. Dies geschieht im Nachgang zur Auswertung einer Vorbeifahrtmessung durch die Zuweisung der passby-id. Alle Messdaten beziehen sich auf den Messquerschnitt MQ23. Erschütterungsmessungen und zusätzliche Schottermessungen wurden über den Messquerschnitt MQ22 verknüpft.

7.1 Flachstellen

Für Flachstellen wird die relative Radlast bestimmt. Diese wird unter Berücksichtigung des charakteristischen dynamischen Zeitverlaufs einer Flachstelle aus der Differenz zwischen dynamischer und statischer Radlast bestimmt und auf die statische Radlast bezogen. Sofern die dynamische Radlast der statischen entspricht ergibt sich eine relative Radlast von 0. Sobald die dynamische Radlast höher ist als die statische ergeben sich Ergebnisse größer Null.

7.1.1.1 Auftretenshäufigkeit

Zur Bewertung der Radqualität an der Messtelle wird zunächst die klassierte Häufigkeitsverteilung der relativen Achslast (Maximalwert der beiden zur Achse gehörenden relativen Radlasten) dargestellt:

Abbildung 19 zeigt, dass der überwiegende Anteil der Räder an der Messstelle unauffällig ist, d.h. dass die auftretenden dynamischen Radlasten aus den Radunrundheiten gering sind im Vergleich zu den statischen Radlasten. Hierbei ist zu beachten, dass die Statistik durch die hohe Anzahl an Personenzugrädern - bei einer relativ geringen Anzahl an Güterzugrädern – dominiert wird.

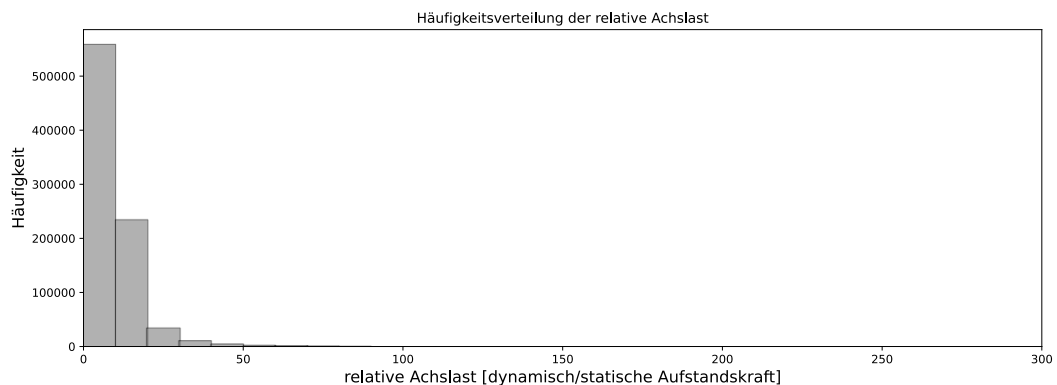


Abbildung 19 Häufigkeitsverteilung aller Rad-Messwerte der relativen Achslast. Der überwiegende Anteil der gemessenen Räder an der Messtelle (Hohe Anzahl an Personenzugrädern und geringe Anzahl an Güterzugachsen) ist unauffällig.

Abbildung 20 schneidet den hohen Anteil unauffälliger Achsen aus Abbildung 19 weg und zeigt eine exponentiell abfallende Verteilung. Anhand dieser Verteilung und den Ergebnissen der Kalibrierung haben wir Klassierungen vorgenommen. Die Klassifizierung erfolgt dabei nach folgender Skala:

Tabelle 2. Klassierung der Räder mit Flachstellen.

Flachstellenklasse	Untergrenze
Keine	<50
Schwach	50
Moderat	75
Deutlich	100
Stark	125
Sehr stark	>150

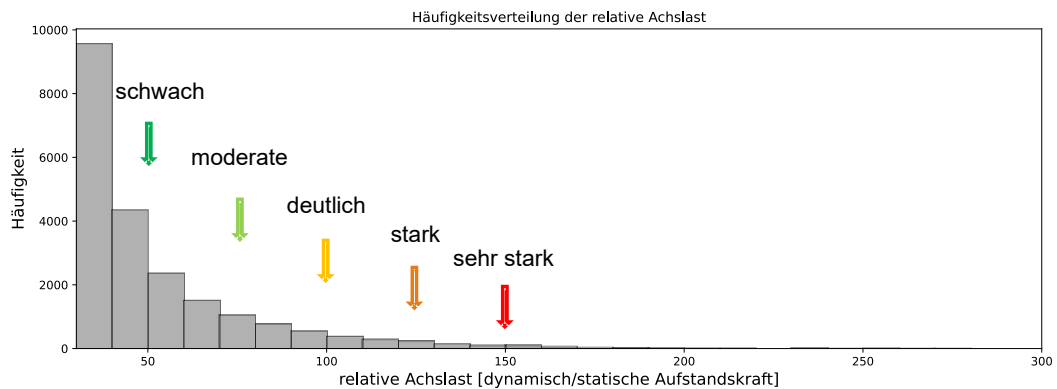


Abbildung 20 Häufigkeitsverteilung für Achsen mit maximaler relativer Radlast größer 30.

Mit dieser Klassierung können wir uns ersten Untersuchungen über das Auftreten von Flachstellen in verschiedenen Gruppen zuwenden.

Die erste **Unterscheidung**, die wir machen können, ist die **zwischen Güterzügen und Personenzügen**.

Abbildung 21 zeigt wie viele Personenzüge im Zeitraum Mai 2024 und Mai 2025 an der Messstation verkehrten mit mindestens einem Rad (Achse) die in eine der obigen Flachstellen Klassen fällt.

Personenzüge weisen nur selten kleinere und noch seltener größere Flachstellen auf.

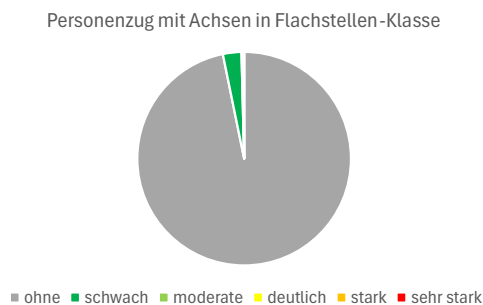


Abbildung 21 Anteil Personenzüge mit mindestens einer Achse in der jeweiligen Flachstellen-Klasse.

Für Personenzüge können für die Messstelle und den Messzeitraum die folgenden Aussagen getroffen werden:

- Nur einer in 30 **Personenzügen** weist Räder mit mindestens schwach erhöhten relativen Radlasten auf. Bei deutlicher Ausprägung ist es nur noch einer von 700 Personenzügen.
- Einer von 80 **Personenwagen** hatte überhaupt Flachstellen-Indikation aber nur an einem von 1500 waren die relativen Radlasten deutlich erhöht.

- Bei den **Personenwagen Achsen** hatte nur eine in 200 überhaupt Flachstellen-Indikation und nur eine in 30.000 deutliche.

Anders sieht das Bild bei den Güterzügen aus. Hier weisen deutlich mehr Achsen Flachstellen auf. Auf Wagenbasis ergibt sich ein nochmals höherer Anteil auffälliger Einheiten mit Flachstellen-Indikation (Abbildung 22).



Abbildung 22 Links: Anteil Güterwagenachsen mit mindestens einem Rad in der jeweiligen Klasse für Flachstellen-Indikation. Rechts Anteil Güterwagen mit mindestens einem Rad in der jeweiligen Klasse für Flachstellen-Indikation

Die Auswertung bezogen auf Güterzüge ergibt, dass ca. 70% der Güterzüge Achsen mit Flachstellen haben, 25% der Güterzüge Räder mit mindestens deutlichen Flachstellen.

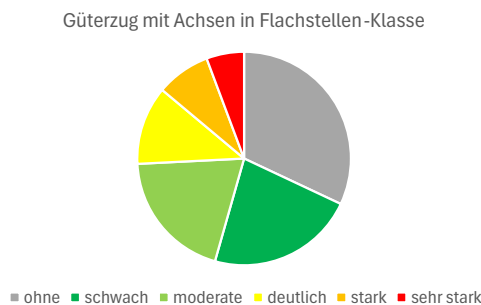


Abbildung 23 Anteil Güterzüge mit mindestens einer Achse in der jeweiligen Flachstellen-Klasse.

Insgesamt lassen sich aus den Messdaten zusammen mit der der Klassierung für Züge, Wagen/Loks und Achsen die folgenden ungefähren Aussagen ableiten:

- **Güterwagen Achsen** waren von den untersuchten Zugstypen am stärksten von Flachstellen betroffen, wobei gut jede 10. Achse schwach auffällig war und jede 40. Achse deutlich erhöhte relative Radlasten aufwies.

- Jeder 4. **Güterwagen** der verkehrte zeigte mindestens eine schwache Flachstellen-Indikation und immerhin noch jeder 12. hatte mindestens ein Rad mit deutlich erhöhten relativen Radlasten.
- 2 von 3 gemessenen **Güterzügen** hatten mindestens schwach erhöhte Flachstellen-Indikation. Bei deutlich erhöhten relativen Radlasten waren es immer noch jeder 4. Güterzug der auffällig war.

Für Loks ergaben sich folgende Zusammenhänge:

- Etwa eine in 50 **Achsen** zeigte bei **Loks** eine schwache Überhöhung der relativen Radlast und nur eine in 340 hatte deutliche Flachstellen-Indikation.
- Bei den **Loks** (GZ, PZ und einzeln verkehrend) zeigte jede 30. schwache Flachstellen-Indikation und eine von 160 deutliche.

7.1.1.2 Zusammenhang Flachstellen und Schallemission

Wesentlich für die Klassierung der Flachstellen ist neben ihrer geometrischen Abmessung auch ihr Einfluss auf Emissionen (Schall/Erschütterung) und die Belastung, die sie auf die Infrastruktur ausüben.

Um den fahrzeugseitigen Einfluss zu reduzieren, konzentrieren wir uns auch weiterhin auf die bereits oben eingeführten Kategorien Güterzug/-wagen, Personenzug/-wagen und Loks. Verschiedenartige Raddefekte wie Polygone, erhöhte akustische Radrauheit und Flachstellen überlagern sich teilweise. Wo möglich, wurden in den folgenden Auswertungen Achsen/Wagen mit Auffälligkeiten nicht betrachteter Raddefekte ausgeschlossen. Im Folgenden wurden zusätzlich Fahrzeugeinheiten in direkter Nachbarschaft zu Fahrzeugeinheiten mit Flachstellen aus der Auswertung ausgeschlossen, sofern sie nicht selbst erhöhte Radlastindikation (>50) aufweisen.

Abbildung 24 stellt eine Korrelation der Flachstellen-Indikation mit dem Vorbeifahrtpegel (7,5m) für Güterwagen her. Es zeigt sich eine deutliche Überhöhung des Vorbeifahrtpegels für Güterwagen mit Flachstellen-Indikation, die umso stärker ausfällt, desto größer die maximale Flachstellen-Indikation im Wagen war.

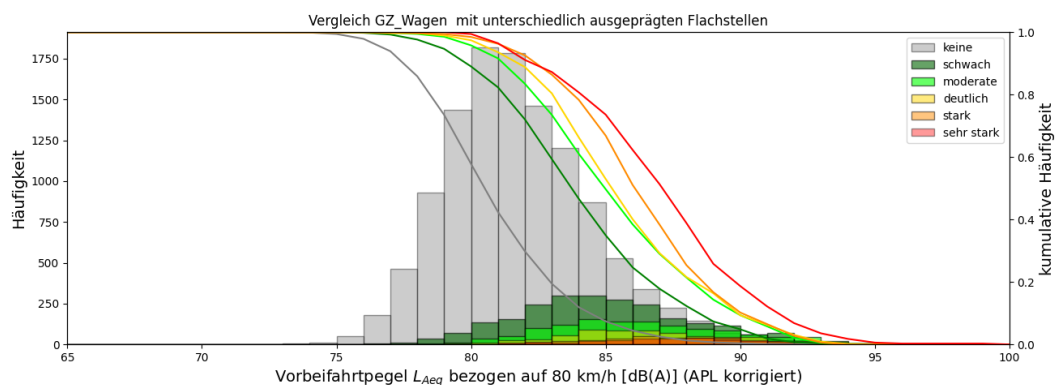


Abbildung 24 Einfluss der Flachstellenklasse in Güterwagen auf deren Vorbeifahrtpegel

Die folgende Tabelle zeigt den Median in den einzelnen Klassen.

Tabelle 3. Median der Vorbeifahrtpegel der Güterwagen in den jeweiligen Flachstellenklassen.

Flachstellenklasse	Median der Vorbeifahrtpegel
Keine	80
Schwach	83
Moderat	84
Deutlich	85
Stark	86

Flachstellenklasse	Median der Vorbeifahrtpegel
Sehr stark	87

Auch für Personenwagen lässt sich eine vergleichbare Aussage treffen. Da die Datenbasis wegen der geringen Anzahl an Flachstellen kleiner ist, wird auf eine Bestimmung der Vorbeifahrtpegel in den einzelnen Klassen verzichtet (siehe Abbildung 25).

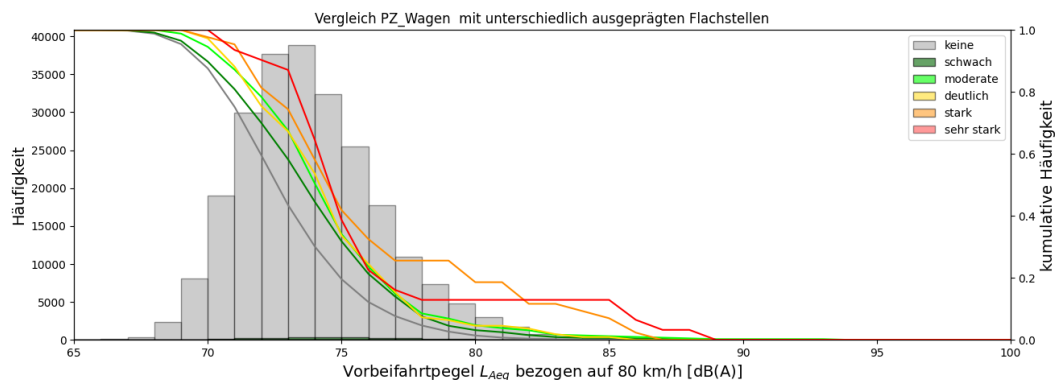


Abbildung 25 Einfluss der Flachstellenklasse in Personenwagen auf deren Vorbeifahrtpegel

7.1.1.3 Zusammenhang Flachstellen und Oberbauanregung

Im Folgenden fokussieren wir uns vornehmlich auf die Unterschiede zwischen Wagengruppen mit Flachstellen (mindestens schwache Flachstellen) und ohne Flachstellen (Verhältnis von dynamischer Radlasten zu statischer Radlast $< 0,5$). Diese vereinfachte Gruppierung dient dazu statistische Aussagen treffen zu können, da die Gruppe der Wagen mit Raddefekten klein und eine detailliertere Unterteilung wie im obigen Kapitel nicht sinnvoll ist.

Der Einfluss von Flachstellen auf den Oberbau wird auf Basis der Schottersensoren unter den Schwellen im Schotterbett abgeleitet. In Abbildung 26 und Abbildung 27 ist der Einfluss einer überhöhten relativen Radlast auf den im Schotterbett gemessenen Beschleunigungspegel dargestellt.

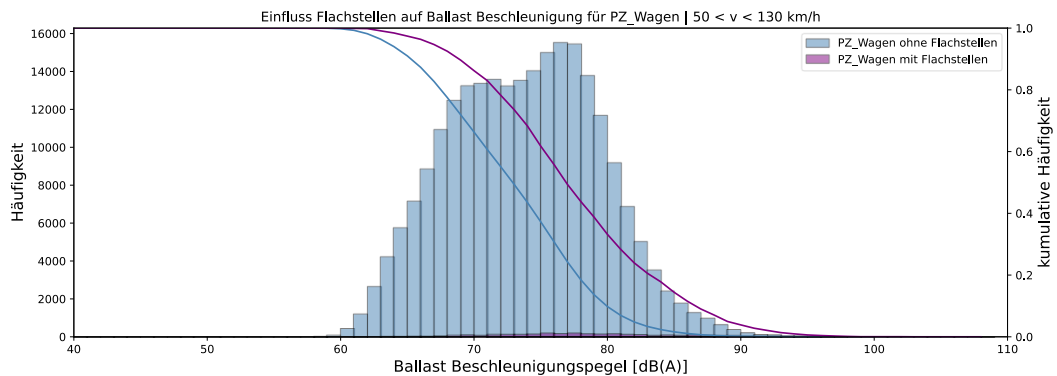


Abbildung 26 Einfluss von Flachstellen auf die Schotterbeschleunigung für Personenwagen

Tabelle 4. Median des Ballast-Beschleunigungspegels der Personenwagen für Wagen mit und ohne Flachstellen.

Flachstellen	Median des Ballast-Beschleunigungspegels
Ohne Flachstellen	73
Mit Flachstellen	78

In der Gruppe der Personenwagen, wo nur wenige und wenn dann eher schwache Flachstellen detektiert werden, ist eine Auswertung nur mit einer erhöhten Unsicherheit möglich. Dennoch zeigt sich, dass Personenwagen mit Flachstellen in der Regel deutlich höhere Beschleunigungspegel im Schotterbett hervorrufen als dies von Wagen ohne Raddefekte zu erwarten ist.

