Messbericht 17-107-2021
Lärm- und LCC-optimierte Schienenzwischenlagen

Ersteller	Marc Meier
Besteller	Philippe Schneider, TÜV Rheinland Schweiz GmbH
Version	1.0
Versionsdatum	30.10.2018

Version	Autor	Information / Ergänzung	geprüft
0.1, 02.10.2018	M. Meier	Entwurf	G. Soldati, 08.10.2018
1.0, 30.10.2018	M. Meier	Anpassungen nach Kundenwunsch	G. Soldati, 31.10.2018

Urheberrecht: Dieses Dokument ist urheberrechtlich geschützt. Jegliche kommerzielle Nutzung bedarf einer vorgängigen, ausdrücklichen Genehmigung.

infraMT GmbH
Hauptstrasse 16 · CH-2577 Finsterhennen · Schweiz
info@inframt.ch · www.inframt.ch

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung 3

2. Ausgangslage 5

3. Auftrag 6

4. Versuchsaufbau 6
4.1. Teststrecke 6
4.2. Zw-Kompressionsmessung 8
4.2.1. Messgeräte und Messunsicherheit 10
4.3. Luftschallemissionsmessung 11
4.3.1. Messgeräte und Messunsicherheit 12
4.4. Gleisabklingrate 12
4.4.1. Messgeräte 13

5. Versuchsprogramm 14
5.1. Kompression der Zw 14
5.2. Luftschallemissionsmessung 14
5.3. Gleisabklingrate 14

6. Ergebnisse/Resultate 15
6.1. Kompression der Zw 15
6.1.1. Übersicht 15
6.1.2. Fahrzeugabhängige Kompression der Zw 15
6.1.3. Kompressionslinie Zw 16
6.2. Luftschallemissionsmessung 19
6.2.1. Dauerschalldruckpegel 19
6.2.1.1. Geschwindigkeitsabhängigkeit 20
6.2.2. Terzspektren 22
6.2.3. Geräuschemission vor Zugdurchfahrt 24
6.3. Gleisabklingrate 24

A. Anhangsverzeichnis 26

B. Abkürzungsverzeichnis 26

C. Abbildungsverzeichnis 26

D. Tabellenverzeichnis 27

1. Zusammenfassung

Im Rahmen eines Forschungsprojekts zum Eisenbahnlärm, welches die TÜV Rheinland Schweiz GmbH im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) durchführt, wurde eine Lärm- und LCC-optimierte Schienenzwischenlage (Zw) entwickelt. Hersteller der neuartigen Schienenzwischenlage ist die Firma Vossloh Fastening Systems aus Werdohl/D. Die neue Schienenzwischenlage wird als Typ ENIT bezeichnet. Sie weist eine hohe Elastizität auf, hat aber zusätzlich eine dämpfende Wirkung, um den Lärmpegel im unbelasteten Zustand zu reduzieren.
Um die Eigenschaften und die Wirksamkeit der neuartigen Zw nachweisen zu können, wurden gemäss Versuchskonzept (Version 1.2 vom 25.05.2018) Messungen im Labor und im Gleis (unter Betrieb) durchgeführt. Der vorliegende Messbericht umfasst die Messungen im Gleis.

Folgende Messungen wurden durchgeführt:

- Kompression der Zw (vertikale Bewegung zwischen Schiene und Schwelle)
- Luftschallemission nach EN ISO 3095:2013
- Gleisabklingrate (Track Decay Rate TDR) nach EN 15461:2008+A1

Um das neue Produkt mit dem aktuellen Stand der Technik vergleichen zu können, wurde die Teststrecke zwischen Sursee und Nottwil (seeseitiges Gleis 100) in drei Abschnitte unterteilt:

A1	Zw SBB Zw 661-6	600 kN/mm
A2	Zw Vossloh Zw 900b	60 kN/mm
A3	Zw Vossloh Zw 900a ENIT	60 kN/mm

Kompression der Zw

Im Mittel über die erste resp. letzte Achse sämtlicher erfassten Fahrzeuge beträgt die Zw-Einsenkung im Abschnitt A1 (steife Zw) 0.07 mm, im Abschnitt A2 mit elastischen Zw 0.50 mm und im Abschnitt A3 mit optimierten Zw ENIT 0.51 mm. Die Differenzen zwischen Abschnitt A2 und A3 bei den unterschiedlichen Fahrzeugen sind ebenfalls marginal. Eine kleine Differenz tritt unter den hohen Achslasten der Fahrzeuge Re 460 und Re 420 auf, wobei die Zw in A3 im Mittel um 0.02 mm stärker komprimiert werden als im Abschnitt A2.

Luftschallemission

Als primäre Vergleichsgrösse dient der A-bewertete, äquivalente Dauerschalldurckpegel $L_{pAeq,Tp}$. Dieser beträgt, gemittelt über alle Messfahrten (unkategorisiert), im Abschnitt A1 mit den steifen Zw 83.4 dBA, im Abschnitt A2 mit den elastischen Zw 86.2 dBA und im Abschnitt A3 mit den optimierten Zw ENIT 87.0 dBA. Werden die gemessenen Züge in die groben Kategorien Regional- und Fernverkehr eingeteilt, zeigt sich, dass die Differenz zu Ungunsten der ENIT Zw aus den Regionalverkehrszügen herrührt. Hier resultiert eine Lärmzunahme von 1.7 dBA. Bei den tendenziell schwereren Fernverkehrszügen hingegen schneidet die ENIT Zw sogar geringfügig besser ab, die Lärmreduktion gegenüber A2 beträgt 0.2 dBA. Bei den Kompositionen mit Re 420 Traktion resultiert eine Reduktion von 0.6 dBA. Die Fernverkehrs- und Güterkompositionen sind aufgrund des höheren mittleren Schallpegels wesentlich störender für die Umwelt sind als die leiseren Regionalverkehrszüge. Die Resultate der Lärmemissionen bei weiterer Unterteilung in Zugtypen sind der Abbildung 1 auf der nächsten Seite zu entnehmen. Hier manifestiert sich die Tendenz der besseren Wirksamkeit der ENIT-Zw bei lauteren Zügen.

Mit zunehmender Geschwindigkeit nimmt in den Abschnitten A1 und A2 bei den Regionalverkehrszügen Flirt und GTW der mittlere Schalldruck ebenfalls zu. Im Abschnitt A3 hingegen bleiben die Werte bei linearer Regression in etwa konstant. Bei den Fernverkehrskompositionen mit

Re 460 Traktion nimm der Schalldruck in allen Abschnitten in derselben Grössenordnung mit der Geschwindigkeit zu.

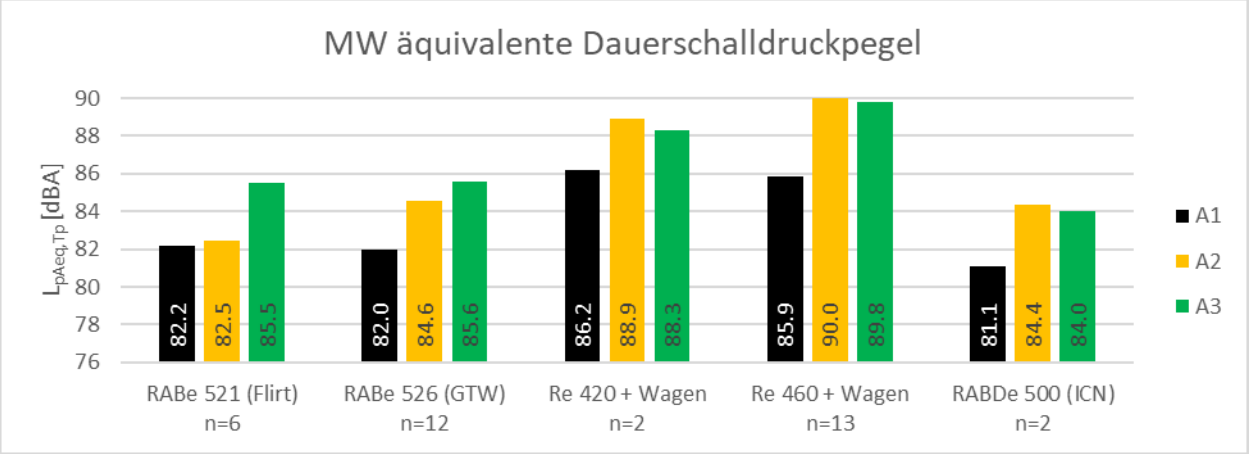


Abbildung 1 Mittlere äquivalente Dauerschalldruckpegel nach Zugtyp

Die wellenlängenabhängige Betrachtung zeigt für alle Zugtypen ein ähnliches Verhalten. Von ca. 80 bis 400 Hz treten im Abschnitt A1 mit steifen Zw höhere Amplituden auf als in den Abschnitten mit weichen Zw. Die Differenz beträgt bis zu 4 dBA. Die Pegel in diesen tiefen Frequenzen sind jedoch wenig relevant. In den höheren Frequenzen führen die weichen Zw fast ausnahmslos zu höheren Schallemissionen, wobei die ENIT-Zw in A3 bei den Zugtypen Flirt und GTW höhere und bei den Fernverkehrskompositionen leicht geringeren Amplituden aufweist als der Abschnitt A2.

Gleisabklingrate

Auf dem Abschnitt A1 liegen die vertikalen und horizontalen Abklingraten überwiegend deutlich oberhalb der Grenzkurven, die normativen Vorgaben nach TSI Fahrzeuge – Lärm sind also erfüllt. Die Ergebnisse von den Abschnitten A2 und A3 zeigen recht ähnliche Kurvenverläufe. Nur in den Terzbändern unterhalb von 400 Hz und oberhalb von 3150 Hz werden die Grenzkurven für die vertikale Schienenschwingung eingehalten, dabei ist tendenziell die dämpfende Wirkung auf dem Abschnitt A2 etwas besser als in A3.

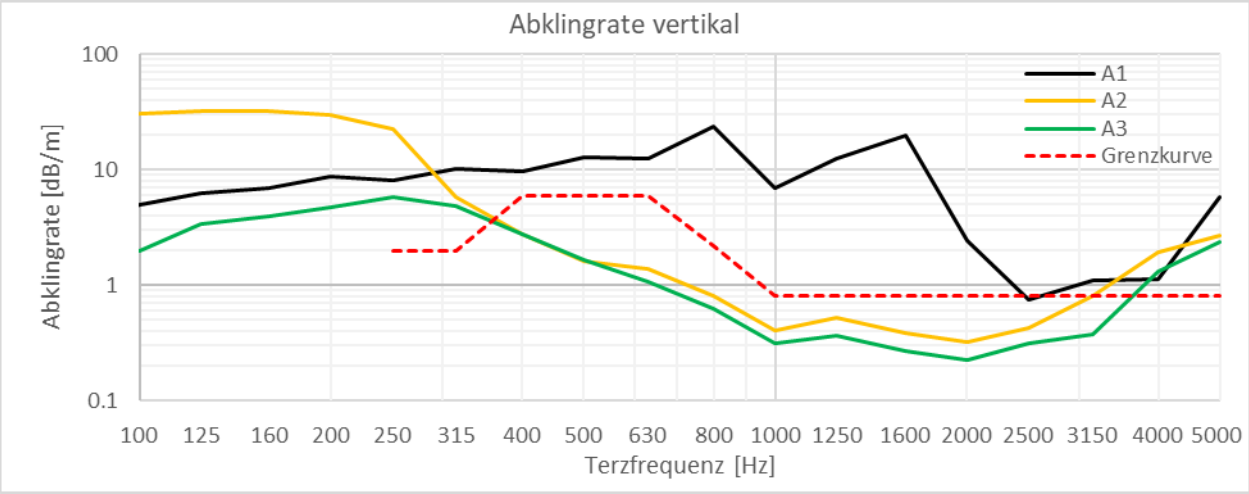


Abbildung 2 Gleisabklingrate vertikal, Schienenstränge gemittelt

Der Grenzwert für die horizontale Abklingrate wird in A2 und A3 in den Terzen von 630 Hz bis 1250 Hz und 2500 Hz (A2) resp. 3150 Hz (A3) bis 4000 Hz eingehalten.

2. Ausgangslage[1]

Im Jahr 2000 waren in der Schweiz 265'000 Menschen schädlichem oder lästigem Eisenbahnlärm ausgesetzt. Zu ihrem Schutz wurde nach Massgabe des Bundesgesetzes vom 24. März 2000 über die Lärmsanierung der Eisenbahnen (BGLE alt) bis 2015 ein umfassendes Konzept zur Lärmreduktion umgesetzt. Damit konnten zwischen 160'000 und 170'000 Menschen vor übermässigem Lärm geschützt werden. Das im Gesetz formulierte Minimalziel zur Anzahl der zu schützenden Personen von mindestens zwei Dritteln wurde jedoch knapp nicht erreicht. Das Parlament trat deshalb im Rahmen der Beratung der Gesamtschau FinöV nicht auf eine Kürzung des Lärmkredites ein. Es verlangte, dass mit den verbleibenden Finanzmitteln eine Verbesserung des Lärmschutzes zu erreichen sei. Mittels Ressortforschung sollen lärmmindernde Technologien bei Infrastruktur und Rollmaterial zur Reduzierung des Fahrlärms von Eisenbahnen um mindestens 1 dB erforscht werden, wobei sich das vorliegende Projekt mit der Infrastrukturseite befasst.

