Allianz Fahrweg Normalspur / Genfergasse 11, CH-3001 Bern / info@allianz-fahrweg.ch / allianz-fahrweg.ch

Stand der Technik zu Erschütterungen und Körperschall auf dem Schweizer Normalspur-Eisenbahnnetz

Laurence Conreaux
Roger Müller
Urs Schönholzer



Januar 2023

Impressum



Autoren
Laurence Conreaux
Roger Müller, https://orcid.org/0000-0001-5609-2045
Urs Schönholzer, https://orcid.org/0000-0001-4333-169X

Herausgeber
Allianz Fahrweg Normalspur, Bern, https://allianz-fahrweg.ch

ISBN
978-3-907456-00-2

Lizenz
Solange nichts anderes angegeben ist, sind die Inhalte dieses Dokuments unter der Lizenz CC-BY 4.0 freigegeben. Für die Nutzung von Teilen, die nicht der Allianz Fahrweg Normalspur gehören, kann die Erlaubnis des jeweiligen Rechteinhabers notwendig sein.

Link
https://allianz-fahrweg.ch/publications/9783907456002.pdf

Zitierung
Laurence Conreaux, Roger Müller, Urs Schönholzer, «Stand der Technik zu Erschütterungen und Körperschall auf dem Schweizer Normalspur-Eisenbahnnetz», Allianz Fahrweg Normalspur, Bern, 2023, ISBN 978-3-907456-00-2, https://allianz-fahrweg.ch/publications/9783907456002.pdf

Version
2.0.0

Interne Referenznummer
PRJ-100-031-201

ALLIANZ FAHRWEG

Zusammenfassung

Schienenfahrzeuge erzeugen bei der Fahrt Schwingungen, die durch den Boden übertragen werden und in Gebäuden entlang von Bahnstrecken als Vibrationen und Lärm wahrgenommen werden können. Sie werden als Erschütterungen respektive abgestrahlten Körperschall bezeichnet. Diese Immissionen können von Menschen als störend oder belästigend empfunden werden und auf Dauer in schwerwiegenden Fällen gesundheitsschädlich sein.

In den letzten 25 Jahren wurde diesem Thema sowohl in der Schweiz als auch international vermehrt Aufmerksamkeit geschenkt. Dies zeigen die zahlreichen Forschungsprojekte und Versuche, die abgewickelt wurden, um die auftretenden Mechanismen genauer zu verstehen oder effektive und kostengünstige Minderungsmassnahmen zu entwickeln.

Die Allianz Fahrweg Normalspur hat im Rahmen vom Projekt 100-031-201 «Grundlagen Erschütterungen und abgestrahlten Köperschall» die Erstellung einer Übersicht beauftragt, die den Wissenstand und die Resultate der Versuche in der Schweiz der letzten 20 Jahre abbildet. Lieferobjekt dieses Projekts bildet der vorliegende Bericht.

Der erste Teil des vorliegenden Berichts soll dem Leser einen Überblick zum Thema Erschütterungen und abgestrahltem Körperschall geben. Erstens werden grundlegende Definitionen, Anregungsmechanismen und die Herausforderungen der Themenstellung behandelt. Dann wird auf die verschiedenen Beurteilungsgrössen und entsprechenden Normen eingegangen, sowie auf die in der Schweiz gültigen Gesetzen und Vorschriften samt bei der Projektplanung eingesetzte Prognosemodelle. Anschliessend werden die relevantesten internationalen Forschungsprojekte und SBB-internen Programme zu dieser Thematik kurz präsentiert und letztlich eine Übersicht der relevanten Einflussfaktoren gegeben.

Im zweiten Teil des Berichts wird auf die verschiedenen Minderungsmassnahmen zu den Erschütterungen und dem abgestrahlten Körperschall detailliert eingegangen und die Ergebnisse relevanter Versuche erläutert. Massnahmen für Streckengleise, inklusive Tunnel, am Fahrzeug, am Oberbau und am Übertragungsweg werden behandelt. Massnahmen im Bereich von Weichen und an den betroffenen Gebäuden werden nicht betrachtet.

ALLIANZ FAHRWEG

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung 3

1 Einleitung 11

2 Erschütterungen und Körperschall - Definitionen und Grundlagen 13

2.1 Definitionen 13

2.2 Betroffener Frequenzbereich 14

2.3 Anregungsmechanismen 15

2.3.1 Quasi-statische Anregung 15

2.3.2 Dynamische Anregungen 15

2.3.3 Typische Anregungsfrequenzen 16

2.4 Bedeutung von EKS 17

2.5 Situation in der Schweiz 18

2.6 Schwierigkeiten und Herausforderungen 18

3 Kennwerte für die Beurteilung von EKS 20

3.1 Erschütterungen 20

3.1.1 Frequenzbewertung 20

3.1.2 Messgrössen 21

3.1.3 Einheiten 22

3.1.4 Zeitbewertung 22

3.1.5 Beurteilungskennzahlen 23

3.1.6 Quantifizierung der Wirkung einer Massnahme – Einfügedämmung 27

3.2 Körperschall 27

4 Überblick nationaler Vorschriften für Neu- und Umbau 30

4.1 Situation Schweiz – Aktueller Stand 30

4.1.1 Schutz von Personen 30

4.1.2 Erschütterungseinwirkung auf Bauwerke 34

4.2 Erschütterungssanierung – Historie und aktueller Stand 36

5 EKS-Prognose 37

5.1 Allgemeines 37

5.2 Schweiz 39

5.2.1 VIBRA-1 Modell 40

5.2.2 VIBRA-2 Modell 43

5.3 Ausblick 45

6 Übersicht der relevanten Forschungsprojekte und Programme 46

6.1 International 46

6.1.1 RENVIB II 46

6.1.2 RIVAS 47
6.1.3 Cargovibes 47
6.1.4 Shift2Rail FINE-2 und SILVARSTAR 48
6.2 SBB-interne Projekte 48
7 Einflussfaktoren 49
8 Minderungsmassnahmen 52
8.1 Am Fahrzeug 52
8.1.1 Radunrundheiten 52
8.1.2 Unabgefederte Radsatzmasse 64
8.1.3 Federung 69
8.1.4 Reduzieren der Fahrgeschwindigkeit 72
8.2 Am Fahrweg 75
8.2.1 Schwingungsisolierung durch Veränderung des Masse-Feder-Systems 75
8.2.2 Unterschottermatten (UBM) 78
8.2.3 Schwellenbesohlung (USP) 84
8.2.4 Schienenbefestigungssysteme 93
8.2.5 Zwischenlagen 97
8.2.6 Masse-Feder-System (MFS) 100
8.2.7 Low Vibration Track with High Attenuation (LVT-HA) 104
8.2.8 Gleisinstandhaltung 108
8.2.9 Betonplatte/Betontrog/Bodenverfestigung 115
8.3 Am Übertragungsweg 122
8.3.1 Bodenschlitz 122
9 Nächste Schritte 132
10 Literaturverzeichnis 134
Anhang 141
A. Beurteilung nach DIN 4150-2 – Auswertungsschritte 142
B. Relevante Aspekte für die Modellierung und Messung und EKS – gemäss ISO 14837-1 Anhang A [8] 143
C. Antriebsanordnungen im Drehgestell – Schnittdarstellungen 149

ALLIANZ FAHRWEG

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: relevante Frequenzbereiche für verschiedene Immissionsarten im Schienenverkehr, im Vergleich mit dem Hörbereich des Menschen (aus [9]) 14
Abbildung 2: Übersicht der Anregungsmechanismen – aus [13] 16
Abbildung 3: Zusammenhänge Wellenlänge – Fahrgeschwindigkeit – Frequenz; Typische Frequenzbereiche – aus [14] 17
Abbildung 4: Frequenzbewertungskurven aus verschiedenen Normen in Vergleich für die Beurteilung von Erschütterungen in Gebäuden, ausgedrückt für Beschleunigungen – aus [16] ... 21
Abbildung 5: Nationale Grenzwerte zur Nachtzeit in Wohngebieten aus [16]. Die Definition von Maximum Value und Equivalent Value sind am Anfang des Kapitels erläutert 24
Abbildung 6: Gegenüberstellung des Modeltyps mit der akzeptablen Modelungenauigkeit nach Projektphasen aus [8] [27] 38
Abbildung 7: Schematische Darstellung des Abminderungsverhaltens von Erschütterungen [29] 40
Abbildung 8: Schematische Darstellung der Berechnung mittels Quell- und Transferspektren im VIBRA-2-Modell [33] 44
Abbildung 9: Emissionsspektrum einer Stichprobe von Re420-Individuen verglichen mit den beiden Lokomotiven der Testkomposition – aus D2.9 [51] 57
Abbildung 10: Schwingschnellenspektren 95%-Wert minus Medianwert im 8m-Abstand für die Flotten Domino, Flirt und ICN für v=100-120 km/h - aus D2.9 [51] 58
Abbildung 11: Verhältnis der Schwingschnellenspektren des 95%-Werts zum Medianwert bei den Vorbeifahrten in Ligerz bei v=60-70km/h im 8m-Abstand - aus D2.9 [51] 59
Abbildung 12: Verhältnis der Schwingschnellespektren des 95%-Werts zum Medianwert bei den Vorbeifahrten in Thun bei v=60-70km/h im 8m-Abstand - aus D2.9 [51] 59
Abbildung 13: Verhältnis von 2021 gegenüber 2015 für alle Fahrzeugtypen mit max. dynamischer Kraft pro Rad für 2021, Quartile 0%, 5%, 25%, 50%, 75%, 95%. Werte grösser 1 bedeuten Verschlechterung gegenüber 2015 aus [55] 61
Abbildung 14: Grafische Darstellung der Berechnung des nach unten korrigierten Eingriffswertes (dynamischer Beiwert) für die FV-Dosto Flotte mittels eines Vergleiches der maximalen Sensormesswerte und der dynamischen Beiwerte der IC-2000 Flotte – aus [56] 61
Abbildung 15: Laufleistung vor dem Auftreten von Unrundheiten im Vergleich – aus [60] 62
Abbildung 16: Laufleistung zwischen Reprofilierungen zwischen den Werkstoffen R7 und Shinkansen, nach Laufleistungsklassen – aus [60] 63
Abbildung 17: Ergebnisse der Parameterstudie für die dynamische Antwort. Dargestellt sind die Koeffizienten der linearen Regression zwischen Parameter und Erschütterungsamplitude im jeweiligen Oktavband. Dunkle Felder zeigen eine grosse Abhängigkeit des Parameters mit der Erzeugun von Erschütterungen, helle oder weisse Felder kleine bis keine Abhängigkeiten. X1: Wagenkastenmasse, X2: Masse des Drehgestellrahmens, X3: Radsatzmasse, X4: Achsabstand, X6: Primärsteifigkeit, weitere Parameter siehe D5.1 [3] 65
Abbildung 18: Einfluss der unabgefederten Massen. Oben: Schwingschnellenpegel, unten: Pegeldifferenz / Einfügedämmung – aus D5.6 [44] 67
Abbildung 19: Vorteile und Nachteile der drei meistverbreiteten Antriebskonfigurationen unter anderem aus [66] 68

Abbildung 20: Schwingschnellenspektrum für Vorbeifahrten in Pratteln im 32m-Abstand nach Zugskategorien – aus [69] 70
Abbildung 21: Schwingschnellenspektrum für Vorbeifahrten in Wichtrach für Regional- (oben) und Güterzügen (unten) bei verschiedenen Entfernungen – im Rahmen vom [34] gemessen 71
Abbildung 22: vrms für Durchfahrten von ICN-Kompositionen gemessen in Ligerz und dargestellt über Fahrgeschwindigkeit – aus [50] 73
Abbildung 23: vrms für Durchfahrten der Lokomotiven Re460, Re482/484 (TRAXX) und Re420 gemessen in Thun und dargestellt über Fahrgeschwindigkeit – aus [50] 73
Abbildung 24: Schwingschnellenamplituden in der Terzband von Durchfahrten dreier Re474/484-Individuen über Fahrgeschwindigkeit – aus [50] 74
Abbildung 25: Einfügen von elastischen Schichten im Oberbaubereich – aus [70] 75
Abbildung 26: Kraftübertragungsfunktion eines Einmassen-Schwingers (aus [18] – Kap 2.4) 76
Abbildung 27: Qualitativer Vergleich der erreichbaren Schwingungsminderung zwischen der Unterschottermatte (USM), des Masse-Feder-Systems (MFS) und elastisches Schienenlager (ESL/KES) aus [9] 77
Abbildung 28: Übersicht der Anwendungsfälle für Unterschottermatten mit jeweiligem Bereich für den Bettungsmodul – aus [72] 78
Abbildung 29: Installation einer UBM auf eine hydraulisch gebundene Tragschicht in Liestal (CH) 79
Abbildung 30: Mittelwerte der gemessenen Einfügungsdämmungen für UBM mit c_{dyn} 0.03/0.06/0.12 N/mm3 im Tunnel und auf der freien Strecke – aus [73] 80
Abbildung 31: Anwendungsgebiete von besohlten Betonschwellen bei der SBB – aus [82] 85
Abbildung 32: Dämmwirkung als Einfügeverstärkung für USPs mit k_{stat} 25MN/m bzw. c_{dyn} 0.037N/mm³ (□), 50MN/m bzw. 0.074N/mm³ (◦), 100MN/m bzw. 0.15N/mm³ (Δ), 200MN/m bzw. 0.29N/mm³ (+) in 16m- (links) und 32m-Abstand (rechts) vom Gleis – aus [86] 86
Abbildung 33: Gemessene Einfügungsdämmungen als Terzspektrum an 6 verschiedenen Standorten zwischen Messort und nebenstehenden Referenzpunkt in 8m- und 10m-Abstand vom Gleis – aus [87] 87
Abbildung 34: Durchschnittliche Einfügedämmung für alle Messpunkte (in Kurve, Übergangsbogen, Gerade) in Lengnau-Pieterlen im 8m-Abstand bei Verwendung des Referenzabschnitts auf dem gleichen Gleis (durchgezogene Linien) und bei Verwendung des Nachbargleis als Referenz (gestrichelte Linien) – aus [92] 88
Abbildung 35: Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Modellen von BAM und KU Leuven – siehe D3.2 [86] und Messungen in Lengnau-Pieterlen an den IC-Zügen – aus D3.8 [92] 89
Abbildung 36: Abminderung und Verstärkung der Schwingschnelle bei ICN-Durchfahrten in 8m-Abstand – aus [90]. Legende siehe Tabelle 13 90
Abbildung 37: Lärmzunahmen bei Strecken mit weichen USPs gegenüber unbesohlten Strecken im Vergleich zu ISVR Berechnungen für 90/220 MN/m und Regionalzug 100 und 160 km/h – aus [98] 92
Abbildung 38: Foto und Aufbau der Befestigung vom Typ "Kölner Ei". Skizze aus [9] 94
Abbildung 39: Schienenbefestigungssystem VANGUARD von Pandrol 95
Abbildung 40: Aufbau des Schienenbefestigungssystems PANDROL DFC aus RIVAS D3.5 [103]. Legende: (a) Gewindeinsert, (b) Anschlag, (c) elastische Unterlage, (d) und (e) äussere und

innere Kunststoffklammer, (f) Kunststoffisolator, (g) Grundplatte, (h) Bolzen, (i) Seitenisolatoren, (j) Zwischenlage 95
Abbildung 41: Auf der Versuchsstrecke getestete Konfigurationen der PANDROL DFC (aus [104]) 96
Abbildung 42: Einfügedämmung in 8m-Entfernung zwischen Referenzabschnitt und Testabschnitt, gemittelt für alle Zugsdurchfahrten, nach Fahrgeschwindigkeit – aus [104] 97
Abbildung 43: Einfügedämmung aus Simulationsergebnisse für die Durchfahrt eines Zuges des Typs «AGC» auf einem Gleis mit Zwischenlage mit k_{stat}=25 MN/m relativ zur Referenz mit k_{stat}=150 MN/m auf verschiedene Böden: steifer Halbraum (duchgezogene Linie), 2 mittelsteife Schichten auf steifem Halbraum (gestrichelte Linie - -) und 2 weiche Schichten auf mittelsteifem Halbraum (gestrichelte Linie . _) – aus D3.2 [86]..... 99
Abbildung 44: Ergebnisse der Abnahmemessungen – Bahnstrecke S-Bahn Zürich aus [110]... 102
Abbildung 45: gemessene Einfügedämmungen von verschiedenen MFS in der Schweiz, Deutschland und Österreich [109]..... 104
Abbildung 46: Aufbau des LVT-Systems [113]..... 105
Abbildung 47: Einfügungsdämmungsspektren des LVT-HA (Section B und Section C) im Vergleich zum Schotteroberbau. Die gestrichelte Linie ist das durch Sonneville berechnete Spektrum. [116] 106
Abbildung 48: Differenzspektren LVT-HA zu LVT-Standard für nahes Gleis Richtung Oerlikon (energ. Mittelung der 3 Sensoren) 108
Abbildung 49: Definition der Gleislagefehler – aus [67] 109
Abbildung 50: Längshöhenfehler vor (an 3 verschiedenen Terminen) und nach dem Stopfen. (a) Standardabweichung. (b) Amplitudenpegel linke Schiene. (c) Amplitudenpegel rechte Schiene – aus D2.8 [125]..... 112
Abbildung 51: Einfügedämmung aufgrund des Stopfens bei unterschiedlichem Rollmaterial, gemessen im 16m-Abstand – aus D2.8 [125] 113
Abbildung 52: Standardabweichung des Längshöhenfehlers in Furet, gleitende Mittelung über 50m. Messpunkt R war die vorgesehene Referenz, Messpunkt C an einem Isolierstoss und Messpunkt D an einem Bahnübergang – aus D2.8 [125]..... 113
Abbildung 53: Einfügedämmungen im 4m-, 8m- und 16m-Abstand bei Güterwagendurchfahrten. (a) Messquerschnitt C (Isolierstoss) , (b) Messquerschnitt D (Bahnübergang) – aus D2.8 [125] 114
Abbildung 54: Eigenschaften der untersuchten Bodenverfestigung – aus D4.4 [128] 115
Abbildung 55: Einfügedämmung (vertikal) der Bodenversteifung für eine Linienquelle in 8m-, 16m-, 24m-, 32m-Abstand für den Standort Horstwalde. Ergebnisse des Modells der KU Leuven in blau, und des ISVR in rot – aus D4.4 [128]..... 116
Abbildung 56: Einfluss der Bodeneigenschaften auf die Einfügedämmung der Bodenverfestigung bei den Standorten Horstwalde (steif), Lincent (weich), Furet (sehr weich) in 16m- (blau), 24m- (rot), 32m-Gleisabstand (pink) – aus D4.4 [128]. 117
Abbildung 57: Wirkung der Bodenverfestigung in Altheim, Sinzheim und Hausen – aus [126] ... 118
Abbildung 58: Wirkung der Betonplatte von drei Versuchen in Deutschland – aus [126] 118
Abbildung 59: Gemessene Einfügedämmungen an den sechs Standorten mit Betontrog+UBM der Bodenkorrekturen [129]..... 119
Abbildung 60: Eigenschaften der untersuchten Betonplatte – aus D4.4 [128] 120

Abbildung 61: Einfügedämmung (vertikal) der Betonplatte für eine Linienquelle in 8m-, 16m-, 24m-, 32m-Abstand für den Standort Horstwalde. Ergebniss des Modells der KU Leuven in blau, und des ISVR in rot – aus D4.4 [128]. 121
Abbildung 62: Einfluss der Bodeneigenschaften auf die Einfügedämmung der Betonplatte bei den Standorten Horstwalde (steif), Lincent (weich), Furet (sehr weich) in 16m- (blau), 24m- (rot), 32m-Gleisabstand (pink) – aus D4.4 [128]. 122
Abbildung 63: Dämmwirkung von verschiedenen offenen Bodenschlitzen – aus [131] 123
Abbildung 64: Dämmwirkungen Betonschlitz in Japan, Mittelwert gemessen 1 bis 5 m hinter Schlitz – aus [131] 124
Abbildung 65: Einfügedämmungspektren der Stahlspundwand in Furet im 8m (schwarz), 16m (rot), 32m (blau), 64m (grün) Abstand vom Gleis, links für die Passagierzüge des Typs X31 mit einer durchschnittlichen Fahrgeschwindigkeit von (a) 75km/h (b) 81km/h , (c) für Güterzügen mit einer durchschnittlichen Fahrgeschwindigkeit von 63km/h aus [134] 125
Abbildung 66: Berechnete (durchgezogene) bzw. gerechnete (gestrichelte Linie) Einfügedämmspektren des Bodenschlitzes in El Realengo für Durchfahrten mit Zügen des Typs S599 mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 119km/h. Der Schlitz befindet sich 16.2m von Gleismitte. Aus [134] 126
Abbildung 67: Terzbandspektren der gemessen Schwingschnelle in der Liegenschaft beim Bodenschlitz in Bern Fischermätteli – Vor (Rosa) und nach (blau) dem Schleifen sowie nach dem Bau des Bodenschlitzes (grün) im Wohnzimmer (MP1 – (a)) und am Fundament (MP2 – (b)) – aus [137] 128
Abbildung 68: Terzbandspektren der Schwingschnelle ca. 20-30cm vor und hinter dem Schlitz auf Höhe des Herzstücks - aus [137] 129
Abbildung 69: Differenzspektren der Messungen 2006/2002 mit Berücksichtigung des Korrekturfaktors für das Rollmaterial – aus [136] 130
Abbildung 70: Beurteilung nach DIN 4150-2 – Auswertungsschritte 142
Abbildung 71: Einzelachsquerantrieb, auch Tatzlagerantrieb genannt, unabgefederte «achsreitende» Ausführung [67] 149
Abbildung 72: Einzelachsquerantrieb, teilabgefederte Ausführung [67] 150
Abbildung 73: Einzelachsquerantrieb, vollabgefederte Ausführung [67] 150

ALLIANZ FAHRWEG

Abkürzungsverzeichnis

AB-EBV	Ausführungsbestimmungen zur Eisenbahnverordnung
AC-Rail	Asphalt Concrete – Rail
BAFU	Bundesamt für Umwelt
BAV	Bundesamt für Verkehr
BEKS	Weisung für Beurteilung von Erschütterungen und Körperschall bei Schienen-verkehrsanlagen
BLS	BLS AG
EKS	Erschütterungen und Körperschall
EMBE	Empfehlungen für Mess- und Berechnungsverfahren für Erschütterungen
EVU	Eisenbahnverkehrsunternehmen
FF	Feste Fahrbahn
FFT	Fast Fourier Transformation
GS	Generalsekretariat
HMT	Heissmischtragschicht (neue Bezeichnung: AC-Rail)
IC	InterCity
ICE	InterCity Express
IG	Insertion Gain = Einfügeverstärkung
IL	Insertion Loss = Einfügedämmung
ISB	Infrastrukturbetreiberin
LVT	Low-Vibration-Track
LVT-HA	Low-Vibration-Track High Attenuation
MFS	Masse-Feder-System
NBS	Neubaustrecke (Bern-Olten)
PSD	Power Spectral Density / Spektrale Leistungsdichte
RCF	Rolling Contact Fatigue = Rollkontaktermüdung
RMS	Root-Mean-Square
SBB	Schweizerische Bundesbahnen
SOB	Schweizerische Südostbahn AG
SOK	Schienenoberkante
TDR	Track Decay Rate = Gleisabklingrate
UBM / USM	Under Ballast Mat = Unterschottermatte
USG	Umweltschutzgesetz
USP	Under Sleeper Pad = Schwellensohle/Schwellenbesohlung
UVEK	Eidgenössische Department für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung
VDV	Vibration Dosis Value
VSE	Verordnung zum Schutz gegen Erschütterungen
WIP	Wave Impeding Block
WP	Work Package

1 Einleitung

Schienenfahrzeuge erzeugen Schwingungen, die durch den Boden übertragen werden und in Gebäuden entlang von Bahnstrecken als Vibrationen und/oder Lärm wahrgenommen werden können. Sie werden als Erschütterungen und abgestrahlten Körperschall bezeichnet. Diese können als störend oder belästigend empfunden werden und auf Dauer in schwerwiegenden Fällen gesundheitsschädlich sein.

Aufgrund der immer dichteren Bebauung in Bahnstreckennähe und der Schienenverkehrszunahme hat das Thema in der Schweiz in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen: Sowohl bei den Anwohnern, die teilweise aufgrund der durchgeführten Lärmsanierung die Erschütterungen stärker wahrnehmen, als auch beim Gesetzgeber, der den Schutz gegen Erschütterungen im Umweltschutzgesetz vorgeschrieben hat, aber dafür bisher noch keine Verordnung erlassen hat.

Auch im Ausland lässt sich diese Tendenz erkennen, sei es im Austausch mit anderen Infrastrukturbetreibern, oder an den verschiedenen internationalen Forschungsprojekten zu diesem Thema in den letzten 25 Jahren. Alle inländischen und ausländischen Bahnen sind oder werden möglicherweise von dieser zunehmenden Aufmerksamkeit betroffen.

Die SBB hat sich seit den 80er Jahren an mehreren internationalen Forschungsprojekten beteiligt und hat zugleich selber unterschiedliche Minderungsmassnahmen untersucht und getestet. Dadurch wurde das Verständnis der involvierten Mechanismen und Einflüsse erhöht sowie die Erkenntnisse über die erreichbaren Dämmleistungen und Begrenzungen dieser Massnahmen gesteigert. Jedoch existiert keine einfach zugängliche Übersicht zu den erzielten Resultaten aus den letzten 20 Jahren in der Schweiz.

Aus diesen Gründen hat die Allianz Fahrweg ein Projekt veranlasst, das diese Übersicht und den Wissensstand in Form eines State-of-the-art Berichts verschaffen soll. Lieferobjekt dieses Projekts bildet der vorliegende Bericht.

Verschiedene Arbeitsgruppen und Forschungsprojekte haben sich schon mit dem zu diesem Zeitpunkt relevanten Stand der Technik befasst. Erwähnenswert sind folgende Referenzen:

- Railway induced vibration – State of the art report, von der UIC, aus 2017 [1]
- State of the art review of mitigation measures on track (D3.1), RIVAS-Projekt, aus 2011 [2]
- Influence of Rolling Stock State-of-the-Art Survey (D5.1), RIVAS-Projekt, aus 2011 [3]
- Alle Lieferobjekte der Phase 1 des Projekts RENVIB II, aus 1998 [4] [5] [6]
- State-of-the-art and Concept of the vibration prediction tool (D1.1), SILVARSTAR-Projekt, aus 2021 [7]

Der erste Teil des vorliegenden Berichts soll dem Leser einen Überblick zum Thema Erschütterungen und abgestrahlten Körperschall geben. In Kapitel 2 werden grundlegende Definitionen, Anregungsmechanismen und die Herausforderungen der Themenstellung behandelt. Auf die verschiedenen Beurteilungsgrössen und entsprechenden Normen wird in Kapitel 3 eingegangen. Kapitel 4 befasst sich mit den in der Schweiz gültigen Gesetzen und Vorschriften bei Umbau- oder Neubauprojekten, inklusive einem Einblick in die historische Entwicklung zur Erschütterungssanierung. Kapitel 5 beschäftigt sich mit den Prognosemodellen von Erschütterungen und Körperschall. In Kapitel 6 werden die wichtigsten internationalen Forschungsprojekte und SBB-internen Programme zu dieser Thematik kurz vorgestellt, die zur Verbesserung des Wissensstands über Minderungsmassnahmen beigetragen haben. Kapitel 7 gibt eine tabellarische Übersicht der relevanten Einflussfaktoren.

Weitere Informationen beziehungsweise die Ausnutzung des Potenzials einiger dieser Einflussfaktoren zur Verminderung von Erschütterungen und abgestrahltem Körperschall werden im zweiten Teil des Berichts (Kapitel 8) behandelt. Dabei wird zwischen Minderungsmassnahmen am Fahrzeug, am Oberbau und am Übertragungsweg unterschieden. Es werden nur Massnahmen für Streckengleise inklusive Tunnel aber exklusive Weichen geschildert. Für jede Massnahme wird ihre Funktionsweise erläutert, Erkenntnisse und Resultate dargestellt, vorwiegend aus Versuchen in der Schweiz und falls sinnvoll aus internationalen Projekten.
Massnahmen an Gebäuden, worauf Bahninfrastrukturbetreiber normalerweise keinen Einfluss haben, werden in diesem Bericht nicht weiter betrachtet.

2 Erschütterungen und Körperschall - Definitionen und Grundlagen

2.1 Definitionen

Fahrende Züge erzeugen mechanische Schwingungen, die entweder als Vibrationen durch den Boden oder als Schall durch die Luft übertragen werden.
In Gleisnähe können diese Vibrationen für den Menschen wahrnehmbar sein. Sie breiten sich wellenförmig im Erdreich aus und können via das Fundament Gebäudeelemente zum Schwingen bringen.

Erschütterungen:
Schwingungen in Wänden, Böden und Decken, die als ein „Vibrieren“ wahrgenommen werden, bezeichnet man als Erschütterungen (auf Englisch ground-borne vibration).

Luftschall:
Beim Luftschall (air-borne noise) breiten sich die Druckschwankungen vom Emissionsort in der umgebenden Luft aus. Im Frequenzbereich von 20 Hz bis 20 kHz kann der Schall durch das menschliche Gehör wahrgenommen werden. Luftschall wird in diesem Bericht nicht weiter betrachtet.

Körperschall:
Im Fall vom Körperschall (structure borne noise) breiten sich die Wellen zuerst in festen Körpern oder an deren Oberfläche aus und werden dann durch eine schwingende Struktur in die Luft als hörbarer Schall abgestrahlt.

Abgestrahlter Körperschall:
Auf Englisch existiert die noch spezifischere Bezeichnung "ground borne noise" für den abgestrahlten Körperschall. Es sind dies die Erschütterungen, die durch die Wände, Böden und Decken im Gebäude von festen Strukturen als hörbarer Schall emittiert wird. Ein Synonym von abgestrahltem Körperschall ist auch sekundärer Luftschall (re-radiated noise). Im Folgenden wird der Begriff Körperschall synonym für abgestrahlten Körperschall verwendet. Schall von z.B. Klirren von Gläsern oder das Klappern von Bildern an einer vibrierenden Wand gelten nicht als abgestrahlter Körperschall.

Diese Definitionen wurden für den Anwendungsfall des Schienenverkehrs in der Norm ISO 14837-1:2005 [8] erläutert.

Der Körperschall kann teilweise durch den direkten, von aussen herkommenden Luftschall überlagert werden. In diesem Fall kann es schwierig sein, beide voneinander zu unterscheiden.

Im nachfolgenden werden Erschütterungen und Körperschall mit EKS abgekürzt.

2.2 Betroffener Frequenzbereich

Erschütterungen und abgestrahlter Körperschall unterscheiden sich nicht nur in der Art ihrer Wahrnehmung, sondern auch im relevanten Frequenzbereich, in dem sie auftreten.

Der relevante Frequenzbereich für Erschütterungen wird, je nach Literaturquelle, von 1 (4) Hz bis (80) 100 Hz definiert. Für den abgestrahlten Körperschall wird der Bereich zwischen 20 bis 250 (350) Hz angegeben.

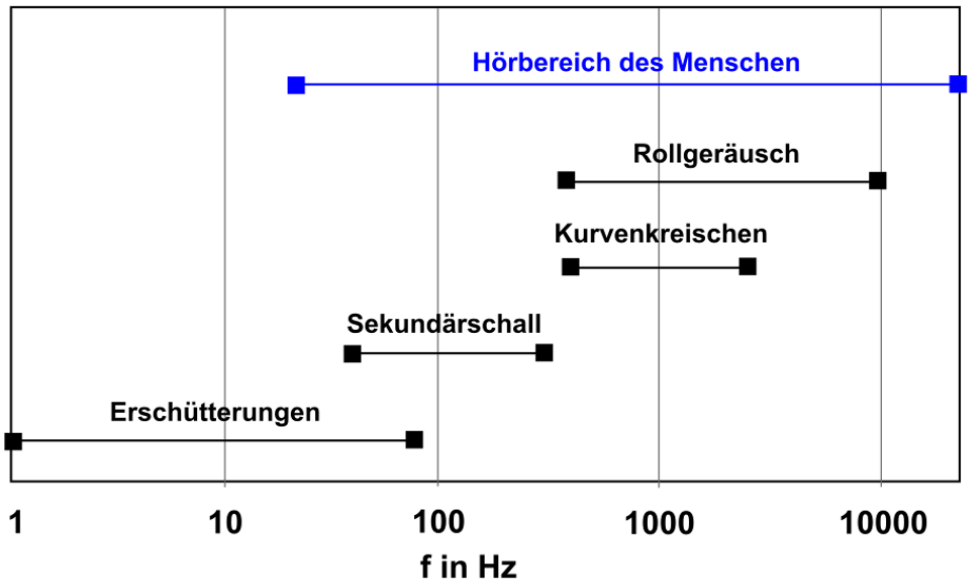


Abbildung 1: relevante Frequenzbereiche für verschiedene Immissionsarten im Schienenverkehr, im Vergleich mit dem Hörbereich des Menschen (aus [9])

Die relevanten Frequenzbereiche beider Phänomene überlappen sich teilweise und es ist möglich, dass der Mensch nicht unterscheiden kann, ob er die Schwingung hört oder diese als Ganzkörperschwingung wahrnimmt.

Abhängig vom Anregungsmechanismus, den Übertragungseigenschaften des Erdreichs und der Eigenfrequenzen der Gebäudebauteilen werden unterschiedliche Frequenzen angeregt, welche stärker oder schwächer durch den Boden bis ins Gebäude übertragen werden. Infolgedessen kann eins der beiden Phänomene je nach diesen Eigenschaften mehr hervorgerufen werden.

Das Gleisbett wirkt als Tiefpassfilter und dämpft die Frequenzen im oberen Teil des für EKS relevanten Frequenzbereichs. Aufgrund von Effekten wie der Dämpfung des Bodens ändert sich der Verlauf des Frequenzspektrums mit der Entfernung, und je nach der Beschaffenheit des Bodens können bei grösseren Entfernungen niedrigere Frequenzen dominieren [8].

Die Eigenfrequenzen von Gebäudebauteilen hängen von deren individueller Konstruktion ab, liegen aber vorwiegend zwischen 10 und 60 Hz [10].

Die relevanten Frequenzbereiche der verschiedenen Anregungsmechanismen werden im folgenden Kapitel 2.3 präsentiert.

2.3 Anregungsmechanismen

Erschütterungen und Körperschall entstehen am Rad-Schiene-Kontaktpunkt und breiten sich von dort durch das Gleisbett in den Untergrund aus. Man unterscheidet zwischen der quasi-statischen Anregung und den dynamischen Anregungsmechanismen.

2.3.1 Quasi-statische Anregung

Die Achslasten bewegen sich entlang der Schiene mit der Fahrgeschwindigkeit. Aufgrund der Last erfährt die Schiene beim Überrollvorgang eine schwankende Einsenkung in der Nähe des Rad-Schiene-Kontaktpunkts, die sich mit der Fahrgeschwindigkeit verschiebt. So werden das Gleis und der Boden zum Schwingen gebracht. An einem festen Beobachtungspunkt entlang der Strecke ist diese Anregung periodisch gemäss der Achs-, Drehgestell- oder Fahrzeugabstände und verursacht bei konventionellen Geschwindigkeiten tieffrequente Schwingungen im Nahfeld, die üblicherweise durch Menschen in benachbarten Gebäuden nicht spürbar sind. Bei Hochgeschwindigkeitsstrecken oder weichen Böden kann diese Anregung jedoch für Immissionen in Gebäuden relevant werden [11] [1].

2.3.2 Dynamische Anregungen

Die Mechanismen der dynamischen Anregungen kann man wie folgt unterteilen [12]:

Parametrische Anregung
Diese ist auf Steifigkeitsschwankungen des Oberbau-Systems zurückzuführen. Die örtliche Steifigkeitsänderung führt beim Überrollen des Rades zu einer schwankenden Einsenkung der Schiene.
Diese Anregung tritt periodisch mit der Schwellenfachfrequenz aufgrund der diskreten Lagerung der Schienen auf den Schwellen auf, oder stochastisch bei einer Änderung der Bettungssteifigkeit. Beispiele dafür sind ein Wechsel zwischen Schottergleis und fester Fahrbahn, der Übergang vom Erdreich zu einer Brücke oder eine Änderung der Schottersteifigkeit aufgrund von unterschiedlichen Stopfzuständen.

Weg- und Geschwindigkeitsanregung

Geometrische Formabweichungen an der Rad- und an der Schienenfahrfläche führen zu dynamischen Kontaktkräften, welche das Rad-Schiene-System zu Schwingungen anregen.
Zu diesen Formabweichungen zählen:

- Periodische Unrundheit des Rades
- Einzelfehler an der Radfläche (Flachstellen, Ausbröckelungen, usw.)
- Riffeln auf der Schienenoberfläche
- periodische Änderungen der Gleislage
- Einzelne Irregularitäten der Schiene wie Weichenherzstücke, Schienen-Schweissstellen, Isolierstösse

Abbildung 2 aus [13] fasst diese Anregungsmechanismen für die Gleisdynamik im Allgemeinen zusammen. Die Form der entsprechenden Differentialgleichung ist in der ersten Spalte angegeben.

	periodisch oder quasiperiodisch	transient	regellos
Fremderregung durch Schienen-Irregularitäten $\mathbf{M\ddot{u} + D\dot{u} + Ku = p}(t)$	Riffeln, Wellen	Bogeneinfahrt, Weichen, Wannen, Schleuderstellen	Beschreibung durch Leistungs-dichtespektren
Fremderregung durch Radirregularitäten $\mathbf{M\ddot{u} + D\dot{u} + Ku = p}(t)$	exzentrische Räder, polygonale Räder, Flachstellen	–	–
Parameter-erregung $\mathbf{M}(t)\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{D}(t)\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}(t)\mathbf{u} = \mathbf{p}(t)$	Schwellen-überrollung	Hohllagen, Brückenauffahrt, Übergänge	keine Erkenntnisse
Selbst-erregung $\mathbf{M\ddot{u} + D\dot{u} + Ku = 0}$	höherfrequente sinuslaufähnliche Bewegungsvorgänge	keine Erkenntnisse	keine Erkenntnisse

Abbildung 2: Übersicht der Anregungsmechanismen – aus [13]

2.3.3 Typische Anregungsfrequenzen

Unabhängig der Ursache kann die Frequenz einer periodischen Anregung anhand folgender Gleichung ermittelt werden:

$$f = \frac{v}{x} \tag{1}$$

Dabei ist v die Fahrgeschwindigkeit [m/s] und x die Wellenlänge der periodischen Störung [m]

Folgende Abbildung 3 zeigt den Zusammenhang von Frequenz und Fahrgeschwindigkeit für typische Störungen.

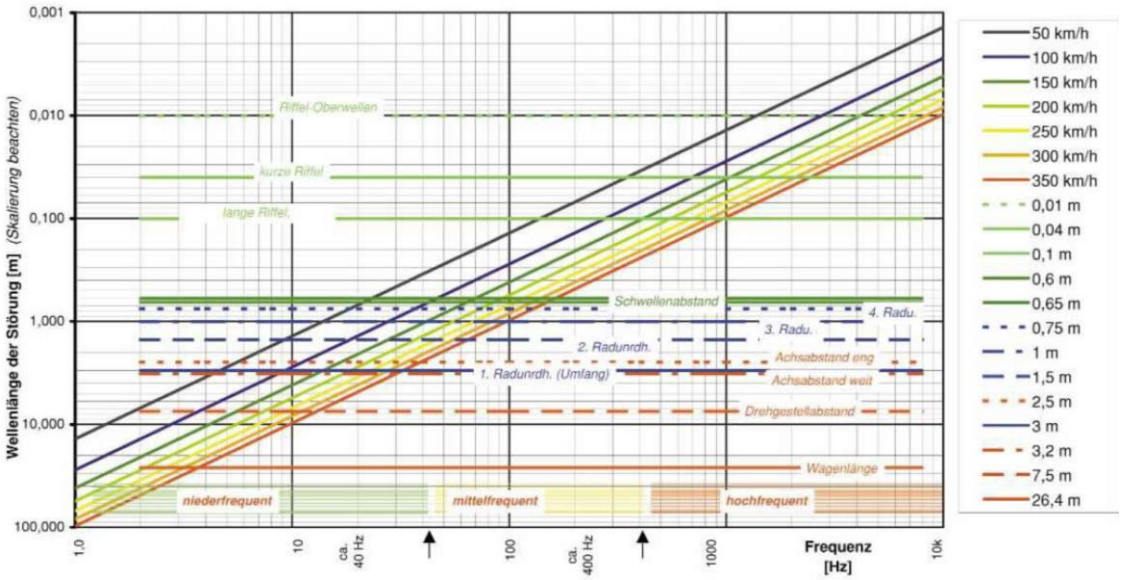


Abbildung 3: Zusammenhänge Wellenlänge – Fahrgeschwindigkeit – Frequenz; Typische Frequenzbereiche – aus [14]

Überlagern sich mehrere Phänomene mit der gleichen Wellenlänge bzw. Anregungsfrequenz mit einer Eigenfrequenzen des Fahrzeugs, des Oberbau-Systems oder des kombinierten Fahrzeug-Oberbau-Systems kann dies zu erhöhten Schwingungsamplituden führen.
Dieses Verhalten hängt ab von den Eigenschaften des Fahrzeug-Oberbau-Systems insbesondere von den Massen der Schienen, Schwellen, Schotter und unabgefederten Fahrzeugmassen sowie von den Vertikalsteifigkeiten und Dämpfungen der Schienenbefestigungen, Zwischenlagen, USP oder UBM (sofern vorhanden). (siehe dazu auch Kapitel 8.2.1).

2.4 Bedeutung von EKS

Abhängig von ihrer Stärke können Erschütterungen und abgestrahlter Körperschall verschiedene Auswirkungen haben. Bei kleinen Amplituden sind Erschütterungen möglicherweise für Menschen gar nicht wahrnehmbar. Umgekehrt ist Körperschall bei kleinen Amplituden meistens schon hörbar.

Höhere Erschütterungs-Amplituden können entweder im ganzen Körper oder z.B. nur mit den Händen, je nach Lage, in der man sich befindet, wahrgenommen werden. Wenn Schwingungen wahrnehmbar sind, insbesondere wenn die Quelle unbekannt ist, können sie Stress und Schlafstörungen bewirken, und dadurch mögliche langfristige Auswirkungen wie Herzkreislaufstörungen verursachen [1] [15]. Auch indirekte Effekte von Erschütterungen wie ein wackeliges Licht und wackelnde Bildschirme können belästigend wirken.

Es gibt häufig Bedenken, dass der Bahnverkehr zu Gebäudeschäden wie zum Beispiel Rissbildung führen könnte. Jedoch werden die normativ angenommenen Schwingstärken, die Gebäudeschäden verursachen können, durch den Bahnbetrieb bei weitem nicht erreicht. Daher sind Rissbildungen an bzw. in Gebäuden vielmehr auf Zwängungen, Fundationsprobleme, Grundwassersenkungen, Erdbeben, Temperaturschwankungen und Ähnliches zurückzuführen [10]. In der Schweiz ist bis heute kein Fall bekannt, bei dem Gebäudeschäden durch Bahnerschütterungen verursacht worden sind.

2.5 Situation in der Schweiz

Aufgrund der Entwicklung in der Schweiz zentral gelegene Gebiete dichter zu besiedeln und mit gutem Anschluss an den öffentlichen Verkehr zu versehen, werden Wohnhäuser immer näher an die Bahnstrecken gebaut. Zudem wird das Angebot im Schienenverkehr laufend erweitert und somit nimmt die Anzahl der Zugsdurchfahrten zu. In gleisnahen Gebäuden können Immissionen entstehen, die für den Menschen störend wahrgenommen werden können.

Stand heute hat der Infrastrukturbetreiber (ISB) bei Um- und Ausbauten an der bestehenden Bahnanlage eine EKS Beurteilung durchzuführen, um eine allfällige Verschlechterung zu identifizieren und Minderungsmassnahmen bei der Bauplanung einzuleiten. Beim Bau neuer Gebäude in Gleisnähe erfolgt die gleiche Beurteilung aber mit strengeren Grenzwerten für die Bauherrschaft und Minderungsmassnahmen sind gebäudeseitig einzuplanen. Eine detaillierte Beschreibung dieser Vorschriften sind in Kapitel 4.1 präsentiert. Für bestehende zu sanierende Bahnanlagen existieren in der Schweiz bis dato keine Grenzwerte und keine Sanierungsverordnung.

Mit der ersten Etappe der Lärmsanierung wurden u.a. Lärmschutzwände und Schallschutzfenster installiert, was teilweise zu einer Verschärfung der Wahrnehmung des Körperschalls führen kann. Der Körperschall wird vom Luftschall am Immissionsort nicht mehr überlagert und wird dadurch besser wahrgenommen [16].

2.6 Schwierigkeiten und Herausforderungen

Zur Eindämmung von Lärm sind kosteneffiziente und fast universal einsetzbare Lösungen vorhanden (Schallschutzwände und -fenster). Für den Schutz gegen Erschütterungen und abgestrahlten Körperschall ist das nicht der Fall.

Wie in Kapitel 3.3 erläutert, entsteht die Anregung im Rad-Schiene-Kontaktpunkt und wird sowohl vom Fahrzeug als auch vom Oberbau beeinflusst. Auch die Überlagerung von mehreren Anregungsmechanismen sind möglich. Je nach Mechanismen entstehen verschiedene Wellentypen, die sich im Erdreich unterschiedlich ausbreiten. Auch die Antwort der Gebäude bzw. von Gebäudeteilen kann stark variieren: je nach Aufbau und eingesetzte Materialien bzw. Eigenfrequenzen der Struktur. Diese Variabilität muss die bei der Massnahmenauswahl berücksichtigt werden.

Auch die lokale Variabilität in den Bodeneigenschaften macht die Behandlung von EKS schwierig: der Boden ist keinesfalls homogen, sondern aus verschiedenen geologischen Schichten unterschiedlicher Eigenschaften aufgebaut. Eine wichtige Eigenschaft ist die Bodensteifigkeit, die den Frequenzinhalt der übertragenen Schwingungen beeinflusst. Diese potenziell sehr lokale Variabilität erschwert einerseits grossflächige EKS-Prognosen, welche die konkrete örtliche Situation abbilden müssen. Anderseits ist die Entwicklung von Minderungsmassnahmen in der Ausbreitung schwierig, weil sie möglicherweise nur bei bestimmten Bodeneigenschaften befriedigend wirken oder sich eventuell nur auf Körperschallimmissionen positiv auswirken und gegen Erschütterungen wirkungslos sind oder sogar negativ ausfallen.

Bei der Schallübertragung durch die Luft existiert keine vergleichbare Variabilität.

Das heisst im Umkehrschluss, dass für jede mögliche Bekämpfungsmassnahme die Anwendungsbedingungen spezifiziert werden müssen. Um diese definieren und untersuchen zu können, sind zuverlässige Modelle und Messmethoden notwendig.

3 Kennwerte für die Beurteilung von EKS

Stand 2022 existieren für die Erschütterungen und den abgestrahlten Körperschall weder international anerkannte Grenz- oder Richtwerte noch eine einheitliche Norm zu ihrer Beurteilung. Aus diesem Grund haben verschiedene Länder ihre eigenen Normen und/oder Vorschriften verfasst. Die unterschiedlichen Ansätze bei den Beurteilungskennwerten versuchen zwar Erkenntnisse zur Wahrnehmung und Belästigung bei Menschen zu berücksichtigen, machen aber Vergleiche von Mess- und Simulationsergebnissen komplexer. Dies betrifft auch die uneinheitlichen Messbedingungen.

Die Normenreihe ISO 14837 versucht - unter anderem mit den Teilen 1 aus 2005 und 31 aus 2017 – diese Unterschiede zu vereinheitlichen.

Das Work Package 1 des RIVAS-Projekts hat sich unter anderem mit dieser Thematik befasst, um die Leistung der in den anderen WP definierte Minderungsmassnahmen zu quantifizieren.

3.1 Erschütterungen

3.1.1 Frequenzbewertung

Die menschliche Empfindlichkeit bezüglich Schwingungen ist amplituden-, frequenz- und richtungsabhängig. Ebenfalls spielt die Häufigkeit und die Dauer des Auftretens eine Rolle sowie die Körperposition (sitzend, stehend, liegend), der Gesundheitszustand, die Gewöhnung, die Tätigkeit des Empfängers (ausruhen, lesen, reden, etc.) und die Einstellung zum Erschütterungserzeuger.

In der ISO 2631-1:1997 *Mechanische Schwingungen und Stöße - Bewertung der Einwirkung von Ganzkörper-Schwingungen auf den Menschen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen* wurden Frequenzbewertungskurven für die Bewertung von Schwingungen im Hinblick auf Schwingungswahrnehmung, -komfort und Reisekrankheit definiert; dies nicht spezifisch für Anwendungen aus dem Schienenverkehr, sondern im Allgemeinen für Fahrzeuge und Maschinen. Die spezifizierten Bewertungskurven sind auf Beschleunigungen anwendbar und sind richtungsabhängig (parallel oder senkrecht zur Körperlängsachse). Sie haben folgende Bedeutung: sinusförmige Schwingungen, deren RMS-Werte den festgelegten Kurven entsprechen, werden ungefähr als gleich stark empfunden.

Der Teil 2 der gleichen Normenreihe *Bewertung der Einwirkung von Ganzkörper-Schwingungen auf den Menschen - Teil 2: Schwingungen in Gebäuden (1 Hz bis 80 Hz)* spezifiziert eine Bewertungskurve W_m, die richtungsunabhängig ist, um der Tatsache Rechnung zu tragen, dass Menschen sich in Gebäuden nicht immer gleich aufhalten.

Diese Bewertungskurve bzw. dieser Filter W_m (für Beschleunigungssignale) werden in verschiedenen nationalen Normen für die Bewertung von Erschütterungen herangezogen. Die

Deutsche DIN 4150-2 verwendet die Frequenzbewertung K_b aus der DIN 45669-1 für die Schwinggeschwindigkeit. Werden diese beiden Bewertungen W_m und K_b für die gleiche Schwinggrösse umgewandelt, haben sie einen vergleichbaren Verlauf. Nur die britische Norm BS6472-1 basiert auf den richtungsabhängigen Bewertungen W_b und W_d.

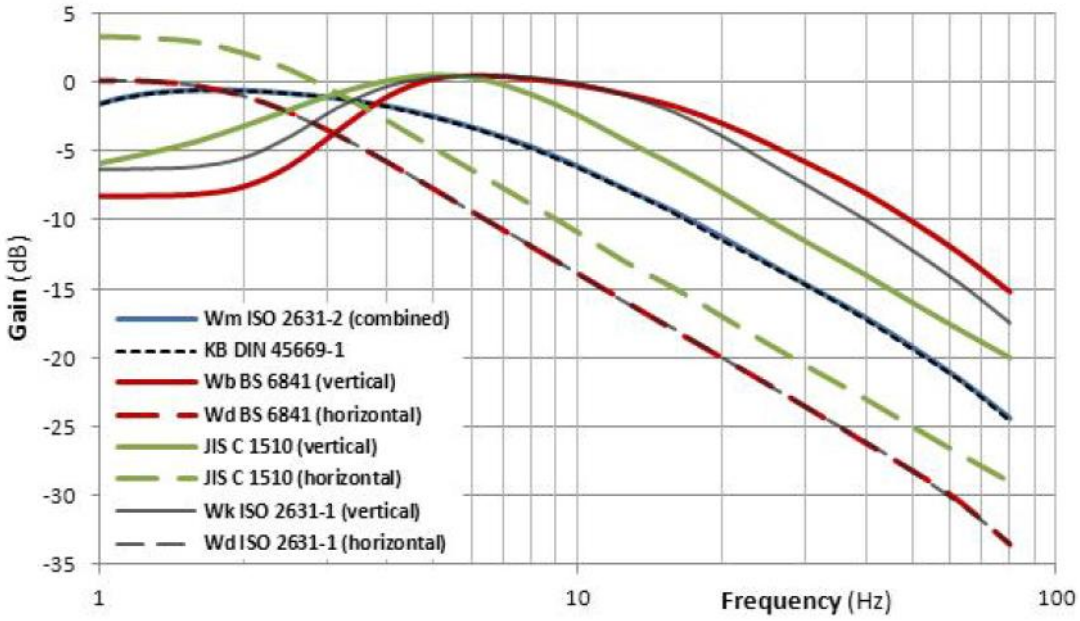


Abbildung 4: Frequenzbewertungskurven aus verschiedenen Normen in Vergleich für die Beurteilung von Erschütterungen in Gebäuden, ausgedrückt für Beschleunigungen – aus [16]

3.1.2 Messgrössen

Es ist messtechnisch irrelevant, ob Erschütterungen in Beschleunigungen oder Schwinggeschwindigkeiten ausgedrückt und gemessen werden, sofern der relevante Frequenzbereich durch den verwendeten Sensor erfasst wird, da man diese Signale über Integration oder Ableitung ineinander überführen kann. Da aber die Schwingungswahrnehmung des Menschen im Frequenzbereich von 8 Hz bis 80 Hz der Schwinggeschwindigkeit folgt (gemäss der Bewertungskurven), sind bei Schwinggeschwindigkeitsmessungen aufgrund der geringeren Anpassungen durch die Filter auch kleinere Messfehler gegeben, weshalb Schwinggeschwindigkeitsmessungen bevorzugt werden [17].