Abbildung 27 zeigt, dass Güterwagen mit Flachstellen deutlich höhere Beschleunigungspegel im Schotter hervorrufen als Güterwagen ohne Flachstellen. Allerdings deutet die zu hohen Beschleunigungen hin langgestreckte Verteilung der Güterwagen ohne Flachstellen darauf hin, dass Flachstellen allein nicht verantwortlich sind für hohe Schotterbeschleunigungen (siehe die entsprechende Auswertung zum Einfluss der Polygone auf Oberbau und Erschütterung).

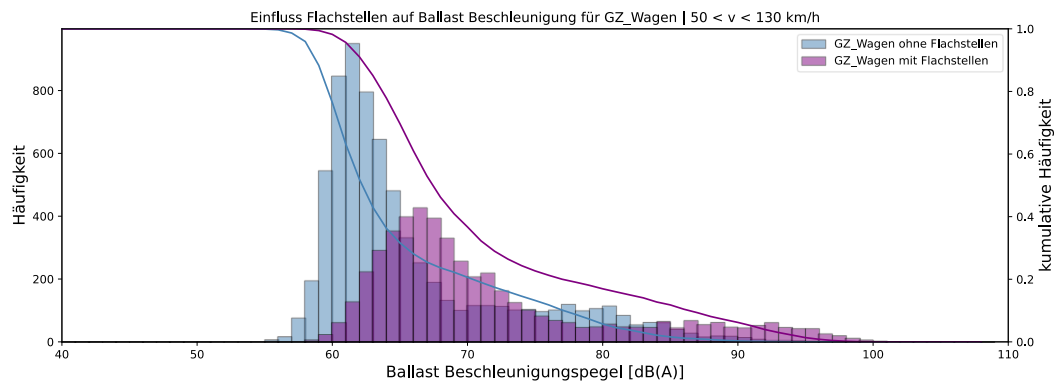


Abbildung 27 Einfluss von Flachstellen auf die Schotterbeschleunigung für Güterwagen

Tabelle 5. Median des Ballast-Beschleunigungspegels der Güterwagen für Wagen mit und ohne Flachstellen.

Flachstellen	Median des Ballast-Beschleunigungspegels
Ohne Flachstellen	63
Mit Flachstellen	68

7.1.1.4 Zusammenhang Flachstellen und Erschütterung

Auch auf den Erschütterungspegel sollten Flachstellen erwartungsgemäß einen Einfluss haben, anders als der Einfluss auf den Vorbeifahrtpegel und den Beschleunigungspegel im Schotterbett lässt sich dieser aber zeitlich weniger eindeutig korrelieren.

Abbildung 28 zeigt die Häufigkeitsverteilung aller Personenwagen des Typs FV-Dosto unterteilt in Gruppen mit Flachstellen und ohne Flachstellen. Auch hier ist der erwartete Effekt messtechnisch nachweisbar. Es wurde spezifisch nur ein Typ an Personenwagen für die Auswertung herangezogen, weil unterschiedliche Bauweisen, Achslasten, Massen und Geschwindigkeiten einen wesentlichen Einfluss auf den jeweiligen erwartbaren Erschütterungspegel haben.

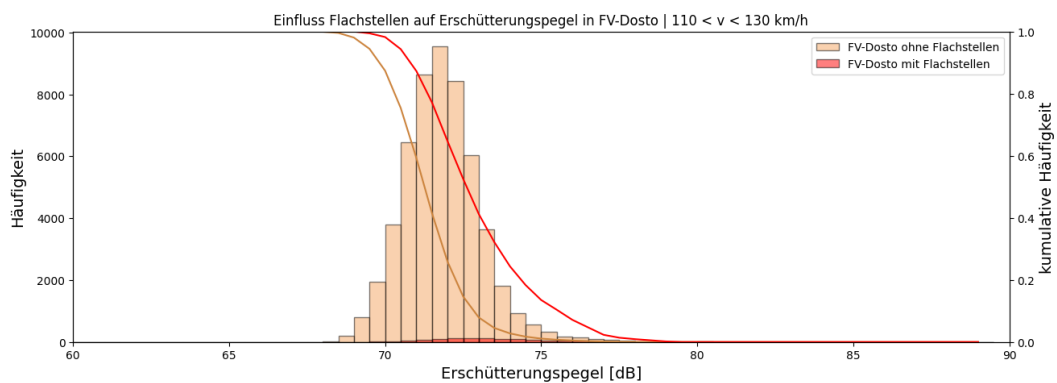


Abbildung 28 Einfluss der relativen Radlast (Flachstellen) auf den Erschütterungspegel für FV-Dosto Personenwagen

Tabelle 6. Median des Erschütterungspegels der Personenwagen für Wagen mit und ohne Flachstellen.

Flachstellen	Median des Erschütterungspegels
Ohne Flachstellen	71,5
Mit Flachstellen	73,0

Für Güterwagen musste aufgrund der geringeren verkehrenden Anzahl ein weiterer Geschwindigkeitsbereich gewählt werden. Es wurde für die Auswertung zum Einfluss der Flachstellen auf den Erschütterungspegel für Güterwagen in Abbildung 29 nur die Gruppe der 2-achsigen gedeckten Güterwagen (mit Typnummer 21) herangezogen.

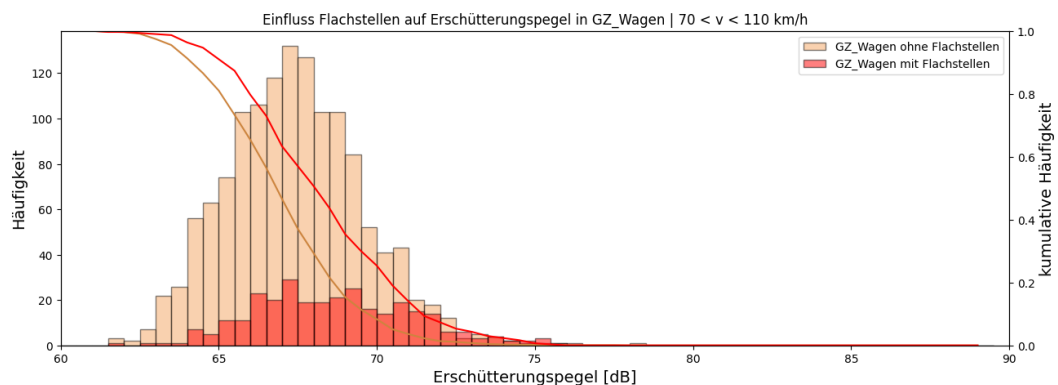


Abbildung 29 Einfluss der relativen Radlast (Flachstellen) auf den Erschütterungspegel bei Güterwagen

An Stellen oder zu Zeiten, in denen der Güterverkehr deutlich stärker ausfällt, sollte zusätzlich in beladen/unbeladen unterteilt werden. Auch die Ausprägung der Flachstellen konnte hier aufgrund der geringen Anzahl nicht statistisch ausgewertet werden.

Tabelle 7. Median des Erschütterungspegels der Güterwagen für Wagen mit und ohne Flachstellen.

Flachstellen	Median des Erschütterungspegels
Ohne Flachstellen	67,0
Mit Flachstellen	68,5

7.2 Radrauheit

Das WMS bestimmt für jedes vorbeifahrende Rad das Radrauheitsspektrum und bildet daraus den Rauheits-Einzahlwert L_{ACA} . in Anlehnung an HARMONOISE [23].

Die Schallemissionen werden dominant von den Achsen angeregt, wenn der Rauheits-Einzahlwert L_{ACA} der Räder den Rauheits-Einzahlwert L_{ACA} der Schienen übersteigt.

Zum Zeitpunkt der Installation wurde die Schienenrauheit an der Messstelle gemessen und es wurde der Einzahlwert L_{ACA} der Schiene berechnet. Dieser beträgt für die Messstelle $L_{ACA} = 4,3$ dB.

Räder mit Rauheiten unterhalb eines Rauheits-Einzahlwerts $L_{ACA} = 5$ wurden als glatt (gut) bewertet.

7.2.1.1 Auftretenshäufigkeit

Die Häufigkeitsverteilung aller gemessenen Achsen ist in Abbildung 30 dargestellt und in Abbildung 31 die Verteilungen separiert in Personenwagen, Güterwagen und Loks.

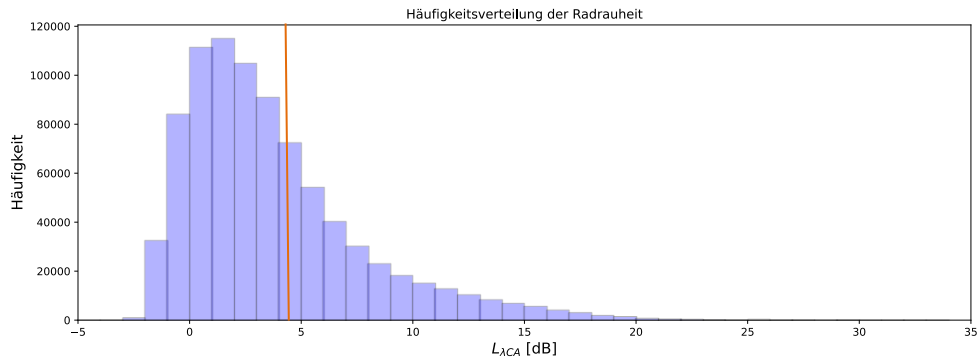


Abbildung 30 Häufigkeitsverteilung aller Messwerte an der Messstelle im Messzeitraum zur indirekten Radrauheit in Einheiten des Rauheits-Einzelwerts L_{ACA} und Schienenrauheit L_{ACA} an der Messstelle.

Die Verteilung des Rauheits-Einzelwerts L_{ACA} wird stark durch den der Personenzüge dominiert, welche an der Messstelle den überwiegenden Anteil an der verkehrenden Flotte stellen.

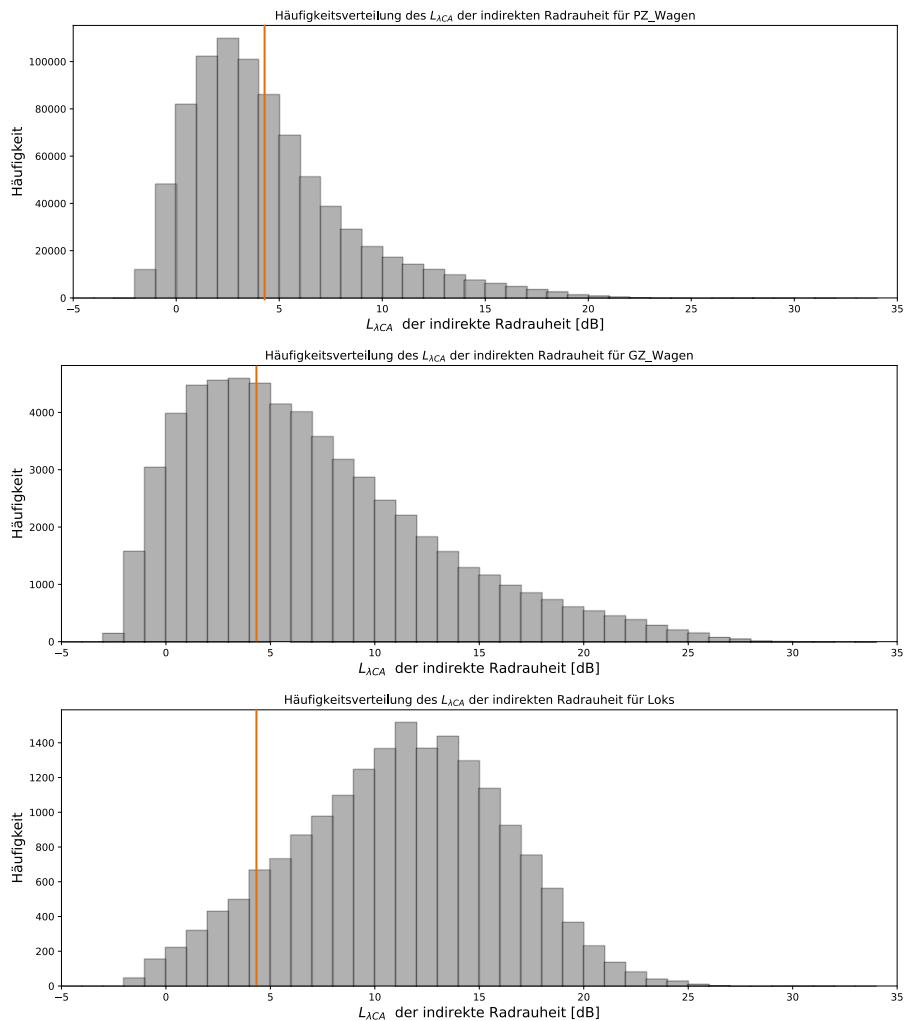


Abbildung 31 Separate Häufigkeitsverteilungen der Radrauheit für Personenwagen, Güterwagen und Loks.

Die Häufigkeitsverteilungen zeigen, dass ein Großteil der Personenzugwagen über eine geringe Radrauheit verfügt. Dennoch übersteigen zahlreiche Achsen den Schienenrauheits-Einzelwert L_{ACA} um bis zu etwa 20 dB.

Auch bei den Güterwagen befindet sich ein hoher Anteil der Räder in gutem Zustand. Allerdings ist der Anteil an Rädern mit erhöhten Rauheiten im Vergleich zu den Personenzugwagen deutlich höher. Die maximal gemessenen Radrauheiten erreichen hier Werte von bis zu $L_{ACA} = 30$ dB und übersteigen den Schienenrauheits-Einzelwert L_{ACA} um bis zu etwa 25 dB.

Ein abweichendes Bild ergibt sich bei den Lokomotiven: Hier gibt es nur wenige Räder mit geringer Radrauheit, insgesamt liegt die durchschnittliche Radrauheit, gemessen am Einzelwert L_{ACA} , spürbar höher. Einzelne Räder erreichen Werte bis etwa $L_{ACA} = 30$ dB und übersteigen den Schienenrauheits-Einzelwert L_{ACA} um bis zu etwa 25 dB.

Auffällig über alle Fahrzeugtypen hinweg ist die große Streuung der Radrauheiten über einen Bereich von etwa $L_{ACA} = 30$ dB.

Für die Klassifizierung des Rauheitseinzahlwerts wurden in Anlehnung an HARMONOISE [23] Klassen der Breite von 5 dB gebildet wobei alle Rauheiten unterhalb eines Rauheits-Einzahlwerts L_{ACA} von 5 als glatt (gut) zu bewerten sind.

Tabelle 8. Klassierung der Räder mit akustischen Rauheiten.

Rauheits-Einzahlwerte L_{ACA}	Untergrenze
Glatt	0
Schwach	5
Moderat	10
Deutlich	15
Hoch	20
Sehr hoch	25

Mit der Bewertung der Radrauheit anhand des Rauheits-Einzahlwerts L_{ACA} können wir uns wieder ansehen welche Fahrzeuggruppen wie stark betroffen sind. An dieser Stelle unterscheiden wir zwischen Personenzugeneinheiten ohne Loks (PZ Wagen), Güterwagen (GZ Wagen) und Loks.

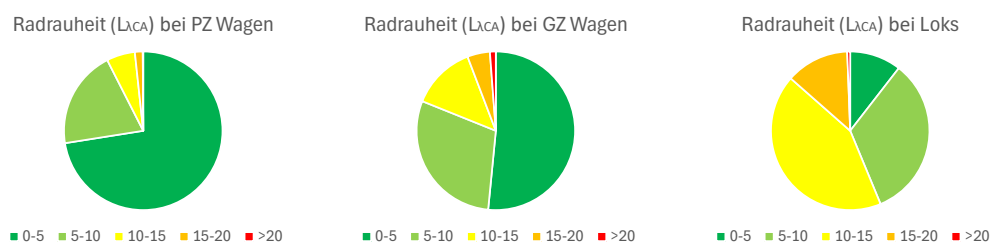


Abbildung 32 Radrauheiten (Rauheits-Einzahlwerte L_{ACA}) gemessen in den Fahrzeuggruppen der Personenzüge und Güterzüge, wobei Loks separat aufgeführt sind.

Personenzüge haben insgesamt eine recht geringe Radrauheit. Güterwagen sind etwas mehr von erhöhter Radrauheit betroffen. Loks hingegen weisen sehr häufig, eine hohe Radrauheit auf.

Tabelle 9. Prozentuale Anzahl der Personenwagen/Güterwagen/Loks in den Radrauheitsklassen.

Rauheits-Einzahlwert-Klasse	Personenwagen	Güterwagen	Loks
Glatt	71	52	10
Schwach	15	30	35
Moderat	7	10	40
Deutlich	4	5	10
Hoch	2	2	3
Sehr hoch	1	1	2

Für die Messstelle überschreiten daher ca. 29% der Personenzugwagen, 48% der Güterwagen und 90% der Loks die mittlere Rauheit der Schiene und sind daher dominant für die Schallanregung. Die Überschreitungen betragen bis zu ca. 25 dB.

7.2.1.2 Mittlere Rauheitspegel-Wellenlängen-Terzspektren

In Abbildung 33 werden die indirekt bestimmten Rauheitspegel-Wellenlängen-Terzspektren der Loks dargestellt.