Um die Beanspruchung der Komponenten im Schotteroberbau zu reduzieren, werden vermehrt elastische Layer eingebaut. Dabei handelt sich hauptsächlich um Schienenzwischenlagen (Zw) sowie Schwellenbesohlungen (USP). Dieses Forschungsprojekt befasst sich mit den Schienenzwischenlagen, da bei diesem Produkt sowohl fahrbahntechnische Aspekte wie auch Lärmthemen von Bedeutung sind und ein Optimierungspotential vorhanden ist.
Ältere Schienenzwischenlagen sind steif und in der Regel für die heutigen Belastungen im Schweizer Bahnnetz zu wenig elastisch. Diese Zwischenlagen aus EVA (Ethylen-Vinyl-Azetat) werden bei der SBB nach wie vor standardmässig eingesetzt. Sie sollen für die Vergleiche bei diesem Forschungsprojekt als Referenz dienen. Neuere Schienenzwischenlagen aus EPDM (Ethylen-Propylen-Dien-Monomer) sind wesentlich elastischer und hinsichtlich LCC besser geeignet als die steifen Schienenzwischenlagen. Aber sie neigen aufgrund ihrer Elastizität zu freier schwingenden Schienen, was sich hinsichtlich Lärm negativ auswirken kann.

Das Ziel dieses Forschungsprojekts ist es, eine neuartige lärm- und LCC-optimierte Schienenzwischenlage zu entwickeln. Einerseits soll sie elastische Eigenschaften wie die heutigen weichen Zwischenlagen aufweisen, um die Lastverteilung entlang der Schienen zu gewährleisten. Andererseits soll sie zusätzlich auch dämpfende Eigenschaften aufweisen, um die Schwingungen der Schienen zu reduzieren und somit den Lärm zu mindern. Dies soll mittels zweier verschiedener Materialien mit unterschiedlichen Steifigkeiten und Dämpfungseigenschaften in derselben Zwischenlage realisiert werden. Die neue Schienenzwischenlage wird als Typ ENIT (Elastomer for Noise Improvement on Track) bezeichnet.

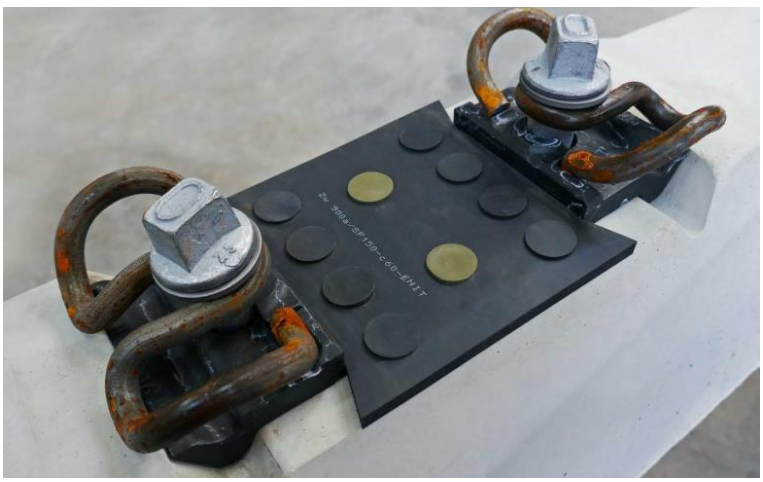


Abbildung 3 Zwischenlage ENIT

[1] Quelle: TÜV Versuchskonzept Lärm- und LCC-optimierte Schienenzwischenlagen, v1.2, Ph. Schneider

3. Auftrag

Auf der Teststrecke Sursee – Nottwil sind folgende Messungen durchzuführen:

Kompression der Zw

In den drei Versuchsabschnitten (siehe 4.1) ist die Kompression resp. die vertikale Einsenkung der Zw an fünf Schwellen an der Aussenschiene messtechnisch zu erfassen. Dazu sind die vertikalen Bewegungen zwischen der Schiene und der Schwelle zu messen.
Die Messungen werden simultan in allen Abschnitten durchgeführt und zeichnen den Regelverkehr während mindestens sechs Stunden auf.
Ausgewertet werden die jeweils ersten Achsen einer Komposition, bei nachlaufenden Lokomotiven die letzte Achse. Als Vergleichsgrössen dienen die gemittelten, maximalen Kompressionen und die Standardabweichung. Dabei werden typengleiche Züge zusammengefasst. Zusätzlich sollen die Formen der Einsenkungsmulden verglichen werden.

Luftschallemission nach EN ISO 3095:2013

Die Luftschallemissionen sind in den drei Testabschnitten (siehe 4.1) simultan zu messen. Während mindestens sechs Stunden ist der Regelverkehr zu erfassen. Die Datenerfassung hat ungefiltert (linear) zu erfolgen, die A-Bewertung wird, wo benötigt, im Postprocessing durchgeführt. Zusätzlich zum Luftschall sind die Zugsdurchfahrtsgeschwindigkeiten aufzuzeichnen.
Zur einfacheren Interpretation werden die erfassten Züge in die Kategorien Fernverkehr (IC), Regionalverkehr (S-Bahnen) und Güterverkehr gruppiert.
Auswertegrössen sind der A-bewertete äquivalente Dauerschalldruckpegel $L_{pAeq,Tp}$ sowie die Terzbänder von 31.5 Hz bis 8000 Hz.

Gleisabklingrate (Track Decay Rate TDR) nach EN 15461:2008+A1

Die Messungen der TDR sollen gemäss der Norm EN 15461:2008+A1 durchgeführt werden. Dazu sind in den drei Testabschnitten (siehe 4.1) beide Schienen mit einem Prüfhammer anzuregen und die Fortpflanzung des Impulses in der Schiene sowohl in horizontaler wie auch in vertikaler Richtung mittels Beschleunigungsaufnehmer aufzuzeichnen.
Aus den erfassten Signalen ist die Gleisabklingrate zu ermitteln. Die Ergebnisse werden den Grenzkurven gemäss TSI Fahrzeuge – Lärm gegenübergestellt.
Die Messung der Gleisabklingrate wurde durch die Firma Müller-BBM Schweiz AG durchgeführt, infraMT hat die organisatorischen Belange abgewickelt.
Die Inhalte der Gleisabklingratenmessung betreffenden Abschnitte 4.4, 5.3 und 6.3 wurden dem Messbericht der Müller-BBM Schweiz AG mit der Nummer C90372/01 entnommen und teilweise in ihrer Form und Schreibweise angepasst. Zudem wurden ergänzende Grafiken hinzugefügt.

Sämtliche Messungen sind in einem Bericht zu dokumentieren.

4. Versuchsaufbau

4.1. Teststrecke

Die Teststrecke befindet sich auf der DfA-Linie 500 zwischen Olten und Luzern auf dem Abschnitt Sursee – Nottwil. Sie wird von Fernverkehrs-, Regional- und Güterzügen befahren. Pro Tag und Gleis verkehren rund 120 Züge (Stand 2016). Die Streckenbelastung pro Gleis beträgt knapp 40‘000 GBRT pro Tag (Stand 2016). Die Geschwindigkeit der Reihe R beträgt 160 km/h. Die drei

Versuchsabschnitte liegen im seeseitigen, östlichen Gleis 100 (Regelgleis Sursee – Nottwil) in einer Geraden ohne Überhöhung.

Die SBB baut seit kurzem auf stark belasteten Gleisen Betonschwellen mit steifen Schwellenbesohlungen (USP) ein, dieser Standard wurde auch bei der Fahrbahnerneuerung zwischen Sursee und Sempach-Neuenkirch angewendet.

- Als Referenzabschnitt (Versuchsabschnitt A1) dient der heute aktuelle Stand der Technik bei der SBB mit besohlten Betonschwellen B91 mit Schienenbefestigung Typ W14 und steifen Zw.
- Der Versuchsabschnitt A2 ist mit der Schienenbefestigung Typ W14 K-900 und elastischen (weichen) Zw von Vossloh ausgestattet.
- Der Versuchsabschnitt A3 ist mit der Schienenbefestigung Typ W14 K-900 und optimierten (weichen) Zw ENIT von Vossloh ausgestattet.

Das Schienenprofil ist auf der gesamten Teststrecke 60 E2 mit der Schienenstahlgüte R260. Die Länge der Versuchsabschnitte beträgt je 216 m, was zweimal der Länge einer Langschiene von 108 m entspricht. Das finale Schienenschleifen fand rund zwei Monate vor den Messkampagnen statt, weshalb von identischen und guten Bedingungen hinsichtlich Schienenrauheit ausgegangen werden kann.



Abbildung 4 Teststrecke mit Versuchsabschnitten, Übersicht

Die Schwellen in den drei Abschnitten wurden auf der Oberseite ab Werk farblich markiert, um Fehler beim Einbau zu vermeiden. Die Farbmarkierung des Abschnitts A1 ist schwarz, des Ab-

schnitts A2 gelb und diejenige des Abschnitts A3 grün. Dieselbe Farbgebung wird im vorliegenden Bericht in grafischen Darstellungen verwendet, um eine rasche Interpretation der Diagramme zu ermöglichen.

Abschnitt	km von	km bis	Zw	Dicke Zw	c_{stat}
A1	72.128	72.344	SBB Zw 661-6	6 mm	600 kN/mm
A2	72.344	72.560	Vossloh Zw 900b	9 mm	60 kN/mm
A3	72.560	72.776	Vossloh Zw 900a ENIT	9 mm	60 kN/mm

Tabelle 1 Versuchsabschnitte und verbaute Zw

Die Position der Messquerschnitte innerhalb der Versuchsabschnitte wurde anhand deren Eignung für die Messung definiert. Bei der Luftschallmessung ist auf möglichst geringe und über die drei Messstellen gleiche Umgebungsbedingungen in Ausbreitungsrichtung zwischen Gleis und Mikrofon zu achten. Dies betrifft u.a. die Bodenbedeckung, Bepflanzungen oder reflektierende Flächen sowie Störelemente wie Fahrleitungsmasten. Zu letzteren wurde bspw. ein Abstand von 10 m eingehalten.
Um bei der Bewegungsmessung die notwendige Qualität erreichen zu können, ist durch eine visuelle Kontrolle sicherzustellen, dass sich keine offensichtlichen Inhomogenitäten in der vertikalen Gleissteifigkeit in der Nähe des Messbereichs befinden wie bspw. hohlliegende Schwellen. Zudem ist ein Mindestabstand zu den Abschnittsgrenzen einzuhalten. Idealerweise würden die Messquerschnitte anhand von kontinuierlichen Einsenkungsmessungen festgelegt, was im vorliegenden Projekt nicht möglich war.
Der Sensorquerschnitt der Gleisabklingratenmessung befand sich jeweils auf Höhe der Lärm-Messquerschnitte. Die Sensorquerschnitte sowie sämtliche Positionen für die Anregung (Hammerschlag) lagen genügend weit von Schweissnähten entfernt.

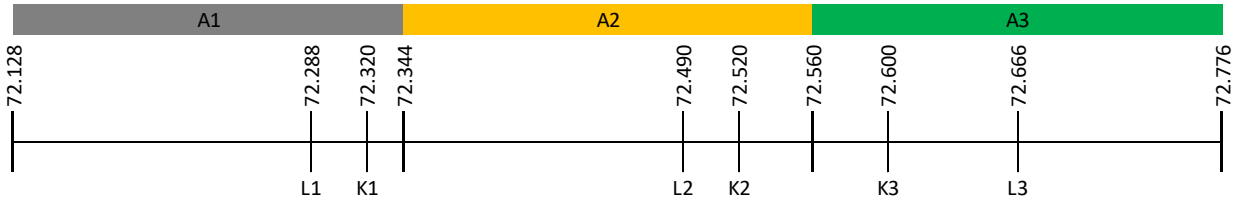


Abbildung 5 Lage der Messquerschnitte innerhalb der Versuchsabschnitte

Aus Abbildung 5 ist die Position der Messquerschnitte für Luftschall und Gleisabklingrate (L) sowie Zw-Kompression/Einsenkung (K) ersichtlich.

