

Akustisch optimierte Betonschwelle

Schlussbericht

Bericht



17.110.00 – BAFU Innovative Betonschwelle

Erstellt	Geprüft	Freigegeben		
C. Czolbe	F. May	Y. Kohler		
Dokumentnummer	Ausgabedatum	Revision	Revisionsdatum	Status
04-03-01921	05.10.2019	1.00	11.12.2019	Released

PROSE AG

Zürcherstrasse 41
8400 Winterthur
Schweiz

www.prose.one

Tel +41 52 262 74 00
Fax +41 52 262 74 01
info.winterthur@prose.one

Verteiler

Firma/Abteilung/Name	Bemerkungen

Revisionsindex

	Ersteller	Prüfer	Freigebender	Datum
04-03-01921	C. Czolbe	F. May	Y. Kohler	05.10.2019
Rev.	C. Czolbe	F. May	Y. Kohler	11.12.2019
Rev.				

Modifikationen

Revision	Beschreibung

Dieses Dokument gibt Kenntnis von Gegenständen, an denen die PROSE AG, 8400 Winterthur (Schweiz), oder eines ihrer Tochterunternehmen Eigentumsrechte hat. Weder Erhalt noch Besitz dieses Dokuments verleihen oder übertragen das Recht, seinen Inhalt als Ganzes, einen Teil davon, eine darin enthaltene Information, oder irgendwelche Gegenstände oder Vorrichtungen zu kopieren oder bekannt zu machen oder irgendwelche Methoden oder Prozesse anzuwenden, ausser nach schriftlicher Genehmigung durch die PROSE AG, 8400 Winterthur (Schweiz) oder schriftlicher Vereinbarung mit dieser Firma.

Dieses Schreiben wurde maschinell erstellt und ist ohne Unterschrift gültig.

1	Management Summary	6
2	Ausgangslage	7
2.1	Projektziel	10
3	Anforderungskatalog Betonschwelle	12
3.1	Anforderungen an den Oberbau im Betrieb	12
3.2	Anforderungen aus dem Gleisbau	12
3.3	Anforderungen an die Fertigung	12
4	Literaturrecherche Akustik	13
5	Gleisdynamik	16
6	Fertigungsunterschiede Betonschwellen	22
6.1	Betonschwellen B91/B06 FS	22
6.2	Betonschwelle B70	23
7	Messungen	24
7.1	Experimentelle Modalanalysen	25
7.2	Rechnerische Modalanalysen - FEM Modell	30
7.3	Messungen an Testgleisen	35
7.3.1	Ergebnisse vom Testgleis mit B70-Schwellen Schrey & Veit	36
7.3.2	Ergebnisse am Testgleis B91 von Vigier Rail	43
7.3.3	Messungen TDR am Testgleis B91 von Vigier Rail	43
7.4	Messungen am realen Gleis	44
7.5	Modalanalysen im eingebauten Zustand	48
7.6	Akustik Modell eines Gleisoberbaus	49
7.7	Einfluss der Klemmkräfte	50
8	Optimierungsprozess	52
8.1	Analyse und Bewertung	52
8.2	Optimierungsansätze	53
8.2.1	Höhere Schwellenmasse	54
8.2.2	Zusätzliche Befestigungen	54
8.2.3	Schienenklemmung über der Zeit	55
8.3	Designprozess	56
8.3.1	Messung der TDR am Testgleis	56
8.3.2	Berechnung der TDR in den FEM Modellen	61
8.3.3	Beurteilung	63
8.3.4	CAD Modelle	65
9	Prototypen	66
9.1	Design	66
9.2	Fertigung	66
9.3	Messungen im Testgleis	68
9.3.1	TDR-Messungen (und Vergleich)	68
9.3.2	Intensitätsmessungen	73
9.3.3	Transferfunktion Hammeranregung Schwelle	78
9.3.4	Transferfunktion Hammeranregung Schiene im Gleis	79
9.3.5	Transferfunktion Lautsprecheranregung	81
9.3.6	Modalanalyse neue Schwellen	82

9.4	Statische Prüfung und Nachweis	83
9.5	LCC Betrachtung	83
10	Zusammenfassung.....	87
10.1	Ausblick	89
10.2	Bewertung Marktchancen.....	89
11	Literatur.....	90
A	Technische Daten	91
A.1	B91-Schwelle.....	91
A.2	B70-Schwelle.....	91
A.3	B70-MN-Schwelle	92
A.4	S06-Schwelle	92
B	Experimentelle Modalanalysen.....	93
B.1	B91-Schwelle.....	93
B.2	B70 Schwelle	98
B.3	B70-MN-Schwelle	101
B.4	S06-Schwelle	104
B.5	Messergebnisse Testgleis B70-Betonschwelle Schrey & Veit	111
B.6	Modalanalyse Testgleis B70 Betonschwelle Schrey & Veit	117
B.6.1	Ergebnisse ohne Schiene	118
B.6.2	Messung mit Schiene.....	120
B.7	Messergebnisse Testgleis B91-Betonschwelle Vigier Rail	122
B.8	Modalanalyse Testgleis B91 Betonschwelle Vigier Rail.....	126
B.8.1	Messung ohne Schiene	126
B.8.2	Messung mit Schiene.....	128
B.9	Modalanalyse Betonschwelle Railbone	130
B.10	Modalanalyse Betonschwelle Hammerhead.....	134
C	Akustik-Messungen an Testgleisen.....	138
C.1	Testgleis mit B70-Schwellen.....	138
C.2	Testgleis mit B91Schwellen	141
C.3	Testgleis mit Hammerhead Schwellen	142
C.4	Testgleis mit Rail-Bone-Schwellen.....	143
D	TDR-Messungen an Testgleisen.....	144
D.1	Testgleis mit B91-Schwellen.....	144
D.2	Testgleis mit Hammerhead-Schwellen.....	146
D.3	Testgleis mit Rail-BoneSchwellen	148
E	Begleitende Untersuchungen.....	149
E.1	Morphologischer Kasten.....	149
E.2	Nutzwertanalyse	152
E.3	Mehrkostenabschätzung mit neuer Schwelle	153
F	Lösungsansätze Schienenbefestigung.....	154
F.1	Zusammenfassung der bisherigen Schienenbefestigung.....	154
F.2	Übersicht zu den Lösungsansätzen	154
F.2.1	Minimierung des Klemmkraftverlusts durch geändertes Material für die Dübel	154

F.2.2	Minimierung des Klemmkraftverlusts durch federnde Verbindung unter Befestigungsschraube	154
F.2.3	Dübel weglassen.....	155
F.3	Dickere Befestigungsschrauben	155
F.4	Änderung der Gewindegometrie der Befestigungsschrauben	155
F.5	Einbetonieren von Gewindestangen anstelle von Dübeln	156
F.6	Lagerung der Schiene auf der Schwelle in einer Nut resp. auch am Steg	156
G	Zeichnungen (externer Anhang)	158

1 Management Summary

Im Laufe des Forschungsprojekts zur optimierten Betonschwelle wurden Erkenntnisse über das Schwingungsverhalten und die Schallabstrahlung von Gleiskomponenten zusammengetragen, die für eine Lärmreduzierung in Betracht kommen. In der Zusammenarbeit mit dem Hersteller Vigier Rail wurden darauf zwei neue marktfähige Betonschwellen entwickelt und vermessen.

In der Voruntersuchung stellte sich heraus, dass für eine effektive Lärmminderung nicht der Schwellenschall, sondern der Schienenschall durch eine bessere Anbindung an die Betonschwelle reduziert werden muss. Die Abklingrate - TDR steht im direkten Zusammenhang mit der Schienenschallabstrahlung und wird damit zur zentralen Bewertungsgröße im Designprozess.

Der Betonschwellentyp «Railbone» zeichnet sich durch breitere Köpfe mit je vier Befestigungspunkten pro Kopfseite aus, sodass doppelte Schienenklemmungen oder aperiodische Klemmungen möglich sind. Eine zweite Designidee «Hammerhead» ist asymmetrisch und hat nur einen verbreiterten Kopf mit vier Befestigungen und einen schmalen Kopf mit zwei Befestigungen, sie wird auch im Gleis im Wechsel der Kopflage verlegt. Durch die breiteren Schwellenköpfe und doppelte Klemmung kann trotz Beibehalt des standardisierten Schwellenabstandes von 60 cm im relevanten Frequenzbereich der Schiene zwischen 800 und 1250 Hz die Dämpfung erhöht werden. Dies wird nach den akustischen Untersuchungen durch die grösste Auflagefläche der Schiene erreicht und über eine Frequenzverlagerung von Torsionsschwingungsmoden der Schwelle weg von der Frequenz der kritischen vertikalen pin-pin-Mode der Schiene.

In der Praxis hat am besten das Testgleis mit Railbone-Schwellen und doppelter Schienenbefestigung abgeschnitten, gefolgt vom Gleis mit Hammerhead-Schwellen. Am Testgleis wurden im kritischen Bereich des Schienenschalls bei 1000 Hz somit über 2.5 dB höhere und bei 1250 Hz noch über 1.5 dB höhere TDR-Werte in lateraler Richtung gemessen als beim Gleis mit B91-Schwellen. Aus dem Verhältnis der TDR Werte lassen sich Pegelminderungen der neuen Betonschwellen berechnen, welche bei der Railbone Schwelle mit doppelter Befestigung im Mittel 1.4 dB beträgt. Auch die Intensitätsmessungen zeigen eine deutliche Pegelreduktion vom Schienenschall im Frequenzbereich zwischen 400 und 2500 Hz bei allen neuen Betonschwellen an, wobei die Railbone mit doppelter Befestigung Pegelreduktionen von 2.5 bis 4.2 dB aufweist.

Für die B91-Schwellen haben Modalanalysen bei freier Aufhängung gezeigt, dass durch eine Besohlung Frequenzverschiebungen in den Schwingungsmoden auftreten, da sie die Biegesteifigkeit der Schwelle geringfügig erhöht. Nach unseren Messungen verschiebt sich die zweite Torsionsmode bei besohlten Schwellen dann genau auf die vertikale pin-pin-Mode der UIC60-Schiene und wirkt dann möglicherweise als verstärkender Faktor. Mit den neuen Betonschwellentypen wird dieser Effekt durch um 100 Hz tiefere Torsionsmoden vermieden.

Aus akustischer Sicht wird mit neuen Betonschwellen vom Typ Railbone oder vom Typ Hammerhead sowie bei der Verwendung von harten Zwischenlagen somit ein lärmärmer Gleisaufbau möglich, an dem 1-2 dB niedrigere Vorbeifahrpegel als bei einem konventionellen Gleis mit B91-Schwellen im realen Gleis realistisch sind.

Durch die höhere Auflagefläche beider Schwellen verringert sich die Schotterpressung bei den neuen Betonschwellen vom Typ Railbone um 32 % und Hammerhead um 20 %. Dies ermöglicht einen längeren Wartungsintervalle. Der Einsatz von bereits vorhandener Technologie, wie z.B. harten Zwischenlagen oder Schwellenbesohlung ist möglich. Damit können die LCC-Kosten grundsätzlich positiv bewertet werden. Der Aufwand für die Schwellen und die Montage mag etwas höher sein, was voraussichtlich durch längere Wartungsintervalle kompensiert wird.

Die Schwellen haben die nötigen Prüfungen zur Festigkeit bestanden und sind damit für eine Erprobung im Feldversuch einsatzbereit. Gegenüber der HDS-Schwelle bieten die neuen Betonschwellen einige Vorteile bezüglich Schwellenfachbreite und Massen.

2 Ausgangslage

Die Entwicklung neuer Gleisbauelemente wie Betonschwellen ist recht langsam, da die Zulassung aufwändig ist und Erfahrungen im Betrieb oft erst nach mehreren Jahren oder Jahrzehnten gesammelt werden können. Die B70-Betonschwelle (Auslaufmodell) wurde in den 1970iger Jahren entwickelt und die B91-Betonschwelle in den 1990igern. Die B70-Schwelle wurde in der Schweiz überwiegend mit UIC54-Schienen verbaut und in dieser Form im sonRAIL-Projekt gemessen. In den letzten 20 Jahren wurden die Transitrouten und Strecken für den Güterverkehr sukzessive auf UIC60-Schienen umgerüstet, welche aufgrund ihres Stegs höhere Betriebslasten aushalten. Dabei wurden i.d.R. auch die Schwellen auf B91 umgerüstet.

Der Lärm vorbeifahrender Züge setzt sich aus verschiedenen Geräuschanteilen zusammen. Die wesentlichen Geräusche sind Antriebsgeräusche, Rollgeräusche und aerodynamische Geräusche. Je nach Geschwindigkeit dominiert einer dieser drei Anteile, siehe Abbildung 1. Da in der Schweiz außer in Tunneln nicht über 200 km/h schnell gefahren werden soll, ist es das Rollgeräusch, welches im Wesentlichen den Lärm verursacht.

- Antriebsgeräusche dominant bis 60 km/h
- Rollgeräusche dominant 60-250 km/h
- Aerodynamische Geräusche dominant ab 250 km/h

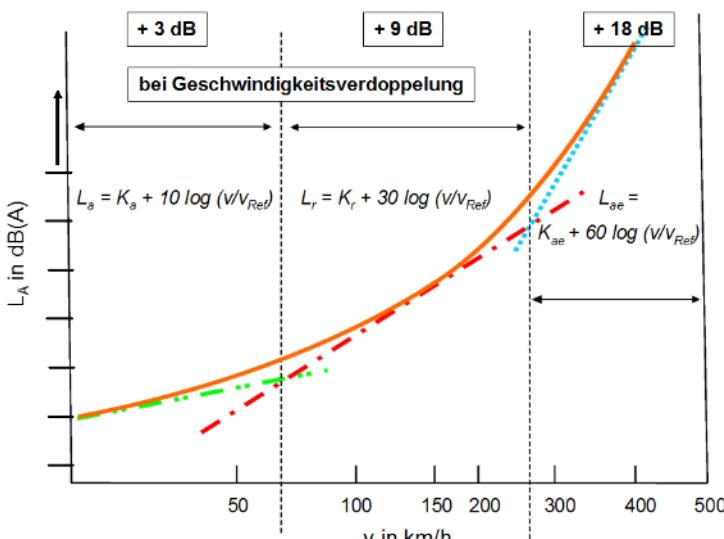


Abbildung 2-1: Lärmemission in Funktion der Vorbeifahrgeschwindigkeit (Hecht 2001)

Das Rollgeräusch selbst wird generiert durch die Rauheit von Rad und Schiene, welche angekoppelte Bauteile wie das Rad selbst und den Gleisoberbau zu Schwingungen anregt, wobei die schwingenden Oberflächen den Schall abstrahlen. Welcher Teil wieviel Schall abstrahlt, hängt von verschiedenen Parametern ab, wie z.B. Grösse, Form und Dämpfung der abstrahlenden Flächen sowie der Kopplung zwischen den Teilen. Die verschiedenen Anteile aus Lärmmeßungen zu separieren, ist allerdings sehr komplex und immer noch Gegenstand der aktuellen Forschung (z.B. BAFU Projekt OST, EU Projekt Roll2Rail). Mit Simulationstools, wie z.B. TWINS oder sonRAIL lässt sich das allerdings berechnen. Die folgende Abbildung zeigt das Resultat einer Berechnung mit TWINS für einen Güterzug bei 100 km/h bei einem Oberbau mit weicher Zwischenlage. Wesentlich für das Rollgeräusch sind in diesem Fall die Schwelle, die Schiene und das Rad, jeweils in unterschiedlichen Frequenzbereichen, wobei der Anteil der Schiene dominiert. Für den Fall mit harten Zwischenlagen (Standardoberbau in der Schweiz) wäre der Anteil der Schiene kleiner (hohe Gleisabklingrate) und derjenige der Schwelle höher, da mit der harten Zwischenlage die Schwelle bis ca. 600 Hz schwingungstechnisch an die Schiene gekoppelt ist.

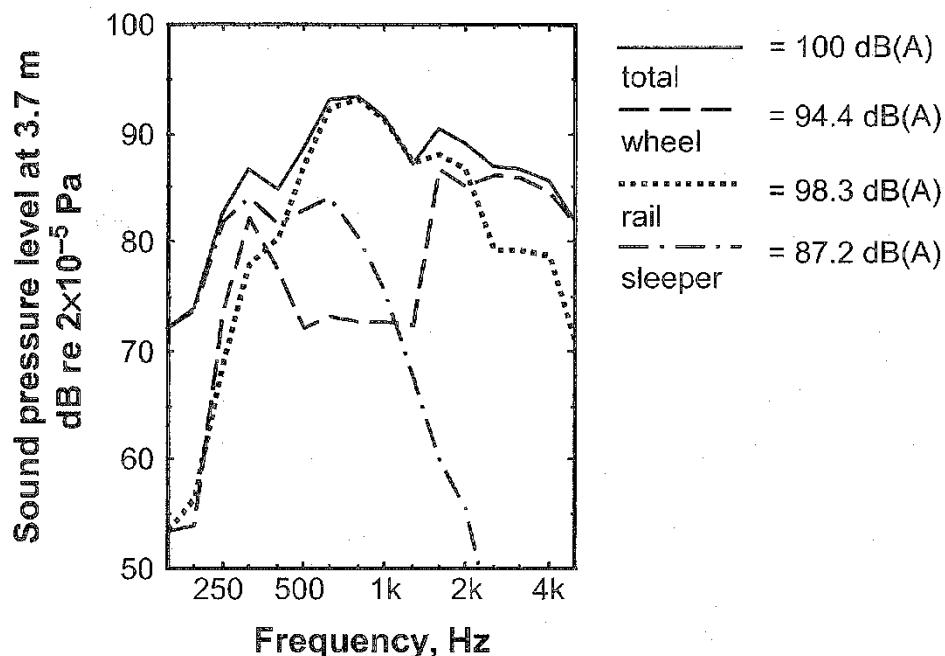


Abbildung 2-2: Lärmemissionen berechnet mit dem TWINS Modell zeigt die frequenzabhängigen Anteile von Rad, Schiene und Schwelle am Rollgeräusch (Quelle: D. Thompson, Railway Noise and Vibration)

Mit dem sonRAIL-Berechnungstool für Eisenbahnlärm kann unter anderem auch der Einfluss verschiedener Oberbautypen auf die Lärmemission berechnet werden. In der folgenden Abbildung ist der Einfluss des Schwellentyps auf das Rollgeräusch $L_{pAeq,T\ Roll}$ bei einem Güterwagen dargestellt. Zusätzlich ist vom Rollgeräusch auch der Anteil des Oberbaus $L_{pAeq,T\ 0m}$ dargestellt.