Die mittleren (energetisch) Rauheitspegel-Wellenlängen-Terzspektren der Güterwagen Räder und der Räder aus den Personenzügen (ohne Loks) liegen teils deutlich tiefer (Abbildung 34). Während die Rauheitspegel-Wellenlängen-Terzspektren der PZ-Wagen weitestgehend unterhalb der TSI-Grenzkurve verlaufen, wird diese von den schlechteren Güterwagen-Rädern im Bereich von 2-8 cm deutlich überschritten. Loks liegen nochmals höher in einem zumeist in einem breiten Wellenlängenbereich von 2-20 cm. Der Lok-Typ RE484 zeigt als einziger keine erhöhten Radrauheiten.

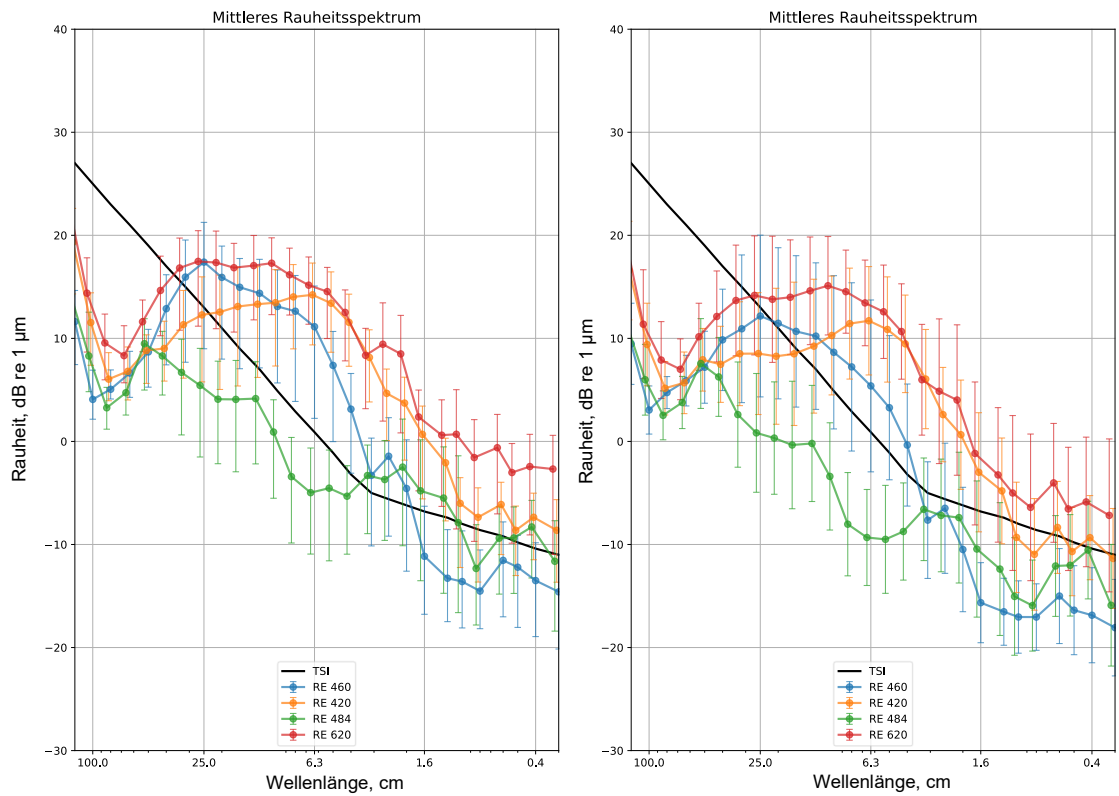


Abbildung 33 Mittleres (links: energetisch, rechts: arithmetisch) Wellenlängen-Terzspektrum der indirekt ermittelten Radrauheit für die 4 am häufigsten verkehrenden Lok-Typen.

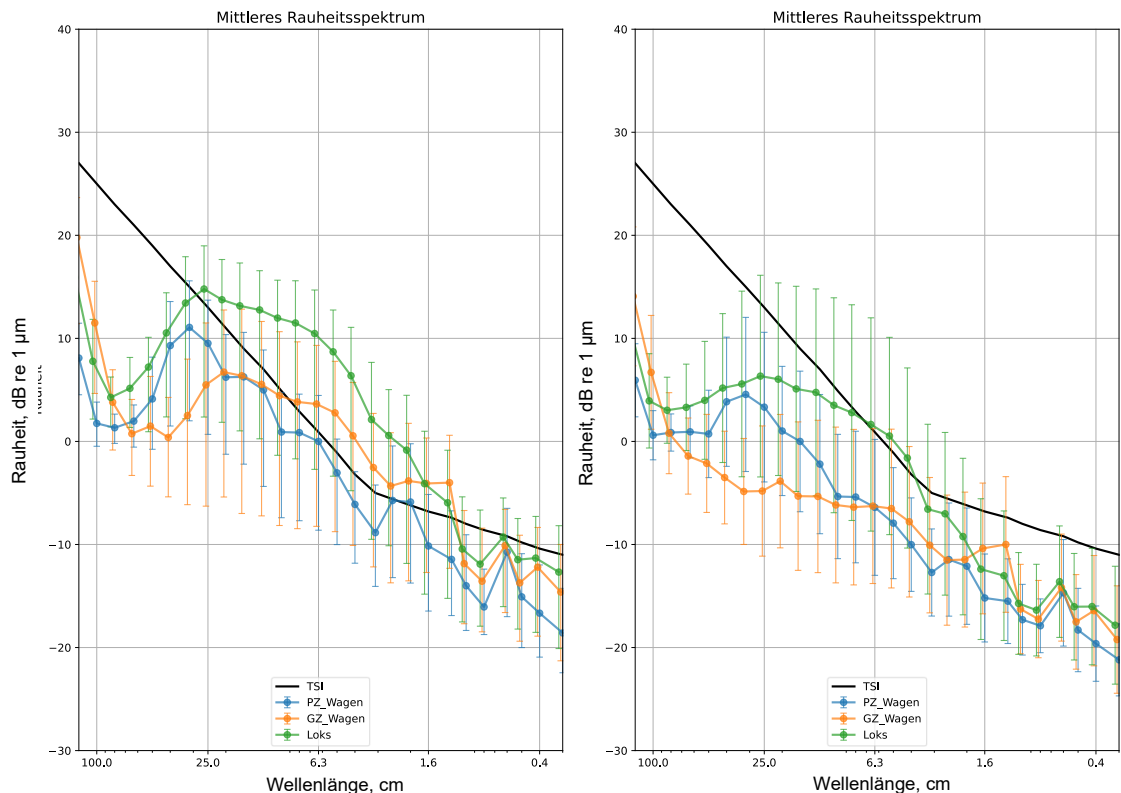


Abbildung 34 Mittleres (links: energetisch, recht: arithmetisch) Wellenlängen-Terzspektrum der indirekt ermittelten Radrauheit für Personenzug Fahrzeugeinheiten (PZ-Wagen), Güterwagen und Loks.

7.2.1.3 Zusammenhang Radrauheit zur Schallemission

Nach den gängigen Rollgeräuschmodellen hat die Radrauheit einen besonders hohen Einfluss auf die Erzeugung des Rollgeräusches und damit den Vorbeifahrtpegel. Abbildung 35 zeigt die Vorbeifahrtpegel für die Güterwagen in den verschiedenen Rauheitsklassen. Weil Flachstellen die indirekte Rauheitsmessung aber vor allem auch die Schall-Messung stark beeinflussen können, wurden für nachfolgende Analysen Wagen (und Achsen) mit Flachstellen nicht mitbewertet. Zusätzlich wurden auch direkte Nachbarwagen zu Wagen mit mindestens moderaten Flachstellen aus der Statistik ausgeschlossen.

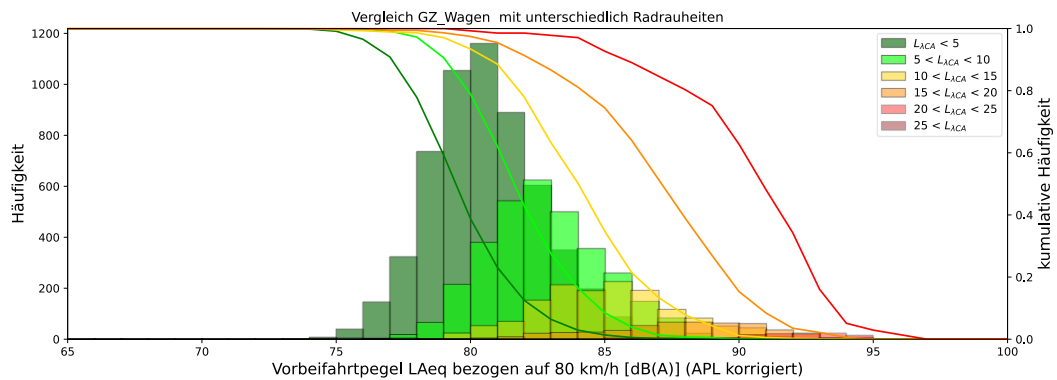


Abbildung 35: Abhängigkeit des Güterwagen-Vorbeifahrtpegel von der Radrauheit (Rauheits-Einzahlwerte L_{ACA}).

Tabelle 10. Median der Vorbeifahrtpegel der Güterwagen in den jeweiligen Radrauheitsklassen.

Rauheits-Einzahlwerte L_{ACA}	Median
Glatt	80
Schwach	83
Moderat	84
Deutlich	87
Hoch	92
Sehr hoch	Nicht auswertbar

Die Güterwagen in der Klasse „hohe Radrauheit“ weisen damit eine um 12 dB überhöhte Schallemission auf.

Im Bahnlärmmonitoring wird häufig der **Anteil lauter Güterwagen (>86 dB)** ermittelt. Hier soll untersucht werden, wie viele dieser Wagen eine mindestens hohe Radrauheit haben.

In Abbildung 36 ist die Verteilung des Rauheits-Einzahlwerts L_{ACA} für die Gruppe der akustisch auffälligen Güterwagen mit Vorbeifahrtpegel $L_{Aeq,80,AP} > 86$ dB dargestellt. Für den überwiegenden Anteil der lauten Wagen werden auch erhöhte Radrauheiten festgestellt. Wagen mit mindestens moderaten Flachstellen wurden aus dieser Statistik ausgeschlossen, ebenso wie deren direkte Nachbarwagen. Andere akustische Störquellen wie Nachbarwagen mit sehr hohen Rauheiten und Loks, welche den gemessenen Vorbeifahrtpegel der Wagen beeinflussen können, sind nicht ausgeschlossen.

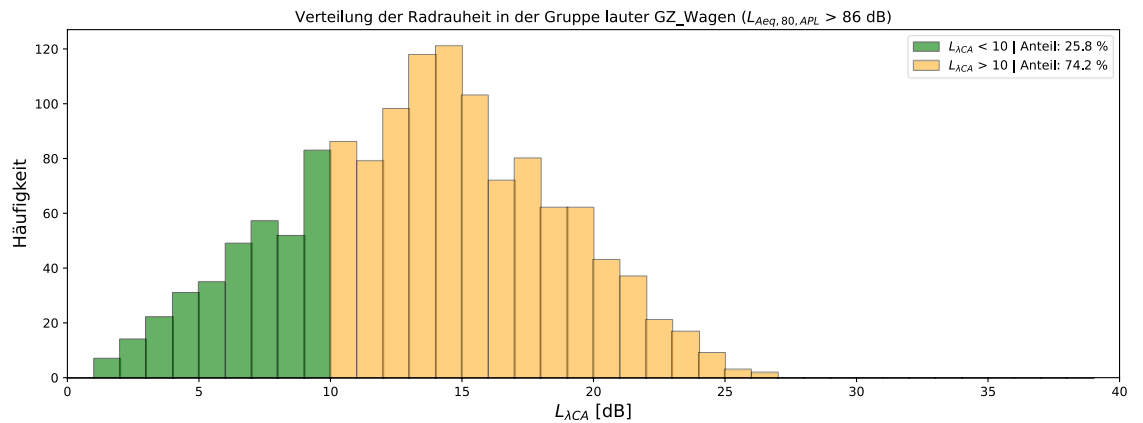


Abbildung 36 Anteil der lauten Güterwagen ($L_{Aeq,80,AP} > 86$ dB) jeweils mit Rauheits-Einzahlwerte $L_{ACA} < 10$ und $L_{ACA} > 10$.

Dies zeigt nochmals den Einfluss der Radrauheit auf hohe Schallemissionen bei Güterwagen.

Abbildung 37 zeigt die Vorbeifahrtpegel für die **Personenwagen** in den verschiedenen Rauheitsklassen. Wie bei der obigen Auswertung für Güterzüge sind Flachstellen Wagen / Achsen sowie deren Nachbarn ausgeschlossen. Die Räder der Personenwagen sind insgesamt glatter und die Vorbeifahrtpegel geringer. Die Zunahme des Schallpegels mit erhöhten Rauheitseinzahlwerten ist ähnlich ausgeprägt wie bei Güterzügen.

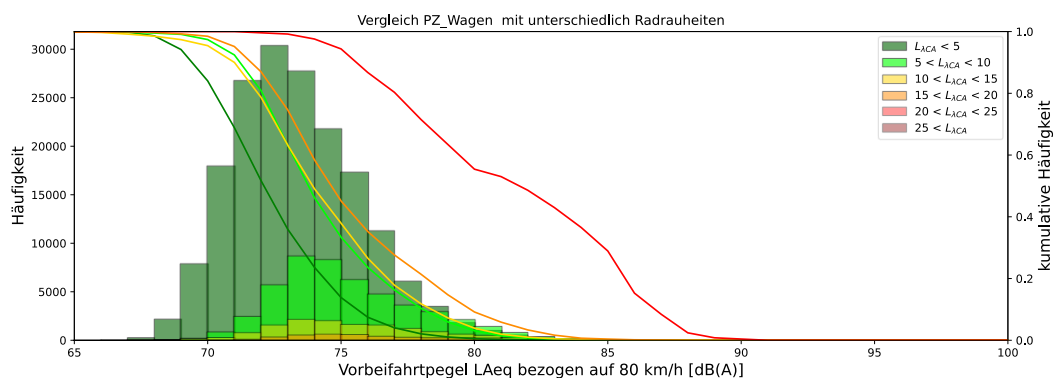


Abbildung 37 oben: Abhängigkeit des Personenwagen-Vorbeifahrtpegel von der Radrauheit (Rauheits-Einzahlwerte L_{ACA}).

Tabelle 11. Median der Vorbeifahrtpegel der Personenwagen in den jeweiligen Radrauheitsklasse.

Rauheits-Einzelwerte L_{ACA}	Median
Glatt	72
Schwach	73,5
Moderat	74
Deutlich	75
Hoch	82
Sehr hoch	Nicht auswertbar

Unter PZ-Wagen werden an dieser Stelle auch angetriebene Fahrzeugsegmente der an der Messstelle verkehrenden Elektrischen Trieb Züge (ETZ) einbezogen. Eine achsscharfe Analyse oder eine Gruppierung der einzelnen über ihre UIC-Nummer identifizierbaren Fahrzeugeinheiten kann hier mehr Erkenntnisse liefern.

In Abbildung 38 sind einige Fahrzeugeinheiten aus den am häufigsten die Messstelle passierenden Personenzügen gruppiert dargestellt. Aus den durchgeführten Analysen lässt sich eine hohe Korrelation des Vorbeifahrtpegel mit dem Rauheits-Einzelwert L_{ACA} beobachten.

Vergleich der häufigsten PZ Wagen ($v > 50$ km/h)

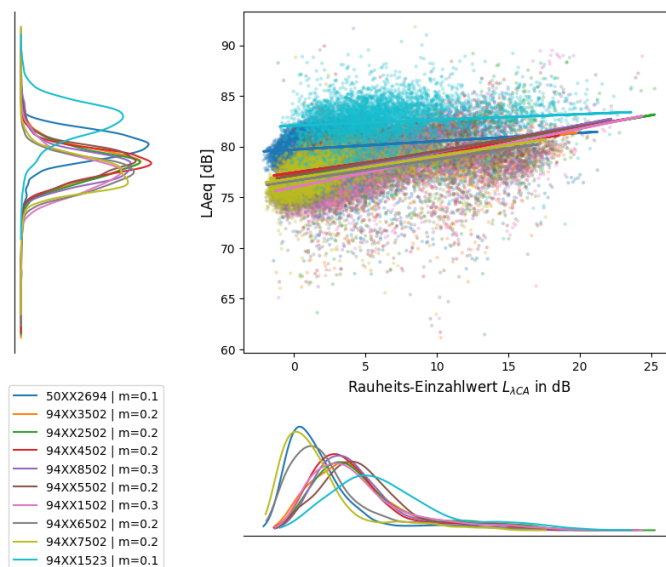


Abbildung 38 Personenzug Fahrzeugeinheiten gruppiert in UIC Wagentyp Nummern und Type Code. Die Einheit 94XX1523 ist die vorderste Einheit des Flirt (angetrieben) und die Einheit 50XX2694 ist der Steuerwagen im IC2000 (nicht-angetrieben).

In Abbildung 39 ist dargestellt wie stark sich im Mittel der Vorbeifahrtpegel von PZ-wagen, GZ-Wagen und Loks erhöht durch die jeweils in dieser Gruppe gemessenen mittleren Rauheit der auffälligen Räder ($L_{ACA} < 5$ bzw. $L_{ACA} > 10$).