4.2. Zw-Kompressionsmessung

Die Bewegung zwischen Schienenfuss und Schwelle entspricht – unter der Annahme, dass die Schiene im unbelasteten Zustand flächig auf der Zw aufliegt – der Kompression resp. Einsenkung der Zw. Diese Bewegung wurde pro Abschnitt in fünf Querschnitten auf der Aussenseite der seeseitigen Schiene gemessen. Zusätzlich ist in zwei Querschnitten dieselbe Grösse auf der Innenseite des Schienenfusses erfasst worden, um auch das Abkippen der Schiene (exzentrische Last durch Berührgeometrie Rad/Schiene) quantifizieren und vergleichen zu können. Das "x" in Abbildung 6 dient als Platzhalter für die jeweilige Versuchsabschnittsnummer.

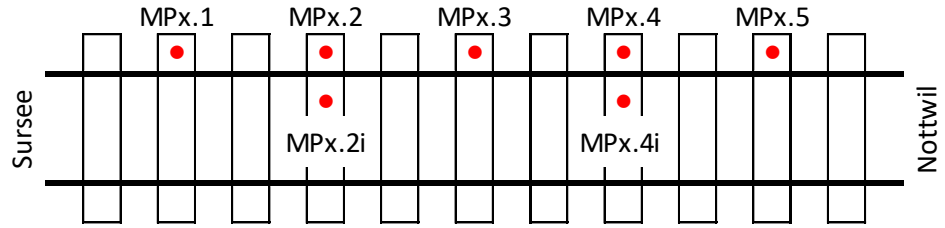


Abbildung 6 Messpunktanordnung Zw-Kompressionsmessungen

Der Abstand zwischen den Messpunkten betrug zwei Schwellen resp. 1.2 m. Daraus resultiert eine Gesamtlänge der Messzone von 4.8 m.

Die Wegsensoren (Tauchanker) wurden mittels auf die Schwelle geklebte Konsolen und Gelenkarme über dem Schienenfuss positioniert. Um eine Beeinflussung der Messkette durch Störströme zu verhindern, sind die Tauchanker mit einem isolierenden Zwischenstück an den Schienenfuss geklebt worden.



Abbildung 7 Sensorapplikation an einem Messquerschnitt mit beidseitiger Sensorik

Die Messungen wurden getriggert gestartet und zeitgesteuert gestoppt. Die Abtastfrequenz betrug 1200 Hz, ungefiltert.

Die Rohsignale wurden im Postprocessing gefiltert und genullt. Als Filter wurde ein Butterworth Tiefpass mit Grenzfrequenz 50 Hz verwendet. Diese Filtercharakteristik ergab bei allen Abschnitten plausible Kurvenverläufe, aus welchen die Schwingungen der Schiene und des Messaufbaus vollständig eliminiert sind, ohne den eigentlichen Kompressionsvorgang abzuschwächen.

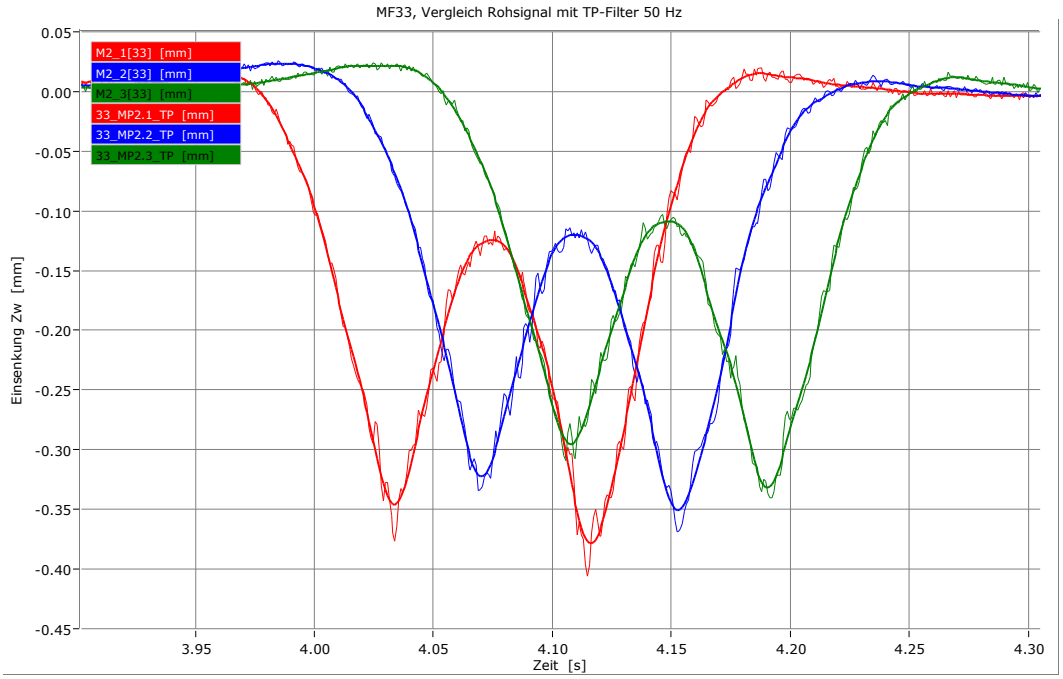


Abbildung 8 Vergleich Rohsignal mit TP-Filter 50 Hz (MF33)

Zur Auswertung wurde jeweils die erste Achse der Komposition beigezogen, bei Pendelzügen mit nachlaufender Lok die letzte Achse. Diese Vorgehensweise ermöglicht die höchste Vergleichbarkeit durch Reduzierung von Einflüssen benachbarter Achsen und dynamischer Anregungen der Schiene durch das Fahrzeug.
Die unter 6.1 dargelegten Ergebnisse sind das Resultat einer Verrechnung der Signale auf der Schieneninnen- und Schienenaussenseite sowie der Mittelung über die jeweils fünf gemessenen Schwellen pro Abschnitt. Die Sensoren auf der Innenseite der Schienen wurden formal folgendermassen berücksichtigt:

MQx: Messquerschnitt
MPx: Messpunkt

MQx.1 = MPx.1 + (MPx.2i – MPx.2) / 2
MQx.2 = (MPx.2i + MPx.2) / 2
MQx.3 = MPx.3 + 0.5 * ((MPx.4i – MPx.4) + (MPx.2i – MPx.2)) / 2)
MQx.4 = (MPx.4i + MPx.4) / 2
MQx.5 = MPx.5 + (MPx.4i – MPx.4) / 2

4.2.1. Messgeräte und Messunsicherheit

Die verwendeten HBM Weggeber vom Typ W10 verfügen über eine induktive Halbbrücke.

Nennkennwert Toleranz: ≤ ±1.0 %
Linearität: ≤ ±1.0 %

Die Empfindlichkeitswerte wurden unmittelbar vor Beginn der Messkampagne ermittelt. Der Messverstärker vom Typ HBM MGCplus ist in der Genauigkeit um Faktoren besser als die Sensorik und wird daher an dieser Stelle nicht berücksichtigt.

Aus der folgenden Tabelle sind die eingesetzten Messverstärker, Kabel, Sensoren und deren eingestellte Empfindlichkeitswerte ersichtlich.

Versuchs-abschnitt	Messpunkt	Sensor-Nr.	Empfindlichkeit [mV/V]	Kabel	Messverstärker	Slot MGCplus
A1	MP1.1	10	80.0	H25-321	MGCplus Nr. 2	1
	MP1.2	15	81.6	H25-314		2
	MP1.3	26	80.0	H25-323		3
	MP1.4	19	78.4	H25-324		4
	MP1.5	22	80.0	H25-303		5
	MP1.2i	16	82.5	H25-313		6
	MP1.4i	6	75.0	H25-312		7
A2	MP2.1	12	77.6	H50-34	MGCplus Nr. 1	1
	MP2.2	9	82.0	H50-14		2
	MP2.3	1	74.0	H25-322		3
	MP2.4	24	80.0	H50-223		4
	MP2.5	27	80.0	H50-326		5
	MP2.2i	28	82.0	H50-35		6
	MP2.4i	18	78.5	H25-319		7
A3	MP3.1	21	83.0	H50-205	MGCplus Nr. 1	8
	MP3.2	17	76.0	H50-2502		9
	MP3.3	20	77.0	H50-204		10
	MP3.4	25	81.6	H50-200+H50-203		11
	MP3.5	23	84.0	H50-211+H50-206		12
	MP3.2i	5	91.0	H50-29		12
	MP3.4i	7	77.6	H50-215+H50-220		14

Tabelle 2 Messkette Bewegungsmessung

4.3. Luftschallemissionsmessung

Die Anordnung der Mikrofone erfolgte, gemäss EN ISO 3095:2013, in 7.5 m Abstand zur Gleisachse und in 1.2 m Höhe über SOK. Alle Messquerschnitte wurden von der Seite des Versuchsgleises her gemessen. In der Ausbreitungsrichtung befand sich ein bei allen Abschnitten gleich breiter, nicht asphaltierter Fuss- und Fahrradweg sowie bei A1 und A2 ein Maschendrahtzaun ohne Bewuchs.

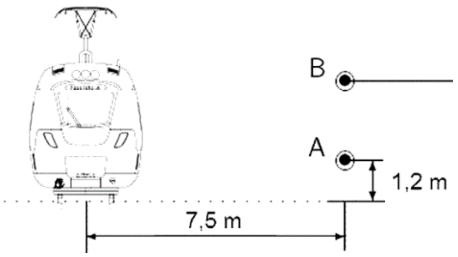


Abbildung 9 Mikrofonposition



Abbildung 10 Situation bei Messquerschnitt L im Abschnitt A2

Die Messung wurde mit einer Abtastfrequenz von 48 kHz durchgeführt. Die A-Bewertung erfolgte im Postprocessing, es wurden die linearen Signale aufgezeichnet.

4.3.1. Messgeräte und Messunsicherheit

Mikrofone:	Bruel & Kjær 4165
Vorverstärker:	Tescon 1560-P42
Verstärker:	Tescon 9017
A/D-Wandler:	Goldammer G0V-1034-0 (USB) Absolute Genauigkeit ±0.46%
Kalibrator:	Bruel & Kjær 4230, 1000 Hz, Nennkennwert Toleranz ±0.3 dB kalibriert am 19.06.2018 (Messabweichung 0.0 dB)
Software Erfassung:	National Instruments DIAdem v8
Software Postprocessing:	National Instruments DIAdem v8 und HBM catman

4.4. **Gleisabklingrate**

Die 29 Messpunkte der Messreihen für die vertikale und horizontale Messrichtung entsprechend EN 15461 wurden an beiden Schienen des Versuchsgleises eingerichtet.

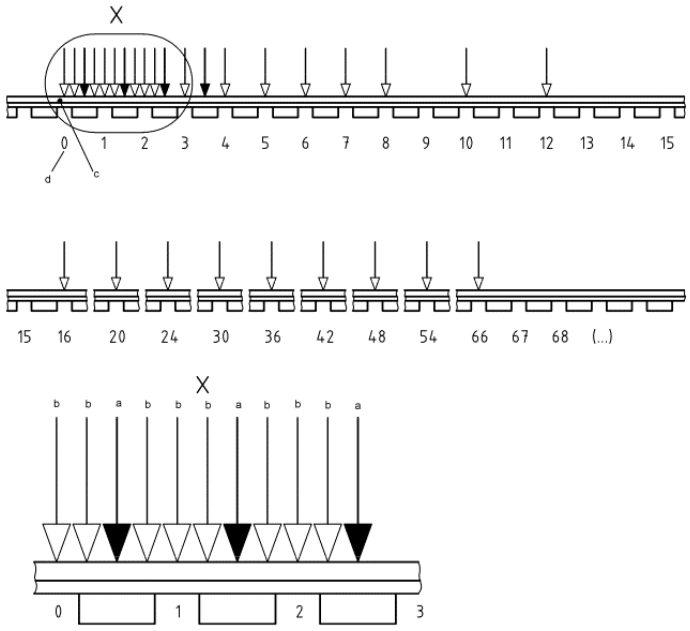


Abbildung 11 Mess- und Anregungspositionen nach EN 15461

a) Hammerschlagimpuls auf der Schiene oberhalb der Schwelle
b) Hammerschlagimpuls auf der Schiene zwischen den Schwellen
c) Position der Beschleunigungsaufnehmer
d) Index des Schwellenfaches

Es wurde zunächst jeder Messabschnitt hinsichtlich seiner Eignung zur Durchführung der Messungen visuell inspiziert und der zu untersuchende Messabschnitt festgelegt. Der Beschleunigungssensor wurde mittels eines Magneten an der Schiene befestigt. Der Sensor wurde vertikal am Schienenkopf angebracht, horizontal auf der Aussenseite des Schienenkopfs (Abbildung 12). Als Signalgeber fungiert ein Prüfhammer in welchem ein Kraftsensor integriert ist. Das Beschleunigungssignal wurde zusammen mit dem Kraftsignal des Prüfhammers in das Messsystem eingeleitet. An jedem Messpunkt wurden mindestens vier gültige Einzelmessungen (Hammerschläge) durchgeführt. Während der Messungen wurde die Kohärenz der Signale überwacht. Bei nicht ausreichender Kohärenz wurden die Einzelmessungen wiederholt.