3.1.3 Einheiten

Die Messgrössen wie Beschleunigungen und Schwinggeschwindigkeiten und die damit verbundenen Indikatoren können gemäss dem internationalen Einheitensystem ausgedrückt werden. Da es sich bei EKS um Schwinggrössen handelt, wird auch gern Dezibel verwendet. Die Definition dieser Pegel lautet wie folgt:

$$L_a = 20log_{10}\frac{a}{a_0} \quad (2)$$

$$L_v = 20log_{10}\frac{v}{v_0} \quad (3)$$

Dabei kommen folgende Bezugswerte zum Einsatz:

- Für den Beschleunigungspegel: $a_o = 10^{-6}$ m/s^2 gemäss ISO 1683:2015, d.h. 100 dB = 0.1 m/s^2
- Für den Schwinggeschwindigkeitspegel: historisch war $v_o = 5.10^{-8}$ m/s (100 dB = 5 mm/s), heute wird meist $v_o = 10^{-9}$ m/s (100 dB = 0.1 mm/s) gemäss ISO 1683:2008 verwendet.

Im Gegensatz zur Definition des Schallpegels entsprechen diese Bezugswerte keinen Wahrnehmungsschwellen.

3.1.4 Zeitbewertung

Analog zum Schalldruck kommen bei der Bestimmung des gleitenden Effektivwerts eine exponentiell zeitabhängige Bewertung zum Zuge. Bei Erschütterungen kommen die Bewertung «FAST» mit einer Zeitkonstante τ = 0.125 s und «SLOW» mit τ = 1 s zum Einsatz, wobei Letztere in den meisten Normen und Vorschriften angewandt wird.

Die Zeitkonstante τ = 1 s ist die kürzest mögliche Mittelungsdauer, die eine korrekte Effektivwertberechnung für eine 1 Hz-Schwingung ermöglicht. Die Anwendung der in der Akustik üblichen „FAST“-Zeitbewertung mit τ = 0,125 s ergibt einen stark oszillierenden Pegel. Bei der tiefsten spürbaren Frequenz von 1 Hz sind 0.125 s gerade noch ein Achtel einer Schwingungsperiode, weshalb die Effektivwertbildung keine Mittelung mehr bewirkt. Dieser stark schwankende Pegelverlauf entspricht in keiner Weise der menschlichen Wahrnehmung und bewirkt rechnerisch um rund 25% überhöhte Wahrnehmungsmaxima. Dieses Problem tritt insbesondere im Frequenzbereich von 1-8 Hz auf, weshalb die Anwendung von DIN 4150-2, welche die „FAST“-Bewertung verwendet, auf dominant niederfrequente Erschütterungen (f < 12 Hz) aus signalanalytischen Gründen zu beträchtlichen Fehlern führt und daher zu vermeiden ist [17].

3.1.5 Beurteilungskennzahlen

Für die Bewertung der Exposition werden folgende Kennzahlen verwendet:

- Der Effektivwert / quadratische Mittelwert (RMS equivalent value):
  Der Effektivwert des Signals s für die Beurteilungszeit T lässt sich wie folgt ermitteln:

$$s_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T s^2(t).dt} \quad (4)$$

- Der Maximalwert des gleitenden Effektivwerts:
  Der gleitende Effektivwert des Signals s mit der Zeitkonstante τ lässt sich wie folgt ermitteln:

$$s_{eff,\tau}(t) = \sqrt{\frac{1}{\tau}\int_0^t s^2(t-\xi).\exp\left(-\frac{\xi}{\tau}\right).d\xi} \quad (5)$$

$$s_{max} = \max\left(s_{eff,\tau}(t)\right)_{Beurteilungszeit} \quad (6)$$

- Vibration Dosis Value, abgekürzt VDV als:

$$VDV = \left[\int_0^T s^4(t).dt\right]^{\frac{1}{4}} \quad (7)$$

Mit der Verwendung der 4. Potenz im VDV anstatt der 2. Potenz wie sie dem RMS-Wert zugrunde liegt, werden zwei Begrenzungen gelöst: die Vergleichbarkeit von Schwingungen mit unterschiedlicher Einwirkungszeit und die adäquate Beurteilung stossartiger Einwirkungen, die als stärker empfunden werden als "sanfte" Schwingungen mit dem gleichen RMS-Wert (die 4. Potenz gewichtet einzelne Beschleunigungsspitzen automatisch stärker) [18].

Für jede dieser Kennzahlen kann noch eine verkehrsbezogene Gewichtung berücksichtigt werden, bei welcher die Rollmaterialtypen und Durchfahrtzeiten anteilmässig berücksichtigt werden.

In den verschiedenen Normen und Vorschriften werden eine, mehrere oder Kombinationen dieser Bewertungen verwendet. Je nachdem werden auch Tag- und Nachtzeiten anders

berücksichtigt, andere Grenzwerte für die verschiedenen Einwirkungsorte (z.B. Industriegebiet, Wohngebiet, Krankenhäuser) angesetzt und Qualitätsklassen der Ergebnisse definiert (von gut bis schlecht oder nach Wahrscheinlichkeit einer Störung).
Gemäss [16] sind Maximalwerte des gleitenden Effektivwerts von Bedeutung für Schlafstörungen und quadratische Mittelwerte (= Effektivwerte) mit verkehrsbezogener Gewichtung eher für die Quantifizierung der langfristigen Belästigung, weil sie die Anzahl Durchfahrten berücksichtigen.

Eine Übersicht mit dem Vergleich einiger Merkmalen von einer Auswahl an Normen und nationalen Vorschriften zu Erschütterungsbeurteilungen ist in Tabelle 1 zu finden.

Eine Übersicht mit weiteren nationalen Normen ist im Deliverable D1.4 Kapitel 2.1 des RIVAS Projekt [16] zu finden.

Ebenfalls wurden verschiedene nationalen Grenzwerte in W_m-bewertete Beschleunigungen umgerechnet und so untereinander verglichen. Für die Nachtzeit sind die Ergebnisse in Abbildung 5 dargestellt.

Table 2.21 Vibration criteria at night-time in residential buildings (W_m-weighted acceleration in mm/s^2)

Country and quality class	Austria		Germany	Italy	Norway		Spain	Sweden	UK	USA	ISO 2631-2 (1989)
	Satisf.	Good			Class C	Class B					
Maximum value	18.8	9.4	7.1	7.0	11	5.4	5.6	14-36	10	3.6	5.4
Equivalent value	1.59	0.84	1.8	–	–	–	–	–	0.5	–	–

Comments:
- The relationship used between acceleration and velocity is: $a_w = 35.7\ v_w$.
- Austria: assessment with exposure corresponding to $a_{w,s} > 3{,}57$ mm/s².
- Germany:
  - time constant: Fast;
  - assessment with exposure corresponding to $KB > 0.1$ mm/s².
- Norway: the assessment quantity is the statistical 95-percentile value (a more stringent criterion than the maximum measured value).
- United Kingdom:
  - 8 occurences at night-time, each of duration $t = 10$ s;
  - $eVDV = 1.4 \times a(t)_{r.m.s.} \times t^{0.25} = 0.1$ m.s$^{-1.75}$;
  - the calculated constant value (10 mm/s²) is an average r.m.s. acceleration over a train passage, thus underestimating the actual maximum value.

Abbildung 5: Nationale Grenzwerte zur Nachtzeit in Wohngebieten aus [16]. Die Definition von Maximum Value und Equivalent Value sind am Anfang des Kapitels erläutert

Diese verschiedenen nationalen Kriterien zeigen eine grosse Streuung in der Strenge der Bewertung. Dies ist auf die Bedeutungen der Grenzwerte zurückzuführen, je nachdem ob sie die akzeptable Belästigung einzelner Ereignisse oder die über eine bestimmte Zeit gemittelte Exposition definieren.

Die Auswertungsschritte der in der BEKS [19] (siehe hierzu Kapitel 4.1.1) referenzierten DIN 4150-2 sind in Anhang A abgebildet.

Tabelle 1: Übersicht mit dem Vergleich einiger Merkmalen von einer Auswahl an Normen und nationalen Vorschriften zu Erschütterungsbeurteilungen

Referenz	Bezeichnung	Land	Jahr	Dokumenttyp	Auch für Körperschall gültig	Einwirk. auf Menschen	Einwirk. auf Bauwerken	Messbedingungen	Spez. der Bewertung	Grenzwerte vorhanden?	Messgrösse	Art der Bewertung	Frequenz-bereich
BS6472-1	Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings Vibration sources other than blasting	UK	2008	Nationale Norm	-	X	-	X	X	X	Beschleuni-gung	- VDV	0.5 - 80 Hz
ISO 2361-1	Mechanical vibration and shock — Evaluation of human exposure to whole-body vibration — Part 1: General requirements	Int.	1997	Internationale Norm	-	X	-	X	X	-	Beschleuni-gung	- max des gleit. Effektivwertes - Effektivwert - VDV	0.5 - 80 Hz
ISO 2631-2	Mechanical vibration and shock — Evaluation of human exposure to whole-body vibration — Part 2: Vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz)	Int.	2003	Internationale Norm	X	X	-	-	-	-	n.z.	n.z. (nur Definition der Frequenzbewertung)	1 - 80 Hz
Ö Norm S 9012	Beurteilung der Einwirkung von Schwingungsimmissionen des landgebundenen Verkehrs auf den Menschen in Gebäuden - Schwingungen und sekundärer Luftschall	Ö	2016	Nationale Norm	X	X	-	X	X	X	Beschleuni-gung	- max des gleit. Effektivwertes - energieäquivalenter Mittelwert	1 - 80Hz

Referenz	Bezeichnung	Land	Jahr	Dokumenttyp	Auch für Körperschall gültig	Einwirk. auf Menschen	Einwirk. auf Bauwerken	Messbedingungen	Spez. der Bewertung	Grenzwerte vorhanden?	Messgrösse	Art der Bewertung	Frequenz-bereich
VDI 2057 Blatt 1	Einwirkungen mechanischer Schwingungen auf den Menschen - Grundlagen, Gliederung, Begriffe	DE	2017	Anerk. Regel der Technik	-	X	-	-	X	-	Schnelle (bzw. KB)	- max des gleit. Effektivwertes - energieäquivalenter Mittelwert	1 - 80 Hz
ISO 14837, Part 31	Mechanische Schwingungen - Erschütterungen und sekundärer Luftschall aus dem Schienenverkehr - Teil 31: Anleitung für Messungen vor Ort zur Ermittlung der Einwirkung auf den Menschen in Gebäuden	Int.	2017	Internationale Norm	-	X	X	X	X	-	Schnelle	- max des gleit. Effektivwertes	1 - 80 (250)Hz
DIN 4150-2	Erschütterungen im Bauwesen; Einwirkungen auf Meschen in Gebäuden	DE	1999	Nationale Norm	-	X	-	X	X	X	Schnelle (bzw. KB)	- max des gleit. Effektivwertes - energieäquivalenter Mittelwert	1 - 80 Hz
DIN 4150-3	Erschütterungen im Bauwesen; Einwirkungen auf bauliche Anlagen	DE	2016	Nationale Norm	-	-	X	X	X	X	Schnelle	- max des gleit. Effektivwertes	1 - 100 Hz
SN 40 312a	Erschütterungseinwirkungen auf Bauwerke	CH	2019	Nationale Norm	-	-	X	X	X	X	Schnelle	- max des gleit. Effektivwertes	8 - 150 Hz
BEKS	Weisung für die Beurteilung von Erschütterungen und Körperschall bei Schienenverkehrsanlagen	CH	1999	Nationale Vorschrift	X	X	-	-	-	X	Gemäss DIN 4150-2 (abweichende Grenzwerte für Um- und Ausbau von Anlagen)		

3.1.6 Quantifizierung der Wirkung einer Massnahme – Einfügedämmung

Die Quantifizierung der Erschütterungsminderung durch eine Massnahme wird üblicherweise mithilfe der "Einfügedämmung" (insertion loss, kurz IL) quantifiziert, die den relativen Minderungseffekt einer Massnahme im Vergleich zu einer Referenzsituation beschreibt. Die Einfügedämmung wird üblicherweise als Frequenzspektrum dargestellt.

Das Standardverfahren zur Bestimmung der Einfügedämmung ist der Vergleich einer gemessenen Schwingungsgrösse (Beschleunigung oder Schwingschnelle) bei der Durchfahrt eines Zuges, der an einem bestimmten Ort vorbeifährt, vor und nach der Umsetzung der Massnahme (die so genannte "Vorher/Nachher"-Methode) oder des gleichen Zuges auf zwei benachbarten Gleisabschnitten mit und ohne Massnahme (die "links/rechts"-Methode) wie in der DIN 45673-3 beschrieben: $L_{v,Ref} - L_{v,U}$

Diese Norm gibt eine Alternativdefinition für die Einfügedämmung als Differenz von Transferfunktionen zwischen Referenz- und Beurteilungsmesspunkt an: $L_{y,Ref} - L_{y,U}$
Zwischen beiden Definitionen dürften nur Unterschiede aufgrund von Nichtlinearitäten vorhanden sein.
Diese Alternativdefinition kann ebenfalls für die Korrektur von unterschiedlichen Eigenschaften an verschiedenen Standorten verwendet werden, indem die resultierende Einfügedämmung aus den Transferfunktionen $L_{Y,Ref} - L_{Y,U}$ der einzelnen Einfügedämmung an den unterschiedlichen Standorten (gemessen anhand von Zugsdurchfahrten) $L_{v,Ref} - L_{v,U}$ voneinander subtrahiert wird. In diesem Fall ergibt sich für die Einfügedämmung D_e:

$$D_e = L_{v,Ref} - L_{v,U} - (L_{Y,Ref} - L_{Y,U}) \quad (8)$$

3.2 Körperschall

Die folgenden zwei Kennwerte für Körperschall kommen in den verschiedenen Normen und Vorschriften vorwiegend zum Einsatz:

- L_{pASmax}: das Maximum vom A-bewerteten Schallpegel (basierend auf dem Effektivwert des Schalldrucks meistens mit der Zeitbewertung "SLOW") bei einer Zugdurchfahrt. Dieser Wert hat den Nachteil, dass weder die Ereignisdauer noch die -häufigkeit berücksichtigt wird, obwohl sie für die Quantifizierung der Belästigung relevant sind.
- L_{pAeq}: der äquivalente A-bewertete Dauerschallpegel. Dieser Kennwert berücksichtigt sowohl den mittleren Schallpegelwert als auch die Dauer des Ereignisses über die Beurteilungszeit.

Eine Übersicht mit dem Vergleich einiger Merkmalen von einer Auswahl an Normen und nationalen Vorschriften zu Körperschallbeurteilung ist in Tabelle 2 zu finden.

Tabelle 2: Übersicht mit dem Vergleich einiger Merkmalen von einer Auswahl an Normen und nationalen Vorschriften zur Körperschallbeurteilung

Referenz	Bezeichnung	Land	Jahr	Dokument-typ	Grenzwerte vor-handen?	Fallunterschied Tag/Nacht?	Ermittlungsort	Zeitbewertung	Frequenzbewer-tung	Frequenzbe-reich	Art der Bewertung
Ö Norm S 9012	Beurteilung der Einwirkung von Schwingungsimmissionen des landgebundenen Verkehrs auf den Menschen in Gebäuden - Schwingungen und sekundärer Luftschall	Ö	2016	Nationale Norm	X	X	An zwei Messpunkten gemäss Ö Norm S 5004 --> energetischer Mittelwert ist daraus zu bilden	SLOW	A	16-125Hz	- $L_{A,max,m}$: mittlerer Wert für einen Zugtypen vom A-bewerteten Maximalpegel - L_{Aeq}
ISO 14837, Part 31	Mechanische Schwingungen - Erschütterungen und sekundärer Luftschall aus dem Schienenverkehr - Teil 31: Anleitung für Messungen vor Ort zur Ermittlung der Einwirkung auf den Menschen in Gebäuden	Int.	2017	Internationale Norm	-	-	Der Messpunkt soll bei 1/3 der Raumbreite platziert werden, in 1.2 bis 1.5 m Höhe Wenn zutreffend beim Punkt, wo Beschwerden vorhanden sind	SLOW	A	16-250Hz	Minimalanforderung: Lp_{AS-max} Zusätzlich: Lp_{Aeq} Zusätzlich: Lp_{CSmax}-Lp_{ASmax}. Grund: ein Unterschied von 15dB deutet auf tieffrequenten Lärm (bzw. Körperschall), wenig Unterschied auf Luftschall
BEKS	Weisung für die Beurteilung von Erschütterungen und Körperschall bei Schienenverkehrsanlagen	CH	1999	Nationale Vorschrift	X	X	Im Gebäude, wo Personen sich aufhalten	nicht spezifiziert	A	nicht spezifiziert	- Lp_{Aeq} mit tagsüber T = 16 Std nachts: die schlechste Stunde T=1 Std
Weisung SBB	Beurteilung von Erschütterungen und abgestrahltem Körperschall entlang von Eisenbahnlinien	CH	1993	Firmeninterne Vorschrift	X	X	In der Mitte des Raumes	nicht spezifiziert	A	nicht spezifiziert	Körperschall: L_K abgeleitet von vrms oder gemessen

Im Jahr 2017 ist die internationale Norm ISO 14837-31 veröffentlicht worden mit dem Ziel, einheitliche Definitionen festzulegen und Messergebnisse vergleichen können. Diese Norm spezifiziert die Verwendung von L_{pASmax} als minimale Anforderung und empfehlt zusätzlich die Dokumentation von L_{pAeq} und die Differenz L_{pCSmax} - L_{pASmax}, um tieffrequenter Lärm bzw. die Unterschätzung durch die A-Bewertung zu identifizieren.

Der schon ältere Bericht aus dem RENVIB II-Projekt [4] hat sich mit dem Vergleich der für abgestrahlten Körperschall relevanten Kennwerte befasst. Ein detaillierter und aktuellerer Vergleich dieser Kennwerte zwischen nationalen Normen und Vorschriften ist im RIVAS Bericht [16] Tabelle 3.1 zu finden. Im Kapitel 3.2 des gleichen Berichtes werden ebenfalls die Grenzwerte zwischen nationalen Vorschriften und Richtlinien verglichen.

4 Überblick nationaler Vorschriften für Neu- und Umbau

4.1 Situation Schweiz – Aktueller Stand

4.1.1 Schutz von Personen

Der Schutz vor Erschütterungen in der Schweiz, wie auch der Schallschutz, sind im Umweltschutzgesetz (USG) geregelt. Artikel 15 schreibt vor, dass «Immissionsgrenzwerte für Lärm und Erschütterungen so festzulegen sind, dass nach dem Stand der Wissenschaft oder der Erfahrung Immissionen unterhalb dieser Grenzwerte die Bevölkerung in ihrem Wohlbefinden nicht erheblich stören.» Ausserdem steht im Artikel 1: «Im Sinne der Vorsorge sind Einwirkungen, die schädlich oder lästig werden könnten, frühzeitig zu begrenzen.»

Stand 2022 gibt es jedoch keine Ausführungsverordnung bzw. keine bezifferten Immissionsgrenzwerte, die zu einer flächendeckenden Sanierungspflicht führen würden. Einerseits ist die Problematik aufgrund der vielen Einflussparameter und die damit zu verknüpfende Entwicklung von Massnahmen sehr anspruchsvoll und komplex. Anderseits müsste vorgängig abgeklärt werden, welcher Kosten-Nutzen Index bzw. welcher Wert der Verhältnismässigkeit für diese Massnahmen bei einer allfälligen Erschütterungssanierung zu erreichen sind und wie die Finanzierung sichergestellt werden kann. An einer Verordnung wurde allerdings Jahre lang gearbeitet. Kapitel 4.2 gibt mehr Details zur historischen Entwicklung der «Verordnung zum Schutz gegen Erschütterungen» (VSE).

Im Sinne einer Übergangsregelung hat das BAFU (damals BUWAL) zusammen mit dem BAV eine Weisung für die Beurteilung von Erschütterungen und Körperschall bei Schienenverkehrsanlagen (kurz BEKS) erstellt, die seit Ende 1999 in Kraft ist [19]. Diese Weisung betrifft ausschliesslich Um-, Aus- und Neubauprojekte und nicht bestehende Anlagen. Durch die unterdessen über zwanzigjährige Gültigkeit der BEKS sind diese Vorgaben im Netz der Bahnen schon weitrechend zur Anwendung gekommen im Rahmen der Ausbau- und Erneuerungsprojekte während der entsprechenden Zeitdauer.

Die in der BEKS vorgeschriebene Beurteilung der Erschütterungen übernimmt die in der DIN 4150-2:1999 definierte Methodik und die Anhaltswerte. Die verschiedenen Auswerteschritte sind in Anhang A dargestellt. Die Bewertung erfolgt nach dem Flussdiagramm im Kapitel 6.2 der DIN 4150-2 und den Anhaltswerten A_u, A_o und A_r. Diese hängen von der Tageszeit (tags / nachts) und von der Art des Einwirkungsortes (z.B. Gewerbe- oder Wohngebiet) ab. Sofern KB_{Fmax} den Anhaltswert A_u nicht überschreitet, gilt kein weiteres Kriterium auf der Beurteilungsschwingstärke KB_{FTr}. Ist KB_{Fmax} grösser als A_u wird ein zweites Kriterium auf KB_{FTr} angewendet.

Für den abgestrahlten Körperschall wird der energieäquivalente Dauerschallpegel L_{eq} über die Beurteilungszeit (über 16 Stunden am Tag oder den Wert über die schlimmste der 8 Stunden nachts) beurteilt.

Auch die Checkliste Umwelt für Eisenbahnanlagen [20] unter Kapitel 5.14 befasst sich mit Erschütterungen- und Körperschallimmissionen. Mit der neuen Fassung vom August 2022 gelten diese Anforderungen für alle Projekte, unabhängig von ihren Kosten, gleichwertig. Diese Checkliste schreibt folgendes Vorgehen vor:
1) Für die Plangenehmigungsgesuche muss mittels Berechnung mit VIBRA-1 ermittelt werden, wie hoch die erwarteten Erschütterungs- und Körperschallwerte nach der Umsetzung sind. Anhand dessen kann festgestellt werden, ob ein «Zweifelsfall» vorliegt.
Es liegt ein «Zweifelsfall» vor:

- für Erschütterungen, wenn die mit VIBRA-1 berechneten Immissionswerte grösser als die Hälfte der für diesen Fall gültigen Anhaltswerte (Tabelle 3 und Tabelle 4 unten) sind
- für den abgestrahlten Körperschall, wenn die mit VIBRA-1 berechneten Immissionswerte grösser als der Richtwert nach BEKS (Tabelle 5 und Tabelle 6 unten) minus 6 dB sind

2A) Liegt kein «Zweifelsfall» vor, werden keine weiteren Abklärungen durchgeführt.
2B) Bei Zweifelsfällen sind EKS mit Immissionsmessungen oder auf der Grundlage eines genaueren analytisch-messtechnischen Prognoseverfahrens (VIBRA-2 oder Gleichwertiges) zu ermitteln.

Zeigt diese Beurteilung, dass diese Grenzwerte gemäss Tabelle 3 bis Tabelle 6 nicht eingehalten werden können, sind Schutzmassnahmen zu prüfen. Falls sich diese als geeignet und verhältnismässig erweisen, sind diese Massnahmen umzusetzen (Art. 12 Abs. 2 USG). Erweisen sich die Massnahmen als unverhältnismässig, können im Einzelfall Erleichterungen gemäss Art. 17 USG[1] beantragt werden.

In der Checkliste sind Umbauprojekte [20] folgendermassen definiert: «Projekte mit baulichen Eingriffen im Bereich der Fahrbahn (z.B. Einbau oder Verschieben von Weichen, Oberbauerneuerungen, mit oder ohne Unterbausanierung) sowie mit betrieblichen Änderungen (z.B. Verkehrszunahme oder einer Veränderung der Verkehrszusammensetzung welche potenziell mehr Erschütterungsemissionen verursachen könnte).»

[1] Der Artikel 17 der USG in ihrer Fassung vom 01.01.2018 wurde per Parlamentarischer Abstimmung angepasst, so dass Erleichterungen bei Erschütterungsproblemen im Einzelfall erlaubt sind. Vorher waren Ausnahmen über dem Immissionsgrenzwert nicht erlaubt.

Tabelle 3: Anhaltswerte für neue Anlagen für Erschütterungsimmissionen in Wohnungen aus [21]

	Anhaltswerte für neue Anlagen							
Zl.	Einwirkungsort	Tags			Nachts			
		A_u	A_o	A_r	A_u	A_o Oberird. Strecken	A_o Tunnel	A_r
	Anwendung auf	KB_{Fmax}		KB_{FTr}	KB_{Fmax}			KB_{FTr}
1	Einwirkungsorte, in deren Umgebung ***nur gewerbliche Anlagen*** und ggf. ausnahmsweise Wohnungen für Inhaber [...]	0.4	6	0.2	0.3	0.6	0.6	0.15
2	Einwirkungsorte, in deren Umgebung ***vorwiegend gewerbliche Anlagen*** untergebracht sind	0.3	6	0.15	0.2	0.6[2]	0.4	0.1
3	Einwirkungsorte, in deren Umgebung weder vorwiegend gewerbliche Anlagen noch vorwiegend Wohnungen untergebracht sind	0.2	5	0.1	0.15	0.6[2]	0.3	0.07
4	Einwirkungsorte, in deren Umgebung ***vorwiegend oder ausschliesslich Wohnungen*** untergebracht sind	0.15	3	0.07	0.1	0.6[2]	0.3[2]	0.05
5	Besonders ***schutzbedürftige Einwirkungsorte***, z.B. in Krankenhäusern, in Kurkliniken, [...]	0.1	3	0.05	0.1	0.6[2]	0.3[2]	0.05

[2] Von der Tabelle 1 der DIN4150-2 abweichende Anhaltswerte A_o gemäss §6.5.3.5 bei oberirdischen Strecken bzw. Tunneln

Tabelle 4: Anhaltswerte für Um- und Ausbauten bestehender Anlagen für Erschütterungsimmissionen in Wohnungen abgeleitet von [21] und [20] Kap. 5.14

Anhaltswerte für Um- und Ausbauten								
Zl.	Einwirkungsort	Tags			Nachts			
		A_u	A_o	A_r	A_u	A_o Oberird. Strecken	A_o Tunnel	A_r
	Anwendung auf	KB_{Fmax}		KB_{FTr}	KB_{Fmax}			KB_{FTr}
1	Einwirkungsorte, in deren Umgebung ***nur gewerbliche Anlagen*** und ggf. ausnahmsweise Wohnungen für Inhaber [...]	0.4[3]	6[3]	0.2[3]	0.3[3]	0.6[3]	0.6[3]	0.15[3]
2	Einwirkungsorte, in deren Umgebung ***vorwiegend gewerbliche Anlagen*** untergebracht sind	0.4	6	0.2	0.3	0.6	0.6	0.15
3	Einwirkungsorte, in deren Umgebung weder vorwiegend gewerbliche Anlagen noch vorwiegend Wohnungen untergebracht sind	0.3	6	0.15	0.2	0.6[2]	0.4	0.1
4	Einwirkungsorte, in deren Umgebung ***vorwiegend oder ausschliesslich Wohnungen*** untergebracht sind	0.2	5	0.1	0.15	0.6[2]	0.3	0.07
5	Besonders ***schutzbedürftige Einwirkungsorte***, z.B. in Krankenhäusern, in Kurkliniken, [...]	0.15	3	0.07	0.1	0.6[2]	0.3[2]	0.05

[3] Der Fall nach Zeile 1 für Um- und Ausbauten bestehender Anlagen wurde in der Checkliste Umwelt (20) vergessen. In der nächsten Fassung werden diese Anhaltswerte integriert.

Tabelle 5: Planungsrichtwerte für neue Anlagen für Körperschall – aus [19]

Planungsrichtwerte für neue Anlagen L_{eq} des Innenraumpegels in dB(A)		
	Tag **16 Std L_{eq}**	**Nacht** **1 Std L_{eq}** **(Höchstwert der 8 Std)**
Reine Wohnzonen, Zonen für öffentliche Nutzung (Schule, Spitäler)	35	25
Mischzonen, städtische Kernzonen, ländliche Dorfzonen, Landwirtschaftszonen, vorbelastete reine Wohnzonen	40	30

Tabelle 6: Immissionsrichtwerte für Um- und Ausbauten bestehender Anlagen für Körperschall – aus [19]

Immissionsrichtwerte für Um- und Ausbauten bestehender Anlagen L_{eq} des Innenraumpegels in dB(A)		
	Tag **16 Std L_{eq}**	**Nacht** **1 Std L_{eq}** **(Höchstwert der 8 Std)**
Reine Wohnzonen, Zonen für öffentliche Nutzung (Schule, Spitäler)	40	30
Mischzonen, städtische Kernzonen, ländliche Dorfzonen, Landwirtschaftszonen, vorbelastete reine Wohnzonen	45	35

4.1.2 Erschütterungseinwirkung auf Bauwerke

Für die Erschütterungseinwirkung auf Bauwerke infolge des Schienenverkehrs gilt die Schweizer Norm SN 40 312 [10]. Diese Norm enthält Richtwerte für Schwingungen ab 8 Hz, bei deren Einhaltung mit keinen Gebäudeschäden zu rechnen ist. Diese Richtwerte sind abhängig von der Empfindlichkeitsklasse des Bauwerks, von der Auftretenshäufigkeit (gelegentlich / häufig / permanent) und vom betroffenen Frequenzbereich und sind als Maximalwerte des Schwinggeschwindigkeitsvektors, gemessen am Fundament, ausgedrückt.
Eisenbahnverkehr wird im Sinne der SN 40 312 als permanent angesehen. Diese Richtwerte für Hochbauten sind in Tabelle 7 angegeben. Die 3 bis 6 mm/s, die für ein normal empfindliches Gebäude gelten werden durch den Bahnbetrieb, ausser in theoretischen Extremfällen,

nicht erreicht. Es ist bis heute in der Schweiz kein Fall bekannt, bei dem Gebäudeschäden durch Schienenverkehrserschütterungen verursacht worden sind und damit kann davon ausgegangen werden, dass diese zu keiner Beeinträchtigung der Bausubstanz führen.
Das gleiche gilt für Erschütterungen, die vom Gleisunterhalt herrühren, beispielsweise von Stopfmaschinen mit oder ohne dynamischen Gleisstabilisator. Diese Erschütterungen sind zwar unter Umständen stärker als beim normalen Verkehr, treten aber deutlich seltener auf.
Da diese Erschütterungen trotzdem sehr wohl durch den Menschen wahrnehmbar sein können, treffen regelmässig Anwohnerbeschwerden bei den Infrastrukturbetreibern ein, auch im Fall von Rissbildungen. Die Ursache der Rissbildungen ist jedoch auf andere Geschehnisse zurückzuführen, wie Fundationsprobleme, Grundwassersenkungen, Erdbeben, etc.

Tabelle 7: Auszug der Richtwerte für Hochbauten nach [10] Tabelle 3

Empfindlichkeitsklasse	**Beispiele von Bauwerken dieser Empfindlichkeitsklasse**	**Richtwerte der Maximalwerte des Geschwindigkeitsvektors**		
		< 30Hz	**30 - 60Hz**	**> 60Hz**
(1) sehr wenig empfindlich	Klasse nur für den Tiefbau relevant	9 mm/s	12 mm/s	18 mm/s
(2) wenig empfindlich	- Industrie- und Gewerbebauten, in Stahlbeton oder Stahlkonstruktion […]	6 mm/s	8 mm/s	12 mm/s
(3) normal empfindlich	- Wohnbauten mit Mauerwerk in Beton, Stahlbeton oder künstlichen Bausteinen Bürogebäude, Schulhäuser, Spitäler, Kirchen mit Mauerwerk […]	3 mm/s	4 mm/s	6 mm/s
(4) erhöht empfindlich	- Häuser mit Gips- und Hourdisdecken - Riegelbauten - Neuerstellte und frisch renovierte Bauten der Klasse (3) - Historische und geschützte Bauten	1.5 - 3 mm/s	2 - 4 mm/s	3 - 6 mm/s

4.2 Erschütterungssanierung – Historie und aktueller Stand

Aufgrund der fehlenden Ausführungsverordnung zum Art. 15/16 des USG hat das BAFU mit einer Begleitgruppe direkt nach der Fertigstellung der BEKS den Prozess Anfang 2000 gestartet eine Verordnung zum Erschütterungsschutz (VSE) zu erstellen. 2004 wurde ein Konzeptdokument zur Erschütterungssanierung publiziert seitens BAV und BAFU [22], mit Stellungnahmen zu den folgenden strategischen Punkten:

- Sanierungspflicht bei allen Schienenverkehrsanlagen, unter Einhaltung der Verhältnismässigkeit
- Sanierungsfristen von 30 bis 40 Jahren
- Die Finanzierung der Massnahmen sowie des Vollzugs muss beim Inkrafttreten der Verordnung sichergestellt sein.

Eine Sanierung mit wesentlich kürzeren Fristen als 30-40 Jahre würde Bauarbeiten unter Bahnbetrieb bedingen, wodurch die prognostizierten Kosten um mindestens 30% erhöht würden. Weiter wären unter diesen Bedingungen betriebliche Probleme, u.a. mit der Kapazitätsplanung, zu erwarten sowie Konflikte mit anderen dringenden Bauarbeiten zu gewärtigen.

Basierend auf diesem Grobkataster wurde 2005 eine Liste der «Hot-Spots» auf dem Netz mit Berücksichtigung der Betroffenheit und Belastung erstellt, die prioritär betrachtet werden müssten.

Im Jahr 2006 wurde die erste Entwurfsversion der Verordnung über den Schutz vor Erschütterungen (VSE) herausgegeben und in die 1. Ämterkonsultation geschickt. Eisenbahnanlagen werden gesondert behandelt. Vor allem gelten diese spezifischen Punkte (Bemerkung: es wurde allerdings kein Kriterium für die Verhältnismässigkeit festgelegt):

- die Eisenbahnbetriebssicherheit hat Vorrang. Auch die Verhältnismässigkeit wird berücksichtigt
- Die Sanierungsfristen werden fallabhängig festgelegt: für Hotspots 15 Jahre und flächendeckend innerhalb 35 Jahren

Hintergrundinformationen zur Entwicklung der VSE sind im Bericht der Fachgruppe [23] zu finden.

Die SBB hatte mit einem Brief an das GS-UVEK während der 1. Ämterkonsultation auf mögliche hohe Kosten hingewiesen. Die SBB wurde daraufhin vom BAV mit einer neuen Berechnung mit dem Grobkataster beauftragt, um die neuen Massnahmen-Kosten für das neue Grenzwertszenario zu berechnen. Die Berechnungen wurden von Rutishauser Ingenieurbüro überprüft. Die Berechnungen von 2007 wurden im Abschlussbericht [24] dokumentiert. Tatsächlich ergab es deutliche Mehrkosten mit dem neuen Grenzwertszenario.

Ein gemeinsames Positionspapier vom BAFU und BAV wird im Laufe des Jahres 2023 erwartet, das die nächsten Schritte bezüglich VSE vorschlägt.

5 EKS-Prognose

5.1 Allgemeines

Eine Prognose der Erschütterungs- und Körperschallimmissionen ist sowohl für Neubauprojekte von Bahnen und Anrainern an die Bahn als auch für Um- und Ausbauprojekte von Relevanz.

Die Anforderungen an das Prognosemodell steigen mit dem Entwicklungsstadium des Projekts. Die ISO 14837-1 [8] definiert dabei Modelle mit drei Detaillierungs- und Ungenauigkeitsstufen:

- Ein Untersuchungsmodell (scoping model) zum Identifizieren kritischer Standorte entlang der Strecke, welche die Grenzwerte überschreiten könnten. Dieses Modell soll nur die wichtigsten Parameter berücksichtigen, die in den frühen Projektphasen bekannt sind, wie die vorgesehenen Fahrzeugtypen, die Trassierungsinformationen, die typischen Bodeneigenschaften, die Abstände zu den Immissionsorten sowie ihre Empfindlichkeit (Wohn- oder Industriegegend, Krankenhaus, Konzertsaal, usw.). Die spektralen Inhalte werden dabei vernachlässigt und die Ergebnisse sollen konservative Einzahlwerte für Erschütterungs- und Körperschallimmissionen liefern, und im Idealfall auf bestehende Messungen repräsentativer Fälle basieren.

- Ein Modell für die Umweltprüfung und Entwurfsplanung (environmental assessment and preliminary design): dieses Modell soll in der Lage sein, Erschütterungen und Körperschall präziser zu quantifizieren unter Berücksichtigung des Frequenzinhalts. Die kritischen Parameter des Anhangs A der ISO 14831-1 (siehe Anhang B dieses Dokuments) müssen einbezogen werden und die möglichen Minderungsmassnahmentypen können mit diesem Modell untersucht werden.

- Ein Modell für die Detailplanung (detail design): dieses Modell soll eine detaillierte Analyse für eine oder mehrere der grundlegenden Komponente des Systems liefern (insbesondere für die Wirkung der Minderungsmassnahme), d.h. für die Quelle, den Ausbreitungsweg und dem Empfänger. Dabei sollen alle relevanten Parameter des Anhangs A der ISO 14831-1 mit ihren spektralen Eigenschaften berücksichtigt werden.

In Abbildung 6 sind diese drei Detaillierungsstufen der akzeptablen Modellungenauigkeit nach Projektphasen gegenübergestellt.

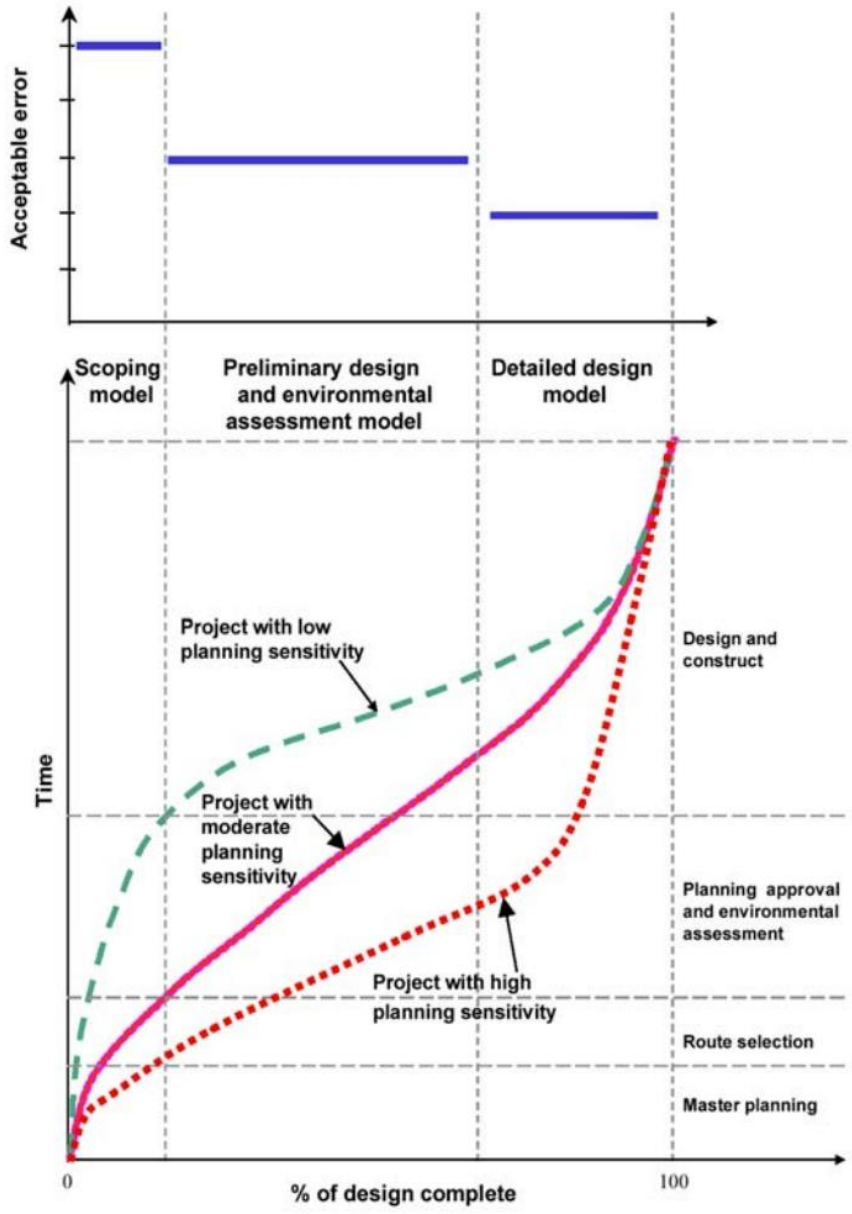


Abbildung 6: Gegenüberstellung des Modeltyps mit der akzeptablen Modelungenauigkeit nach Projektphasen aus [8] [25]

Die Ergebnisse dieser Modelle sollen als Einfügedämmung oder als Amplitude von Transferfunktionen ausgedrückt werden.
Die Modelle können entweder parametrisch sein, d.h. auf die Lösung mathematischer Gleichungen basieren, die algebraisch (und somit vereinfacht) oder numerisch gelöst werden. Sie können empirisch sein, d.h. auf Messergebnissen basieren, die extrapoliert werden. Auch

eine Kombination von parametrischen und empirischen Ansätzen ist möglich, dies wird als semi-empirisch bezeichnet.
Die ISO 14837-1 [8] weist darauf hin, dass Modellunsicherheiten bei der EKS-Prognose unvermeidbar sind und daher eine Notwendigkeit besteht, die Genauigkeit eines Modells zu kennen. Diese kann entweder mit Vergleichsmessungen oder bei einem Vergleich mit einem anderen validierten Modell, das kompatible Annahmen trifft, erfolgen.

Die Norm macht auch eine wichtige Unterscheidung zwischen Modellkalibrierung und -validierung. Die Kalibrierung findet am Ende der Entwicklungsschleife statt. Mit Kalibrierungsfunktionen wird die Übereinstimmung zwischen Modellergebnis und gemessenen Daten sichergestellt. Die Modellvalidierung mit Bestimmung der Ergebnisgenauigkeit erfolgt anschliessend als weiterer Schritt mit anderen Messdaten als denjenigen, die bei der Kalibrierung verwendet wurden.

Ein State-of-the-Art über Prognosemodelle ist im SILVARSTAR-Bericht [7] und in Bericht zum Niederländischen Prognosemodell [26] zu finden.

5.2 Schweiz

In der Schweiz kommen hauptsächlich die VIBRA-Modelle zum Einsatz. Die drei Programme VIBRA 1, 2 und 3 wurden von Ziegler Consultants in Zusammenarbeit mit der SBB entwickelt.
In der ersten Projektphase können mit Hilfe von VIBRA-1 mit wenig Inputinformationen Konfliktgebiete ausgeschieden werden. Kritische Gebäude werden in einem zweiten Schritt berechnet.
In einer zweiten Phase wird bei einem Aus- oder Umbau der Gleisanlage die Situation vorgängig für den betroffenen Standort gemessen (bei einem 8 m-Freifeldmesspunkt und neben dem Haus, sowie Hausmesspunkte Keller und verschiedene Geschossdecken). Die verschiedenen gemessenen Norm- und Transferspektren können anschliessend in VIBRA-2 zur Prognose verwendet werden.
Die Anwendung der VIBRA-Modelle (oder von vergleichbaren Alternativen) wird in der BEKS und in der Umwelt-Checkliste herangezogen.

Bei VIBRA-3 handelt es sich nicht eigentlich um ein Berechnungsmodell, sondern um eine Datenbank von Spektren für die Verwendung in VIBRA-2.

Die Programme VIBRA-1, 2 und 3 sind in Microsoft Access implementiert.

5.2.1 VIBRA-1 Modell

Das Modell VIBRA-1 berechnet eine Prognose der Erschütterungs- und Körperschallimmissionen mit einem einfachen semi-empirischen Modell. VIBRA-1 gehört zu den Untersuchungsmodellen gemäss Aufstellung in Kapitel 5.1 bzw. ISO 14837-1 [8].

Es basiert auf dem Fakt, dass Schwingungen, die am Rad-Schiene-Kontakt entstehen, durch den Boden und über das Gebäudefundament bis zu den Wänden und Decken gelangen und auf diesem Weg mehr oder weniger gut übertragen werden (vgl. Abbildung 7).

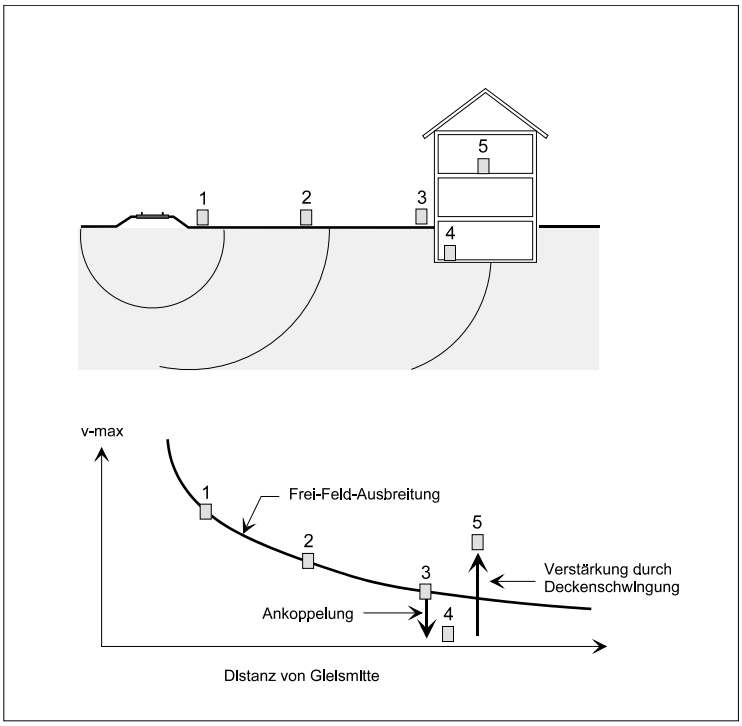


Abbildung 7: Schematische Darstellung des Abminderungsverhaltens von Erschütterungen [27]

$$v_j = v_{0,j} \cdot \left(\frac{G}{G_0}\right)^h \cdot F_t \cdot F_s \cdot F_b \cdot \left(\frac{r_0}{r}\right)^m \cdot F_a \cdot F_d \qquad (9)$$

Die verschiedenen Transferfaktoren (siehe Erläuterung in Tabelle 8) wurden durch statistische Auswertung von zahlreichen vorhandenen Erschütterungsmessungen ermittelt. Weitere Parametersätze, die den spezifischen Verhältnissen vielleicht besser angepasst sind, können vom Benutzer eingestellt werden.

Tabelle 8: Erläuterung der Parameter des VIBRA-1 Modells [27]

Pa-ram.	Definition	Erläuterung/Kommentar
v_j	RMS-Wert der Schwinggeschwin-digkeit über eine Zugdurchfahrt in Mitte des Fussbodens für den Zugtyp j	Berechnungsergebnis
$v_{0,j}$	Referenzwert der Schwingge-schwindigkeit für den Zugtyp j d.h. Schwinggeschwindigkeit in einer Distanz r0.	Wert aus statistischen Auswertungen von Messungen für den jeweiligen Zugtyp.
r_0	Referenzdistanz (in der Regel 8 m), die für die Bestimmung von v0,j zur Anwendung kam.	Distanz bei welcher v0,j angegeben ist
r	Abstand Gebäudefront – Gleis-mitte	Projektspezifischer Input
G_0	Referenz-Fahrgeschwindigkeit	Fahrgeschwindigkeit bei welcher v0,j ange-geben ist.
G	Mittlere Fahrgeschwindigkeit der Züge	Gilt für die bewerteten Zugtypen
h	Exponent für Geschwindigkeitss-kalierung	Es liegen keine statistischen Werte vor, h = 1 wird verwendet.
F_t	Faktor zur Berücksichtigung der Trasse (offene Strecke, Tunnel, Damm, Einschnitt etc.)	Für Tunnel werden z.B. Faktoren 0.5-0.65 verwendet
F_s	Faktor zur Berücksichtigung von Schienenbesonderheiten (Wei-chen und Stösse)	Für Weichen werden z.B. ein Faktor 2.5 (für ES) oder 1.9 (für KS) verwendet.
F_b	Faktor zur Berücksichtigung des Bodens im Gleisbereich	Es wird ein Unterschied zwischen lockerem Boden und Fels gemacht.
m	Exponent für geom. und Material-dämpfung im Boden	Es wird m=1.05 für ES und m=1.5 für KS empfohlen
F_a	Ankopplungsfaktor Gebäude – Baugrund	Eine Unterscheidung wird für Ein- bzw. Mehrfamilienhäuser gemacht sowie für Er-schütterung und Körperschall
F_d	Faktor für Eigenschwingung der Geschossdecken	Für Beton-, Hourdis- und Holzdecken kom-men verschiedene Werte zum Einsatz.
F_{ks}	Körperschall-Faktor	Gilt für Gleichung (10). Er bildet die Transfereigenschaft zwischen Vibrationen am Fussboden und dem Kör-perschall. Für Beton- und Holzdecken kom-men verschiedene Werte zum Einsatz.

Die Gleichung (9) erlaubt eine einfache Berechnung der EKS vom Gleis bis ins Gebäude. Sie berücksichtigt die wichtigsten Einflussparameter wie Rollmaterialtyp, Fahrgeschwindigkeit (lineare Abhängigkeit), Trasseneigenschaften (Damm, Einschnitt, Tunnel), Weiche oder Stösse, Distanz Gleis – Gebäude (ungefähr invers lineare Abhängigkeit), Gebäudetyp und Deckentyp.

Dieser Ansatz berücksichtigt keine Frequenzabhängigkeit bzw. Spektren. Einzig werden für die Beurteilung von Körperschall andere Werte verwendet, die auf gefilterten Messwerten für den Frequenzbereich 40-125 Hz basieren. Grund dafür ist, dass das menschliche Ohr unter 40 Hz praktisch nichts mehr wahrnimmt und dass Frequenzen über 125 Hz im Gebäude beim Eisenbahnverkehr für die offene Strecke in der Regel nicht auftreten.

Für die Ableitung von Körperschall kommt folgende Formel zum Einsatz:

$$p = v \cdot F_{ks} \qquad (10)$$

Mit:

- p der RMS-Wert des abgestrahlten Körperschalls
- v der RMS-Wert (Ausgangsgrösse) von Gl. (9) ermittelt für den Körperschall
- F_{ks} der Körperschall-Faktor (siehe Tabelle 8)

Für die Ableitung vom A-bewerteten äquivalenten Schalldruckpegel gilt:

$$L_{Aeq} = 20 \cdot \log\left(\frac{p}{p_{ref}}\right) - A \qquad (11)$$

Mit:

- L_{Aeq} der A-bewertete äquivalente Schallpegel
- A die Berücksichtigung der A-Bewertung mit 26 dB für das 63 Hz-Terzband
- p_{ref} = 20 µPa

Aufgrund der Ergebnisse für die einzelnen Rollmaterialtypen sowie Inputs zum tatsächlich gefahrenen Verkehr wird die Gesamtimmission gemäss der gewählten Beurteilungsnorm abgeleitet. Die Anwendung von VIBRA-1 für die Grobbeurteilung wird z.B. in der Umwelt-Checkliste [20] gefordert.

2005 wurde ein Vergleich von gemessenen Werten mit den durch VIBRA-1 prognostizierten Ergebnissen durchgeführt. Es hat sich gezeigt, dass die Prognose in den meisten Fällen auf der sicheren Seite ist, oft mit einem Faktor 2 (6 dB) bis 4 (12 dB), und dies sowohl für Erschütterungen als auch für Körperschall [28]. Der Körperschall wurde an einem der zehn

untersuchten Messorte um 5 dB unterschätzt. Diese Feststellung hat nachträglich zu einer Verbesserung in der Definition der Transferfaktoren geführt.

Eine Validierung von VIBRA-1 ist im Bericht [29] der Firma Ziegler aus 2015 zu finden. Daraus wurde abgeleitet, dass ein Faktor 2 bei der Beurteilung der Immissionen aufgrund einer VIBRA-1-Berechnung sinnvoll ist. So dürften bis auf ganz wenige Ausnahmen alle kritischen Gebäude erfasst werden. Dies begründet die Definition des «Zweifelsfalls» in der Umweltcheckliste [20] (siehe auch Kapitel 4.1.1). Die Validierung von VIBRA-2 ist in [30] präsentiert.