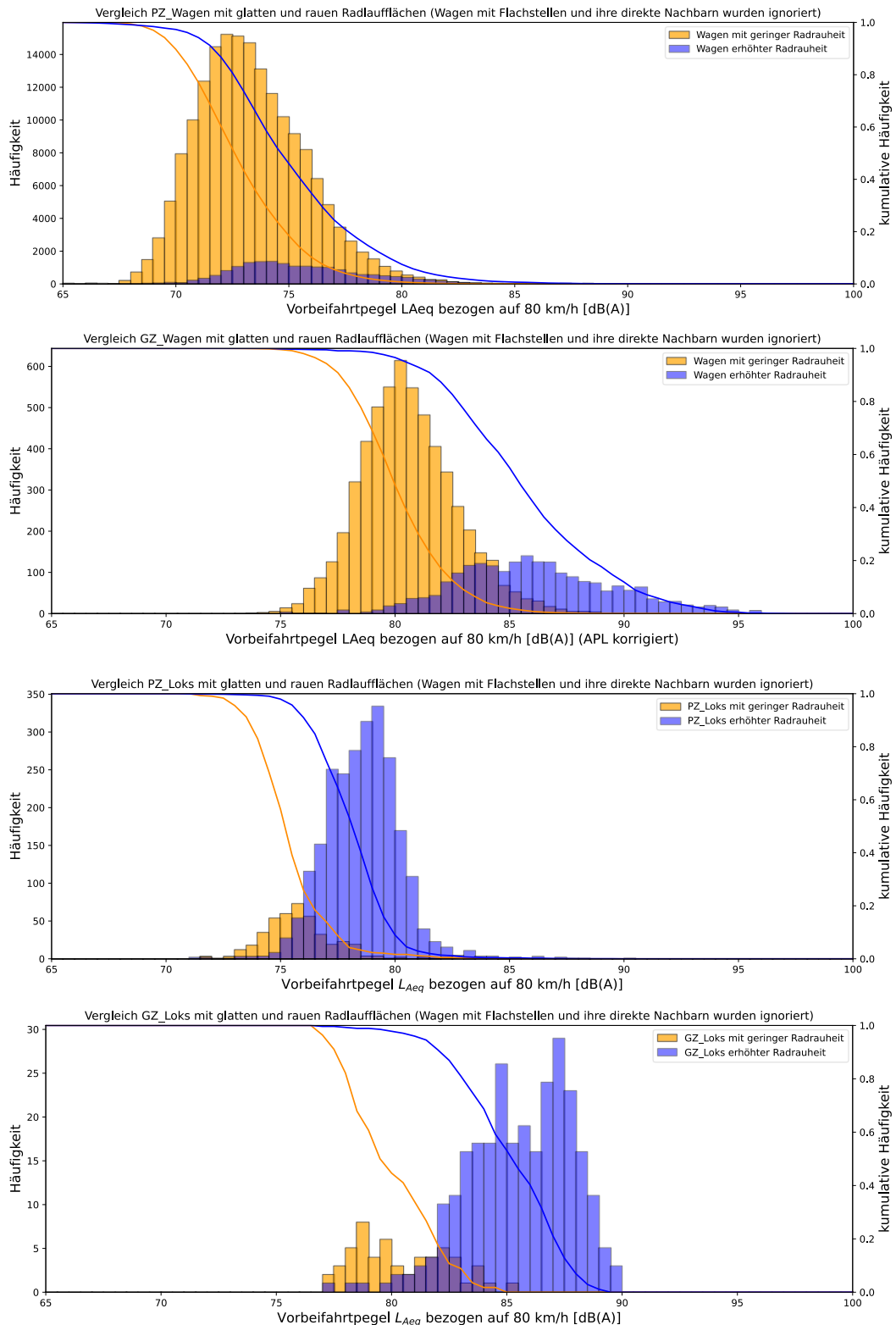


Abbildung 39 mittlere Verteilungen des Vorbeifahrtpegel L_{Aeq} (bezogen auf 80 km/h) für glatte Räder ($L_{ACA} < 5$) und solche bei denen die Rauheit erhöht ist ($L_{ACA} > 10$).

Tabelle 12. Erhöhung des Vorbeifahrtpegel L_{Aeq} (bezogen auf 80 km/h) für glatte Räder ($L_{ACA} < 5$) und solche bei denen die Rauheit erhöht ist ($L_{ACA} > 10$).

Rauheits-Einzelwerte L_{ACA}	PZ-Wagen	GZ-Wagen	PZ-Lok (RE460)	GZ-Loks
$L_{ACA} < 5$	72,5	80	75	79
$L_{ACA} > 10$	74,5	85,5	78	85

Alle Fahrzeugeinheiten in Abbildung 39 (Tabelle 11) weisen einen Anstieg des Schallpegels mit zunehmender Radrauheit auf. Personenwagen (PZ-Wagen) haben insgesamt die geringsten Vorbeifahrtpegel und ein geringer Anteil der gemessenen Personenwagen zeigen erhöhte Radrauheiten. In der Gruppe der PZ-Loks wurde ausschließlich die häufig verkehrende RE 460 ausgewertet. Ein großer Anteil der PZ-Loks weisen erhöhte Radrauheiten und gleichzeitig erhöhte Vorbeifahrtpegel auf. Die mittleren Vorbeifahrtpegel der PZ-Loks liegen um 5-6 dB höher als die der Personenwagen. Bei Güterwagen (GZ-Wagen) findet sich ein höherer Anteil Wagen mit erhöhten Radrauheiten als bei Personenwagen. Ein Großteil der Messungen von GZ-Loks weisen auf erhöhte Radrauheiten hin, wobei der mittlere Vorbeifahrtpegel einer GZ-Lok mit rauen Rädern in etwa dem eines Güterwagens mit rauen Rädern entspricht. Dies zeigt das hohe Potential einer Vermeidung überhöhter Radrauheiten wie es z.B. durch eine zustandsabhängige Radwartung erreicht werden kann. Überhöhte Schallemissionen können damit vermieden werden.

7.2.1.4 Zusammenhang Radrauheit und Oberbauanregung

Der Theorie nach hat die Radrauheit nur einen geringen Anteil an den in den Oberbau (hier Schotterbett) eingebrachten Schwingungen. Aus Abbildung 33 und Abbildung 34 ist ersichtlich, dass es vor allem Loks und Güterwagen sind die erhöhte Radrauheiten aufweisen können. Allerdings weisen deren Räder neben erhöhter Radrauheit auch längerwellige Anteile auf. Um eine statistisch relevante Testgruppe zu haben, die Wagen mit und ohne erhöhte Rauheiten enthält, gleichzeitig, aber auch vergleichbare Achslasten und Geschwindigkeiten haben, werden in Abbildung 40 nur Personenwagen gleicher Bauart (hier beispielhaft IC2000) ausgewertet. Des Weiteren werden Wagen mit Flachstellen oder ausgeprägten Polygonen sowie deren Nachbarwagen aus der Auswertung ausgeschlossen. Es zeigt sich keine wesentliche Erhöhung des Beschleunigungspegel im Ballast.

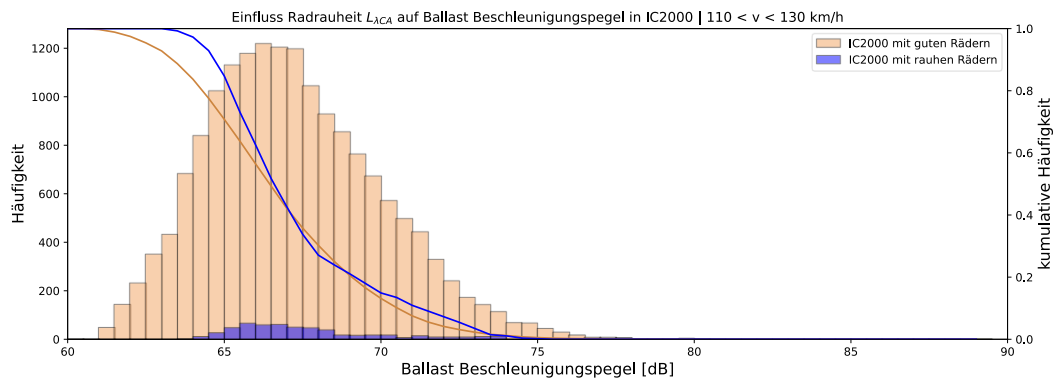


Abbildung 40 Einfluss der Radrauheit (für Wagen ohne Polygone/ Flachstellen) auf den Beschleunigungspegel im Schotterbett für IC2000 Wagen mit Geschwindigkeiten 120 km/h

Es sollte noch erwähnt werden, dass die Radrauheiten der in der Testgruppe verwendeten IC2000 keine hohen oder sehr hohen Rauheiten aufweisen (zumindest jene Wagen, die nicht auch zusätzlich Polygone oder Flachstellen enthielten). Es ist nicht auszuschließen, dass Wageneinheiten mit sehr hohen Radrauheiten auch einen deutlicheren Beitrag zur Anregung des Oberbaus liefern.

7.2.1.5 Zusammenhang Radrauheit und Erschütterung

Auch auf den Erschütterungspegel sollte die Radrauheit keinen wesentlichen Einfluss haben so die Räder mit erhöhten Radrauheit nicht auch zusätzlich weitere Raddefekte, wie Polygone oder Flachstellen aufweisen. Beispielhaft wird dies wieder anhand der IC2000 Personenwagen aus 7.2.1.4 untersucht.

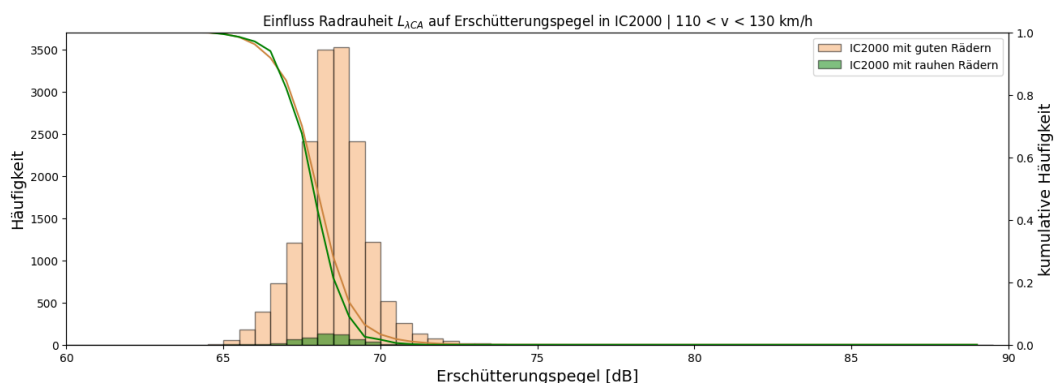


Abbildung 41 Einfluss der Radrauheit (für Wagen ohne Polygone/ Flachstellen) auf den Erschütterungspegel im Schotterbett für IC2000 Wagen mit Geschwindigkeiten 120 km/h

Wagen mit Polygonen oder Flachstellen sind in der Auswertung in Abbildung 41 ausgeschlossen, ebenso Nachbarwagen zu Wagen mit Flachstellen. Es zeigt sich kein wesentlicher Einfluss auf den Erschütterungspegel.

7.3 Polygone

Polygone sind Unrundheiten auf der Radlauffläche im langwelligeren Bereich. Zur Bewertung der Polygone ermittelt das WMS ein Maß für die Polygon-Amplitude und stellt diese als Polygon-Indikator (in dB) dar.

7.3.1.1 Auftretenshäufigkeit

Abbildung 42 zeigt die Verteilung des ermittelten Polygon-Indikators aller in den Auswertungen eingeschlossenen Achsen. Auch für die Auswertung der Polygone wurden Wagen (und Achsen) mit Flachstellen nicht mitbewertet. Zusätzlich wurden auch hier wieder direkte Nachbarwagen zu Wagen mit mindestens moderaten Flachstellen aus der Statistik ausgeschlossen.

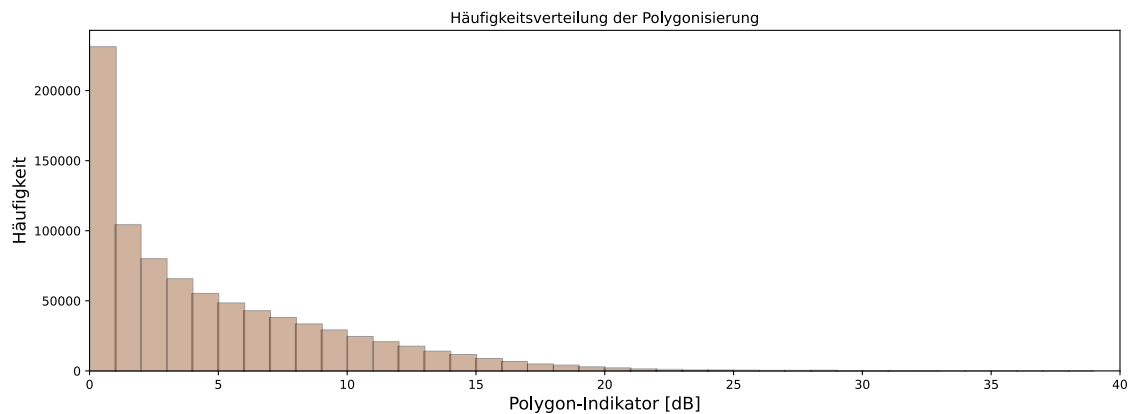


Abbildung 42 Häufigkeitsverteilung der Polygon-Indikation aller gemessenen Achsen

Wir unterteilen in unseren weiteren Auswertungen wieder in die Gruppen: Personenzugeneinheiten ohne Loks (PZ Wagen), Güterwagen (GZ Wagen) und Loks (Abbildung 43). Wie schon bei der Rauheit sind Loks bei Polygonen größtenteils als auffällig einzustufen.

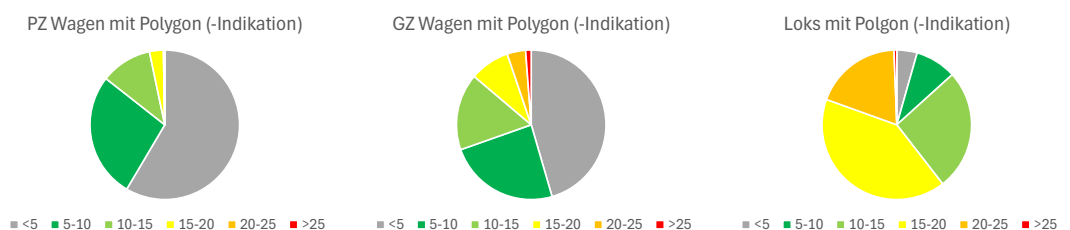


Abbildung 43 Polygon-Indikation gemessen in den Fahrzeuggruppen der Personenzüge und Güterzüge, wobei Loks separat aufgeführt sind.

Tabelle 13. Prozentuale Anzahl der Personenwagen/Güterwagen/Loks in den Polygonklassen:.

Klassierung Polygone	Personenwagen	Güterwagen	Loks
Glatt	60	45	5
Schwach	25	24	11
Moderat	10	15	26
Deutlich	4	9	39
Hoch	1	5	18
Sehr hoch	-	2	1

Polygone treten bei allen Fahrzeugtypen in relevantem Umfang auf, am häufigsten jedoch bei Lokomotiven: Hier sind 95 % der Räder betroffen, 19 % der Räder sind dabei hoch/sehr hoch polygonisiert. Bei Güterwagen sind 55 % der Räder betroffen und 7% sind mindestens hoch/sehr hoch polygonisiert. Bei Personenwagen sind es 40% bei einer hohen/sehr hohen Polygonisierung von 1 %. Die Ergebnisse zeigen, dass insbesondere Loks und Güterwagen hinsichtlich Polygonbildung einen erhöhten Instandhaltungsbedarf aufweisen.

Wellenlängenbereiche: Für alle Fahrzeugtypen sind vor allem die Wellenlängenbereiche von 4 cm (bei einem Raddurchmesser von 85 cm entsprechend der 67. Ordnung) bis 40 cm (bei einem Raddurchmesser von 85 cm entsprechend der 7. Ordnung) betroffen. Für die größeren Raddurchmesser bei den Loks entspricht dies einer Ordnung von 78 bis 8 (bei einem angenommenen Durchmesser von 1,0 m).

7.3.1.1 Zusammenhang zur Schallemission

Ein deutlicher Einfluss der Polygone auf die Schallemission ist nicht zu erwarten (Abbildung 11). Aufgrund des Wellenlängenbereichs der Polygonisierung überschneiden sich die Polygone teils mit der Radrauheit, wodurch sich auch eine (leichte) Korrelation zum Luftschall ergibt.

In Abbildung 44 betrachten wir wieder die bereits in 7.2 referenzierte Testgruppe der IC2000 Personenwagen im engen Geschwindigkeitsfenster um 120 km/h. Hier wurden Wagen mit Flachstellen oder deutlich erhöhten Radrauheiten sowie deren Nachbarwagen aus der Analyse ausgeschlossen. Es zeigt sich, dass Polygone vor allem dazu führen, das leise Wagen lauter werden, sonst aber keinen wesentlichen Einfluss auf den Vorbeifahrtpegel haben.