Abbildung 12 Messung der Schienenabklingrate vertikal (links) und horizontal (rechts).

Vor der Messung der Abklingrate wurde jeweils eine Konsistenzprüfung in vertikaler Messrichtung durch den Vergleich der Übertragungsfunktionen im nullten Schwellenfach (Startpunkt, Position 0) mit zwei Punktübertragungsfunktionen im Abstand von je einem Viertel des Schwellenabstands in beide Richtungen (-1 und +1) durchgeführt. Ein Vergleich der Punktübertragungsfunktionen (Punktakzeleranzen) für die Punkte 0, -1, und +1 ergab, dass sich diese nur gering voneinander unterscheiden. Der vorgesehene Messort war damit prinzipiell zur Durchführung der Abklingratenmessung geeignet. Als Referenzpunkt für die Abklingratenmessung wurde jeweils der Punkt 0 gewählt.

Die aufgezeichneten Beschleunigungs- und Kraftsignale wurden in Schmalbandspektren im Frequenzbereich von 0 bis 6400 Hz bei 4 Hz Auflösung fouriertransformiert. Aus den Schmalbandspektren wurde die Übertragungsfunktion (Akzeleranz [m/Ns-2]) bestimmt. Die Zeitsignale, deren Schmalbandspektren sowie die Übertragungsfunktionen und die Kohärenz der Signale wurden gemittelt und abgespeichert. Aus den gemittelten, schmalbandigen Übertragungsfunktionen wurden Terzspektren bestimmt. Damit wurde die Abklingrate in dB/m errechnet und den Grenzkurven aus EN ISO 3095 gegenübergestellt.

4.4.1. Messgeräte

Die verwendeten Messgeräte wurden vor und nach den Messungen auf ihre einwandfreie Funktion überprüft. Die Messwerterfassung erfolgte mit einem Mehrkanalmesssystem der Firma Mecalc, Typ MK-II. Das System war mit den aufgeführten Komponenten bestückt.

Beschreibung	Hersteller	Typ	Serien-/ Versionsnummer
Vielkanal-Messgerät MKII	Mecalc	PQ12 SC427 ICP429	0511M2944 0212M8824 0511M3101
Mess- und Auswerteprogramm PAK	M-BBM VAS	5.9	SR 2a
Beschleunigungsaufnehmer	BBN	507-01	158
Impulshammer (Stahlspitze)	B&K	8202	1461449

Abbildung 13 Messgeräte zur Bestimmung der Gleisabklingrate

Die Auswertung der aufgenommenen Messdaten erfolgte mit der Software PAK 5.9 SR 2a (Müller-BBM VibroAkustik Systeme GmbH).

5. Versuchsprogramm

5.1. Kompression der Zw

Die Messung der Zw-Kompression erfolgte vom 7. bis 8. August 2018 bei Lufttemperaturen von 19 bis 25 °C. Die Fahrbahn war mehrheitlich trocken, zwischenzeitlich fiel leichter Regen.
Die Tabelle im Anhang I enthält nur diejenigen Züge, die bei allen Abschnitten simultan gemessen wurden. Weitere Zugsfahrten wurden aufgezeichnet, jedoch aufgrund der fehlenden Daten bei einem oder zwei Abschnitten nicht zur Auswertung beigezogen.

Die Tabelle mit sämtlichen während des Versuchs aufgezeichneten Zügen sind dem Anhang I zu entnehmen.

5.2. Luftschallemissionsmessung

Die Luftschallmessungen begannen am Nachmittag des 6. Augusts 2018 und dauerten bis in die Nacht desselben Tages an. Der atmosphärische Luftdruck betrug 955 bis 956 mbar, der Wind wehte aus südwestlicher Richtung mit Geschwindigkeiten stets unter 5 m/s.

Die Tabelle mit sämtlichen während des Versuchs aufgezeichneten Zügen sind dem Anhang II zu entnehmen. Darin enthalten sind auch die Durchfahrtsgeschwindigkeiten und die Klimabedingungen.

5.3. Gleisabklingrate

Die Messungen erfolgten in der Nacht vom 14. auf den 15. August 2018 und wurden von der Müller-BBM Schweiz AG durchgeführt. Die Witterung während den Messreihen war trocken. Die Schienentemperatur betrug zwischen 12 und 15 °C, die Lufttemperatur 13 bis 15 °C.

Eine ausführliche Dokumentation des Versuchs ist im Bericht Nr. C90372/01 zu finden.

6. Ergebnisse/Resultate

6.1. Kompression der Zw

6.1.1. Übersicht

Im Mittel über die erste resp. letzte Achse sämtlicher erfassten Fahrzeuge beträgt die Zw-Einsenkung im Abschnitt A1 (steife Zw) 0.07 mm, im Abschnitt A2 mit elastischen Zw 0.50 mm und im Abschnitt mit optimierten Zw ENIT 0.51 mm. Eine Betrachtung von Streuwerten über alle Fahrzeugtypen ist nicht aussagekräftig, da die Variation in den Amplituden grösstenteils in den unterschiedlichen Achslasten ihre Ursache hat.

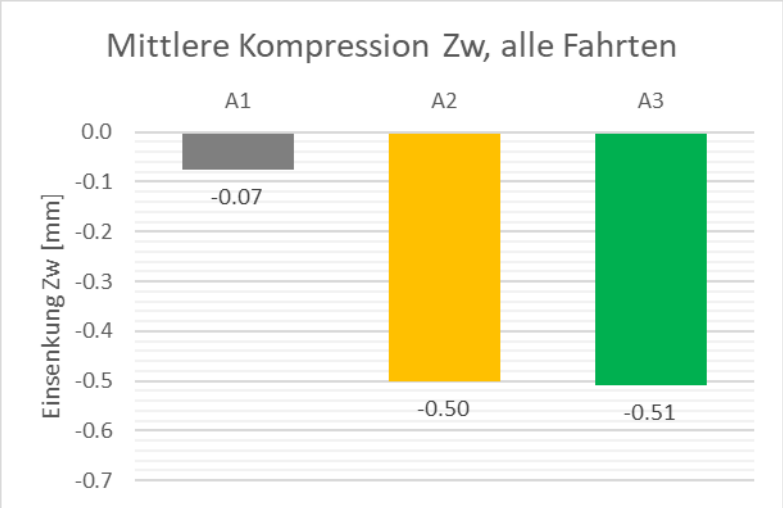


Abbildung 14 Mittlere Einsenkung der Zw über alle Fahrten

6.1.2. Fahrzeugabhängige Kompression der Zw

Der am häufigsten erfasste Zugtyp ist der Stadler Flirt (RABe 521) mit 18 Fahrten. Ebenfalls in ausreichender Häufigkeit für eine statistische Betrachtung erfasst wurden die Fernverkehrskompositionen mit fast ausschliesslich vorlaufenden Re 460. Seltener, je zweimal, wurden Intercity Neigezüge (ICN, RABDe 500) und Lokomotiven vom Typ Re 420 gemessen, gar nur einmal eine Lokomotive vom Typ Re 620. Aufgrund der Anzahl Messungen wird lediglich bei den RABe 521 und Re 460 eine Angabe der Standardabweichung gemacht. Vom ICN und der Re 420 beschränken wir uns auf die Darstellung der Mittelwerte.

Die geringfügige Differenz von 0.01 mm zusätzlicher Kompression bei der Zw ENIT gegenüber der weichen Standard-Zw (siehe 6.1.1) gründet auf den schweren Achslasten der Lokomotiven Re 460 und Re 420 mit je 0.02 mm zusätzlicher Kompression. Bei den leichten Fahrzeugen RABe 521 und ICN ist keine Differenz festgestellt worden. Auch die Standardabweichung weist eine maximale Differenz von +0.01 mm bei den Re 460 im Abschnitt A3 (Zw ENIT) auf, ansonsten sind die Werte identisch.

Aufgrund der markant kleineren Amplituden im Abschnitt A1 (steife Zw) werden lediglich Vergleiche zwischen den Abschnitten A2 und A3 gezogen.

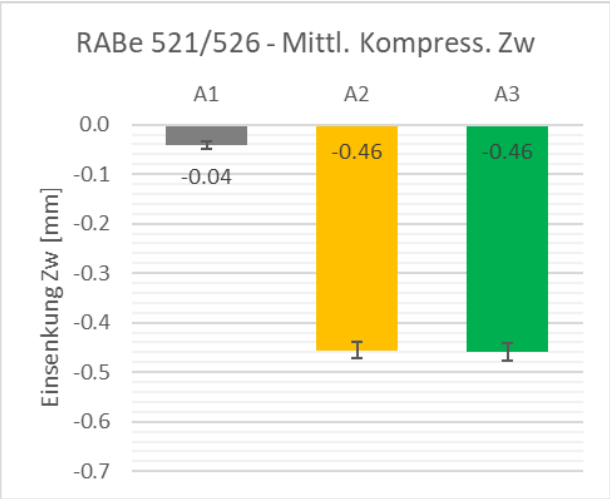


Abbildung 15 Mittlere Zw-Kompression Re RABe 521/526



Abbildung 16 Mittlere Zw-Kompression Re 460

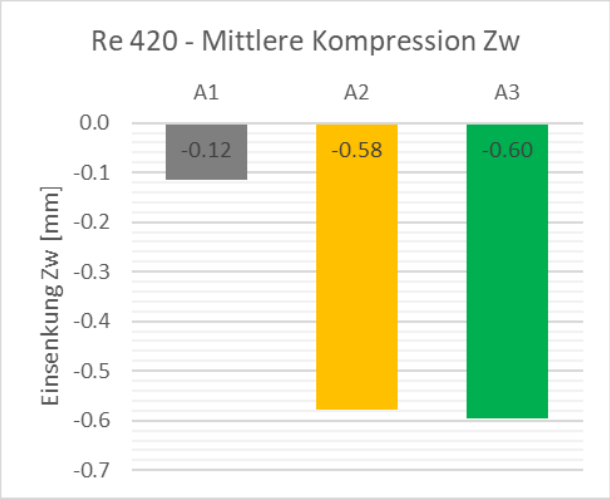


Abbildung 17 Mittlere Zw-Kompression Re 420

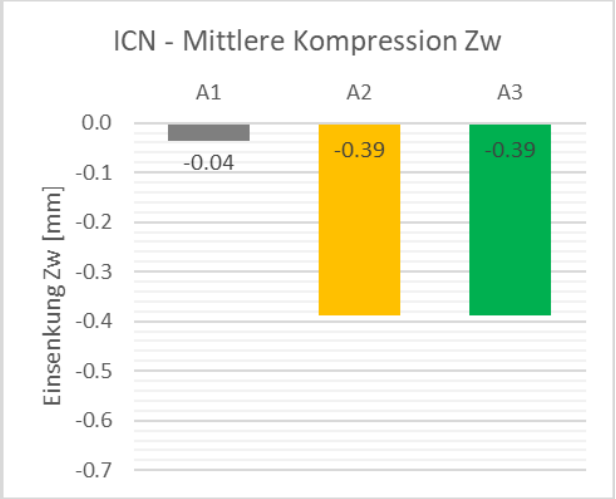


Abbildung 18 Mittlere Zw-Kompression RABDe 500

6.1.3. Kompressionslinie Zw

Nebst der absoluten Einsenkung resp. Kompression der Zw ist die Lastverteilfähigkeit ein entscheidendes Kriterium bei der Beurteilung des elastischen Layers. Ziel ist es, die Radlast in Längsrichtung auf möglichst viele Schwellen zu verteilen, um die Belastung für das einzelne Element sowie den darunterliegenden Schotter und Unterbau zu reduzieren. Zudem wird auch die Schiene bei gleicher Gesamteinsenkung bei einer längeren Einsenkungsmulde weniger stark auf Biegespannung beansprucht.

Durch die vorliegende Messung kann nicht die gesamte Biegelinie der Schiene abgebildet werden, es handelt sich lediglich um die Kompressionslinie der Zw.

Um den Lastverteileffekt der Zw veranschaulichen zu können, wurden zwei Messfahrten (MF) ausgewählt, bei welchen die jeweils ersten Achsen in den Abschnitten A2 und A3 dieselben mittleren Amplituden hervorgerufen haben (MF10 mit Re 460 und MF16 mit RABe 521/526). Die Kurven der Messpunkte 1 bis 5 (nur Schienenaussenseite) wurden zeitlich so verschoben, dass sie übereinander zu liegen kamen. Durch das Verrechnen der Zeit mit der Geschwindigkeit konnte der Wegkanal generiert werden. Der Nullpunkt dieses Wegkanals entspricht der Position, an welcher sich die erste Achse befindet (maximale Einsenkung). In den folgenden Abbildungen 19 und

20 ist jeweils nur der Ausschnitt vor der ersten Achse zu sehen (negativer Wegbereich), da die Kompressionslinie auf der anderen Seite von der zweiten Achse im Drehgestell beeinflusst wird. Die Kompression über das gesamte erste Drehgestell ist in den Abbildungen 21 und 22 zu sehen.