5.2.2 VIBRA-2 Modell

Im Gegensatz zu VIBRA-1, was einen einfachen Ansatz mit wenig Inputdaten anwendet, basiert VIBRA-2 auf einem aufwändigeren Modell, das die spektrale Abhängigkeit der wichtigen Aspekte der Erschütterungsausbreitung berücksichtigt.

Die Ausgangsgrösse ist das Quellspektrum, das Schwingschnelle-Terzbandspektrum eines bestimmten Rollmaterialtyps mit einer definierten Fahrgeschwindigkeit in einer definierten Distanz zur Gleismitte.

Durch die Multiplikation des Quellspektrums mit verschiedenen Transferspektren werden die Eigenschaften des Gleises, des Bodens, ggf. von Minderungsmassnahmen auf dem Übertragungsweg, der Ankopplung des Fundaments mit dem Boden, der Gebäudeeigenschaften berücksichtigt und so die Erschütterungen- und Körperschallspektren im Wohnraum ermittelt. Dies ist in Abbildung 8 schematisch dargestellt.

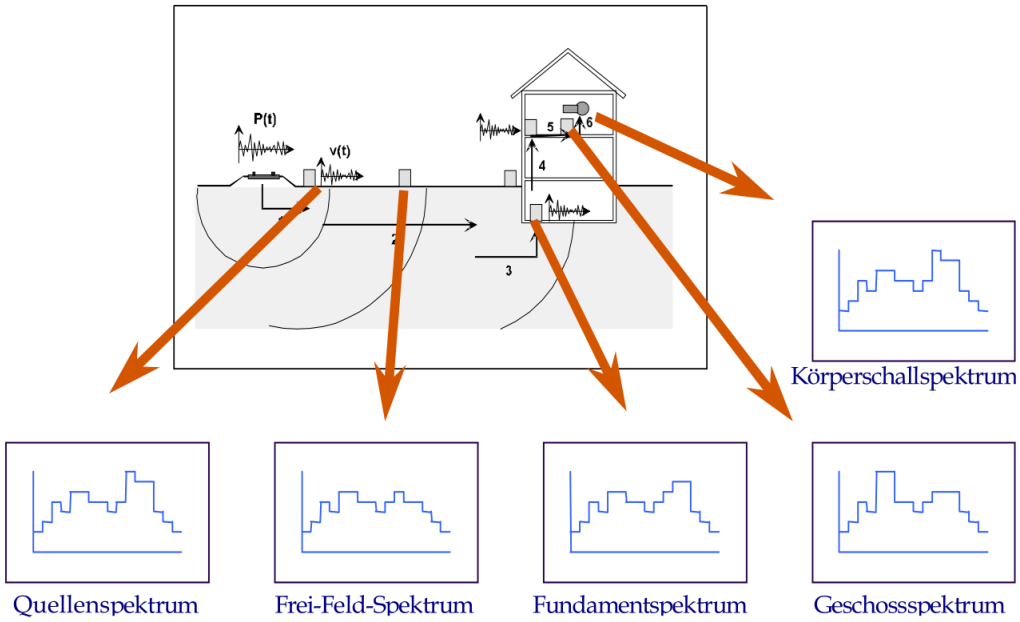


Abbildung 8: Schematische Darstellung der Berechnung mittels Quell- und Transferspektren im VIBRA-2-Modell [31]

Aufgrund dieser Ergebnisse für die einzelnen Zugtypen können die Beurteilungswerte nach einer Auswahl an Normen – unter anderem die DIN 4150-2 und Ö-Norm 9012 - berechnet werden. Ein VIBRA-2-Modell kann optional mit einer vorort-Messung im Gebäude kalibriert werden. So wird die Genauigkeit der Prognose erhöht und es kann der Einfluss einer potenziellen Minderungsmassnahme quantifiziert werden. Mit einer solchen Kalibrierung gehört VIBRA-2 zu den Modellen für die Detailplanung gemäss Aufstellung in Kapitel 5.1 bzw. ISO 14837-1 [8]. Ohne Berücksichtigung der gemessenen Spektren zählt VIBRA-2 eher zu den Modellen für die Entwurfsplanung oder sogar zu den Untersuchungsmodellen (Scoping Model), falls die Anzahl an Eingangsparameter elementar bleibt.

Eine Validierung des VIBRA-2 Modells ist im Rahmen vom RENVIB II Projekt, in der Phase 3 Task D [32] durchgeführt worden, sowie im Bericht [29] aus 2015 diskutiert.

Die Anwendung von VIBRA-2 (oder eines ähnlich detaillierten Modells) wird in der Umwelt-Checkliste [20] für die Beurteilung von Zweifelsfällen gefordert.

Im Rahmen der Erstellung der VSE wurde eine Lücke bei der Ableitung des abgestrahlten Körperschalls anhand der Erschütterungsspektren der Begrenzungsflächen identifiziert. Bis dato ist in der Schweiz keine spezifische Methodik durch die Vorschriften vorgegeben und die Planer wenden unterschiedliche Methoden an. Die neue Hochrechnungsformel der EMBE (Empfehlungen für Mess- und Berechnungsverfahren für Erschütterungen) soll gegenüber den bisherigen Methoden genauere Ergebnisse liefern können und weniger Streuung aufweisen. Die Hochrechnungsformel ist auf physikalische Grundlagen abgestützt und enthält

zudem empirisch ermittelte Koeffizienten [33]. Stand 2022 ist die Anwendung dieser Methodik noch nicht Pflicht.

5.3 Ausblick

Bei semi-empirischen Modellen wie VIBRA-1 und VIBRA-2 ist es notwendig, in regelmässigen Abständen eine Validierung mit aktualisierten Messdaten durchzuführen, damit die Eigenschaften der aktuellen Fahrzeugflotte und Oberbauten berücksichtigt wird.

Im Rahmen von der EU-finanzierten Shift2Rail Initiative laufen derzeit zwei komplementäre Projekte, die sich mit einer EKS-Prognosesoftware befassen. Einerseits ist dies FINE-2, dessen Projektmitglieder Schienenfahrzeughersteller und Bahnen sind. Des Projekt beschäftigt sich mit der Spezifikation von Anforderungen an einer Prognosesoftware, die allgemein anerkannt und validiert ist, eine graphische Benutzeroberfläche besitzt und Ergebnisse in Form von Beurteilungskennwerten liefert. Eine Basisversion basierend auf einem empirischen Ansatz sowie einen semi-empirischen Ansatz als Weiterentwicklung in einem zweiten Schritt [34]. Jedoch sind in dieser Spezifikation keine Anforderungen betreffend Validierung formuliert worden.

Die tatsächliche Entwicklung der Software findet im Rahmen des Projekts SILVARSTAR statt, dessen Teilnehmer vorwiegend Forschungsinstitute und Engineering-Dienstleister sind. Ein Review zum Stand der Technik bezüglich EKS-Prognosetools sowie das Konzept der zu herstellenden Software gibt der Projektbericht D1.1 [7]. Der Aufbau der Datenbank, auf welcher die neue Software basiert, ist in [35] erläutert. Eine Validierung des Softwareprototypen sollte im Bericht D1.3 dokumentiert werden. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts liegt er noch nicht vor.

6 Übersicht der relevanten Forschungsprojekte und Programme

In diesem Kapitel werden die relevanten internationalen und SBB-internen Forschungsprojekte und Programme kurz vorgestellt, wovon Erkenntnisse und Resultate vor allem im Kapitel 8 zu den Minderungsmassnahmen referenziert werden.

6.1 International

6.1.1 RENVIB II

1997 hat die UIC die Notwendigkeit identifiziert, das Thema Erschütterungen und Körperschall voranzutreiben und die erste Phase des Forschungsprojekts RENVIB II lanciert. Die erste Projektphase hat sich auf einen Review des Stands der Technik konzentriert und wurde von Ingenieurbüros bearbeitet. Die Aufgaben lauteten:

- Task 1: Umweltnormen und Leitfaden [4]
- Task 2: Empirische Prognosemodelle
- Task 3: Mathematisches Modellieren von Erschütterungen
- Task 4: Minderungsmassnahmen für Tunnelstrecken [5]
- Task 5: Minderungsmassnahmen für die freie Strecke [6]

Für diese Phase 2 wurden zusätzlich verschiedene Mitgliederbahnen näher involviert und einige Themen aus der ersten Phase vertieft. Folgende Themen wurden in der zweiten Phase behandelt:

- Task 1: Entwurf eines Messverfahrens für Erschütterung und Körperschall
- Task 2: Machbarkeitsstudie einer gemeinsamen Datenbank
- Task 3: Minderungsmassnahmen im Tunnel
- Task 4: Minderungsmassnahmen auf der freien Strecke
- Task 5: EKS-Minderungsmassahmen: eine Kosten-Nutzen-Analyse
- Task 6: Einflüsse auf die Erzeugung von Erschütterungen [36]
- Task 7: Minderungsmassnahmen auf der freien Strecke bei weichen Böden

In der Phase 3, die 2003 abgeschlossen wurde, wurde hauptsächlich an einem Prognosetool gearbeitet. Folgenden Aufgaben wurden konkret behandelt:

- Task A: Entwicklung der Struktur für die Prognosesoftware
- Task B: Messverfahrens für Erschütterung und Körperschall
- Task C: Funktionale Spezifikation für die RENVIB EKS Datenbank
- Task D: Analyse eines einfachen Prognosemodell, inkl. Validierung [32]
- Task E: Leitfaden für die Auswahl von Minderungsmassnahmen [25]

Die SBB war an den Phasen 2 und 3 des RENVIB II-Projekts beteiligt.

6.1.2 RIVAS

Das RIVAS Projekt war ein 3-jähriges EU-finanziertes Forschungsprojekt zwischen 2011 und 2013, an welchem verschiedene Bahnen, Fahrzeug- und Komponentenhersteller, Universitäten und Ingenieurbüros teilgenommen haben. Der Fokus wurde auf die Untersuchung und Quantifizierung der Wirksamkeit von neuen und innovativen Lösungen und Technologien zur Bekämpfung von Erschütterungen und abgestrahltem Körperschall sowohl an der Quelle, am Oberbau als auch am Übertragungsweg gesetzt, und zwar beim Design und bei der Instandhaltung von Fahrzeug- und Infrastrukturkomponenten.

Das Ziel von RIVAS war, anwendungsnahe Ergebnisse zu liefern, um im Nachgang eine schnelle Implementierung zu ermöglichen. Das Projektbudget betrug insgesamt ca. 8 Mio Euro.

Das Projekt wurde in fünf Arbeitspakete (WP) aufgeteilt, mit den folgenden Schwerpunkten:

- WP1: Beurteilung von Erschütterungen und Körperschall, Beurteilung der Dämmleistung von Massnahmen, Einfluss der Bodeneigenschaften
- WP2: Minderungsmassnahmen am Rad-Schiene-Kontakt durch Instandhaltung
- WP3: Minderungsmassnahmen am Oberbau
- WP4: Minderungsmassnahmen am Übertragungsweg
- WP5: Minderungsmassnahmen/Optimierungen am Fahrzeug

Die SBB war in allen Arbeitspaketen involviert. Die Ergebnisse von mehreren Messkampagnen auf dem SBB Netz wurden für WP2, WP3 und WP5 herangezogen.

6.1.3 Cargovibes

Dieses Projekt, war ein 3-jähriges EU-finanziertes Projekt, das zum Teil parallel zum RIVAS Projekt gelaufen ist, hat sich auf die Erschütterungen fokussiert, die durch den Güterverkehr verursacht werden. Die Motivation, den Güterverkehr getrennt zu behandeln, kam einerseits von den durch den Nachtverkehr verursachten Schlafstörungen und anderseits von den erzeugten Schwingungsmustern (Amplitude und Frequenzinhalt), die sich von denen aus dem konventionellen Verkehr unterscheiden. An diesem Projekt waren hauptsächlich Forschungsinstitute und Universitäten beteiligt.
Ein Schwerpunkt war die Wahrnehmung, Belästigungen und Schlafstörungen, die durch EKS verursacht werden. Die Thematik der Bewertung und Messung der Effizienz von Minderungsmassnahmen wurde behandelt. Bei den Untersuchungen von Minderungsmassnahmen wurde fahrzeugseitig der Fokus auf die Radinstandhaltung, gleisseitig auf Schwellenbesohlung und am Übertragungsweg auf Bodenschlitze gesetzt.

Die SBB war in Cargovibes nicht involviert.

6.1.4 Shift2Rail FINE-2 und SILVARSTAR

FINE-2 und SILVARSTAR sind zwei Projekte aus der Technologie-Initiative Shift2Rail. Das Arbeitspaket WP8 von FINE-2 befasst sich mit Erschütterungen. Eine Aufgabe dabei ist eine Spezifikation für ein gemeinsames Prognosetool zu schreiben.
Die Implementierung und Validierung dieser Software erfolgen innerhalb des SILVARSTAR-Projekts. Für beide Projekte ist der Abschluss Ende 2022 geplant.

Bei diesen beiden Projekten ist die SBB nicht involviert.

6.2 SBB-interne Projekte

SBB-intern fand zwischen 1997 und 2000 ein Entwicklungsprojekt zur Unterschottermatte mit einer Projektsumme von ca. 1.4 Mio. CHF statt. Die Ergebnisse der Versuche in Raron, Rothrist und St-Aubin werden in Kapitel 8.2.2 vorgestellt.

Zwischen 2005 und 2007 wurde ein Entwicklungsprojekt zur Schwellenbesohlung abgewickelt, mit dem Einbau von weichen USPs in Pratteln. Aufgrund von fehlendem Schotter bei den Schwellenköpfen musste der Versuch abgebrochen und die USPs wieder ausgebaut werden. Die genaue Ursache des möglichen Schotterfliessens konnte nicht eruiert werden. An anderen Stellen im Netz haben die gleichen Schwellensohlen dieses Verhalten nicht gezeigt.

Aufgrund des steigenden Drucks bezüglich eines Inkrafttretens der VSE und fehlender kostengünstiger und effektiver Sanierungsmassnahmen wurde Ende 2010 ein dreijähriges Aktionsprogramm zum Erschütterungsschutz beschlossen mit dem Ziel, die Kosten für eine mögliche Sanierung des SBB-Netzes zu reduzieren. Die Projektsumme betrug ca. 1.5 Mio CHF. Der Fokus wurde auf folgende Massnahmen gesetzt: Schwellenbesohlung für die Streckengleise und für die Weiche, Bodenschlitz und Massnahmen beim Rollmaterial [37].

2016 wurde das fünfjährige «Entwicklungsprogramm EKS» gestartet. Das Programm wurde zu 100% von SBB-I finanziert mit einem Budget von ca. 800’000 CHF. Folgende Schwerpunkte bzw. Teilprojekte wurden festgelegt: Schwellenbesohlung, erschütterungsarme Weiche, Bodenschlitz, Massnahmen am Rollmaterial, dynamische Diagnose am Oberbau, Schadensmechanismen an der Infrastruktur und Verbesserung der Prognose.

Die konkreten Ergebnisse zu diesen Projekten sind in den einschlägigen Kapiteln dieses Dokuments beschrieben.

7 Einflussfaktoren

Im nachfolgenden sind die Einflussfaktoren auf EKS aufgelistet. Die Tabelle 9 soll eine einfache Übersicht geben, ob diese eine positive oder negative Wirkung auf EKS haben. Wie diese Einflussfaktoren sich auf den Anregungsmechanismen und die Minderungsmassnahmen detailliert auswirken, ist in den entsprechenden Kapiteln 2.3 und 8 beschrieben. Die Tabelle wurde aus [9] abgeleitet und wurde mit einigen Kommentaren und Änderungen ergänzt. Für die Aspekte, die in den nachfolgenden Kapiteln detailliert behandelt werden, ist der Verweis zur entsprechenden Kapitelnummer in der letzten Spalte ersichtlich.

Bei der Spalte «Wirkung» bedeutet ein Positivzeichen, dass der beschriebene Parameter EKS-mindernd wirkt, ein Negativzeichen, dass er eher erhöhte EKS verursacht.

Tabelle 9: Generelle Wirkung von einigen Parametern auf Erschütterungsimmissionen in Gebäuden - wenn nicht anders spezifiziert, aus [9]

Parameter			Wirkung	Kommentar	Quelle	Behandlung in den nachfolgenden Kap.
	Am Fahrzeug					
		Geschwindigkeitserhöhung	-	Sofern keine besondere Effekte angeregt werden		8.1.4
		Flachstellen, Ausbröckelung und sonstige Radschäden	-			8.1.1
		Radpolygonisierung	-			8.1.1
		Geringe unabgefederte Radsatzmasse	+	Trifft bei steiferen Böden zu (Weg-Geschwindigkeit-Anregung massgebend)	UIC State-of-the-art report [1] Kap. 6.2	8.1.2
		Geringe Achslast	+	Trifft bei weichen Böden zu (quasi-statische Anregung massgebend)	UIC State-of-the-art report [1] Kap. 6.2	-
		Drehgestell- und Achsabstände	+ oder -	je nach Fahrgeschwindigkeit und Kombinierung mit anderen Resonanzfrequenzen		-
		Vorhandensein einer sekundäre Federungsstufe	+		Cargovibes D3.1 [38] , Kap 7	8.1.3
	Am Oberbau und Trassierung					
		Gute Gleislage	+			8.2.8
		Unstetigkeit in der Schiene in Längsrichtung (Schweissstellen, Weichenherzstück, Dehnungsfugen)	-		UIC State-of-the-art report [1] Kap. 1.3	8.2.8

Parameter			Wirkung	Kommentar	Quelle	Behandlung in den nachfolgenden Kap.
		Grosse, elastisch abgefederte Oberbaumasse (MF-System)	+			8.2.6
		elastischer Oberbau	+			8.2.2, 8.2.3, 8.2.4, 8.2.5, 8.2.7
		plötzliche Änderung der Oberbausteifigkeit	-		UIC State-of-the-art report [1] Kap. 1.3	2.3.2
		kontinuierlich-elastische Gleislagerung	+			-
	Am Übertragungsweg					
		Steifer Boden (grosser Schubmodul)	+			8.2.9
		Lockerboden (niedriger Schubmodul)	-			-
		Einbauten im Boden, die die Bereiche um die Strecke und Gebäude verbinden (Körperschallbrücke)	-			-
	Am Gebäude					
		elastisch abgefederte Gebäude	+			-
		Holzbalkendecken	-			-
		Höhere Entfernung vom Emissionsort	+			-

8 Minderungsmassnahmen

8.1 Am Fahrzeug

Die Fahrzeugparameter, die einen Einfluss auf Erschütterungen und Körperschall haben, wurden im vorangehenden Kapitel aufgelistet. Diese sind vor allem: die Fahrgeschwindigkeit, die Radunrundheiten, die unabgefederte Radsatzlast, die Achslast und die Fahrzeugfederung. Auch die geometrischen Parameter wie die Achsabstände und Drehgestellabstände könnten einen Einfluss haben, jedoch im tiefen Frequenzbereich (vgl. Abbildung 3), und bei weichen Böden und daher in der Schweiz generell weniger von Bedeutung.

Diese Parameter wirken sich auf die Rad-Schiene-Kontaktkräfte und ihrem Frequenzinhalt und somit auf die Anregung von EKS aus. Durch konstruktive oder konzeptuelle Änderungen während der Fahrzeugentwicklung sowie durch Anpassungen in den Instandhaltungsvorgaben ist eine Reduktion von Erschütterungen und/oder Körperschall möglich.

In den folgenden Unterkapiteln werden diese Minderungsmöglichkeiten einzeln behandelt. Dabei werden durchgeführte Versuche und einige Referenzen präsentiert, die sich mit der Untersuchung und mit dem Potenzial dieser Minderungsmöglichkeiten befasst haben.

8.1.1 Radunrundheiten

8.1.1.1 Definitionen

Stochastische Radunrundheiten
Radunrundheiten sind geometrische Formabweichungen am Umfang der Radlauffläche, verglichen zum perfekt runden Rad. Diese Abweichungen können «stochastisch» oder «singulär» sein, wie zum Beispiel Flachstellen, Ausbrüche, Ausbröckelungen, Abplattungen, usw. Sie treten einmal pro Radumdrehung auf, sind jedoch hinsichtlich ihrer Auswirkungen vergleichbar mit Isolierstössen, Herzstücklücken, usw. Diese weisen daher neben periodischen auch breitbandigen Erregungen auf. [14]
Eine Klassifizierung dieser Schäden ist in der EN 15313 Anhang C, in [39] und in [40] zu finden. Im Anhang G der Norm sind zulässige Rundlaufabweichungen (informativ) angegeben.

Periodische Radunrundheiten
Radunrundheiten können auch eine Periodizität aufweisen und werden dann als «Polygonisierung» bezeichnet. Die Periodizität der Unrundheit wird als Radordnung ausgedrückt. Die Rundlaufabweichung kann durch mehrere Methoden gemessen werden. Diejenigen, welche bei den SBB zum Einsatz kommen, sind im Kapitel 8.1.1.2 vorgestellt.

Durch eine FFT-Analyse der gemessen Rundlaufabweichung kann der Beitrag jeder Harmonischen bzw. Radordnung ermittelt werden. Aus der massgebenden Radordnung(en) kann der Frequenzinhalt der Anregung ermittelt werden (vgl. Formel (1)). Die Ausprägung der Radordnungen wird üblicherweise als Radrauheitsspektrum dargestellt, siehe hierzu Erläuterungen im RIVAS Bericht D2.4 Kapitel 5.2 [41].

Stochastische und periodische Unrundheiten verursachen hohe dynamische Lasten, die zu erhöhten EKS führen und auch im Fahrzeug spürbar sind und zu einem verringerten Fahrkomfort führen. Diese Korrelation konnte aufgrund von Simulationen und Messungen nachgewiesen werden (siehe Kapitel 8.1.1.2 und 8.1.1.4). Hohe dynamische Lasten sind nicht nur für Erschütterungen nachteilig, sondern können auch für Fahrzeug- und Gleiskomponenten schädlich sein und demnach höhere Instandhaltungskosten verursachen.

8.1.1.2 Messung und Quantifizierung von Unrundheiten

Für die Messung und Quantifizierung von Unrundheiten kommen bei der SBB verschiedene Werkzeuge und Verfahren zum Einsatz.

Handwerkzeug Calipri
In der Werkstatt kommen handbediente Werkzeuge zum Einsatz, die eine direkte Messung erlauben. Die Durchführung solcher Messung bedingt aber, dass der Radsatz für die Messung angehoben wird, was relativ zeitaufwändig ist. Bei der SBB Cargo wird die Radunrundheit an den Lokomotiven in der präventiven Instandhaltung mit dem optischen Messgerät Calipri des Hersteller NextSense mit dem entsprechenden Zusatzmodul gemessen (siehe Datenblatt [42]).
Bei SBB-P erfolgen keine Messungen mit dem Handwerkzeug, sondern die Unrundheiten werden durch die ARGUS-Anlage oder durch die Radsatz-Drehbänke vor und nach der Reprofilierung gemessen. Dank der Radkraftmessungen durch die RLC-Anlagen werden auch Informationen zu den Radunrundheiten gewonnen.

ARGUS Anlage (nur in Genf)
Auf einem Rangiergleis aussen in der Serviceanlage Genf ist die Überfahrmessanlage ARGUS-II installiert, welche Radsätze bei einer maximalen Geschwindigkeit von 10km/h vermisst. Im Gegensatz zu den anderen Überfahrmessanlagen der SBB misst die ARGUS-Anlage zusätzlich zu den Raddurchmessern und -profilen noch die Radunrundheiten. Diese Messung erfolgt nicht direkt an der Fahrfläche, da es beim Überfahren nicht möglich ist, sondern an der Spurkranzkuppe von unten aus durch mechanische Wegsensoren. Daraus wird die Rundheitsabweichung im Bereich der Fahrfläche rechnerisch abgeleitet [43].

Unterflurdrehbänke

Unterflurdrehbänke (UFD) sind CNC-Bearbeitungsmaschine zur Reprofilierung von Radsätzen im eingebauten Zustand. Diese Anlagen sind kein Messmittel im eigentlichen Sinne, besitzen jedoch ein Messsystem zur Verifizierung der durchgeführten Bearbeitung. Die SBB besitzt drei UFDs (in Zürich, Basel und Genf). Standardmässig messen und protokollieren alle drei Anlagen den Rundlauf (maximale Unrundheit als Einzahlwert) jedes Rades. Die neuste UFD in Zürich erfüllt einerseits die Anforderungen eines K2-Messmittels nach DIN 27201-9 und ist anderseits in der Lage, die Unrundheiten über die Radabwicklung zu protokollieren. Somit kann diese Anlage auch als Messmittel der Radunrundheiten dienen [43].

Radlast-Checkpoints (RLC) – Zugkontrolleinrichtungen (ZKE)

Mit Zugkontrolleinrichtungen der SBB-Infrastruktur werden an punktuellen Orten des Netzes sicherheitsrelevante Kontrollen gemacht, wie z.B. zur Detektion von Lichtraumprofilüberschreitungen oder von Heissläufern. Weiter werden Achslasten ermittelt, um Lastüberschreitungen und Schieflasten zu identifizieren, die die Infrastruktur beschädigen oder zu Zugentgleisungen führen könnten. Diese Messung erfolgt an den sogenannten Radlast-Checkpoints, kurz RLC. Dank der Fahrzeugidentifikation können die detektierten Ausreisser aus dem Betrieb genommen werden.

Stand 2022 gibt es 33 solcher RLC-Anlagen auf dem Netz [44]. Konkret wird die Schubspannung mit Dehnmessstreifen in der Schiene an mehreren Punkten innerhalb eines 3 bis 15m langen Gleisstücks gemessen und daraus eine durchschnittliche Radaufstandskraft ermittelt. Dank der Algorithmik können die statische Radlast und der dynamische Anteil der Radaufstandskraft abgeleitet werden. Detaillierte Informationen zum Post-Processing sind in [45] zu finden.

Es laufen aktuell Untersuchungen an den RLCs BRU15 (Brunnen) und DK756 (Däniken) mit Beschleunigungsmessungen am Schienenfuss für die Ermittlung der Radabwicklung [46]. Das entsprechende Post-Processing ist in [47] dokumentiert. Finale Ergebnisse bzw. eine Validierung dieses Verfahrens liegen noch nicht vor.

8.1.1.3 Auswirkung von Unrundheiten auf EKS

Für die RIVAS Deliverable D2.2 [48] wurden Simulationen von Raddefekten mit Parametervariation durchgeführt und die Schwingschnelle im 8 m-Abstand ermittelt. Dabei wurden zwei Modelle kombiniert: «TRAFFIC» für den Rad-Schienen-Kontakt + Oberbau und «DIFF» für den Boden.

Für die Flachstelle wurde beobachtet, dass die Schwingschnelle bei zunehmender Flachstellenlänge zunimmt. Diese steigt meistens auch bei zunehmender Geschwindigkeit, wobei Gegenbeispiele bei bestimmten Flachstellen- und Bodenparametern aufgezeigt wurden. Die

Autoren haben diese Feststellung durch die Verschiebung des Frequenzinhalts der Anregung zu höheren Frequenzen, die weniger gut durch den Boden übertragen werden, erklärt. Schliesslich wurde dargelegt, dass der Einfluss der Achslast im Fall der Flachstelle wenig Einfluss auf EKS hat.

Auch polygonisierte Räder wurden simuliert (unter Berücksichtigung der Gleisqualität nach dem Bericht ORE B176). Dabei wurde festgestellt, dass die ermittelte Schwingschnelle merklich niedriger ist, als bei Flachstellen, was durch die Versuche der SBB nicht bestätigt werden konnte.

In den verschieden RIVAS-Berichten wird auf zwei Testkampagnen in der Schweiz zurückgegriffen.
Die erste aus dem Mai 2013 mit einem Versuchszug, bei welcher EKS an zwei Standorten gemessen (Dottikon und Brunnen, bestehende Radlastcheckpoints-Messstationen) wurden. Der Testzug bestand aus Güterwagen mit unterschiedlichen Unrundheiten, inkl. ein Drehgestell mit Flachstellen, sowie unterschiedliche Achslasten und unabgefederte Radsatzmasse. Die Rauheitspegel der Räder zur Quantifizierung der Unrundheiten wurden dokumentiert. An beiden Enden der Komposition wurden Lokomotiven vom Typ Re420 eingesetzt, eine davon mit einem mittleren Rauheitspegel und die andere mit einem hohen Pegel. Die Bodeneigenschaften in Dottikon wurden als repräsentativ für einen durchschnittlichen Boden in der Schweiz angesehen.

Die zweite Kampagne wurde nicht direkt im Rahmen vom RIVAS-Projekt durchgeführt aber bei der SBB vorgängig vorhandene Messdaten aus 2010 wurden verwendet, um bestimmte Abhängigkeiten aufzuzeigen. Auch in diesem Fall wurden Erschütterungsmessungen an drei RLC-Standorten (Thun, Ligerz und Cadenazzo) erfasst.

In der ersten Messung in Dottikon und Brunnen konnten deutliche Unterschiede in den EKS Messungen zwischen den Fahrzeugen mit gutem und schlechtem Radzustand beobachtet werden. Konkret wurden folgende Feststellungen gemacht [48] [49] [50]:

- Bei den Re 420-Lokomotiven gab es für bestimmte Terzbänder zwischen 10 bis 20 dB Unterschied.
- Diese Feststellung gilt für beide Standorte, wobei der Frequenzinhalt vermutlich aufgrund der unterschiedlichen Bodeneigenschaften nicht vergleichbar war.
- Somit widerspricht dies den obenerwähnten Simulationsergebnissen aus Deliverable D2.2 [48].
- Bei den Güterwagen betrug der maximale Unterschied etwa 5dB.
- Aufgrund der gemessenen Rauheitspegel wurde folgende Korrelation festgestellt: innerhalb eines definierten Frequenzterzbands wirkt sich eine Reduktion der Unrundheit von X dB um X dB im Schwingschnellenpegel aus.
- Die Flachstelle wirkt sich mit 5-10 dB ab 30 Hz je nach Terzband und Fahrgeschwindigkeit aus. Mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit verschiebt sich das Maximum in höhere Terzbänder.

- Die Fahrgeschwindigkeit beeinflusst den Frequenzinhalt der Antwort zu einer Anregung durch periodische Unrundheiten (siehe Abbildung 24). Der Einfluss der Fahrgeschwindigkeit wird im Kapitel 8.1.4 detaillierter präsentiert.

8.1.1.4 Minderung von Unrundheiten durch Optimierung in der Instandhaltungsplanung

Potenzial der Instandhaltungsintervalle

Die obengenannten Messungen in Brunnen wurden über etwa 6 Monate durchgeführt, um statistische Auswertungen zu ermöglichen. Die Testbedingungen und Ergebnisse sind im Deliverable D2.9 [49] Kapitel 5 präsentiert.

In der Abbildung 9 wird die gemessene Schwingschnelle der beiden Lokomotiven in der Testkomposition mit dem Median- und 95%-Perzentilwert der Re 420-Durchfahrten in Brunnen verglichen. Dabei zeigt sich, dass die zwei ausgewählten Testlokomotiven den 50%- und 95%-Perzentilwerten der Flotte gut abbilden können.

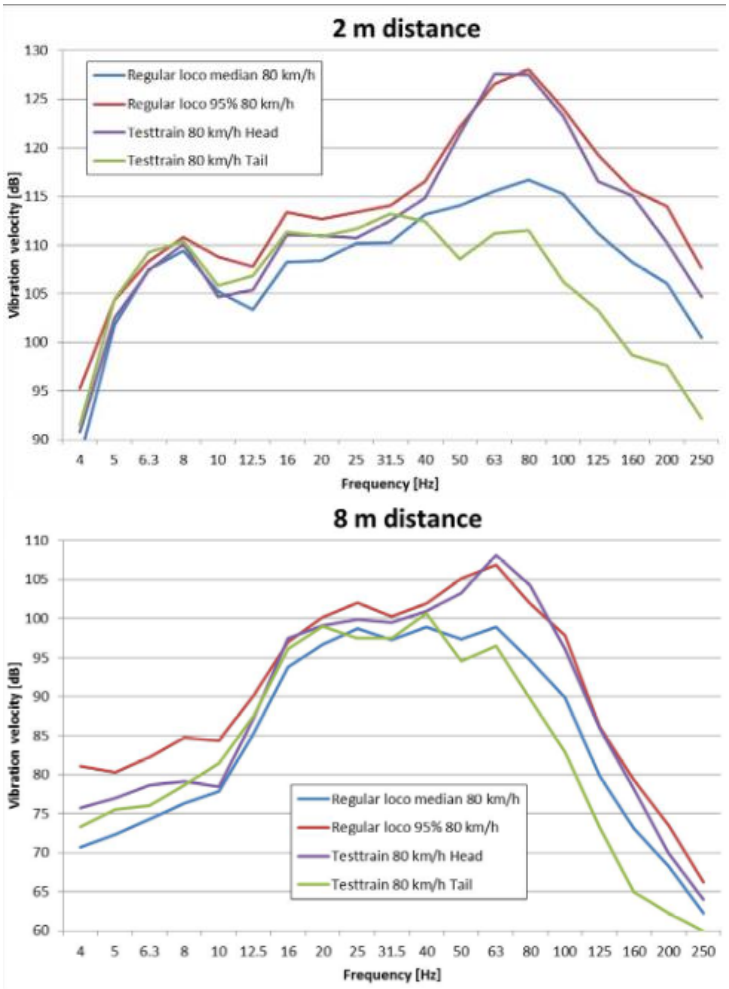


Abbildung 9: Emissionsspektrum einer Stichprobe von Re420-Individuen verglichen mit den beiden Lokomotiven der Testkomposition – aus D2.9 [49]

Aufgrund der in Kapitel 8.1.1.3 erläuterten Differenz in den EKS-Immissionen zwischen beiden Testlokomotiven von 10 bis 20 dB, bedeutet dies, dass die Reprofilierung gezielter Individuen mit grossen Rauheitspegeln zur einer massgebenden Minderung von EKS führen kann.

Eine gleichwertige Auswertung wurde an den Sgns-Güterwagen durchgeführt und könnte eine Verbesserung von bis 4-5 dB bis 63 Hz und bis 10 dB oberhalb davon bringen.

Auch Passagierzüge der Flotten ICN, Domino und Flirt wurden untersucht. Je nach Flotte und Drehgestelltyp war das Minderungspotenzial deutlich kleiner und beträgt etwa 3-4 dB. Ebenfalls ist es in den verschiedenen Frequenzbändern unterschiedlich.

Dies wird anhand der Differenz zwischen dem 95%-Perzentil- und dem Medianwert quantifiziert. Ist dieser gross, ist eine relevante Streuung zwischen den Individuen vorhanden, die durch die Eliminierung der Maximalwerte, d.h. konkret durch eine Wiederherstellung des Radrundheit, reduziert werden könnte.

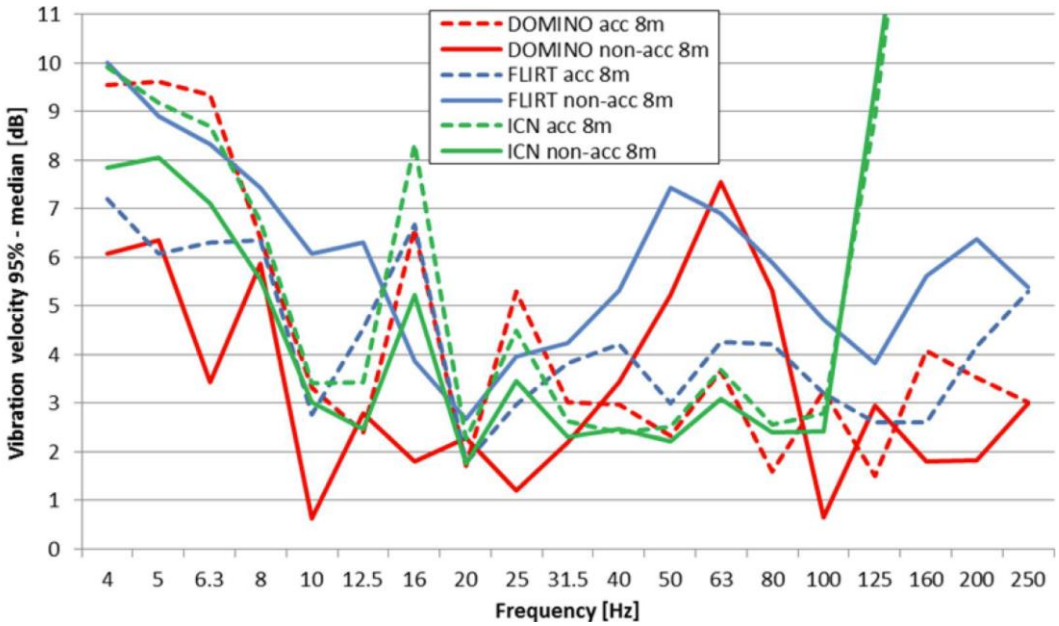


Abbildung 10: Schwingschnellenspektren 95%-Wert minus Medianwert im 8m-Abstand für die Flotten Domino, Flirt und ICN für v=100-120 km/h - aus D2.9 [49]

Auch aus der früheren Kampagne in Thun, Ligerz und Cadenazzo wird mit einer statischen Auswertung der EKS-Messung nach Flotte gezeigt, dass bei den Flotten mit grosser Streuung eine mögliche Minderung durch ein rechtzeitiges Abdrehen der Räder erreicht werden könnte (Abbildung 11 und Abbildung 12 sowie aus Tab. 6.2 in D2.9 [49]). Konkret waren dabei die Güterwagen mit Y25-Drehgestellen mit 1.8 m-Achsabstand, die Dominotriebwagen- und die EWII-Flotte besonders auffällig.

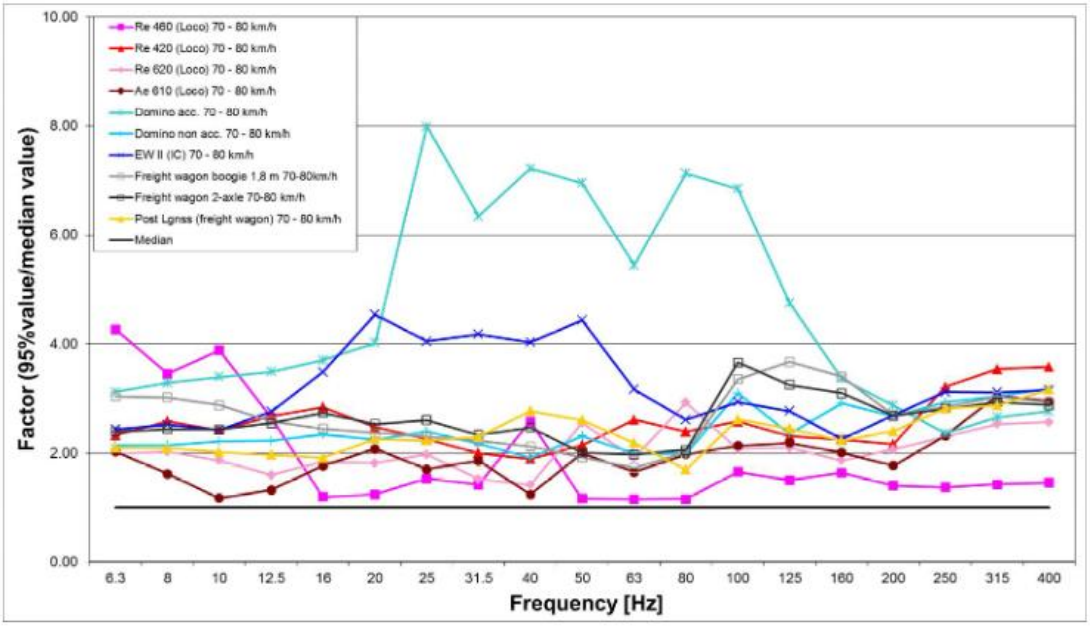


Abbildung 11: Verhältnis der Schwingschnellenspektren des 95%-Werts zum Medianwert bei den Vorbeifahrten in Ligerz bei v=60-70km/h im 8m-Abstand - aus D2.9 [49]

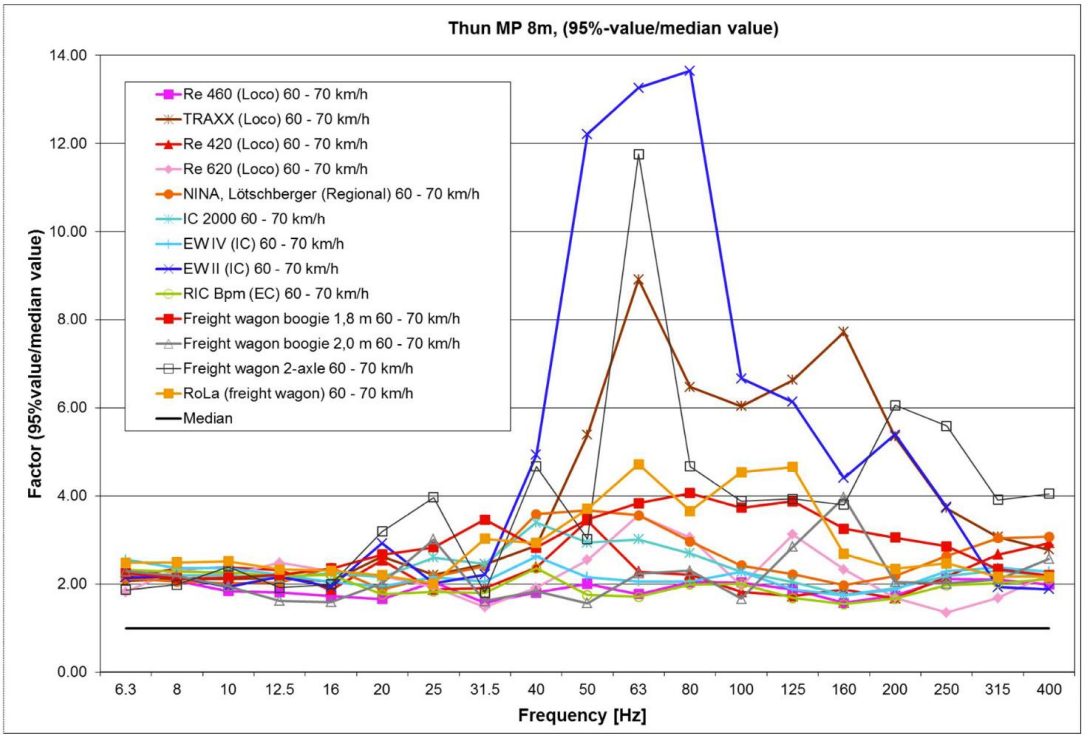


Abbildung 12: Verhältnis der Schwingschnellespektren des 95%-Werts zum Medianwert bei den Vorbeifahrten in Thun bei v=60-70km/h im 8m-Abstand - aus D2.9 [49]

Aus Tab. 6.2 in D2.9 [49] ist jedoch bemerkenswert, dass das Potenzial nicht nur vom Fahrzeugtyp abhängig ist, sondern innerhalb eines Fahrzeugtyps auch vom Beobachtungsstandort bzw. von den Bodeneigenschaften.

Auch im Rahmen vom parallel zum RIVAS-Projekt laufenden SBB-Aktionsprogramm zu EKS (2011-2013) wurde das Fazit gezogen, dass ein koordinierter Radunterhalt Potenzial zur Verbesserung zeigt. Aber auch, dass eine gesamthafte Beurteilung der Kostenauswirkungen von unrunden Rädern und ihrer Dynamik auf den Unterhalt und die Erneuerung der Fahrbahn fehlt [37].

Überwachung der Unrundheiten mit den RLCs

Bis im Jahr 2013 kamen Warngrenzen bzw. Betriebsgrenzen für die durch die RLCs gemessenen gesamte Radaufstandskraft zum Einsatz, die zu einer Meldung an das EVU bzw. Aussetzen des Fahrzeugs geführt haben [51]. Im Rahmen einer Masterarbeit [52] wurde untersucht, ob eine aus den RLC-Daten abgeleitete Warngrenze definiert werden kann, die eine Unrundheit von 0.6mm widerspiegeln. Dafür wurde ein statischer Ansatz am Beispiel der Re420-Flotte gewählt. Die Auswertung ist für Geschwindigkeitsbereiche auf dem RLC von 20km/h erfolgt. Die bei der Reprofilierung gemessene Unrundheit wurde der bei der letzten 7 Durchfahrten gemessenen Radaufstandskraft gegenübergestellt und dies für jeden Durchfahrtsgeschwindigkeitsbereich. Für 3 von 5 Geschwindigkeitsbereiche bzw. für 65% aller RLC-Überfahrten wurde ein ausreichender linearer Zusammenhang beider Messgrössen festgestellt. Somit wurde die Sinnhaftigkeit der Definition eines Warnwerts gezeigt. Der Ansatz wurde an Personenfahrzeugen überprüft, mit der Gegenüberstellung der Unrundheit in diesem Fall mit dem dynamischen Beiwert, der den Beladungszustand des Fahrzeugs berücksichtigt.

Mit diesem Ergebnis wurde 2014 für Personenzüge des EVU SBB-P eine Warngrenze bei dynamischen Beiwerten von 1.8 eingeführt. Bei einer Überschreitung dieses Wertes bei 3 von 5 RLC-Überfahrten wird eine Überprüfung des Radzustands in der Werkstatt eingeleitet [51]. Im Bericht [53] unter Kapitel 2.2 wird die Verwendung des dynamischen Beiwerts als Instandhaltungskriterium aufgrund seiner Abhängigkeit mit der statischen Radlast nochmal hinterfragt. Im gleichen Bericht ist ebenfalls eine statistische Betrachtung enthalten, die eine Abnahme der dynamischen Radkräften zwischen den Jahren 2015 und 2021 für die meisten untersuchten Fahrzeugtypen aufzeigt und je nach betrachteten Perzentilen von 5 bis 45% beträgt (siehe Abbildung 13).

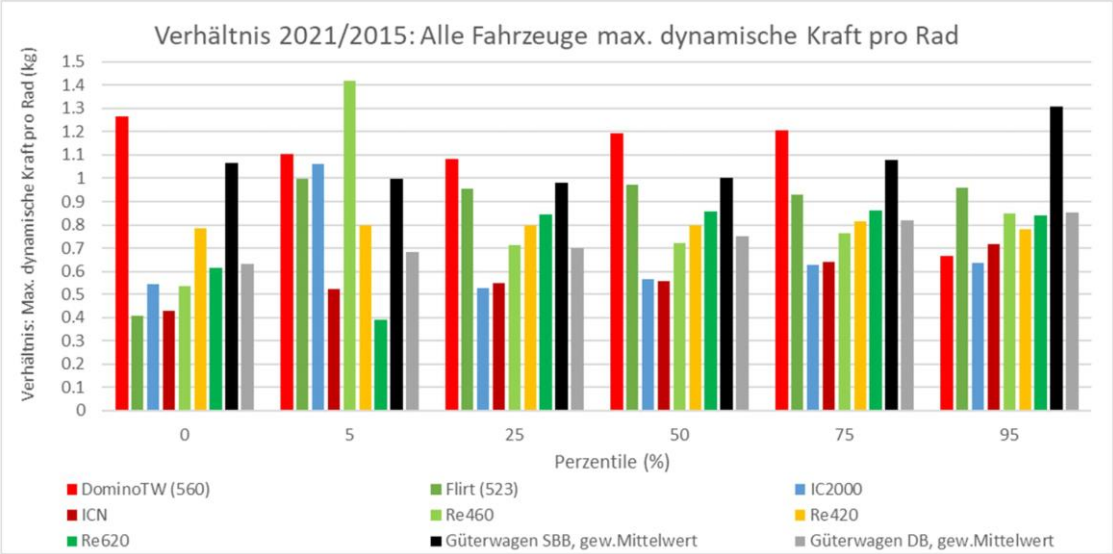


Abbildung 13: Verhältnis von 2021 gegenüber 2015 für alle Fahrzeugtypen mit max. dynamischer Kraft pro Rad für 2021, Quartile 0%, 5%, 25%, 50%, 75%, 95%. Werte grösser 1 bedeuten Verschlechterung gegenüber 2015 aus [53]

In der Analyse [54] wurde anhand eines Vergleichs der gemessenen Radaufstandskräfte und dynamischen Beiwerte zwischen den Flotten FV-Dosto und IC2000 aufgezeigt, dass die gleich definierte Warngrenze zu unterschiedlichen Schlageinwirkungen auf das Gleis führen (siehe Abbildung 14).

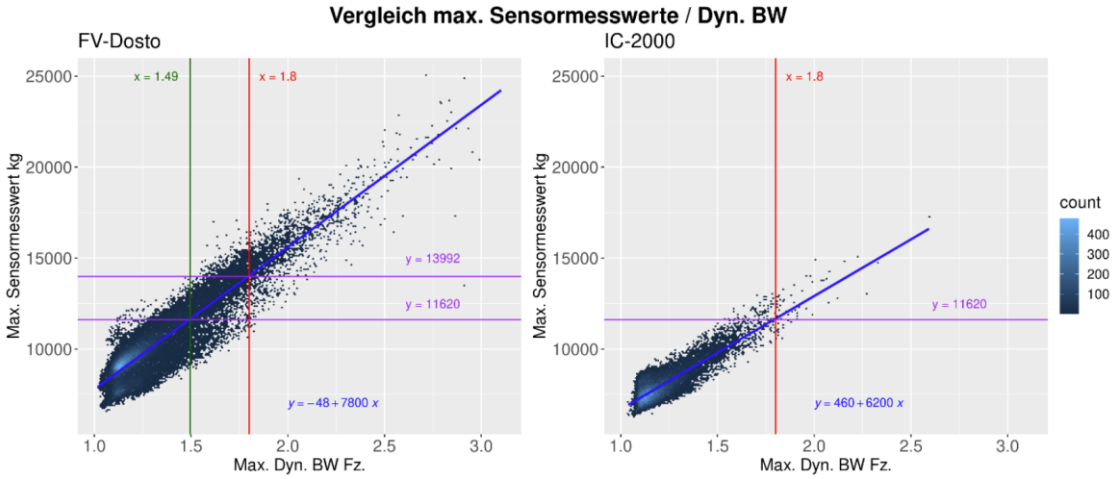


Abbildung 14: Grafische Darstellung der Berechnung des nach unten korrigierten Eingriffswertes (dynamischer Beiwert) für die FV-Dosto Flotte mittels eines Vergleiches der maximalen Sensormesswerte und der dynamischen Beiwerte der IC-2000 Flotte – aus [54]

Im Bericht [53] unter Kapitel 4.2 sind Vorschläge für zukünftige Untersuchungen zu dynamischen Radkräften im Hinblick auf Erschütterungen aufgelistet.

8.1.1.5 Minderung von Unrundheiten – Potential des Fahrzeugdesigns

Radwerkstoffe

Mit der Auswahl von Radwerkstoffen mit erhöhtem Widerstand gegen Verschleiss und gegen Rollkontaktermüdung kann die Entwicklung von Unrundheiten gebremst werden. Dies wurde anlässlich verschiedener Versuche, auch bei der SBB, gezeigt [55] [56] [57].

Die Deutsche Bahn hat sich Anfang der Nullerjahre für einen japanischen Radwerkstoff interessiert, was einige Jahre im Einsatz auf den Shinkansen-Zügen im Einsatz war [58]. Dieser Werkstoff wies eine hohe Zugfestigkeit auf, wie der Standardwerkstoff R9 (oder ER9 nach EN 13262), der eher für Spezialfälle wie die RoLa eingesetzt wird, aber die Bruchzähigkeit vom verbreiteten ER7. Dieses Material zeigt auch eine hohe Reinheit und eine äusserst homogene Struktur.

Auch der Werkstoff ADI (Austempered Ductile Iron) war von Interesse mit einer hohen Zugfestigkeit und hoher Widerstand gegen Verschleiss und Ermüdung. Er enthält Kugelgraphit, der wie ein Schmiermittel zwischen Rad und Schiene wirkt und somit den Verschleiss mindert.

Es wurden Tests an einem Rollprüfstand durchgeführt. Der Radsatz mit dem Standardradwerkstoff wies eine deutlich kleinere Laufleistung vor dem Auftreten von Unrundheiten wie der Shinkansen-Stahl (vgl. Abbildung 15).

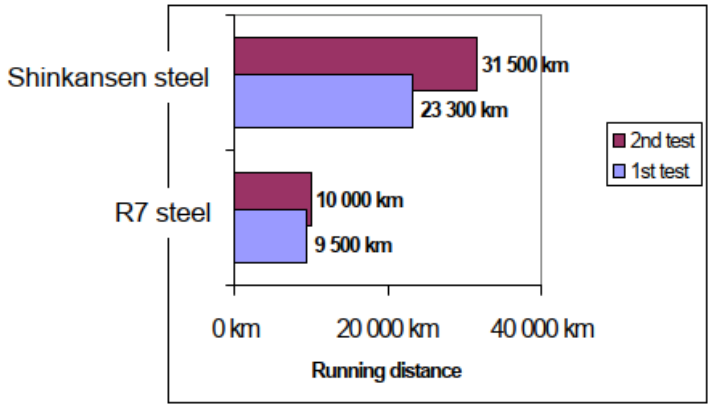


Abbildung 15: Laufleistung vor dem Auftreten von Unrundheiten im Vergleich – aus [58]

Auch die Betriebserprobung mit dem Shinkansen-Werkstoff an ICE-Laufdrehgestellen hat deutlich höhere Reprofilierungsintervalle ermöglicht (siehe Abbildung 16). Gemäss dem

Paper [59] bestanden in 2012 die Hälfte der Räder der ICE1- und ICE2-Flotten aus diesem Werkstoff.