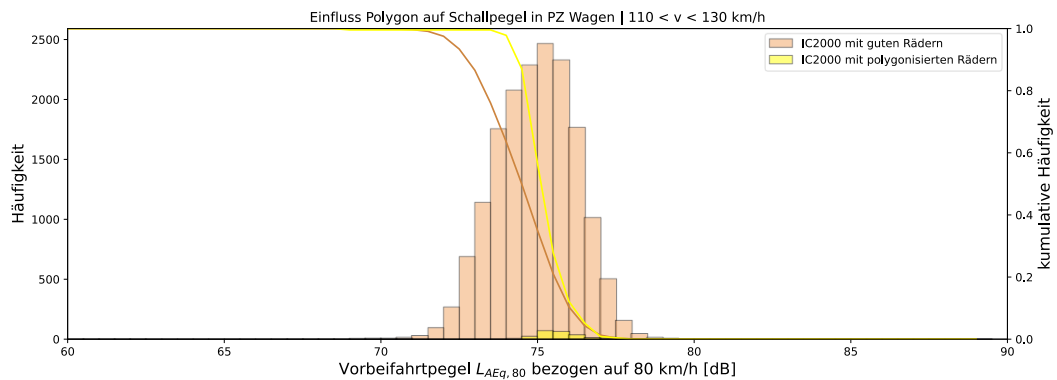


Abbildung 44 Einfluss der Polygone auf den Vorbeifahrtpegel von IC2000 Personenwagen (ohne Flachstellen), mit Polygonen (>15) und ohne Polygone (<5)

7.3.1.2 Zusammenhang zur Oberbaudynamik

Der Schotter als elastischer Bestandteil des Oberbaus reagiert besonders empfindlich im Bereich seiner Eigenfrequenzen, die in der Literatur zwischen 25 Hz und 150 Hz angegeben werden. Dadurch können Resonanzphänomene, hohe Beschleunigungsantworten und plastische Verformungen auftreten [31].

Sensitive Wellenlängenbereiche der Polygone sind – in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit - in der folgenden Abbildung markiert.

Demnach sind Polygone niedriger Ordnung in einem Wellenlängenbereich von 0,2 bis 1 m bei typischen Fahrgeschwindigkeiten als besonders kritisch anzusehen. Die in den Untersuchungen beobachteten Polygone weisen Wellenlängen von etwa 4 cm bis 40 cm auf (Abbildung 33, Abbildung 34). Die langwelligeren Polygone zwischen 20 cm und 40 cm sind, je nach Fahrgeschwindigkeit, besonders geeignet, die Schotterresonanzen anzuregen.

	Fahrgeschwindigkeit, km/h				
Wellenlänge, m	60	80	100	120	140
3	6	7	9	11	13
2	8	11	14	17	19
1	17	22	28	33	39
0,5	33	44	56	67	78
0,2	83	111	139	167	194
0,1	167	222	278	333	389
0,05	333	444	556	667	778
0,02	833	1111	1389	1667	1944

Abbildung 45 Geschwindigkeits- und wellenlängenabhängige Anregungsfrequenzen [Hz], welche geeignet sind, die Eigenresonanzen des Schotters anzuregen.

Abbildung 46 zeigt den hohen Einfluss, den polygonisierte Räder auf die Schwingungen im Schotterbett haben. Es zeigt sich, das hohe Pegel im Schotter meist bei Fahrzeugen mit polygonisierten Rädern auftreten.

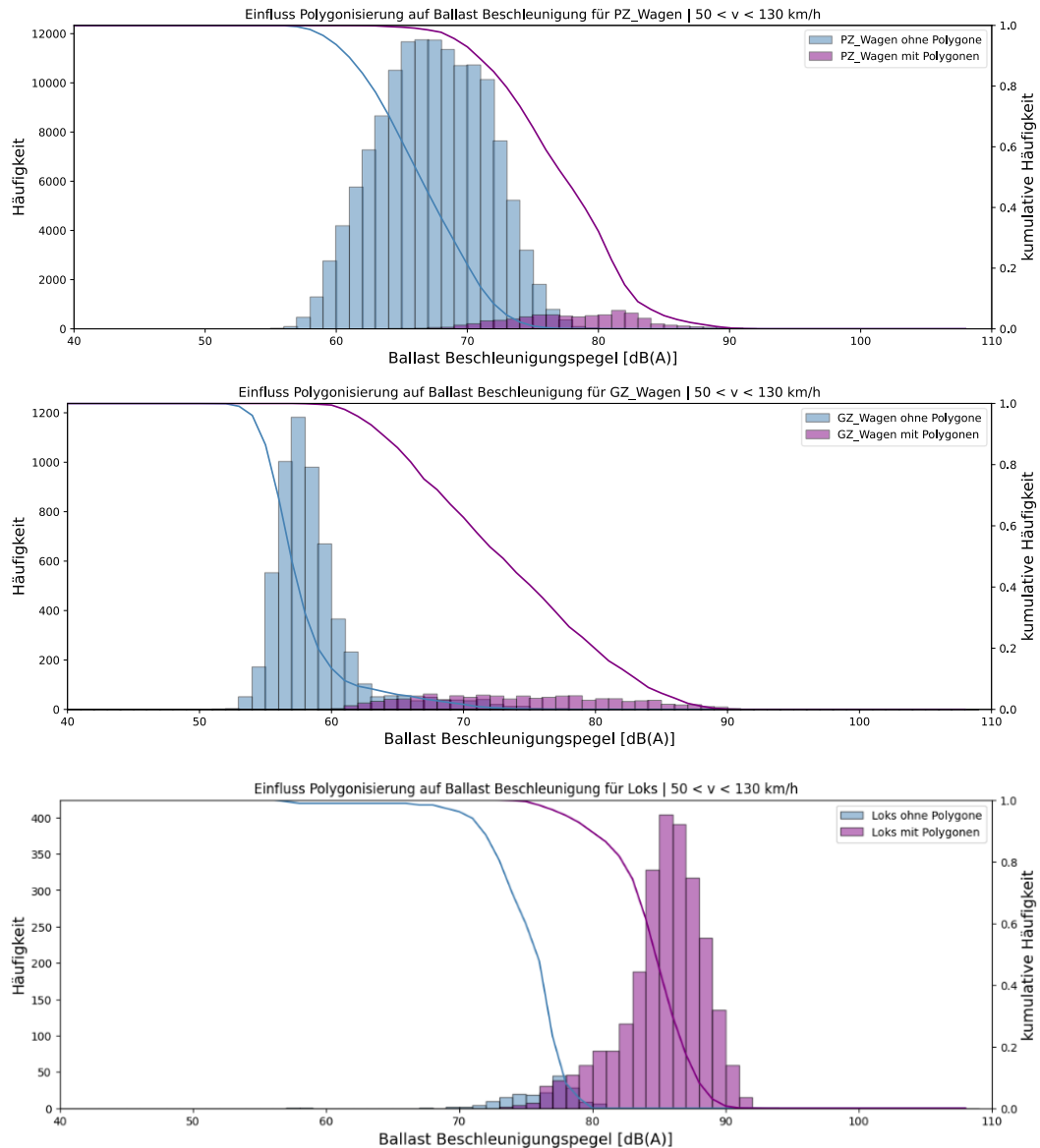


Abbildung 46 mittlerer Beschleunigungspegel (energetisch) im Schotter bei Überfahrt von Fahrzeugeinheiten mit (>15) und ohne Polygone (<5).

Tabelle 14. Median des mittleren Beschleunigungspegel (energetisch) im Schotter für glatte Räder (P < 5) und Räder mit mindestens starker Polygonisierung (P > 15).

Polygonisierung	PZ-Wagen	GZ-Wagen	Lok
< 5	66	57	76
> 10	78	74	85

Die Pegelerhöhungen zwischen glatten Rädern (< 5) und Räder mit mindestens starker Polygonisierung (> 15) betragen für die Fahrzeugkategorien ca. 8-17 dB. Eine Erhöhung von 20 dB entspricht dabei einem 10-fach erhöhten Beschleunigungspegel.

7.3.1.3 Zusammenhang zu Erschütterungen

Für den Boden ist die Auswertung schwieriger, weil

- zum einen keine Geophone am Messquerschnitt des WMS verbaut sind,
- zum anderen aber auch weil sich die Erschütterungssignale aufeinanderfolgender Fahrzeugeinheiten viel stärker überlappen als dies für die Sensorik im Oberbau der Fall ist. Aufgrund der Wellenausbreitung im Boden dauert es eine Zeitspanne, bis sich die Wellen (v.a. die Rayleighwelle, welche den größten Energieanteil besitzt) bis zum Erschütterungsmesspunkt ausgebreitet haben und sich der maximale Pegel am Erschütterungsmesspunkt zeigt. Die Pegel sind damit im Bereich der folgenden Wagen erst erhöht. Polygone wurden meist an einzelnen Fahrzeugeinheiten oder gar nur an einzelnen Achsen erkannt, der mittlere Erschütterungspegel der gesamten Vorbeifahrt war dadurch oft nur gering beeinträchtigt

Ausgeprägte Polygone wurden vor allem im Wellenlängenbereich 5-40 cm gefunden (ein Beispiel-Spektrum eines polygonisierten Rades findet sich in Abbildung 57). Für die typischen Vorbeifahrtgeschwindigkeiten von 84 km/h bei Güterzügen und 115 km/h bei Personenzügen ergeben sich Anregungsfrequenzen im Erschütterungsspektrum oberhalb von 80 Hz. In diesem Frequenzbereich ist die Erschütterungsanregung nicht mehr dominant (siehe Abbildung 16).

Abbildung 47 zeigt den mittleren Einfluss der Polygonisierung in PZ Wagen und Loks auf den Erschütterungspegel (z-Richtung). Weil der Erschütterungspegel zusätzlich abhängig von der Masse und Geschwindigkeit sein kann wurde ein begrenzter Geschwindigkeitsbereich betrachtet und Güterwagen ausgeschlossen da wenige Fahrten mit recht unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Beladungen vorliegen.

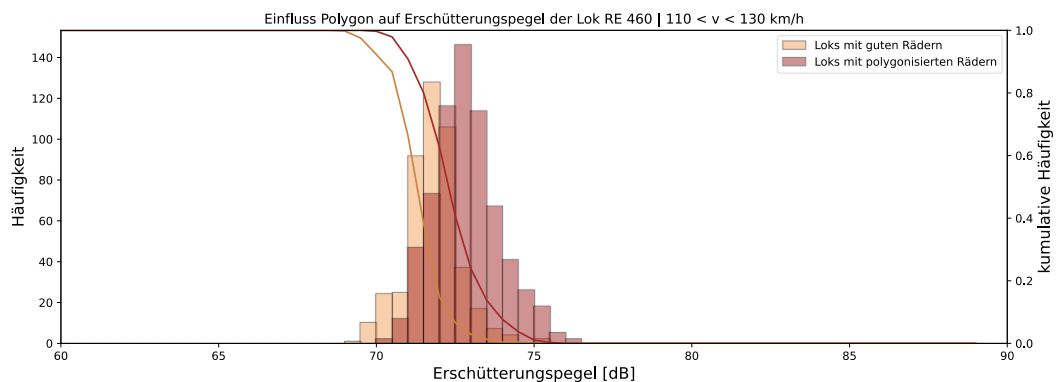
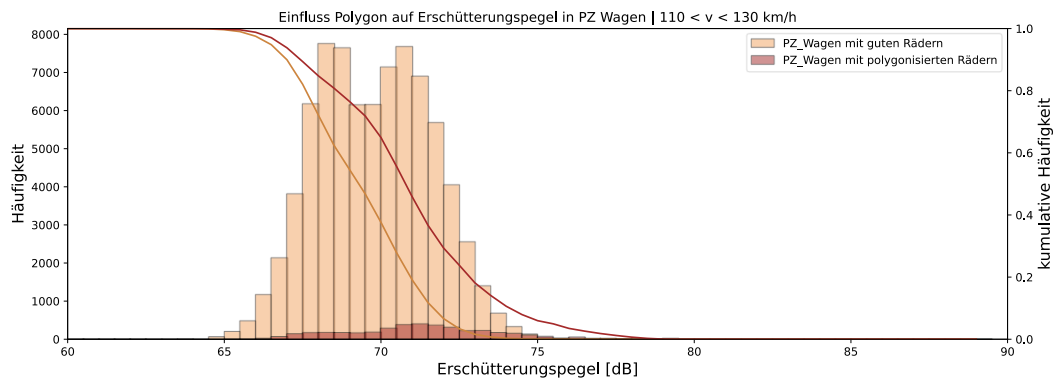


Abbildung 47 Erschütterungspegel in z-Richtung für Personenzugeneinheiten (oben) mit guten Rädern (<5) und polygonisierten Rädern (>15) und die Lok RE460 (unten) mit verschobenen Grenzwerten für gute Räder (<10) und polygonisierte Räder (>20)

Abbildung 48 zeigt für die beispielhaft in 7.2 und 7.3.1.1 verwendeten Testgruppe der IC2000 Personenwagen das Polygone klar mit Wagen korrelieren die auch einen erhöhten Erschütterungspegel aufweisen.

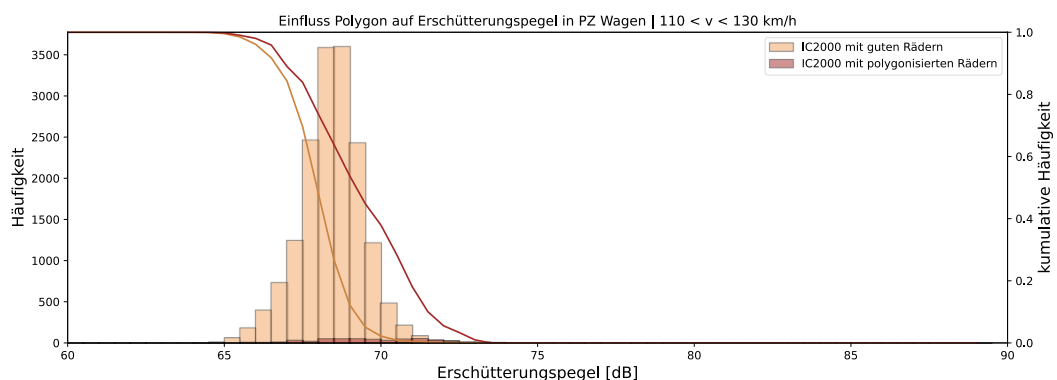


Abbildung 48 Einfluss der Polygone auf den Erschütterungspegel von IC2000 Personenwagen (ohne Flachstellen)

Dass Polygone die Erschütterung beeinflussen, zeigt auch Abbildung 49 für einige zufällig gewählte Fahrzeugeinheiten der am häufigsten verkehrenden Personenzüge.

Die Wageneinheit 94XX1523 ist der vorausfahrende Teil eines Flirt, welcher auf der letzten Achse angetrieben ist.

Vergleich der häufigsten PZ Wagen ($v > 50$ km/h)

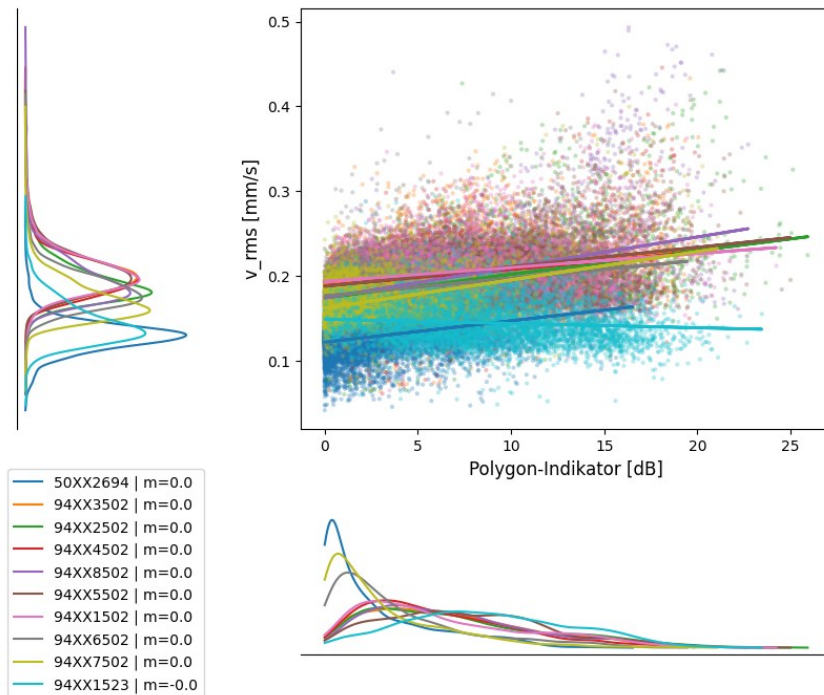


Abbildung 49 Schwingschnelle am Erschütterungsmesspunkt in 8m (z-Richtung) für Personenzugeneinheiten aufgetragen gegen ihren Polygon-Indikator.

Da die auftretenden Polygone bei den vorherrschenden Fahrgeschwindigkeiten nicht die Frequenzen im Bereich des Erschütterungsmaximum anregen, sind an der untersuchten Messstelle erwartungsgemäß keine hohen Auswirkungen der Polygone auf die Erschütterungsemission zu beobachten. Begründet ist dies primär im Antwortverhalten des Bodenmesspunktes, der im Fahrbahnlabor dominante Anteile im tieffrequenten Bereich aufweist. Das Polygone und Flachstellen nicht vernachlässigt werden dürfen, macht eine spektrale Auswertung deutlich. In Abbildung 50 sind die Schnelle-Spektren des Erschütterungsmesspunktes (MQ22) einiger häufiger am Fahrbahnlabor verkehrenden Wagenbauarten dargestellt. Zusätzlich ist jeweils der Einfluss der Radformfehler (Polygone und Flachstellen) mit aufgetragen. Im Fall der Polygoneauswertung sind Flachstellen ausgeschlossen. Es zeigt sich, dass sowohl Polygone aber besonders auch Flachstellen den Erschütterungspegel im Frequenzbereich oberhalb von 60 Hz (teilweise oberhalb 20 Hz) deutlich erhöhen können. Die hier dargestellten Spektren sind Mittelwerte (energetisch) über das gesamte Jahr.