Die Kompressionslinie im Abschnitt A3 mit der optimierten Zw verläuft geringfügig steiler als im Abschnitt A2 mit der elastischen Zw. Ebenfalls ist die Abhebewelle (positive Einsenkung, bzw. Dekompression) im Abschnitt A3 leicht höher. Die gesamte Einflusszone der Radlast weist bei der Re 460 eine halbe Wellenlänge von über 4 m auf, bei der leichteren Achse des Regionalverkehrszuges sind es nur etwa 2.5 m. Der Abschnitt A1 ist aufgrund seiner sehr geringen Kompression schwer beurteilbar, da sich sämtliche Grössen im Hundertstelmillimeterbereich bewegen. Der Einfluss der Zw auf die Lastverteilung ist mit einer solch hohen Steifigkeit und dem damit einhergehenden tiefen Anteil an der Gesamteinsenkung kaum relevant.

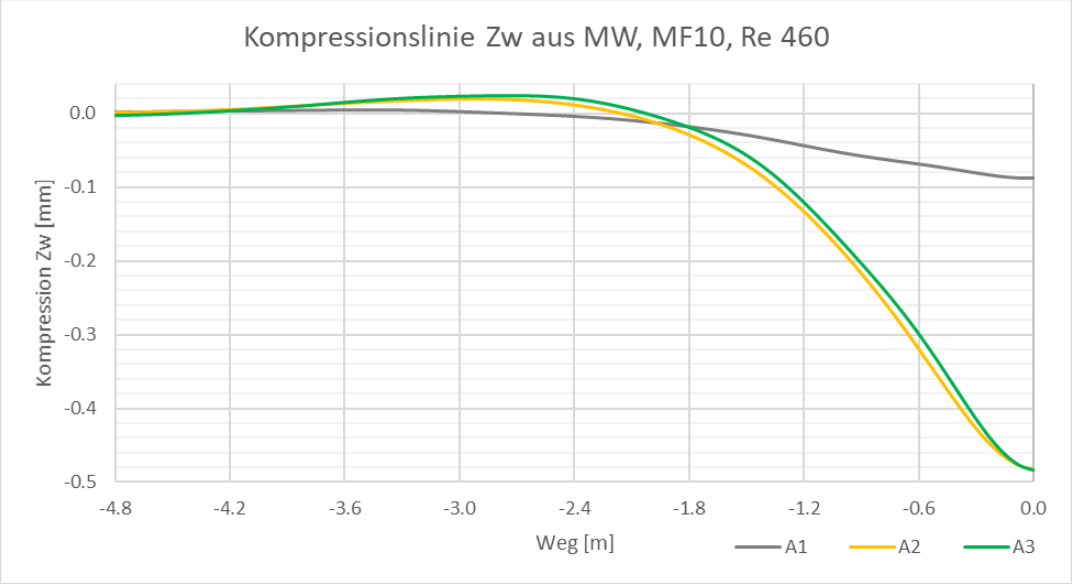


Abbildung 19 Kompressionslinie Zw Detail, MF10, Re 460

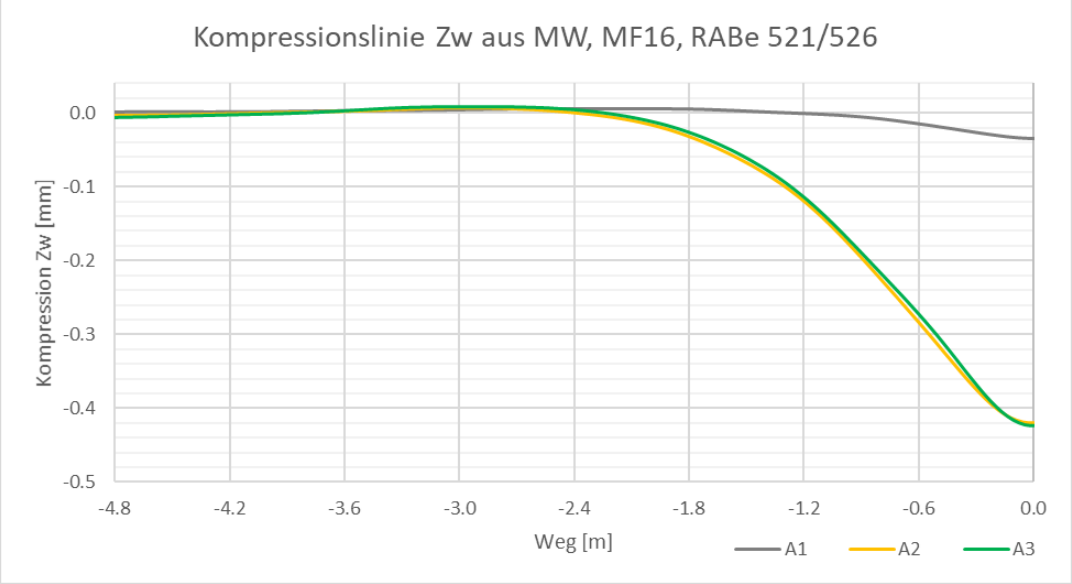


Abbildung 20 Kompressionslinie Zw Detail, MF16, RABe 521/526

Bei der Beurteilung der Kompressionslinie ist jedoch Vorsicht geboten, insbesondere wenn die Differenzen so gering ausfallen wie im Vergleich der beiden Abschnitte A2 und A3. Die Steifigkeiten der weiteren elastischen Komponenten im Gleis, allen voran des Untergrunds, haben einen wesentlichen Einfluss auf die Lastverteilung innerhalb der lastabtragenden Schwellen und somit auf die Biegelinie der Schwelle und auch auf die Kompression der Zw. Es ist also nicht klar, ob die geringen, erfassten Differenzen auf die Zw oder auf die gesamte Gleissteifigkeit zurückzuführen sind.

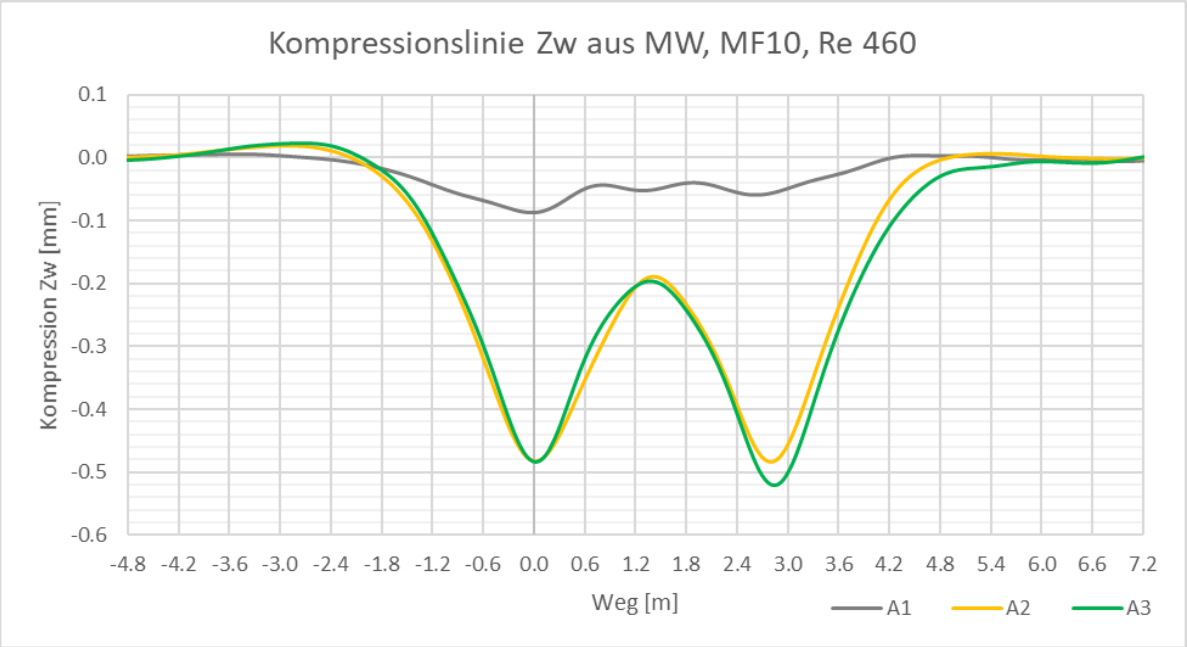


Abbildung 21 Kompressionslinie Zw, MF10, Re 460

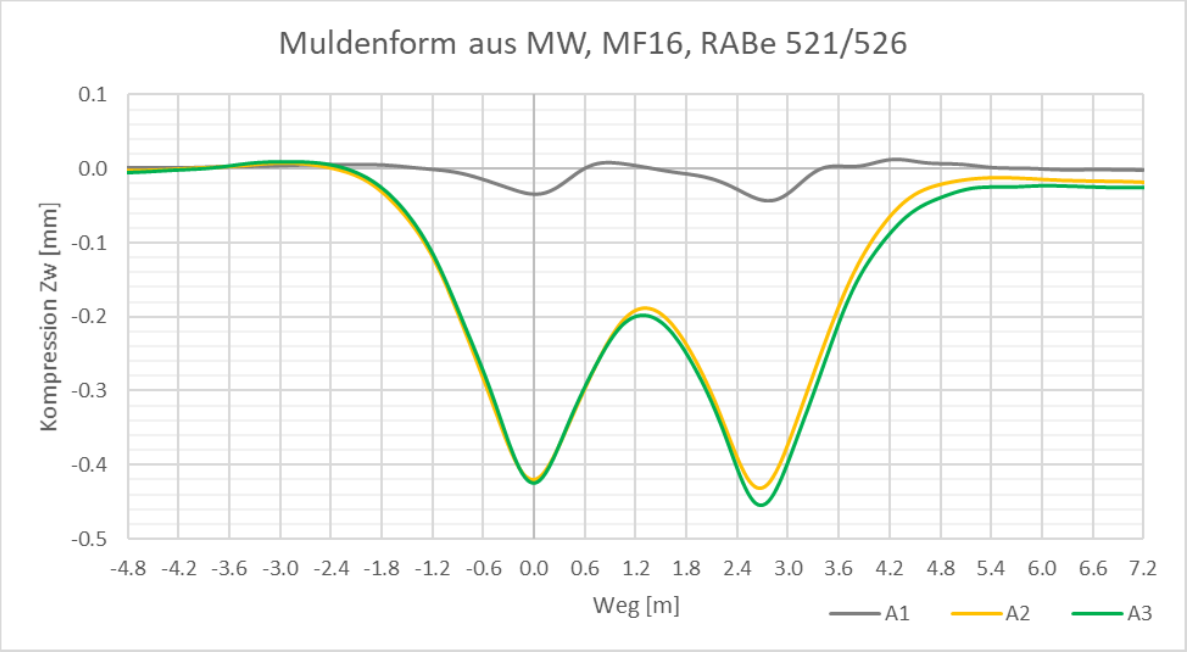


Abbildung 22 Kompressionslinie Zw, MF16, RABe 521/526

6.2. Luftschallemissionsmessung

6.2.1. Dauerschalldruckpegel

Als Vergleichsgrösse dient der A-bewertete, äquivalente Dauerschalldurckpegel $L_{pAeq,Tp}$. Dieser beträgt, gemittelt über alle Messfahrten (unkategorisiert), im Abschnitt A1 mit den steifen Zw 83.4 dBA, im Abschnitt A2 mit den elastischen Zw 86.2 dBA und im Abschnitt A3 mit den optimierten Zw ENIT 87.0 dBA. In der Folge wird vornehmlich auf den Vergleich von Abschnitt A2 und A3 eingegangen, da der Abschnitt A1 aufgrund der steifen Zw hinsichtlich der Lärmemissionen in allen Belangen überlegene Resultate liefert. In den Diagrammen sind stets alle drei Abschnitte aufgeführt.

Werden die gemessenen Züge in die groben Kategorien Regional- und Fernverkehr eingeteilt, zeigt sich, dass die Differenz zu Ungunsten der ENIT Zw aus den Regionalverkehrszügen herrührt. Hier resultiert eine Lärmzunahme von 1.7 dBA. Bei den tendenziell schwereren Fernverkehrszügen hingegen schnitt die ENIT Zw sogar geringfügig besser ab, die Lärmreduktion beträgt 0.2 dBA. Die Fernverkehrs- und Güterkompositionen sind aufgrund des höheren mittleren Schallpegels wesentlich störender für die Umwelt als die leiseren Regionalverkehrszüge.
Die zur Mittelung verwendete Anzahl Züge beträgt 19 Züge im Regionalverkehr und 16 Züge im Fernverkehr.