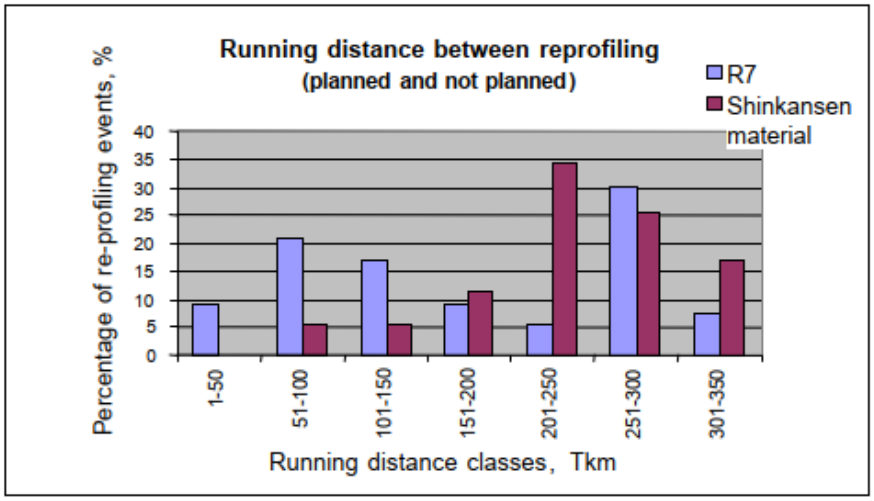


Abbildung 16: Laufleistung zwischen Reprofilierungen zwischen den Werkstoffen R7 und Shinkansen, nach Laufleistungsklassen – aus [58]

Beim Werkstoff ADI wurde eine Laufleistung höher als 50'000km auf dem Rollprüfstand beobachtet, wobei der Schmiereffekt auf dem Netz wahrscheinlich kleiner ausfallen würde im Vergleich mit dem auf den 6m-langen Schienen des Prüfstands.
Die Deutsche Bahn hat die Fertigung von Testradsätzen mit diesem Material in Auftrag gegeben, aber ihre Ultraschallprüfungen haben unzulässige Ergebnisse ergeben, so dass die Betriebserprobung nicht stattgefunden hat.

Bei der SBB wurde eine erste Betriebserprobung an der Re420/Re620-Flotte mit dem härteren Radwerkstoff Exzellent als Ersatz für B4N durchgeführt. Es wurde eine etwa 20% höhere Laufleistung aufgrund eines kleineren Verschleisses erzielt, jedoch wurden keine Verringerung der Ausbröckelungen, die bei diesen Lokomotiven problematisch waren, festgestellt [55] [56].

Die zweite Betriebserprobung fand an der NPZ-Triebwagenflotte statt. Dabei wurden die Werkstoffe B5T Uplos und Superlos vom Hersteller Lucchini als Ersatz für B4N getestet.
Hinsichtlich des Verschleissabtrages im Betriebseinsatz (Materialabtrag durch Rad-/Schienen-Kontakt) zeigten die beiden Werkstoffe ein ähnliches Verhalten. Der spezifische Verschleissabtrag liegt beim Superlos leicht unterhalb desjenigen beim B5T Uplos. Auch bezüglich der Schädigungen an den Radlaufflächen zeigt sich beim Superlos ein signifikant günstigeres Verhalten als beim B5T Uplos. Dies wurde anhand der visuellen Begutachtung der Radlaufflächen, des Vergleichs der Durchmesserreduktion bei der Reprofilierung sowie der Reprofilierungsintervalle festgestellt [57].

Der Einsatz von optimierten Radwerkstoffen zeigt Potenzial für die EKS-Minderung, indem die Entwicklung von Unrundheiten und/oder von Rissen, Ausbröckelungen und Rollkontaktermüdungsdeffekten verzögert werden kann. Dieses Thema wird auch in den Projekten 3 und 5 der Systemführerschaft Interaktion Fahrzeug-Fahrweg Meterspur behandelt, wofür Ergebnisse noch ausstehend sind [60].

Schienenkopfkonditionierung vom Fahrzeug aus
Mit einer Schienenkopfkonditionierung wird angestrebt, den Verschleiss und die Bildung von Rollkontaktermüdungsdeffekten an Schienen- und Radlaufflächen durch das Einstellen eines optimierten Reibwerts zu reduzieren und ohne das Traktions- und Bremsverhalten zu beeinträchtigen. Im Rahmen der Kooperation der schweizerischen Meterspurbahnen «RAILplus» wird ein Projekt zur Schienenkopfkonditionierung abgewickelt. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts lagen hierzu nur ein Projektbeschrieb und noch keine Ergebnisse vor [61].

Bei der BLS ist ein Testzug der RABe535-Flotte mit einer fahrzeugseitigen Schmieranlage mit dem Laufflächenkonditioniermittel KELTRACK ausgerüstet worden, mit dem Ziel RCF-Risse zu reduzieren und die Laufleistung zu erhöhen [62]. Konkrete Versuchsergebnisse diesbezüglich liegen noch nicht vor.

8.1.2 Unabgefederte Radsatzmasse

Die unabgefederte Radsatzmasse ist die Masse der Drehgestellkomponenten, die unterhalb der Primärfederstufe angebracht ist. Ausgedrückt für eine Achse beinhaltet sie konkret die Masse des kompletten Radsatzes, der Achsendbelegung (Lager + eventuelle Ausrüstungsteile), der eventuellen Rad- und Wellenbremsscheiben und je nach Konzept eines Anteils des Achslenkers und bei Triebradsätzen, des Massenanteils des Antriebs, der sich auf die Radsatzwelle stützt.

8.1.2.1 Auswirkung der unabgefederten Radsatzmasse auf EKS

Der Einfluss der unabgefederten Radsatzmasse (kurz unabgefederte Masse) auf EKS wurde im Rahmen vom RIVAS Projekt WP5 ausführlich behandelt. Im State-of-the-Art-Bericht zum Einfluss des Rollmaterials [3] wurden Simulationsergebnisse von Parameterstudien aus zwei früheren Forschungsprojekten präsentiert.

Mit dem Ansatz im RENVIB II Projekt [36] konnte ein Einfluss der unabgefederten Masse im Frequenzbereich von 25 bis 125Hz festgestellt werden. Eine Reduzierung dieser Masse wirkt sich positiv auf EKS aus, wobei die Grösse der Einfügedämmung in einem Terzband abhängig von der Masse ist.

Die Ergebnisse aus dem Projekt SP18 der Universität Chalmers (Abbildung 17) zeigen einen deutlichen Einfluss der unabgefederten Masse (Parameter X3) auf die Erschütterungen im 0-2m-Abstand zum Gleis.

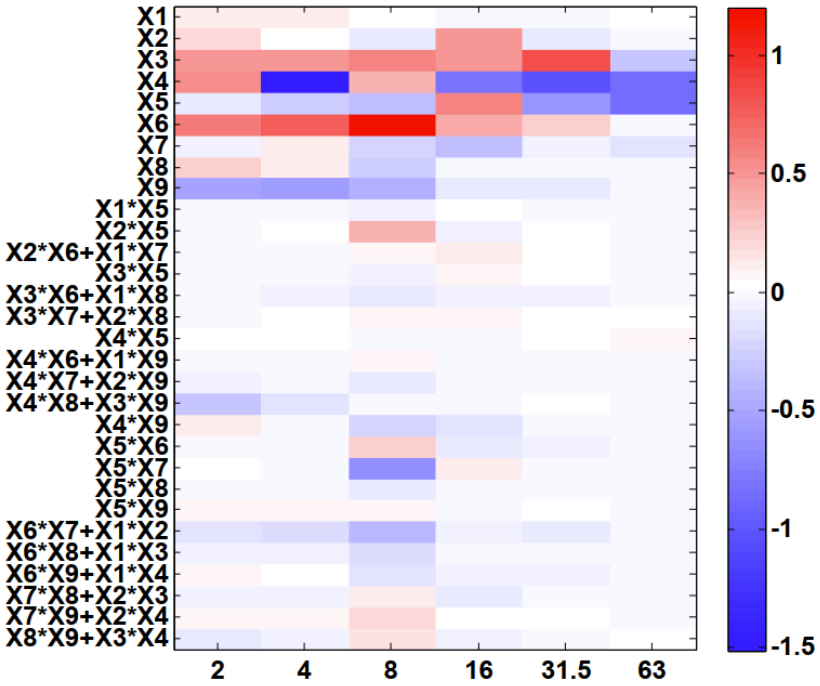


Abbildung 17: Ergebnisse der Parameterstudie für die dynamische Antwort. Dargestellt sind die Koeffizienten der linearen Regression zwischen Parameter und Erschütterungsamplitude im jeweiligen Oktavband. Dunkle Felder zeigen eine grosse Abhängigkeit des Parameters mit der Erzeugun von Erschütterungen, helle oder weisse Felder kleine bis keine Abhängigkeiten. X1: Wagenkastenmasse, X2: Masse des Drehgestellrahmens, X3: Radsatzmasse, X4: Achsabstand, X6: Primärsteifigkeit, weitere Parameter siehe D5.1 [3]

Der Bericht D5.1 [3] zieht folgende Schlussfolgerung: eine Änderung der unabgefederten Masse führt zu einer Frequenzverschiebung in der Fahrzeugrezeptanz. Wie diese sich auf EKS auswirkt, muss gesamtheitlich mit der Gleisrezeptanz und mit dem Frequenzinhalt der Radunrundheiten und Gleisstörungen betrachtet werden.
Im Deliverable D5.2 [63] wurde der gleiche Modellierungsansatz wie im Kapitel 8.1.1.3 erwähnt verwendet, um eine weitere Parameterstudie zu realisieren. Der Einfluss der unabgefederten Masse wird ebenfalls ab etwa 20Hz deutlich, für die drei unterschiedlichen Standorte, und steigt mit einer zunehmenden Fahrgeschwindigkeit.

Im Rahmen der Arbeiten zum Deliverable D5.4 [64] wurde die Modellierung verfeinert und die erste Biegeeigenfrequenz des Radsatzes berücksichtigt. Bei den untersuchten Varianten liegt diese Eigenfrequenz zwischen 80-100Hz und somit in einem für EKS relevanten Frequenzbereich. Es konnte jedoch kein relevanter Einfluss der berücksichtigten Radsatzbiegung auf EKS festgestellt werden.

Für die Messkampagne in Dottikon (siehe Beschreibung in Kapitel 8.1.1.3) wurde die Zusammenstellung der Testkomposition so gestaltet, dass Wagen mit verschiedenen unabgefederte Massen eingereiht wurden, um diesen Einfluss durch Messungen nachzuweisen. Im Nachgang hat sich herausgestellt, dass der Wagen mit der grössten unabgefederten Massen auch höhere Radunrundheiten aufwies, und somit liess sich dieser Einfluss nicht direkt ableiten. Die Achslasten beider Fahrzeuge waren vergleichbar (4.8 t vs 4.9 t). Eine qualitative Zunahme aufgrund der erhöhten unabgefederten Masse (1610 kg vs 1060 kg) konnte beobachtet werden. Mit der Feststellung, dass XdB Abnahme im Rauheitspegel zu XdB im Schwinggeschwindigkeitspegel in einem bestimmten Terzband führen (siehe 8.1.1.3), wurde geschätzt, dass die 550 kg Zunahme sich mit einer EKS-Zunahme von 2 bis 4 dB auswirken (siehe Abbildung 18 bzw. D5.6 [50]).

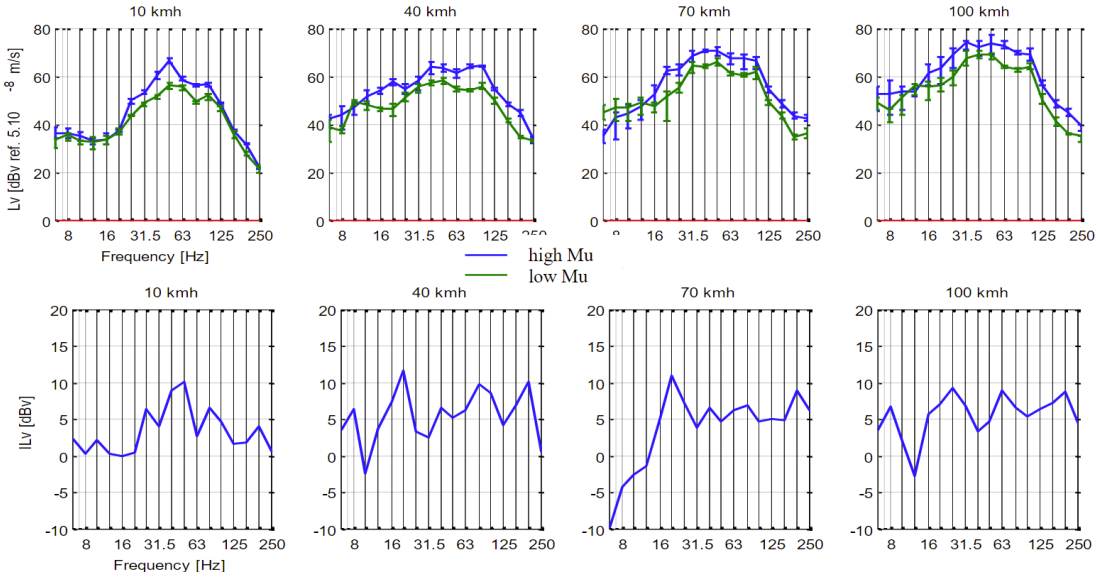


Abbildung 18: Einfluss der unabgefederten Massen. Oben: Schwingschnellenpegel, unten: Pegeldifferenz / Einfügedämmung – aus D5.6 [50]

8.1.2.2 Optimierungen im Fahrzeugdesign

Damit diese Feststellung eine Minderungsmassnahme wird, sind Massenoptimierungen im Drehgestell notwendig.

Optimierung dank Antriebskonzept

Ein Hebel für eine Reduktion der unabgefederten Masse besteht in der Antriebsanordnung im Drehgestell. Üblicherweise wird zwischen den drei folgenden Anordnungen unterschieden:

- Unabgefederter Antrieb oder Tatzlagerantrieb (*nose-suspended drive*): das Grossrad des Getriebes ist auf der Achswelle aufgepresst und der Motor stützt sich über zwei Lager auf dem Radsatz ab.
- Teilabgefederter Antrieb (*semi-suspended drive*): das Grossrad sitzt in diesem Fall auch auf der Radsatzwelle aber der Motor ist vollständig am Drehgestellrahmen befestigt. Dafür ist eine elastische Kupplung zwischen Motor und Getriebe notwendig, um die Relativbewegung zwischen Radsatz und Rahmen aufzunehmen.
- Vollabgefederter Antrieb (*fully-suspended drive*): für diese Konfiguration bilden Motor und Getriebe eine Einheit, die am Rahmen befestigt ist. Das Getriebe ist zwingend zweistufig und wirkt sich auf eine Hohlwelle, die die Radsatzwelle umschliesst, aber sie ist damit drehelastisch verbunden.

Zur Veranschaulichung dieser drei Anordnungen sind Schnittdarstellungen beispielhafter Umsetzungen im Anhang C dargestellt.

Die Vorteile und Nachteile dieser drei Antriebskonfigurationen unter anderem im Hinblick auf unabgefederte Masse, Einmalkosten und Instandhaltungsaufwand sind in Abbildung 19 aus dem RIVAS Bericht D5.4 [64] zusammengefasst.

Im gleichen Bericht sind die Entscheidungsparameter für die Auswahl der Antriebsanordnung erläutert sowie weitere weniger verbreitete Konzepte vorgestellt.

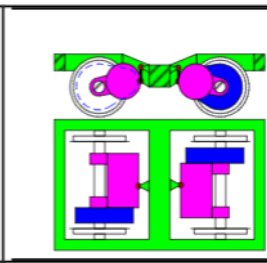
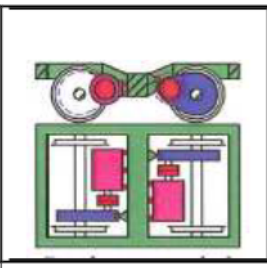
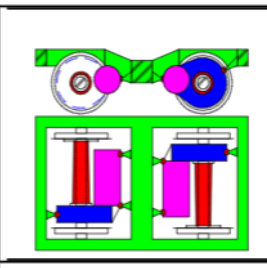
Principle			
Name	Nose-suspended	Semi-suspended	Fully-suspended
Mounting characteristics	Motor riding the axle with bearing. Third connection point on the bogie middle beam	Motor suspended on the bogie middle beam. Gear riding the axle. Coupling connecting both	Drive fully supported on the bogie frame. Hollow shaft compensating the relative movements
Cost of drive: initial	Medium	Low	High
Reliability of the drive	High-Medium	High	Low
Dismounting of the motor	Possible	Easy	No
Maintenance effort	Medium	Low	High
Unsprung mass	High	Medium	Low
Needed place	Lateral: medium Longitudinal: high	Lateral: high Longitudinal: low	Lateral: medium Longitudinal: low
Drive weight	High	Low	High

Abbildung 19: Vorteile und Nachteile der drei meistverbreiteten Antriebskonfigurationen unter anderem aus [64]

Optimierung am Radsatz

Beim Radsatz ist der Handlungsspielraum für eine Massenoptimierung begrenzt, da das Konzept von zwei Rädern verbunden mit einer Welle im Vollbahnbereich (nahezu) fix ist.

Bei der Welle gibt es Werkstoffe, die eine kleinere Dichte aufweisen, jedoch deutlich teurer wären. Auch eine Hohlbohrung in der Welle, ermöglicht eine Gewichtseinsparung. Sie sind

heute für die Ultraschallprüfungen in der Instandhaltung üblich aber ihr Durchmesser lässt sich nur unter Einhaltung der Zeitfestigkeitsanforderungen optimieren.
Für die Räder könnte gemäss [64] eine Einsparung von 5 bis 10% mit einer Optimierung der Geometrie der Radscheibe im Hinblick auf Ermüdung erreicht werden. Eine Verkleinerung der Radreifendicke ist ebenfalls denkbar, würde aber eine kleinere Lebensdauer der Reifen/Räder/Radsätze und besonders wenn Reprofilierung öfters notwendig sind, höhere LCC-Kosten bedeuten.
Im RIVAS Bericht wird geschätzt, dass eine Einsparung von 250kg am Radsatz und 200kg mit einem vollabgefederten Antrieb statt teilabgefedert möglich wären und zu einer EKS-Reduktion von 1 bis 2.5dB im RMS-Pegel (2-200Hz) führen könnten aber dafür allein für die Welle Zusatzkosten von +250% (Stand 2013) anfallen würden.

Ebenfalls wird erwähnt, dass mögliche negative Konsequenzen von Gewichtseinsparungen zu beachten wären, wie eine höhere Schallabstrahlung durch die Radscheibenfläche eines leichteren Rades.

8.1.3 Federung

Federungssysteme in Fahrwerken müssen Stossbelastungen aufnehmen und dämpfen sowie die Bewegungen zwischen Radsatz und Kasten entkoppeln können. Sie sind so auszulegen, dass Resonanzen zwischen den verschiedenem Starrkörper- und Struktureigenmoden vermieden werden.

Die Primärfederung verbindet die Radsatzlagerträger mit dem Drehgestellrahmen. Neben der klassischen, heute nur noch im Güterverkehr verbreiteten Blattfeder kommen heute im Personenverkehr vorwiegend Kombinationen aus Schraubenfedern und/oder Gummi-Metall-Verbundfedern zum Einsatz.

Die Sekundärfederung verbindet den Drehgestellrahmen mit dem Wagenkasten. Sie kommen meistens nur im Personenfahrzeugen zum Einsatz und werden mehrheitlich als Kombinationen von Schraubenfedern mit Gummi-Metall-Elementen oder als Luftfedern in Reihe mit Gummi-Metall-Schichtfedern gefertigt [65].

In den Simulationen im Rahmen von RENVIB II Phase 2 Task 6 [36] wurde die Primärsteifigkeit zwar variiert, aber nicht unabhängig von der Variation der unabgefederten Masse und lässt somit keine klare Schlussfolgerung bezüglich des Einflusses auf EKS zu.

Die Parameterstudie im Projekt SP18 der Universität Chalmers (Abbildung 17) zeigt einen deutlichen Einfluss der Primärsteifigkeit (Parameter X6). Die Abhängigkeit der Primärfederung mit den Erschütterungen ist vor allem bei tiefen Oktaven (2 bis 31.5 Hz mit Maximum bei 8 Hz) vorhanden, siehe Abbildung 17.

In der Parameterstudie, beschrieben im RIVAS Bericht D5.4 [64], ist der Einfluss der Primärfederstufe (Steifigkeit und Dämpfung) auf den RMS-Wert der Schwingschnelle an zwei der untersuchten Standorte klein. Am dritten Standort Furet (weicher Boden) hat die Primärsteifigkeit den grössten Einfluss von allen variierten Parametern auf EKS. Dies wird mit der hohen Mobilität im Frequenzbereich 5 bis 50 Hz begründet.

Versuche in der Schweiz mit gezielter Variation der Primärfederung gab es nicht.

In den Deliverables 3.1 [38] und 6.3 [66] vom Projekt Cargovibes wird erwähnt, dass das Nichtvorhandensein einer Sekundärfederung bei Güterwagen ein Grund sei, warum diese Fahrzeuge mehr auf tieffrequente Anregungen reagieren. Eine detaillierte Herleitung in den öffentlichen Berichten zu dieser Aussage fehlt jedoch.

Dies wurde jedoch auch bei Versuchen in der Schweiz, zum Beispiel in Pratteln [67] vor allem bei der grössten Entfernung beobachtet. In Abbildung 20 ist die Amplitude von vrms für die Güterzügen bei 8Hz hoch und trägt einen relevanten Beitrag zum Gesamtwert.

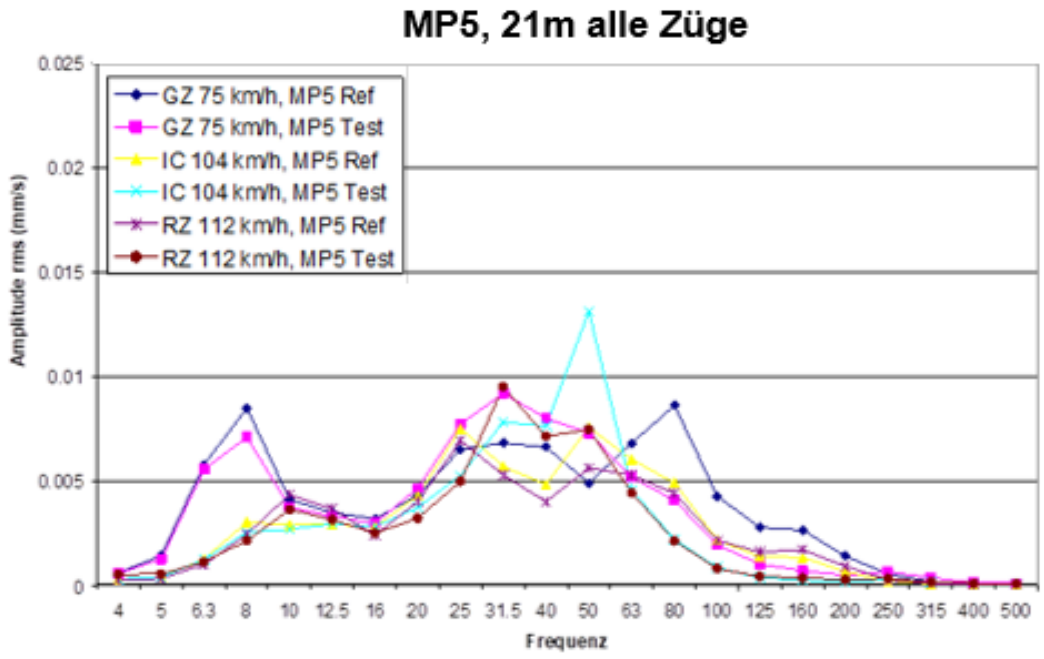


Abbildung 20: Schwingschnellenspektrum für Vorbeifahrten in Pratteln im 32m-Abstand nach Zugskategorien – aus [67]

In Wichtrach, wo der Boden relativ weich ist, wurde dieser Unterschied zwischen Güterzügen und Regionalzügen um 4Hz ebenfalls beobachtet, siehe Abbildung 21.

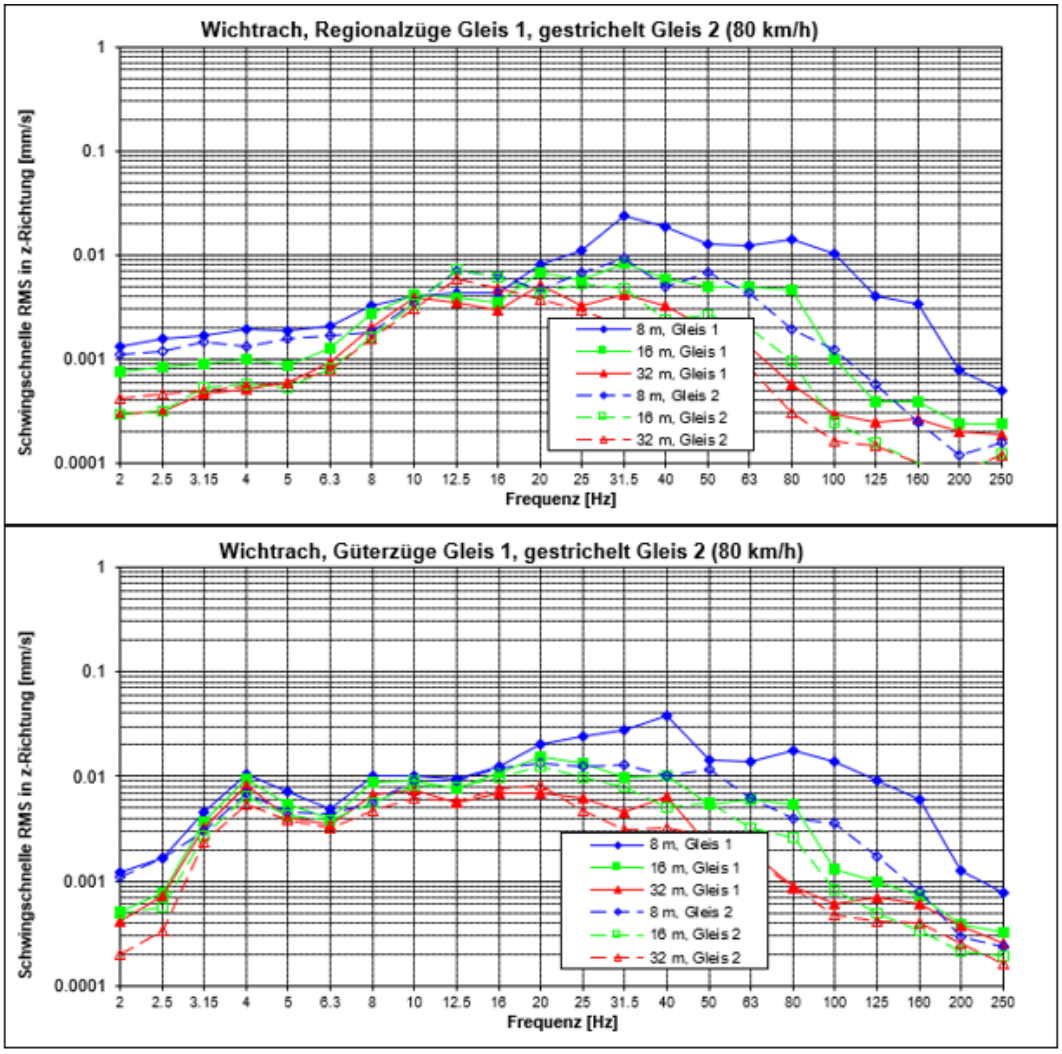


Abbildung 21: Schwingschnellenspektrum für Vorbeifahrten in Wichtrach für Regional- (oben) und Güterzügen (unten) bei verschiedenen Entfernungen – im Rahmen vom [32] gemessen

Kurz zusammengefasst kann man sagen, dass die Primärsteifigkeit sich aus EKS-Sicht bei bestimmten Bodeneigenschaften (insbes. weiche Böden) vorteilhaft optimieren lässt, aber dass diese Änderung möglicherweise für andere Standorte nicht wirksam wäre.

Dabei muss man aber bedenken, dass die Primärfederung einen Einfluss auf Rad-Schienen-Kräfte und in erster Linie sicherheitsrelevante Aufgaben zu erfüllen hat wie z.B. die Sicherheit gegen Entgleisen und die Einhaltung des Lichtraumprofils.

8.1.4 Reduzieren der Fahrgeschwindigkeit

Die Fahrgeschwindigkeit wird hier im Kapitel zu Minderungsmassnahmen zwar behandelt, und eine Anpassung derselben könnte effektiv unter definierten Bedingungen zu EKS-Reduktion führen, ist aber betrieblich möglicherweise nicht umsetzbar oder unerwünscht.

Die Fahrgeschwindigkeit des Fahrzeugs hat einen Einfluss auf die Anregung. Unabhängig vom Anregungsmechanismus spielt die Fahrgeschwindigkeit eine Rolle auf den Frequenzinhalt der Anregung, wie im Kapitel 2.3.3 erläutert. Mit einer zunehmenden Fahrgeschwindigkeit verschiebt sich die Anregung in höhere Frequenzen.
Sogar eine singuläre gleisseitige Störung wird von mehreren Rädern gleicher Entfernung überfahren, deren Überfahrfrequenz von der Fahrgeschwindigkeit abhängig ist.

Die im RIVAS D5.2 [63] und D5.4 [64] durchgeführten Parameterstudien (vorgestellt in Kapitel 8.1.2.1 dieses Berichtes) wurden ebenfalls unter Berücksichtigung verschiedener Fahrgeschwindigkeiten durchgeführt. Es zeigt sich, dass der Effekt einer höheren unabgefederten Masse durch eine höhere Fahrgeschwindigkeit noch verstärkt wird. Auch bei der Messkampagne in Dottikon, bei den Durchfahrten mit dem Testzug bei 10, 40, 70 und 100km/h durchgeführt wurden, nimmt der Mittelwert der gemessenen Erschütterungen mit der Geschwindigkeit zu. Auch die Terzbandfrequenzen, die die grössten Amplituden aufweisen, verschieben sich nach rechts.

Im D5.2 [63] wird erläutert, dass die unabgefederte Masse und die Fahrgeschwindigkeit zum Teil den gleichen Effekt auf EKS haben. Dies lässt sich damit erklären, dass eine höhere unabgefederte Masse mehr Trägheitskräfte am Rad verursacht. Das gleiche Phänomen passiert mit einer erhöhten Fahrgeschwindigkeit: da die Frequenzen steigen, steigen auch die Trägheitskräfte.
Der Einfluss der Geschwindigkeit wurde auch bei den Messungen in Thun, Ligerz und Cadenazzo auf verschiedene Rollmaterialien beobachtet (RIVAS D2.2 [48]). Folgendes wurde festgestellt:

- Der ICN, der gute Radzustände aufgrund einer häufigen Instandhaltung aufweist, zeigt eine Geschwindigkeitsabhängigkeit mit vrms auf. Die Streuung um die Regressionslinie steigt jedoch bei höheren Geschwindigkeiten (siehe Abbildung 22).

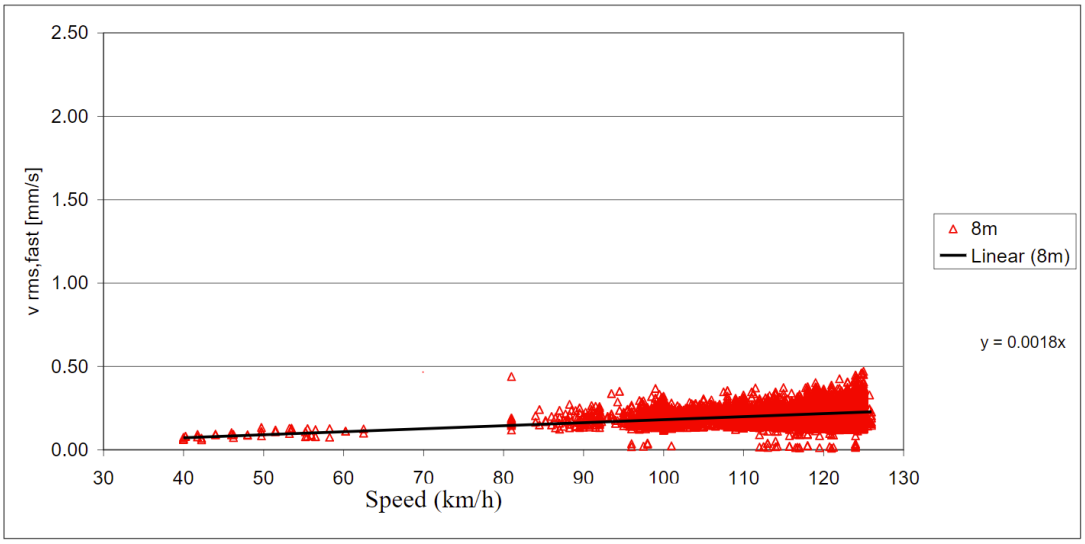


Abbildung 22: vrms für Durchfahrten von ICN-Kompositionen gemessen in Ligerz und dargestellt über Fahrgeschwindigkeit – aus [48]

- Das gleiche wird bei der Re460 festgestellt, die ebenfalls dank ihrer Konstruktion wenig Radeffekte zeigt (Abbildung 23).

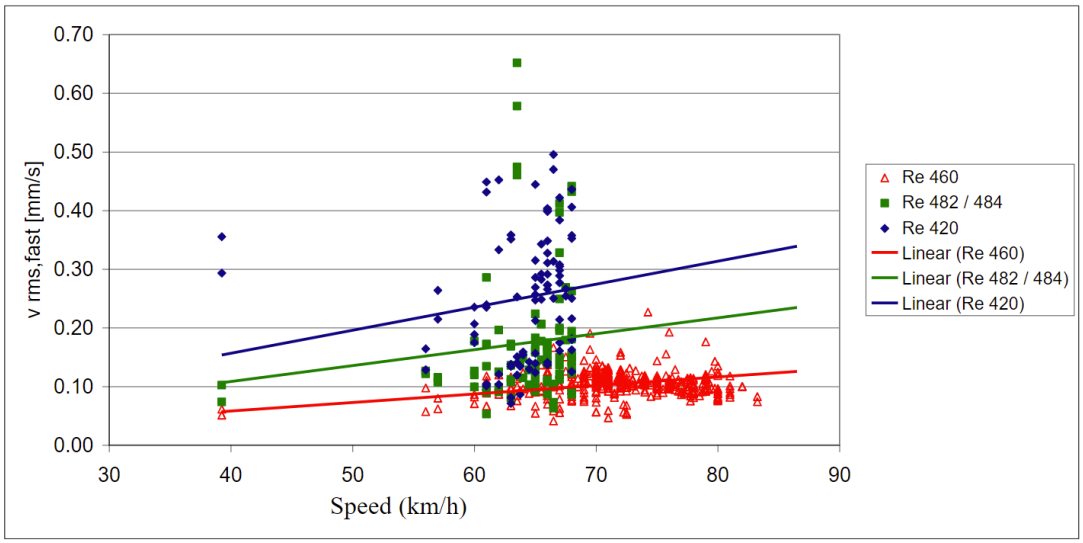


Abbildung 23: vrms für Durchfahrten der Lokomotiven Re460, Re482/484 (TRAXX) und Re420 gemessen in Thun und dargestellt über Fahrgeschwindigkeit – aus [48]

- Beim Güterwagen Lgnss wird ebenfalls eine ähnliche Feststellung gemacht, wobei die Regressionslinie vrms zur Fahrgeschwindigkeit viel steiler ist.
- Der NPZ verhält sich aber anders. Der Höchste Wert von vrms wird bei 70-80km/h erreicht und nimmt bis 100km/h wieder ab. Dieses Phänomen konnte im D2.2 [48] nicht erklärt werden.

- Bei der Re420 ist die Geschwindigkeitsabhängigkeit nicht wirklich zu erkennen und die Streuung zwischen den Fahrzeugen ist gross (Abbildung 23).
- Bei der Analyse der Schwinggeschwindigkeit innerhalb einzelne Terzbänder in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit an den TRAXX Lokomotiven ist deutlich ersichtlich: die Schwingungen bei der Anregungsfrequenz einer bestimmten Radordnung und des Schwellenabstands sind verstärkt (Abbildung 24)

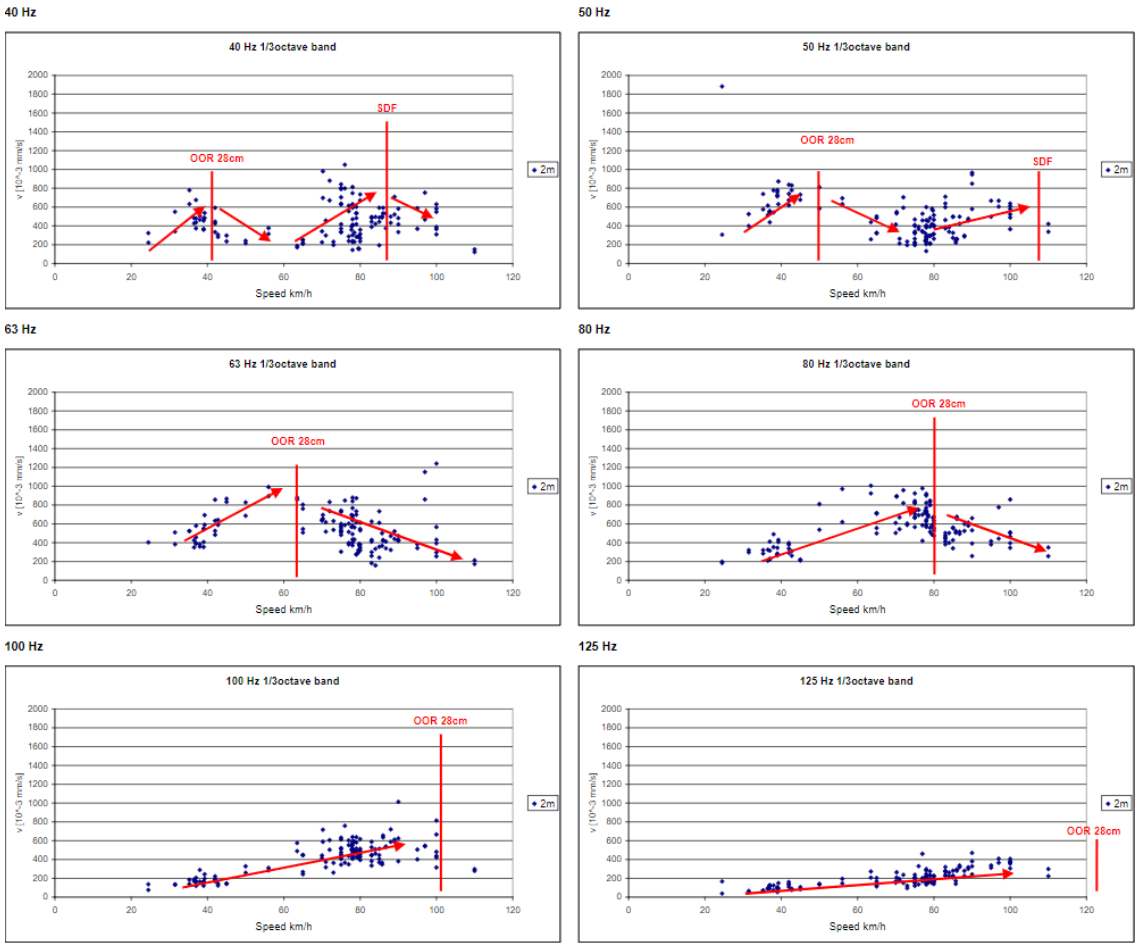


Abbildung 24: Schwingschnellenamplituden in der Terzband von Durchfahrten dreier Re474/484-Individuen über Fahrgeschwindigkeit – aus [48]

Der Einfluss der Fahrgeschwindigkeit bei einer Anregung durch eine Flachstelle bei Simulation an drei Standorten ist im D2.2 [48] präsentiert. Nicht nur die Geschwindigkeit wurde dabei variiert, sondern auch die Länge und die Abrundung der Flachstelle sowie die Achslast. Eine allgemeingültige Tendenz über den Einfluss der Fahrgeschwindigkeit konnte dabei nicht festgestellt werden. Je nach Standort und Flachstellengeometrie traten die höchsten Vibrationen nicht unbedingt bei der höchsten Geschwindigkeit auf. Bei einem Parametersatz wurde die maximale Stossbelastung bei niedrigen Geschwindigkeiten aufgrund des längeren

Kontaktverlusts festgestellt. Dies könnte auch durch die Verschiebung der Anregungsfrequenz erklärt werden, die je nach Bodeneigenschaften bis zum Messpunkt mehr oder weniger übertragen werden.

In Dottikon wurde bei der Messung des Wagens mit Flachstelle bei 10/40/70/100km/h bemerkt, dass der Frequenzinhalt der Schwingungen sich mit steigender Fahrgeschwindigkeit wie erwartet verschiebt und dass die maximale Terzamplitude ebenfalls steigt.

Abschliessend kann man sagen, dass eine Reduktion der Fahrgeschwindigkeit nicht systematisch zu einer Verminderung der Vibrationen führt. Umgekehrt kann eine Geschwindigkeitserhöhung eine EKS Zunahme bewirken. Messtechnisch wurde dieser Einfluss an vereinzelten Standorten und an den meisten Fahrzeugtypen aufgezeigt, jedoch nicht systematisch. Je nach Anregungswellenlänge und örtlichen Bodeneigenschaften können Resonanzeffekte auch verstärkt werden. Bei einer Beurteilung nach DIN 4150-2 [21] kann eine langsame Fahrgeschwindigkeit ausserdem die Belegung von einem zusätzlichen Takt verursachen, was zu höheren Beurteilungsgrössen führt.

8.2 Am Fahrweg

8.2.1 Schwingungsisolierung durch Veränderung des Masse-Feder-Systems

Das System Fahrzeug + Fahrweg ist ein Schwingsystem, das durch eine Kombination von Massen, Feder- und Dämpferelemente modelliert werden kann. Viele Minderungsmassnahmen am Oberbau basieren auf einer Änderung dieses Masse-Feder-Systems durch die Änderung der Steifigkeiten und/oder der Massen und damit auch einer Resonanzfrequenz. Dies kann zum Beispiel erreicht werden, indem man eine zusätzliche elastische Schicht installiert, die die Zusammenstellung der Massenelemente modifiziert und ein zusätzliches Feder- und Dämpferelement zwischenschaltet. Die verschiedenen elastischen Oberbauelemente, die zur Anwendung kommen, sind in Abbildung 25 dargestellt.

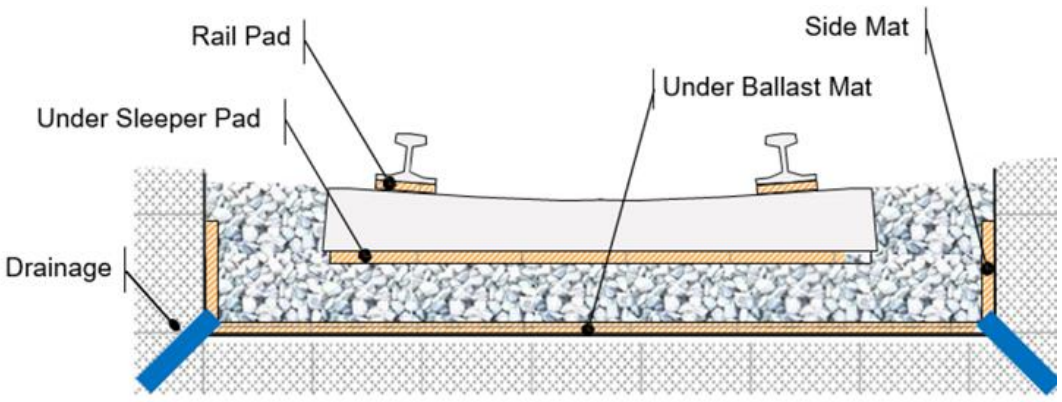


Abbildung 25: Einfügen von elastischen Schichten im Oberbaubereich – aus [68]

Abbildung 26 zeigt der Verlauf der Kraftübertragungsfunktion zwischen der Anregung $x_b(t)$ und die Antwort x(t). In dieser Abbildung ist β das Verhältnis Frequenz f zur Eigenfrequenz f_0 vom Einmassenschwinger. Bei der Eigenfrequenz ist die Amplitude maximal. Unterhalb der Eigenfrequenz ist die Anregung verstärkt und ab der Grenzfrequenz $\sqrt{2} \times f_0$ wird die Anregung vermindert [18].

Das heisst, dass man im Frequenzbereich ab $\sqrt{2} \times f_0$ mit dem Einfügen einer elastischen Schicht, eine Schwingungsminderung erreichen kann. Dabei muss man beachten, dass unterhalb dieser Frequenz eine Verstärkung möglich ist. Je nach Dämpfung (in der Abbildung 26 mit «D» bezeichnet) ist dieser Effekt mehr oder weniger ausgeprägt.

Bei einem Einmassenschwinger mit einer Steifigkeit k und Masse m beträgt die Eigenfrequenz:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \qquad (12)$$

Diese Schwingungsminderung wird als Schwingungsisolierung bezeichnet. Dies ist die Funktionsweise von Unterschottermatten, Schwellenbesohlungen, Masse-Feder-Systeme, elastische Schienenbefestigungen und Zwischenlagen, die in den nachfolgenden Kapiteln behandelt wird [1].

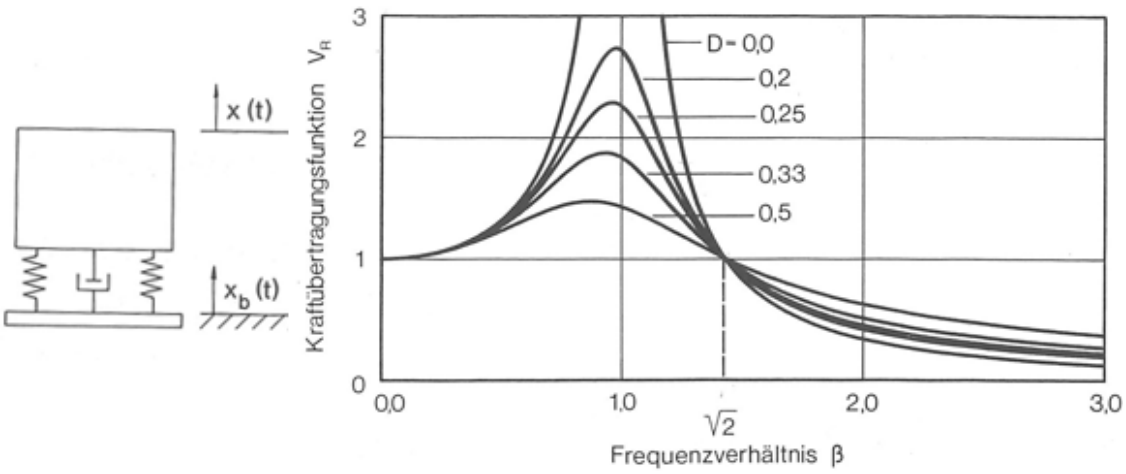


Abbildung 26: Kraftübertragungsfunktion eines Einmassen-Schwingers (aus [18] – Kap 2.4)

Aus Formel (12) lässt sich ableiten, dass eine kleinere mitschwingende Masse zu einer höheren Eigenfrequenz bzw. Grenzfrequenz führt, was die Wirkung der Massnahme in einem noch grösseren bzw. im tieferen Frequenzbereich verhindert.

Für die Zwischenlage beträgt diese Masse einen Anteil der Masse der Schiene und der Befestigungsteile sowie die unabgefederte Radsatzmasse.
Für die Unterschottermatte greift die ganze Oberbaumasse inklusive unabgefederter Radsatzmasse ein.

In der Abbildung 27 wird ein qualitativer Vergleich der erreichbaren Schwingungsminderung zwischen der Unterschottermatte (USM), des Masse-Feder-Systems (MFS) und elastisches Schienenlager (ESL/KES) präsentiert. Die Schwellenbesohlung ist nicht dargestellt.

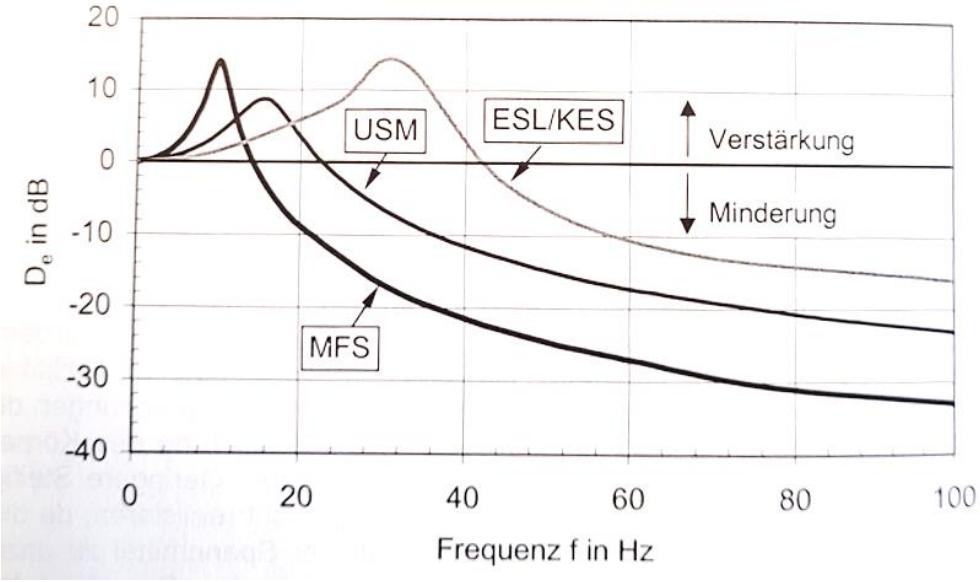


Abbildung 27: Qualitativer Vergleich der erreichbaren Schwingungsminderung zwischen der Unterschottermatte (USM), des Masse-Feder-Systems (MFS) und elastisches Schienenlager (ESL/KES) aus [9]

Erweiterungen dieses einfachen Modells mit komplexen Impedanzen sind im Buch [11] unter Kapitel 13 und spezifisch für die Einfügedämmung von Unterschottermatten bei Wettschureck in [69] behandelt worden.

Mit der Einführung einer zusätzlichen elastischen Schicht können positive Effekte im Hinblick auf EKS erzielt werden. Dabei dürfen unerwünschte Nebeneffekte nicht aus den Augen verloren werden, insbesondere:

- eine Verringerung der Gleisstabilität: aufgrund der niedrigeren Steifigkeit sind grössere Gleiseinsenkungen möglich, was zu grösseren Schienenfussspannungen führen kann und allenfalls zur Destabilisierung des Schotters. Hierzu ist der Punkt 12.3 vom AB-EBV Blatt 14N zu berücksichtigen.
- zusätzliche Instandhaltungskosten: sprunghafte Änderungen in der Gleissteifigkeit beim Übergang zwischen unterschiedlichen Gleisaufbauten können zu grossen dynamischen Kräften führen, die den Oberbau schaden können. Übergänge mit

Einsenkungsdifferenzen grösser 0.5 mm sind deshalb zu vermeiden (Punkt 12.5 vom AB-EBV Blatt 14N)

- oder eine Lärmzunahme: die Schwingungsisolierung wirkt sich häufig im für den Luftschall relevanten Bereich negativ aus. Das heisst, dass mögliche positive Kopplungseffekte (z.B. mit dem Schotter) mit der Einführung der elastischen Schicht verloren gehen, und zu mehr Schallabstrahlung (vor allem durch die Schiene und durch die Schwelle) führen kann.

8.2.2 Unterschottermatten (UBM)

8.2.2.1 Allgemeines

Eine Unterschottermatte (auf Englisch Under Ballast Mat, kurz UBM) ist eine Elastomer-Schicht, die zwischen Planie und Schotterbett verlegt wird. Die Funktionsweise lässt sich vereinfacht durch eine Zwischenschaltung eines zusätzlichen Feder-Dämpfer-Elements erklären, wie im Kapitel 8.2.1 erläutert.
UBM mit unterschiedlichen Eigenschaften können für verschiedene Zwecke eingesetzt werden. Die Anwendungsgebiete nach Bettungsmodulen sind in Abbildung 28 zusammengefasst [70].