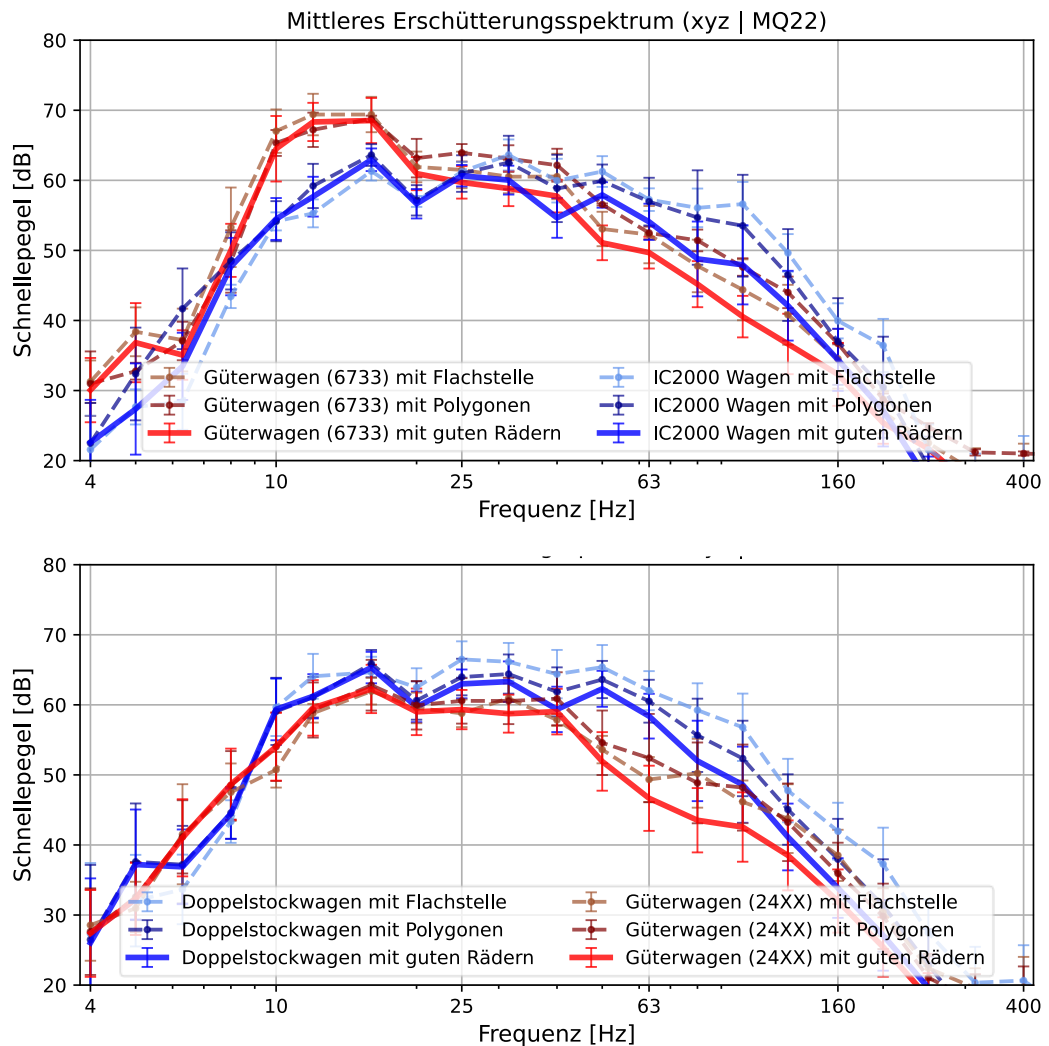


Abbildung 50 Terzspektren der Schnelle am Erschütterungsmesspunkt einiger im Fahrbahnlabor häufiger verkehrender Wagen Bauarten. Doppelstockwagen (RV-Dosto, FV-Dosto, RABe512) und IC2000 Wagen (ebenfalls Doppelstock) und 4-achsigen Güterwagen (Wagentype 6733) und 2-achsigen Wagen (Wagentypen 24xx)

Im Rahmen des europäischen Forschungsprojekts RIVAS ([27] - [29]) wurden bei einer besseren Übereinstimmung der Polygonanregungsfrequenzen und dem Erschütterungsmaximum an zwei Lokomotiven gleichen Typs mit unterschiedlich stark ausgeprägter Polygonalisierung Unterschiede im Erschütterungspegel (4m) von bis zu 20 dB festgestellt. In dem in Kapitel 7.4 gezeigtem Beispiel wird immerhin noch eine Minderung des Erschütterungspegels (8m) von knapp 10 dB nach einer Radüberarbeitung nachgewiesen für einen Personenwagen des IC2000.

Die **Geschwindigkeitsabhängigkeit** der gemessenen Schwingschnelle (rms) ist in Abbildung 51 für die Lok RE 460 verdeutlicht und in Abbildung 52 für ausgewählte Wagentypen der am häufigsten verkehrenden Personenzüge.

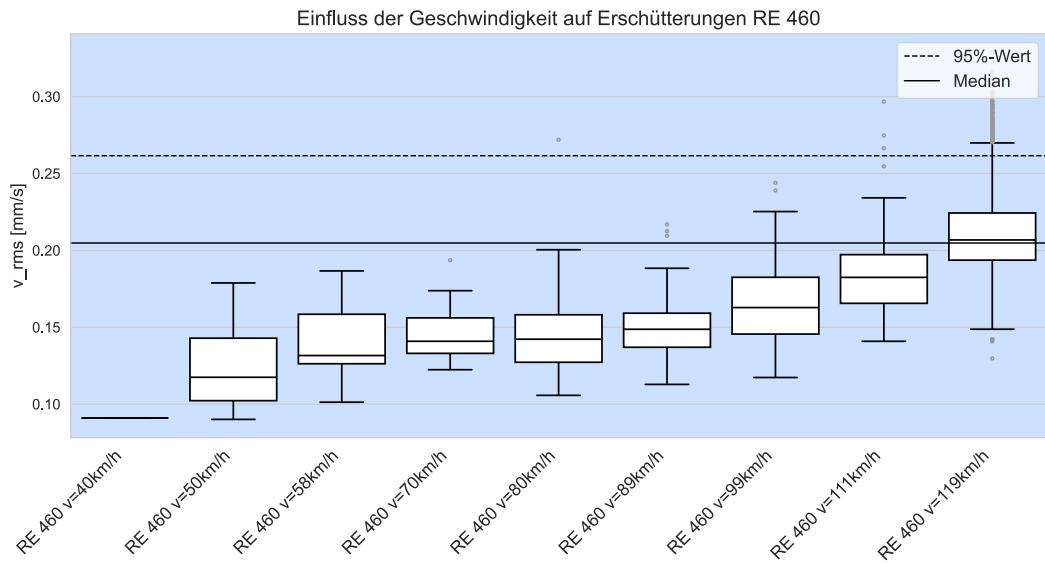


Abbildung 51 Einfluss der Geschwindigkeit auf die Erschütterung (8m von der Gleisachse in z-Richtung) für die am häufigsten verkehrende Lok RE 460 im Fahrbahnlabor.

Vergleich der häufigsten PZ Wagen ($v > 50$ km/h)

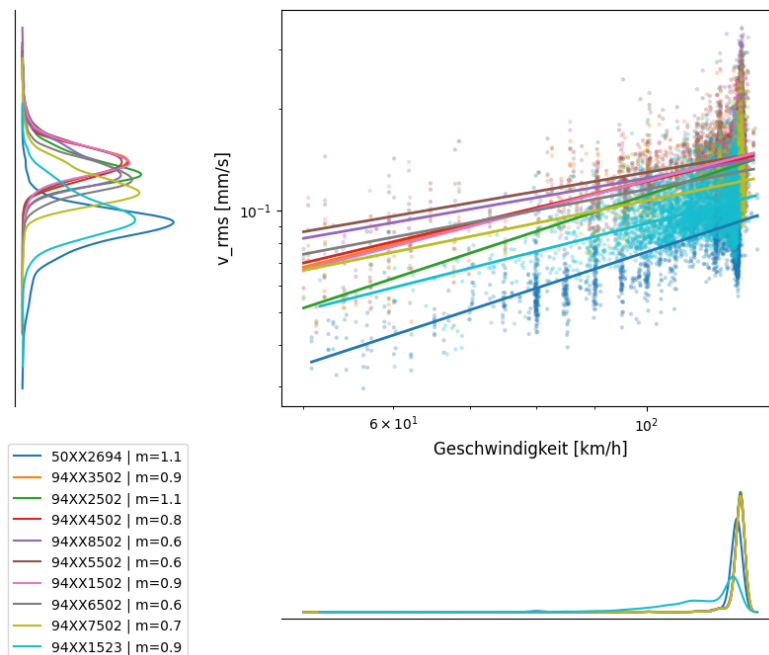


Abbildung 52 Schwingschnelle am Erschütterungsmesspunkt in 8m (z-Richtung) für Personenzugseinheiten doppellogarithmisch aufgetragen gegen die Geschwindigkeit.

In Abbildung 53 ist die mittlere Schwingschnelle (z-Richtung) aller an der Messeinrichtung verkehrenden Loks (UIC-Typecode 91) dargestellt zusammen mit der Angabe der mittleren gefahrenen Geschwindigkeit (oben) und der mittlere

Polygon-Indikator der für diese Loks gemessen wurde (unten). Es zeigt sich eine Korrelation zwischen der mittleren Schwingschnelle und der Polygonisierung aber auch konstruktionsbedingte Unterschiede zwischen den einzelnen Bauarten (insbesondere RE 484).

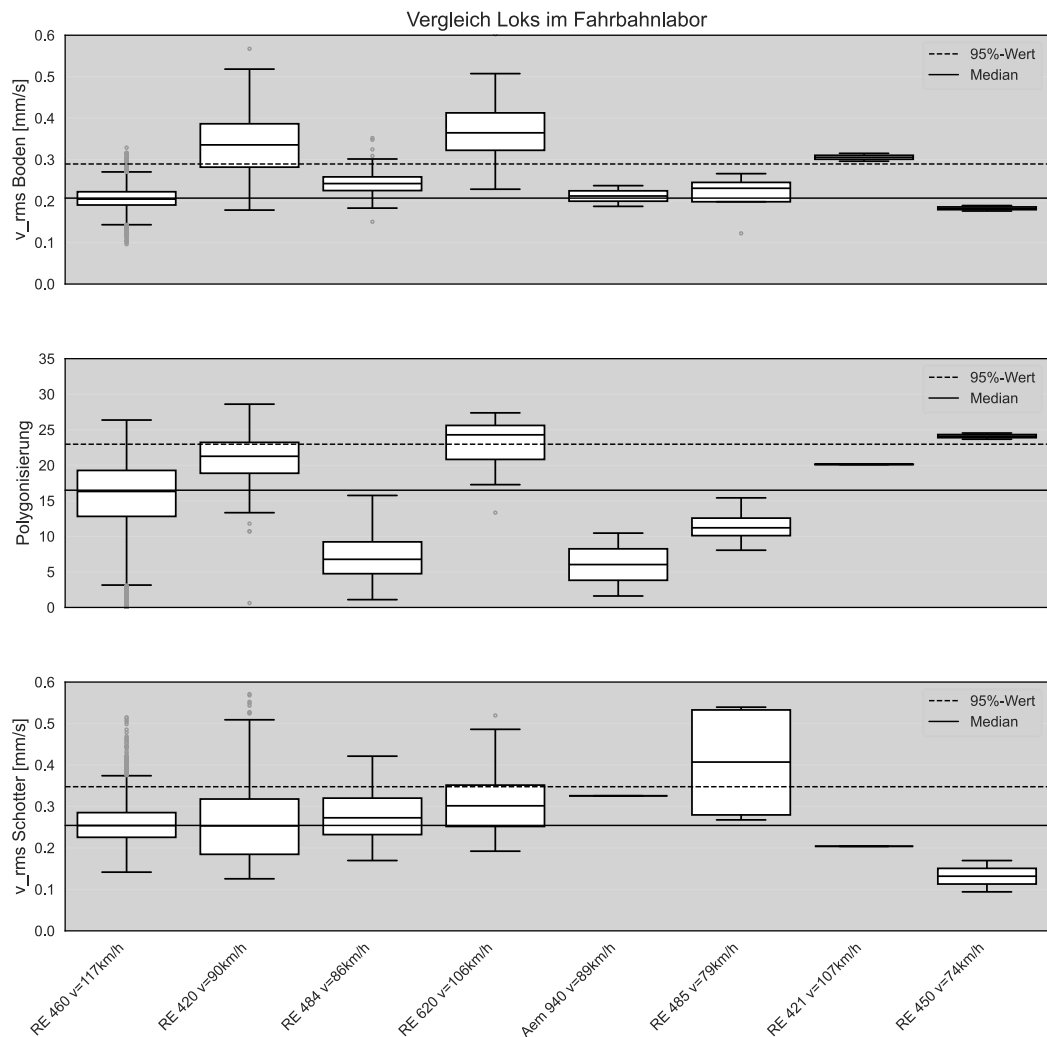


Abbildung 53 Schwingschnelle am Bodenmesspunkt in 8m von der Gleisachse und im Schotter unterhalb Schwellen und Schiene sowie Polygon-Indikation der im Fahrbahnlabor verkehrenden Loks

Aus Abbildung 53 erschließt sich, dass Loks der Baureihe RE 420 im Mittel eine höhere Radrauheit im Wellenlängenbereich der Polygone aufweisen und höhere Schnellepegel am Erschütterungsmesspunkt in 8m Entfernung zur Gleisachse verursachen als Loks der Baureihe RE 460. Gleichzeitig sind die im Schotter unterhalb der Schwelle (und Schiene) gemessenen Schnellen beider Loks vergleichbar. Für die Ermittlung der Schnelle im Schotter wurde das Beschleunigungsspektrum integriert, die Pegelsumme gebildet und dann in Schnelle umgerechnet. Die Lok RE 460 verkehrt fast ausschließlich in Personenzügen (mittlere Geschwindigkeit 117 km/h) während die RE 420 vornehmlich in Güterzügen zum Einsatz kommt (mittlere Geschwindigkeit 90 km/h).

In Abbildung 54 sind Schnellespektren beider Loks im Schotter (oben) und am Bodenmesspunkt (unten) einander gegenübergestellt. Unterschieden wird zusätzlich in Loks mit guten Rädern (Polygon-Indikation < 15 und ohne Flachstellen) und Loks mit Flachstellen oder Polygonen (Flachstellen behaftete Fahrzeuge ausgeschlossen). Für einen direkteren Vergleich beider Lokomotiven wurde außerdem ein enges Geschwindigkeitsfenster von ± 5 km/h um die mittlere Geschwindigkeit 90 km/h der RE 420 gewählt. Aus den Spektren wird ersichtlich, dass Radunrundheiten vor allem den Frequenzbereich oberhalb von 60 Hz wesentlich beeinflussen. Welche Frequenzen das Erschütterungsspektrum dominieren hängt zusätzlich stark von lokalen Gegebenheiten (Bodeneigenschaften) ab. Maßgeblich bei tieferen Frequenzen sind oft die ungedeckelten Massen welche auch ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal der RE 420 (Tatzlager-Antrieb – Fahrmotor liegt teils auf Achse auf) und RE 460 (Drehstrom-Antrieb – Fahrmotor abgedeckt). Für beide Lokomotiven ergibt sich am Bodenmesspunkt (MQ22) ein dominanter Frequenzbereich zwischen 10 und 50 Hz. Die RE 420 zeigt gegenüber der RE 460 einen um ca. 6 dB erhöhten Schnellepegel.