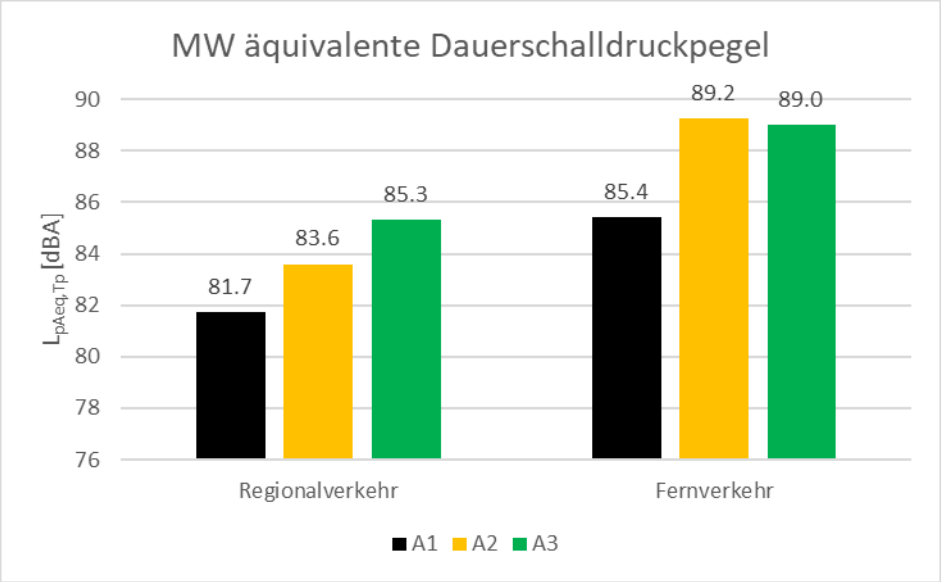


Abbildung 23 Mittlere äquivalente Dauerschalldruckpegel Regional- und Fernverkehr

Werden die Kategorien weiter unterteilt nach Zugtypen, zeigt sich die grösste Differenz bei den RABe 521 (Flirt). Hier beträgt die Lärmzunahme im A3 (ENIT) 3 dBA. Der mit schweren Mitteldrehgestellen ausgerüstete RABe 526 (GTW) verursacht noch eine Zunahme von 1.1 dBA. Im Fernverkehr hingegen resultiert bei allen Zugtypen eine leichte Abnahme der Schallemission, von 0.2 bis 0.6 dBA. Eine Zusammenstellung der mittleren äquivalente Dauerschalldruckpegel und die Anzahl gemessener Kompositionen (n) ist aus Abbildung 24 ersichtlich.

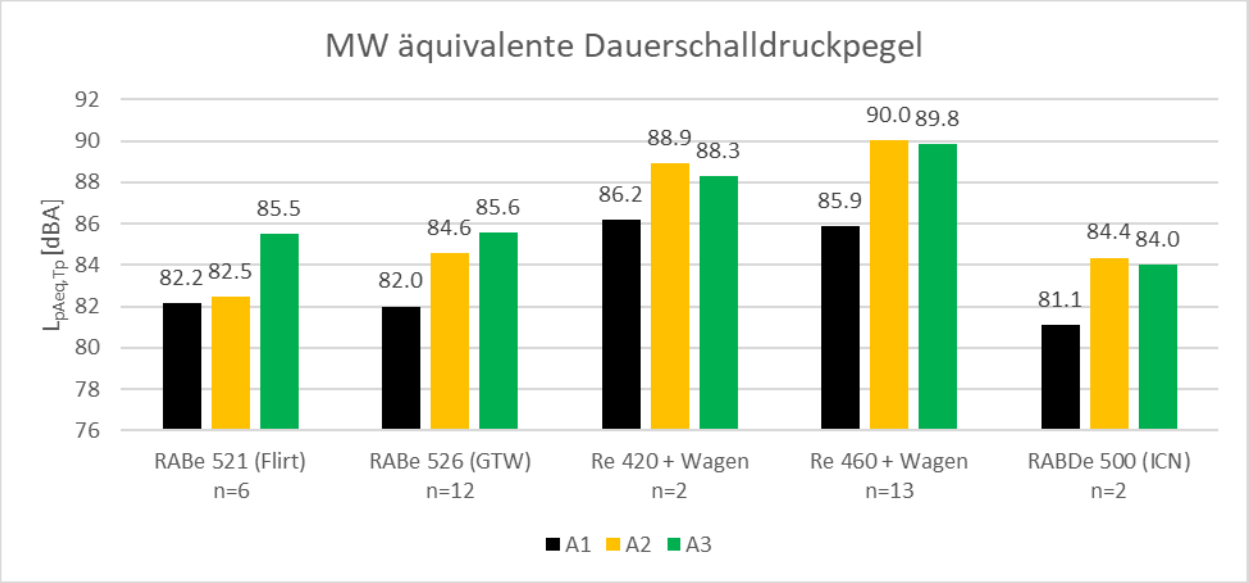


Abbildung 24 Mittlere äquivalente Dauerschalldruckpegel nach Zugtyp

Die stark unterschiedlichen Verhältnisse unter den Zugtypen scheinen nicht direkt von der Achslast abhängig zu sein. So weist bspw. der Flirt ebenso wie die Fernverkehrszüge eine im Mittel höhere Achslast auf als der GTW, die Luftschallemission ist jedoch beim GTW gegenüber dem Flirt vermindert aber im Vergleich zu den FV-Zügen verstärkt. Auch dürfte die unabgefederte Masse beim Flirt und beim GTW in etwa identisch sein, bei den FV-Kompositionen jedoch wesentlich höher. Vielmehr scheinen hier andere Faktoren wie das Laufverhalten auf der Geraden und bei hohen Geschwindigkeiten sowie die unterschiedliche Anregung aufgrund der Raddurchmesser Einfluss zu nehmen.

Sämtliche Einzelwerte für $L_{pAeq,Tp}$ sind dem Anhang III zu entnehmen.

6.2.1.1. Geschwindigkeitsabhängigkeit

In den Abschnitten A1 und A2 nimmt bei den Regionalverkehrszügen Flirt und GTW der mittlere Schalldruck mit zunehmender Geschwindigkeit ebenfalls zu. Im Abschnitt A3 hingegen bleiben die Werte im Geschwindigkeitsbereich von 116 bis 158 km/h bei linearer Regression in etwa konstant, siehe Abbildung 25.

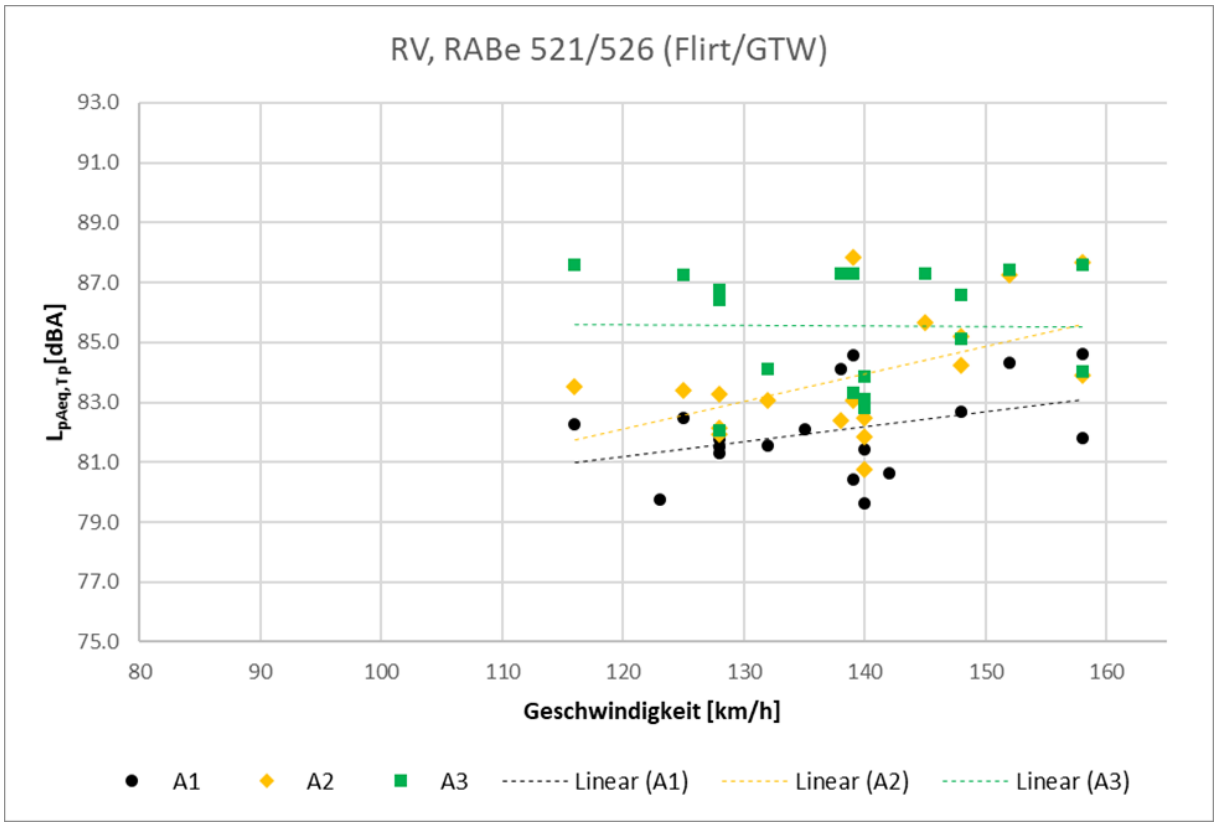


Abbildung 25 V-abhängige Dauerschalldruckpegel RABe 521/526 (Flirt/GTW)

Bei den Fernverkehrskompositionen mit Re 460 Traktion nimmt der Schalldruck in allen Abschnitten in derselben Grössenordnung mit der Geschwindigkeit zu, siehe Abbildung 26.

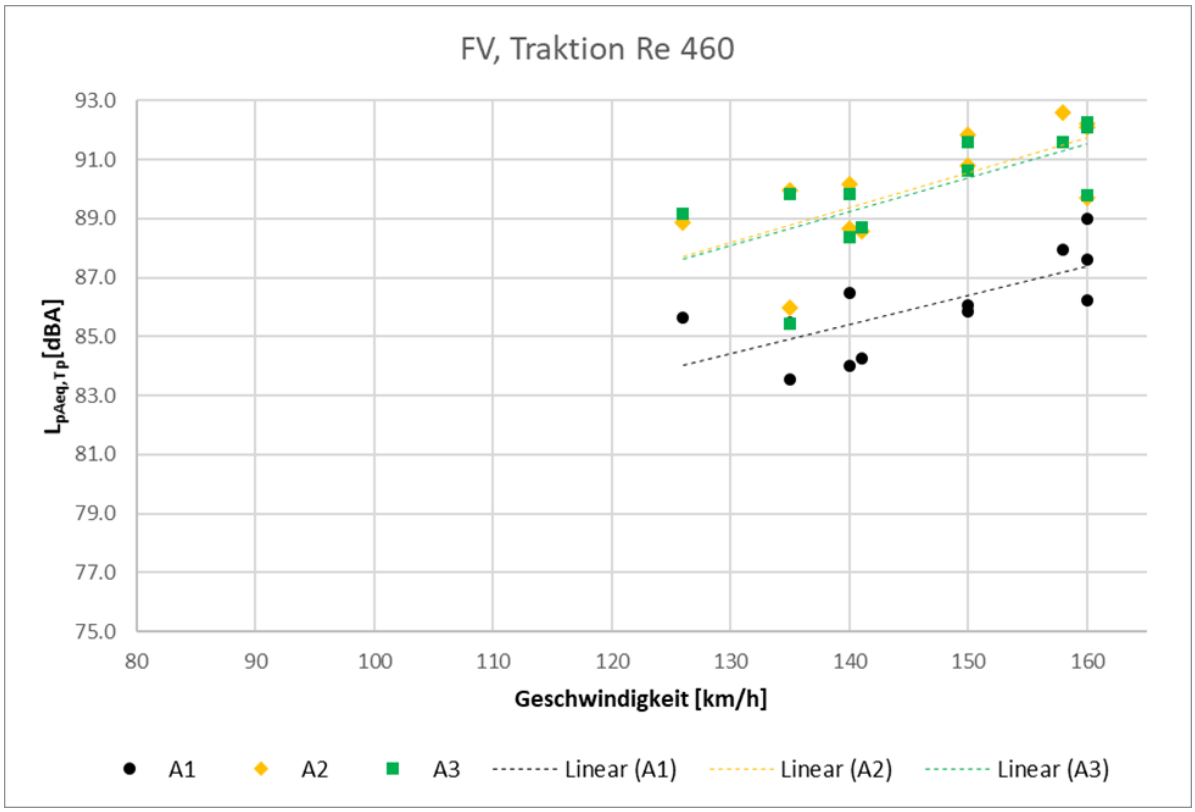


Abbildung 26 V-abhängige Dauerschalldruckpegel Re 460 FV-Kompositionen

6.2.2. Terzspektren

Die wellenlängenabhängige Betrachtung zeigt für alle Zugtypen ein ähnliches Verhalten. Von ca. 80 bis 400 Hz treten im Abschnitt A1 mit steifen Zw höhere Amplituden auf als in den Abschnitten mit weichen Zw. Die Differenz beträgt bis zu 4 dBA. In den höheren Frequenzen über 500 Hz führen die weichen Zw fast ausnahmslos zu höheren Schallemissionen, wobei die ENIT-Zw in A3 bei den Zugtypen Flirt und GTW höhere und bei den Fernverkehrskompositionen leicht geringeren Amplituden aufweist als der Abschnitt A2.