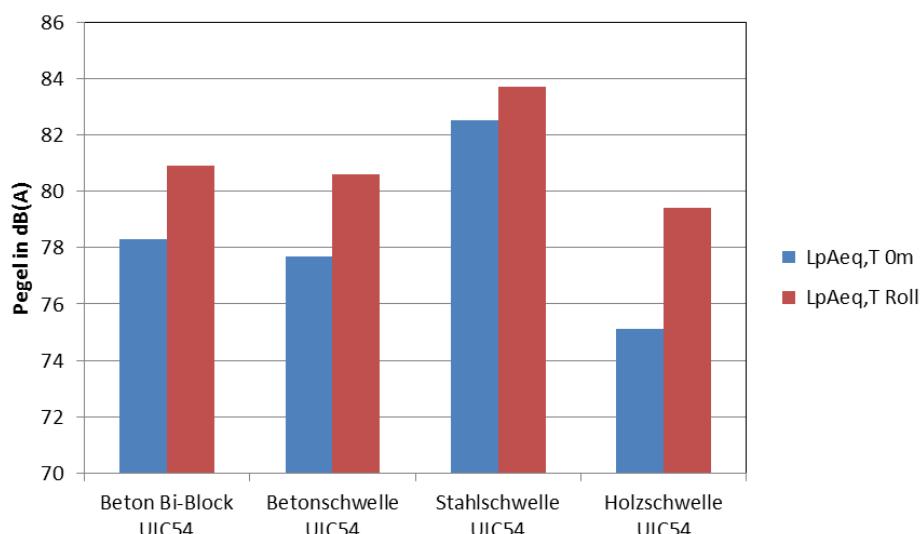


Abbildung 2-3: Berechnung Rollgeräusch Güterwagen bei verschiedenen Schwellentypen (Quelle: sonRAIL Webtool Version 2017)

Offensichtlich werden auf Oberbauten mit unterschiedlichen Schwellentypen bei gleichem Schienentyp auch unterschiedliche Rollgeräusche abgestrahlt. Der Oberbautyp mit Holzschwellen erweist sich hierbei als vorteilhaft durch geringste Schallabstrahlung. Oberbautypen mit Betonschwellen strahlen hingegen ca. 3 dB(A) mehr Schienenschall bzw. $L_{pAeq,T\ 0m}$ ab.

Die Meta-Analyse zur Auswirkung der Schwellenbesohlung auf die Lärmemission (durchgeführt von PROSE im Auftrag des BAFU), basierend auf mehreren Messkampagnen bei vier SBB-Teststrecken, zeigte für 97% der untersuchten Fälle eine Lärmzunahme durch Einfügen der Schwellenbesohlung gegenüber dem Standardoberbau SBB. Vermutet wurde, dass diese Lärmzunahme mit verstärkten Schwellenschwingungen zu tun hat. Diese Vermutung stützt sich einerseits auf die verschiedenen, ausgewerteten Lärmzunahmen, welche einen dominanten,

tieffrequenten Lärmanteil im Frequenzbereich 250-630 Hz zeigen, der auf den Einfluss der Schwelle hindeutet (dominant deshalb, weil Schiene und Rad in diesem Frequenzbereich nur wenig abstrahlen, siehe Abbildung 2) und andererseits auf Schwellenschwingungsmessungen in Lengnau – Pieterlen, Pratteln und Erstfeld, welche eine deutliche Zunahme der Schwellenschwingungen bei Schwellen mit Schwellenbesohlung zeigen. Zudem zeigen die kombinierten Messungen von Schall, Schienen- und Schwellenschwingungen im Fall Pratteln, dass die Lärmzunahme durch Schwellenbesohlung nur mit erhöhten Schwellenschwingungen erklärt werden kann. Die folgende Abbildung zeigt, dass die Zunahme der Schwellenschwingungen sehr gut mit der Lärmzunahme korreliert, hingegen die Schienenschwingungen kaum zunehmen.

**Pratteln , Differenzspektren USP-Referenz für Intercity-Züge
Schwingungen Schiene und Schwelle, Schall**

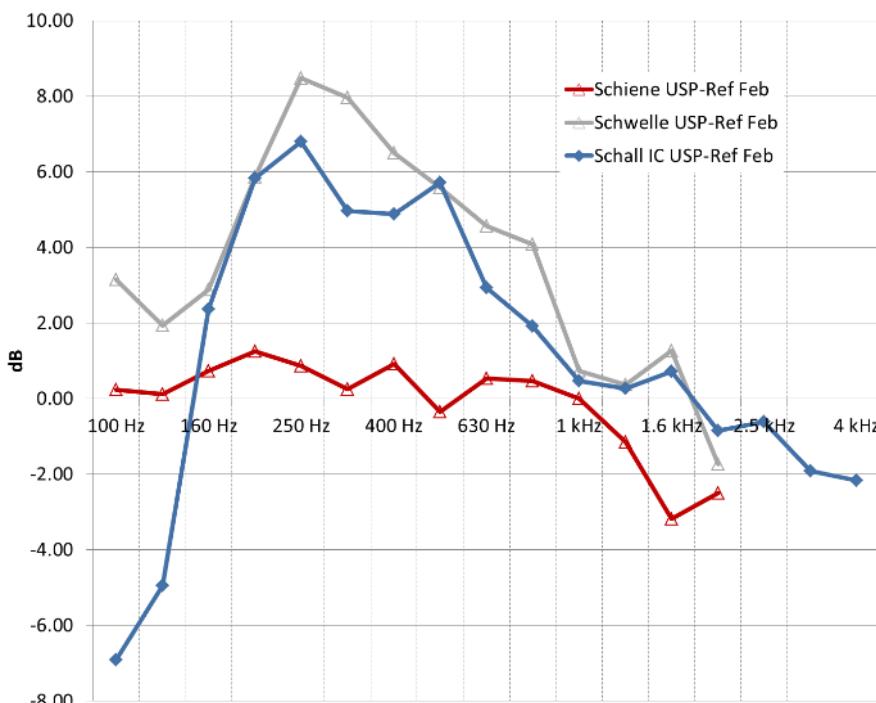


Abbildung 2-4: Gemessene Zunahme der Schallemission sowie der Schienen- und Schwellenschwingungen im Bereich Schwellenbesohlung in Pratteln gegenüber Referenz (PROSE 2015)

Nach Ende dieses Forschungsprojekts müssen die zuvor genannten Annahmen etwas relativiert werden. Zum einen ist die geringere Dämpfung der Schiene im Gleis durch die geringere Kopplung mit dem Unterbau mit besohlten Schwellen nach wie vor für die Lärmzunahme im Rollgeräusch verantwortlich, die Schwelle strahlt im tiefen Frequenzbereich bis etwa 630 Hz Schall ab, während die Schiene zwischen 500 und 2500 Hz Schienenschall abstrahlt. Wenn man diesen Frequenzbereich vom Schienenschall mit in die Betrachtung einbezieht, so ist die Pegeldifferenz zwischen 630 und 1600 Hz mit z.T. über 4 dB schon erheblich.

Da die Schwellenbesohlung eine wirtschaftlich sehr interessante Massnahme ist, um Erschütterungen zu mindern und Stopfintervalle zu verlängern, ist das Interesse der Infrastrukturbetreiber sehr gross, in bestimmten Fällen diese Massnahme einzubauen. Aus Gründen der Instandhaltung haben sich bereits Infrastrukturbetreiber wie die ÖBB und die SOB dazu entschlossen, bei Oberbauerneuerungen generell Betonschwellen mit harten Schwellenbesohlungen einzubauen. Dies führt bei diesen Betreibern, wie beschrieben, mit jeder Oberbauerneuerung zu einer Lärmzunahme im entsprechenden Abschnitt. Das Ziel wäre in solchen Fällen mit Schwellenbesohlung eine entsprechend akustisch optimierte Schwelle zu haben, die diese Lärmzunahme kompensiert.

2.1 Projektziel

Das Design der Betonschwelle B91, welche in der Schweiz auf praktisch allen Hauptstrecken eingesetzt wird, beruht auf rein statischen Überlegungen und Anforderungen, welche aus dem Jahr 1991 stammen. Eine akustische Optimierung dieser Schwelle gab es bisher nicht und wie die Ausführungen im vorhergehenden Abschnitt zeigen, besteht durchaus Potential, mit einer akustisch optimierten Schwelle den Schienenverkehrslärm zu reduzieren.

Das Ziel des Projekts ist die Betonschwelle B91 akustisch zu optimieren, um die Lärmemission vorbeifahrender Züge zu mindern. Gleichzeitig wird das Design entsprechend den Anforderungen zukünftiger Belastungen aktualisiert. Die Optimierung soll verschiedene Einsatzfälle abdecken:

1. Lärmarmer Oberbau ohne Optimierung hinsichtlich Instandhaltung und Erschütterungen d.h. keine Besohlung
2. Lärm- und instandhaltungssarmer Oberbau ohne Optimierung hinsichtlich Erschütterungen d.h. steife oder partielle Besohlung
3. Lärm-, instandhaltungs- und erschütterungssarmer Oberbau d.h. weiche Besohlung

Für die drei Fälle soll zudem geklärt werden, ob weiche oder harte Zwischenlagen optimal sind.

Aus den Untersuchungen soll sich neben einem Vorschlag für eine lärmoptimierte Schwelle auch ein Empfehlungskatalog ergeben, der zusammenfasst, in welchen Fällen welche Kombination von Zwischenlage und Besohlung optimal ist.

Phase 1: Grundlagen

- Anforderungskatalog Betonschwelle zusammenstellen
- Literaturrecherche Akustik / Dynamik Betonschwelle, Messberichte

Phase 2: Messkonzept Schwingungsmessungen Betonschwelle B91, B70, B06 FS

- Streckenabschnitte, Messpunkte definieren mit harter / weicher Zwischenlage, mit / ohne Schwellenbesohlung weich / steif
- Ergänzend wird auch in einem Streckenabschnitt mit eingebauter Flachschwelle B06 FS gemessen, um den Einfluss einer Geometrieveränderung auf die Akustik zu erfassen
- Schienen- und Schwellenschwingungen bei Zugvorbeifahrten
- Methoden: Pass-by (Zugvorbeifahrten), Forced Vibration Testing (Impulshammer)

Phase 3: Messung und Auswertung B91 als Referenz (B06 FS als Variante, B70 zum Vergleich)

- Gemäss Messkonzept aus Phase 2
- Auswertung Eigenfrequenzen, Eigenformen, Dämpfung
- Angeregte Schwingungsformen im Betrieb
- Labormessung frei schwingende Schwellen (Eigenfrequenzen, Dämpfung): Akustischer Vergleich B91 – B70 – B06 FS
- Messungen der Schallabstrahlung von B70 und B91 am Gleisprüfstand (Schrey&Veit, Vigier Rail, neues Konzept 2018)

Phase 4: FE-Modell Schwelle erstellen (B91 und B06 FS)

- Geometrie einlesen, vernetzen, Randbedingungen definieren
- Abgleich mit Messdaten (Eigenfrequenzen, Dämpfung etc.)
- Fluid-Struktur-Kopplung, um Schallabstrahlung berechnen zu können

Phase 5: FE-Berechnung Schwelle B91, Varianten entwickeln

- Festlegen der Varianten (Geometrie, Material, Lagerung)
- Harmonische Analyse im Frequenzbereich 100 – 1000 Hz
- Prognose der Lärminderung durch optimierte Schwelle gegenüber B91
- Selektion einer Variante
- Empfehlungskatalog Oberbau

Phase 6: Design, Rechnerischer Nachweis der Festigkeit

- Dimensionierung Schwelle gem. Lasten Anforderungskatalog
- Konstruktionszeichnungen
- Rechnerischer Nachweis

Phase 7: Versuche an Prototyp (bei geometrisch optimierter Schwelle)

- Herstellung einiger Prototypen
- Statische / dynamische Versuche an der Einzelschwelle
- Labormessung frei schwingende Schwelle (Eigenfrequenzen, Dämpfung): Akustischer Vergleich zu B91 – B70 – B06 FS

3 Anforderungskatalog Betonschwelle

3.1 Anforderungen an den Oberbau im Betrieb

Zu den Aufgaben der Schwellen in einem Gleisrost beim Schotterooberbau gehören:

- Herstellung und Beibehaltung der Spurweite
- Erhaltung der Gleislage (Längs- und Querverschiebewiderstand)
- Verteilung und Weiterleitung der Kräfte auf Bettung
 - Längskräfte beim Beschleunigen, Bremsen und Ausdehnung in x-Richtung
 - Quer- und Fliehkräfte in y-Richtung
 - Achslasten in z-Richtung
- Das Festhalten der Schienen (in der Höhe, nach der Seite, in Längsrichtung)
- Das Sichern des Fahrwegs (bei Bauzustand, bei Schienenbruch, nach Entgleisung)
- Beständigkeit gegen dynamische Krafteinwirkungen und Erschütterungen
 - Der Schwelle selbst
 - Des Schotters und Schotterbetts
- Beibehalt der bewährten Schottermenge bzw. Tiefe der Unterschotterung

3.2 Anforderungen aus dem Gleisbau

- Höhe der Schwelle 300mm bei B70 und B91 Betonschwellen:
 - Je höher die Schwelle, desto tiefer muss das Schotterbett ausfallen, da sich immer die gleiche Schottermenge unter dem Gleis befinden soll.
- Logistik, Transport:
 - Je Containertragwagen können etwa 69t transportiert werden, das sind 690 Holz- oder Stahlschwellen mit je 100 kg oder 230 Betonschwellen mit 300 kg
- Montage auf Gleisfelder:
 - Gleisfelder mit leichteren Schwellen können länger vormontiert werden und sind leichter zu transportieren.
- Austauschbarkeit bei Reparaturen
- Wartung bei Schotterreinigung und Stopfen. Hier ist der vorhandene Schwellenabstand von 60cm von grosser Bedeutung, da die meisten Maschinen darauf abgestimmt sind.

3.3 Anforderungen an die Fertigung

- Effiziente Fertigungsverfahren, z.B. Langbettverfahren bei Spannbetonelementen
- Durchsatz, Qualitätssicherung
- Prüfungen, statisch und dynamisch (siehe tech. Spez. Spannbetonschwellen SBB Teil A)

4 Literaturrecherche Akustik

Bezüglich Betonschwellen gab es in der Vergangenheit zunächst Erkenntnisse über deren Schallabstrahlung, welche sich vor allem in den Arbeiten zum Rollgeräuschsimulationstool TWINS von David Thompson wiederfinden. Auch in dem Forschungsprojekt METARAIL wurden zum SilentTrack Erkenntnisse über die Schallabstrahlung von Betonschwellen gewonnen. Zunächst hat man sich dann jedoch auf die Dämpfung der Schiene konzentriert und 1997 den ersten Schienenstegdämpfer von MBB (später Schrey & Veit) appliziert. Massnahmen an der Schwelle sind nicht bekannt.

In den folgenden Forschungsprojekten IMAGINE und HARMONOISE wurden die Grundlagen für die Eisenbahnlärmberechnung mittels Strecken- und Fahrzeugspezifischer Parameter gelegt. So gingen z.B. die Forderungen bezüglich Gleistransferfunktionen und Schienenrauheiten daraus hervor.

- TWINS Untersuchungen ISVR Mitte der 1980iger Jahre (siehe auch Thompson 2009)
- EU Projekte SilentTrack, METARAIL, 1990iger Jahre
- EU Projekte HARMONOISE, IMAGINE 2000er Jahre

In den sonRail-Untersuchungen wurden intensiv die Oberbautypen in der Schweiz untersucht und auf Basis von IMAGINE wurde ein neues Berechnungstool für den Schienenverkehrslärm entwickelt. Dabei wurden Unterschiede im Dämpfungsverhalten der Oberbautypen mit verschiedenen Schwellenarten festgestellt. Relevante Quellen sind:

- sonRAIL Messungen 2007-2010
Hier wurden die Kombinationen B91/UIC60 und B70/UIC54 gemessen, daher sind die Ergebnisse schwer vergleichbar. Messungen an verschiedenen Oberbautypen, TDR, Luftschall, Transferfunktionen, Emissionsmodell
- D. Thompson, Railway Noise and Vibration, Mechanisms, Modelling and Means of Control, 2009
- PROSE Messungen, Schienenstegdämpfer SSD 2010, Schienenrauheiten 2014, Schallabstrahlung besohlter Schwellen 2013-2014, Schienenstegabschirmung SSA 2015

Im EU-Projekt RIVAS ging es um die Ursache für Erschütterungen aus dem Schienenverkehr und Massnahmen zu deren Bekämpfung. Gleisseitig wurden Massnahmen hinsichtlich elastischer Lagerungen untersucht, wie z.B. Unterschottermatten UBP, Schwellenbesohlung USP und Zwischenlagen, die im wesentlich auf vorhandene Oberbaukomponenten ausgelegt sind. Relevante Quellen sind:

- EU-Projekt RIVAS Erschütterungen im Schienenverkehr DB, SBB, SNCF, PROSE u.a.

Im Forschungsprojekt Schienenstegdämpfer und Faktor X der SBB wurden zum einen die Funktion und Anwendung von Schienenstegdämpfern unter den vorhandenen Netzbedingungen untersucht und zum anderen dynamische Parameter bewertet, die mit dem Schienenschall in Zusammenhang stehen. Relevante Quellen sind:

- SBB Untersuchung Schienenstegdämpfer und Faktor X 2013 – 2016

Die Dissertation von Christoph Gramowski und das Forschungsprojekt OST mit EMPA, TU Berlin und TUMünchen haben sich noch einmal umfassend mit den theoretischen Schwingungseigenschaften und der Schallabstrahlung der Oberbaukomponenten beschäftigt. Die

Abbildung 5-5 bis Abbildung 5-9 verdeutlichen nochmals den Zusammenhang zwischen dem Schwingungsverhalten einer im Gleis eingespannten UIC60-Schiene mit der Track Decay Rate bei vertikaler und lateraler Anregung. Für den Schallanteil des Oberbaus am Rollgeräusch ist vor allem der Schienenschall im Frequenzbereich zwischen 400 bis 2500 Hz verantwortlich. Relevante Quellen sind:

- Dissertation Christoph Gramowski: Gleisseitige Schallemission 2013
- EMPA, TU Berlin, TU München, Oberbau-Simulations-Tool OST, Projekt 2016-2018

Jüngere Arbeiten von PROSE beschäftigen sich mit dem akustischen Unterschied von Betonschwellenoberbauten mit B70-Schwelle (alt) und B91-Schwelle (neu). Dabei ist die Erkenntnis gereift, dass aus mechanischer Hinsicht keine relevanten Unterschiede zwischen den beiden Betonschwellen existieren, welche die unterschiedliche Schallabstrahlung erklären würden. Dies bestätigen auch die Simulationsergebnisse mit B70-Schwellen (TU Berlin) und B91-Schwellen (PROSE). Vielmehr halten wir die Art und den Zustand der Schienenbefestigung und Zwischenlage für die Schallemissionsunterschiede verantwortlich, da diese ein breites Spektrum an mechanischer Ankopplung der Schiene mit der Schwelle zulassen. In den meisten Untersuchungen wurden diese Parameter jedoch nicht ausreichend dokumentiert. Relevante Quellen sind:

- PROSE Bericht Akustischer Unterschied von B91- und B70-Schwellen, 05-2018
- PROSE Bericht Messungen Zwischenlagentausch BLS Sommer 2018
- PROSE Messbericht Schallabstrahlung B70-Betonschwellen am Testgleis 12-2018
- PROSE Ermittlung von Abklingrate und Einfügedämmmass von SSA an einer 6m frei gelagerten Schiene, Messbericht SEKISUI 2018
- TNO Messung vom Einfügedämmmass von SSA mittels Impulshammer- und reziproker Messmethode, Oktober 2017.

Eine gute Zusammenfassung über Schwellendesigns von 1900 bis heute gibt die Dissertation von Florian Auer 2010. Hier wurden auch solche Schwellenformen mit breiterem Kopf oder doppelter Befestigung erwähnt.

In Österreich wurden die HDS Heavy-Duty Sleeper und H Schwellen (zwei B91-Schwellen mit Querverbindung) auf Strecken mit hohem Güterverkehrsanteil eingebaut, um die Gleisroststeifigkeit und den Querverschiebewiderstand zu erhöhen. Als Nebeneffekte bei den HDS-Schwellen konnten eine höhere Schienendämpfung und geringere Lärmabstrahlung beobachtet werden. Dies ist plausibel, da die HDS-Schwellen zusammen mit der Befestigung ca. 500 kg wiegen und ebenfalls zwei Befestigungspunkte pro Schienenauflage bieten. Zwei Testabschnitte mit HDS werden zurzeit auch in der Schweiz bei der SOB und SBB getestet.