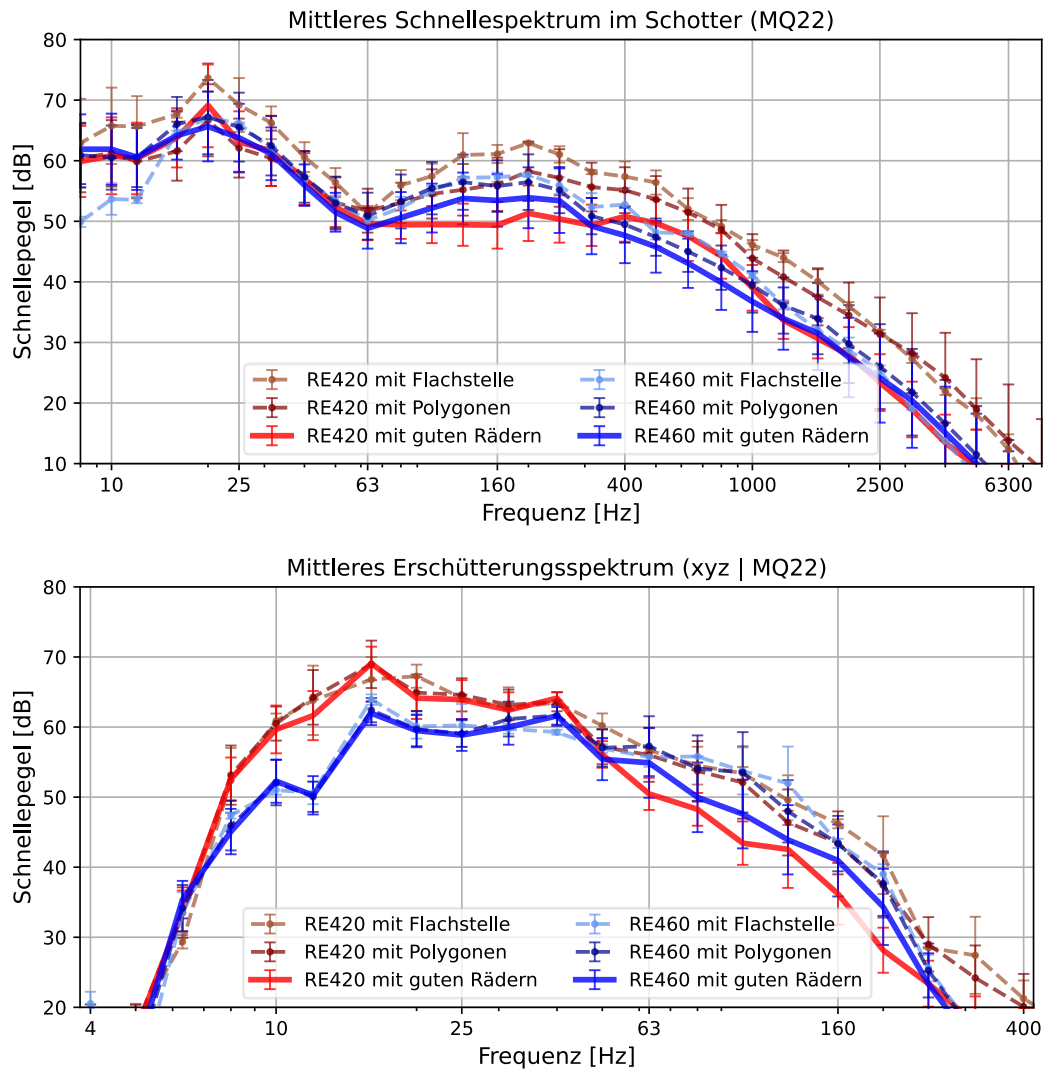


Abbildung 54 Schwingschnelle Spektren am Bodenmesspunkt in 8m von der Gleisachse und im Schotter unterhalb Schwellen und Schiene für die Loks RE460 und RE420 im Geschwindigkeitsfenster ~85-95 km/h.

7.4 Kontinuierliche Zustandsüberwachung und Wartungszustand

Die automatische Messung und das Monitoring der Radqualität eröffnet neue Möglichkeiten für die effiziente und zukunftsorientierte Instandhaltung. Durch die kontinuierliche Zustandsüberwachung regelmäßig verkehrender Fahrzeugeinheiten und Achsen werden die Radzustandsdaten in Echtzeit ermittelt und stehen für die Wartungsplanung zur Verfügung.

Damit bildet die Zustandsüberwachung der Räder die Grundlage für eine moderne zustandsbasierte Instandhaltung (Condition-Based Maintenance). Das bedeutet: Wartung erfolgt nicht mehr nach starren Intervallen, sondern bedarfsgerecht – basierend auf dem tatsächlichen technischen Zustand der Räder. Dies verringert nicht nur die Schall- und Erschütterungsemission und verbessert die Oberbaudynamik sondern erhöht auch die Betriebssicherheit und optimiert Stillstandszeiten und Wartungskosten.

Abbildung 55 zeigt wie sich der Polygon-Indikator einiger häufiger verkehrender Personenwagen deutlich mit der Zeit verändert. Der Wagen mit der Nummer 508526941374 (cyan) wurde im August 2024 überdreht, der Effekt ist klar erkennbar.

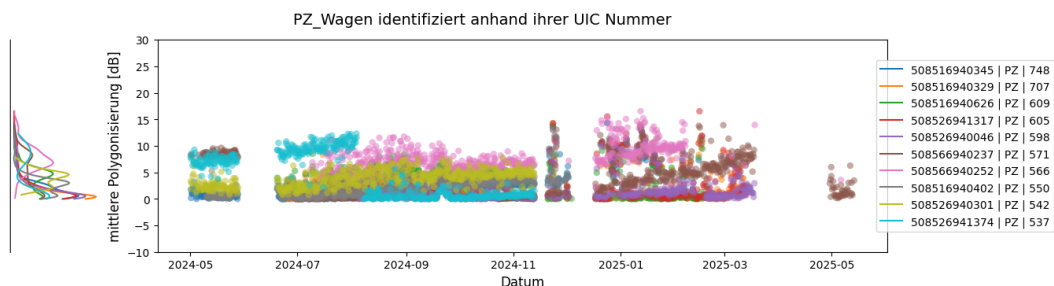


Abbildung 55 mittlere Polygonbildung in einigen häufiger verkehrenden Personenwagen.

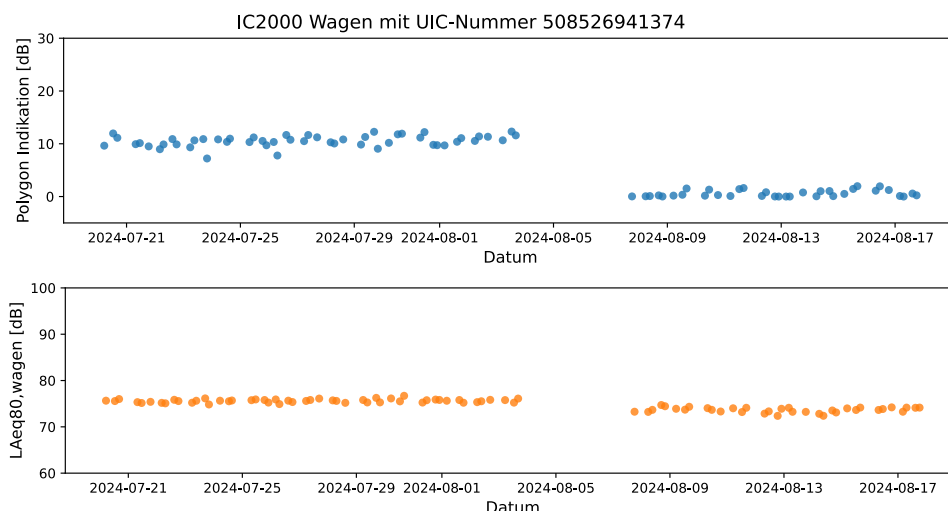


Abbildung 56 Polygon Indikation und mittlerer Schallpegel Verlauf 14 Tage vor und nach Radüberarbeitung am IC2000 Wagen mit der UIC-Nummer 508526941374.

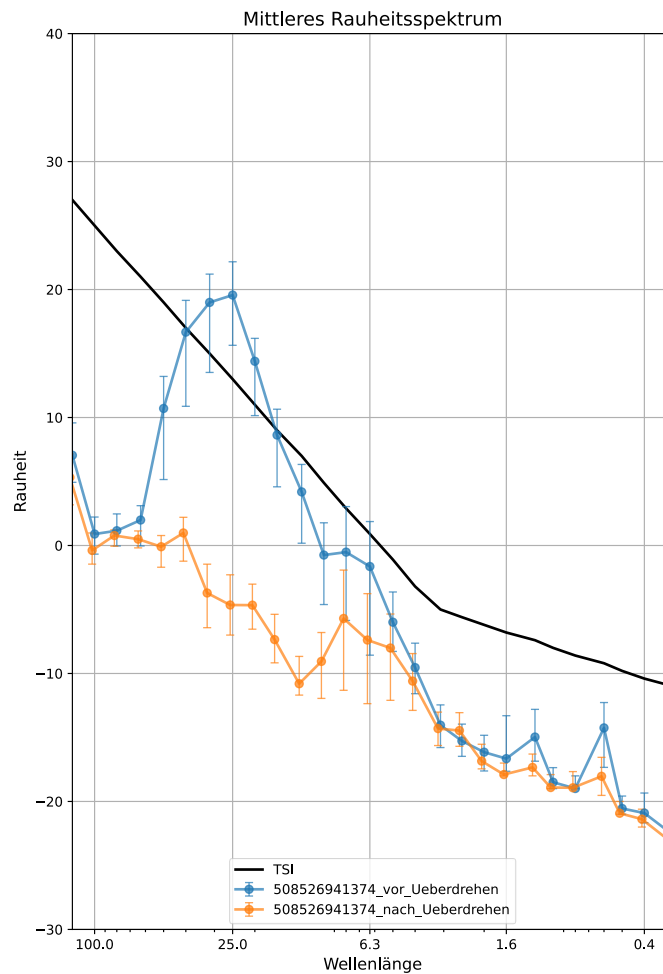


Abbildung 57 mittleres gemessenes Wellenlängen-Terzspektrum der indirekten Rauheit für den Wagen 508526941374 in den zwei Wochen vor und nach der Überdrehung

Der unterschiedliche Radzustand vor und nach der Wartung wird auch ersichtlich aus den indirekt ermittelten Wellenlängenterzspektrern der Radlauffläche (Abbildung 57). Um den Effekt der Radwartung auf den Oberbau (Schotter) und die Erschütterungsemission (Bodenmesspunkt 8m von Gleisachse) zu verdeutlichen sind in Abbildung 58 Schnelle-Spektren des Zeitraum vor und nach der Radüberarbeitung dargestellt. Alle Vorbeifahrtspektren (geometrische Vorbeifahrtdauer am Sensorquerschnitt) des IC2000 Wagens mit der UIC-Nummer 508526941374 aus den 14 Tagen vor und nach der Radüberarbeitung (jeweils ca. 40 Fahrten) wurden energetisch gemittelt. Der Einfluss der Radunrundheit (Polygonisierung) zeigt sich deutlich im Schotterpegel und auch sehr deutlich am Erschütterungsmesspunkt (wo sich ein um knapp 10 dB erhöhter Pegel zeigt). Der Effekt der Radunrundheiten auf den Emissionspegel für den gesamten Zug fällt hier deutlich geringer aus, da nur der eine Wagen stark betroffen war. Im Schallpegelverlauf des Wagens zeigt sich keine wesentliche Veränderung durch die Radüberarbeitung.

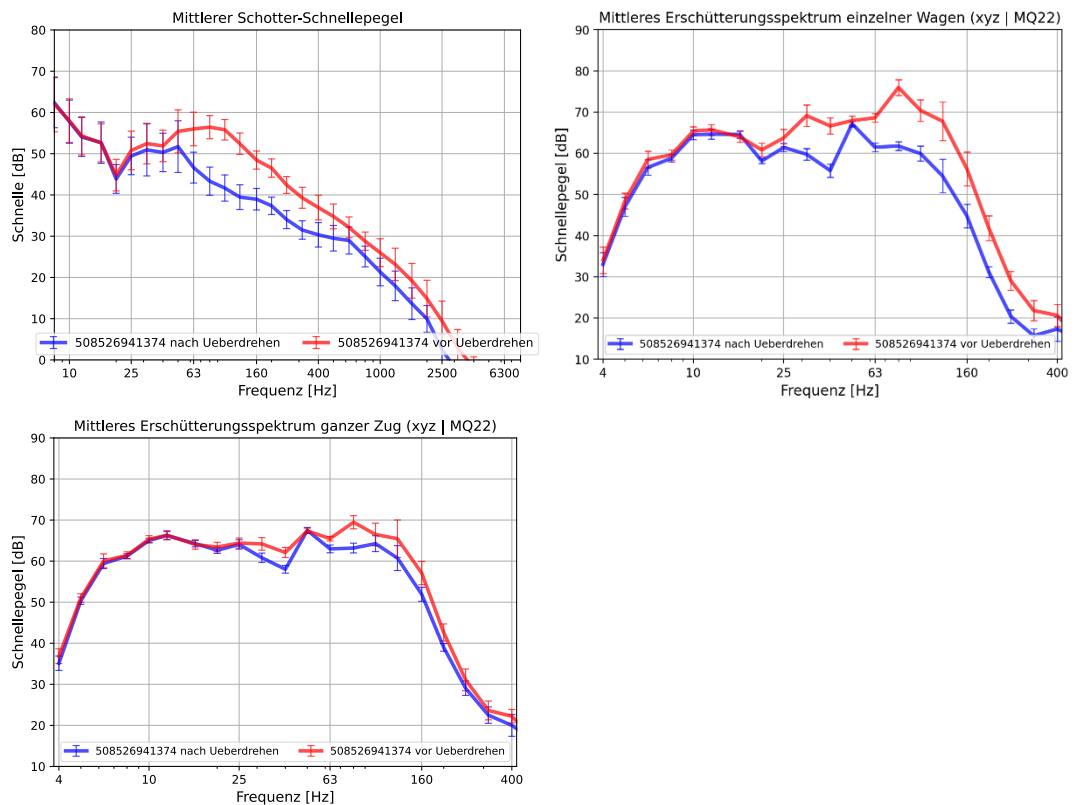


Abbildung 58 Mittleres Schnelle-Spektrum im Schotter (oben links) und am Erschütterungsmesspunkt in 8m Entfernung (oben rechts) aller erfassten Vorbeifahrten des IC2000 Wagens mit der UIC-Nummer 508526941374 aus 14 Tagen vor und nach der Radüberarbeitung. Unten rechts der Effekt der Radüberarbeitung am ganzen Zug.

Anhand der Ergebnisse einer kontinuierlichen Zustandsüberwachung kann ebenfalls eine vorausschauende Instandhaltung (Predictive Maintenance) durchgeführt werden: Mithilfe langfristig erfasster Zustandsdaten und intelligenter Analysemodelle lassen sich potenzielle Schäden frühzeitig erkennen und präzise vorhersagen. So können Instandhaltungsmaßnahmen geplant werden, bevor es zu Ausfällen kommt. Dies macht die Wartung planbar, erhöht die Effizienz und die Wirtschaftlichkeit und reduziert die Schall- und Erschütterungsemission und verbessert die Oberbaudynamik.

Prof. Dr.-Ing. habil. Stefan Lutzenberger

Dr. rer. nat. Nathan Isert

8 Literatur

- [1] Bundesamt für Verkehr (BAV), Monitoring Eisenbahnlärm, Jahresbericht 2022
- [2] RAILplus, Aaron Seeberger, Matterhorn Gotthard Bahn; RAILPlusSF-00027 Gründe für die Reprofilierung der Räder/Radsätze und das Schleifen/Fräsen der Schienen; 09.11.2023
- [3] Wheel Monitoring System WMS, Müller-BBM Rail Technologies GmbH; <https://www.muellerbbm-rail.de/produkte/wheel-monitoring-system/>, abgerufen am 6.10.2025
- [4] R. Müller / A. Seeberger, Railplus: Schlussbericht zur Verlängerung Betriebserprobung SKK auf der Strecke Täsch – Zermatt. Technischer Bericht, RAILPlusSF-00038, 28.03.2024
- [5] Stefan Lutzenberger; Literaturstudie: Untersuchung des Zusammenhangs von Radunrundheiten und der Schallemission, der Erschütterungsemission und der Oberbaudynamik, Müller-BBM Rail Technologies Bericht Nr. R140336/01, 3. Juni 2024
- [6] Thompson, D.; 2009. Railway Noise and Vibration. Mechanisms, Modelling and Means of Control: Elsevier professional. ISBN 978-0-08-045147-3.
- [7] Lutzenberger, Stiebel, Gerbig, Wettschureck; Luftschall aus dem Schienenverkehr, Fachwissen Technische Akustik, Springer Verlag 2017
- [8] VERORDNUNG (EU) Nr. 1304/2014 DER KOMMISSION vom 26. November 2014 über die technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Fahrzeuge — Lärm“ sowie zur Änderung der Entscheidung 2008/232/EG und Aufhebung des Beschlusses 2011/229/EU, konsolidierte Version — 28.09.2023
- [9] DIN EN ISO 3095:2014-07; Akustik - Bahnanwendungen - Messung der Geräuschemission von spurgebundenen Fahrzeugen (ISO 3095:2013); Deutsche Fassung EN ISO 3095:2013
- [10] DIN 38452-1:2022-08; Langzeitmessung von Schienenverkehrsgeräuschen - Teil 1: Emissionen
- [11] DIN EN 61672-3; Elektroakustik - Schallpegelmesser - Teil 3: Periodische Einzelprüfung (IEC 61672-3:2013); Deutsche Fassung EN 61672-3:2013, Ausgabedatum: 2017 05
- [12] Isert, Lutzenberger, Brammer, Jöckle; Lärm-Monitoring Jahresbericht 2022, Schallmessung im Schienenverkehr; Eisenbahn-Bundesamt 2023
- [13] Maly T., Jaksch M. und Dinhobl G., 2016. Schallemissionen von Laufflächendefekten [online]. Eisenbahntechnische Rundschau. Eisenbahntechnische Rundschau
- [14] Dorothee Stiebel Protocol for free field measurements of mitigation effects in the project RIVAS for WP 2, 3, 4, 5, Domain WP 1.2
- [15] DIN 45672-2:2020-11, Schwingungsmessung an Schienenverkehrswegen - Teil 2: Auswerteverfahren