Anwendung	Typ Unterschottermatte			
	sehr weich $0{,}025 \leq C_{dyn} < 0{,}037$	weich $0{,}037 \leq C_{dyn} < 0{,}050$	mittelsteif $0{,}050 \leq C_{dyn} < 0{,}067$	steif $0{,}067 \leq C_{dyn} < 0{,}080$
Ungenügende Schotterbettdicke auf starrem Unterbau			X	
Erschütterung- und Körperschallsschutz	X	X		
Übergangszonen		X	X	X

Abbildung 28: Übersicht der Anwendungsfälle für Unterschottermatten mit jeweiligem Bereich für den Bettungsmodul – aus [70]

Der Einsatzbereich umfasst die freie Strecke, wie auch Tunnelstrecken, Brücken Weichenstrassen, sowohl von Hochgeschwindigkeits- bis zu U-Bahn- und Strassenbahnstrecken. Je nach Einsatzzweck kommen Matten mit unterschiedlichen Steifigkeiten (statisch und dynamisch) zum Einsatz, die üblicherweise als Bettungsmodule [N/mm3] ausgedrückt werden.

Ein aktueller Wissenstand zu Unterschottermatten bei Vollbahnen liefert die IRS 70719-1 [68] von August 2022.

Gemäss der IRS sind UBM effiziente Minderungsmassnahmen, um den Körperschall bei Schottergleisen im Tunnel und auf Brücken zu reduzieren und in einem geringeren Ausmass auf freier Strecke oder bei Weichen. Die erzielte Einfügungsdämmung ist sehr stark vom Frequenzinhalt der Anregung, vom Bettungsmodul der Unterschottermatte relativ zur Steifigkeit vom Unterbau abhängig.

Aufgrund der aufwändigen Installation solcher Matten, auch im Vergleich mit USPs, müssen die eingesetzten Materialien alterungsbeständig sein sowie vermeiden können, dass Schottersteine die Matte verletzen. Letzteres kann durch mehrschichtige Materialien realisiert werden.

UBM können normalerweise nur in Totalsperre eingebaut werden, der Einbau in den bei der SBB üblichen Nachtintervallen mit Bauabschnitten von 18 m Länge ist nicht möglich.



Abbildung 29: Installation einer UBM auf eine hydraulisch gebundene Tragschicht in Liestal (CH)

8.2.2.2 Mögliche EKS-Reduktion

Wie in Kapitel 8.2.1 theoretisch aufgezeigt, ist eine Schwingungsminderung ab $\sqrt{2}$ x Eigenfrequenz des äquivalenten Schwingsystems zu erwarten, d.h. im höheren typischen Frequenzbereich für Erschütterungen und im Bereich des abgestrahlten Körperschalls. Für

tiefere Frequenzen sind keine Reduktionen bzw. Amplifikationen (je nach Dämpfungseigenschaften) gemäss Modell (siehe Abbildung 27) erwartet.

In der Abbildung 30 aus [71] sind Mittelwerte von erreichten EKS-Reduktionen dank UBM. Zu beachten ist, dass die Definition von C_{dyn} in Abbildung 30 nicht mehr 1:1 die aktuelle Definition gemäss EN 17282:2020 entspricht.

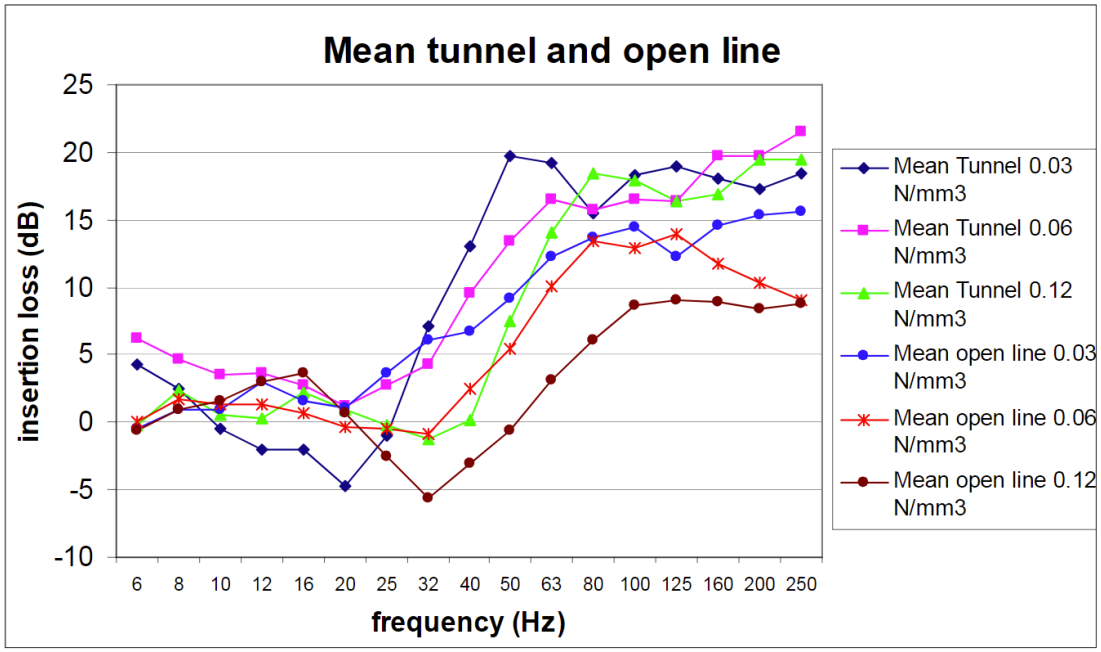


Abbildung 30: Mittelwerte der gemessenen Einfügungsdämmungen für UBM mit c_{dyn} 0.03/0.06/0.12 N/mm3 im Tunnel und auf der freien Strecke – aus [71]

Die grösste Dämmwirkung ist mit Unterschottermatten im Tunnel und auf feste Fahrbahn aufgrund des steifen Untergrunds möglich. Die möglichen Reduktionen auf Schottergleise sind kleiner. Ein steifer Untergrund (z.B. mit HMT/AC-Rail) kann die Wirkung der UBM erhöhen.

Eine Übersicht der UBM-Versuchsstrecken mit EKS-Messungen in der Schweiz sind in der nachfolgenden Tabelle präsentiert.

Tabelle 10: Übersicht der UBM-Versuchsstrecken mit EKS-Messungen in der Schweiz

Gleistyp	Versuchsort	Messungen durch	Jahr	Referenz Messbericht
Schottergleis mit HMT	Raron und Gampel	SBB	1997/ 1998	[72] [73]
Schottergleis mit HMT	Rothrist	SBB	1999	Zusammenfassung in [71]
Tunnel mit Schot-tergleis	St-Aubin	SBB	2000	Zusammenfassung in [71]
Tunnel im Tagbau	Concise	SBB	2003	[74]

In Raron (gerade Strecke) und Gampel (Kurve) wurden 2 verschiedenen UBM-Produkte auf eine Heissmischtragschicht (HMT) verlegt. Eine Dämmwirkung konnte erst ab 63 Hz bzw. 50Hz beobachtet werden und die maximale Wirkung von 9 bis 12 dB wurde bei 125 Hz bzw. 100Hz festgestellt. Die Dämmwirkung beider Produkte war vergleichbar und es konnten keine Unterschiede in der Wirkung zwischen dem eingesetzten Rollmaterial aufgezeigt werden. Ein Dämmungseffekt durch die Heissmischtragschicht allein konnte nicht identifiziert werden.

In Rothrist wurde ebenfalls eine UBM auf HMT verlegt. Dort konnte eine Dämmwirkung ab 40Hz festgellt werden und ein Maximum von 15 dB bei 125 Hz [71] erreicht werden. Die bessere Wirkung an diesem Ort In Vergleich mit Raron lässt sich durch den steiferen Boden erklären. Im Rahmen dieses Versuchs wurde auch die Wirkung von zusätzlichen Seitenmatten untersucht: diese ist kaum feststellbar.

Im Tunnel St-Aubin-Sauges mit Schottergleis wurden 1999 4 UBM-Typen getestet. Durch die Messung konnten die durch die Hersteller angegebenen Dämmwirkungen der Matten bestätigt werden. Trotz Unterschiede im dynamischen Bettungsmodul zwischen diesen konnte kein direkter Zusammenhang festgestellt werden. Es wurde vermutet, dass es an der inhomogenen Steifigkeit des Untergrundes liegt.

2003 wurde die Wirkung einer Unterschottermatte im Tunnel in Concise gemessen. Dabei konnte eine Dämmwirkung ab 50 Hz aufwärts festgestellt werden, bis maximal 25dB. Unterhalb von 50Hz wurde eine Verstärkung von 5 – 8dB gemessen. Auch in Concise konnte kein signifikanter Einfluss der Seitenmatten beobachtet werden, sowie wenig Einfluss des Rollmaterialtyps.

Parallel zu den hier erwähnten Versuchseinbauten auf der freien Strecke und im Tunnel hat die SBB UBM bei Weichen an diversen Orten installiert, die hier nicht thematisiert werden.
Im Gegensatz zu den anderen gängigen EKS-Minderungsmassnahmen wurden die Unterschottermatten beim RIVAS-Projekt nicht untersucht.

8.2.2.3 Qualifizierung der UBM

Damit die verschiedenen UBM-Produkte einerseits durch Kunden spezifiziert werden und anderseits untereinander verglichen werden können, muss eine geeignete und einheitliche Qualifizierung vorhanden sein. Die EN 17282:2020 befasst sich mit dieser Qualifizierung. In dieser Norm sind die Prüfverfahren und deren Bewertungskriterien definiert. Diese Norm spezifiziert die verschiedenen Steifigkeitsprüfungen für die Ermittlung des statischen Bettungsmoduls c_{stat}, des niederfrequenten dynamischen Bettungsmoduls c_{dyn} und des hochfrequenten dynamischen Bettungsmodul C_H. Letzteres charakterisiert die Steifigkeit der UBM im Hinblick auf Lärm- und Erschütterungsschutz.

C_{dyn} und C_H können für gleiche Frequenzen ermittelt werden aber im Gegensatz zur Ermittlung von C_{dyn}, wird das Prüfverfahren zur Messung des höherfrequenten dynamischen Bettungsmoduls C_H mit einer statischen Vorbelastung und mit einer geringeren Schwingungsamplitude durchgeführt.

Die Prüfverfahren für die Ermittlung der Bettungsmodule nach EN17282:2020 erfordern die Verwendung einer geometrische Schotterplatte (auf Englisch Geometric Ballast Plate, kurz GBP), um die Geometrie der Schottersteine zu berücksichtigen. Dies weicht von den Tests nach der etwas älteren Norm DIN 45673-5 ab, wofür eine flache Platte (Flat Plate, kurz FP) zum Einsatz kam. Erwähnenswert ist, dass sich bei gleicher Belastung (Kraft, Frequenz) andere Resultate ergeben. Der Zusammenhang zwischen den Werten, die mit FP und GBP gemessen werden, kann nicht durch eine lineare Funktion abgebildet werden und ist für statische und dynamische Bettungsmodulwerte unterschiedlich. Daher ist ein direkter Vergleich dieser Werte nicht möglich. Eine Gegenüberstellung ist in der IRS 70719-1 [68] zu finden.

8.2.2.4 Auswirkung auf den Aussenlärm

Im IRS 70719-1 wird ohne weitere Details erwähnt, dass begrenzte Versuchsergebnisse darauf hindeuten, dass der Einbau von Unterschottermatten zu keiner Lärmzunahme führt. Eine Erklärung ist, dass die oberen Oberbauelemente (Schiene und Schienenbefestigung) den grössten Beitrag zum Luftschall haben.

8.2.2.5 Weitere Einsatzbegrenzungen

Wie in Kapitel 8.2.1 erwähnt, wird mit einer Unterschottermatte mehr Elastizität ins Gleisbett eingebracht. Dies erfordert zusätzliche Aufmerksamkeit im Hinblick auf Gleisstabilität. Daher empfehlt die IRS 70719-1, die Gleiseinsenkung auf 2mm zu begrenzen. Ebenfalls werden seitliche Halterung gegen Schotterfliessen empfohlen.

Aus dem gleichen Grund wird vom gleichzeitigen Einsatz von weichen UBM zur Minderung von EKS und weichen Schwellenbesohlungen abgeraten. Auch wenn beide Lösungen einzeln Dämmwirkung mit sich bringen, heisst das noch nicht, dass sie sich beim gleichzeitigen Einsatz kumulieren würden.

8.2.2.6 Ausblick

Bei der SBB hat die Unterschottermatte als EKS-Minderungsmassnahme für offene Strecken, Tunnel und Brücken bei Fahrgeschwindigkeiten bis 160km/h den State-of-the-Art erreicht. Die Anforderungen an die Einsatzbedingungen und Produktauswahl sind in der Weisung FB 400-0510 vom 01.12.2022 [75] enthalten. Der vorgesehene Prozessablauf ist im Anhang D der Weisung spezifiziert.

8.2.3 Schwellenbesohlung (USP)

8.2.3.1 Allgemeines

Schwellenbesohlungen (auf Englisch Under Sleeper Pad, kurz USP) sind elastische Unterlagen, die an der Unterseite von Schwellen angebracht werden. Sie ermöglichen die gezielte Einbringung zusätzlicher Elastizität im Oberbau und können eine isolierende Wirkung haben. Ihre Funktionsweise lässt sich vereinfacht durch die Zwischenschaltung eines zusätzlichen Feder-Dämpfer-Elements erläutern, wie im Kapitel 8.2.1 präsentiert.

USPs werden ebenfalls zwecks Oberbauschonung eingesetzt, und erlauben die Kombination einiger Vorteile der Holzschwelle mit der Langlebigkeit der Betonschwelle. Der Haupteffekt ist die vergrösserte Auflagefläche unter der Betonschwelle (ohne USP: Kontaktfläche 3 bis 5% der Schwellenfläche, mit USP: bis etwa 30%), was zu einer besseren Einleitung der Radlast in den Schotter führt. Dies bewirkt eine höhere Stabilität des Schotterbetts, geringere Setzungen und einem reduzierten Verschleiss an den wesentlichen Komponenten des Fahrwegs, somit schlussendlich niedrigere Unterhaltskosten und dies bei entsprechend moderatem Investitionsaufwand [76].

Weitere Einsatzgebiete sind Übergangszonen, wo Steifigkeitsänderungen im Oberbau stufenweise verkleinert werden können oder Bereiche mit reduzierter Schotterdicke.

Für die Verbesserung der Gleisqualität und Verringerung der Unterhaltskosten eignen sich eher die sogenannten "steifen" und "mittelsteifen" USPs [77]. Für den Erschütterungsschutz hingegen die "weichen" USPs.

Die Einteilung in Steifigkeitsklassen anhand ihres statischen Bettungsmoduls c_{stat} ist bei den Schweizerischen ISB [78] leicht abweichend zu der Definition nach UIC IRS 70713-1 [77] und RTE 22041 [79] Anhang 1 geregelt. Diese Einteilung ist in der folgenden Tabelle ersichtlich. Ziel der nicht unmittelbar angrenzenden Steifigkeitsklassen sind die klare Trennung der Einsatzgebiete von USPs.
Die Anwendungsgebiete nach Steifigkeitsklassen sind in Abbildung 31 zusammengefasst. Im Nachfolgenden wird die Definition nach [78] angewendet.

Tabelle 11: Steifigkeitsklassen für die USPs nach Vereinbarung SBB, BLS, SOB [78], RTE 22041 [79] und UIC IRS 70713-1 [77]

Bezeichnung	**Gem. Vereinbarung SBB, BLS, SOB** [78]	**Gem. UIC IRS 70713-1 und RTE 22041**
Steife USP	$0.30 \leq c_{stat} \leq 0.35$ N/mm³	$0.25 \leq c_{stat} < 0.45$ N/mm³
Mittelsteife USP	$0.20 \leq c_{stat} \leq 0.25$ N/mm³	$0.15 \leq c_{stat} < 0.25$ N/mm³
Weiche USP	$0.10 \leq c_{stat} \leq 0.15$ N/mm³	$0.08 \leq c_{stat} < 0.15$ N/mm³

Anwendungsgebiet der USP		USP Typ		
		steif	mittelsteif	weich
Gleislagegüte	Streckenschwelle B91	■		
Gleislagegüte	Streckenschwelle B06		■	
Gleislagegüte	Weichenbetonschwelle		■	
Bauwerke mit starrem Unterbau			■	
Zonen mit reduzierter Schotterbettdicke			■	
Übergangsbereiche (Brücken, FF etc.)			■	
Erschütterungsschutz (EKS)				■

Abbildung 31: Anwendungsgebiete von besohlten Betonschwellen bei der SBB – aus [80]

Bei der SBB ist der Einsatz der steifen und mittelsteifen USPs, eventuell in Kombination mit entsprechenden Zwischenlagen in der Weisung FB 400-0507 [81] und FB 400-0209 [82] geregelt. Weiche USPs zum EKS-Schutz haben den State-of-the-art für einen regulären Einsatz bis jetzt nicht erreicht und sind in diesen Dokumenten deshalb nicht berücksichtigt.

Die EN 16730:2016 [83] spezifiziert die Prüfverfahren für die messtechnische Ermittlung der statischen und dynamischen Bettungsmodule zur Qualifizierung der USP. Weitere Anforderungen an USPs sind in [77] unter §3.1 aufgelistet.

8.2.3.2 Mögliche EKS-Reduktion

Wie in Kapitel 8.2.1 vereinfacht aufgezeigt, ist eine Schwingungsminderung ab $\sqrt{2}$ x Eigenfrequenz des äquivalenten Schwingsystems zu erwarten, analog zur Unterschottermatte mit abweichenden Massen- und Federeigenschaften. Für tiefere Frequenzen sind keine Reduktionen aber gewisse Amplifikationen (je nach Dämpfungseigenschaften, siehe Abbildung 27 und Abbildung 32) gemäss Modell zu erwarten.

Gemäss dem UIC Leitfaden [77] sind weiche USPs für den EKS-Schutz ab etwa 50Hz wirksam und eine Dämmwirkung von etwa 6 dB kann typischerweise erzielt werden.

Im Deliverable D3.2 [84] des RIVAS-Projekts wurde die Dämmwirkung von USPs mit verschiedenen Steifigkeiten mittels Simulation mit dem Modell vom BAM (präsentiert in [84] unter §1.1) ermittelt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 32 dargestellt. Eine Einfügedämmung zwischen 10 und 20 dB wird im Frequenzbereich 60-125 Hz beobachtet und bei der Eigenfrequenz eine Verstärkung von etwa 10dB.

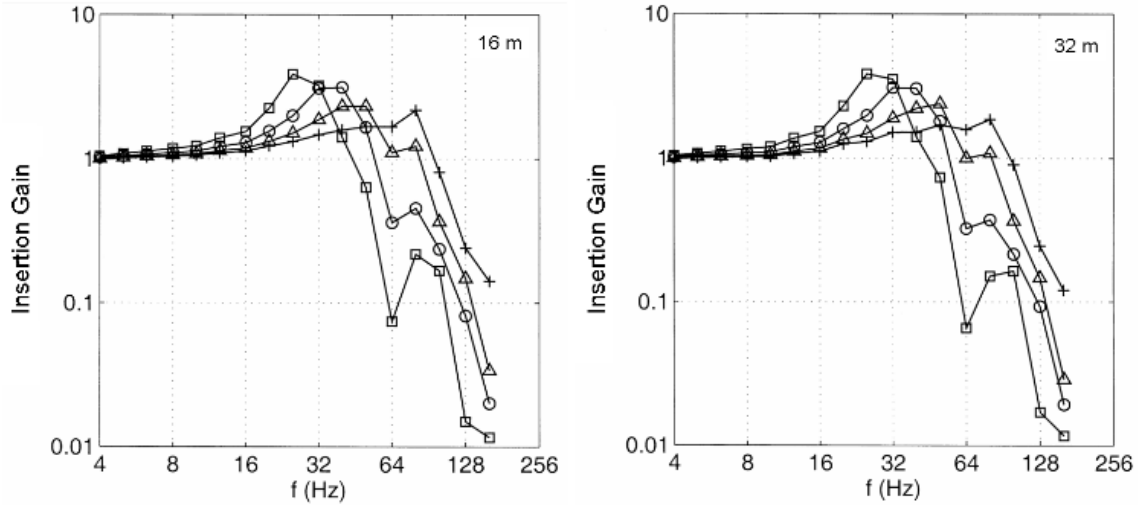


Abbildung 32: Dämmwirkung als Einfügeverstärkung für USPs mit k_{stat} 25MN/m bzw. c_{dyn} 0.037N/mm³ (□), 50MN/m bzw. 0.074N/mm³ (○), 100MN/m bzw. 0.15N/mm³ (Δ), 200MN/m bzw. 0.29N/mm³ (+) in 16m- (links) und 32m-Abstand (rechts) vom Gleis[4] – aus [84]

Im gleichen Bericht wurden einige Parametervariationen untersucht und folgende Effekte festgehalten:

- Einfluss der Radsatzmasse: die Resonanzfrequenz bzw. die Frequenz des Nulldurchgangs beim IL sinkt mit steigender Masse (wie erwartet gemäss Gleichung (12)). Zwischen 1000 und 3000 kg mit einer USP mit k_{stat}=50 MN/m wird ein Unterschied von ca. 20 Hz für den Nulldurchgang beobachtet, und einen Unterschied von ca. 3 dB in der Dämmwirkung.
- Ein steifer Boden verschärft die Effekte der USP: sowohl eine höhere Verstärkung bei der Resonanz wie eine höhere Dämmung oberhalb der Resonanz treten auf.
- Die Variation der Schottersteifigkeit hat unter 64 Hz fast keinen Einfluss. Bei höheren Frequenzen ist dieser Einfluss bedeutend, bei 128 Hz werden bis 20 dB Unterschied zwischen dem weichsten und dem steifsten Schotter beobachtet.

Im ersten Projekt der UIC zu USPs aus 2007 [85] wurden Messergebnisse aus sechs Standorten verglichen, bei welcher USPs mit verschiedenen Steifigkeiten installiert wurden. Für die drei Standorte mit den höchsten Steifigkeiten wurde kaum Verstärkung beobachtet. Für die weicheren USPs wurde zwar eine Verstärkung von 5dB beobachtet, jedoch nicht so hoch wie von den obenerwähnten Simulationen vorhergesagt (10dB).

[4] Für die Einfügeverstärkung IG gilt $IG=10^{-IL/20}$ mit IL in dB. In Abbildung 32 wird die Steifigkeit k_{stat} der USP angegeben. Die Umrechnung als Bettungsmodul c_{stat} wurde in der Bildbeschriftung hinzugefügt.

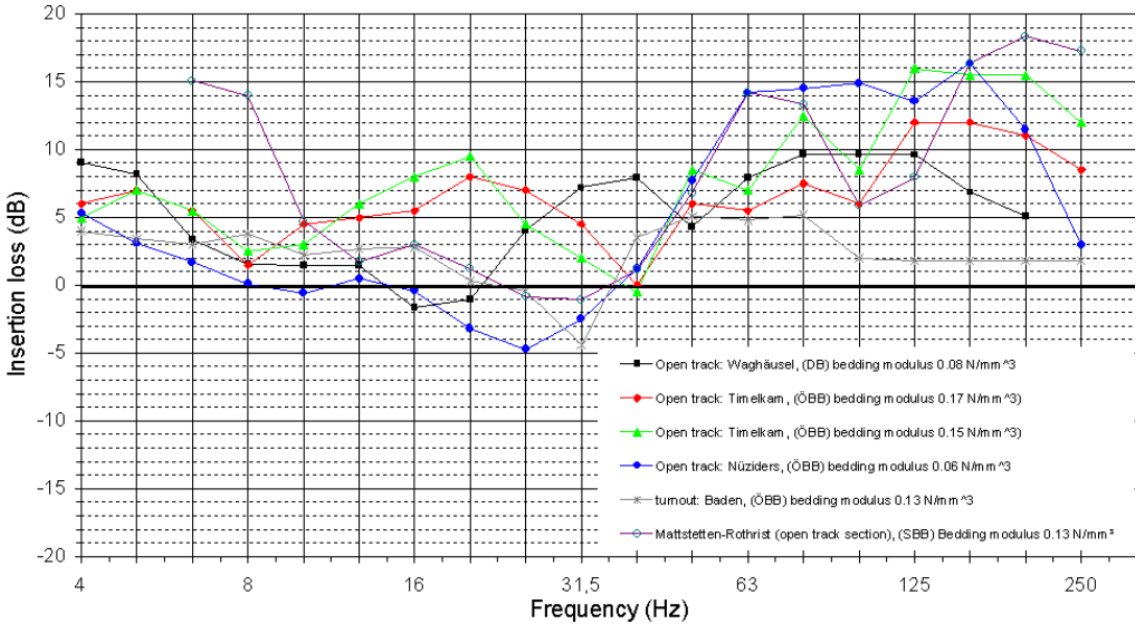


Abbildung 33: Gemessene Einfügungsdämmungen als Terzspektrum an 6 verschiedenen Standorten zwischen Messort und nebenstehenden Referenzpunkt in 8m- und 10m-Abstand vom Gleis – aus [85]

Streckenabschnitte auf dem Netz der SBB, die mit USP verschiedener Steifigkeiten und Hersteller aus Testgründen ausgerüstet wurden, sind in Tabelle 12 aufgelistet.

Tabelle 12: Versuchsorte mit USPs auf dem SBB-Netz

Versuchsort	Steifigkeits-klasse USP	Einbaujahr	Referenz Messbericht(e)
Kiesen	Weich bis steif	2005	Lärm: [86] [87]
Bellach-Solothurn	Weich bis steif	2005	EKS: [88] Lärm: [89]
Lengnau-Pieterlen	Weich	2011	EKS und Lärm: [90]
Pratteln	Weich	2006 Ausbau in 2008	EKS: [91] Lärm: [92]
Laborstrecke Sempach-Rothenburg	Steif	2019	Lärm: [93]

Im Rahmen vom RIVAS-Projekt wurde eine Versuchskampagne in Lengnau-Pieterlen (Schweiz) durchgeführt, in welcher weiche USPs verschiedener Hersteller mit c_{stat}=0.10 N/mm³ in einer Kurve, im Übergangsbogen und in einem geraden Abschnitt getestet wurden und im Bericht D3.8 [90] dokumentiert wurde. Die USP Strecke war ebenfalls mit

weichen Zwischenlagen mit k_{stat}=100kN/mm ausgerüstet. Bei dieser Messkampagne wurde nicht nur EKS gemessen, sondern auch Lärm sowie verschiedene Fahrbahnparameter wie die Einsenkung, Setzungen, Achslagerbeschleunigungen und der Querverschiebewiderstand.

Es wurde zwar an einem Referenzabschnitt im Anschluss der umgebauten Versuchsstrecke gemessen (MP2+MP3), jedoch wurden grosse Abweichungen festgestellt und vermutet, dass lokale Änderungen im Ausbreitungsweg vorhanden sind. Daher wurde das nicht umgebaute Nachbargleis in der gleichen Höhe zum Messpunkt unter Berücksichtigung einer Abstandskorrektur als zweite Referenz verwendet (siehe Abbildung 34).

Unabhängig von der Referenzauswahl ist ein ansprechender Dämmeffekt ab 50-63 Hz zu beobachten, zwischen 4-17 dB je nach Terzband, Rollmaterial und Referenz. Je nach Referenz wird eine leichte Verschlechterung oder Verbesserung unterhalb von 40 Hz festgestellt. Eine breitbandige Verbesserung war jedoch nicht erwartet, was sich möglicherweise durch eine Überschätzung der Abstandskorrektur erklären lässt. Dabei ist zu beachten, dass die Referenzen- und Testabschnitten sich nicht nur vom Vorhandensein von USPs unterscheiden, sondern auch von der Steifigkeit der Zwischenlagen (steif bei den Referenzen, weich bei den Testabschnitten). Die Unterschiede zwischen den verschiedenen getesteten USP-Produkten liegen innerhalb der Unsicherheit der Ermittlung [90] [37]. Weitere Darstellungen und Vergleiche sind im D3.8 [90] (inkl. dessen Anhang) zu finden.

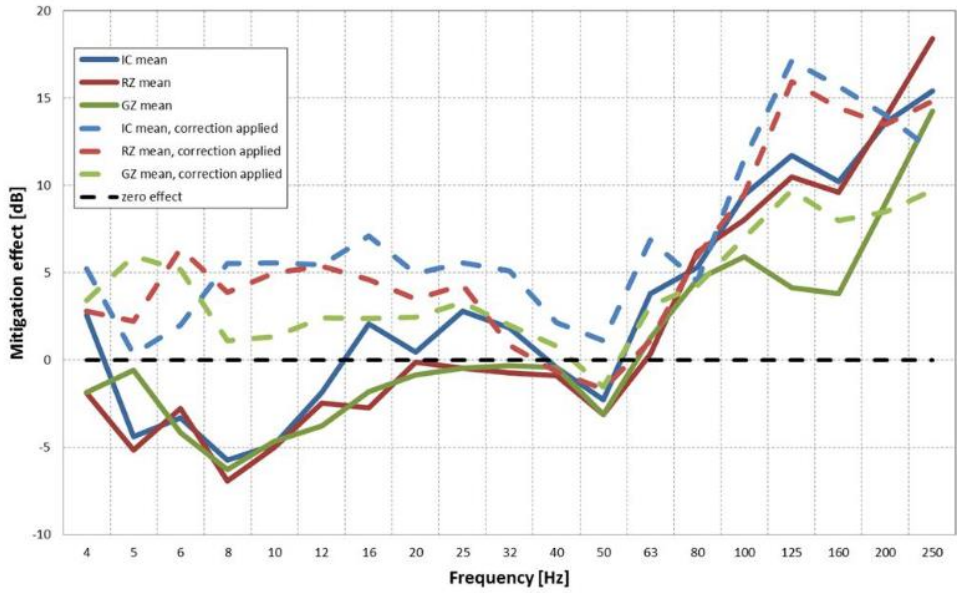


Abbildung 34: Durchschnittliche Einfügedämmung für alle Messpunkte (in Kurve, Übergangsbogen, Gerade) in Lengnau-Pieterlen im 8m-Abstand bei Verwendung des Referenzabschnitts auf dem gleichen Gleis (durchgezogene Linien) und bei Verwendung des Nachbargleis als Referenz (gestrichelte Linien) – aus [90]

Die Messergebnisse wurden mit den Simulationsergebnissen der in D3.2 [84] verwendeten Modelle verglichen (siehe Abbildung 35), obwohl die Parameter nicht vollständig vergleichbar sind, insbesondere der Effekt weiche USP + weichere Zwischenlagen auf dem Testabschnitt in Pieterlen-Lengnau sind mit bei den Modellrechnungen nicht simuliert worden. Die durchschnittliche gemessene Einfügedämmung stimmt gut mit den Simulationsergebnissen überein. Positiv ist auch, dass die hohe Verstärkung bei der Resonanzfrequenz, die von den Simulationen vorhergesagt wird, bei den Messungen nicht so stark ausfällt.

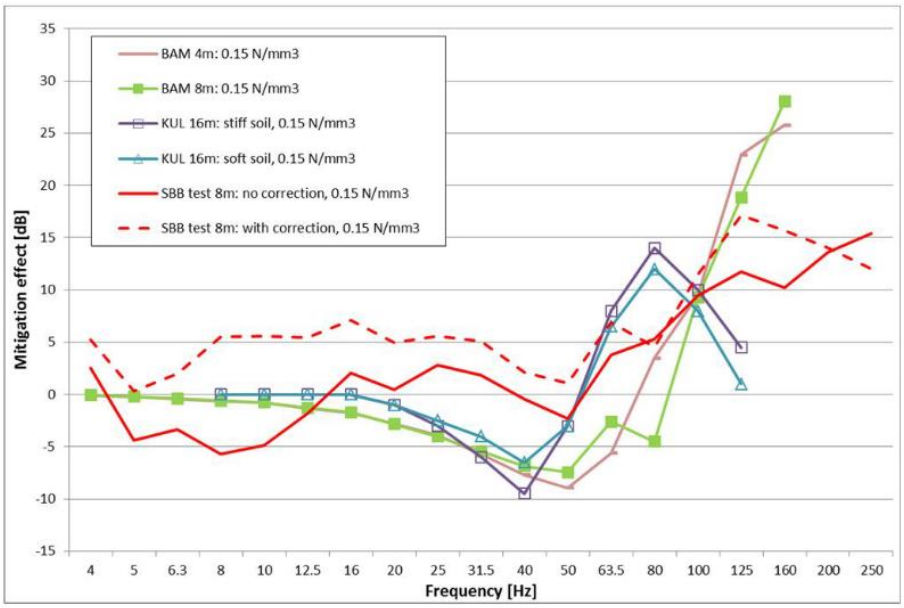


Abbildung 35: Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Modellen von BAM und KU Leuven – siehe D3.2 [84] und Messungen in Lengnau-Pieterlen an den IC-Zügen – aus D3.8 [90]

2008 fand eine Messung an einem mit USPs ausgerüsteten Testabschnitt zwischen Bellach und Solothurn statt. In diesem Fall wurde keine sehr weiche USP installiert, sondern weich/mittelsteif oder steif, je nach Abschnitt. Ziel des Einbaus war nicht EKS, sondern es wurde primär untersucht, ob eine besohlte Betonschwelle mit c_{stat}=0.17 N/mm^3 die sonst bei schlechtem Unterbau notwendige Unterbausanierung beim Wechsel von Holz-auf Betonschwellen überflüssig machen könnte. Die Eigenschaften der USP sind in Tabelle 13 zusammengefasst.

Tabelle 13: Eigenschaften der USP bei der Versuchsstrecke Bellach-Solothurn

Hersteller	Typ	c_{stat}	Steifigkeits-klasse nach Tabelle 11	Kurvenfarbe in Abbildung 36	Bezeichnung im Testbe-richt
Getzner	SLS 1707 G	0.17 N/mm^3	Weich/mittel-steif	Orange und Gelb	USP6
Getzner	SLB 3007 G	0.3 N/mm^3	Steif	Blau	USP1
Müller RST	M01	0.3 N/mm^3	Steif	Rot	USP2

Die gemessenen Dämmeffekte bei ICN-Durchfahrten sind in Abbildung 36 zu finden. Die steife USP von Müller RST zeigt einen tieffrequenten Dämmeffekt bis etwa 30 Hz (rot). Die steife USP von Getzner (blau) zeigt hingegen eine Verstärkung unterhalb 16 Hz und eine Abminderung 63Hz von ca. 4-5 dB. Die weiche/mittelsteife USP (orange und gelbe Kurven) zeigen ähnliche Verläufe ab 63 Hz mit einer etwas höheren Dämmung. Im tieffrequenten Bereich zeigt diese USP wenig bis keine Verstärkung auf.

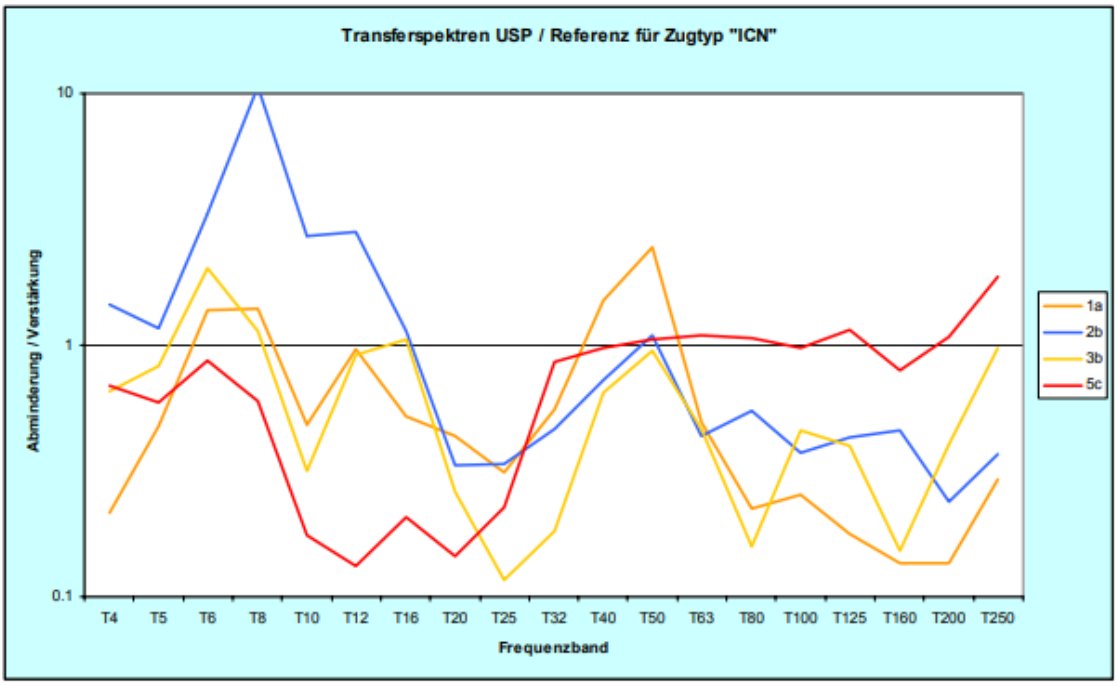


Abbildung 36: Abminderung und Verstärkung der Schwingschnelle bei ICN-Durchfahrten in 8m-Abstand – aus [88]. Legende siehe Tabelle 13

8.2.3.3 Auswirkung auf den Aussenlärm

Im UIC-Projekt zu USPs [85] 2007 wurde nebst den EKS-Reduktionen dank weichen Schwellenbesohlungen auch über eine Lärmzunahme berichtet. Diese hat sich bei verschiedenen

Versuchsstrecken in der Schweiz bestätigt. Einige Ergebnisse sind in den nachfolgenden Abschnitten näher erläutert.

In Lengnau-Pieterlen wurden auch die Schallemissionen entlang der Versuchsstrecke gemessen und mit dem Referenzabschnitt verglichen. Diese Versuchsordnung enthält nicht nur eine, sondern zwei bis drei Variationsparameter: die USP, die Zwischenlage und für die Messpunkte im Bogen, die Trassierung. Folgende Zunahmen wurden für den Aussenlärm gemessen: für Güterzüge 3-4 dB(A), für ICN 2-2.5 dB(A), für FLIRT-Züge 2 dB(A) und für NPZ 5 dB(A). Die Zunahme erfolgt im Frequenzbereich 315-1250 Hz. Oberhalb 1250 Hz sind die Werte vergleichbar und unterhalb von 315 Hz wird eine Abnahme gemessen [90].
Die gemessene Abnahme der Abklingrate hat bestätigt, dass von einer Schallpegelerhöhung auszugehen war. Jedoch war aufgrund der Versuchsanordnung (Kombination weiche Zwischenlage + weiche USP) nicht unterscheidbar, welcher Anteil der Lärmzunahme auf die weichen USPs zurückzuführen ist [90]. Der Lärmeinfluss weicher Zwischenlagen ist inzwischen erwiesen [94]. Deswegen kann bei diesen Tests keine Aussage zu den USPs bzgl. Lärmzunahme gemacht werden.

Bei der Teststrecke in Bellach-Solothurn wurden ebenfalls Lärmmessungen durchgeführt. Es wurde zwar eine Lärmzunahme festgestellt, die bei den verschiedenen Produkten und Zugstypen unterschiedlich, aber vor allem im Frequenzbereich 250-1000 Hz enthalten war. Es konnte aber kein Zusammenhang u.a. mit ihrer Steifigkeit gezogen werden [89].

Die Testabschnitte mit weichen Schwellenbesohlungen weisen eine Lärmzunahme von 2 dB(A) bis maximal 4 dB(A) auf, je nach Zugtypen und Messort in der Schweiz. International ist diese Lärmzunahme nicht feststellbar. Der vermutete Grund ist, dass wegen den harten Zwischenlagen in der Schweiz der Schwellenlärm und damit der Einfluss der USPs nur in der Schweiz von Relevanz ist. Die Lärmzunahme wird von den Schweizer Behörden als nicht zumutbar gesehen, so dass ein Einsatz der weichen USPs für Körperschallschutz nicht möglich ist. [95]

Im Auftrag des BAFU wurde eine Metaanalyse durchgeführt [95]. Bezüglich der Entwicklung der Schienenrauheit konnte bis jetzt kein klarer Zusammenhang gefunden werden, ja nach Örtlichkeit wurde eine positive oder negative Entwicklung beobachtet. Auch bezüglich Gleisabklingrate konnte keine Aussage getroffen werden, da mehrere Gleisparameter gleichzeitig relativ zur Referenz geändert worden sind [96].

Anhand von Schwingungsmessungen an Schiene und Schwelle wurde gezeigt, dass die Schwellen mit weicher Schwellenbesohlung verstärkt schwingen, und zwar genau in den Frequenzbereichen, in denen die höchsten Lärmzunahmen festgestellt wurden. Diese Schwingungen und die daraus resultierende Schallabstrahlung dürften der Hauptgrund für die festgestellten Lärmzunahmen sein.

Die SBB hat 2019 eine Studie [97] beauftragt, welche die Lärmzunahme in Abhängigkeit der Steifigkeit der USP mit der Software TWINS quantifizieren sollte. Die Berechnungsergebnisse stimmen mit Lärmmessungen gut überein, wobei die Modellierung den tatsächlichen Lärm zwischen 315-500 Hz und bei 1000 Hz unterschätzt (vgl. Abbildung 37).

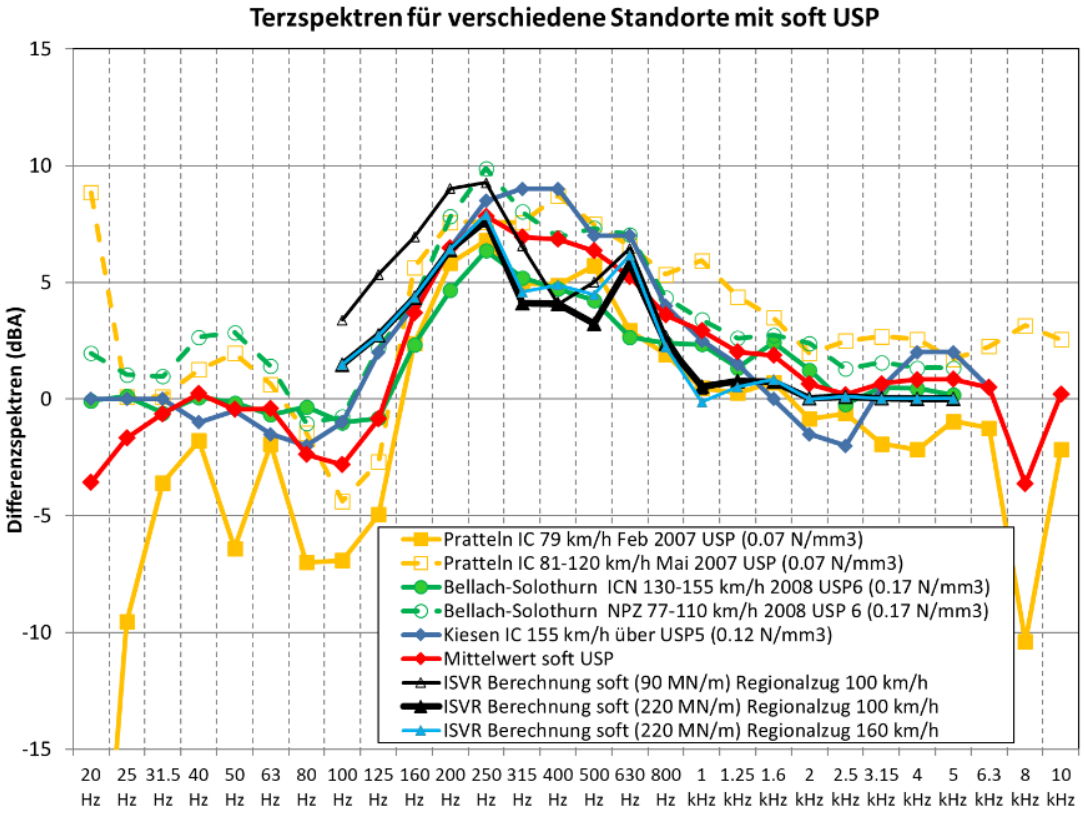


Abbildung 37: Lärmzunahmen bei Strecken mit weichen USPs gegenüber unbesohlten Strecken im Vergleich zu ISVR Berechnungen für 90/220 MN/m und Regionalzug 100 und 160 km/h – aus [96]

8.2.3.4 Weitere Einsatzbegrenzungen

Bei der Messkampagne in Lengnau-Pieterlen wurde der Querverschiebewiderstand des Gleises gemessen. Bei einer Querverschiebung von 2 mm wurde eine um 40-43% kleinere Kraft im geraden Abschnitt mit den USPs gemessen [84]. Bezüglich weichen USPs gibt es gemäss IRS 70713-1 [77] noch keine abschliessende Beurteilung, da zu wenige und widersprüchliche Ergebnisse vorliegen.

Da das dynamische Verhalten des Oberbaus durch weiche USPs verändert wird, soll gemäss IRS 70713-1 [77] auf Schotterfliessen geachtet werden, daher sind bei Teststrecken entsprechende Sichtprüfungen vorzusehen. In einem Bahnhofbereich in Pratteln wurde 2006 ein Streckenabschnitt mit weichen USPs für Testzwecke eingebaut. Aufgrund von fehlendem

Schotter unterhalb des Perrons mussten die USPs 2008 wieder ausgebaut werden. Trotz Ausbau wurden im Dezember 2009 weiterhin freiliegende Schwellenköpfe beobachtet. Ein direkter Zusammenhang zwischen weichen USPs und einem seitlichen Abfliessen des Schotters kann somit nicht hergestellt werden [98].

Derzeit gilt in der Schweiz noch die Auflage beim Einbau von mittelsteifen USPs, dass der Schotter im entsprechenden Bereich über seitliche Halterungen verfügen muss im Gegensatz zum UIC IRS 70713-1 [77]. Im Bericht [98] wurde die visuelle Kontrolle sämtlicher Abschnitte des SBB Netzes mit mittelsteifer und weicher Schwellenbesohlung dokumentiert. Dabei konnte ein systematisches Sicherheitsproblem durch Auflockern oder seitliches Abfliessen des Schotters aus dem Gleis ausgeschlossen werden [98].

8.2.3.5 Steife Schwellenbesohlung

Seit 2018 baut die SBB ab einer bestimmten Streckenbelastung steif besohlte Betonschwellen ein zur Optimierung der Unterhaltsintervalle. Es wurde festgestellt, dass die oben beschriebenen Effekte der Lärmzunahme für diesen USP-Typ nicht auftreten. Sowohl theoretische Berechnungen am Modell [99] als auch Messungen an einem Testabschnitt [93] haben bestätigt, dass die steif besohlten Schwellen zu keiner relevanten Lärmzunahme führen im Vergleich zu unbesohlten Betonschwellen.

8.2.3.6 Ausblick

Weiche USPs bilden eine kostengünstige und effektive EKS-Minderungsmassnahme ab etwa 50Hz. Leider hat es sich gezeigt, dass sie in der Schweiz eine Lärmzunahme mit sich bringen. Um die Lärmzunahme besser zu verstehen, erscheint es notwendig, die verschiedenen relevanten Grössen (u.a. Lärm spektral, TDR, Schienenrauheit, Schwingungen Schiene und Schwelle, Rollmaterialparameter) zu erfassen und auszuwerten, bzw. zu modellieren, um Rückschlüsse über die Ursache der Lärmzunahme vornehmen zu können.
Ebenfalls könnte das Zusammenspiel einer weichen USP mit einer lärmoptimierten Zwischenlage (vgl. Kapitel 8.2.5) Potenzial zeigen die Lärmzunahme unter 1 dB(A) zu bringen und sollte in Zukunft untersucht werden.

8.2.4 Schienenbefestigungssysteme

Die Schienenbefestigung im Allgemeinen hat die Aufgabe die Spurweite zu halten und die auf die Schienen wirkenden Kräfte auf die Schwelle oder die Betonplatte bei fester Fahrbahn zu übertragen. Die auf die Schienenbefestigungen einwirkenden vertikalen Kräften können durch unter den Schienen eingelegte elastische Zwischenlagen gedämpft werden [100].
Bei der Einbringung von Elastizität in die Ebene des Schienenbefestigungssystems sind die möglichen erhöhten Schienenkopfauslenkungen, verbunden mit der sich daraus ergebenden Spurerweiterung, zu beachten [9].

In diesem Kapitel werden einzelne Entwicklungen von Schienenbefestigungssystemen als Ganzes betrachtet, d.h. diese umfassen meistens auch eine Zwischenlage. Die hier erwähnten Schienenbefestigungssysteme beinhalten ebenfalls eine zweite elastische Schicht, als Plattenunterlage genannt, die zwischen der Rippenplatte und der Schwelle angebracht ist.

Zwischenlagen allein als Minderungsmassnahmen werden separat im Kapitel 8.2.5 behandelt.

An weichen Schienenbefestigungen wurden schon in den Siebzigerjahren gearbeitet. Das Kölner Ei der Firma Clouth (siehe Abbildung 38) besteht aus zwei elastischen Schichten. Die erste Federstufe bildet einen Gummiring, der die Rippenplatte und den Rahmen durch Vulkanisation verbindet. Dieses System wurde erfolgreich für den Körperschallschutz im Stadtbahnbereich eingesetzt. Jedoch ist es für die Vollbahn aufgrund der grösseren Achslasten nicht anwendbar. Bei der SBB kommen ähnlich aufgebaute Befestigungen, die sogenannten Delkor-Stützpunkte, bei Stahlbrücken mit offener Fahrbahn und Holzschwellen, um die Lärmemission der Brücken zu reduzieren.

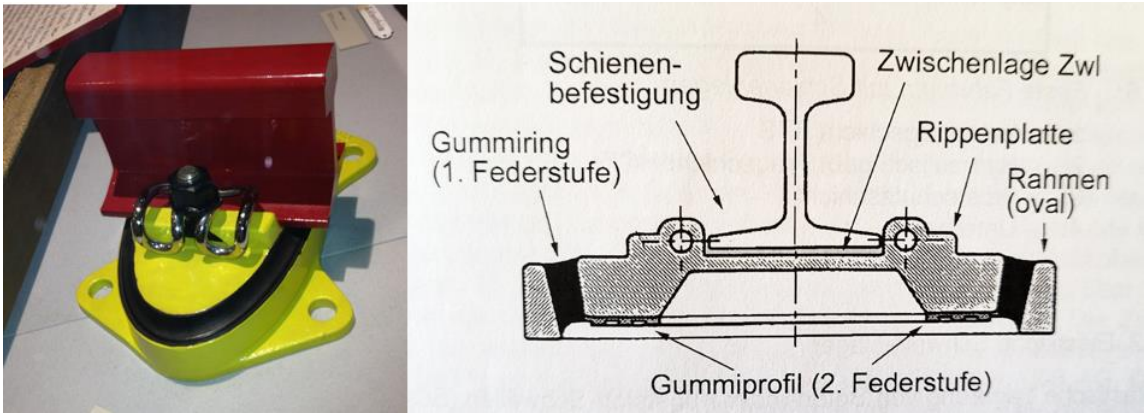


Abbildung 38: Foto und Aufbau der Befestigung vom Typ "Kölner Ei". Skizze aus [9]

Basierend auf der gleichen Idee wurde zum Beispiel das Produkt VANGUARD durch die Firma Pandrol entwickelt (siehe Abbildung 39). Gemäss der technischen Beschreibung des Produkts, kann dies im Vollbahnbereich eingesetzt werden. In der Referenzliste des Produkts sind hauptsächlich Einsätze auf Feste-Fahrbahn-Systemen für Stadtbahnen enthalten. Nur einzelne Referenzen für Achslasten über 20t sind genannt.



Abbildung 39: Schienenbefestigungssystem VANGUARD von Pandrol

Im Rahmen vom WP3 des RIVAS-Projekts war geplant, die Dämmleistung dieser Schienenbefestigung auf einer Versuchsstrecke in Frankreich zu testen. Jedoch gab es Schwierigkeiten mit den Dauerfestigkeitstests, die für den Probebetrieb gefordert waren [101].