Über alle Fahrten gemittelt beträgt die grösste Differenz zwischen den beiden weichen Zw 2.4 dBA bei 2.5 kHz zu Ungunsten der ENIT-Zw, wobei lediglich der vom Pegel her relevante Frequenzbereich von ca. 300 bis 6000 Hz berücksichtigt wird. Beim Flirt sind es sogar 6.1 dBA bei derselben Terz-Mittenfrequenz.
Die grössten Vorteile weist die ENIT-Zw bei den ICN-Kompositionen mit -1.6 dBA bei der 630 Hz-Terz auf und bei den Re 460 Pendelzügen mit -1.3 dBA bei der 800 Hz-Terz.

Beispielhaft sind in den folgenden Darstellungen die gemittelten Terzbänder aller Zugfahrten sowie der häufigsten Zugtypen GTW und Re 460 dargestellt. Dem Anhang IV können zusätzlich die weiteren gemittelten Terzbänder (Flirt, ICN) sowie die Terzbänder aller einzelnen Fahrten entnommen werden.

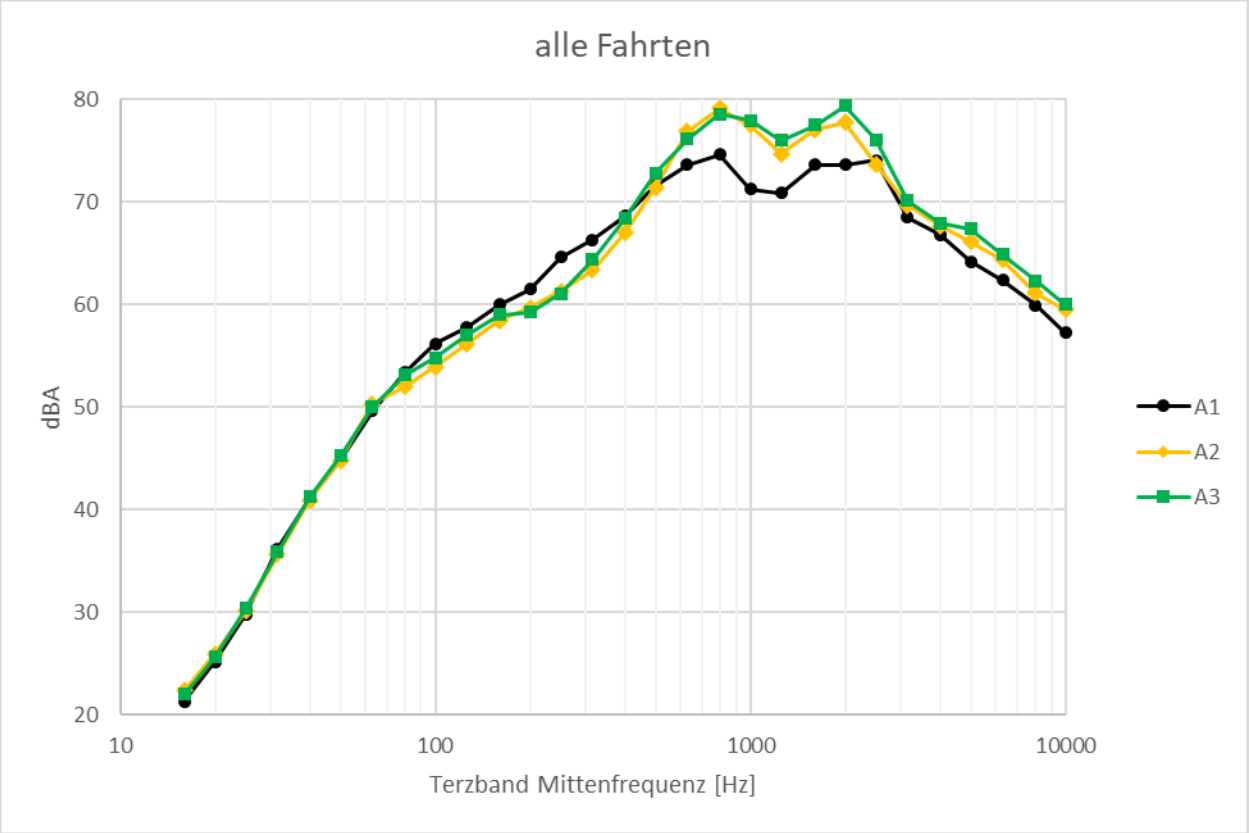


Abbildung 27 Terzbänder über alle Messfahrten gemittelt

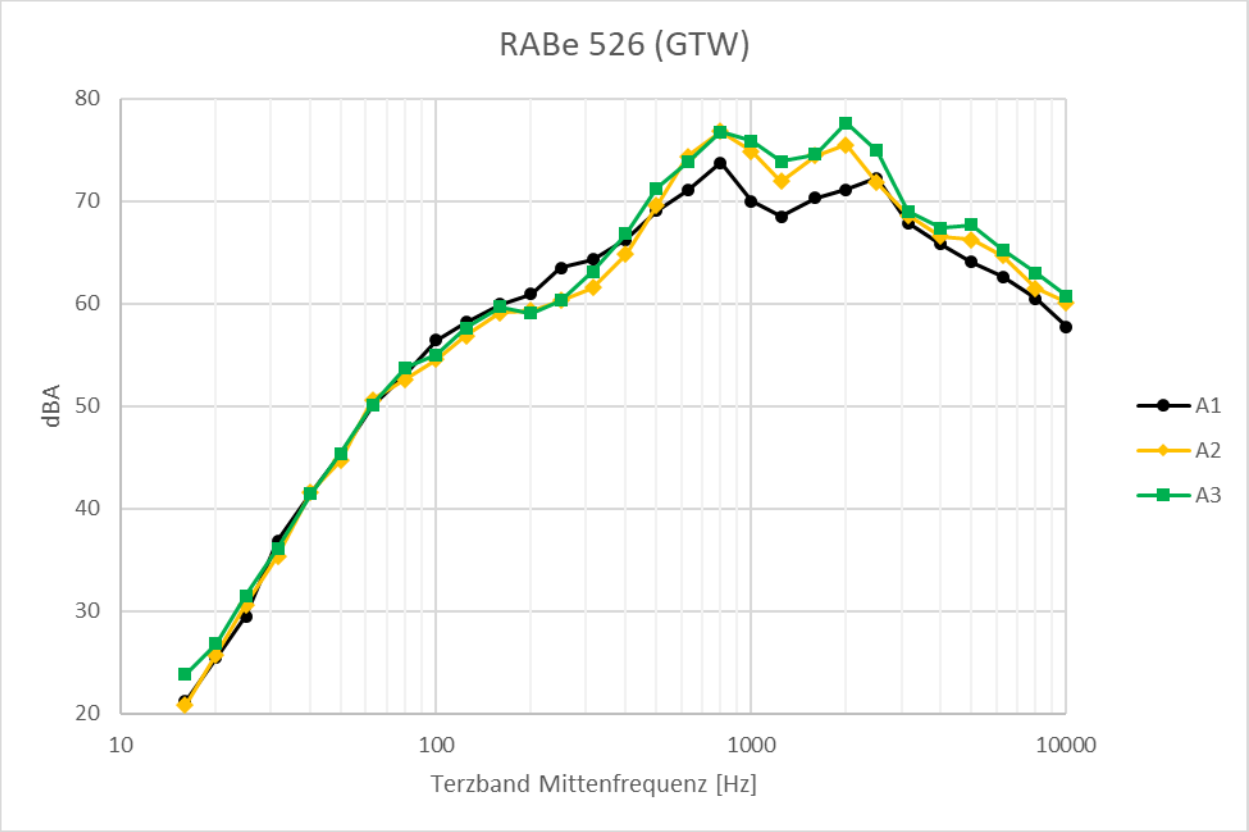


Abbildung 28 Terzbänder über alle erfassten RABe 526 (GTW) gemittelt

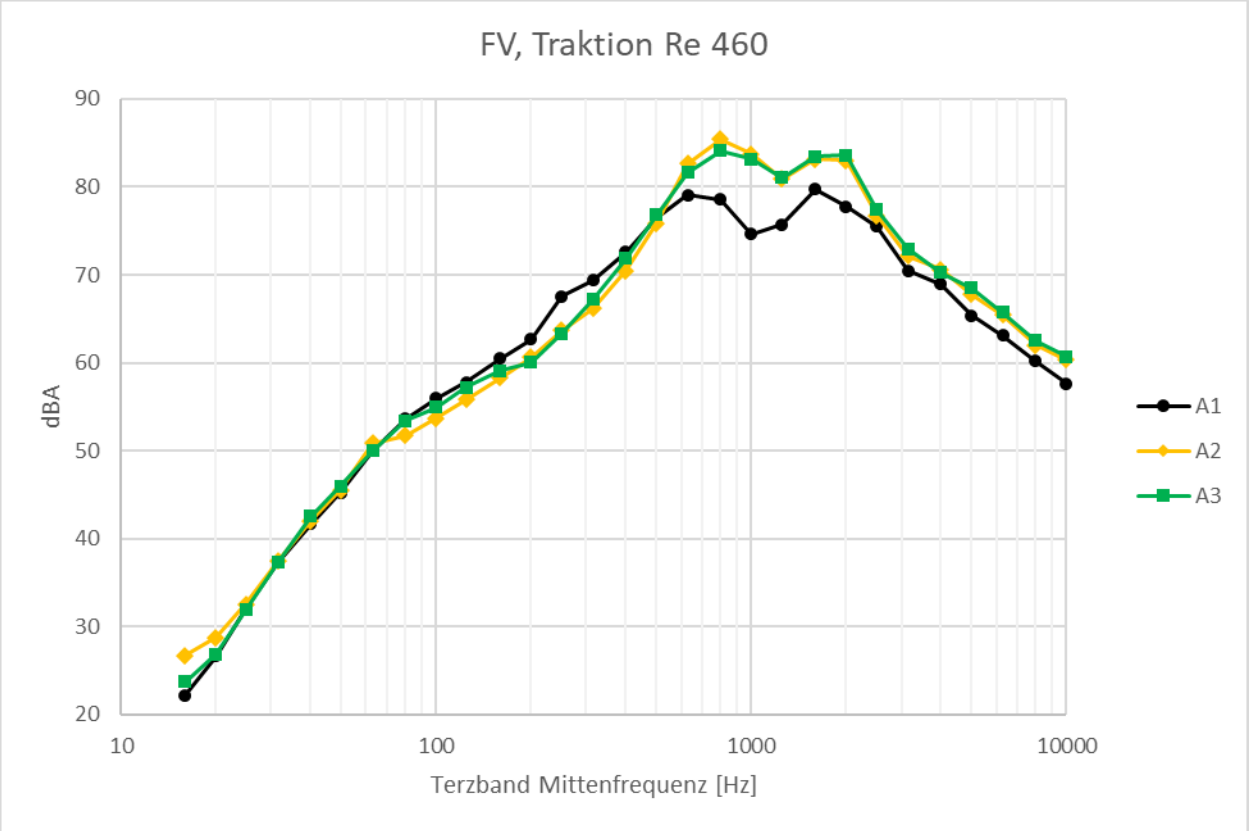


Abbildung 29 Terzbänder über alle erfassten Re 460-Kompositionen gemittelt

6.2.3. Geräuschemission vor Zugdurchfahrt

Die Norm EN ISO 3095:2013 fordert als Vergleichsgrösse den äquivalenten Schalldruckpegel $L_{pAeq,Tp}$, welcher die Zugdurchfahrt von Puffer bis Puffer berücksichtigt. In Abbildung 30 sind die Rohsignale der Messfahrt Nr. 27 aufgetragen, oben von A2 und unten von A3. Der Zuganfang und das Zugende, also der auszuwertende Bereich für $L_{pAeq,Tp}$, sind mit blauen Linien markiert.

Bevor sich der Zug an einem Beobachtungsquerschnitt, in diesem Fall dem Messquerschnitt, befindet, ist an gewissen Gleisen bereits lange Zeit im Voraus ein singendes Geräusch der Schiene bemerkbar. Dieser Effekt tritt erfahrungsgemäss bei besohlten Betonschwellen verstärk auf und kann für Anwohner eine zusätzliche Lärmbelästigung darstellen.