Tabelle 4-1: Eigenschaften der HDS-Schwelle

Parameter	Technische Daten
Länge x Breite x Höhe	2.60m x 0.55m x 0.23m
Gewicht	450 kg
Beton	C50/60
Vorspannkraft / Bewehrung	480 kN / 6 profilierte Drähte mit 9.5mm St 1375/1570
Spurweite / Schienen	1.437m / 60E1, 54E2, 49E1
Achslast / Geschwindigkeit	25 t / 250 km/h

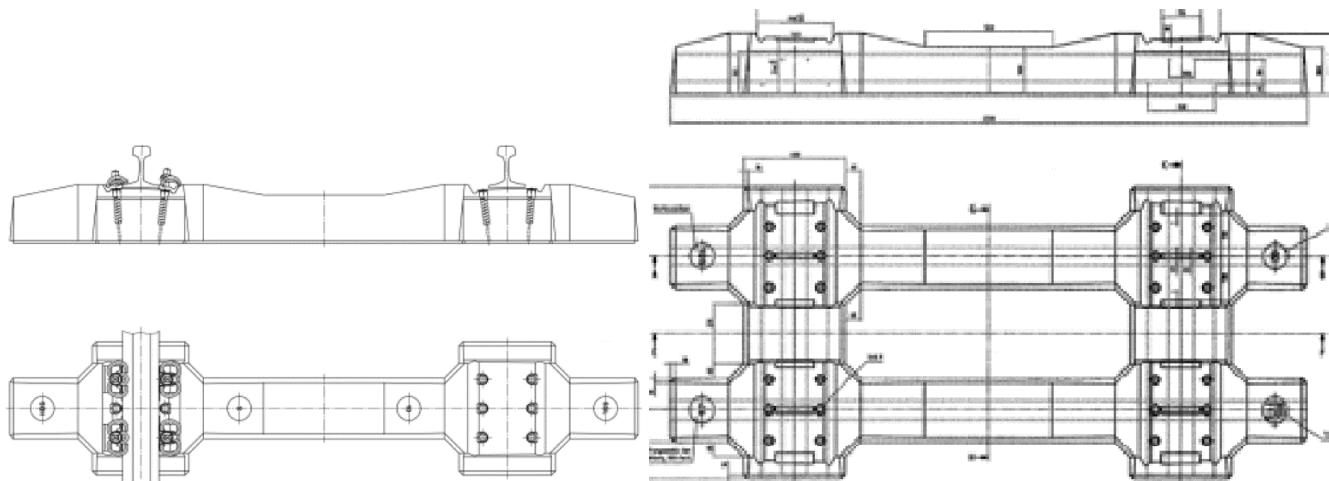


Abbildung 4-1; links HDS Schwelle einfach, rechts RS115 Rahmenschwelle mit HDS, Firma SSL AT

Darüber hinaus gibt es auch Rahmenschwellen, bei der zwei konventionelle Balkenschwellen über zwei Querbalken miteinander verbunden sind. Diese Schwellenarten sind allerdings im Gleisbau eher selten anzutreffen und bedürfen spezieller Stopf- und Wartungsmaschinen.



Abbildung 4-2: Rahmenschwelle in Österreich Quelle: Florian Auer 2010

5 Gleisdynamik

Untersuchungen zur Schallabstrahlung der Oberbaukomponenten sowie des Rollmaterials wurden seit Mitte der 1980iger Jahre von David Thompson am ISVR in Southampton durchgeführt. Das Rollgeräusch dominiert den Schienenverkehrslärm im Geschwindigkeitsbereich zwischen 60 und 200 km/h, also den üblichen Betriebsgeschwindigkeiten in der Schweiz und Europa. Die Schallanteile im Frequenzbereich sind unterschiedlich, so strahlt die Schwelle im mittleren Frequenzbereich zwischen 250 und 1000 Hz ab, während Schiene und Rad darüber abstrahlen (siehe auch Abbildung 2-1).

Grundsätzlich strahlt ein Körper Schall ab, wenn er mechanisch angeregt wird und bestimmte Schwingungsformen annimmt. Die Betonschwellen mit einem Masse von ca. 300 kg und einer Länge von 2.5m werden durch den Rollvorgang über die Schiene, Zwischenlage und Befestigung in Schwingungen gesetzt, dabei führt gerade die Biegeschwingung zu einer Luftschallabstrahlung. Der Schotter ist dabei das Dämpfungsglied, hier werden sowohl mechanische Schwingungen gedämpft als auch Schall absorbiert.

Die mechanische Anregung setzt sich aus der statischen Achslast und dynamischen Schwingungen zusammen. Die Achslast eines überfahrenden Zuges wird über die Schiene auf mehrere Schwellen verteilt. Man geht in der Berechnung von einer folgenden Achslastaufteilung aus:

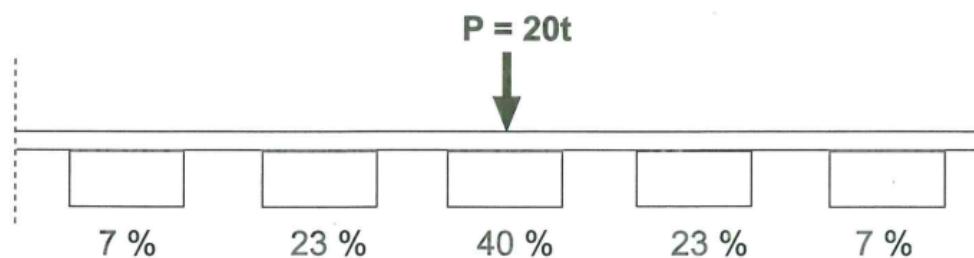


Abbildung 5-1: Achslastaufteilung aus Handbuch Gleis

Die dynamischen Schwingungen sind weitaus kleiner in der Amplitude, sind aber massgeblich verantwortlich für den Luftschall. Die folgende Abbildung zeigt das Schwingungsverhalten benachbarter Schwellen zur Achslage (0m).

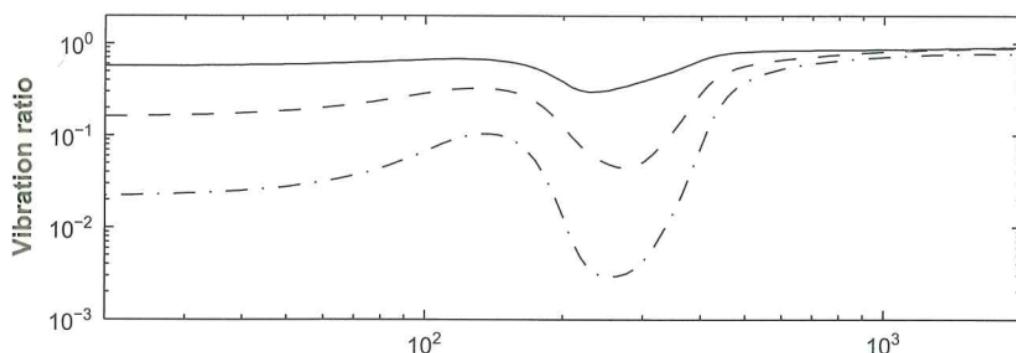


Abbildung 5-2: Verhältnis der Vibrationsan Betonschwellen: ____0m (unter der Achse), ____0.6m (neben der Achse) und ____1.2m (neben der Achse) Quelle: Thompson 2009[5]

Die vertikalen Rezeptanzen von Schienen und Schwellen (Nachgiebigkeit) zeigen bei der Schwelle eine Resonanz bei 160 Hz, danach fällt diese ab bis eine weitere Resonanz bei etwa 500 Hz zu erkennen ist.

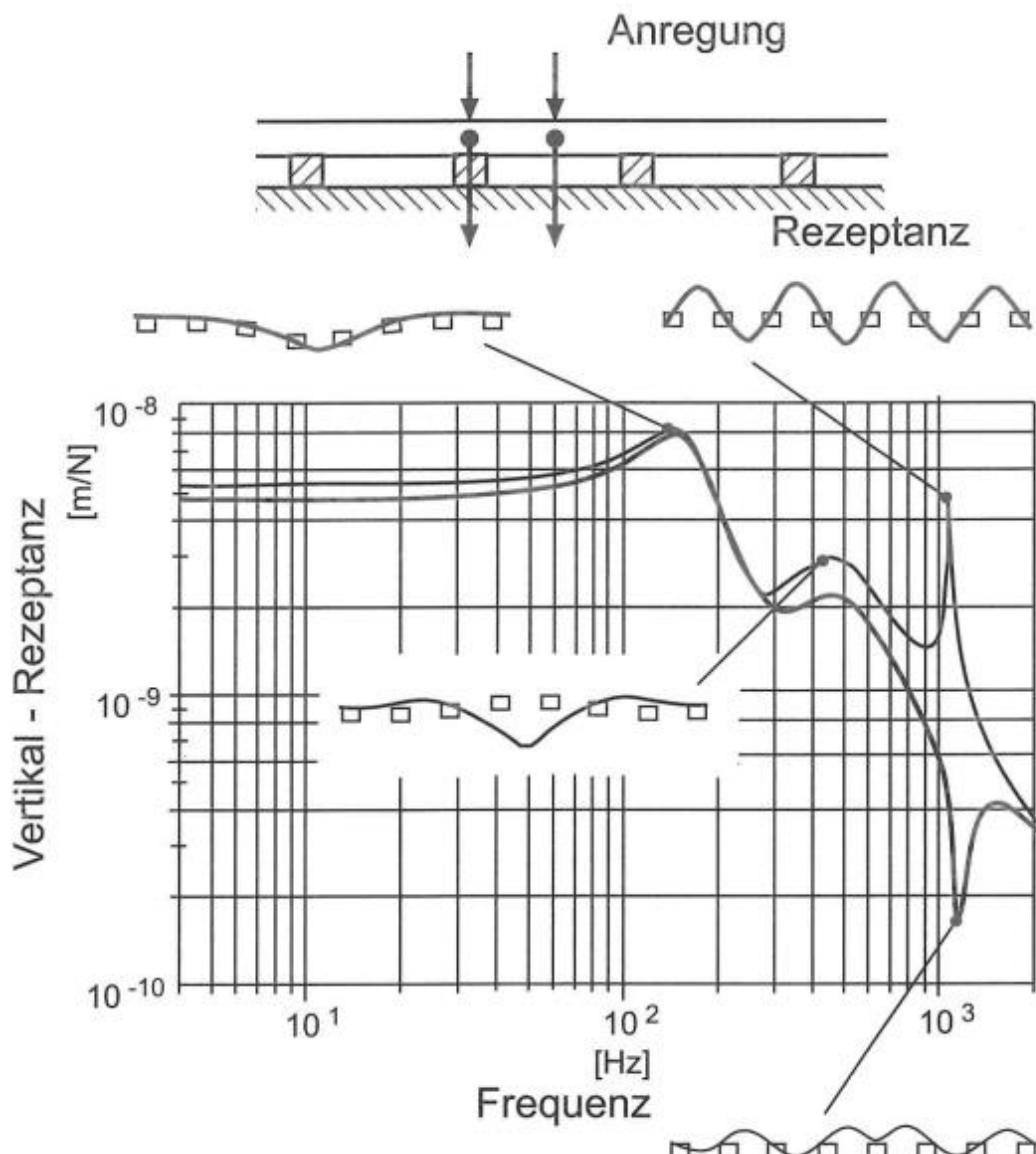


Abbildung 5-3: Vertikale Rezeptanzen von Schiene und Schwelle, Quelle Thompson 2009[5]

Betonschwellen vom Typ B70 und B91 sind sich von Ihrer Geometrie recht ähnlich. So kann dies auch im ersten Ansatz gleichermaßen im Modell beschrieben werden:

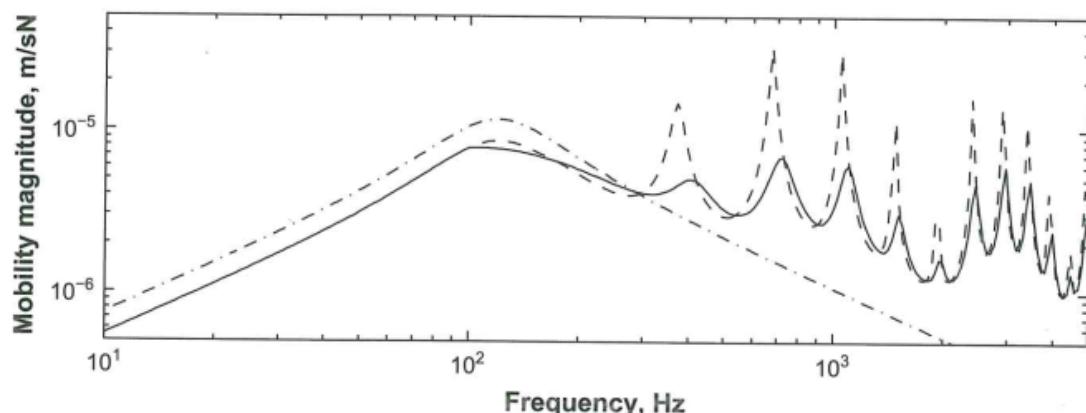
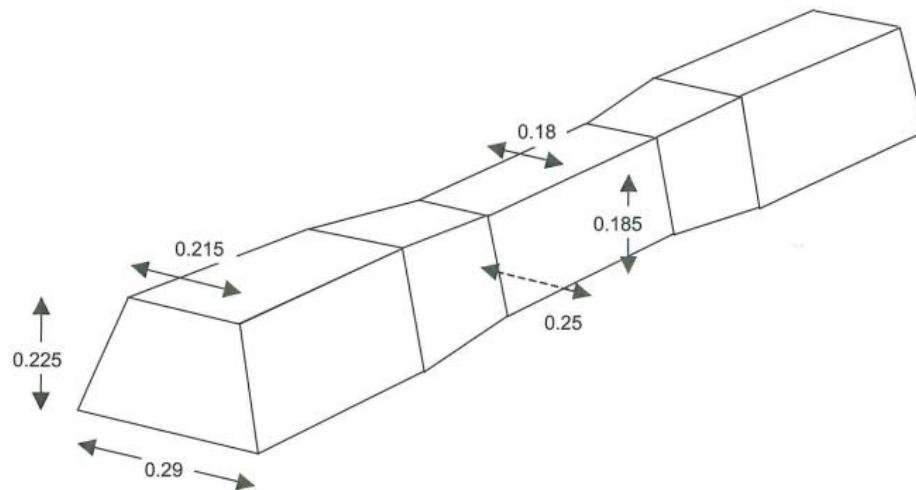


Abbildung 5-4: Berechnete Punkt-Mobilitäten einer Betonschwelle (Timoshenko-Beam-Ansatz) — frequenzabhängige Schottersteifigkeit, - - - gleichwertiges Masse-Feder-System, Quelle Thompson 2009[5]

Hohe Mobilitäten zeigen eine leichte Erregbarkeit der Struktur in diesem Frequenzbereich. Bei tiefen Frequenzen führen hohe Schwingungsamplituden nicht automatisch zur Luftschallabstrahlung, erst bei der sogenannten Koinzidenzfrequenz von Biegewellen in der Schwelle und Luftschallwellen wird Schall abgestrahlt. Dies ist wie eingangs erwähnt ab etwa 200 Hz der Fall und setzt sich bis ca. 1000 Hz fort.

Im Projekt OST wurden 2017 Gleisoberbauten mit allen Komponenten mittels Mehrkörpersimulation und Finite-Elemente-Methoden simuliert. Die ersten Schwingungsmoden konnten berechnet und dargestellt werden.

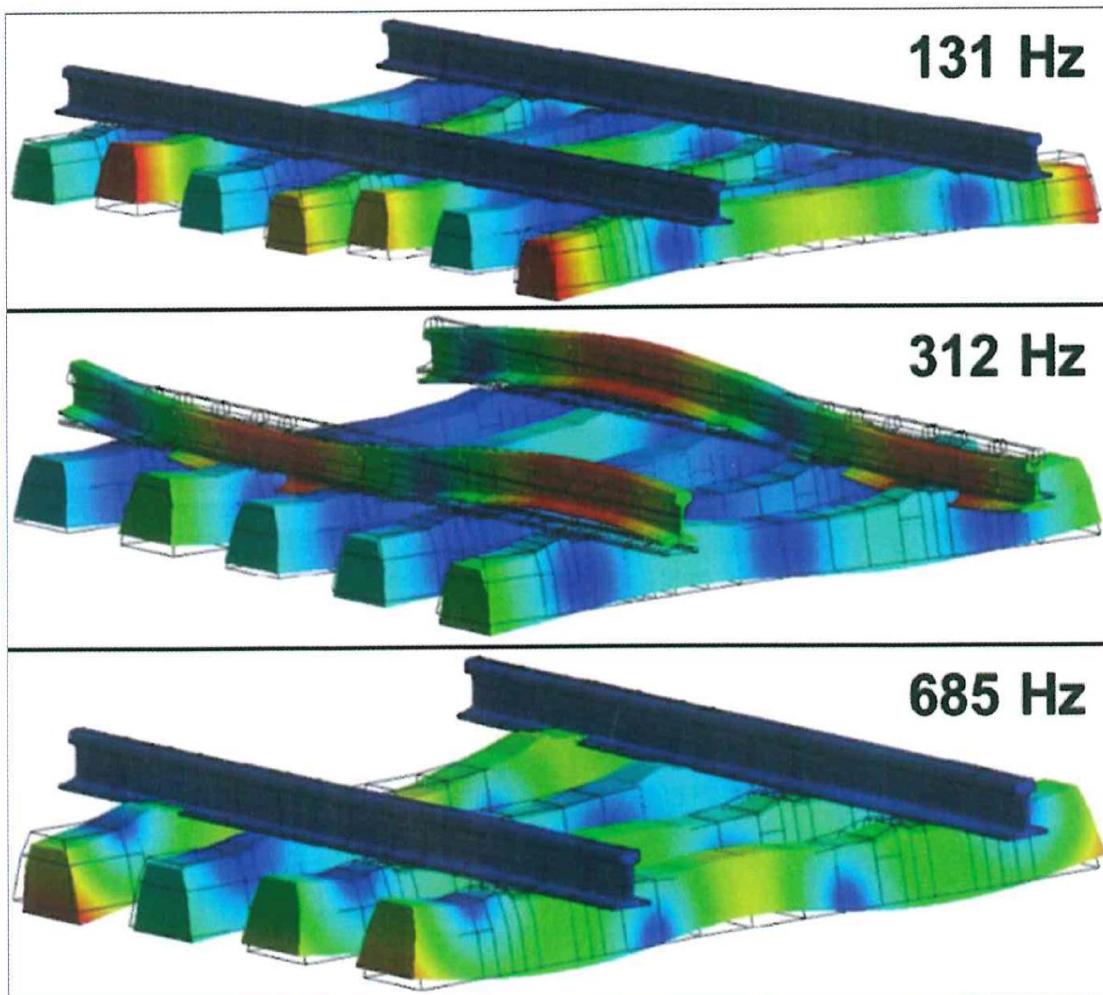


Abbildung 5-5: Die ersten drei Biegeschwingungsformen der Schwelle im Gleis, ZEV Rail 10-2018 OST[20]

Die Schiene verhält sich bei den ersten drei Eigenmoden der Schwelle meist noch starr, bis auf die Biegung bei 312 Hz. Schall kann von Biegewellen nur dann abgestrahlt werden, wenn die Dimensionen des Körpers gross gegenüber der akustischen Wellenlänge sind und wenn die Biegewellenlänge zur Luftschallwellenlänge passt. Das bedeutet für das Gleis, dass die Schwellen im Frequenzbereich 100 bis etwa 800 Hz Schall abstrahlen, die Schiene aufgrund der kleineren Dimensionen (Höhe und Schienenaufstandsbreite) erst ab 400 Hz. Somit ist die Bewegung der Schiene bei 312 Hz für den Luftschall vernachlässigbar. Im Rollgeräusch ist aber gerade der Frequenzbereich des Schienenschalls von 500 Hz bis 2500 Hz dominant, daher muss an einer neuartigen Betonschwelle weniger die Schallabstrahlung optimiert werden als vielmehr die Schienendämpfung erhöht werden.