Auf dieser Versuchsstrecke konnte jedoch das Produkt DFC Valiant von Pandrol installiert und getestet werden. Auch dieses Befestigungssystem weist zwei elastische Schichten auf (siehe Abbildung 40)

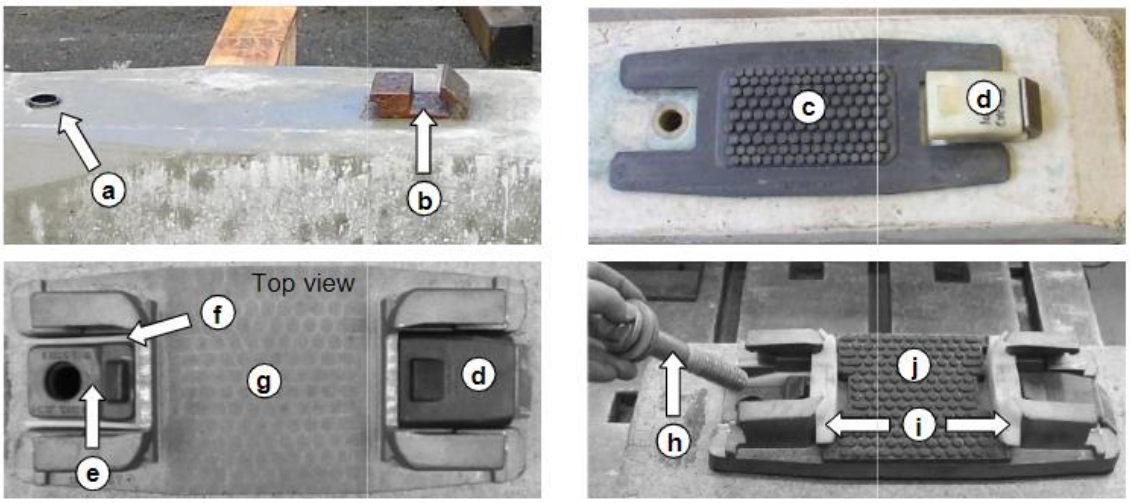


Abbildung 40: Aufbau des Schienenbefestigungssystems PANDROL DFC aus RIVAS D3.5 [101]. Legende: (a) Gewindeinsert, (b) Anschlag, (c) elastische Unterlage, (d) und (e) äussere und innere Kunststoffklammer, (f) Kunststoffisolator, (g) Grundplatte, (h) Bolzen, (i) Seitenisolatoren, (j) Zwischenlage

Detaillierte Informationen zum Messaufbau und zu weiteren Messungen (Transferfunktionen) sind dem Bericht D3.10 [102] zu entnehmen. Es wurden Einfügedämmungen anhand von Vorbeifahrten ermittelt. Als Referenz wurde ein Abschnitt etwa 100m-entfernt vom Testabschnitt verwendet, ausgerüstet mit der SNCF Standard-Zwischenlage und 40kg-schwereren Schwellen (Typ M450). Es wurden drei Konfigurationen der DFC-Befestigung getestet, siehe Abbildung 41.

Name	Under Rail Pad		Under Base-plate Pad		Global stiffness
	Type	Stiffness	Type	Stiffness	
DFC 0	SNCF std. (9 mm)	120 MN/m	EVA	270 MN/m	75 MN/m
DFC 2	Vossloh 2 (10.5 mm)	40 MN/m	EVA	270 MN/m	36 MN/m
DFC 3	SNCF std. (9 mm)	120 MN/m	Studded rubber	64 MN/m	25 MN/m

Abbildung 41: Auf der Versuchsstrecke getestete Konfigurationen der PANDROL DFC (aus [102])

In Abbildung 42 sind die Ergebnisse nach Fahrgeschwindigkeitskategorie dargestellt. Mindestens ab 63Hz wird eine positive Einfügedämmung beobachtet, zwischen 20 und 50Hz wird eine Verstärkung festgestellt, mit einem Maximum von -6 bis -9dB bei 40Hz. Eine positive Einfügedämmung ist bei tiefen Frequenzen (unter 16-20Hz, je nach Fahrgeschwindigkeit) zu sehen. Dies entspricht nicht den Simulationsergebnissen aus D3.2 [84] (die jedoch die Zwischenlage allein betrachtet), die ausschliesslich eine Amplitudenverstärkung unterhalb der Systemeigenfrequenz vorgesehen hatten.

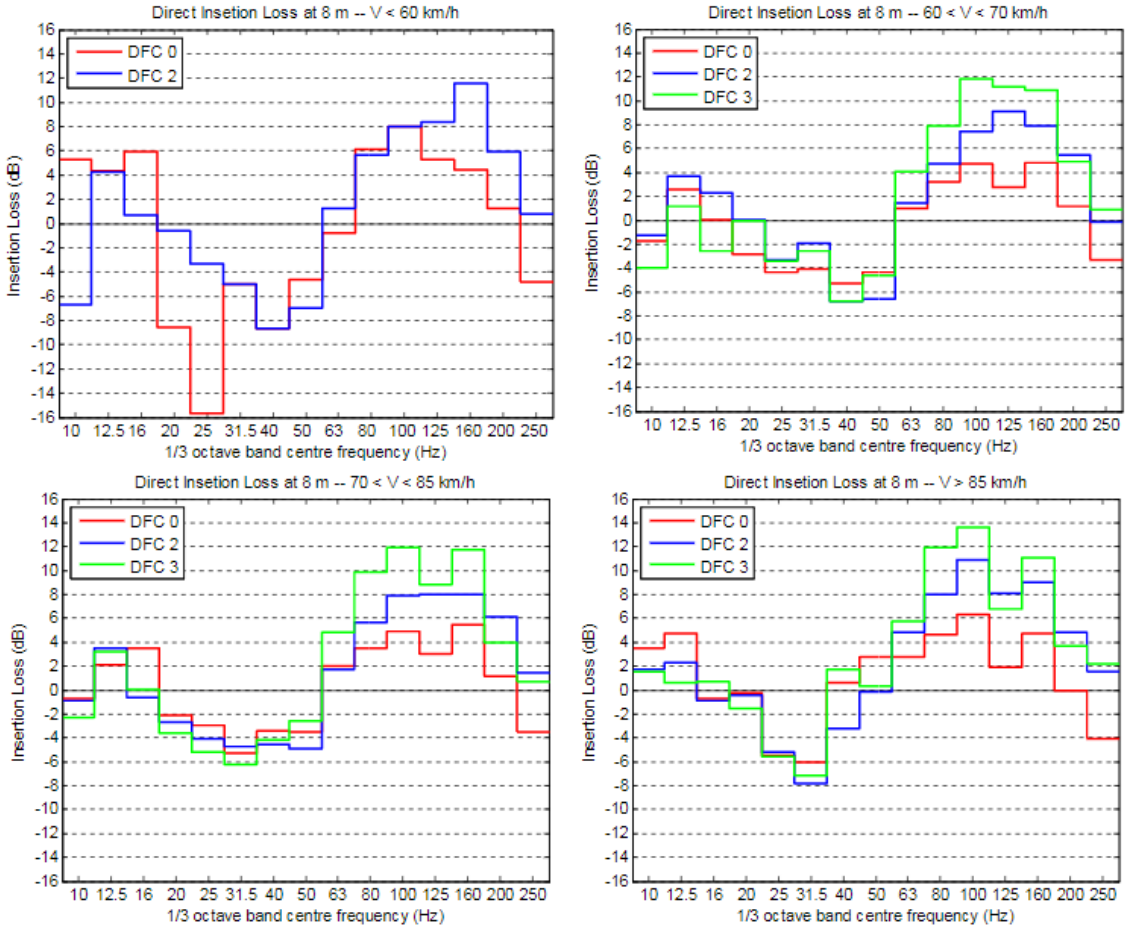


Abbildung 42: Einfügedämmung in 8m-Entfernung zwischen Referenzabschnitt und Testabschnitt, gemittelt für alle Zugsdurchfahrten, nach Fahrgeschwindigkeit – aus [102]

In der Schweiz wurden keine Versuche mit alternativen Schienenbefestigungskonstruktion als EKS-Minderungsmassnahme durchgeführt.

Die Problematik der Luftschallemissionszunahme, die bei den weichen Zwischenlagen auftritt, wird mit isolierenden Schienenbefestigungen ähnlich erwartet.

8.2.5 Zwischenlagen

Die Zwischenlage ist ein Elastomer-Bauteil, das zwischen Schiene und Schwelle eingebaut wird. Die Zwischenlage ist eine Komponente der Schienenbefestigung. Das ursprüngliche Ziel des Einsatzes von Zwischenlagen war die Schonung der Schwellen, insbesondere der Betonschwellen, und des Schotters dank einer besseren Verteilung der Radlast über mehrere Stützpunkte bei Zugsdurchfahrten sowie eine möglichst dauerhafte gute Gleislage.

Es wird umgangssprachlich zwischen harten und weichen Zwischenlagen unterschieden, abhängig von ihrer statischen Steifigkeit k_{stat}. Im Gegensatz zu den USP sind die entsprechenden Klassen jedoch nirgends definiert, so dass sicher jedes Land, teilweise auch jeder einzelne Infrastrukturbetreiber andere Klasseneinteilungen verwendet.

Tabelle 14: Definition der harten und weichen Zwischenlage in der Schweiz

	Nach BAV Richtlinie Lärmschutz [94]	**Nach SBB Weisung FB 400-0507** [103]
Harte Zwischenlagen	k_{stat} > 800 kN/mm	k_{stat} > 800 kN/mm
Weiche Zwischenlagen	k_{stat} ≤ 500 kN/mm	k_{stat} ≤ 800 kN/mm

Die Wirkungsweise der Zwischenlage basiert auf der Schwingungsisolierung, wie im Kapitel 8.2.1 allgemein erläutert: wird eine genug weiche Zwischenlage gewählt, können Vibrationen oberhalb der Frequenz $\sqrt{2} \times f_0$ gemindert werden. Unterhalb dieser muss mit einer Verstärkung gerechnet werden.

Aufgrund der im eingebauten Zustand auf der Zwischenlage geringen wirksamen Massen können Zwischenlagen ab etwa 40Hz gegen EKS wirksam sein [9] [84].
Ausserdem dürfen weiche Zwischenlagen die Lagestabilität des Gleises, vor allem die Spurweite, nicht dermassen beeinflussen, dass sie ausserhalb der Grenzwerte liegen.

Der Isolierungseffekt der weichen Zwischenlage wirkt sich jedoch negativ auf den Lärm aus. Da die Schwingungen weniger auf die Schwellen übertragen werden, werden sie von der Schiene in einem grösseren Ausmass abgestrahlt. Das lässt sich konkret an einer höheren Gleisabklingrate erkennen. Mit der weichen Zwischenlage ist mit einer Lärmzunahme von etwa 3dB(A) relativ zur harten Zwischenlage zu rechnen [104].

Dies ist vermutlich der Grund, warum weiche Zwischenlagen als EKS-Minderungsmassnahme in Versuchen und Forschungsprojekten wenig berücksichtigt wurden. Die reinen Materialkosten sind für die Zwischenlagen relativ niedrig, jedoch müsste man teilweise bei einem Umbau das Schienenbefestigungssystem zusätzlich tauschen (die bei der SBB noch grossflächig im Einsatz stehende Spannklemmen Skl 1 sind damit nicht kompatibel) [103].

Bei der SBB werden aufgrund der Lärmzunahme keine weichen Zwischenlagen bei Strecken mit maximaler Fahrgeschwindigkeit kleiner oder gleich 160km/h verbaut, sondern harte Zwischenlagen. Erst bei höheren Fahrgeschwindigkeiten werden weichen Zwischenlagen verbaut, und dies seit 2010 in Kombination mit steifen USPs.

Im Rahmen vom RIVAS Deliverable 3.2 [84] wurde eine Parameterstudie durchgeführt, um den Einfluss auf die Wirkung verschiedener Oberbaumassnahmen zu beurteilen. Neben den Zwischenlagen wurden auch die Schwellenbesohlung und die Schwellengeometrie untersucht.

Diese Studie basiert auf ein FEM/BEM-Modell der KU Leuven. Folgende Ergebnisse und Einflüsse können aus dieser Studie festgehalten (vgl. Abbildung 43)

- Es werden die Zwischenlagen mit k_{stat} = 25kN/mm und 150kN/mm miteinander verglichen und die Einfügedämmung berechnet: ab dem 63Hz-Terzband wird eine Dämmwirkung beobachtet, mit einem Maximum von 16-20dB bei 80Hz
- Ein steiferer Unterbau führt zu einer Amplifikation der Effekte der Zwischenlage: die Schwingungsverstärkung ist höher, dafür wird die Abminderung oberhalb ebenfalls höher. Der Unterschied im IL zwischen den Böden beträgt 3-4dB.

Ein Vergleich dieser Simulationsergebnisse mit Messergebnissen liegt nicht vor.

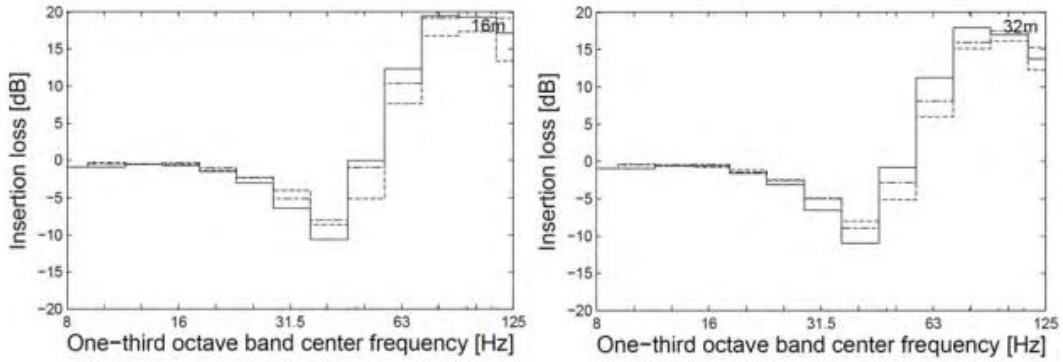


Abbildung 43: Einfügedämmung aus Simulationsergebnisse für die Durchfahrt eines Zuges des Typs «AGC» auf einem Gleis mit Zwischenlage mit k_{stat}=25 MN/m relativ zur Referenz mit k_{stat}=150 MN/m auf verschiedene Böden: steifer Halbraum (duchgezogene Linie), 2 mittelsteife Schichten auf steifem Halbraum (gestrichelte Linie - -) und 2 weiche Schichten auf mittelsteifem Halbraum (gestrichelte Linie . _) – aus D3.2 [84]

Spezifische Versuche zur EKS-Minderung durch weiche Zwischenlagen gab es im Netz der SBB aufgrund der obenerwähnten Nachteile nicht. Andere Infrastrukturbetreiberinnen in der Schweiz setzen aktuell bei Erneuerungen standardmässig weiche Zwischenlagen ein. Untersuchungen zu EKS sind in diesem Zusammenhang nicht gemacht worden.

In den letzten 5 Jahren wurden drei verschiedene Forschungsprojekte im Auftrag des BAFUs (und BAV) zur Optimierung von Zwischenlagen abgewickelt. Ihr gemeinsames Ziel war, die Vorteile der steifen Zwischenlagen im Hinblick auf Lärm mit denen von den weichen Zwischenlagen im Bezug auf Instandhaltung und Erschütterungen zu kombinieren und dies unter Gewährleistung der Kompatibilität mit den anderen bestehenden Oberbaukomponenten.

Ein Projekt wurde durch die Firma PROSE und den Hersteller BATEGU bearbeitet.
Die statische Steifigkeit k_{stat} der entwickelten Zwischenlagen beträgt etwa 200kN/mm.
Die im Bericht [105] dargestellten Ergebnisse zu Erschütterungen zeigen, dass die rms-Werte der Schwingschnelle im 7.5m-Abstand für die neuentwickelte Zwischenlage etwa 33% der Werte für die harten Zwischenlagen erreichen. Zu diesen Ergebnissen liegen wenig Details

vor, wie Frequenzspektren oder Ankopplung des Messsensors mit dem Boden. Diese fallen aber etwas optimistisch aus: aufgrund der nicht so kleinen Steifigkeit werden Dämmleistungen erst oberhalb von 150Hz erwartet, wenn man die Modellierung nach Kap. 8.2.1 anwendet und die Ergebnisse aus Abbildung 42 extrapoliert.

Das zweite Projekt wurde an die KPZ Fahrbahn bei einer Zusammenarbeit mit dem Hersteller Getzner beauftragt [106]. Die statische Steifigkeit des untersuchten Produkts beträgt etwa 60-80 kN/mm. Der Fokus der Versuche lag beim Lärm und es liegen keine Ergebnisse zu Erschütterungen im Freifeld vor.

Das dritte Forschungsprojekt wurde zwischen 2017-2022 abgewickelt, bei einer Zusammenarbeit der EPFL, der HEIG Yverdon, der EMPA, der SBB-Infrastruktur und dem Hersteller Semperit. Die neuentwickelte Zwischenlage besteht aus einem Kompositmaterial und die Variante, die im eingebauten Zustand getestet wurde, wies eine statische Steifigkeit von 244kN/mm auf. Auch bei diesem Projekt wurde keine Beurteilung im Hinblick auf EKS durchgeführt.

Die in [84] gerechneten Einfügedämmungen, für Zwischenlagen mit k_{stat}=25kN/mm relativ zur Referenz mit k_{stat}=150kN/mm, die mehr als 15dB erreichen, scheinen sehr optimistisch. Es könnte am Modell liegen, wofür keine Hinweise auf eine korrekte Validierung dokumentiert ist. Die Übertragbarkeit dieser optimistischen Ergebnisse für die in der Schweiz typisch eingesetzten Zwischenlagen (vgl. Tabelle 14) ist nicht klar.
Um den Einfluss der neuartigen Zwischenlagen auf EKS zu bestimmen, die in den drei BAFU-Forschungsprojekten untersucht wurden, auch im Zusammenspiel mit USPs, wären zusätzliche Untersuchungen sinnvoll. Das neulich in Betrieb genommene Fahrbahnlabor auf der Strecke zwischen Sempach und Rothenburg könnte dafür geeignet sein.

8.2.6 Masse-Feder-System (MFS)

8.2.6.1 Allgemeines

Als «Masse-Feder-System» wird eine Oberbauausführung bezeichnet, die aus einer schweren Beton-Grundmasse besteht, die durch elastische Bauteile abgefedert ist.
Mit diesem System erreicht man die beste Erschütterungsisolierung aller Massnahmen, aber auch die höchsten Kosten. Die Funktionsweise ist die eines Ein-Massen-Schwingers wie in Kapitel 8.2.1 erläutert. Dabei kann die wirkende Masse sehr hoch gesetzt werden, um eine grosse Einfügedämmung zu erreichen. Diese erlaubt daher, eine sehr tiefe Eigenfrequenzen bis 5Hz zur erreichen, ermöglicht eine Schwingungsisolierung ab ca. 8 Hz und somit nicht nur für den abgestrahlten Körperschall, sondern auch für Erschütterungen.

Die Grundmasse kann als Betontrog, Betonbalken oder Betonplatte ausgebildet werden. Diese Masse beträgt typischerweise 4 bis 10t/m je nach angestrebter Einfügungsdämmung

[5]. Bei einer Trogausführung kann ein normales Schotterbett verlegt werden. Auf Balken oder Platten werden die Schienen mittels elastischer Schienenlager befestigt, d.h. als feste Fahrbahn. Heutige Masse-Feder-Systeme sind überwiegend solche schotterlosen Bauformen.

Die elastischen Elemente können aus Elastomerlagern oder aus Stahlfedern bestehen. Bei den Elastomerelementen kann die Lagerung vollflächig als elastische Matte erfolgen, mittels in Fahrtrichtung verlegten Elastomerstreifen oder mit punktförmigen Lagern erfolgen. Bei der punktförmigen Lagerung kommen Revisionsöffnungen zum Einsatz, die die Inspizierung und den Austausch der Lager ermöglicht. Abgesehen von Stahlfederlagern weisen Elastomer-Einzellager eine geringe Schubsteifigkeit auf. Daher muss die Grundplatte in diesem Fall mit Seitenlagern versehen werden [9].

Der Einsatz vom Masse-Feder-System ist vielmehr im Tunnelbereich üblich wie auf der freien Strecke aufgrund des kontrolliert steifen Unterbaus dank der Tunnelsohle. Für ein tieffrequentes MFS werden schwere Grundplatten benötigt, was ebenfalls eine grosse Bauhöhe erfordert, typischerweise zwischen 0.8 bis 1.5m ab SOK [5] und somit auch beim Tunnelbau zu hohen Zusatzkosten führt. Gemäss [107] spielen neben den hohen Kosten konstruktive Schwierigkeiten wie grosse Temperaturschwankungen oder Aufnahme der Horizontalkräfte eine Rolle.

8.2.6.2 Einsatz von MFS in der Schweiz

Die in der Schweiz verbauten MFS-Systeme sind in Tabelle 15 aufgelistet.

Tabelle 15: Übersicht der Masse-Feder-Systeme in der Schweiz (Vollbahnbereich) mit vorhandenen Messergebnissen aus [107]. MFS-F = MFS auf Flächenlager, MFS-S = MFS auf Streifenlagern, MFS-E = MFS auf Einzellagern

ISB	Ortsbezeichnung	Projekt	Typ	Oberbau	Referenz Messbericht
SBB	Central, Zürich	Central	MFS-E	FF	[108]
SBB	First Church Kreuzstr., Zürich	First Church	MFS-F	FF	[108]
SBB	Rämistr., Zürich	Rämistrasse (Weiche)	MFS-E	Schotter	[108]
SBB	Kirche St. Antonius, Zürich	St-Antonius	MFS-F	FF	[108]
SBB	Zollikofen	Grauholztunnel	MFS-F	FF	[109]
SBB	Zürich Wiedikon	Zimmerbergtunnel E1	MFS-E	FF	[110]
SBB	Zürich Wiedikon	Zimmerbergtunnel F1	MFS-S	FF	[110]
SBB	Zürich Wiedikon	Zimmerbergtunnel F2	MFS-S	FF	[110]
SBB	Zürich Wiedikon	Zimmerbergtunnel F3	MFS-S	FF	[110]
SBB	Zürich Wiedikon	Zimmerbergtunnel F4	MFS-S	FF	[110]
SBB	Zürich Wiedikon	Zimmerbergtunnel F5	MFS-S	FF	[110]
SBB	Thalwil	Zimmerbergtunnel E2	MFS-E	FF	[110]
SBB	Thalwil	Zimmerbergtunnel F6	MFS-S	FF	[110]

ISB	Ortsbezeichnung	Projekt	Typ	Oberbau	Referenz Messbericht
SBB	Thalwil	Zimmerbergtunnel F7	MFS-S	FF	[110]
SBB	Kirchberg	Tunnel Emmequerung (NBS)	MFS-S	FF	-
SZU	Zürich, Gebäude Ha-bis Royal	Habis-Royal	MFS-E	FF	[107]
SZU	Shopville Zürich HB	Shopville	MFS-F	FF	[107]

Masse-Feder-Systeme auf der freien Strecke sind weltweit sehr selten und kommen in der Schweiz nicht zum Einsatz, da die Baukosten als unverhältnismässig angesehen werden.

Beim Bau der Zürcher-S-Bahn-Strecke Ende der 80er-Jahren, die unterhalb der Stadt führt, wurden einige kritischen Streckenabschnitte identifiziert, wo besondere Schutzmassnahmen zu treffen waren. Es wurden entweder Unterschottermatten oder MFS-Varianten implementiert [108]. Die Ergebnisse der Abnahmemessungen mit einer Re4/4-Lokomotive (als absolute Messwerte) sind in Abbildung 44 dargestellt.

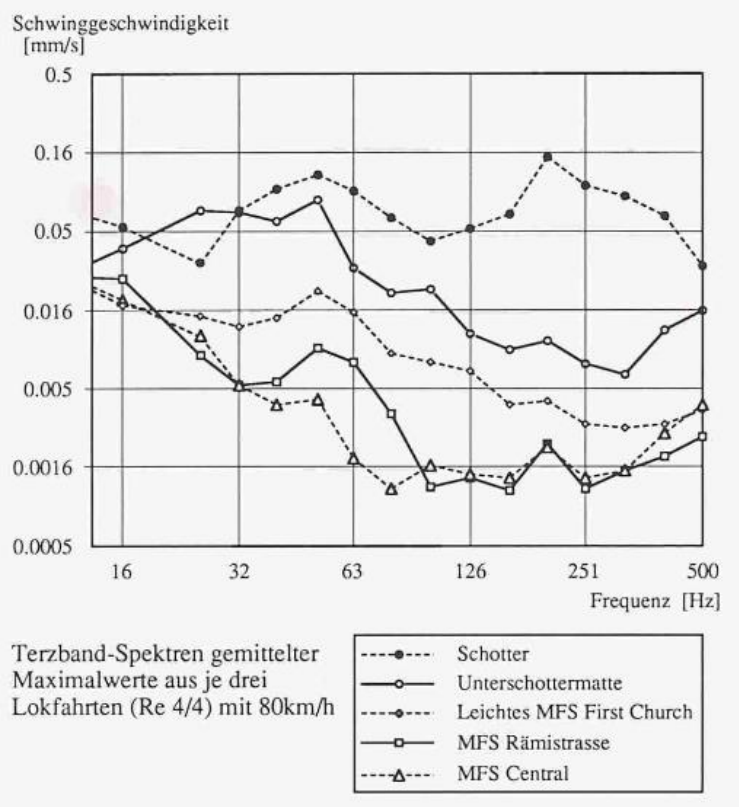


Abbildung 44: Ergebnisse der Abnahmemessungen – Bahnstrecke S-Bahn Zürich aus [108]

1997 wurden Nachmessungen an verschiedenen Stellen dieser Strecke mit Lokomotiven der Typen Re4/4 und Re460 durchgeführt, um Erfahrung mit MFS im Hinblick auf dem Bau des

Zimmerbergtunnels zu gewinnen. Es konnte festgestellt werden, dass die gemessene Dämmwirkung sogar etwas besser war wie bei den Abnahmemessungen. Nach 7 Jahren Betrieb wurden auch keine Schäden am MFS identifiziert. Bei einer Messung in einem Haus, wo der Tunnel vom Lockergestein allmählich in den Fels eintaucht, konnte beobachtet werden, dass die Emissionen des Tunnels im Fels ca. 10 dB geringer sind als im Lockergestein. Auch die grossen Unterschiede in den Immissionen zwischen den Fahrzeugtypen (um einen Faktor 2.5) konnte festgestellt werden. An den Einfügedämmungen fällt das nichtlineare Verhalten des Systems auf: die Dämmwirkung ist bei der Lokomotive mit der stärksten Anregung (Re4/4) grösser. Dies lässt sich durch die Abnahme der dynamischen Steifigkeit bei höheren Anregungsamplituden bzw. höheren Achslasten erklären.

Im Grauholztunnel wurden wegen darüber liegenden Wohngebäuden auf 100m-Länge ein MFS gebaut. Als elastisches Element wurde die UBM 1000 W eingesetzt. Nach der Inbetriebnahme erfolgten 1995 Abnahmemessungen im Tunnel und in 2 Wohngebäuden. Die Eigenfrequenz von 25Hz konnte messtechnisch bestätigt werden. 2014 wurden im Tunnel und in einem darüberliegenden Haus Vergleichsmessungen durchgeführt, um Langzeiterfahrung über das MFS zu gewinnen. Dabei hat sich gezeigt, dass die Eigenfrequenz sich nicht verändert hat. Die Erschütterungen im Erdgeschoss haben im Vergleich mit 1995 tendenziell abgenommen, der Körperschall hat im Erdgeschoss um 1.7dB zugenommen und im Obergeschoss um -5.8dB abgenommen. Dies konnte nicht begründet werden. Bei diesem Vergleich wurden Veränderungen des Gleichzustands und des Rollmaterials nicht berücksichtigt [109].

Im Allgemeinen sind bei tieffrequenten MFS ($f_0 < 10$Hz) Einfügedämmungen von ca. 15-20dB ab 50Hz erreichbar [107] [9]. Dies verdeutlicht Abbildung 45, mit gemessenen Einfügedämmungen verschiedener MFS in der Schweiz, Deutschland und Österreich.

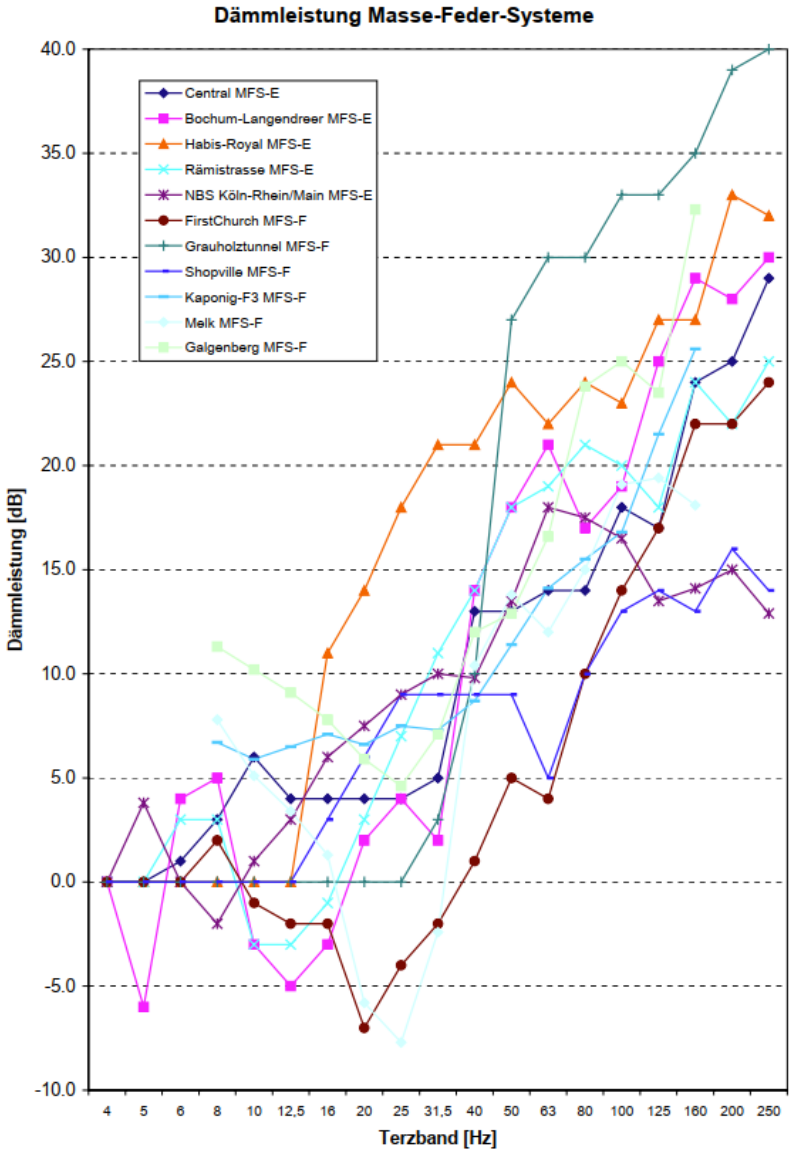


Abbildung 45: gemessene Einfügedämmungen von verschiedenen MFS in der Schweiz, Deutschland und Österreich [107]

8.2.7 Low Vibration Track with High Attenuation (LVT-HA)

Das “Low-Vibration-Track” kurz LVT ist eine kommerzielle Bezeichnung für ein Feste-Fahrbahn-System der Firma Sonneville. Die Stützpunkte für die Schiene bestehen aus Betoneinzelblöcken, die auf eine elastische Einlage aufliegen und von einem Gummischuh umrandet sind (auf Englisch «booted sleeper»). Zwischen Schiene und Betonblock kommt eine zweite elastische Schicht (Zwischenlage) zum Einsatz. Im Gegensatz zu anderen Systemen kommen keine Spurstangen in Gleisquerrichtung zum Einsatz. Der Aufbau des LVT-Systems ist in

Abbildung 46 ersichtlich. Nach dem Verlegen und Ausrichten wird der Gleisrost mit unbewehrten Füllbeton vergossen [111].

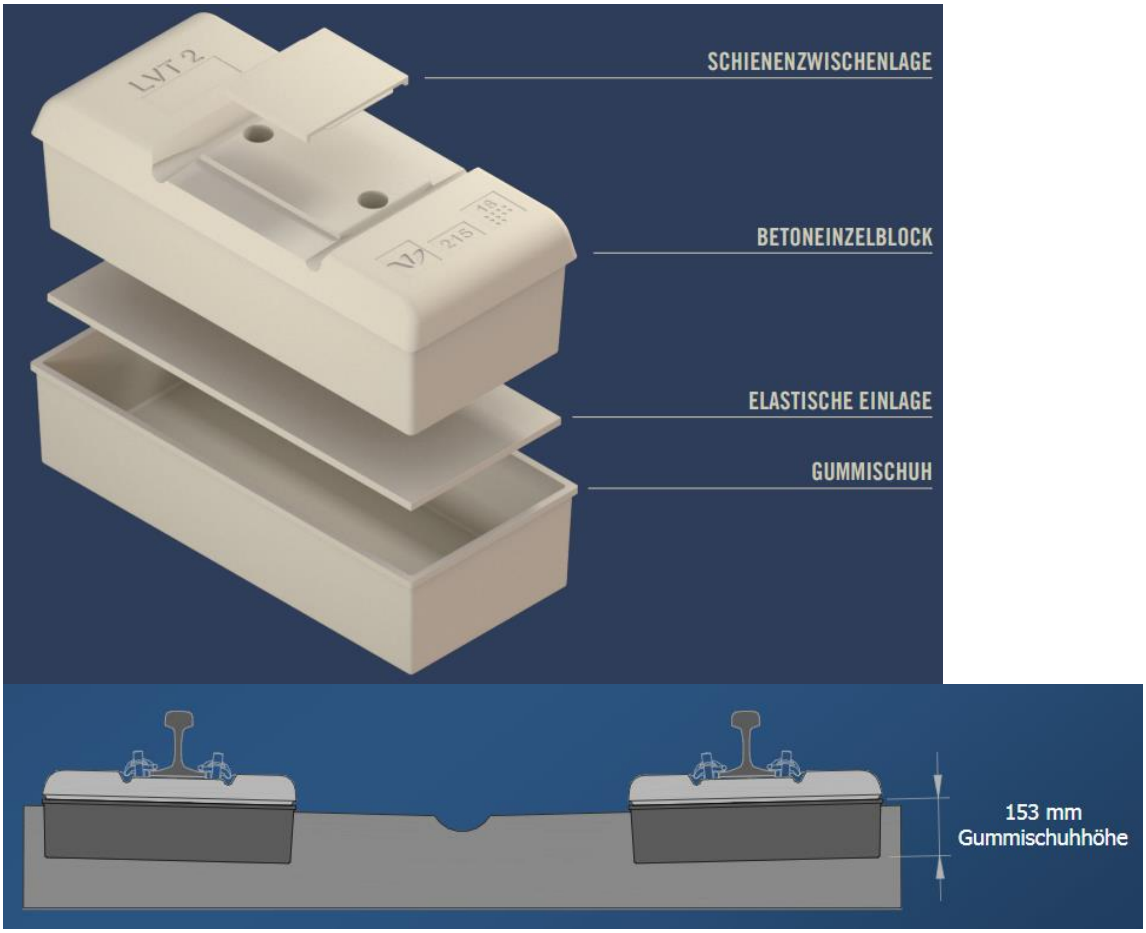


Abbildung 46: Aufbau des LVT-Systems [111]

Das LVT-System von Sonneville kennzeichnet sich durch ein ähnliches Einsenkungsverhalten wie ein Schotteroberbau. Die Einsenkung wird durch die elastische Einlage unter dem Betonblock ähnlich dem Schotter im Schotteroberbau erzielt [112]. Gleisseitige Einsenkungsmessungen wurden im Gotthard-Tunnel durchgeführt und haben die prognostizierten Werte bestätigt [113].

Dieses Feste-Fahrbahn-System wird in zwei Varianten angeboten: Standard LVT und High Attenuation LVT (LVT-HA). Letztere besteht aus Stützpunkten mit grösseren Dimensionen (etwa 30% zusätzliche Masse) und kleinerer Steifigkeit (auf dem SBB-Netz Stützpunktsteifigkeit im Bereich ca 9kN/mm). Gemäss Herstellerangaben ist die Dämmleistung der LVT-HA vergleichbar mit der eines leichten Masse-Feder-Systems. Der LVT-Standard wird im Gegensatz zum LVT-HA nicht als EKS-Minderungsmassnahme angesehen.

Im Auftrag von Vigier Rail wurde 2014 eine Messkampagne im Tunnel «Citytunneln» in Malmö (Schweden) durchgeführt, bei welcher zwei LVT-HA-Abschnitte mit einem Schotteroberbau verglichen wurde. «Section B» befindet sich im Tagbautunnelabschnitt, «Section C» in einem gebohrten Tunnelabschnitt. Der Schotteroberbau wird als «normal» bezeichnet, weitere Details sind nicht vorhanden. Die beiden LVT-HA weisen eine statische Steifigkeit von 9kN/mm aus.

Die Messungen der Schwingschnellen am Tunnelbankett bei Zugsvorbeifahrten wurden mittels Mobilitätsmessungen korrigiert, um die unterschiedlichen Eigenschaften der Umgebung zu berücksichtigen. Die gemessenen Einfügedämmungen sind in Abbildung 47 dargestellt. Die erreichten Dämmungen betragen 20-30dB im Frequenzbereich 50-125Hz. Ausserhalb dieses Bereichs ist sie niedriger. Trotz «Umgebungskorrektur» ist die Dämmleistung um etwa 5dB höher bei der Tagbauausführung.

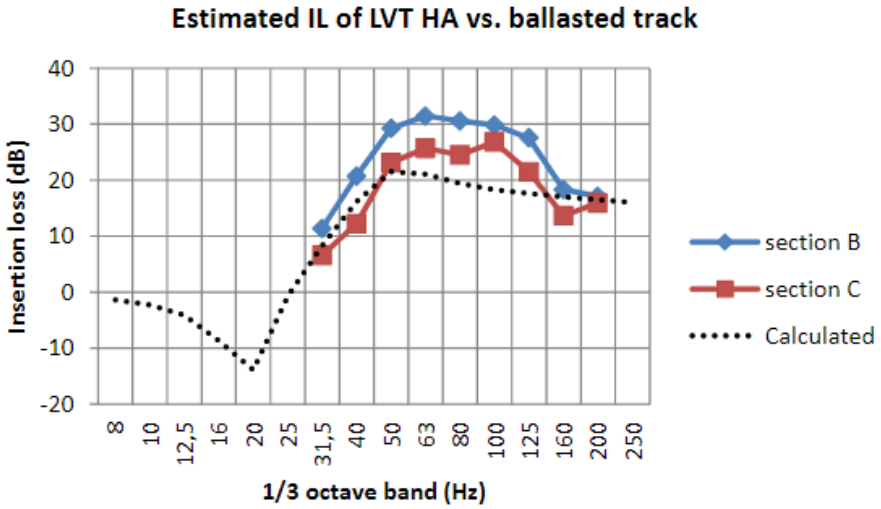


Abbildung 47: Einfügungsdämmungsspektren des LVT-HA (Section B und Section C) im Vergleich zum Schotteroberbau. Die gestrichelte Linie ist das durch Sonneville berechnete Spektrum. [114]

Der Konkurrent SATEBA bietet Produkte mit einem ähnlichen Aufbau, in Monoblock-Ausführung sowie in einer Bi-Block-Variante mit Spurstange. Gemäss Produktbeschreibungen [115] [116] sind IL bis 20dB bei 63Hz erreichbar.

Die in der Schweiz verbauten LVT-HA sind in Tabelle 16 aufgelistet. Dieses System kam in der Schweiz bis jetzt ausschliesslich in Tunneln zum Einsatz und wird nur an Stellen installiert, wo ein erhöhter Körperschallschutz notwendig ist.

Tabelle 16: Übersicht der eingebauten LVT-HA-Systemen in der Schweiz (nur Abschnittsweise)

Ortsbezeichnung	Typ	Eigenschaften	Jahr	Referenz Messbericht
Weinbergtunnel (DML) Zürich	LVT-HA	Stützpunktsteifigkeit LVT-HA: 9kN/mm (Ref: LVT:37kN/mm)	2016	[117]
Gotthard Basis Tunnel	LVT-HA		2016	Kein Messbericht vorhanden
Tunnel CEVA	LVT-HA		2019	Kein Messbericht vorhanden
Ceneri Basis Tunnel	LVT-HA		2020	Keine belastbaren Ergebnisse

2016 wurden Vergleichsmessungen im Weinbergtunnel zwischen einem Abschnitt mit LVT-Standard und einem mit LVT-HA. Die beiden Abschnitte liegen etwa 600m voneinander entfernt (da dazwischen MFS-Abschnitte verbaut wurden), die Tunnelform und die Geologie sind an beiden Stellen nicht identisch.

Im LVT-HA Abschnitt wurde beobachtet, dass die Fahrten auf dem vom Sensor fernen Gleis höhere Werte aufwiesen wie auf dem nahen Gleis, was beim LVT nicht der Fall war und generell nicht erwartet wird. Dies konnte nicht erklärt werden. Nur die Fahrten auf dem nahen Gleis wurden für die Detailauswertung berücksichtigt.

Die Differenzspektren für einige Zugsindividuen (Abbildung 48) zeigen eine gute Dämmwirkung der LVT-HA von 40 bis 200Hz (5 bis 13dB) gegenüber dem LVT-Standard. Zwischen 12 und 32Hz tritt eine Verstärkung auf, die sich mindestens zum Teil durch die Systemresonanz (bei 26.1Hz) interpretiert wurde. Es wird vermutet, dass diese Verstärkung sich zum anderen Teil durch die unterschiedlichen Tunnelformen und Geologien erklären lassen könnte.
Für den Anstieg ab 200Hz wird keine Hypothese formuliert. Erwähnenswert ist, dass die erreichte Dämmwirkung deutlich kleiner ist, wie die, die in Malmö nachgewiesen werden konnte (vgl. Abbildung 47).

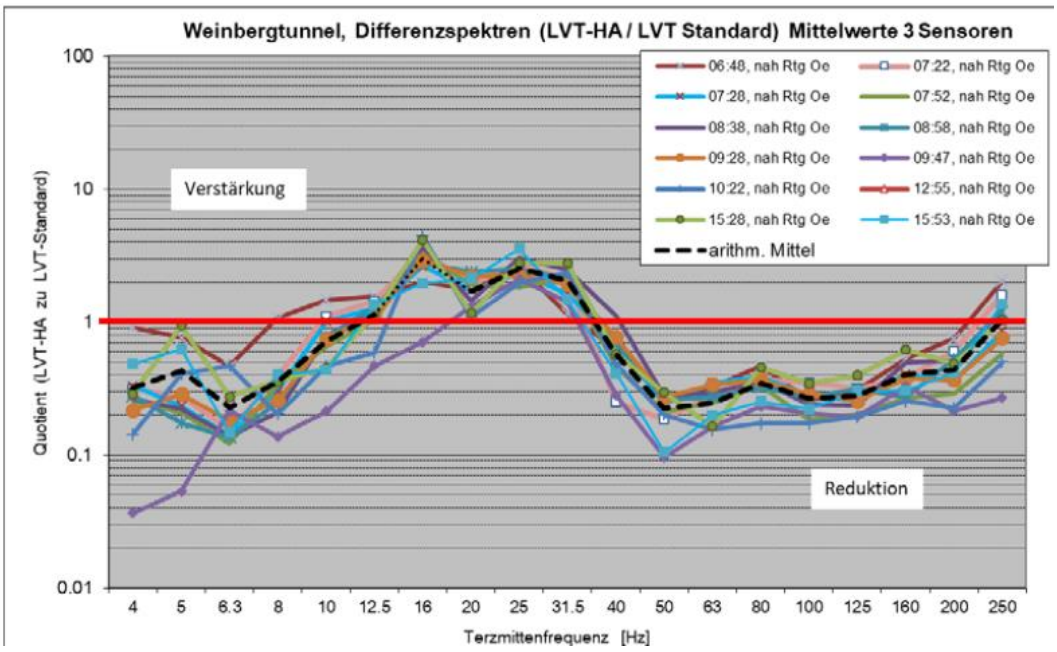


Abbildung 48: Differenzspektren LVT-HA zu LVT-Standard für nahes Gleis Richtung Oerlikon (energ. Mittelung der 3 Sensoren)

Weitere belastbare Resultate zum LVT-HA in der Schweiz liegen derzeit nicht vor.

8.2.8 Gleisinstandhaltung

Analog zu den Radunregelmässigkeiten, die in Kapitel 8.1.1.1 erläutert sind, ergeben sich in der Praxis Abweichungen zum perfekten gleichmässigen Oberbau, sowohl an der Geometrie wie auch an der Steifigkeit.

Höhenlagefehler

Der Höhenlagefehler h(x) oder Längshöhenfehler ist die vertikale Abweichung der Gleismitte des trassierten Sollwertes und aus der Abweichung der linken z_L und rechten Schiene z_R abgeleitet, siehe graphische Darstellung in Abbildung 49 [65].

$$h(x) = \frac{z_L + z_R}{2} \qquad (13)$$

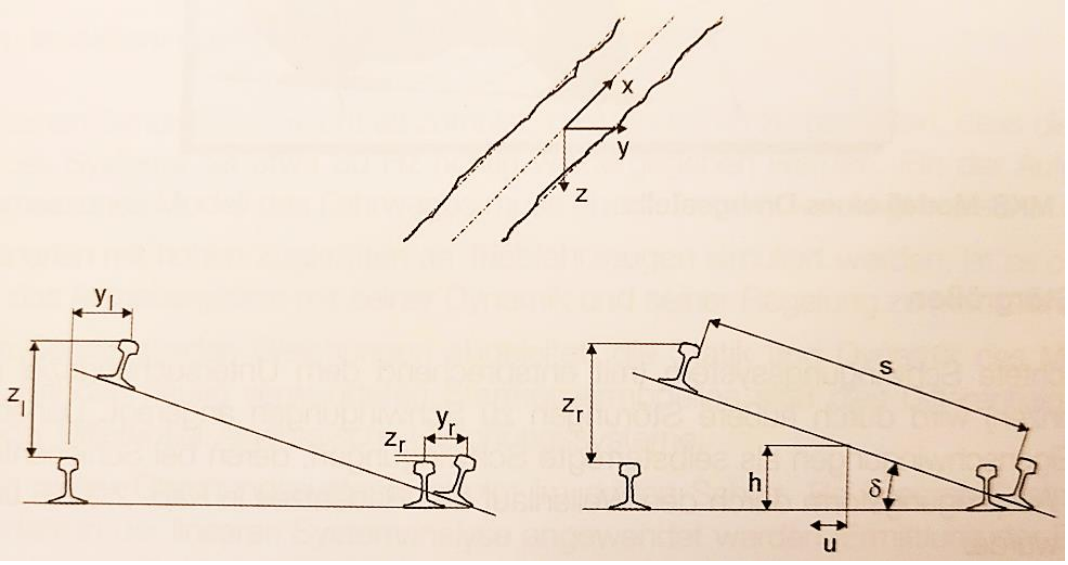


Abbildung 49: Definition der Gleislagefehler – aus [65]

Die Verschlechterung der Längshöhe ist oftmals auf Setzung des Schotters oder des Unterbaus zurückzuführen, die durch wiederholte statische und dynamische Belastungen durch die vorbeifahrenden Züge ausgeübt werden [118].

Das SBB-Reglement I-22070 [119] definiert die maximal zulässigen Maximalwerte der Längshöhe für zwei Wellenlängenbereiche und verschiedene Streckengeschwindigkeiten.
In Simulationsmodellen, vor allem im Rahmen der Fahrzeugauslegung wird die Höhenlage mit den sogenannten Unebenheitsdichtespektren (PSD) quantifiziert. Ein solches Spektrum sagt aus, welche Wellenlängen und welche dazugehörigen Effektivwerte der Gleisfehler vorhanden sind [100].

Schienenstösse
An der Verbindungsstelle zwischen verlaschten Schienen oder bei Isolierstössen kann ein Spalt in der Fahrfläche und eventuell ein Höhenunterschied entstehen. Aufgrund dieses sprunghaften Geometriewechsels treten hohe dynamische Lasten auf. Zusätzlich führt der Stoss zu einer lokalen Veränderung der dynamischen Gleissteifigkeit aufgrund der veränderten Biege- und Schersteifigkeit der Schiene und des zusätzlichen Gewichts der Lasche [118].

Schweissstellen
Auch bei verschweissten Schienen können an der Verbindungsstelle geometrische Abweichungen in der Fahrfläche in Form eines Umkehrpunkts entstehen und somit hohe dynamische Lasten verursachen.

Weichen
Bei jeder Weiche ist vor dem Herzstück aus konstruktiven Gründen ein Spalt - die Herzstücklücke – vorhanden, der ebenfalls grosse Stossbelastungen verursacht.

Periodische Formabweichungen in der Schienenfahrfläche
Zu diesen Formabweichungen zählen Schlupfwellen und Riffel, auf Englisch unter dem Begriff «corrugation» zusammengefasst. Sie weisen typischerweise Wellenlängen im Bereich 50 bis 200mm auf [14]. Eine Klassifizierung der Besonderheiten, Mechanismen und Instandsetzungsverfahren der verschiedenen Riffeltypen ist im Paper [120] zu finden.

Stochastische Formabweichungen in der Schienenfahrfläche
Auch Einzelfehler können an der Schienenfahrfläche entstehen, mit verschiedenen Ursachen, wie zum Beispiel Schleuderstellen, Squats oder Head Checks.

Steifigkeitsänderungen
Der Oberbau weist verschiedene Steifigkeitsänderungen auf. Einerseits aufgrund vom Untergrund, der sich entlang einer Strecke ändert oder aufgrund von punktuellen Störungen wie Übergänge zwischen Ober- und Unterbautypen, typischerweise bei Weichen, Brücken und Tunneln oder Hohllagen (hanging sleepers). Diese Steifigkeitsänderungen verursachen eine tieffrequente Anregung [118].
Zusätzlich bewirkt die punktuelle Lagerung der Schienen auf den Schwellen eine periodische Anregung mit der Schwellenfachfrequenz.

Die Gleissteifigkeit wird in der Schweiz für spezifische Strecken mit dem Gleiseinsenkungsmesswagen gemessen, der von der SBB entwickelt wurde [121] und heute von einer Drittfirma betrieben wird. Die Erfassung der Längshöhe mit den Diagnosefahrzeugen DFZ und gDFZ.

Im Deliverable D2.1 [118] vom RIVAS-Projekt wurden verschiedene Gleisfehler mit Parametervariationen simuliert und Schwingschnellespektren berechnet. Dafür wurden die in Kapitel 8.1.1.3 Modelle «TRAFFIC» und «DIFF» an den drei Referenzstandorten verwendet.

Erstens wurden die Erschütterungen für verschiedene Unebenheitsdichtespektren, die gewöhnlich bei der Fahrzeugauslegung zur Anwendung kommen, verglichen.
Danach wurde gezeigt, dass die Erschütterungen mit zunehmender Tiefe und abnehmender Wellenlänge der Höhenfehler zunehmen. Auch Stösse wurden untersucht: die Erschütterungen nehmen ebenfalls mit der Tiefe zu und mit der charakteristischen Länge des Defekts ab, oder anders gesagt, Erschütterungen nehmen mit der «Steilheit» des Defekts zu. Hingegen hat der Höhenunterschied beim Stoss im Bereich 0.05 bis 0.2mm eine vernachlässigbare Rolle.

Bei der Untersuchung der Schlupfwellen / Riffeln wurde beobachtet, dass Rauheitsamplituden ab 25dB (Ref. 1µm) im untersuchten Terzband einen signifikanten Einfluss auf die Schwingschnelle haben.

Im Rahmen vom gleichen Deliverable wurden die Einflüsse von verschiedenen Gleisfehler messtechnisch an Standorten in der Schweiz (in Kiesen, Goldau-Steinen und Schwyz)

ermittelt. Dabei wurden Einfügedämmungen zwischen Referenzabschnitten und Messquerschnitten bei den Defekten bei Zugsvorbeifahrten gemessen.

Folgende Feststellungen wurden bei dieser Testkampagne gemacht:

- Am Standort mit den hohen Gleiseinsenkungen (Kiesen) wurden höhere Schwingungspegel im Frequenzbereich bis 100Hz festgestellt und tiefere Pegel über 100Hz verglichen zum Referenzabschnitt
- Bei den zwei gemessenen Schienenstössen hat der Stoss mit dem etwas grösseren Spalt höhere Erschütterungen verursacht wie der andere Stoss, der tiefer war und visuell einen schlechteren Zustand aufwies. Verglichen mit dem Referenzabschnitt hat der Stoss mit dem grössten Spalt höhere Pegel im Frequenzbereich 4 bis 12Hz und 40 bis 100Hz gezeigt.
- Bei der Messung am Streckenabschnitt mit Riffeln mit Wellenlängen im Bereich 0.16-0.20m wurden den Erwartungen entsprechend höhere Schwingungen im Frequenzbereich 110 bis 125Hz bei Zugsdurchfahrten mit v=78km/h beobachtet.
- Bei den Messungen an auffälligen Schweissstellen wurden effektiv erhöhte Erschütterungen gemessen. Die betroffenen Frequenzbereiche waren ortsabhängig.

Aufgrund der begrenzten Anzahl an Messstellen und untersuchten Standorten können aus diesen Feststellungen keine abschliessenden Schlussfolgerungen gezogen werden. Dafür wären noch zusätzliche Messungen notwendig [118].