- [16] DIN EN 15610:2021-11; Bahnanwendungen - Akustik - Messung der Schienen- und Radrauheit im Hinblick auf die Entstehung von Rollgeräuschen; Deutsche Fassung EN 15610:2019
- [17] DIN EN 15654-1:2023-08; Bahnanwendungen - Messung von vertikalen Rad- und Radsatzkräften - Teil 1: Gleisseitige Messeinrichtungen für fahrende Fahrzeuge; Deutsche Fassung EN 15654-1:2018+A1:2023
- [18] DIN CEN/TR 16891:2017-03 DIN SPEC 38451:2017-03 Bahnanwendungen - Akustik - Messverfahren für kombinierte Rauheit, Gleisabklingraten und Übertragungsfunktionen; Deutsche Fassung CEN/TR 16891:2016
- [19] DIN EN 15313 Railway applications – Inservice wheelset operation requirements – Inservice and offvehicle wheelset maintenance; English version EN 15313:2016, English translation of DIN EN 15313:2016-09
- [20] UIC B 169/DT 405 (Mai 2006) Schadkatalog Räder / Radsatzwellen / Radsätze Teil 1: Einleitung, Terminologie, Klassierung der Fehler, Fehlerarten am Radsatz
- [21] Allgemeiner Vertrag für die Verwendung von Güterwagen (AVV), 1. Januar 2025.
- [22] Starnberg, M.; Brick, H.; Dörsch, S.; Akustische Anerkennung neuer Bremssohlen; Berichte des Deutschen Zentrums für Schienenverkehrsforschung, Bericht 17 (2022); Projektnummer 2018-U-3-12022., ergänzte Auflage, 2022
- [23] Harmonised Accurate and Reliable Methods for the EU Directive on the Assessment and Management Of Environmental Noise. Definition of track influence: roughness in rolling noise. Deliverable 12 part 1 of the HARMONOISE project
- [24] Huth, C.; Egeler, J.; Liepert, M.; Studie zur Quantifizierung von Flachstellen auf dem deutschen Schienennetz im Auftrag des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr, Entwurf Abschlussbericht, Möhler + Partner; 2023
- [25] N. Isert, M. Naumann and S. Lutzenberger, H2020 research project NEMO - Identifying high noise emitters from automated trackside rail vehicle monitoring, Proceedings of the 10th Convention of the European Acoustics Association, Forum Acusticum 2023 pp. 3251-3258.
- [26] Huth, C.; Liepert, M.; S Messung von Flachstellen und Ermittlung eines akustischen Instandhaltungskriteriums, Ressortforschungsplan des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, Forschungskennzahl 3718 54 102 0, Texte 59/2022
- [27] RIVAS Deliverable D2.9; Validation of wheel maintenance measures on the rolling stock for reduced excitation of ground vibration; 2013
- [28] Huber, Ph.; Nélain, B.; Müller, R. RIVAS – Mitigation Measures on Vehicles (WP5); Experimental Analysis of SBB Ground Vibration Measurements and Vehicle Data

- [29] RIVAS Deliverable D2.7, Definition of wheel maintenance measures for reducing ground vibration; 2013
- [30] <https://www.trackopedia.com/lexikon/infrastruktur/lastabtragung/stoerung-der-lastabtragung>, abgerufen am 6.10.2025
- [31] Alexander B. Nottbeck; Untersuchungen zu Auswirkungen von Geschwindigkeitserhöhungen auf Bahnstrecken im Bestand; Dissertation Technische Universität München, Lehrstuhl für Verkehrswegebau 2016
- [32] Eisenmann, Josef Prof. Dr.-Ing.; Mattner, Lothar; Steinbeißer, Lorenz: Einsenkungs- und Beschleunigungsmessungen am Eisenbahnoberbau bei hohen Fahrgeschwindigkeiten. Hg. v. Technische Universität München. Prüfamts für Bau von Landverkehrswegen der Technischen Universität München. München (Mitteilungen des Prüfamtes für Bau von Landverkehrswegen, 58, 1989
- [33] Sun, Q. D. et al.; Technical Note, Effect of cyclic loading frequency on the permanent deformation and degradation of railway ballast; Géotechnique 64, No. 9, 746–751 2014
- [34] Gall Heinrich, Steger Harald¹ und Quirchmair Martin; Was leistet die besohlte Schwelle; Fachtagung Bahnakustik, 2025
- [35] Eisenmann, J., Leykauf, G.: Zukunftsperspektiven zum Eisenbahnoberbau. EI Der Eisenbahningenieur (43) 3/1992, S. 130-139.
- [36] Lichtberger, Bernhard: Track compendium. Track system, substructure, maintenance, economics. 2. ed., completely rev. Hamburg: Eurailpress]
- [37] DIN 45669-2:2005-06, Messung von Schwingungsimmissionen - Teil 2: Messverfahren; 2011
- [38] Cecilia Vale; Wheel Flats in the Dynamic Behavior of Ballasted and Slab Railway Tracks; Appl. Sci. 2021, 11(15), 7127; <https://doi.org/10.3390/app11157127>, abgerufen am 6.10.2025
- [39] <https://www.fahrbahnlabor.ch/> , abgerufen am 6.10.2025
- [40] Bahnlärmmonitoring (TMS), Müller-BBM Rail Technologies GmbH; <https://www.mbbm-rail.com/de/produkte/bahnlaermmonitoring>, abgerufen am 6.10.2025
- [41] Brammer, Henning; Radscharfe Detektion von Raddefekten/Flachstellen im Rahmen des Lärm-Monitorings; Fachtagung Bahnakustik, 2025

Anhang A

1 Kenngrößen zur Bewertung von Schall, Erschütterungen und Oberbaudynamik

1.1 Akustische Kenngrößen

Akustische Kenngrößen werden z.B. in dem Monitoring Eisenbahnlärm [1] bzw. dem Bahnlärmmonitoring Deutschland [12] oder in ISO 3095 [9] oder DIN 38452-1 [10] aufgeführt. Die Wichtigsten sind im Folgenden, getrennt nach Kenngrößen für Zugvorbeifahrten oder einzelne Zugbestandteilen wie Wagen, Loks oder einzelne Achsen und Mittelungspegel einer Messstelle aufgeführt.

1.1.1 Kenngrößen für Zugvorbeifahrten

TEL: A-bewerteter Schallpegel einer Zugvorbeifahrt als energetischer Mittelwert über die Schallereignisdauer T normiert auf die Vorbeifahrtzeit T_p . Der **TEL** ist damit ein Maß, um die gesamte akustische Energie einer Zugvorbeifahrt zu erfassen.

$$TEL = 10 \log \left(\frac{1}{T_p} \int_0^T \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right) \quad (3)$$

mit

$p_0 = 20 \mu\text{Pa}$ (Bezugsschalldruck)

$T_p =$ geometrische Vorbeifahrtzeit des Zuges

$T =$ Schallereignisdauer/Messdauer (enthält alle Schallwerte vor und nach der Zugvorbeifahrt, bis der Pegel auf mehr als 10 dB(A) unter den Wert während der Vorbeifahrt abgesunken ist).

TEL80: Vorbeifahrtexpositionspegel für die Bezugsgeschwindigkeit 80 km/h

Der auf die Geschwindigkeit 80 km/h umgerechnete Vorbeifahrtexpositionspegel **TEL** wird i. d. R. für die Vergleichbarkeit unterschiedlicher Messstellen ermittelt und errechnet sich aus:

$$TEL80 = TEL - 30 \cdot \log \left(\frac{v}{v_0} \right) \quad (4)$$

mit

$v_0 = 80 \text{ km/h}$ (Bezugsgeschwindigkeit)

SEL: Schallexpositionspegel

Der Schallexpositionspegel **SEL** bezieht die akustische Schallenergie auf eine Sekunde. Er wird für die Berechnung des Mittelungspegel L_m verwendet und hat die nachstehende Beziehung mit dem Vorbeifahrtexpositionspegel **TEL**:

$$SEL = TEL - 10 \log (T_0 / T_p) \quad (5)$$

mit

$$T_0 = 1 \text{ Sekunde}$$

$$T_p = T_2 - T_1 = \text{geometrische Vorbeifahrtzeit des Zuges}$$

1.1.2 Kenngrößen für Wagnvorbeifahrten

$L_{pAeq,Tp}$: Der A-bewertete äquivalente Dauerschalldruckpegel entspricht dem, über die Messdauer T_p energetisch gemittelten A-bewerteten Schalldruckpegel nachfolgender Gleichung:

$$L_{pAeq,Tp} = 10 \log \left(\frac{1}{T_p} \int_{T_1}^{T_2} \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right) \quad (6)$$

mit

$$p_0 = 20 \text{ } \mu\text{Pa (Bezugsschalldruck)}$$

$$T_p = T_2 - T_1 = \text{geometrische Vorbeifahrtzeit des Wagens}$$

$L_{pAeq,Tp,80}$: Dauerschalldruckpegel der Vorbeifahrt bezogen auf 80 km/h

Der mit der Vorbeifahrtgeschwindigkeit v wie folgt auf die Geschwindigkeit 80 km/h umgerechnete A-bewertete äquivalente Dauerschalldruckpegel:

$$L_{pAeq,Tp,80} = L_{pAeq,Tp} - 30 \cdot \log \left(\frac{v}{v_0} \right) \quad (7)$$

mit

$$v_0 = 80 \text{ km/h (Bezugsgeschwindigkeit)}$$

$L_{pAeq,Tp,APL,80}$: Dauerschalldruckpegel korrigiert auf Achsen pro Länge

Für die Auswertung einzelner Güterwagen wird in Anlehnung an die TSI-Lärm der A-bewertete äquivalente Dauerschalldruckpegel bezogen auf 80 km/h zusätzlich auf die Anzahl der Achsen pro Länge wie folgt normiert:

$$L_{pAeq,Tp,APL,80} = L_{pAeq,Tp,80} - 10 \cdot \log \left(\frac{APL}{0,225} \right) \quad (8)$$

mit

$$APL = \text{Anzahl Achsen geteilt durch Länge des Wagens in Meter.}$$

L_{pAFmax} : AF-bewerteter maximaler Schalldruckpegel

Maximalwert des A-bewerteten Schalldruckpegels, der während der Messdauer T bei Anwendung der Zeitbewertung F (fast) bestimmt wird.

1.1.3 Achsscharfe Kenngrößen

Die Bestimmung achsscharfer Kenngrößen ist schwierig, da die Auswertezeiten sehr kurz sind und ein Übersprechen der Nachbarachsen das Ergebnis verfälschen kann. Es wird daher auf den Maximalpegel verzichtet und nur der äquivalente Dauerschalldruckpegel bestimmt.

$L_{pAeq,Tp}$: Der A-bewertete äquivalente Dauerschalldruckpegel entspricht dem, über die Messdauer T_p energetisch gemittelten A-bewerteten Schalldruckpegel nachfolgender Gleichung:

$$L_{pAeq,Tp} = 10 \log \left(\frac{1}{T_p} \int_{T_1}^{T_2} \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right) \quad (9)$$

mit

$p_0 = 20 \mu\text{Pa}$ (Bezugsschalldruck)

$T_p = T_2 - T_1 =$ geometrische Vorbeifahrtzeit der Achse

1.2 Erschütterung

Da es derzeit keine internationalen Normen für schwingungstechnische Kenngrößen gibt, sind diese weniger gut beschrieben als schalltechnische Kenngrößen.

Messgrößen werden im Forschungsvorhaben RIVAS [14] und der DIN 45672-2 [15] aufgeführt.

Es können analoge Kenngrößen wie bei der Schallauswertung definiert werden. Die Schwingungen werden teilweise im linearen Maßstab (z.B. mm/s), teilweise im nichtlinearen Maßstab (Pegel) dargestellt. Terzbandspektren müssen den Bereich von der unteren Terzmittenfrequenz von 4 Hz bis zur oberen Terzmittenfrequenz von 250 Hz umfassen.

Für Immissionsprognosen werden weitere Kenngrößen wie Taktmaximal und max Hold Terzspektren verwendet.

Ausgangsgröße für die Auswertung von Erschütterungen an Schienenverkehrswegen ist das unbewertete und bandbegrenzte Zeitsignal der Schwinggeschwindigkeit $v(t)$. Bei Beschleunigungsmessungen kann dieses durch einmalige Integration aus $a(t)$ gewonnen werden.

Kenngrößen sind:

v_{\max} : Maximale Schwinggeschwindigkeit

Die maximale Schwinggeschwindigkeit v_{\max} ist der maximale Betragswert der gemessenen Schwinggeschwindigkeit $v(t)$.

$v_{\text{eff}}(t)$ bzw. $v_F(t)$ Gleitender Effektivwert

Mit der Zeitbewertung F bewertete(r) Schwinggeschwindigkeit(spiegel). In Deutschland wird für Erschütterungsauswertungen die Zeitbewertung FAST mit der Zeitkonstante von $\tau = 125 \text{ ms}$ herangezogen. Zur Auswertung des gleitenden FAST-bewerteten Effektivwertes ist eine Vorlaufzeit von mindestens 0,5 s erforderlich.

Der gleitender Effektivwert $\mathbf{v}_F(\mathbf{t})$ kann auch als F-bewerteter Schwinggeschwindigkeitspegel $L_{vF}(\mathbf{t})$ (Bezugswert $v_0=5 \cdot 10^{-5}$ mm/s) ausgedrückt werden.

$\mathbf{v}_{\text{eff,max}}$ $\mathbf{v}_{F,\text{max}}$ Maximalwert des gleitenden Effektivwertes

Zur Charakterisierung der Emission werden im Fahrbahnlabor folgende Kenngrößen ermittelt

1.2.1 Kenngrößen für Zugvorbeifahrten

TEL_v : Schnellepegel einer Zugvorbeifahrt als energetischer Mittelwert über die Ereignisdauer T normiert auf die Vorbeifahrtzeit T_p . Der TEL ist damit ein Maß, um die gesamte Schwingungsenergie einer Zugvorbeifahrt zu erfassen.

$$TEL_v = 10 \log \left(\frac{1}{T_p} \int_0^T \frac{v^2(t)}{v_0^2} dt \right) \quad (10)$$

mit

$v_0 = 5 \cdot 10^{-5}$ mm/s (Bezugsschnelle)

T_p = geometrische Vorbeifahrtzeit des Zuges

T = Schwingungsereignisdauer/Messdauer (enthält alle Werte Schwingungswerte vor und nach der Zugvorbeifahrt bis die Pegel auf mehr als 1/4 unter den Wert während der Vorbeifahrt abgesunken ist)

1.2.2 Kenngrößen für Wagnvorbeifahrten

$L_{veq,Tp}$: Der äquivalente Schwingschnellepegel entspricht dem, über die Messdauer T_p energetisch gemittelten Schnellepegel nach folgender Gleichung:

$$L_{veq,Tp} = 10 \log \left(\frac{1}{T_p} \int_{T_1}^{T_2} \frac{v^2(t)}{v_0^2} dt \right) \quad (11)$$

mit

$v_0 = 5 \cdot 10^{-5}$ mm/s (Bezugsschnelle)

T_p = geometrische Vorbeifahrtzeit des Wagens

Da das Schwingungssignal durch die Wellenausbreitung am Messpunkt verzögert ankommt, ist eine achsscharfe Auswertung der Erschütterungen nicht mehr sinnvoll.

1.3 Oberbaudynamik

Die Messgrößen der Oberbaudynamik werden typischerweise unbewertet (keine Zeit-/Frequenzbewertung) dargestellt.

Typische Messgrößen sind die Kontaktkraft, die Beschleunigung oder die Schwingschnelle.

Es kann der Zeitverlauf oder der Maximalwert der Messgröße ausgewertet werden.

Im Fahrbahnlabor erfolgen folgende Auswertungen:

1.3.1 Kenngrößen für Zugvorbeifahrten

TEL_a: Beschleunigungspegel einer Zugvorbeifahrt als energetischer Mittelwert über die Ereignisdauer T normiert auf die Vorbeifahrtzeit T_p . Der **TEL** ist damit ein Maß, um die gesamte Schwingungsenergie einer Zugvorbeifahrt zu erfassen.

$$TEL_a = 10 \log \left(\frac{1}{T_p} \int_0^T \frac{a^2(t)}{a_0^2} dt \right) \quad (12)$$

mit

$a_0 = 1 \cdot 10^{-6}$ mm/s (Bezugsbeschleunigung)

T_p = geometrische Vorbeifahrtzeit des Zuges

T = Schwingungsereignisdauer/Messdauer (enthält alle Werte Schwingungswerte vor und nach der Zugvorbeifahrt bis die Pegel auf mehr als 1/4 unter den Wert während der Vorbeifahrt abgesunken ist)

1.3.2 Kenngrößen für Wagnervorbeifahrten

L_{aeq,Tp}: Der äquivalente Beschleunigungspegel entspricht dem, über die Messdauer T_p energetisch gemittelten Beschleunigungspegel nach folgender Gleichung:

$$L_{aeq,Tp} = 10 \log \left(\frac{1}{T_p} \int_{T_1}^{T_2} \frac{a^2(t)}{a_0^2} dt \right) \quad (13)$$

mit

$a_0 = 1 \cdot 10^{-6}$ mm/s (Bezugsbeschleunigung)

T_p = geometrische Vorbeifahrtzeit des Wagens

1.3.3 Achsscharfe Kenngrößen

L_{aeq, T_p} : Der A-bewertete äquivalente Dauerbeschleunigungspegel entspricht dem, über die Messdauer T_p energetisch gemittelten A-bewerteten Beschleunigungspegel nachfolgender Gleichung:

$$L_{aeq, T_p} = 10 \log \left(\frac{1}{T_p} \int_{T_1}^{T_2} \frac{a^2(t)}{a_0^2} dt \right) \quad (14)$$

mit

$a_0 = 1 \cdot 10^{-6}$ mm/s (Bezugsbeschleunigung)

$T_p = T_2 - T_1 =$ geometrische Vorbeifahrtzeit der Achse