Folgende Abbildungen verdeutlichen nochmals den Zusammenhang zwischen dem Schwingungsverhalten einer im Gleis eingespannten UIC60-Schiene mit der Track Decay Rate bei vertikaler und lateraler Anregung (Eingangsrezeptanzen bei punktförmiger Kraftanregung). Wesentlich für die akustische Optimierung ist die Vermeidung von Resonanzen, da im Frequenzbereich einer Resonanz hohe Schwingungsamplituden und niedrige Dämpfungen auftreten, z.B. pin-pin Mode bei 1070 Hz.

Die Pin-Pin-Mode kann über den E-Modul der Schiene, deren Masse und dem Abstand der Lagerpunkte berechnet werden. Bleiben Schienentyp und Abstand der Schwellen gleich, so bleibt auch die pin-pin-Frequenz unverändert. Sie lässt sich an den hier betrachteten Standardgleisen nur noch in der Amplitude durch Dämpfung reduzieren, was zum einen über die Kopplung mit der Betonschwelle z.B. durch harte Zwischenlagen, oder zum anderen durch eine Veränderung der Biegemoden im Bereich der pin-pin-Mode geschehen kann.

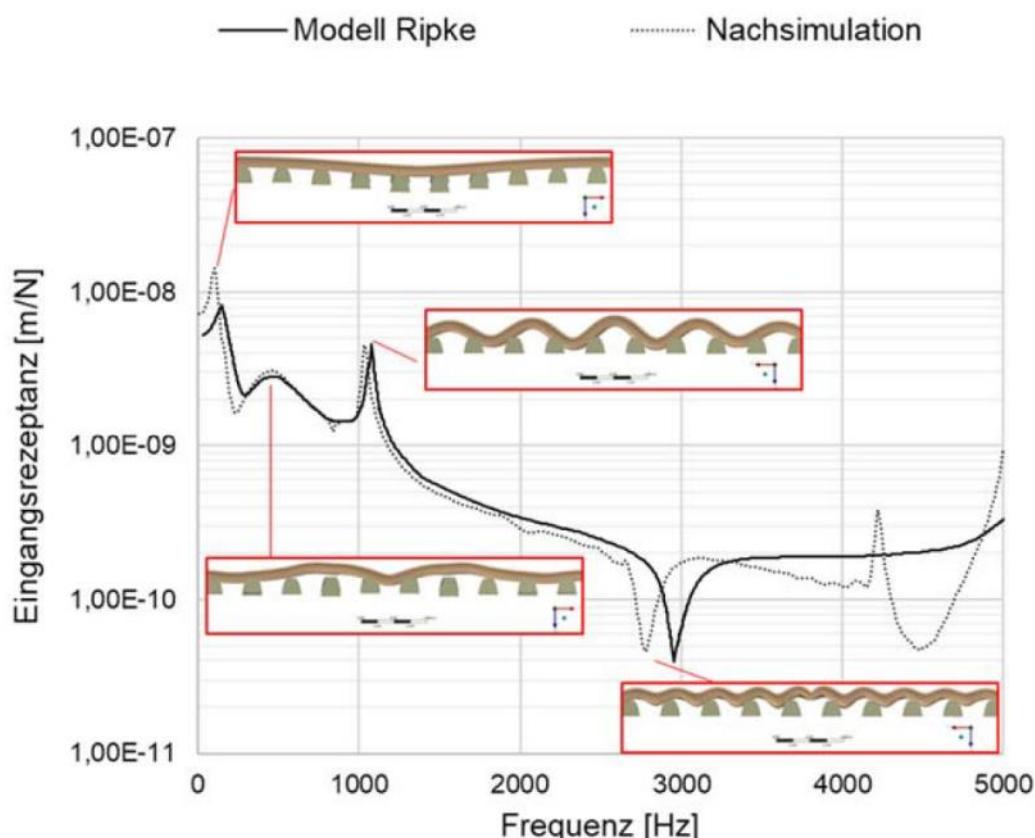


Abbildung 5-6: Vertikale Eingangsnachgiebigkeit über Modellsimulation (OST / TU Berlin, 2017 [19])

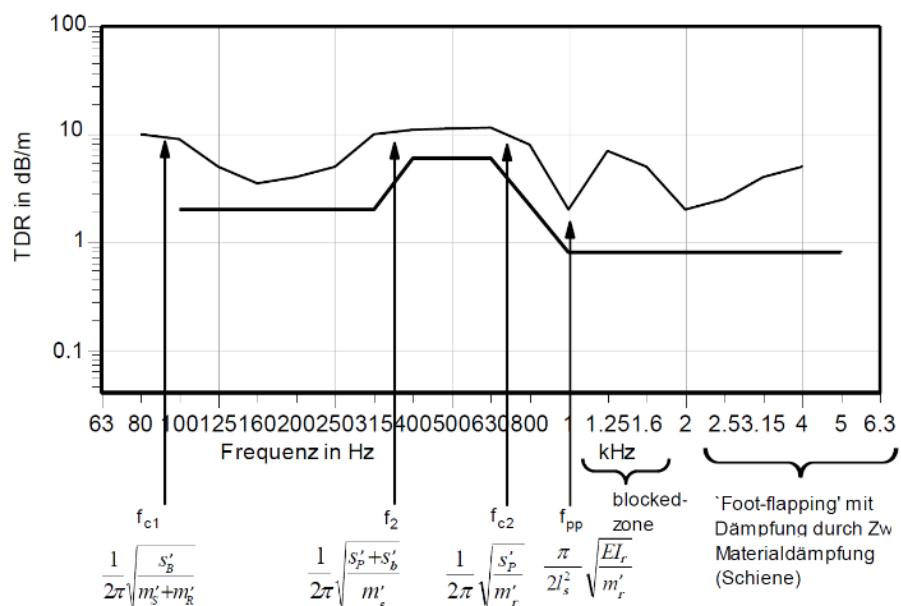


Abbildung 5-7: Abklingverhalten bei vertikaler Anregung, B70-Gleis im Schotterbett (Diss. Gramowski [7])

Wie in Abbildung 5-6 an der Darstellung der pin-pin-Mode erkennbar ist, würde eine Torsionsbiegeschwingung der Schwelle diesen Effekt verstärken, d.h. eine Verlagerung dieser Torsionsschwingung der Schwelle ist sinnvoll und würde die Dämpfung erhöhen.

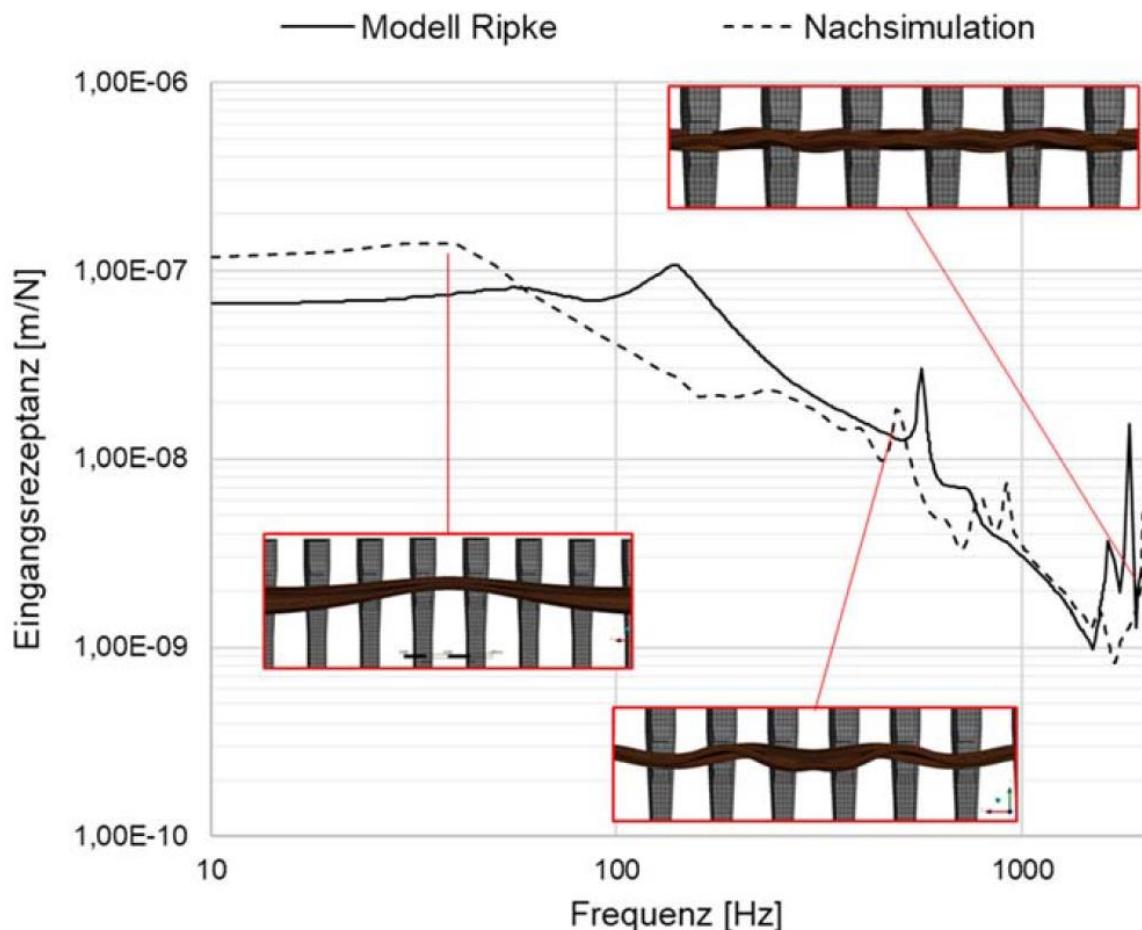


Abbildung 5-8: Laterale Eingangsnachgiebigkeit (OST / TU Berlin, 2017[20])

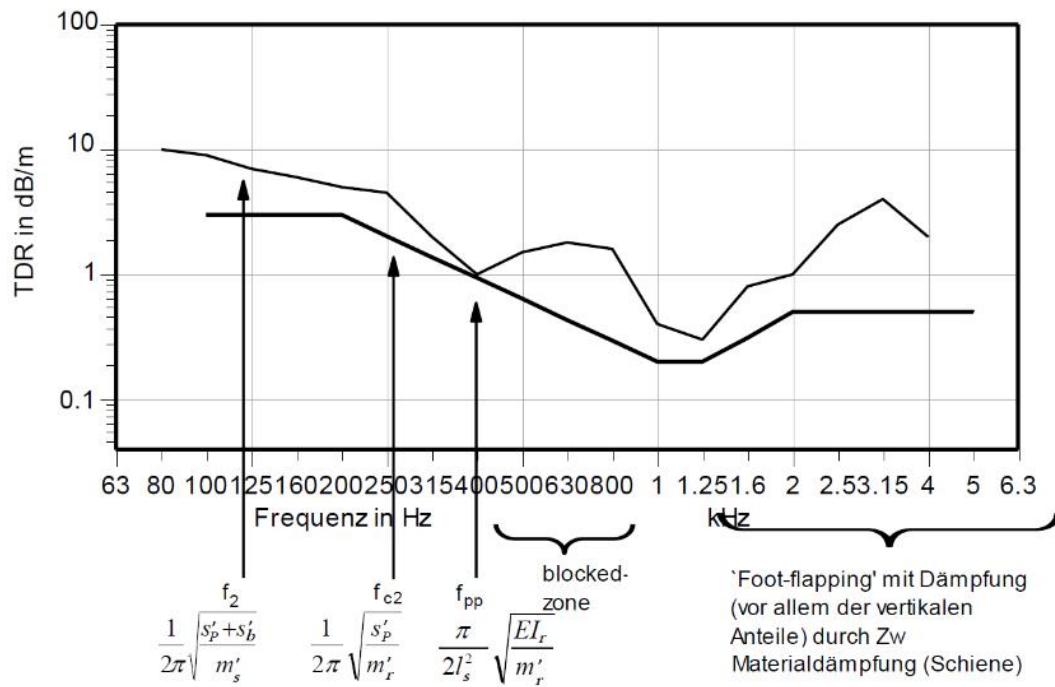


Abbildung 5-9: Abklingverhalten bei lateraler Anregung, B70-Schwelle und UIC60-Schiene (Diss. Gramowski[7])

In der lateralen Schwingungsrichtung ist die Schiene deutlich biegeweicher und hat geringere Dämpfung verglichen mit der vertikalen Schwingungsrichtung. Die laterale pin-pin-Mode liegt demzufolge auch tiefer im Bereich von 400 Hz. Hier ist das Schwingungsverhalten der Betonschwellen im Gleis weniger kritisch.

6 Fertigungsunterschiede Betonschwellen

6.1 Betonschwellen B91/B06 FS

Betonsorte:	Vibrier Beton, C 60/75
Herstellverfahren	Abetong Langbett, Spätentschalung nach ca. 15 – 18h
Vorspannung B91:	14 Spanndrähte d 5mm mit Direktverbund Vorspannung nach ca. 15 h eingeleitet Vorspannkraft: 340kN
Vorspannung B06 FS:	16 Spanndrähte d 5mm mit Direktverbund Vorspannung nach ca. 15 h eingeleitet Vorspannkraft: 425kN
Anforderungen:	225 kN Achslasten 200 km/h Geschwindigkeit Bemessungsmomente: +20 kNm (Schienenauflager) -14 kNm und +11 kNm (Schwellenmitte)

Zulassungsprüfungen (Ausschnitt aus Tech. Spez. SBB):

Obwohl in der EN-Normenreihe 13230 als obligatorisch bezeichnet, verzichten die SBB ausdrücklich auf die Durchführung der dynamischen Prüfung des positiven Biegemomentes im Querschnitt unter der Schiene. Im Gegenzug wird dafür die Anzahl der zu prüfenden Schwellen für das positive und das negative Biegemoment in Schwellenmitte zur Verbesserung der statischen Aussagekraft angemessen erhöht.

Somit sind im Zulassungsverfahren nachfolgende Produktprüfungen durchzuführen:

- Statischer Versuch / Querschnitt unter der Schiene / Prüfung des positiven Bemessungsbiegemomentes an 6 Schwellen
- Statischer Versuch / Querschnitt in Schwellenmitte / Prüfung des negativen Bemessungsbiegemomentes an 6 Schwellen
- Statischer Versuch / Querschnitt in Schwellenmitte / Prüfung des positiven Bemessungsbiegemomentes an 6 Schwellen
- Statischer Versuch / Querschnitt unter der Schiene / Positives Bemessungsbiegemoment / Prüfung des Haftverbundes bei Laststufe "Fr_r" an 6 Schwellen (gleiche Schwellen wie bei Prüfung Bemessungsbiegemoment)

Prüflasten für Zulassungsprüfungen (Ausschnitt aus Tech. Spez. SBB):

	Querschnitt	M	Prüfkraft	Kriterien	n
Statische Prüfung	unter Schiene	M _{dr+}	$F_{r0} = 8 \times M_{dr+}$ $= 160 \text{ kN}$	$F_{r,r} > F_{r0} > 160 \text{ kN}$ Prüfung des Haftverbundes bei Fr _r	6
				$F_{r,0,05} > k_{1s} \times F_{r0} > 288 \text{ kN}$	
	Schwellen- mitte	M _{dc-}		$F_{rB} > k_{2s} \times F_{r0} > 400 \text{ kN}$	
	Schwellen- mitte	M _{dc-}	$F_{c0n} = 4 \times M_{dc-} / 1,4$ $= 40 \text{ kN}$	$F_{crn} > F_{c0n} > 40 \text{ kN}$	3
				$F_{cBn} > k_{2s} \times F_{c0n} > 100 \text{ kN}$	
	M _{dc+}		$F_{c0} = 4 \times M_{dc+} / 1,4$ $= 31 \text{ kN}$	$F_{cr} > F_{c0} > 31 \text{ kN}$ $F_{cB} > k_{2s} \times F_{c0} > 78 \text{ kN}$	3

Rissprüfungen bei Produktionskontrolle:

- Riss nach 1 Tag Fr0 > 135 kN (Schienenauflager)
- Riss nach 2 Tage Fr0 > 145 kN (Schienenauflager)
- Riss nach 7 Tage Fr0 > 160 kN (Schienenauflager)
- Riss nach 7 Tage Fcrn > 48 kN (Schwellenmitte)

Technische Spezifikationen SBB vom 23.02.2017 beiliegend.

6.2 Betonschwelle B70

Betonsorte:	Erdfeuchter Beton, C 60/75
Herstellverfahren	Kippformfertiger, Sofortentschalung auf Brett
Vorspannung:	4 x Spannstab d 9.4mm Vorspannung nach ca. 2 bis 7 Tagen Vorspannung mit Endverankerung (Haarnadel und Mutter/Glocke) Vorspannkraft: 320kN nachträgliche Initiierung von Mörtel um die Spannstäbe und stirnseitige Versiegelung mit Bitumen
Anforderungen:	225 kN Achslasten Geschwindigkeit, Achsüberfahrten, Personenverkehr / Güterverkehr Zulassungsbedingungen aus Tech. Lieferbedingungen SBB von 1986: Schienenauflager: Anrißmoment +21 kNm Moment bei Rissbreite 0.05mm +34 kNm Bruchmoment +48 kNm Schwellenmitte: Anrißmoment -13 kNm Moment bei Rissbreite 0.05mm -17 kNm Bruchmoment -26 kNm

7 Messungen

Zur Schallabstrahlung von Betonschwellen gibt es bisher einige theoretische Untersuchungen, mit denen sich Aussagen über deren mögliche Art der Schallquelle und über den Frequenzbereich des abgestrahlten Schalls treffen lassen. Dies ergibt generell einen Eindruck von den einzelnen Komponenten des Rollgeräusches: Rad-, Schienen- und Schwellenschall.

Über die Messung der Schienenabklingrate (Track Decay Rate) nach EN 15610 lässt sich zudem die Dämpfung eines Gleises im Frequenzbereich zwischen 50 und 5000 Hz bestimmen. Der Einfluss unterschiedlicher Schwellen liegt vor allem im unteren Frequenzbereich zwischen 100 und 800 Hz.

Die Schallmessungen am realen Gleis fanden in den letzten 20 Jahren i.d.R. mit Fokus auf die Fahrzeuge und in einer Entfernung von 7.5 bis 25m zur Gleismitte statt. Diese Entfernung lässt keine Trennung zwischen den Schallanteilen am Rollgeräusch zu. Sollen nun Komponenten am Gleis bewertet werden, so müssen die Sensoren sehr nah an den Komponenten platziert werden. PROSE hat ein neues Messverfahren zur Messung der Schienenschall-Intensität entwickelt, mit deren Hilfe man den Anteil der Schiene vom Rollgeräusch isolieren kann. Siehe DAGA 2018 [13].

Zusätzliche Untersuchungen an 6m langen Testgleisen sollen zudem Aufschluss über die Schwingungsübertragung von Schiene zur Schwelle und der Schallabstrahlung der Schwelle liefern. Hierzu finden Messungen an einem Testgleis von Schrey&Veit (B70 mit UIC60) und Vigier Rail (B91 mit UIC60) statt.