Im Deliverable D2.6 [122] des RIVAS-Projekts wurden die verschiedenen Instandhaltungs-/Instandsetzungsmassnahmen am Oberbau referenziert, die bei den Infrastrukturbetreibern zum Einsatz kommen, mit dem Ziel eine effiziente und möglichst kostenneutrale Instandhaltungsmassnahme zu identifizieren. Dabei wurde das Stopfen gewählt und im Rahmen vom Deliverable D2.8 [123] mittels Simulation und Feldversuchen untersucht.

Die Messungen fanden in Raubling (Deutschland) statt, an einem Streckenabschnitt mit Grenzwertüberschreitung des Längshöhenfehlers, vor und nach dem Stopfen, und lagen 1.5 Monat auseinander. Messungen wurden am Testort (zwischenzeitlich gestopft) und an einem nicht behandelten Referenzabschnitt. Es wurde jedoch festgestellt, dass die Gleislage sich beim Referenzabschnitt zwischen beiden Messungen verbessert hatte, möglicherweise weil das Nachbargleis (unerwartet) zwischenzeitlich erneuert wurde (vgl. Abbildung 50). Aus diesem Grund wurden die Messungen bei den Referenzabschnitten nicht weiter berücksichtigt.

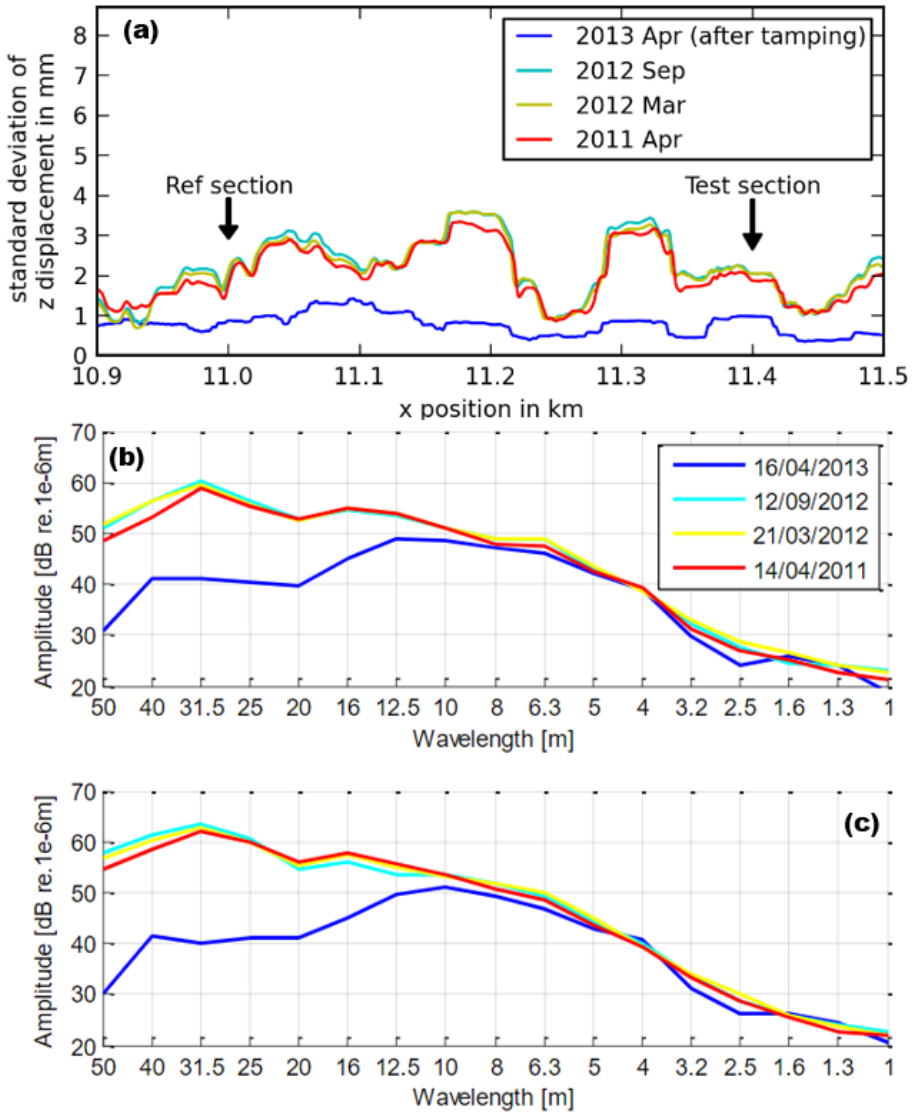


Abbildung 50: Längshöhenfehler vor (an 3 verschiedenen Terminen) und nach dem Stopfen. (a) Standardabweichung. (b) Amplitudenpegel linke Schiene. (c) Amplitudenpegel rechte Schiene – aus D2.8 [123]

In Abbildung 50 ist ersichtlich, dass das Stopfen Wellenlängen über 8m korrigieren konnte. Für Vorbeifahrten bei 120km/h bedeutet das, dass die Anregungen bei Frequenzen kleiner als 4Hz reduziert werden können; bei 200km/h sind das 7Hz.
Abbildung 51 zeigt die Einfügedämmung bei Vorbeifahrten durch verschiedene Fahrzeugkategorien. Eine Dämmung wird wie erwartet im tiefen Frequenzbereich beobachtet, jedoch bis ca. 20Hz. Sie ist maximal mit 10dB bei den tiefsten Frequenzen. Oberhalb von 20Hz wurde kaum eine Änderung oder eine Verstärkung der Erschütterungen gemessen, je nach betrachtetem Terzband. Gemittelt über dem Frequenzbereich 2-250Hz sind bei Regional- und Intercityzügen keine Verbesserungen dank des Stopfens zu verzeichnen, bei Güterzügen ca. 1dB

Verbesserung. Dies lässt sich durch höhere Schwingamplituden im tiefen Frequenzbereich unterhalb 12Hz bei den Güterzügen erklären. Ein Einfluss durch die Erneuerung des Nachbargleises kann jedoch nicht ausgeschlossen werden.

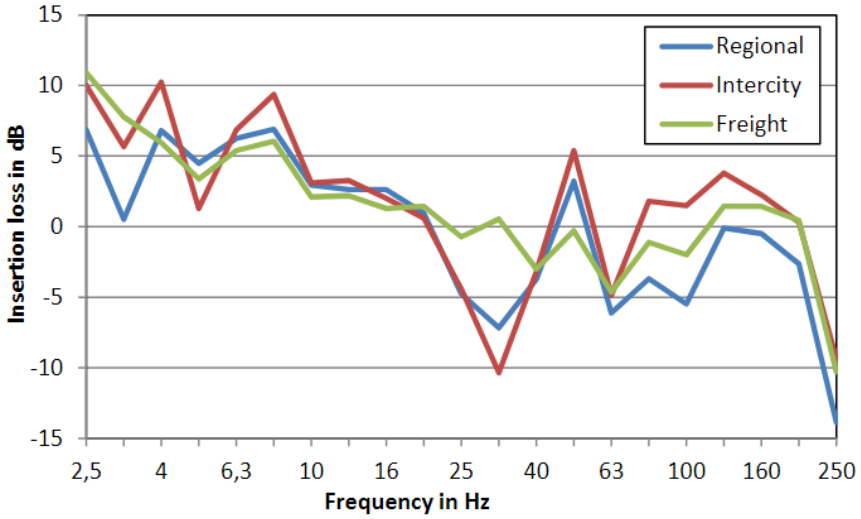


Abbildung 51: Einfügedämmung aufgrund des Stopfens bei unterschiedlichem Rollmaterial, gemessen im 16m-Abstand – aus D2.8 [123]

Eine zweite Messkampagne hat in Furet (Schweden) stattgefunden. Die Vor- und Nachmessungen fanden innerhalb zwei Monaten statt. Messpunkt R war die vorgesehene Referenz, C liegt bei einem Isolierstoss und D bei einem Bahnübergang.

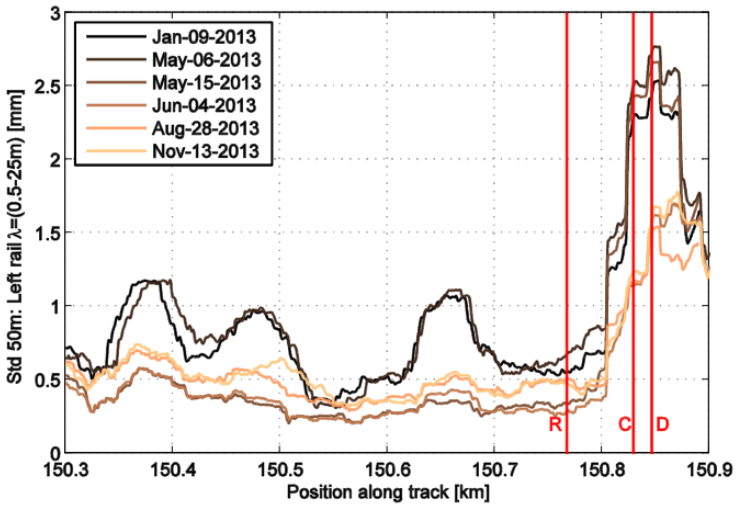


Abbildung 52: Standardabweichung des Längshöhenfehlers in Furet, gleitende Mittelung über 50m. Messpunkt R war die vorgesehene Referenz, Messpunkt C an einem Isolierstoss und Messpunkt D an einem Bahnübergang – aus D2.8 [123].

Aufgrund der beobachteten Längshöhenfehler vor und nach dem Stopfen (siehe Abbildung 52) kann der Messpunkt R nicht als Referenz betrachtet werden, da die Gleislage auch verbessert wurde. Die Einfügedämmungen wurden für Vorbeifahrten von Güterzügen bei 40-46km/h berechnet und sind in Abbildung 53 dargestellt. Für die Messungen im 8m- und 16m-Abstand ist eine Dämmung bis 35-50Hz zu beobachten, bei höheren Frequenzen eine Verstärkung der Erschütterungen. Beim Isolierstoss konnte ein besserer Dämmeffekt als beim Bahnübergang erzielt werden.

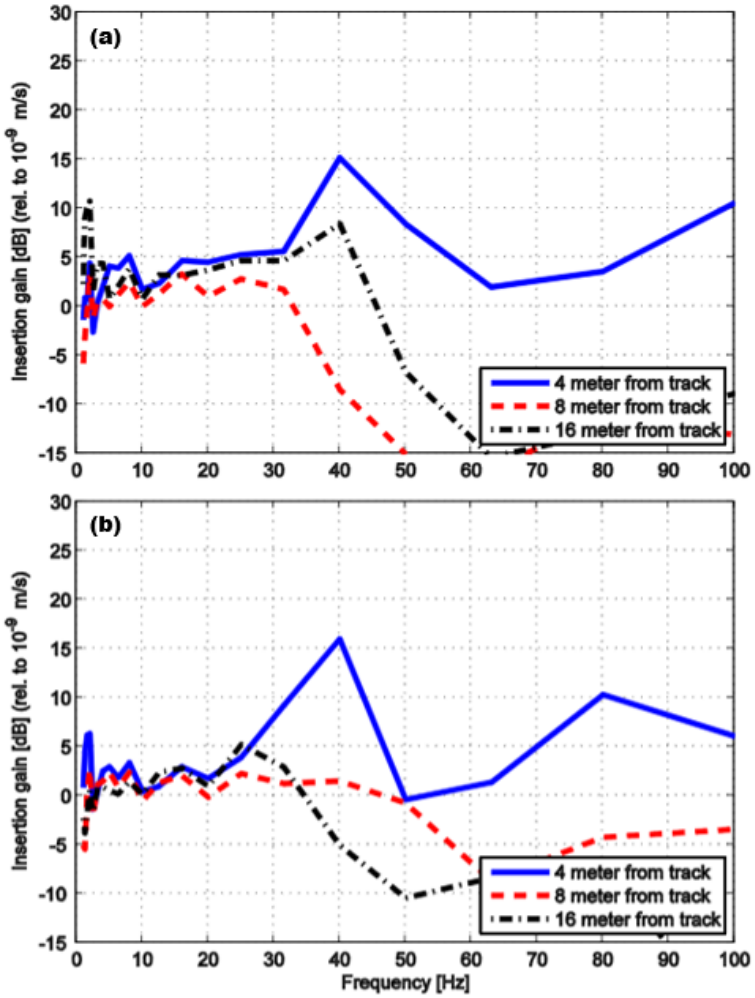


Abbildung 53: Einfügedämmungen im 4m-, 8m- und 16m-Abstand bei Güterwagendurchfahrten. (a) Messquerschnitt C (Isolierstoss) , (b) Messquerschnitt D (Bahnübergang) – aus D2.8 [123]

Mit diesen zwei Messkampagnen in Deutschland und Schweden wurde gezeigt, dass Stopfen als EKS-Minderungsmassnahme bei tieffrequenten Problemen (f < 40 Hz) wirksam sein kann. Im höheren Frequenzbereich ist das Stopfen nutzlos oder kann gar kontraproduktiv sein.

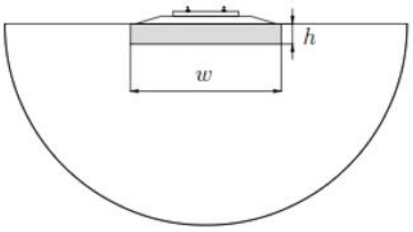
Durch das Stopfen nutzen sich die Schottersteine ab. Ein häufigeres Stopfen würde demnach zu einer kleineren Liegedauer des Schotters führen.

8.2.9 Betonplatte/Betontrog/Bodenverfestigung

Bei der Bodenplatte/Bodenverfestigung handelt sich um die Versteifung des Unterbaus unmittelbar unterhalb des Schotters. Einerseits können Gleiseinsenkungen damit reduziert werden und möglicherweise auch Erschütterungen. Diese Massnahme zeigt Potenzial, um die tieffrequenten Probleme bei weichen Böden zu bekämpfen.

Es kommen verschiedene Materialien und Verfahren zum Einsatz, die das bestehende Bodenmaterial kompaktieren, teilweise oder komplett ersetzen, unter anderem mit Kalk oder Zement. Detaillierte Informationen zu diesen Verfahren sind in [124] [6] [25] [125] zu finden.

Im RIVAS D4.4 [126] wurde eine Bodenplatte mit zwei verschiedenen Modellen der KU Leuven und des ISVR untersucht. Informationen zu diesen Modellen sind im Bericht [126] oder in den dort referenzierten Publikationen zu finden. Die Eigenschaften der untersuchten Bodenplatte sind in Abbildung 54 erläutert.



Height	$h = 0.5\,\mathrm{m}$
Width	$w = 6.0\,\mathrm{m}$
Mass density	$\rho = 2400\,\mathrm{kg/m^3}$
Shear wave velocity	$C_\mathrm{s} = 1400\,\mathrm{m/s}$
Poisson's ratio	$\nu = 0.25$
Damping ratio	$\beta = 0.05$

Abbildung 54: Eigenschaften der untersuchten Bodenverfestigung – aus D4.4 [126]

Die ermittelten Einfügedämmungen für eine Linienquelle im Frequenzbereich 4-100Hz sind in Abbildung 55 dargestellt. Eine Dämmwirkung wird ab 16Hz beobachtet, erreicht ein Maximum bei 40-50Hz mit 6-8dB und nimmt bei höheren Frequenzen wieder ab. Eine Verstärkung wird ab 80Hz beobachtet.
Der Verlauf der Einfügedämmung ist ähnlich wie bei den gemessenen Dämmwirkungen in [124] aber die Frequenzen der Nulldurchgänge sind bei den Simulationsergebnissen höher. Diese hängen vermutlich von den Eigenschaften der Bodenversteifung und des umliegenden Bodens ab.

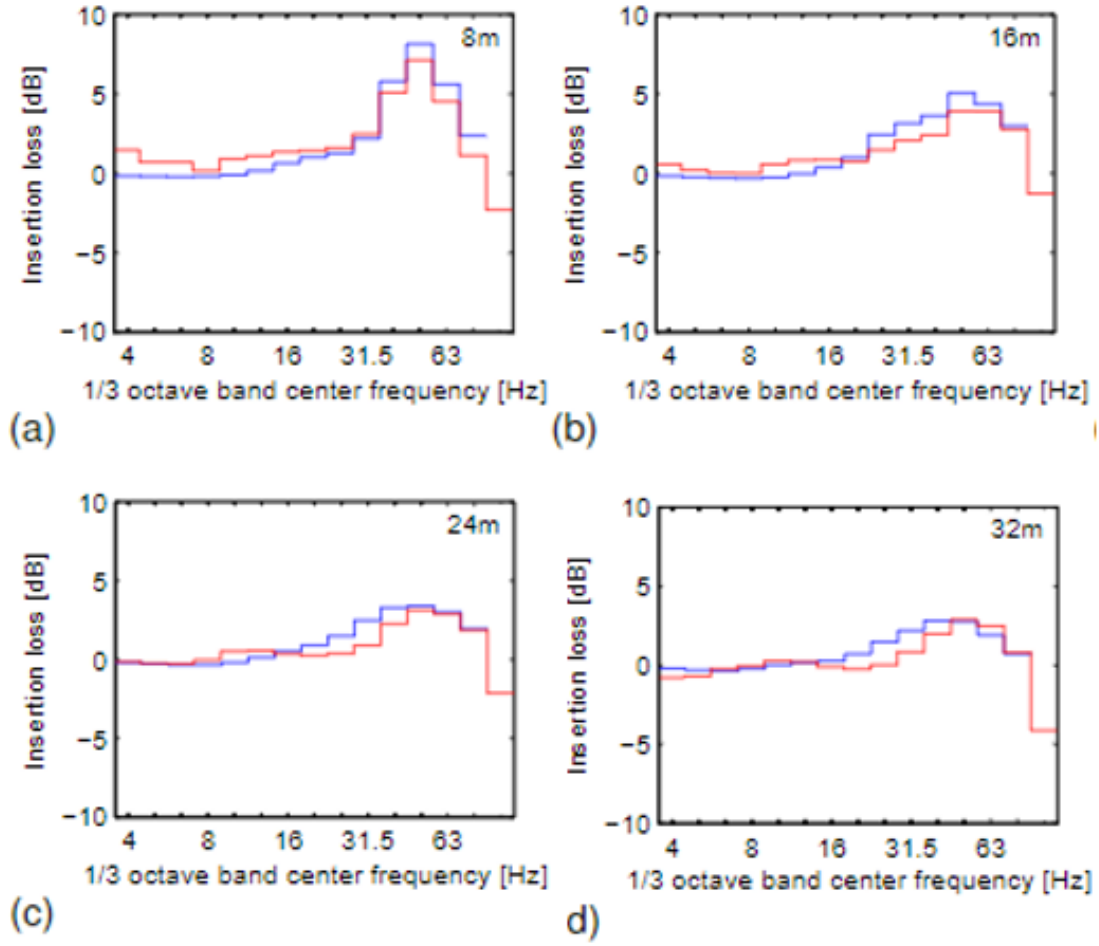


Abbildung 55: Einfügedämmung (vertikal) der Bodenversteifung für eine Linienquelle in 8m-, 16m-, 24m-, 32m-Abstand für den Standort Horstwalde. Ergebnisse des Modells der KU Leuven in blau, und des ISVR in rot – aus D4.4 [126].

Im Rahmen vom RIVAS-Projekt wurde anschliessend eine Parameterstudie zu der Bodenplatte realisiert (siehe D4.4 [126] Kap. 3.6). Dabei wurde festgestellt, dass diese einen höheren und breitbandigen Dämmeffekt bei einem weichen Boden erzielen kann (Standort Furet). Beim steifen Boden (Standort Horstwalde) ist eine Dämmung erst ab 30Hz beobachtet. Für alle Standorte wurde eine Schwingungsverstärkung ab 63-80Hz berechnet (siehe Abbildung 56). Diese höheren Frequenzen sind jedoch möglicherweise weniger problematisch bei weichen Böden.

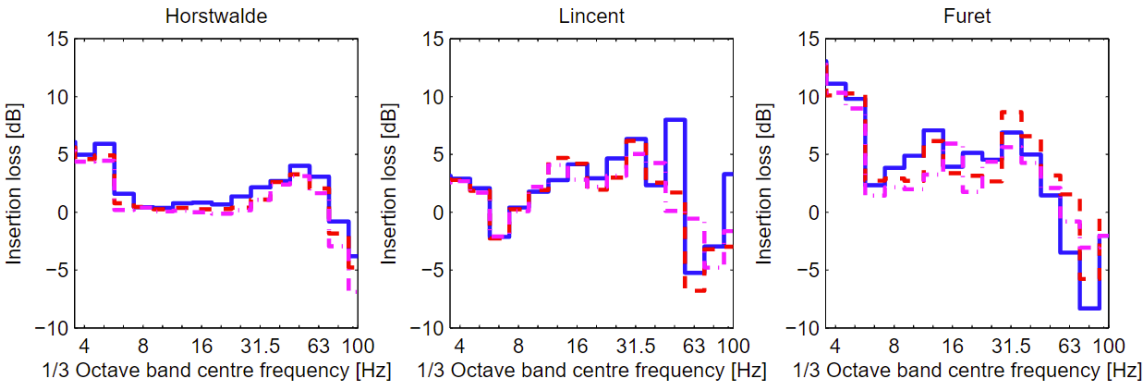


Abbildung 56: Einfluss der Bodeneigenschaften auf die Einfügedämmung der Bodenverfestigung bei den Standorten Horstwalde (steif), Lincent (weich), Furet (sehr weich) in 16m- (blau), 24m- (rot), 32m-Gleisabstand (pink) – aus D4.4 [126].

Eine Erhöhung der Bodenplattenhöhe von 0.5 auf 2m wirkt sich positiv aus und bringt ca. 7dB Dämmung zusätzlich, aber auch mehr Verstärkung im höheren Frequenzbereich.

Die Anwendung von Zement im Rahmen eines Injektionsverfahrens (jet grouting Verfahren) anstatt Beton, was als Retrofitmassnahme anwendbar ist, reduziert gemäss den Simulationsergebnissen die Dämmleistung. Diese könnte aber mit einer tieferen Behandlung des Bodens etwas gesteigert werden.

Im State-of-the-Art Bericht [124] wurde die Einfügedämmung von drei Versuchen mit Bodenverfestigung (ohne Unterschottermatte) in Altheim und Sinzheim (Deutschland) und Hausen (Schweiz) verglichen und in Abbildung 57 dargestellt. Diese bewirken unter 40 Hz leichte Verbesserungen bis im Mittel maximal 5 dB bei 12 und 16 Hz. Es ergibt sich eine Verstärkung der Erschütterungen bei Frequenzen ab 50 Hz.

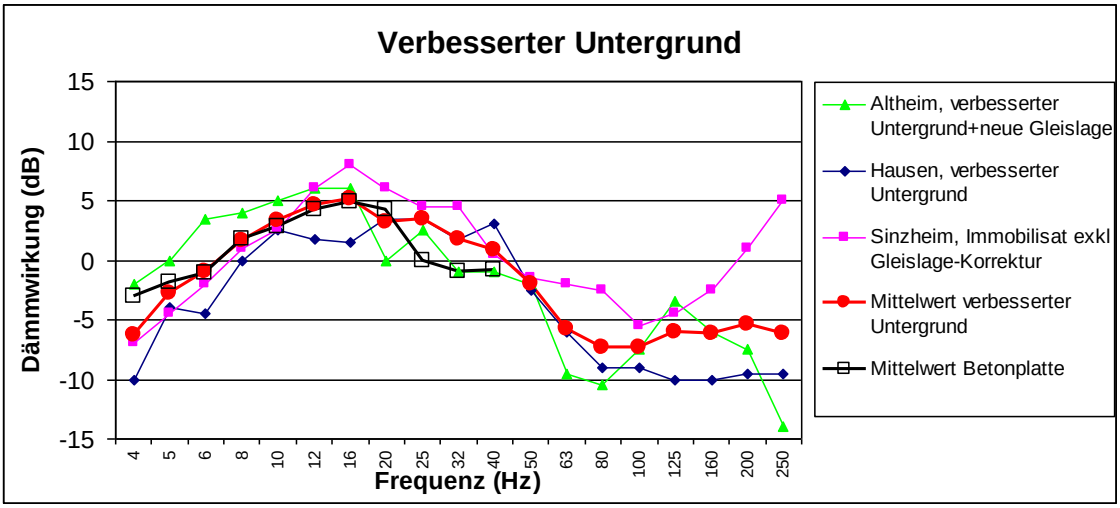


Abbildung 57: Wirkung der Bodenverfestigung in Altheim, Sinzheim und Hausen – aus [124]

Bei der Kombination von Betonplatten mit einer Unterschottermatte, versucht man zusätzlich die Verstärkungen im höheren Frequenzbereich zu dämpfen. Die Abbildung 58 aus [124] zeigt die gemessen Einfügedämmungen für solche Kombinationen an drei Standorten in Deutschland. Eine Wirkung von maximal 5dB wird unterhalb 25Hz erreicht, und oberhalb dieser Frequenz eine Verstärkung der Erschütterungen.

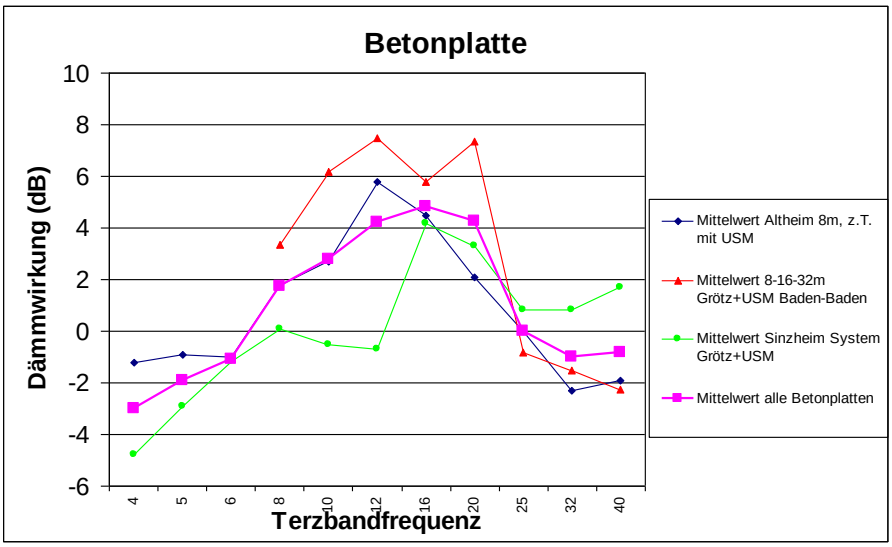


Abbildung 58: Wirkung der Betonplatte von drei Versuchen in Deutschland – aus [124]

Bei den in Abbildung 57 und Abbildung 58 untersuchten Standorten wird in [124] angenommen, dass diese einen eher weichen Boden aufweisen. Eine Untersuchung für steifere Böden liegt nicht vor.

Im Paper [127] werden Messungen an sechs Umsetzungen von Betontrögen in Kombination mit einer Unterschottermatte in Deutschland bei der Durchfahrt eines ICE-Typens verglichen. Mit einem Betontrog bezeichnet man einen Betonrahmen, der als steifer Unterbau dient und gleichzeitig ein seitliches Schotterfliessen verhindert. Zwischen Betontrog und Schotter wurde eine UBM verlegt, um den Schotter zu schützen und als EKS-Massnahme.

Da die Bodeneigenschaften an den sechs verschiedenen Standorten möglicherweise eine massgebende Rolle spielen können, wurden die gemessenen Einfügedämmungen mit den entsprechenden vor Ort gemessenen Transfermobilitäten korrigiert.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 59 ersichtlich. Die Einfügedämmung zwischen 2 bis 16Hz beträgt im Durschnitt 5dB. Ab 16Hz nimmt diese ab und zwischen 25-80Hz ist sie nahe Null dB, und in einzelnen Fällen wird eine Schwingungsverstärkung in diesem Frequenzbereich gemessen. Über 80Hz kommt der Dämmeffekt der Unterschottermatte zum Tragen, eine Einfügedämmung von 5 bis 9dB wird beobachtet.

Obwohl die Ergebnisse anhand der örtlichen Eigenschaften korrigiert wurden, ist eine relevante Streuung zwischen den Standorten feststellbar, vor allem sind zwei Standorte auffällig. Im Paper wird vermutet, dass es an der etwas veralteten Konstruktion oder an der begrenzten Anzahl an berücksichtigten Zugsdurchfahrten liegen könnte.

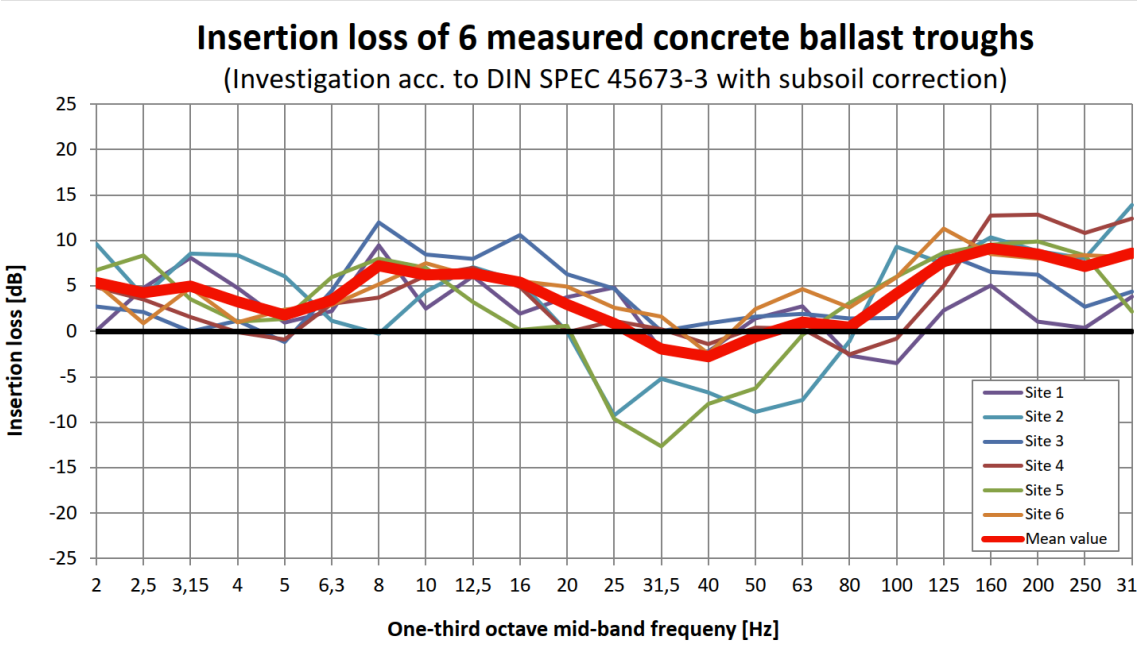
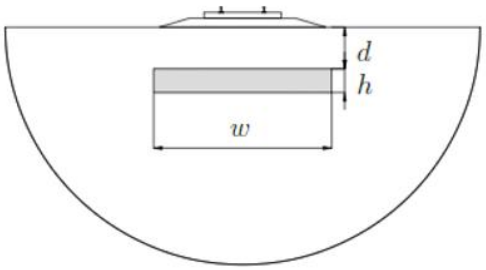


Abbildung 59: Gemessene Einfügedämmungen an den sechs Standorten mit Betontrog+UBM der Bodenkorrekturen [127]

Wave Impeding Block (WIB)

Im RIVAS Deliverable D4.4 [126] wurde eine Variante der Betonplatte untersucht: die Versteifung des Bodens erfolgt tiefer unterhalb des Gleises als bei der Bodenplatte, und nicht unmittelbar unterhalb des Schotters. Diese könnte analog der Bodenplatte mit der Installation einer steifen Platte, zum Beispiel aus Beton (wave impeding block) realisiert werden oder Injektionsverfahren wäre ebenfalls denkbar. Beispiele von konkreten Umsetzungen wurden nicht genannt.

Zwei ähnliche Modelle wie für die Bodenplatte kamen im Rahmen von RIVAS D4.4 [126] für den WIB zum Einsatz. Die Eigenschaften des untersuchten Blocks sind in Abbildung 60 erläutert.



Depth to top of block	$d = 0.9\,\mathrm{m}$
Height	$h = 0.5\,\mathrm{m}$
Width	$w = 6.0\,\mathrm{m}$
Mass density	$\rho = 2400\,\mathrm{kg/m^3}$
Shear wave velocity	$C_s = 1400\,\mathrm{m/s}$
Poisson's ratio	$\nu = 0.25$
Damping ratio	$\beta = 0.05$

Abbildung 60: Eigenschaften der untersuchten Betonplatte – aus D4.4 [126]

Die ermittelten Einfügedämmungen für eine Linienquelle im Frequenzbereich 4-100Hz sind in Abbildung 61 dargestellt. Eine Dämmwirkung wird ab 25Hz beobachtet, erreicht ein Maximum bei 50Hz mit 3-4dB und nimmt bei höheren Frequenzen wieder ab. Eine Verstärkung wird von ISVR ab 80Hz für grössere Distanzen beobachtet.

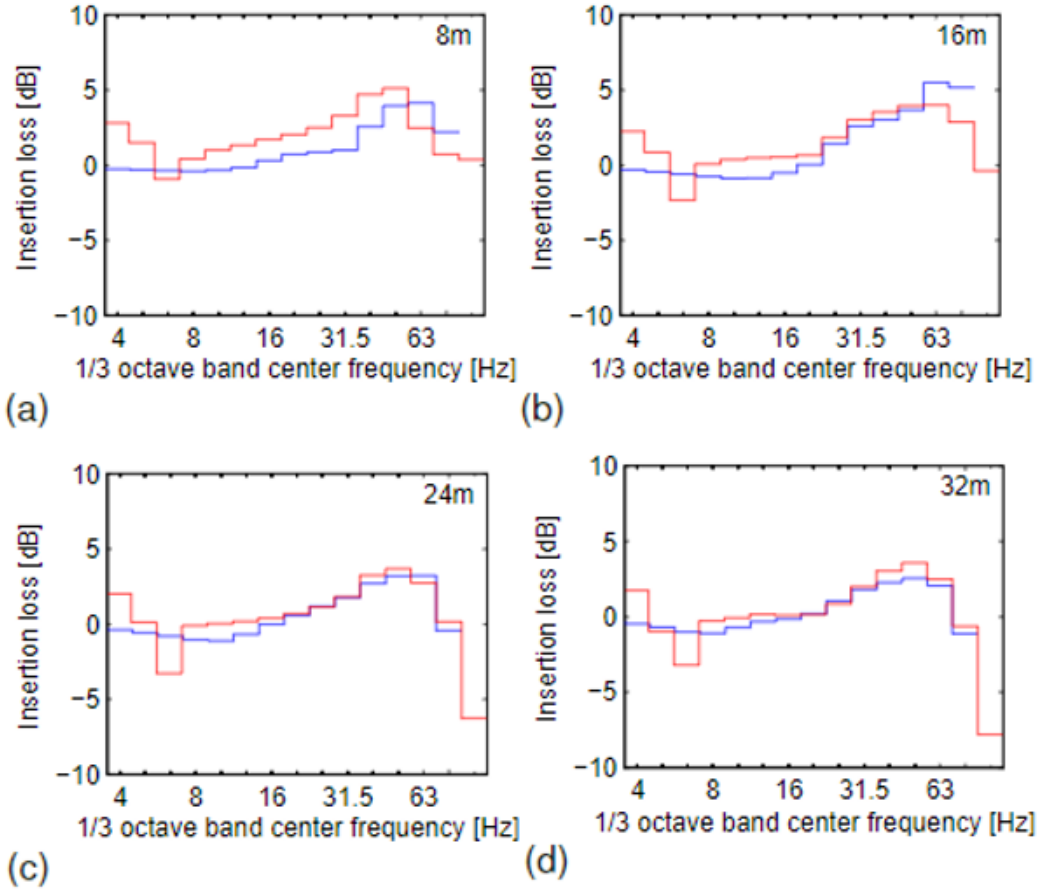


Abbildung 61: Einfügedämmung (vertikal) der Betonplatte für eine Linienquelle in 8m-, 16m-, 24m-, 32m-Abstand für den Standort Horstwalde. Ergebniss des Modells der KU Leuven in blau, und des ISVR in rot – aus D4.4 [126].

Ähnliche Eigenschaften wie bei der Bodenplatte wurden im Rahmen der Parameterstudie im D4.4 [126] des RIVAS-Projekts untersucht. Je weicher der Boden, desto tiefer die Grenzfrequenz, ab welcher ein Dämmeffekt beobachtet wird, und desto höher die Dämmwirkung.

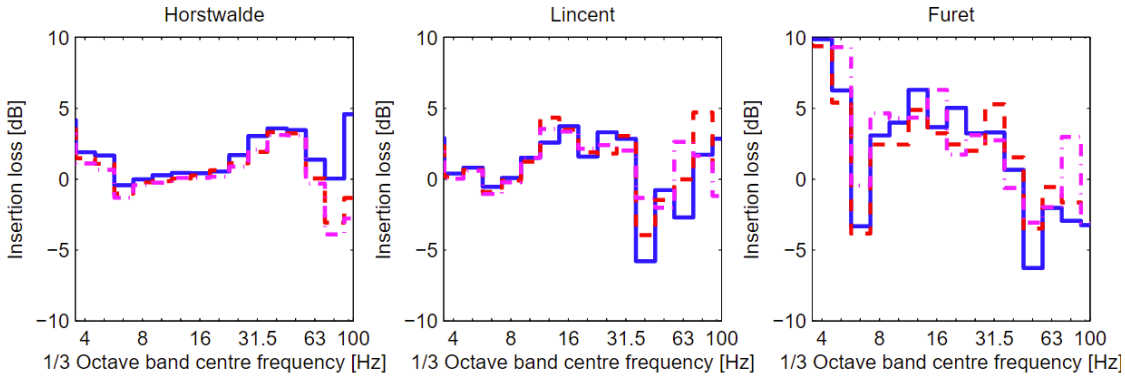


Abbildung 62: Einfluss der Bodeneigenschaften auf die Einfügedämmung der Betonplatte bei den Standorten Horstwalde (steif), Lincent (weich), Furet (sehr weich) in 16m- (blau), 24m- (rot), 32m-Gleisabstand (pink) – aus D4.4 [126].

Rechnerisch wurde ermittelt, dass eine Erhöhung der Breite der Platte von 6 auf 12m die Erhöhung der Dämmwirkung um 3-4dB bewirkt. Die Verwendung von Zement anstatt Beton reduziert bei dieser Massnahme ebenfalls die Dämmleistung.

8.3 Am Übertragungsweg

8.3.1 Bodenschlitz

Bodenschlitze werden ausserhalb des Gleisbereichs parallel zu den Gleisen errichtet, um die Übertragung der einfallenden Wellen zum Gebäude durch Unterbrechen des Ausbreitungspfads bzw. Reflexion zu schwächen. Ein solcher Effekt kann erreicht werden, indem die Materialeigenschaften (Dichte, E-Modul) des Schlitzes sich drastisch von den aus dem umliegenden Boden unterscheiden.

Ein offener, luftgefüllter und vertikaler Schlitz ist theoretisch der ideale Schlitz aber in der Praxis kaum realisierbar und nachhaltig zu erhalten [128]. Tiefe vertikale «Luftschlitze» sind nicht standfest und können nicht umgesetzt werden. Schräggraben sind denkbar, erfordern jedoch einen grossen Platzbedarf. Aus diesem Grund kommen Bodenschlitze mit einem Füllmaterial zum Einsatz [125].

Die als «offene» oder «weiche» (soft wall barrier) bezeichnete Bodenschlitzausführungen werden mit weichen Materialen gefüllt wie Luft- oder Gasmatratzen, Elastomerstücke oder -matten, Schäume, Polystyrol, etc. Für harte Böden sind solche Schlitze zu bevorzugen [129]. Harte Bodenschlitze sind Ausführungen mit Betonplatten - oder Pfähle oder als Stahlspundwand. Insbesondere für weiche Böden können solche Schlitze sinnvoll sein.

Aufgrund des Zusammenhangs zwischen Wellenlänge, -frequenz und Ausbreitungsgeschwindigkeit lässt sich die Mindesttiefe eines Bodenschlitzes ermitteln: der Schlitz muss mindestens

so tief reichen wie die halbe Wellenlänge der abzuschirmenden Welle. So beträgt z.B. bei einer Geschwindigkeit der Oberflächenwelle von 250m/s (abhängig von der Bodensteifigkeit) und einer minimalen Abschirmfrequenz von 25Hz die Wellenlänge 10m. Dabei sollte der Bodenschlitz mindestens eine Tiefe von 5m aufweisen [130]. Ebenfalls sind eventuelle Reflektionen bei Mehrschichtigen Böden zu berücksichtigen, die aufgrund vom Impedanzwechsel zwischen den Schichten entstehen können. Die Länge des Bodenschlitzes ist ebenfalls ein massgebender Parameter, der sorgfältig gewählt werden muss, da die Bodenwelle seitlich an der Schlitzkante gestreut werden kann.

Im SBB State-of-the-Art Bodenschlitze aus 2007 [129] sind die Dämmwirkungen aus verschiedenen offenen Bodenschlitzen in Deutschland, Japan sowie die damals in der Schweiz umgesetzten Schlitze in Berg und in Bern dargestellt (siehe Abbildung 63). Diese Ergebnisse zeigen eine Dämmwirkung von mindestens 6dB im Mittel über den ganzen Frequenzbereich 5 bis 200Hz.

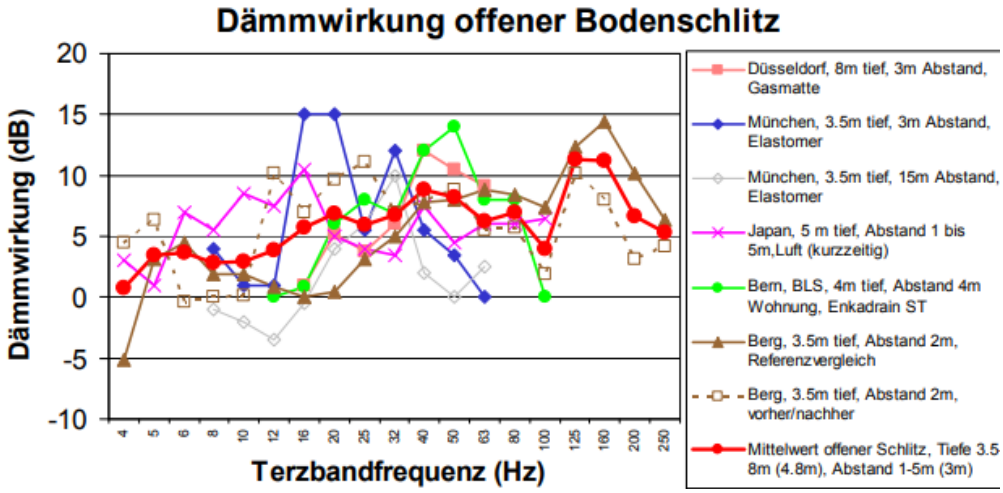


Abbildung 63: Dämmwirkung von verschiedenen offenen Bodenschlitzen – aus [129]

Ebenfalls wurden die Ergebnisse aus mehreren Ausführungen von harten Bodenschlitzen in Japan mit verschiedenen Tiefen und Breiten vorgestellt. Im Mittelwert weisen diese Schlitze eine Einfügedämmung von 3 bis 7dB auf. Diese ist etwas kleiner im tiefen Frequenzbereich, maximal um 20 Hz und nimmt im höheren Frequenzbereich wieder leicht ab (siehe Abbildung 64).

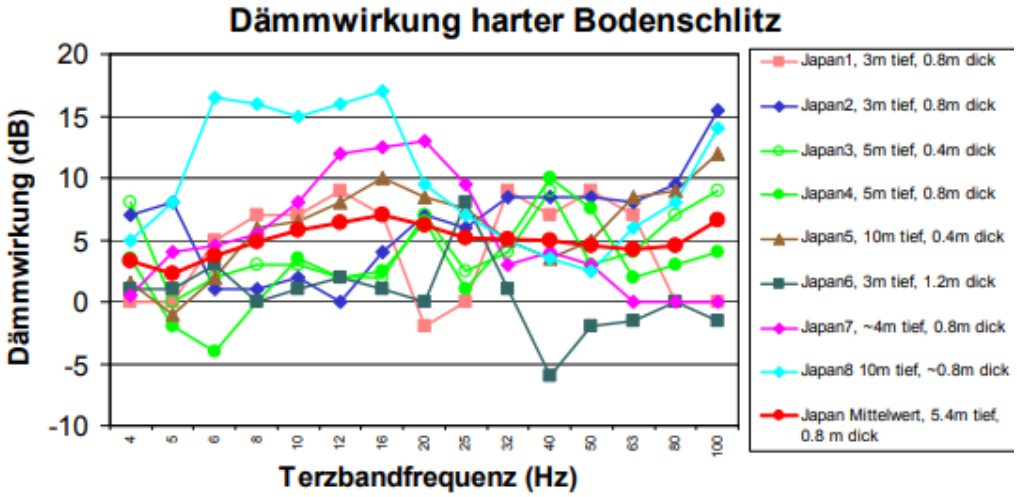


Abbildung 64: Dämmwirkungen Betonschlitz in Japan, Mittelwert gemessen 1 bis 5 m hinter Schlitz – aus [129]

Im Rahmen vom WP4 des RIVAS-Projekts wurden die Minderungsmassnahmen am Übertragungsweg behandelt und im Deliverable D4.2 [128] eine Parameterstudie mittels Simulation für die Herstellung eines Bodenschlitzes in Rubigen (Schweiz). Für die Studie wurde die Software TEA verwendet.

Die Simulationen haben gezeigt, dass die Breite und die Position eines offenen Schlitzes (Luftspalt) keinen grossen Einfluss haben auf die erreichte Wirkung. Bei einem Schlitz gefüllt mit weichem Material wird die Steifigkeit des Spaltes von der Breite beeinflusst und ein breiterer Schlitz wirkt sich positiv aus.

Verschiedene elastische Füllmaterialien wurden untersucht. Um eine höhere Dämmwirkung zu erreichen, sollte das E-Modul minimiert werden. Dieses Optimierungspotenzial ist in der Praxis jedoch begrenzt, da das Füllmaterial den Bodendruck aushalten muss, um einen Einsturz zu vermeiden.

Die Wirkung des Schlitzes hängt stark von den Bodeneigenschaften ab. Am untersuchten Standort liegt eine weiche Schicht auf einem steifen Untergrund. Bei einer 3m dicken Schicht und einem 3m tiefen Schlitz ist eine Wirkung ab 25Hz festzustellen. Einen tieferen Schlitz zu bauen ist kaum effizienter. Weist die weiche Schicht eine Dicke von 6m auf, ist ein Schlitz mit 6m-Tiefe sinnvoll und wirkt schon ab 10Hz [128].

Nachträgliche Messungen der Bodeneigenschaften in Rubigen haben gezeigt, dass die weiche Schicht nur 1.2m beträgt und somit ein Bodenschlitz mit weicher Füllung noch weniger Wirkung bringen würde (weniger als 5dB zwischen 40 und 80Hz). Aus diesem Grund wurde der Bodenschlitz in Rubigen letztendlich nicht realisiert (siehe Deliverable D4.3 [131].

In diesem WP4 wurden dann zwei Ausführungen von harten Bodenschlitzen getestet:

- Eine 100m-lange Stahlspundwand in Furet (Schweden). Seine Tiefe beträgt 12m, wobei jedes vierte Spundwandelemente einer erhöhten Tiefe von 18m aufweisen.
- eine 55m-lange Injektionsstrahlwand (jet grouting wall) in El Realengo (Spanien). Die Wanddicke beträgt 1m und die Tiefe 7.5m. Sie wurde mit eine 16.2m-Abstand vom Gleis installiert.

Die Versuchsergebnisse aus Furet sind in Abbildung 65 dargestellt.

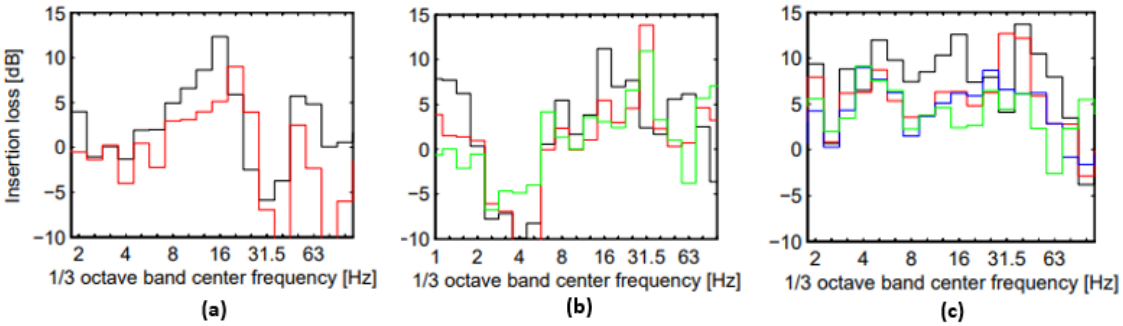


Abbildung 65: Einfügedämmungspektren der Stahlspundwand in Furet im 8m (schwarz), 16m (rot), 32m (blau), 64m (grün) Abstand vom Gleis, links für die Passagierzüge des Typs X31 mit einer durchschnittlichen Fahrgeschwindigkeit von (a) 75km/h (b) 81km/h , (c) für Güterzügen mit einer durchschnittlichen Fahrgeschwindigkeit von 63km/h aus [132]

Gemäss Abbildung 65 (a) wird unmittelbar nach der Spundwand eine Dämmleistung ab 4Hz beobachtet. Diese ist um 20Hz maximal und bei höheren Frequenzen etwas tiefer. Mit zunehmendem Abstand zum Gleis ist die Einfügedämmung kleiner und die Frequenz, ab welcher die Wand wirkt, grösser. Im Bericht wird vermutet, dass die grosse Abnahme bei 30-40Hz nicht auf die Wand zurückzuführen ist, genau wie die Abnahme bei 4Hz in Abbildung 65 (b). Diese konnten jedoch nicht erklärt werden.
Für die Güterzüge in Grafik (c) sind solchen Abnahmen nicht feststellbar, und die Einfügedämmung ist etwas stetiger über den Frequenzbereich. Ab 40Hz nimmt die Einfügedämmung wieder ab.

Mit dem Beton-Bohrpfahlwand in El Realengo (jet grounting wall) wurde unmittelbar nach der Wand eine Einfügedämmung von 5dB ab 8Hz gemessen, mit einem Maximum von 12dB bei 25Hz. Die Dämmleistung nimmt mit dem Abstand ab: im 32m-Abstand beträgt der maximale IL nur noch 5-6dB (siehe Abbildung 66 für einen der beiden untersuchten Fahrzeugtypen).

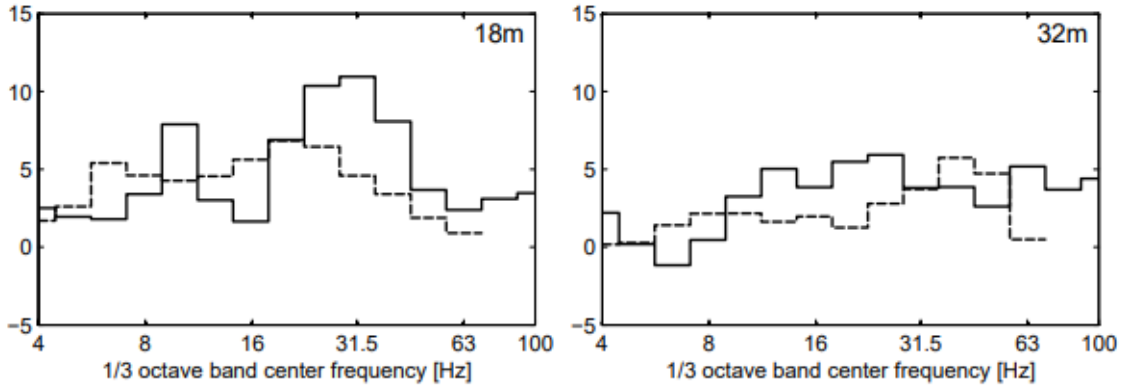


Abbildung 66: Berechnete (durchgezogene) bzw. gerechnete (gestrichelte Linie) Einfügedämmspektren des Bodenschlitzes in El Realengo für Durchfahrten mit Zügen des Typs S599 mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 119km/h. Der Schlitz befindet sich 16.2m von Gleismitte. Aus [132]

Die Ergebnisse der beiden Bodenschlitze in Furet und El Realengo haben gezeigt, dass harte Bodenschlitze in der Lage sind, Erschütterungen breitbandig und ab tiefen Frequenzen zu reduzieren, sofern der Boden weich genug ist.
Der RIVAS Bericht D4.6 [133] enthält ein Leitfaden zur Erstellung von Bodenschlitzen.