In A3 tritt dieses Geräusch früher auf als in A2, jedoch mit niedrigerer Intensität. Die höchsten Amplituden liegen im Bereich von 730 bis 940 Hz. Das anschwellende Geräusch ist mit orangen Linien verdeutlicht.

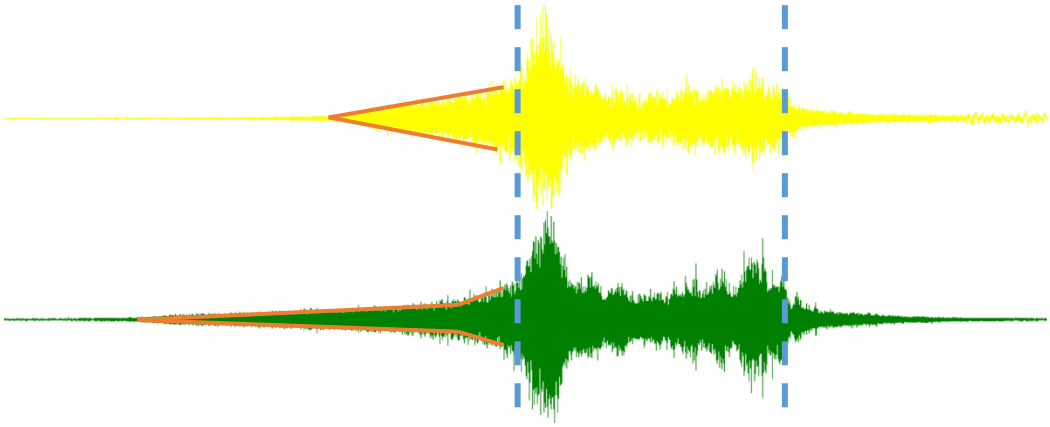


Abbildung 30 Rohsignal Schalldruck A2 und A3, MF27

6.3. **Gleisabklingrate**

Die Abbildungen auf der Folgeseite zeigen die über beide Schienen gemittelten Terzspektren der Abklingraten in vertikaler (Abbildung 31) und horizontaler (Abbildung 32) Richtung. Rot gestrichelt sind die jeweiligen unteren Grenzkurven eingetragen, welche definieren ob ein Gleis für akustische Messungen im Rahmen von Typenprüfungen von Fahrzeugen verwendet werden darf oder nicht. Im Anhang V sind alle gemessenen Abklingraten (östliche und westliche Schienen einzeln) tabellarisch und in Diagrammform dargestellt.
Auf dem Abschnitt A1 liegen die vertikalen und horizontalen Abklingraten überwiegend deutlich oberhalb der Grenzkurven, d.h. die Schienen erfüllen die Vorgaben der Norm EN ISO 3095 über einen breiten Frequenzbereich, allerdings unterschreitet die westliche Schiene bei 2500 Hz die Grenzkurve um einen signifikanten Betrag. Die Ergebnisse von den Abschnitten A2 und A3 zeigen recht ähnliche Kurvenverläufe. Nur in den Terzbändern unterhalb von 400 Hz und oberhalb von 3150 Hz werden die Grenzkurven für die vertikale Schienenschwingung eingehalten, dabei ist tendenziell die dämpfende Wirkung auf dem Abschnitt A2 etwas besser als in A3.

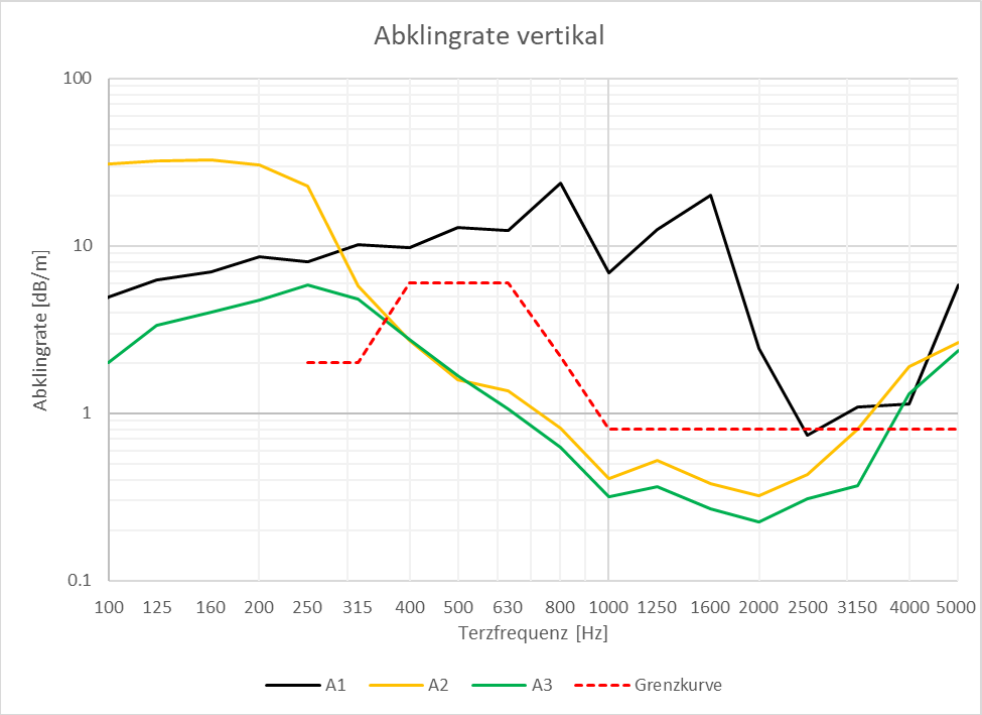


Abbildung 31 Gleisabklingrate vertikal, Schienenstränge gemittelt

Die untere Grenzkurve für die horizontale Abklingrate wird in A2 und A3 in den Terzen von 630 Hz bis 1250 Hz und von 2500 Hz (A2) resp. 3150 Hz (A3) bis 4000 Hz nicht unterschritten. Bei Frequenzen unterhalb von 630 Hz verlaufen die horizontalen Abklingratenkurven leicht unterhalb und in etwa parallel zur Grenzkurve.

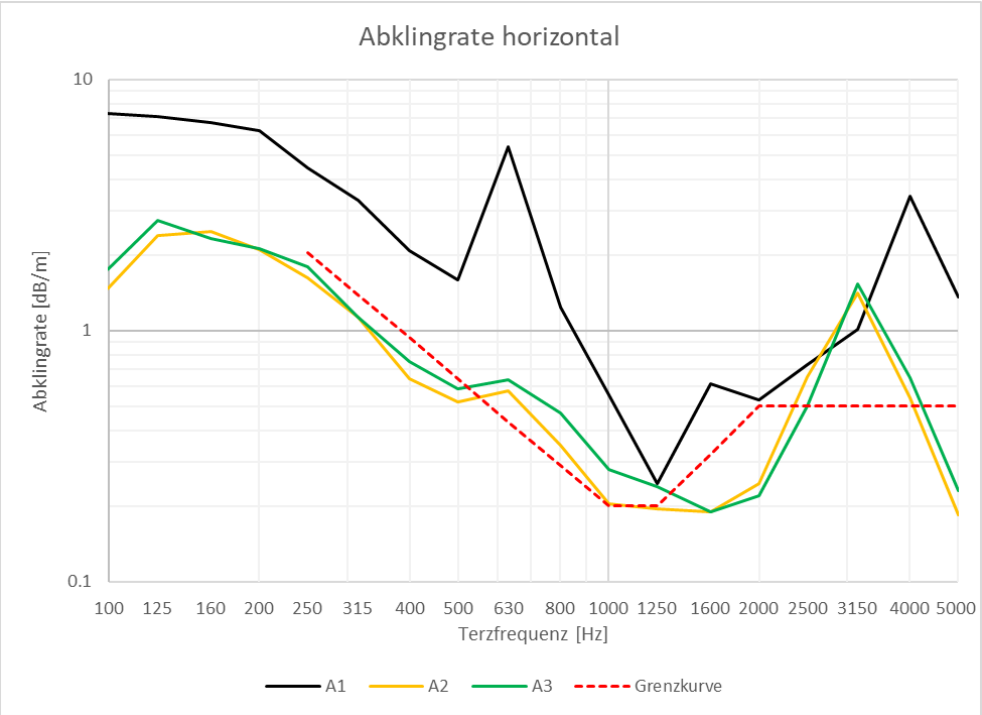


Abbildung 32 Gleisabklingrate horizontal, Schienenstränge gemittelt

A. Anhangsverzeichnis

Anhang I Protokoll Zw-Kompression
Anhang II Protokoll Luftschallmessung
Anhang III Einzelmesswerte $L_{pAeq,Tp}$
Anhang IV Terzbänder
Anhang V Messkurven und Wertetabellen TDR

B. Abkürzungsverzeichnis

BGLE	Bundesgesetzes über die Lärmsanierung der Eisenbahnen
DfA	Datenbank feste Anlagen
ENIT	Elastomer for Noise Improvement on Track
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Monomer
EVA	Ethylen-Vinyl-Azetat
FinöV	Bundesbeschluss über Bau und Finanzierung von Infrastrukturvorhaben des öffentlichen Verkehrs
FV	Fernverkehr
GBRT	gewichtete Bruttoregistertonne
GTW	Gelenktriebwagen
IC	Intercity
ICN	Intercity Neigezug
LCC	Life Cycle Cost
$L_{pAeq,Tp}$	A-bewerteter äquivalenter Dauerschalldruckpegel
MF	Messfahrt
MP	Messpunkt
MQ	Messquerschnitt
MW	Mittelwert
SOK	Schienenoberkante
TDR	Track Decay Rate (Gleisabklingrate)
TSI	Technische Spezifikationen für die Interoperabilität
USP	Under Sleeper Pad (Schwellenbesohlung)
Zw	Zwischenlage

C. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Mittlere äquivalente Dauerschalldruckpegel nach Zugtyp 4
Abbildung 2 Gleisabklingrate vertikal, Schienenstränge gemittelt 4
Abbildung 3 Zwischenlage ENIT 5
Abbildung 4 Teststrecke mit Versuchsabschnitten, Übersicht 7
Abbildung 5 Lage der Messquerschnitte innerhalb der Versuchsabschnitte 8
Abbildung 6 Messpunktanordnung Zw-Kompressionsmessungen 9
Abbildung 7 Sensorapplikation an einem Messquerschnitt mit beidseitiger Sensorik 9
Abbildung 8 Vergleich Rohsignal mit TP-Filter 50 Hz (MF33) 10
Abbildung 9 Mikrofonposition 12
Abbildung 10 Situation bei Messquerschnitt L im Abschnitt A2 12
Abbildung 11 Mess- und Anregungspositionen nach EN 15461 12
Abbildung 12 Messung der Schienenabklingrate vertikal (links) und horizontal (rechts). 13
Abbildung 13 Messgeräte zur Bestimmung der Gleisabklingrate 14
Abbildung 14 Mittlere Einsenkung der Zw über alle Fahrten 15
Abbildung 15 Mittlere Zw-Kompression Re RABe 521/526 16
Abbildung 16 Mittlere Zw-Kompression Re 460 16
Abbildung 17 Mittlere Zw-Kompression Re 420 16
Abbildung 18 Mittlere Zw-Kompression RABDe 500 16

Abbildung 19 Kompressionslinie Zw Detail, MF10, Re 460 17
Abbildung 20 Kompressionslinie Zw Detail, MF16, RABe 521/526 17
Abbildung 21 Kompressionslinie Zw, MF10, Re 460 18
Abbildung 22 Kompressionslinie Zw, MF16, RABe 521/526 18
Abbildung 23 Mittlere äquivalente Dauerschalldruckpegel Regional- und Fernverkehr 19
Abbildung 24 Mittlere äquivalente Dauerschalldruckpegel nach Zugtyp 20
Abbildung 25 V-abhängige Dauerschalldruckpegel RABe 521/526 (Flirt/GTW) 21
Abbildung 26 V-abhängige Dauerschalldruckpegel Re 460 FV-Kompositionen 21
Abbildung 27 Terzbänder über alle Messfahrten gemittelt 22
Abbildung 28 Terzbänder über alle erfassten RABe 526 (GTW) gemittelt 23
Abbildung 29 Terzbänder über alle erfassten Re 460-Kompositionen gemittelt 23
Abbildung 30 Rohsignal Schalldruck A2 und A3, MF27 24
Abbildung 31 Gleisabklingrate vertikal, Schienenstränge gemittelt 25
Abbildung 32 Gleisabklingrate horizontal, Schienenstränge gemittelt 25

D. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Versuchsabschnitte und verbaute Zw 8
Tabelle 2 Messkette Bewegungsmessung 11

Finsterhennen, 30.10.2018

Marc Meier
Projektleiter / Geschäftsführer

Giuliano Soldati
Geschäftsführer