Das Messkonzept geht einher mit dem Aufbau eines Simulationsmodells, was über Modalanalyse, Transferfunktionen und Schallabstrahlungsberechnung eines Gleises in Abhängigkeit der verwendeten Komponenten eine rechnerische Bewertung des Oberbaus zulässt.

Eine Modalanalyse ergibt das Schwingungsbild eines Festkörpers bzw. einer Struktur, in dem die sogenannten Eigenfrequenzen mit ihren unterschiedlichen Schwingungsformen ermittelt werden. In einer Eigenfrequenz schwingt ein Körper quasi von selbst und ohne grosse Anregung von aussen.

Transferfunktionen beschreiben die Übertragungseigenschaften z.B. von mechanischer Anregung auf der Schiene zur mechanischen Schwingungsantwort der Schwelle oder auch zur Luftschaallabstrahlung der Schwelle.

Die Schallabstrahlung der beteiligten Komponenten am Oberbau kann man mittels TWINS Rollgeräuscberechnung abhängig der gewählten Eingangsparameter für Rad- und Schienentypen berechnen. Wir wollen aus den vorangehenden Untersuchungen diese Parameter ermitteln und in ein Gleismodell einbringen, an denen dann neuartige Betonschwellen untersucht werden können.

Als erstes werden die Komponenten einzeln analysiert und später im Gleisaufbau mit realistischen Randbedingungen wie Massen, Vorspannung und Dämpfungen charakterisiert.

- Experimentelle Modalanalyse der Betonschwellen (frei gelagert) – 03/18
- Rechnerische Modalanalyse FEM der Betonschwelle (frei gelagert) – 04/18
- Messung der Schallabstrahlung und Transferfunktion im Testgleis – 06/18
- Messungen am realen Gleis – ist erfolgt 11/17 CH, 01/18 DE, 04/18 DE, 05/18 CH
- Aufbau eines FE Modells für das Testgleis – 12/2018

7.1 Experimentelle Modalanalysen

Im Februar 2018 fanden experimentelle Modalanalysen an sechs Betonschwellen in Winterthur statt. Sie wurden hinsichtlich ihrer modalen Schwingungsformen und Dämpfungseigenschaften bei freier Lagerung untersucht. Parallel wurde für den Typ B91, B70 und S06 je ein einfaches FEM Modell aufgebaut. Deren Ergebnisse decken sich mit denen der experimentellen Modalanalyse. Der nächste Schritt ist die Ermittlung der Dämpfung durch den Schotter und die Randbedingungen bei montierten Schienen. Diese Parameter sollen z.T. aus realen Situationen im Netz und aus einem Testgleis gewonnen werden.

Vigier Rail hat uns 6 Schwellen unterschiedlichen Typs geschickt. Diese Schwellen werden einzeln (Randbedingungen: frei – frei) mittels experimenteller Modalanalyse untersucht.

- B91 Schwelle ohne/mit Besohlung von Getzner
- B70 Schwelle zwei Stück (ca. 30 Jahre alt)
- B70 MN BLS für Meterspur und Normalspur
- B06 FS Flachschwelle

Für die Messung wurden die Betonschwellen auf Gummireifen gelagert, so dass die Eigenfrequenz der Aufstellung deutlich tiefer als die ersten Eigenfrequenzen der Betonschwelle liegt. Dann kann die Bedingung frei-frei als erfüllt angesehen werden.



Abbildung 7-1: Betonschwellen für die Modalanalyse auf Gummireifen gelagert, B70 oben und B91 unten

Bei der Modalanalyse werden Übertragungsfunktionen (Beschleunigung / Anregungskraft) für verschiedene Messpunkte auf der Betonschwelle gebildet. Die Anregung mit dem Impulshammer erfolgt immer an der gleichen Ecke (Markierung F auf der Schwelle unteres Bild) und der triaxiale Beschleunigungssensor wurde an die Messpunkte versetzt. Es wurden 11 Messpunkte je Längsseite an jeder Schwelle gemessen. Wird die Betonschwelle als Balken betrachtet, so genügen für den hier interessierenden Frequenzbereich bis 1500 Hz die Messungen an der unteren Schwellenkante, woraus ein zweidimensionales Schwingungsbild erzeugt werden kann. In einem Fall wurde allerdings zusätzlich auch die obere Kante gemessen, was ein dreidimensionales Schwingungsmodell erzeugt.



Abbildung 7-2: Eigenform B70-Mode 3 an der Schwellenunterseite gemessen

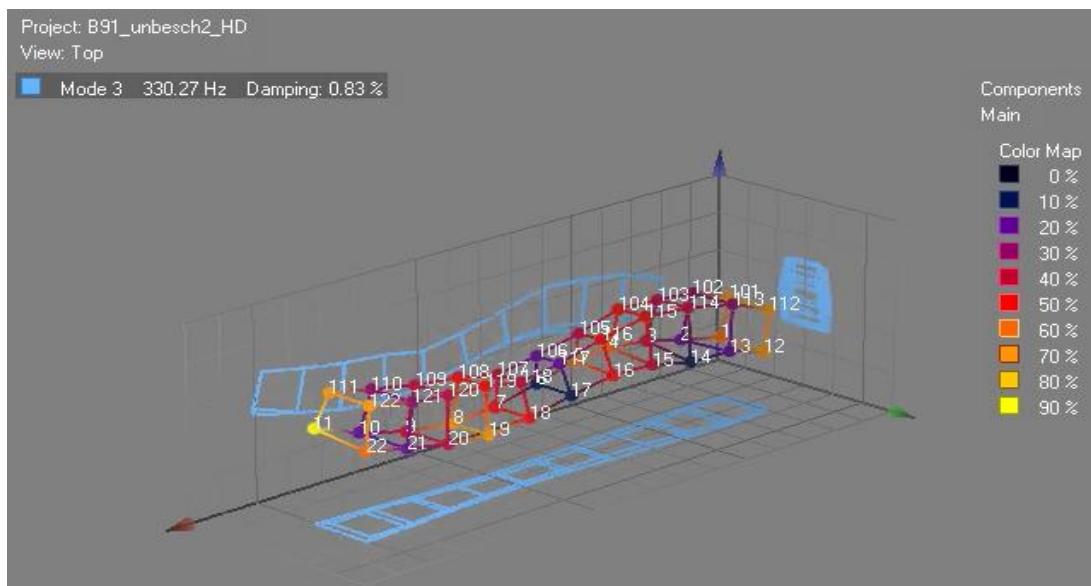


Abbildung 7-3: Eigenform B91-Mode an der Schwellenunterseite und -oberseite gemessen

Die Ergebnisse der Modalanalysen sind in Anhang B enthalten.

Für einen Vergleich wurden hier nun die Parameter der Übertragungsfunktionen dargestellt:

Tabelle 7-1: Eigenfrequenzen und Dämpfungen B91 ohne/mit Besohlung

Mode Nr	B91			B91 mit Besohlung		
	f [Hz]	D [%]	Eigenform	f [Hz]	D [%]	Eigenform
1	111.88	2.1	1. Biegung, vertikal	112.97	2.46	1. Biegung, vertikal
2	118.42	1.6	1. Biegung, horizontal	122.48	2.09	1. Biegung, horizontal
3	330.27	0.83	2. Biegung, vertikal	338.66	2.97	2. Biegung, vertikal
4	339.65	0.68	1. Torsion	349.77	1.24	1. Torsion
5	369.92	0.61	1. Torsion + 2. Biegung, horizontal	378.21	1.02	1. Torsion + 2. Biegung, horizontal
6	720.07	1.33	3. Biegung, horizontal	741.82	0.96	3. Biegung, horizontal
7	734.45	1.38	1. Längs	798.81	1.53	1. Längs
8	1010.67	0.84	4. Biegung, vertikal *	1030.65	0.76	4. Biegung, vertikal
9	1100.92	0.55	2. Torsion + 1. Biegung, horizontal *	1085.93	0.97	2. Torsion + 1. Biegung, horizontal
10	1141.37	0.68	4. Biegung, horizontal *	1159.04	0.54	4. Biegung, horizontal

*keine eindeutige Identifizierung (besser erkennbar an der beschichteten Schwelle)

Tabelle 7-2: Eigenfrequenzen und Dämpfungen B70

Mode Nr	B70_1			B70_2		
	f [Hz]	D [%]	Eigenform	f [Hz]	D [%]	Eigenform
1	117.98	3.04	1. Biegung, vertikal	115.78	1.89	1. Biegung, vertikal
2	132.24	1.03	1. Biegung, horizontal	128.5	1.05	1. Biegung, horizontal
3	345.27	0.64	2. Biegung, vertikal	338.21	0.83	2. Biegung, vertikal
4	360.14	0.63	1. Torsion	346.19	1.04	1. Torsion
5	402.69	0.57	1. Torsion + 2. Biegung, horizontal	388.15	0.6	1. Torsion + 2. Biegung, horizontal
6	659.68	0.77	3. Biegung, vertikal	647.28	0.98	3. Biegung vertikal
8	793.28	0.68	1. Längs	787.1	1.47	3. Biegung, horizontal
9	1006.21	0.75	keine klare Identifikation	1036.67	0.92	keine klare Identifikation
10	1060.76	1.73	4. Biegung, vertikal ?	1094.39	1.94	keine klare Identifikation
11	1243.98	0.61	4. Biegung, horizontal	1212.63	0.83	keine klare Identifikation

Tabelle 7-3: Eigenfrequenzen und Dämpfungen B70_MN und B06_Flachschwelle

Mode Nr	B70_MN			B06_FS		
	f [Hz]	D [%]	Eigenform	f [Hz]	D [%]	Eigenform
1	128.32	2.82	1. Biegung, vertikal	103.87	0.84	1. Biegung, vertikal
2	132.87	0.94	1. Biegung, horizontal + vertikal	206.96	0.61	1. Biegung, horizontal
3	367.09	0.71	2. Biegung, vertikal	291.66	0.67	2. Biegung, vertikal
4	406.41	0.84	1. Torsion + 2. Biegung, horizontal	357.76	0.62	1. Torsion + 2. Biegung, horizontal
5	692.38	0.88	3. Biegung vertikal (+ Längs)	561.26	0.91	3. Biegung vertikal
6	738.9	0.64	keine klare Identifikation	849.81	1.22	2. Torsion
7	778.57	1.14	3. Biegung, horizontal	879.72	1.68	4. Biegung vertikal
8	1104.62	1.22	4. Biegung, vertikal			
9	1187.91	0.79	keine klare Identifikation			
10	1228.2	0.8	4. Biegung, horizontal			

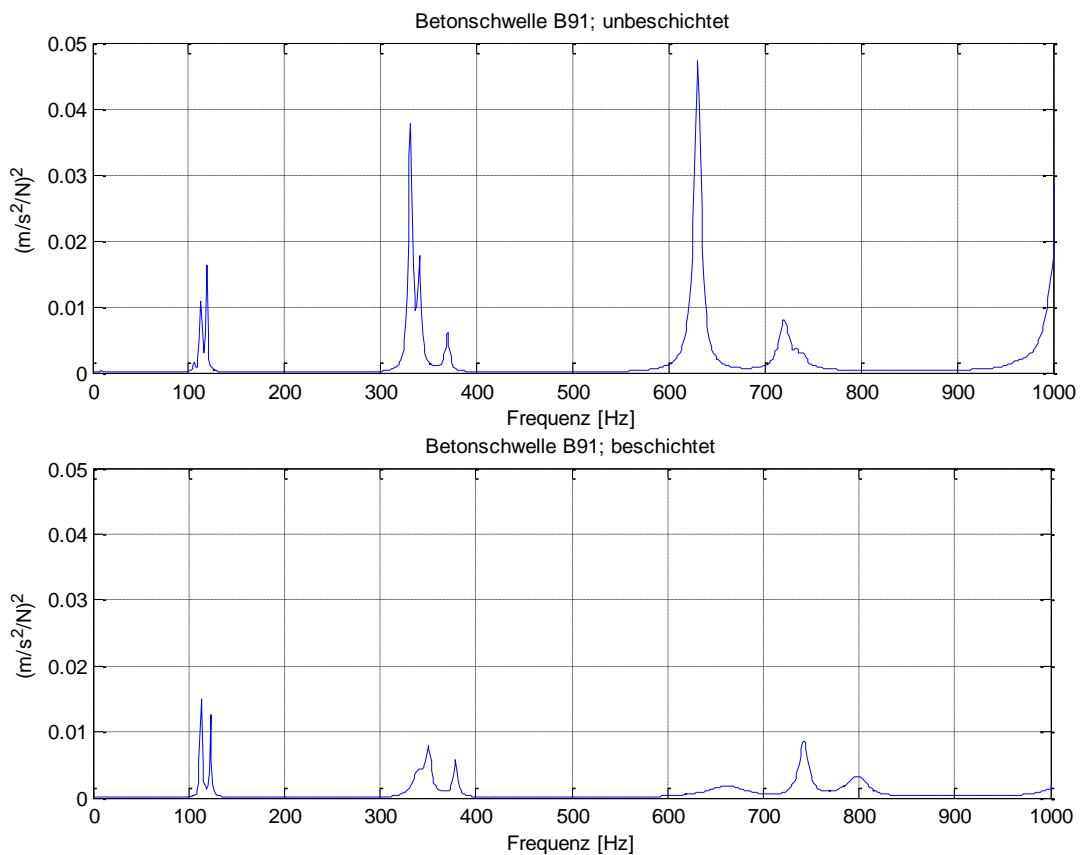


Abbildung 7-4: Globale Transfermatrizen B91 mit/ohne Besohlung

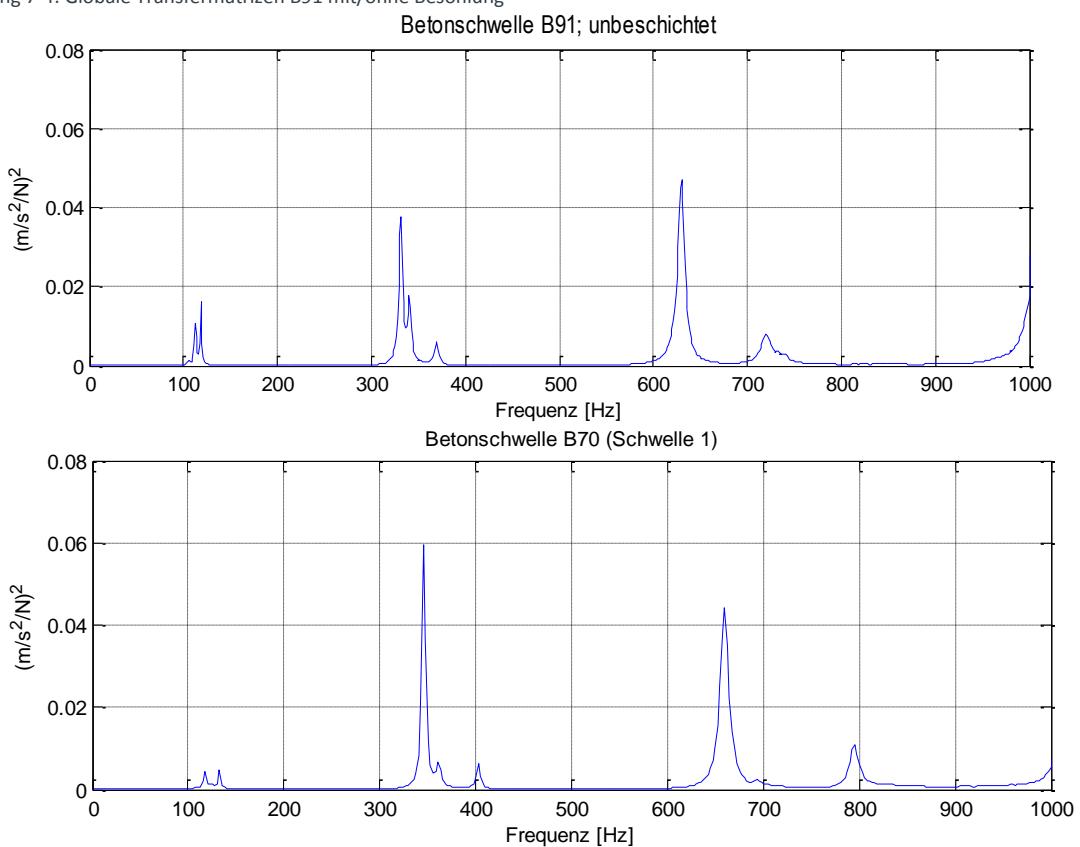


Abbildung 7-5: Globale Transfermatrizen B91 und B70 ohne Besohlung

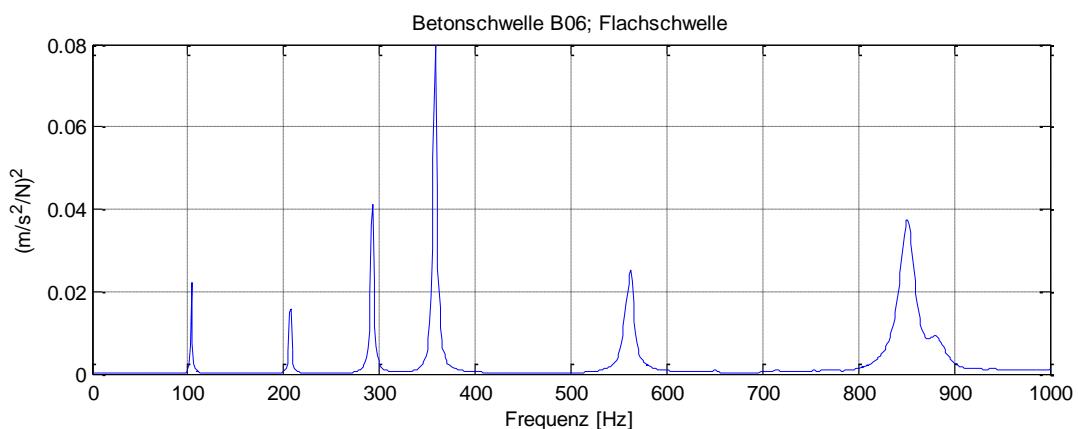


Abbildung 7-6: Globale Transfermatrizen B70, B70MN und B06_FS

Die besohlte Schwelle B91 verhält sich steifer und ist stärker gedämpft. Die beiden Schwellen B70 zeigen den Alterungseinfluss. Generell ist eine Versteifung feststellbar, wobei über das Alter der beiden B70-Schwellen keine Angaben vorliegen. Die Dämpfung zeigt tendenziell eine Abnahme infolge des Alterns der Schwellen.

7.2 Rechnerische Modalanalysen - FEM Modell

Es wird zunächst ein FEM-Modell von der frei schwingenden Schwelle aufgebaut und später ein Modell vom Gleis, sodass alle Kopplungselemente, Massen und Dämpfungsglieder darin enthalten sind.

Für die rechnerische Modalanalyse wurden verschiedene FE-Modelle der Schwelle B91 (unbeschichtet) aufgebaut, um die Einflussfaktoren zu untersuchen. Es wurden die Parameter Vorspannung, Art der Armierung, Geometrie der Schwelle sowie der E-Modul des Betons variiert. Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über die erstellten FE-Modelle.