In der Schweiz sind Bodenschlitze an drei Orten implementiert (siehe Tabelle 17). Die Schlitze in Berg und Bern (Dämmwirkung oben in Abbildung 64 dargestellt) sind aufgrund der Anregung durch eine Weiche verbaut worden. 2020 wurde ein mit injektiertem Kunstharz gefüllter Schlitz eingebaut um ein Einfamilienhaus in Bad-Schinznach zu schützen. Einzig der Schlitz in Bern wurde durch einen Infrastrukturbetreiber gebaut, die andern wurden durch Privatpersonen errichtet.

Tabelle 17: realisierte Bodenschlitze in der Schweiz

Gleistyp	Versuchsort	Beschreibung Ausführung	Messungen durch	Jahr	Referenz Messbericht
Weiche	Berg	Privat durch einen Anwohner realisiert: Länge: 17m, Tiefe: 3.5m, Breite: 40cm, gefüllt mit Sagexbruchstücke	Rutishauser	2006	[134]
Weiche	Bern Fischermätteli (BLS)	Länge: 30m, Tiefe: 4m Breite: ca. 1m, mit 40mm Enkadrain ST, Polystyrol und Betonkies gefüllt.	Gartenmann Engineering AG	2004	[135]
Streckengleis	Bad-Schinznach	Tiefe des Schlitzes: 1.5m, Tiefe der Injektionen: ca. 4m ab Schlitzunterkannte, Breite: 30-40cm Injektionen aus URETEK-Kunstharz 140kg/m^3 Füllung des Schlitzes mit URETEK-Kunstharz 40kg/m^3	Trombik	2020	[130]

Die Ergebnisse der Messung für den Bodenschlitz in Bern werden in Abbildung 67 präsentiert. Vor dem Errichten des Bodenschlitzes wurde ein Versuch mit Schleifen der Weiche mit Vor- und Nachmessungen durchgeführt. Das Schleifen hat zu schlechteren EKS-Resultaten als im Ursprungszustand geführt. Eine Dämmung aufgrund des Bodenschlitzes ist ca. im Bereich 16-80Hz zu beobachten, in diesem Fall mit unterschiedlichen Maxima je nach Zimmer/Fundament. Eine Reduktion von ca. Faktor 3 bis 4 wurde in bestimmten Terzbänder gemessen.

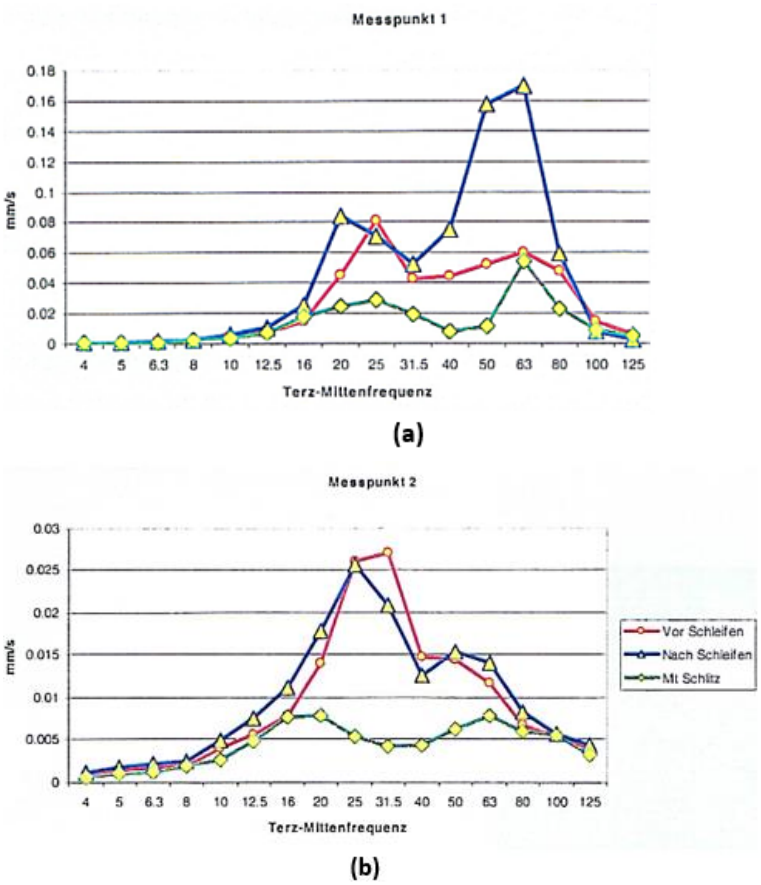


Abbildung 67: Terzbandspektren der gemessen Schwingschnelle in der Liegenschaft beim Bodenschlitz in Bern Fischermätteli – Vor (Rosa) und nach (blau) dem Schleifen sowie nach dem Bau des Bodenschlitzes (grün) im Wohnzimmer (MP1 – (a)) und am Fundament (MP2 – (b)) – aus [135]

Ebenfalls wurde eine Messung in der Nähe des Schlitzes (ca. 20-30cm vor und hinter dem Schlitz) durchgeführt. Die Terzspektren gegenüber dem Herzstück sind in Abbildung 68 dargestellt. Die Abnahme der Schwingungen ist im Bereich 10-125Hz deutlich zu sehen mit einer maximalen Reduktion bei 25Hz um fast einen Faktor 10.

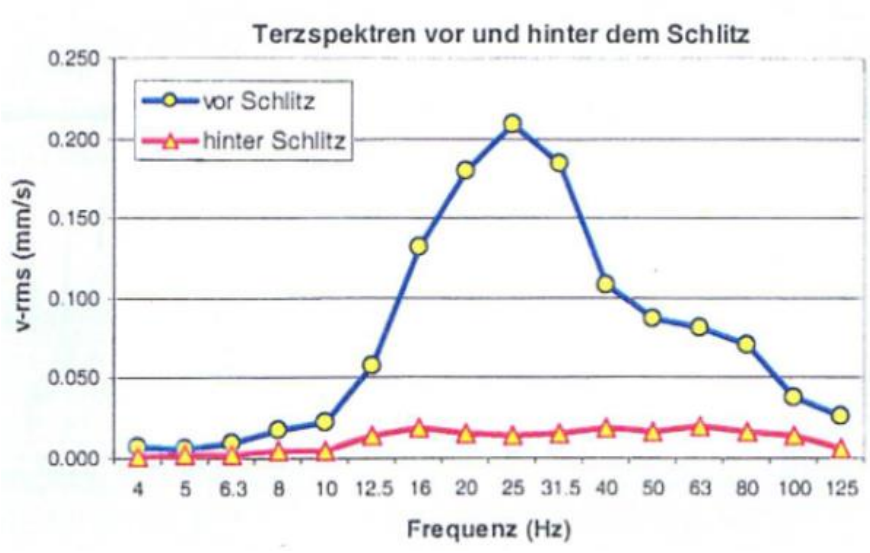


Abbildung 68: Terzbandspektren der Schwingschnelle ca. 20-30cm vor und hinter dem Schlitz auf Höhe des Herzstücks - aus [135]

Bei einer Liegenschaft in Berg entlang der Strecke Weinfelden-Kreuzlingen hat der Hauseigentümer 2002 einen Bodenschlitz in seinem Garten gebaut, um seine Drehbank in der Werkstatt gegen die durch eine Weiche verursachten Erschütterungen zu schützen. Vor dem Bau wurde eine Erschütterungsmessung durchgeführt sowie eine im Jahr 2006, die in [134] dokumentiert ist. Bei den Gebäudemesspunkten wurde eine Abnahme von ca. 50% der Erschütterungen festgestellt. Jedoch hat sich das dort durchfahrende Rollmaterial zwischen 2002 und 2006 stark geändert und aufgrund der grossen Zeitspanne der Gleiszustand möglicherweise auch.

Für die Veränderung des Rollmaterials wurde eine lineare Korrektur der in 2002 gemessenen Spektren um einen Faktor 2/3 für jede Terzbandamplitude appliziert.
Beim Messpunkt «Garten Weiche» (siehe Abbildung 69) 2m nach dem Schlitz ist eine gute Wirkung des Bodenschlitzes um einen Faktor 45% über 25Hz beobachtet. 10m vom Schlitz entfernt beträgt diese Reduktion nur noch ca. 10%. Für die Messpunkte im Gebäude ist die Wirkung ebenfalls nicht eindeutig.

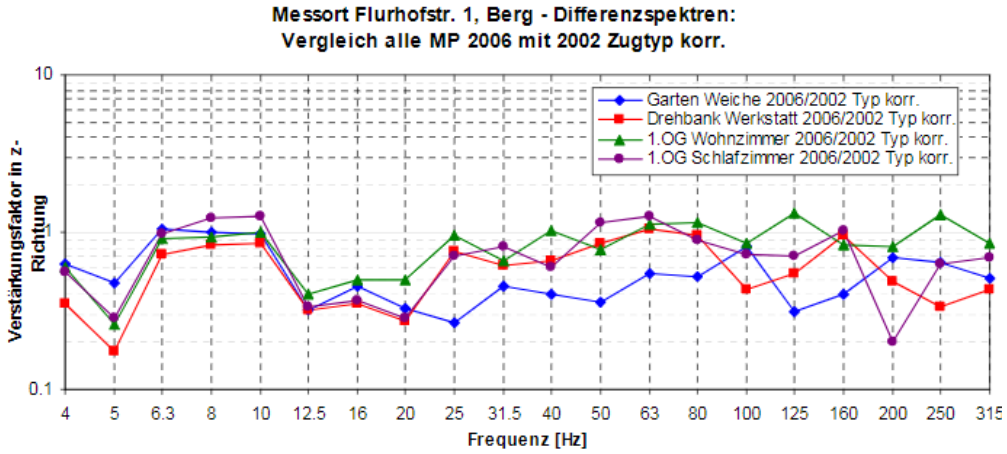


Abbildung 69: Differenzspektren der Messungen 2006/2002 mit Berücksichtigung des Korrekturfaktors für das Rollmaterial – aus [134]

In Bad-Schinzach wurde eine Kombination aus einem Injektionsverfahren mit Kunstharzschaum mit einem wenig tiefen Bodenschlitz um ein Einfamilienhaus eingesetzt. Mit der Injektion von Kunstharz wird der Boden verdrängt und so ein Isolierkörper im Boden hergestellt, ohne aufwändige Grabarbeiten. In diesem neugebauten Haus nahe einer Bahnlinie wurden die hohen Erschütterungsimmissionen im Gebäude durch eine Übereinstimmung verschiedenen Deckeneigenfrequenzen mit der Hauptschwingungsenergie (Schwellenfachfrequenz mit Bodenresonanz) möglicherweise erklärt [130]. Eine weitere Erklärung ist, dass die Abstimmfrequenz der effektiv eingebauten Gebäudelagerung 30Hz beträgt statt der 12Hz-Abstimmung, die in der Studie spezifiziert wurde [136].

Es wurde nur ein wenig tiefer Schlitz mit einer Tiefe von 1.5m und vom Schlitzboden Kunstharzschaum zusätzlich etwa weitere 4m tief injiziert, mit dem Ziel die etwa 6m tiefliegende Felsoberfläche zu erreichen. Im Bericht wurde nicht dokumentiert, ob die Felsoberfläche effektiv erreicht wurde.

Die Vor- und Nachmessungen haben unmittelbar vor und nach der Konstruktionsarbeiten stattgefunden. Messtechnisch wurde eine Minderung von 30-40% der KB_{FTr} und KB_{Fmax} und für den Körperschall eine Abnahme von 2.5-4.5dB für LA_{eq} für eine mittlere Vorbeifahrt nachgewiesen.
Für eine abschliessende Beurteilung der Wirkung eines solchen Injektionsverfahren fehlt aber noch Erfahrung unter anderen Bedingungen [130].

2016 hat die SBB eine Machbarkeitsstudie [137] zu den verschiedenen Bauverfahren von Bodenschlitzen in Auftrag gegeben. Dabei sollten verschiedene Ausführungen vom Bauvorgang und von den Kosten her verglichen werden. Bedingungen dabei waren, dass die Bauarbeiten möglichst tagsüber bei laufendem Bahnbetrieb stattfinden können. Dabei wurden zwei Vorzugsvarianten identifiziert.

Die Variante ENKADRAIN mit einem gespriessten Graben (analog Bodenschlitz in Bern Fischermätteli) wurde als einzige Lösung mit einer weichen Füllung identifiziert und mit Kosten von CHF 835/m^2 geschätzt.
Die zweite vorgeschlagene Vorzugsvariante ist das Injektionsverfahren System «URETEK», was nachträglich in Bad-Schinznach verwendet wurde. Die Kosten dieser Variante wurden bei CHF 655/m2 geschätzt.

Aufgrund der meistens aufwändigen Bauarbeiten beim Errichten eines Bodenschlitzes, eignet sich diese Massnahme in erster Linie für punktuelle Störstellen. Ausserdem gibt es heute noch keinen validierten State-of-the-art für das Design von Bodenschlitzen. Dafür wird noch ein validiertes Berechnungstool benötigt, welches auf günstige Inputparametern basiert und mit dem die optimierten Bodenschlitzeigenschaften ermittelt werden können. Die Messart und Bewertung für diese benötigten Inputparameter ist eine weitere offene Frage. Danach müssten einige Tests mit Bodenschlitzen an verschiedenen Orten die Designvorschläge prüfen.

9 Nächste Schritte

Im ersten Teil dieses Berichts wurden Grundlagen zum Thema Erschütterungen und abgestrahlten Körperschall vorgestellt, sowie die rechtlichen Aspekte in der Schweiz. Nach wie vor fehlt eine Erschütterungs-Verordnung zur Konkretisierung des Umweltschutzgesetzes.

Im zweiten Teil wurden die relevantesten Minderungsmassnahmen vorgestellt, sowohl fahrzeugseitig wie fahrwegseitig, sowie Ergebnisse aus Einbauversuchen zum Teil in der Schweiz sowie international. Insbesondere bzgl. kostengünstige Massnahmen unter 40 Hz sind in Zukunft weitere Anstrengungen nötig.

Für die offene Strecke, Tunnel und Brücken bei Fahrgeschwindigkeiten bis 160km/h hat die EKS-Unterschottermatte als Minderungsmassnahme den State-of-the-Art erreicht und es existiert eine aktuelle SBB Weisung für den Einbau bei Projekten. Bei kritischen Stellen im Tunnel können Masse-Feder-Systeme oder der Feste-Fahrbahn-Typ LVT-HA eingesetzt werden und zeigen je nach Design ab 25 bzw. 40Hz die erste Wirkung. Bezüglich fester Fahrbahn und Erschütterungsschutz ist aktuell eine CEN-Norm in Arbeit (EN 16432-4).

Weiche Schwellensohlen für Betonschwellen bilden eine kostengünstige und effektive EKS-Minderungsmassnahme ab etwa 50Hz. Leider hat es sich gezeigt, dass sie in der Schweiz eine Lärmzunahme mit sich bringen, die von den Behörden nicht akzeptiert wird. Um die weiche Schwellenbesohlung auf dem Stand der Technik zu bringen sind noch weitere Untersuchungen notwendig, um die Lärmzunahme zu verstehen und zu wenn möglich zu eliminieren, eventuell in Kombination mit einer lärmoptimierten Zwischenlage. Gleichzeitig muss das dynamische Verhalten des Oberbaus beurteilt werden, um eine Destabilisierung des Schotterbetts durch die Interaktion der elastischen Komponenten ausschliessen zu können.

Der Einsatz von weichen Zwischenlagen bringt ebenfalls eine Lärmzunahme mit sich und wurde aus diesem Grund als EKS-Minderungsmassnahme in Versuchen und Forschungsprojekten wenig weiterverfolgt. Aus den Untersuchungen mit lärmoptimierten Zwischenlagen liegen bisher noch keine belastbaren Ergebnisse zu Erschütterungen vor. Der Frequenzbereich, ab welcher eine EKS-Reduktion beobachtet werden kann, dürfte aufgrund ihrer Steifigkeit ziemlich hoch sein und somit wird wegen der eher bescheidenen Wirkung kaum als potenzielle EKS-Massnahme in Frage kommen. Diese neuartigen Zwischenlagen könnten jedoch helfen, die Problematik der Lärmzunahme von weichen USPs in den Griff zu bekommen.

Für die effiziente Entwicklung und Dimensionierung von Minderungsmassnahmen unter Berücksichtigung der örtlichen Gegebenheiten sind validierte Modelle notwendig. Solche Modelle werden oft im Rahmen von Forschungsprojekten entwickelt und gelangen anschliessend nicht zum Infrastrukturbetreiber oder Ingenieurbüro, welche die Massnahmen effektiv plant. Umgekehrt werden Datensätze aus Abnahmemessungen selten verwendet, um bestehende Modelle zu validieren oder weiterzuentwickeln. Um diese Lücke zu schliessen, wurde ein

Projekt zu EKS-Modellen und Datenbankablage zu vergangenen und zukünftigen EKS-Messungen durch die Allianz Fahrweg beauftragt.

Für eine Reduktion von EKS am Immissionsort verfügt ein Bahn-Infrastrukturbetreiber über zwei Möglichkeiten: entweder die Schwingung auf dem Ausbreitungsweg (Fahrweg und Boden) zu verringern oder die Anregung im Rad-Schiene-Kontakt zu mindern. Letzteres kann fahrzeugseitig dank konstruktiver oder konzeptueller Anpassungen während der Fahrzeugentwicklung und sowohl fahrzeug- wie infrastrukturseitig durch Optimierungen während der Instandhaltung geschehen. Es ist noch zu wenig klar, welcher Anteil von der Infrastruktur beeinflussbar ist und welchen Einfluss die Fahrzeuge haben und wo der Hebel beim Gesamtsystem sinnvoll angesetzt werden soll. Ein weiteres Projekt der Allianz Fahrweg wird sich zukünftig mit dieser Problematik befassen.

10 Literaturverzeichnis

1. Union Nation des Chemins de Fer . *Railway Induced Vibration - State of the Art Report.* 2017.
2. Terno, Hans-Joerg. *RIVAS - D3.1 - State of the art review of mitigation measures on track.* 2011.
3. Mirza, Adam and Nielsen, Jens and Ruest, Ruest. *RIVAS - D5.1 - Train Induced Ground Vibration – Influence of Rolling Stock.* 2011.
4. Walker, J.G. and Paddan, G.S and Griffin, M.J. *RENVIB II, Phase 1 - Task 1 - State of the Art Review.* 1997.
5. VCE, RUING. *RENVIB II - Phase 1 - Task 4 - State-of-the-art Review- Reduction measures for tunnel lines.* 1997.
6. Müller BBM. *RENVIB II - Phase 1 - Task 1.5 - State of the Art Report - Mitigation Measures for Surface Railways.* 1997.
7. SILVARSTAR Consortium. *D1.1 State-of-the-art and concept of the vibration prediction tool.* 2021.
8. *ISO 14837-1:2005.*
9. Krüger, Friedrich. *Schall- und Erschütterungsschutz im Schienenverkehr .* 2001.
10. SN 40 312. *Erschütterungseinwirkungen auf Bauwerke.* 1992.
11. Thompson, David. *Railway Noise and Vibration.* s.l. : Elsevier, 2009.
12. Müller, Gerhard und Möser, Michael. *Erschütterungen und sekundärer Luftschall aus dem Schienenverkehr .* 2017.
13. Knothe, Klaus. *Gleisdynamik.* 2001.
14. Müller, Roland. *Übersicht zu Mechanismen, Diagnose, Abhilfemassnahmen gegen dynamische Schäden/Beanspru-chung und Erschütterungen - Teilbericht 1.* 2018.
15. Janssen, Sabine and Vos, Henk and Koopman, Arnold. *Internoise 2013 - A meta-analysis of surveys into vibration annoyance from railway.* 2013.
16. Ellias, Patrick and Villot, Michel. *RIVAS - D1.4 - Review of existing standards, regulations and guidelines, as well as laboratory and field studies concerning human exposure to vibration.* 2011.
17. *Erschütterungsbeurteilung nach ÖNORM S 9012 im Vergleich zur internationalen Normung.* Steinhauser, Peter and Steinhauser, Sigrid. 2010, Lärmbekämpfung Bd. 5 Nr. 5.
18. Studer, Jost A. and Koller, Martin G. *Bodendynamik - Grundlagen, Kennziffern, Probleme.* 1997.
19. BAV, BAVU. Weisung für die Beurteilung von Erschütterungen und Körperschall bei Schienenverkehrsanlagen (BEKS). 1999.
20. BAFU, BAV. *Checkliste Umwelt für Eisenbahnanlagen.* 2022.
21. DIN 4150-2 Erschütterungen im Bauwesen - Teil 2: Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden. 1999.
22. BAV, BUWAL. *Konzept für die Sanierung von Schienenverkehrsanlagen betreffend Erschütterungen.* 2004.
23. Fachgruppe VSE. *Verordnung über den Schutz vor Erschütterungen (VSE) - Bericht der Fachgruppe.* 2006.
24. Müller, Roger. *Erschütterungs- und Körperschallimmisionen von Bahnen: Abschätzung der Sanierungskosten gemäss VSE (Stand Juli 2006) - Bericht.* 2008.

25. —. *RENVIB II - Phase 3 - Task E - Guideline for Vibration Mitigation.* 2003.
26. de Gruijter, D. and al. *Een uniform rekenmodel voor spoortrillingen 2016 - (Trad.: Ein vereinheitlichtes Berechnungsmodell für EKS 2016).* 2016.
27. Ziegler Consultants. *Handbuch zum Programm VIBRA-1 - V4.3.* 2009.
28. —. *VIBRA-1-2-3: Validation of a model for railway vibration prediction.* 2005.
29. Birchmeier, Marcel. *Transferfaktoren und Transferspektren für die VIBRA-Modelle (Auswertung der Daten 2001 bis 2014).* 2015.
30. Müller, Roger and Ziegler, Armin. *Internoise 2010 - Validation of prediction methods for vibration and groundborne noise of railways.* 2010.
31. Ziegler Consultants. *Handbuch zum Programm VIBRA-2 - V4.3.* 2009.
32. Müller, Roger and Köstli, Kornel. *RENVIB II - Phase 3 - Task D: Analysis of simple prediction model.* 2003.
33. Egger, Adrian and Billeter, Peter and Müller, Roger. *Neuer Ansatz zur Bestimmung des abgestrahlten Körperschalls in Räumen – Wie gross ist das Verbesserungspotential.* 2017.
34. FINE-2 Consortium. *Deliverable 8.1 Specification of model requirements including descriptors for vibration evaluation.* 2020.
35. SILVARSTAR Consortium. *D2.1 Database for vibration emission, ground transmission and building transfer functions.* 2022.
36. B. P. Temple, J. R. Block. *REINVIB II - Phase 2, Task 6 - Influences on the generation of railway groundborne vibration.* 1999.
37. Müller, Roger. *Schlussbericht Massnahmenentwicklung Erschütterungsschutz.* 2014.
38. Masoumi, Hamid and Vanhonacker, Patrick and Dias, Daniel. *Cargovibes - D3.1 - Maintenance limits -Wheel & rails surface.* 2013.
39. Deuce, Roger. *Wheel Tread Damage - An Elementary Guide.* 2007.
40. Nielsen, Jens. *Wheel/Rail Interface Handbook - Out-of-round wheels.*
41. Gratacos, Pau and Mora Pablo. *RIVAS - D2.4 - Classification of Wheel Out-of-Roundness Conditions with Resperct to Wheel OOR Database.* 2013.
42. NextSense. *Calipri C4X - Messmodul Rundlauf/Planlauf - Doc. ID. CMM1008.* 2022.
43. Chevrolet, J. *Nicht veröffentlicht - Technischer Bericht bezüglich Messunsicherheiten & Wartungskonzept - Radsatzmessmittel Calipri, Unterflurdrehbänke & Überfahrmessanlagen - Entwurf vom 04.07.22.* 2022.
44. I-SQU-UEW. *I-50099 Handbuch Zugkontrolleinrichtungen - DMS ID 17608282, Version 13-0.* 2022.
45. Rüegg, André. *Design Algorithmus Kontrolleinrichtung RLC - V1.7.* 2012.
46. Imfeld, Dominik. *Radabwicklung Kurzbericht.* 2021.
47. Rüegg, André and Smula, Jasmin. *Design Algorithmus RLC Radabwicklung - V2.4.* 2021.
48. Nielsen, Jens and Müller, Roger and Krüger, Matthias and Lölgen, Thomas and Mora, Pablo and Gratacos, Pau. *RIVAS D2.2 - Classification of Wheel Out-of-Roundness Conditions with Respect to Vibration Emission.* 2012.
49. Müller, Roger and Leibundgut, Daniel and Stallaert, Bert and Pesqueux, Lise and Ekblad, Alf. *RIVAS - D2.9 - Validation of wheel maintenance measures on the rolling stock for reduced excitation of ground vibration.* 2013.

50. Nelain, Brice and Huber, Philipp and Mirza, Adam and Oppel, Maik and Muller, Roger. *RIVAS - D5.6 - Field test measurement report – the influence from vehicle design on the generation of ground-borne vibration.* 2013.
51. Krummenacher, Beat. *Präsentation - Punktgenaue Radsatzinstandhaltung dank ZKE.* 2014.
52. Gonsior, Peter. *Optimierung der Radsatzinstandhaltung durch Verwendung von Daten aus Radlastcheckpoints.* 2014.
53. Müller, Roger. *Bericht zu RLC-Messungen Radunrundheiten Fahrzeuge.* 2022.
54. Rohrbach, Silvan. *FV-Dosto - Radanalysen.* 2021.
55. Scherler, Lorenz. *Betriebsversuche Radreifenwerkstoffe Re 420 / Re 620 - Zwischenbericht März 2010.* 2010.
56. Comps, Justin. *Untersuchungen zum Bandagenverschleiss und Zustand.* 2013.
57. Müller, Roland. *Bericht zum Radwerkstoff Superlos auf NPZ- Triebwagen RBDe 560.* 2014.
58. Mädler, Katrin and Bannasch, Manfred. *Materials used for Wheels on Rolling Stock.*
59. *Polygonisation of railway wheels: a critical review.* Gongquan Tao, Zefeng Wen, Xuesong Jin, Xiaoxuan Yang. 2020, Rail. Eng. Science.
60. RAILplus. *Systemführerschaft Interaktion Fahrzeug-Fahrweg - Infoletter.* Zugriffsdatum 2022.
61. Müller, Roland. *Strategien zur Verringerung der Umweltbelastung infolge fahrzeuginduzierter Erschütterungen im Erdreich durch Massnahmen bei den Fahrzeugen.* 2014.
62. Hürzeler, Thomas. *Erprobung eines KELTRACK Applikationssystems auf BLS RABe 535 .* 2017.
63. Nielsen, Jens and Nelain, Brice and Müller, Roger and Frid, Anders and Mirza, Adam. *RIVAS - D5.2 - Train Induced Ground Vibration – characterization of vehicle parameters from test data and simulations.* 2012.
64. Nielsen, Jens and Mirza, Adam and Cervello, Steven and Frid, Anders and Müller, Roger and Nelain, Brice and Ruest, Philipp. *RIVAS - D5.4 - Train Induced Ground Vibration – Optimised Rolling Stock Mitigation Measures and their Parameters.* 2013.
65. Schindler, Christian. *Handbuch Schienenfahrzeuge.* s.l. : Eurailpress, 2014.
66. Hamid Masoumi, APT. *Cargovibes D6.3 - Standards.* 2014.
67. Müller, Roger. *Bericht Erschütterungsmessungen neben Gleis - Pratteln Nov 26, Feb 07, Jun 07.* 2007.
68. UIC. *IRS 70719-1 Recommendations for the use of Under Ballast Mats.* 2022.
69. Wettschureck, Rüdiger F. *Körperschall an Schienenverkehrswegen - Gastbeitrag im Rahmen der Vorlesung Technische Akustik II - TU-Berlin.* 2012.
70. SBB I-NAT-FW-TAFB-UGT. *Unterschottermatte bei ungenügender Schotterbettdicke über starrem Unterbau - Technische Spezifikation.* 2022.
71. Müller, Roger. *Under Ballast Mat - Insertion Loss.* 2008.
72. —. *Dämmwirkung von Unterschottermatten gegen Schwingungen - 1. Messkampagnem Raron Nov. 1997.* 2000.
73. —. *Dämmwirkung von Unterschottermatten gegen Schwingungen . 2. Messkampagne Raron/Gampel - Mai 1998.* 2000.
74. Köstli, Kornel. *Erschütterungsdämmung von Unterschotter- undSeitenmatten in der Galerie de Concise.* 2004.

75. Müller, Roger. *FB 400-0510 - Unterschottermatten als Schutz vor Erschütterung und Körperschall (EKS) - DMS ID 132928090.* 2012.
76. VCE Consult ZT-GmbH. *UIC “USP in Track” Project - State-of-the-art report.* 2010.
77. UIC. *IRS 70713-1 Under Sleeper Pads (USP) - Recommandation for Use.* 2019.
78. SBB / BLS / SOB. *Kennzeichnung der besohlten Betonschwellen - DMS 102989480.* 2022.
79. VÖV UTP. *Lückenlose undverlaschteGleiseund Weichen - Normalspur.* 2019.
80. I-AT-F-TEC-OBA. *Technische Spezifikation - Pflichtenheft Teil A - Schwellenbesohlung (USP).* 2014.
81. Schönholzer, Urs. *FB 400-0507 - Elastische Komponenten für Betonschwellenim Gleis: Zwischenlagen und Schwellenbesohlung.* 2020.
82. Keller, Steffen. *FB 400-0209 Besohlung von Betonschwellen (B91 und B06) auf starrem Unterbau.* 2017.
83. *EN 16730:2016 - Gleis- und Weichenschwellen aus Beton mit Schwellensohlen.* 2016.
84. Faure, Baldrik and Bongini, Estelle and BAM and KUL. *RIVAS - D3.2 - Results of the Parameter Studies and Prioritization for Prototype Construction for Ballasted Track.* 2012.
85. Garburg, Rüdiger. *UIC Project No I/05/U/440.* 2007.
86. Grolimund & Partner AG. *Lärm-Emissionsmessungen SBB Oberbau Bahnhofbereich Kiesen.* 2005.
87. DB Systemtechnik. *Luftschallmessungen an Streckenabschnitten mit unterschiedlichen Schwellenbesohlungen in Kiesen.* 2007.
88. Ziegler Consultants. *Erschütterungsmessung Bellach – Solothurn West.* 2008.
89. Grolimund & Partner AG . *Lärm-Messungen SBB - Schwellenbesohlung Bellach - Solothurn West.* 2006.
90. Müller, Roger and Brechbühl, Yves. *RIVAS Project - D3.8 - Measurement report about a new under sleeper test track in a curve.* 2013.
91. SBB AG. *Piloteinbau „elastische Schwellenbesohlung auf offener Strecke“ Abschnitt Pratteln – Kaiseraugst, Bahn-km 78.241 – 78.565.* 2008.
92. Gruner AG. *Pilotprojekt Schwellenbesohlung Kaiseraugst - Pratteln - Lärm-Emissionsmessungen .* 2007.
93. EMPA. *Ermittlung des Einflusses einer harten Schwellenbesohlung mittels Vorbeifahrts-Schalldruckpegelmessungen zwischen Sempach und Rothenburg.* 2020.
94. BAV. *Richtlinie Lärmschutz bei Eisenbahnanlagen.* 2019.
95. Huber, Philipp. *Bericht 04-03-01033.* 2018.
96. Müller, Roger. *Nicht veröffentlicht - Diskussionsgrundlage weiche Schwellenbesohlung und Lärm.* 2022.
97. ISVR Consulting. *Effects of under sleeper pads on TWINS predictions of rolling noise.* 2019.
98. Schönholzer, Urs. *Gleisemitmittelsteifer oder weicher Schwellenbesohlung im Netz der SBB: Status 2020.* 2021.
99. Morin, Benjamin. *Rail Track Noise Emission: Influence of Under Sleeper Pads on Railway Rolling Noise Emissions.* 2018.
100. Lichtberger, Bernhard. *Handbuch Gleis - Unterbau, Oberbau, Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit.* 2004.

101. Faure, Baldrik and Bongini, Estelle. *RIVAS - D3.5 - Mitigation measures installed on commercial track.* 2013.
102. Faure, Baldrik and Bongini, Estelle and Nelain, Brice. *RIVAS - D3.10 - Optimisation of the fastening system and the sleeper: results of the measurement campaign on commercial track.* 2013.
103. I-NAT-FW-TAFB. *Elastische Komponenten fürBetonschwellenim Gleis: Zwischenlagen und Schwellenbesohlung.* 2020.
104. Werner, St. und Huber, Ph. *Vergleich Zwischenlagen für Betonschwellen - Analysebericht.* 2021.
105. Czolbe, Christian. *Akustisch optimierte Schienenzwischenlage - Schlussbericht.* 2020.
106. Huber Philipp, Werner Stefan. *Forschungsprojekt hochdämpfende Zwischenlage - Schlussbericht.* 2020.
107. Rutishauser, Gérard and Huber, Philipp. *AG LEO - Zusammenstellung und Bewertung bestehender Systeme.* 2003.
108. Rubi, Hanspeter / Hejda, Georg / Rutishauser, Gerard. *S-Bahn Technik: Gleisoberbau und Körperschallschutzmassnahmen.* 1991.
109. Hofmann, Basler &. *SBB Grauholztunnel - Kontrollmessungen Masse-Feder-System.* 2014.
110. Rutishauser Ingenieurbüro. *2. Doppelspur Zürich HB - Thalwil- Erschütterungen und Körperschal - Immissionsmessungen unter Regelzugverkehr.* 2004.
111. Sonneville. *Low vibration track system - Produktbeschreibung des Herstellers.* Zugriffsdatum: 2022.
112. Gerber, Tobias and Hengelmann, Anabel and Laborenz, Peter and Rubi, Thomas and Trovato, Marco and Ziegler. Armin. *Feste Fahrbahn mit Erschütterungs- und Körperschallschutz.* 2012.
113. Stahl, Walter. *Dynamische Einsenkungsmessungen im Gotthard-Basistunnel.* 2016.
114. Tyrens. *LVT-HA System - Insertion Loss measurements in Citytunneln, Sweden.* 2014.
115. SATEBA. *S312 Twinblock booted sleeper.* 2022.
116. —. *M312 Monoblock booted sleeper.* 2022.
117. Basler&Hofmann. *SBB DML Weinbergtunnel, Vergleich von LVT-Standard und LVT-HA.* 2019.
118. Nielsen, Jens and Beeterens, Wouter and Stallaert, Bert and Berggren, Eric. *RIVAS - D2.1 - Classification of Track Conditions with Respect to Vibration Emission.* 2012.
119. I-NAT-FW. *I-22070 Einbau, Kontrollen und Unterhalt von Gleisen.* 2022.
120. *Rail corrugation: characteristics, causes, and treatments.* Grassie, Stuart L. 2009, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, Bd. 223, S. 581-596.
121. Diagnosetechnik, SBB Mess- und. *Factsheet Gleiseinsenkungsprüfung - Oberbau-Unterbauzustand:Einsenkungsmessung.* 2014.
122. Lölgen, Thomas and Pesqueux, Lise and Feng, Joseph. *Definition of track maintenance measures for reduction of ground vibrations.* 2013.
123. Joseph Feng, Jens Nielsen, Bert Stallaert, Eric Berggren. *Validation of track maintenance measures.* 2013.
124. Müller, Roger. *State-of-the-Art: Betonplatte/Bodenverfestigung.* 2008.

125. Coulier, P., Degrande G., Dijckmans A., Houbrechts J., Lombaert G., Rücker W., Auersch L., Rodríguez Plaza M., Cuellar M., Thompson D.J., Ekblad A., Smekal A. *RIVAS - D4.1 - Scope of the parametric study on mitigation measures on the transmission path.* 2011.
126. Dijckmans A. and Jiang J. and Toward, M.G.R and, Thompson D.j. and, Degrande, G. and Lombaert, G. *RIVAS - D4.4 - Numerical study of vibration mitigation measures in the transmission path.* 2013.
127. Garburg, Rüdiger and Frank, Christian and Mistler, Michael. *Investigation of vibration mitigation by concrete trough with integrated under ballast mats for surface-railways.* 2019.
128. Coulier, P. and Dijckmans, A. and Degrande, G. and Lombaert, G. and Jiang, J. and Thompson, D.J. *RIVAS - D4.2 - Optimum test conditions for field tests of vibration mitigation measures in the transmission path.* 2012.
129. Müller, Roger. *Bodenschlitz als Erschütterungs- und Körperschallschutzmassnahme - State-of-the-art Bericht .* 2007.
130. Trombik Ingenieure AG. *Pilotprojekt: Erschütterungs-und Körperschallmessungen zur Analyse der Schutzwirkung eines Isolierkörpers im Boden.* 2021.
131. Coulier P., Degrande G., Dijckmans A., Lombaert G., Rodríguez Plaza M., Cuellar V., Yuste M., Müller R., Vucotic G., Keil J., Auersch L., Knothe E., Rücker W., Said S., Jiang J., Thompson D.J., Toward M.G. *RIVAS - D4.3 - Design of the mitigation measures at the test sites.* 2013.
132. Dijckmans, A. and Coulier, P. and Degrande, G. and Lombaert, G. and Ekblad,A. and Smekal, A. and Rodríguez Plaza, M. and Andrés-Alguacil, Á. and Cuéllar, V. and Keil, J. and Vukotic, K. *RIVAS - D4.5 - Mitigation measures on the transmission path: results of field tests.* 2013.
133. Lombaert G., Dijckmans A., Coulier P., Degrande G., Smekal A., Ekblad A., Thompson D.J., Jiang J., Toward M.G.R., Rücker W., Keil J., Vukotic G., Rodríguez Plaza M., Andrés Á., Cuéllar V. Garburg R., Müller R. *RIVAS - D4.6 - Design guide and technology assessment of the transmission mitigation measures.* 2013.
134. Rutishauser Ingenieurbüro. *Bodenschlitz in Berg, TG - Erschütterungsuntersuchung.* 2007.
135. Gartenmann Engineering AG. *BLS Doppelspurausbau Fischermätteli-Weissenbühl: Bodenschlitz als Abschirmung gegen Erschütterungen - Erfahrungsbericht.* 2005.
136. Ziegler Consulting. *Summary Ziegler Syposium 2016 - Elastische Lagerung eines Einfamilienhauses.* 2016.
137. c+s ingenieure ag. *Studie Bauverfahren Bodenschlitze als Erschütterungsreduktionsmassnahmen-Stufe 1 .* 2017.
138. *Umweltschutzgesetz (USG), Beschluss vom 07.10.1983, Fassung vom 01.01.2022.*
139. EN 17282:2020: Railway applications - Infrastructure - Under ballast mats. 2020.
140. SBB. *Erschütterungs- und Körperschallimmissionen von Bahnen: Belastungssituation, technische Massnahmen und finanzielle Konsequenzen - Bericht.* 2003.
141. Faure, Baldrik and Bongini, Estelle and BAM and KUL. *Results of the Parameter Studies and Prioritization for Prototype Construction for Ballasted Track.* 2012.
142. SBB. *Nicht veröffentlicht - Aussprache Erschütterungen bei TAFB.* 2019.

Anhang

A. Beurteilung nach DIN 4150-2 – Auswertungsschritte

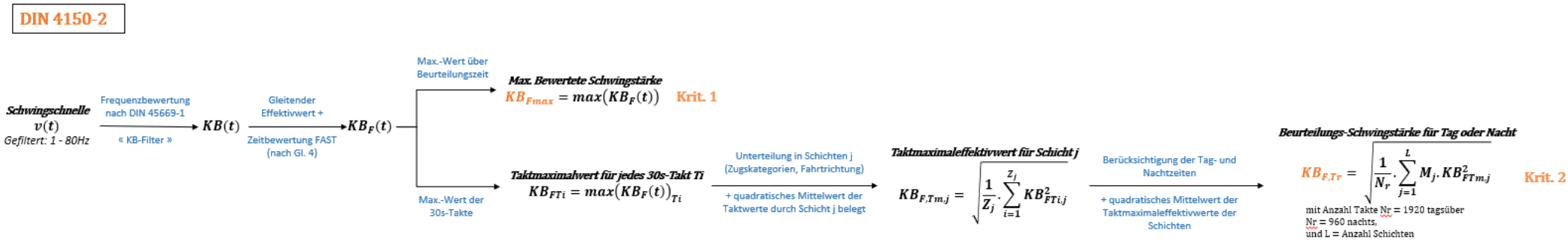


Abbildung 70: Beurteilung nach DIN 4150-2 – Auswertungsschritte

B. Relevante Aspekte für die Modellierung und Messung und EKS – gemäss ISO 14837-1 Anhang A [8]

A.1 General

This annex provides a checklist of issues relevant to modelling and measurement that should be reviewed when predicting ground-borne vibration and/or resulting ground-borne noise, or when undertaking measurements. The parameters will have varying degrees of significance and some will not be relevant to a particular prediction situation. It is therefore a matter for expert engineering judgement as to their relative significance or relevance to a given situation.

They are listed under the principle headings of source, propagation path and receiver. They are not listed in any significant order.

The component parameters listed may either be constant or a function of frequency, strain, load, temperature, etc. It may be possible to ascribe confidence limits to these parameters, either from a statistical evaluation or by engineering judgment.

A.2 Source

A.2.1 Route alignment

a) Horizontal, vertical

b) At grade, cuttings, embankments

c) Elevated

d) In tunnel

A.2.2 Rolling stock

a) Vehicle length

b) Wheel profile

c) Wheel diameter

d) Wheel roughness, wheel faults

e) Wheel dampers

f) Resilient wheels

- rim mass
- dynamic stiffness

g) Unsprung mass

- wheels
- axles
- other (brake discs, axle hung motor, gearboxes, etc.)

h) Primary suspension

- stiffness
- damping (viscous, hysteretic, Coulomb)

i) Sprung mass

- bogie frame
- traction components
- frame-hung motors or gearboxes

j) Secondary suspension

- stiffness (bogie fraction, traction components)
- damping

k) Body mass (all mass above secondary suspension)

l) Total mass per axle (= unsprung mass + sprung mass + body mass): empty or full

m) Axle load (static/dynamic)

n) Moments of inertia and flexure of wheel/axle set

o) Number of axles and axle spacing

p) Flexural modes of body

A.2.3 Rail

a) Alignment (track geometry: line and level)

b) Rail gauge

c) Rail roughness (condition, irregularities), various types

d) Rail section, rail steel

e) Switches, crossings, joints, welds

f) Periodicity of load (parametric excitation) due to varying track support stiffness and axle spacing (function of vehicle speed)

g) Lateral loads [cant deficiency, oscillating wheel rail forces due to tight curves (e.g. manifest as wheel squeal), flange contact, contact patch]

h) Contact patch stiffness (vertical)

i) Lubrication (friction modifiers)

A.2.4 Track form

a) Load capacity of rail fastening (clips, insulator, clamping system)

b) Continuously supported rail

c) Embedded rail

d) Sleepers

e) Periodicity of support

f) Ballast (glued ballast)

g) Booted blocks, sleepers

h) Pads and resilient bearings (resilient fasteners or resilient base plates or under sleepers)

i) Ballast mats

j) Static/dynamic/acoustic stiffness of resilient elements

k) Concrete slab

l) Floating track slab

m) Current collection (power track)

A.2.5 Supporting infrastructure

A.2.5.1 At grade

In cutting, on an embankment (soil or expanded polystyrene), ground beams, piles, ground stabilization (lime-cement, grouting, soil nails, mesh), bituminous surfacing, concrete slab, sub-grade (soft spots), ground conditions.

A.2.5.2 Elevated structure

a) Construction material: steel (welded, bolted, riveted), concrete (*in situ*, precast), composite (steel/concrete), timber

b) Deck mobility (complex)

c) Frequencies, damping

d) Soil-structure interaction (foundation type, soil conditions)

e) Changes (e.g. removal of ballast under track replacement)

NOTE Structure-radiated noise that can have a significant environmental impact is excluded.

A.2.5.3 Tunnel

a) Type and location

b) Depth

c) Shape

d) Lining, relining

e) Track foundation (invert)

f) Immediate soil and structures, grout

g) Voids

h) Rattle from loose fixings in tunnel

A.2.6 Construction tolerance

a) Stiffness variation of resilient elements

b) Construction tolerance on support spacing

c) Time effects, long-term E-values (Young's modulus)

d) Cracking

A.2.7 Operational

a) Train speed

b) Mixture of traffic or service pattern

A.2.8 Operational maintenance

a) Track geometry (e.g. rail line and level)

b) Wheel trueing

c) Wheel and rail grinding

d) Roughness

- corrugation
- degradation

e) Wheel slip/slide protection

f) Ballast and track slab condition

g) Track maintenance factors

A.3 Propagation path

A.3.1 Ground (soil, rock)

a) Geological profile (stratification, layer inclination and distinction of layer interfaces)

b) Topography

- ground surface

- buildings (shape, size and location)
- ditches

c) Water tables

d) Soil dynamic properties at small strains (drained and undrained)

- shear modulus
- Poisson ratio
- density
- shear (v_s), compression (v_p) wave velocities
- loss factor (type and viscous or hysteretic)

e) Inhomogeneties in the path

- man-made (pipes, roads, other tunnels, ground anchors, piles, deep foundations, pre- or post-ground treatment)
- natural (faults, fissuring, voids, layering, anisotropies, inclusions, two-phase propagation, free surface)
- mitigation, interventions (e.g. screen walls)

f) Season (frozen ground or soil properties, moisture content)

A.3.2 Wave field

a) Wavetype, wavetype conversion, reflections and diffraction

b) Angle of incidence

c) Near field

d) Far field

e) Axis (resultant, or longitudinal, transversal, vertical)

f) Radiation distribution

g) Geometric damping

A.4 Receiver

A.4.1 Structures

a) Metric to predict

b) Foundation type (raft, piles, base isolation, etc.; materials of foundation, and response to different wavetypes)

c) Geometry of foundation

d) Local soil dynamic properties

e) Effect of local ground treatment

f) Formation level (distance, axis)

g) Soil-structure interaction

h) Building type

- concrete
- brick
- timber
- steel

i) Building condition

j) Floor type (geometry and materials, suspended, ground bearing)

- stiffness, mass, damping
- live loading

k) Eigen frequencies of structure and damping

l) Predicted parameters of vibration with reference to structures, occupants, sensitive equipment

m) Location of prediction in structure

n) Empty or full buildings (mass)

o) Background vibration levels (e.g. services equipment, road traffic, footfall)

p) Visual/audible cues to vibration

q) Swimming pools (underwater noise)

A.4.2 Ground-borne noise

a) Ground-borne noise: Distinction between airborne, ground-borne, bone conduction on pillow

b) Metric to predict

c) Position in building

d) Position in room

e) Radiation efficiency

f) Room acoustics

- reverberation time (empty or full)
- room size and liveliness of room elements
- background noise

g) Rattle of contents (high frequency).

C. Antriebsanordnungen im Drehgestell – Schnittdarstellungen

In diesem Absatz dargestellte Bilder stammen aus dem Buch [65].

Unabgefederter Antrieb (*nose-suspended drive*)

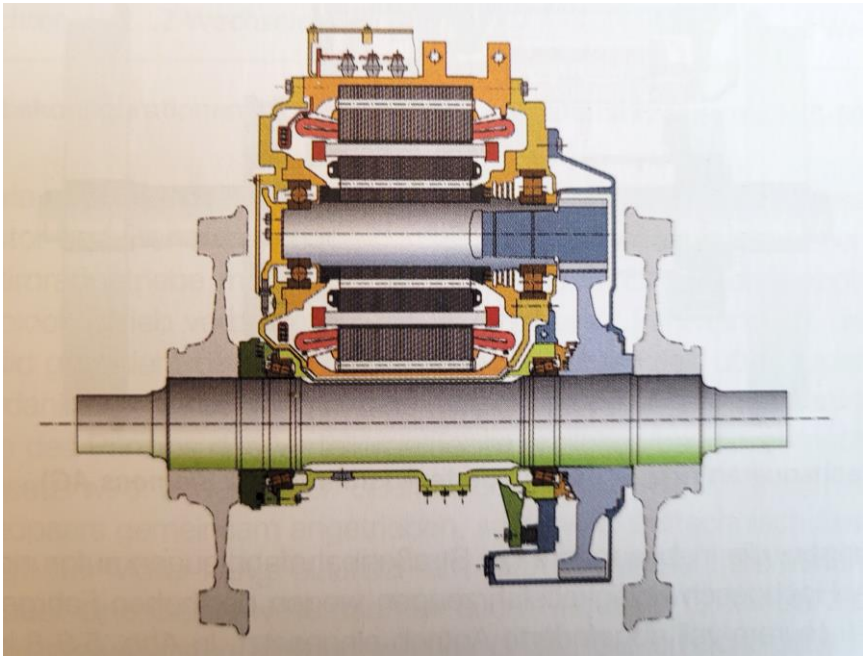


Abbildung 71: Einzelachsquerantrieb, auch Tatzlagerantrieb genannt, unabgefederte «achsreitende» Ausführung [65]

Teilabgefederter Antrieb (*semi-suspended drive*)

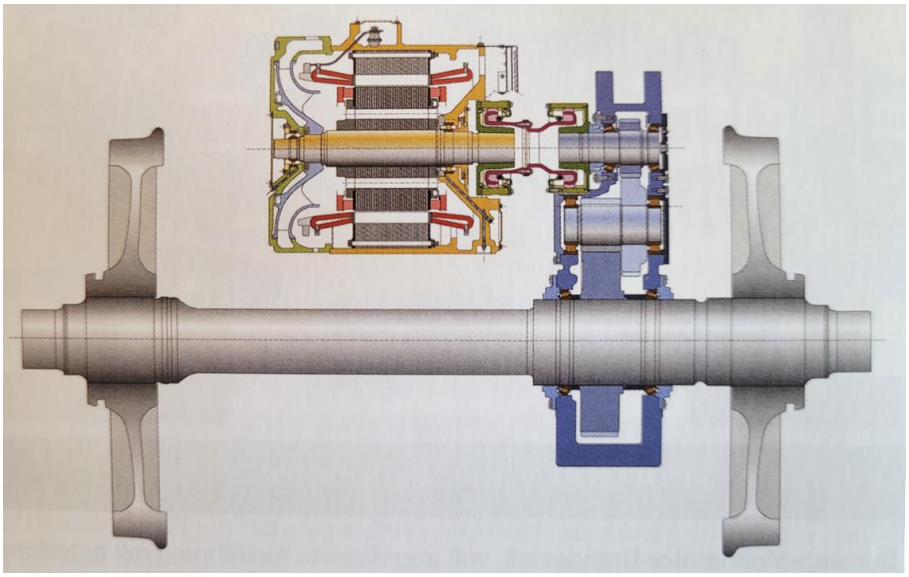


Abbildung 72: Einzelachsquerantrieb, teilabgefederte Ausführung [65]

Vollabgefederter Antrieb (*fully-suspended drive*)

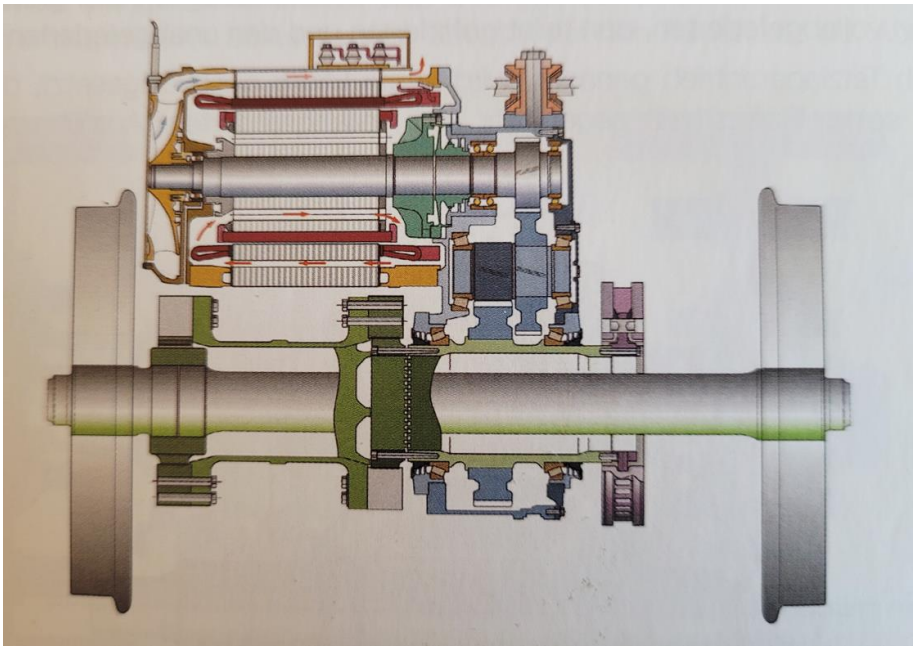


Abbildung 73: Einzelachsquerantrieb, vollabgefederte Ausführung [65]