	FE-Modell 1	FE-Modell 2	FE-Modell 3	FE-Modell 4
FE-Modelldatei	B91_Schwelle_01_007	B91_Schwelle_01_007_ohne_Armierung	B91_Schwelle_02_001	B91_Schwelle_02_002
Geometrie	vereinfacht	vereinfacht	detailliert	detailliert
Armierung	mit Armierung; ohne Vorspannung	ohne Armierung; ohne Vorspannung	ohne Armierung; ohne Vorspannung	ohne Armierung; ohne Vorspannung
Material-eigen-schaften	E-Modul 38'200 Mpa Poisson-Zahl 0.2	E-Modul 38'200 Mpa Poisson-Zahl 0.2	E-Modul 38'200 Mpa Poisson-Zahl 0.2	E-Modul 45'000 Mpa Poisson-Zahl 0.2

Tabelle 7-4: Übersicht der verwendeten FE-Modelle

Die vereinfachte Geometrie berücksichtigt nur die Hauptabmessungen, aber nicht die Details der Schienenbefestigung. Bei den FE-Modellen mit Armierung wurden 14 Stahldrähte mit einem Durchmesser von 5mm mitmodelliert. Dadurch besteht die Möglichkeit, zusätzlich eine Vorspannkraft von 340 kN auf die Schwelle aufzubringen.

Die Materialeigenschaften des Betons unterliegen starken Schwankungen. Aus diesem Grund hat der Hersteller eine Bandbreite der Materialparameter angegeben. Für die FE-Berechnung wurden sowohl Mittelwerte als auch Maximalwerte der Materialparameter untersucht.

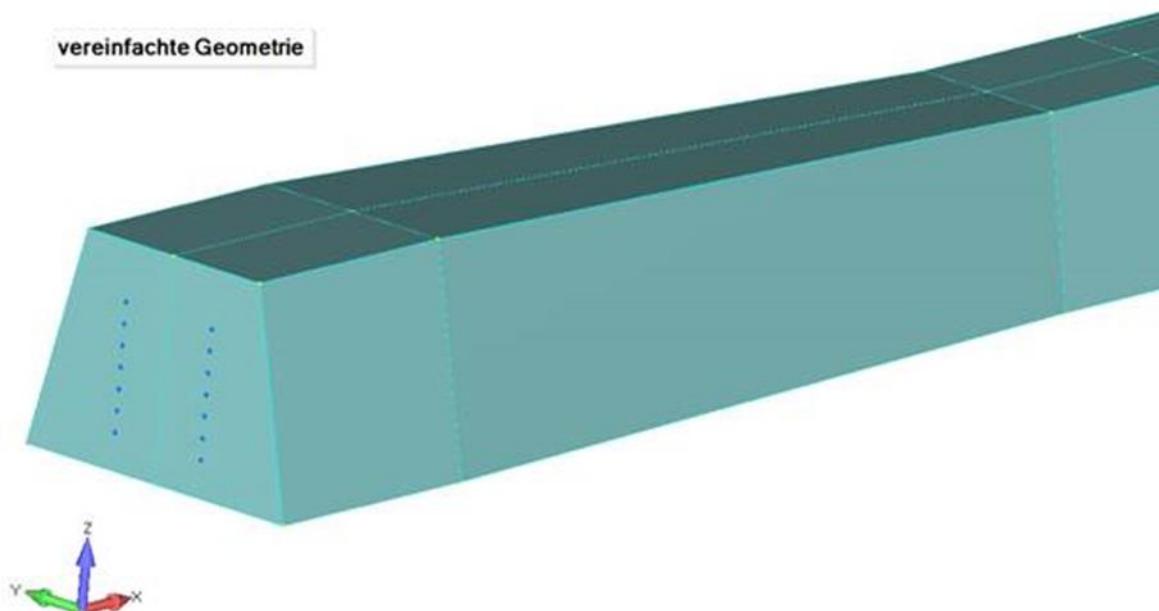


Abbildung 7-7: FE-Modell mit vereinfachter Geometrie und Zugstangen

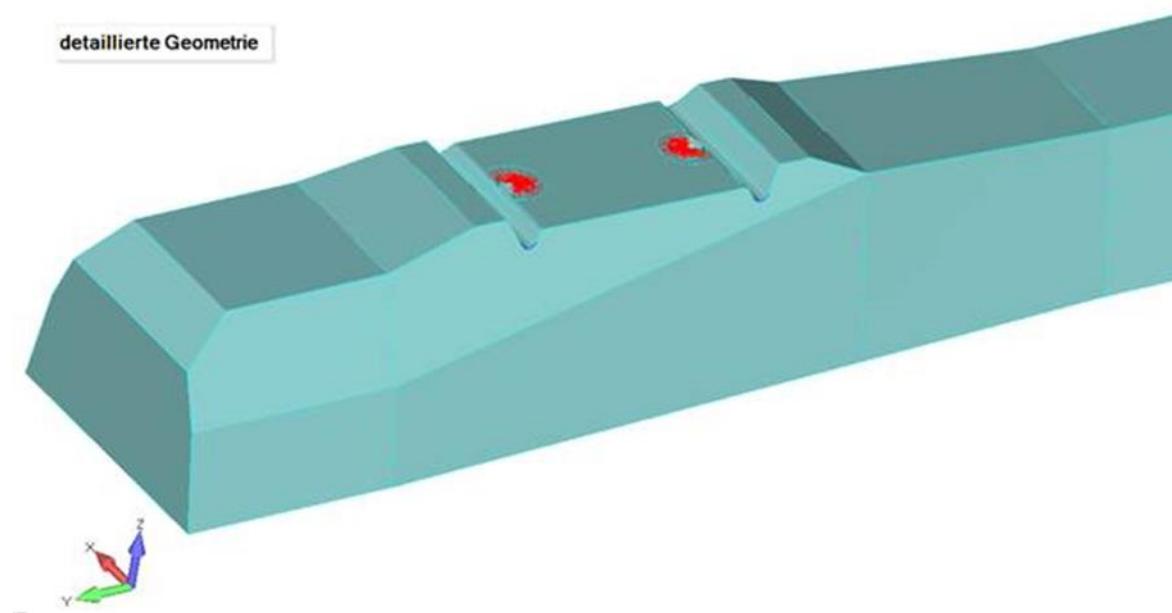


Abbildung 7-8: FE-Modell mit detaillierter Geometrie, aber ohne Zugstangen

Eine Voruntersuchung zeigte, dass die Vorspannung der Zugstangen keinen Einfluss auf die berechneten Eigenfrequenzen hat. Dies ist auch direkt aus der Formel für die Berechnung der Eigenfrequenz eines Einmassenschwingers ersichtlich:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{Formel 1}$$

Wobei k die Steifigkeit, m die Masse und ω die Eigenkreisfrequenz ist. Die Vorspannung der Zugspannung verändert zwar den Spannungszustand in der Schwelle, aber nicht die Steifigkeit der Schwelle (lineares Materialverhalten vorausgesetzt). Die Vorspannung erzeugt Druckspannungen im Beton und erhöht somit die Festigkeit der Schwelle, aber beeinflusst die Eigenfrequenzen der Eisenbahnschwellen nicht und wird deshalb für die weiteren Betrachtungen weggelassen.

Die Ergebnisse der verschiedenen FE-Berechnungen im Vergleich zu den Messergebnissen sind in den folgenden Tabellen zusammengefasst.

Mode	Beschreibung	Messung [Hz]	FE-Berechnung [Hz]	FE-Berechnung [Hz]
	B91 unbeschichtet M1-5.mp4		FE-Modell 1 (B91_Schwelle_01_007)	FE-Modell 2 (B91_Schwelle_01_007 _ohne_Armierung)
			vereinfachte Geometrie mit Armierung E-Modul 38200 MPa	vereinfachte Geometrie ohne Armierung E-Modul 38200 MPa
1	Biegung vertikal (2 Knoten)	111.9	96.1	95.6
2	Biegung horizontal (2 Knoten)	118.4	105.7	105.0
3	Biegung vertikal (3 Knoten)	330.3	284.8	284.2
4	Biegung horizontal (3 Knoten)	339.6	319.4	318.4
5	Torsion (1 Knoten)	369.9	334.9	334.6
	Masse [kg]	286.0	274.5	270.7

Tabelle 7-5: Ergebnisse für die FE-Modelle 1 und 2 der B91 Betonschwelle

Mode	Beschreibung	Messung [Hz]	FE-Berechnung [Hz]	FE-Berechnung [Hz]
		B91 unbeschichtet M1-5.mp4	FE-Modell 3 (B91_Schwelle_02_001)	FE-Modell 4 (B91_Schwelle_02_002)
			detaillierte Geometrie ohne Armierung E-Modul 38200 MPa	detaillierte Geometrie ohne Armierung E-Modul 45000 MPa
1	Biegung vertikal (2 Knoten)	111.9	98.2	106.6
2	Biegung horizontal (2 Knoten)	118.4	106.2	115.3
3	Biegung vertikal (3 Knoten)	330.3	294.5	319.7
4	Biegung horizontal (3 Knoten)	339.6	314.6	341.5
5	Torsion (1 Knoten)	369.9	335.8	364.5
	Masse [kg]	286.0	282.6	282.6

Tabelle 7-6: Ergebnisse für das FE-Modell 3

Aufgrund der Ergebnisse können die folgenden Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Die Armierung hat nur einen minimalen Einfluss auf die Eigenfrequenzen (< 0.5%) und wurde deshalb für die Berechnung mit der detaillierten Geometrie weggelassen. Das heisst gleichzeitig auch, dass die Eigenfrequenzen bei einer zukünftigen Optimierung mit zusätzlicher Armierung kaum beeinflusst werden können.
- Die FE-Modelle 1 (vereinfachte Geometrie) und 2 (detaillierte Geometrie) ergeben vergleichbare Resultate, welche jedoch deutlich in den Eigenfrequenzen von den Messergebnissen abweichen. Es spielt deshalb keine grosse Rolle, welche Geometrie (vereinfacht oder detailliert) für die weiteren Untersuchungen verwendet wird.
- Der E-Modul des Betons ist der Parameter mit dem grössten Einfluss auf die berechneten Eigenfrequenzen. Wenn für den Beton ein E-Modul von 45'000 N/mm² angesetzt wird, beträgt die Abweichung zwischen Messung und Berechnung für die ersten 5 Eigenfrequenzen weniger als 5%.
- Ab dem 5. Eigenmode sind die Modalformen in der Messung nicht mehr klar erkennbar und deshalb nicht mehr direkt mit den FE-Ergebnissen vergleichbar.
- Das Gewicht der FE-Modelle konnte noch nicht validiert werden, weil keine Gewichtsmessungen an den Schwellen durchgeführt wurden. Der Wert von 286kg ist ein theoretischer Wert des Herstellers.

Für die weiteren Untersuchungen der in der Schiene eingebauten Schwelle wird das FE-Modell 4 verwendet.

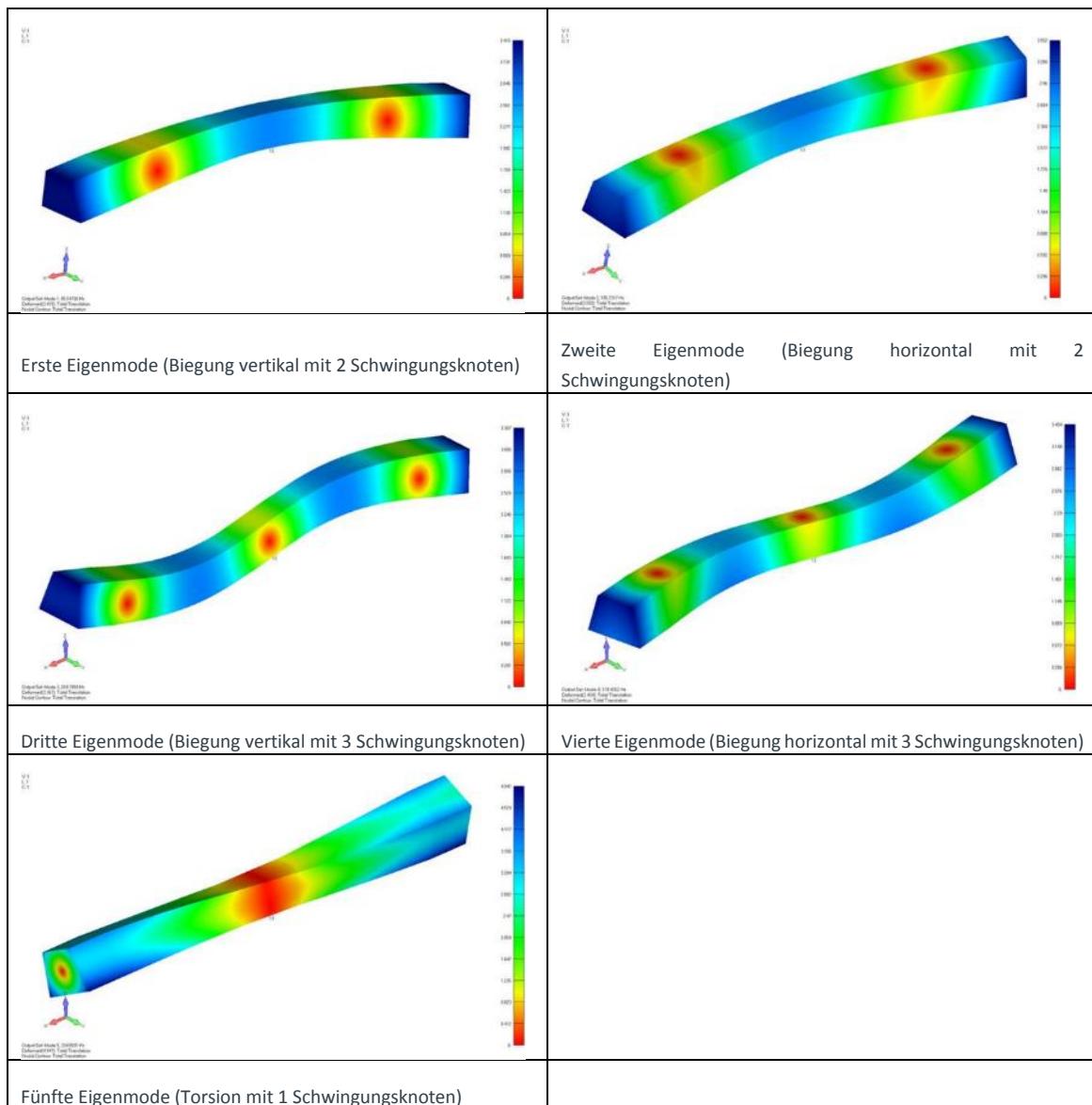


Abbildung 7-9: Die ersten fünf Eigenmoden aus der FEM-Simulation

Ende 2018 war die Erkenntnis über den Einfluss der 2. Torsionsmode bei 1100 Hz noch nicht vorhanden, daher wurden diese Moden nicht aus dem FE Modell ausgelesen.

Ein FE Modell des Testgleises in Müntschemier vom Dezember 2018 mit Schwellen im Schotterbett zeigt folgendes Bild.

V:1
C:1

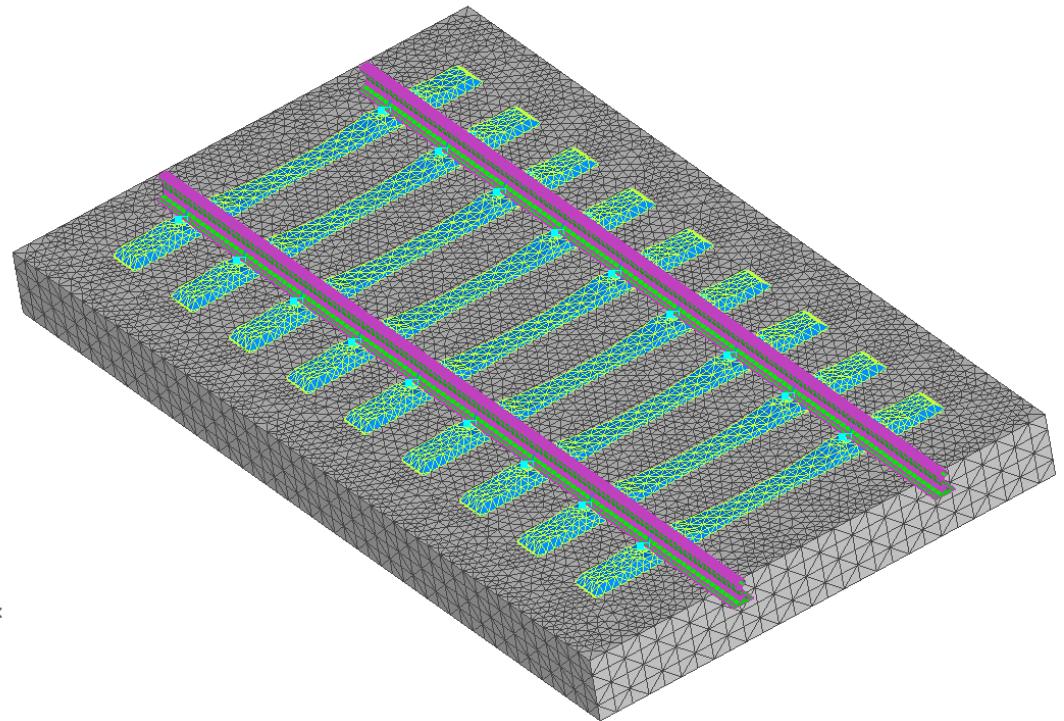


Abbildung 7-10: FE-Modell des Testgleises B91 von Vigier Rail

Am FE-Modell des Testgleises können die mechanischen Eigenschaften aus Transferfunktionen, welche mit Shaker- oder Hammermessungen ermittelt wurden, reproduziert werden. Ziel ist es, das Abklingverhalten der Schiene zu modellieren, um so die gemessenen TDR-Kurven in Abbildung 7-23 zu berechnen.

An dem Modell wurden daraufhin die Ideen zur Optimierung untersucht, eine Schwelle mit höherem Gewicht, eine am Kopf verbreiterte Schwelle mit doppelter oder asymmetrischer Klemmung.

7.3 Messungen an Testgleisen

Auf dem Werksgelände der Vigier Rail wurde ein Testgleis mit B91-Betonschwellen im Schotterbett und 6m langen UIC60-Schienen geplant und im Mai 2018 errichtet, an dem in den darauffolgenden Wochen Schallmessungen der Schwelle sowie experimentelle Modalanalysen von eingeschotterten Schwellen stattfinden sollen. Zuvor wurden Messungen an einem gleichartig aufgebauten Testgleis von Schrey & Veit mit B70-Schwellen durchgeführt, um den Unterschied im Schwingungsverhalten beider Typen besser zu verstehen.

Das Gleis kann mechanisch an der Schiene angeregt werden, sodass Schwingungen und deren Übertragung in eine Schwelle gemessen werden können.



Abbildung 7-11: Testgleis S&V in Deutschland (Schrey&Veit GmbH)

Ziel ist mittels bildgebender Verfahren (Schallintensität oder Nahfeldholographie) die Schallabstrahlung einer Schwelle zu ermitteln. Somit können am Ende grundlegende Vergleiche zwischen unterschiedlichen Schwellentypen stattfinden, Computermodelle validiert werden und die Schallabstrahlung gefahrlos im Laborbetrieb gemessen werden.



Abbildung 7-12: Testgleis bei Vigier Rail

7.3.1 Ergebnisse vom Testgleis mit B70-Schwellen Schrey & Veit

Am 27. und 28. Juni 2018 haben Messungen zum Schwellenschall an einem 6m langen Testgleis bei S&V in Sprendlingen stattgefunden. Dabei wurde die Schiene mittels Shaker mechanisch angeregt und die Schwingungen und der Luftschall mittels Intensitätsverfahren und Nahfeldholografie gemessen. Zudem wurde eine experimentelle Modalanalyse der eingebauten Schwelle durchgeführt.

Die Intensitätsmessungen ergaben wenige Hinweise auf das Vorhandensein des Schwellenschalls, es sind zu viele Teilflächen mit negativer Intensität vorhanden, sodass eine Interpretation bzw. eindeutige Zuordnung schwierig werden. Der Schienenschall ist jedoch eher in den Intensitätsspektren erkennbar und liegt zwischen 315 und 2000 Hz.

Die Resultate aus der Nahfeldholographie sind ebenfalls nicht eindeutig und sehr schwierig zu interpretieren, vermutlich gibt es keine sinnvollen Ergebnisse bei Anregung an der Schiene, da die Schallabstrahlung der Schiene dominiert.

Die experimentelle Modalanalyse zeigte einen wesentlichen Einfluss der Kopplung mit der Schiene auf die Eigenfrequenzen. Ohne Kopplung an die Schiene ergeben sich ähnliche Eigenfrequenzen und -formen wie mit der Lagerung frei-frei. Der Einfluss der Dämpfung durch den Schotter und Schiene ist allerdings erkennbar, so sind bei den ersten Eigenmoden die Dämpfungen im eingebauten Zustand um Faktor 5 bis 10 höher. Nach Kenntnis des relevanten Frequenzbereichs vom Schienenschall dürften ohnehin nur die ersten Eigenmoden der Schwelle bei 130 Hz und 350 Hz für die Schallabstrahlung der Schwelle eine Bedeutung haben.

Analog zu dieser Messung an einem Testgleis mit B70-Schwellen wurde im September eine weitere Messung an einem Testgleis mit B91 in Müntschemier durchgeführt. Hier sind die Ergebnisse, was die Luftschallabstrahlung angeht, ähnlich. Transferfunktionen von Schienenschwingung zu Schwellenschwingung bzw. Luftschall werden in einem vergleichenden Bericht zusammengefasst.

Die wesentliche Schlussfolgerung aus diesen Messungen ist, dass die Luftschallabstrahlung der Schwelle messtechnisch kaum zu erfassen ist. Für den Schienenschall ist die Anbindung der Schiene im gesamten System von Bedeutung. So haben z.B. weiche und harte Zwischenlagen oder die Klemmkraft einen höheren Einfluss auf den Schienenschall als die Art der Betonschwelle selbst. Da die Anbindung der Schiene durch die Schwelle gegeben wird, besteht aber Potential zur Gesamtenkung des Lärms durch die Optimierung der Betonschwellen, auch wenn die Schallabstrahlung der Schwelle selbst sekundär ist.

Als Anregung wurde ein Rosarauschen (gleiche Energie in den Terzbändern) verwendet, was zudem noch Bandpass-gefiltert war. Für den tieffrequenten Bereich der Schwellenschwingungen wurde ein Bandpassfilter zwischen 31.5 Hz und 1250 Hz angesetzt «Tiefrosa» und für den Bereich der Schienenschwingungen ein Bandpassfilter zwischen 80 und 5000 Hz «Rosa».

Mittels Schallintensitätsmessungen wurde die Schwelle über punktförmige Messungen abgetastet:

- Messung in z-Richtung an der Schwellenoberseite Nr.6 in 25cm Abstand
- Messung in +/-x Richtung an den Schwellenflanken Nr.6 in 25cm Abstand
- Messungen in z-Richtung im benachbarten Schotterbett von Schwelle Nr. 6
- Messungen vom Schienenschall in +/-y Richtung und in z-Richtung



Abbildung 7-13: Betonschwellen B70 im S&V-Testgleis

Die Schallintensität I ist ein Skalarprodukt aus Schalldruck p und gerichteter Schallschnelle v. Bei der Intensitätsmessung mittels Zweimikrofonmethode wird die Schallschnelle über die Phasenlage und den konstanten Mikrofonabstand ermittelt und mit dem Schalldruck multipliziert. Positive Intensitäten stammen dann vom gemessenen Bauteil und negative Intensitäten aus der Umgebung. Der Auswertefrequenzbereich wird dabei durch das gewählte Distanzstück bestimmt.

50mm Distanzstück: 50 Hz bis 1250 Hz

12mm Distanzstück: 125 Hz bis 10000 Hz

Intensitäten in Terzbändern, die ausserhalb dieses Bereichs liegen, können nicht mehr sicher bestimmt werden und sollten daher mit angemessener Vorsicht betrachtet werden. Der jeweilige Summenpegel wurde entsprechend nur über den Auswertefrequenzbereich gebildet.

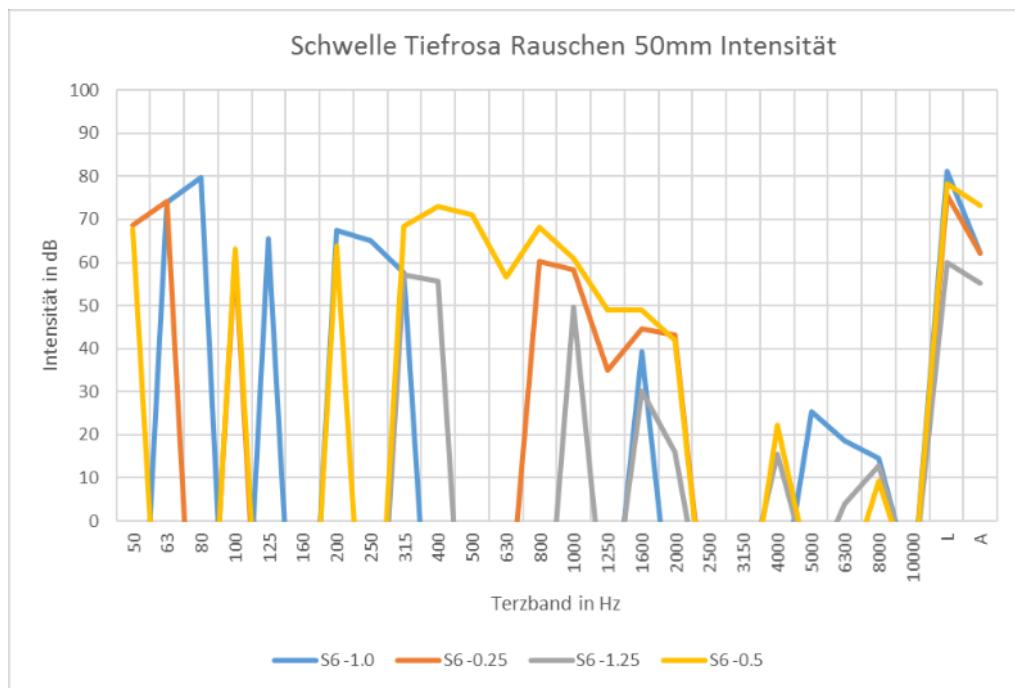


Abbildung 7-14: Schallintensität B70-Betonschwelle an vier Messpunkten (Summenpegel-Frequenzbereich 50 Hz bis 1250 Hz)

In den gemessenen Intensitäten zwischen 100 und 250 Hz sind ein paar Terzbänder enthalten, welche wahrscheinlich von der Schwelle stammen. Bei 125 Hz und bei 200 Hz liegen modale Eigenformen der Schwelle, so wird sie in diesen Bereichen auch Luftschall abstrahlen.

Die Kontur der S6-0.5-Messung zwischen 315 Hz und 1250 Hz wird auch durch Schienenschallreflexionen beeinflusst und kann daher nicht eindeutig der Schwelle zugeordnet werden. Zum Vergleich ist nachfolgend einmal der Schienenschall abgebildet, welcher unmittelbar seitlich und über der Schiene gemessen wurde (bei unterschiedlicher Rauschanregung).

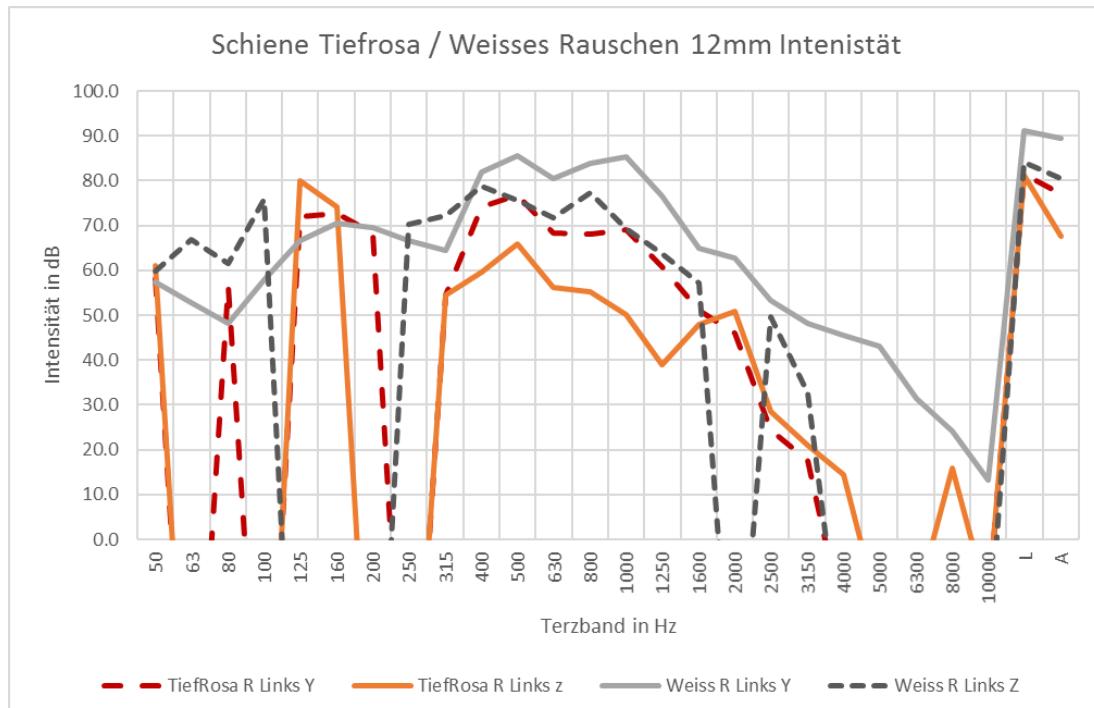


Abbildung 7-15: Schallintensität der Schiene bei Tiefrosa-Rauschen und 12mm Intensitätssonde (Auswertebereich 125 Hz bis 10000 Hz)

Nachfolgend sind die einzelnen Intensitätsmessungen den Messpositionen zugeordnet und über jedes Terzband aufgetragen.

Position		Frequency 125.00[Hz]					Position		Frequency 400.00[Hz]				
[m]		B6	S6SL	S6	S6SR	B5	[m]		B6	S6SL	S6	S6SR	B5
-1.25		71.3	76.6	-67.9	76.7	-69.7	-1.25		-65.2	65.1	55.8	-69.8	-64.2
-1.00		51.8	69.0	65.5	77.4	-72.9	-1.00		-68.6	66.9	-64.7	-71.8	-67.9
-0.50		-77.8	76.9	-75.1	-68.1	-77.9	-0.50		-61.8	68.2	69.5	-62.8	-71.0
-0.25		-80.5	77.7	-67.1	-80.5	-67.4	-0.25		-66.8	72.1	73.1	-74.5	-68.2
0.00		74.0	81.5	-72.8	-80.9	75.5	0.00		-66.6	72.2	-68.4	-73.2	-65.3
0.25		-74.1	82.3	62.5	-81.8	78.4	0.25		-71.6	71.5	-65.9	-74.0	-62.0
0.50		76.4	83.1	-66.9	-76.9	82.3	0.50		-71.3	69.5	-66.0	-72.9	-70.8
1.00		75.5	80.7	71.7	75.5	83.5	1.00		-71.2	69.8	-68.9	-71.1	-73.7
1.25		75.0	80.2	78.3	-81.0	82.7	1.25		-64.8	59.1	68.2	-63.3	-62.7
													
Position		Frequency 50.00[Hz]					Position		Frequency 160.00[Hz]				
[m]		B6	S6SL	S6	S6SR	B5	[m]		B6	S6SL	S6	S6SR	B5
-1.25		-78.8	-73.2	-76.1	-70.0	56.6	-1.25		-74.7	-75.9	-76.4	76.8	-75.0
-1.00		-74.4	59.3	-74.6	-69.0	-63.0	-1.00		66.5	71.2	-73.6	75.0	-69.1
-0.50		-70.5	68.1	-69.2	-72.0	-65.3	-0.50		-80.3	-66.7	-71.3	-76.4	-67.5
-0.25		-69.1	69.1	67.7	-72.0	-64.4	-0.25		-78.6	72.8	-72.3	-76.2	65.4
0.00		65.3	72.1	68.6	-73.5	-63.0	0.00		-69.9	75.8	-74.8	-72.2	74.2
0.25		65.8	70.6	69.6	-74.5	60.2	0.25		77.3	80.7	-69.2	-76.5	81.4
0.50		71.1	71.9	69.9	75.5	63.8	0.50		80.5	83.5	74.1	81.4	85.6
1.00		70.0	69.6	64.9	-79.3	-69.4	1.00		82.6	82.1	75.4	71.4	87.6
1.25		68.9	72.1	71.2	-78.2	-70.7	1.25		82.2	84.7	80.6	72.2	86.0
Position		Frequency 63.00[Hz]					Position		Frequency 200.00[Hz]				
[m]		B6	S6SL	S6	S6SR	B5	[m]		B6	S6SL	S6	S6SR	B5
-1.25		-72.7	72.2	-66.2	-69.3	-71.4	-1.25		-70.9	71.9	-68.0	-72.6	-70.7
-1.00		-72.9	-60.9	73.9	-73.4	-68.2	-1.00		-68.1	70.0	67.5	-68.5	64.3
-0.50		-73.5	68.7	69.3	-72.4	-60.8	-0.50		-63.5	75.8	68.2	-76.6	-69.4
-0.25		-75.5	67.7	-65.2	-72.6	-62.8	-0.25		-60.4	70.2	64.0	-67.6	-62.6
0.00		67.0	72.7	74.2	-75.9	67.4	0.00		-68.4	68.1	-63.0	-66.9	-64.7
0.25		-70.7	74.3	69.3	-76.5	72.3	0.25		-67.6	75.0	-61.7	-74.6	-48.4
0.50		68.1	70.8	68.6	65.4	73.4	0.50		-71.9	78.3	-61.1	-76.3	71.9
1.00		50.4	73.1	71.0	-67.2	64.2	1.00		-78.8	77.6	-70.8	-77.8	80.7
1.25		68.1	72.5	61.0	-67.5	67.4	1.25		-76.6	80.6	73.6	-79.8	81.4
Position		Frequency 80.00[Hz]					Position		Frequency 250.00[Hz]				
[m]		B6	S6SL	S6	S6SR	B5	[m]		B6	S6SL	S6	S6SR	B5
-1.25		-65.6	70.2	-69.5	-76.1	-76.2	-1.25		-73.8	74.7	-67.5	-77.8	64.7
-1.00		71.2	74.4	79.6	-76.2	-71.1	-1.00		-69.7	66.5	65.0	-74.5	-72.5
-0.50		-74.3	74.6	78.0	-75.3	-62.3	-0.50		70.5	68.2	63.0	-74.0	-75.2
-0.25		-73.6	69.9	-71.9	-71.7	-66.0	-0.25		-62.4	-66.2	-62.0	-74.7	-73.4
0.00		66.7	72.4	-69.6	-70.0	-64.5	0.00		-63.5	69.8	-69.7	-76.5	-72.4
0.25		69.4	71.5	-61.1	-68.4	-56.0	0.25		53.6	71.3	-68.4	-75.8	-69.5
0.50		69.8	72.0	68.6	68.3	-67.1	0.50		-65.7	68.9	-65.7	-61.2	-69.4
1.00		64.4	68.2	64.1	-68.9	-68.6	1.00		-73.7	-69.9	-67.1	-66.9	-65.3
1.25		67.5	65.0	69.1	-68.3	-68.3	1.25		-62.5	-64.7	-70.7	-61.7	60.7
Position		Frequency 100.00[Hz]					Position		Frequency 315.00[Hz]				
[m]		B6	S6SL	S6	S6SR	B5	[m]		B6	S6SL	S6	S6SR	B5
-1.25		-74.2	-73.2	-75.4	-71.5	-70.5	-1.25		-62.5	62.4	57.0	-66.8	-61.1
-1.00		-79.0	-72.3	-80.1	69.6	64.7	-1.00		-53.2	60.2	57.6	-67.9	-64.2
-0.50		-69.4	-66.8	-79.7	70.8	-67.1	-0.50		66.3	63.8	69.2	-65.8	-65.0
-0.25		-63.2	63.5	63.1	-70.3	-69.4	-0.25		-62.6	60.5	68.4	-60.5	65.5
0.00		63.0	72.7	61.2	-74.1	-66.1	0.00		-66.1	61.7	-54.8	-67.9	56.8
0.25		62.3	75.2	-57.1	-74.9	72.1	0.25		-63.6	59.1	-62.8	-67.7	-63.4
0.50		67.5	75.4	70.9	-74.9	74.2	0.50		-64.1	63.6	-58.9	55.2	-68.5
1.00		-70.6	72.4	65.6	77.4	70.9	1.00		-67.7	68.0	60.7	-69.4	-69.5
1.25		-70.2	69.9	-69.8	73.1	-70.2	1.25		66.2	67.7	61.9	-69.8	63.0
Position		Frequency 800.00[Hz]					Position		Frequency 1000.00[Hz]				
[m]		B6	S6SL	S6	S6SR	B5	[m]		B6	S6SL	S6	S6SR	B5
-1.25		54.4	51.3	-48.9	-50.5	-52.2	-1.25		-50.7	48.1	-56.4	55.3	-54.4
-1.00		58.5	60.6	-58.1	-53.4	54.7	-1.00		-66.2	64.3	63.2	-66.9	58.6
-0.50		-57.3	57.9	60.2	-56.3	-56.8	-0.50		-62.6	61.8	68.1	-70.5	65.0
-0.25		-53.8	58.4	56.7	-58.8	51.3	-0.25		-63.5	63.8	60.1	-61.2	61.7
0.00		-53.6	62.2	-29.7	-64.3	-58.0	0.00		-62.9	65.3	-54.0	-65.5	-58.2
0.25		-64.5	62.1	58.1	-64.9	-59.7	0.25		-70.7	60.0	64.4	-71.0	-64.5
0.50		-65.8	62.5	66.9	-66.1	-63.0	0.50		-64.9	60.7	49.3	-64.8	-64.0
1.00		-64.9	-60.6	-57.8	-65.5	-64.2	1.00		-54.3	-56.8	54.3	-62.5	-53.0
1.25		-60.3	59.5	58.5	-62.5	-53.0	1.25		-54.3	-56.8	54.3	-62.5	-55.8

Abbildung 7-16: Schallintensitäten B70-Betonschwelle gemessen an der Schwelle S6 und im Schotter B5, B6

Für die Nahfeldholografie wird ein Mikrofonarray BionicM von CAE verwendet, bei dem 112 Mikrofone gleichmäßig verteilt in einem Durchmesser von 1m angeordnet sind. Mit diesem Verfahren kann man sehr nah an das schallabstrahlende Objekt heran und theoretisch die Schallschnellen im Frequenzbereich 50 Hz bis 10000 Hz darstellen. Im besten Fall sind dann Bereiche zu erkennen, wo eine Schallabstrahlung vom Objekt ausgeht.

Die Schallabstrahlung der Schwelle sollte über Schallintensitätsmessungen bestimmt werden. Außerdem wurde ein neues Verfahren, die akustische Nahfeldholographie, mittels Mikrofonarray erprobt, was sich jedoch erst unter diesen Umgebungsbedingungen erweisen musste.



Abbildung 7-17: Messungen des Schwellenschalls mittels Mikrofonarray BionicM

Mit dem BionicM-Array mit 1m Durchmesser muss die Betonschwelle mit 2.5m Länge durch drei überlagerte Messpositionen nacheinander gemessen werden. Wir haben jeweils die Mitte der Schwelle gewählt und dann die beiden Enden inklusive der Schienen.

Sinnvoll erscheint die Auswertung der Mittelposition der Schwelle, da hier der Einfluss des Schienenschalls geringer ist als an den Enden. In einer Terzanalyse des Arrayssignals in Abbildung 7-19 erkennt man zunächst, dass der vermeintliche Schwellenschall überwiegend in einem Frequenzbereich zwischen 100 und 500 Hz liegen muss.

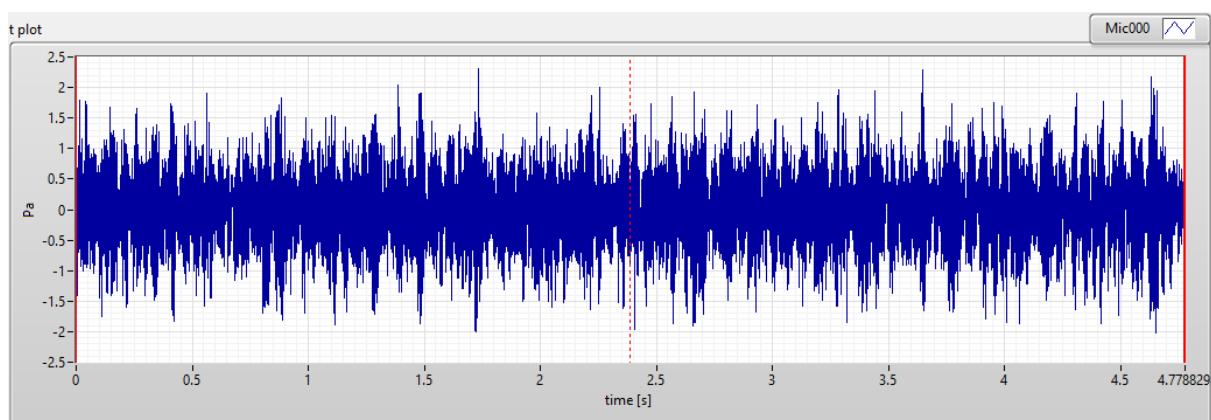


Abbildung 7-18: Zeitsignal an einem Mikrofon

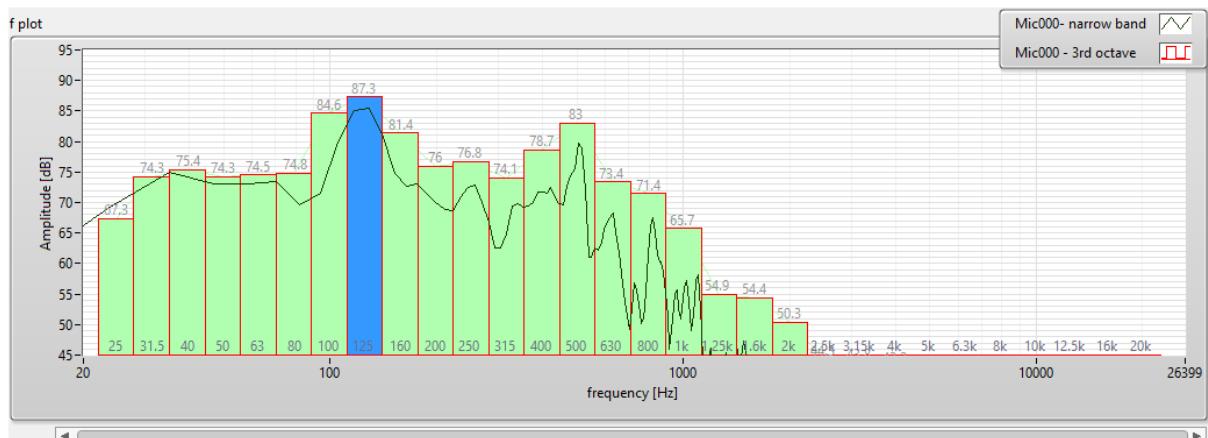


Abbildung 7-19: Terzanalyse vom Schalldrucksignal

Die Auswertung wurde einmal terzweise und einmal bandpassweise in den sechs interessanten Bandbereichen durchgeführt, dort wo die Eigenfrequenzen der Schwellen vermutet wurden.

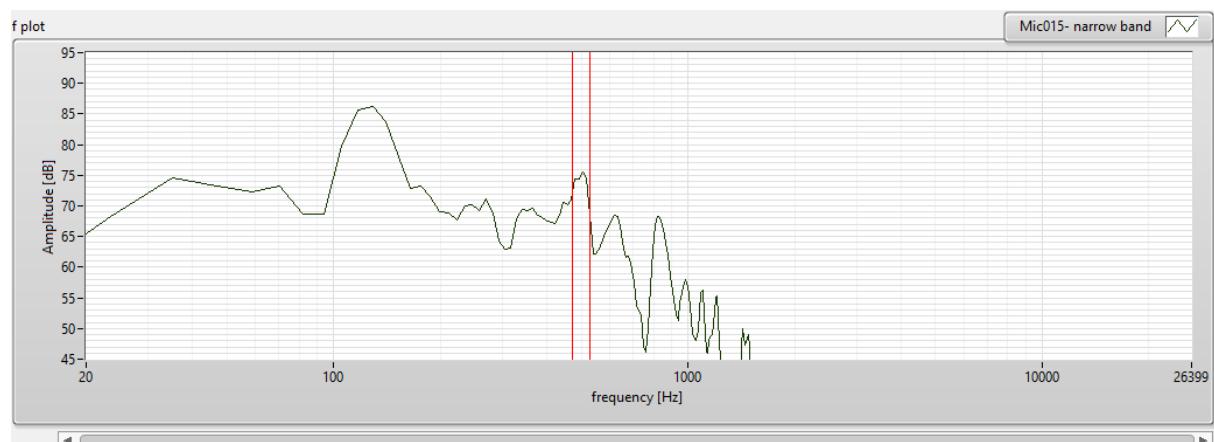


Abbildung 7-20; Auswertung Nahfeldholographie in einem Bandpass

Da die Kamera des Arrays einen begrenzten Aufnahmebereich hat, wird bei der Messung in wenigen cm über der Schwelle nur ein kleines Bild aufgenommen.

Auf dem Ergebnisbild der Nahfeldmessung in Abbildung 7-22 ist zu erkennen, dass im Bereich der Schwellenmitte offenbar eine Schallabstrahlung bei ca. 130 Hz stattfindet. Es sind jedoch auch Schallquellen an anderen Orten sichtbar, etwa im Bereich der Schiene.

Mit zunehmender Frequenz erscheinen auch Spiegelschallquellen durch Reflexionen in den Nahfeldholografien, diese stammen dann vom Schienenschall – siehe Anhang B.5 und B.7.

Zusammenfassend lässt sich mit der Nahfeldholografie kein komplettes Bild der Schallabstrahlung der Schwelle erzeugen. Die Artefakte und Spiegelquellen im Schotter überlagern die Schallabstrahlung der Schwelle zu sehr.

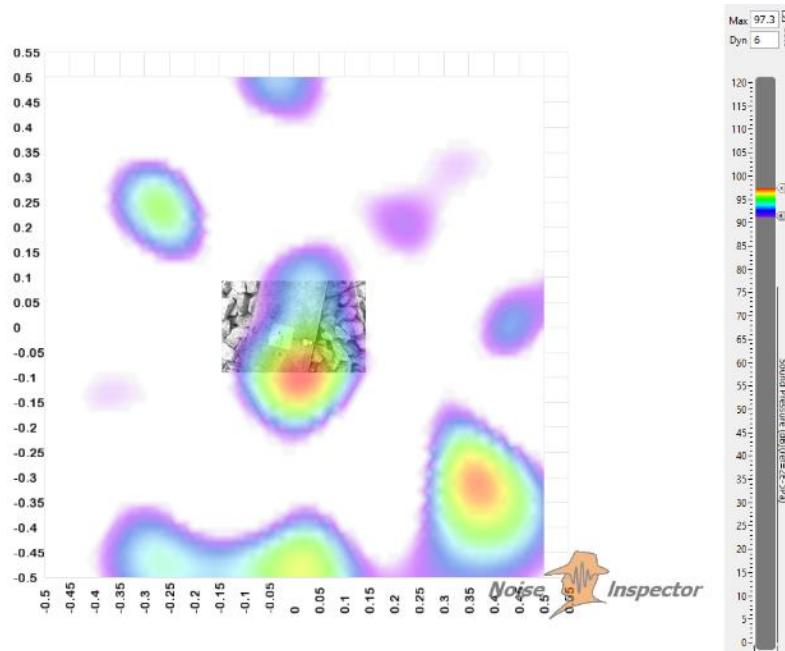


Abbildung 7-21: Nahfeldmessung Mitte Betonschwelle zwischen 105 und 140 Hz

Zur Veranschaulichung der Lage muss ein grosses Bild entsprechend skaliert hinterlegt werden.

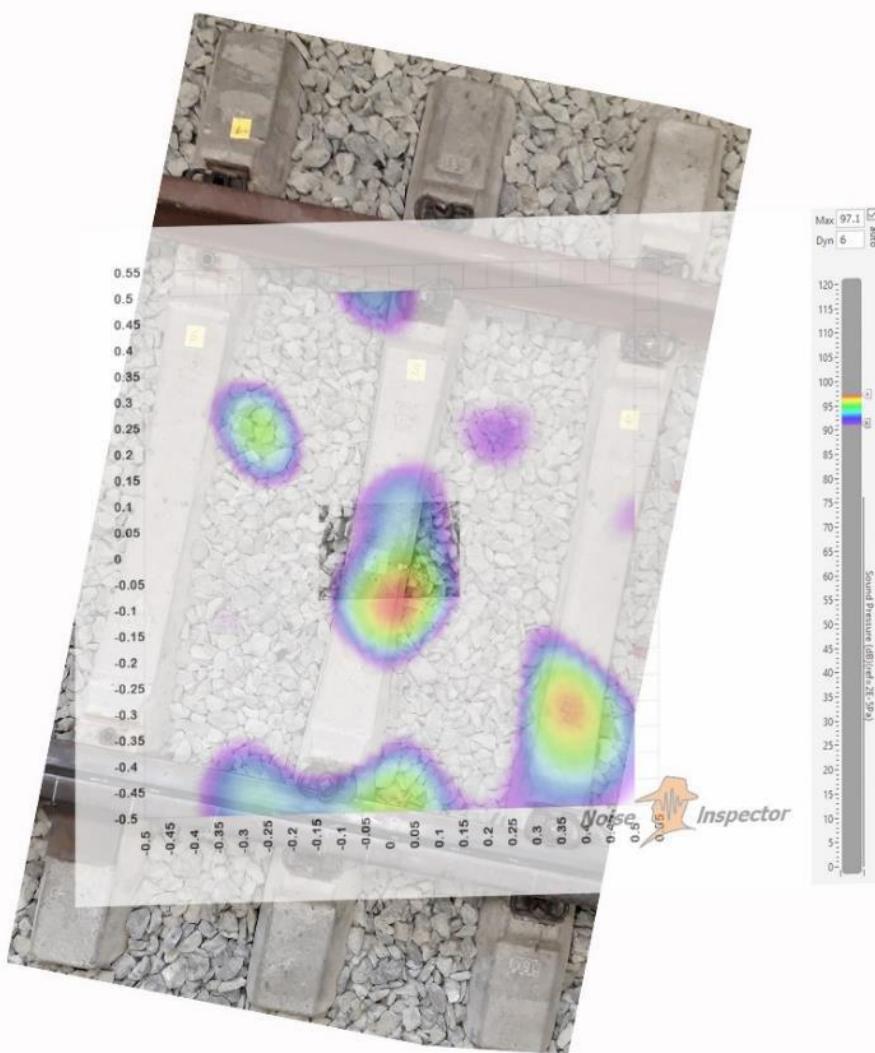


Abbildung 7-22: Nahfeldmessung Betonschwelle zwischen 105 und 140 Hz mit Lagebild

7.3.2 Ergebnisse am Testgleis B91 von Vigier Rail

Am 4.9.2018 wurden analog zu den Messungen an B70-Schwellen bei Schrey & Veit in Sprendlingen Schall- und Beschleunigungsmessungen am Testgleis von Vigier Rail in Müntschemier am Gleis mit B91-Schwellen durchgeführt.

Die Ergebnisse der Messungen fallen ähnlich aus wie bei B70-Schwellen, der Schienenschall ist messbar, der Schwellenschall nicht sicher erkennbar.

Bei der Modalanalyse verhalten sich Betonschwellen B91 im eingebauten Zustand gleichartig wie B70-Schwellen.

7.3.3 Messungen TDR am Testgleis B91 von Vigier Rail

Am 1.11.2018 wurden am Testgleis in Müntschemier Messungen mit verschiedenen Zwischenlagen durchgeführt. Der Unterschied im Verlauf der TDR-Kurven zwischen harter und weicher Zwischenlage ist deutlich und entspricht etwa dem auf dem realen Gleis.

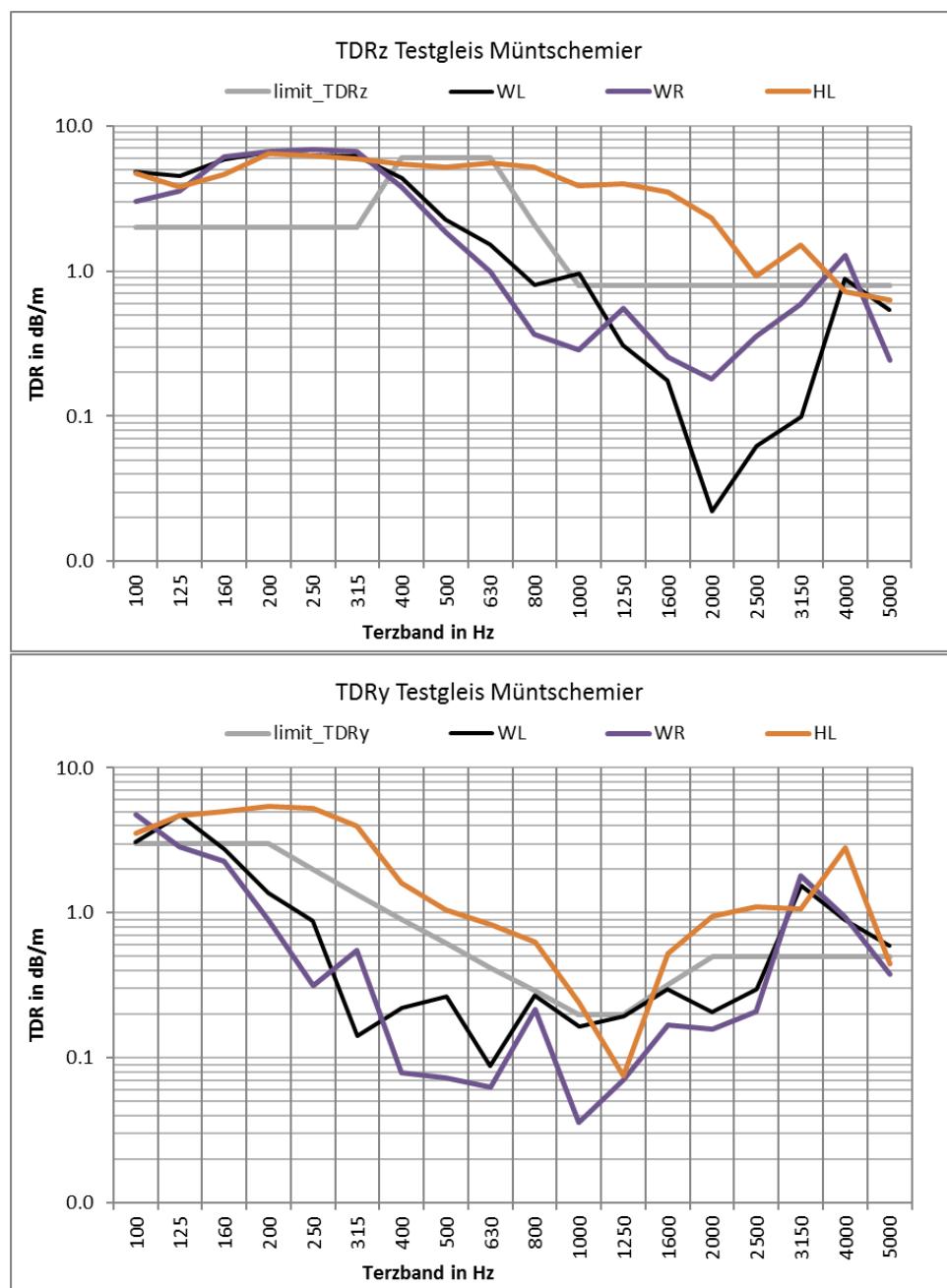


Abbildung 7-23: TDR Müntschemier 6m Testgleis

7.4 Messungen am realen Gleis

Messungen von Schienenschall und Schwingungen haben in Kerzers an B91/UIC60, in Wegberg (DE) und im April 2018 bei Donauwörth (DE) an B70/UIC60 sowie im Mai und Juni 2018 bei der BLS und bei der BLS B70/UIC54 stattgefunden. Hieraus wurden Auswertungen vom Schienenschall und Schwellenschwingungen durchgeführt.



Abbildung 7-24: Messung Schienenschall über Schallintensitäten - zwei Verfahren (PROSE 2017)

Dabei wurden folgende Messungen vorgenommen, um entsprechende Parameter zu gewinnen.

- Messung Luftschall für Vorbeifahrpegel in 7.5m und 3m Abstand zur Gleismitte
- Messung von Schienenschwingungen vertikal und horizontal
- Messung von Schwellenschwingungen vertikal
- Messung TDR
- Messung von Schienenschallintensität

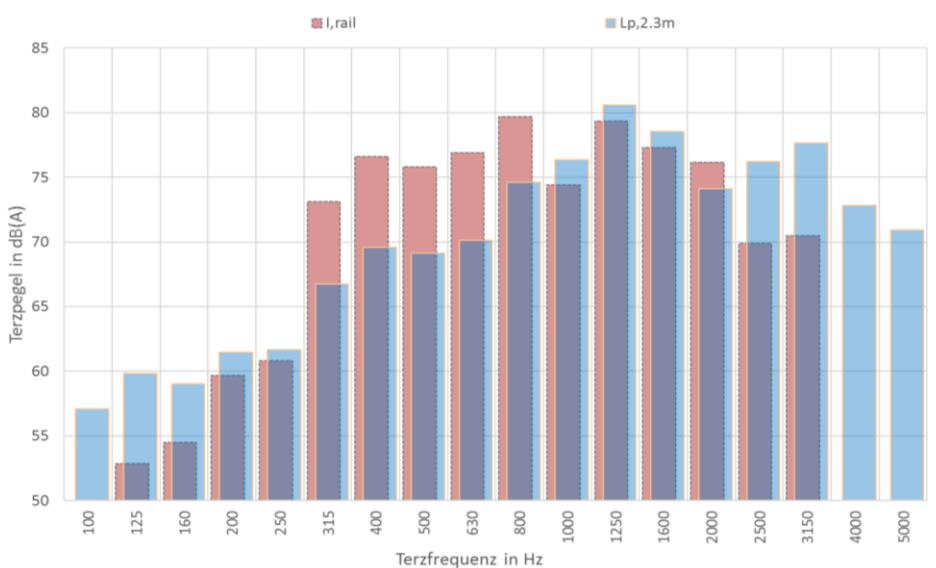


Abbildung 7-25: Vergleich Schienenschallintensität I_rail zum Rollgeräusch Lp,2.3m roll

Die folgenden Auswertungen zeigen einen Teil der bisher gewonnenen Parameter:

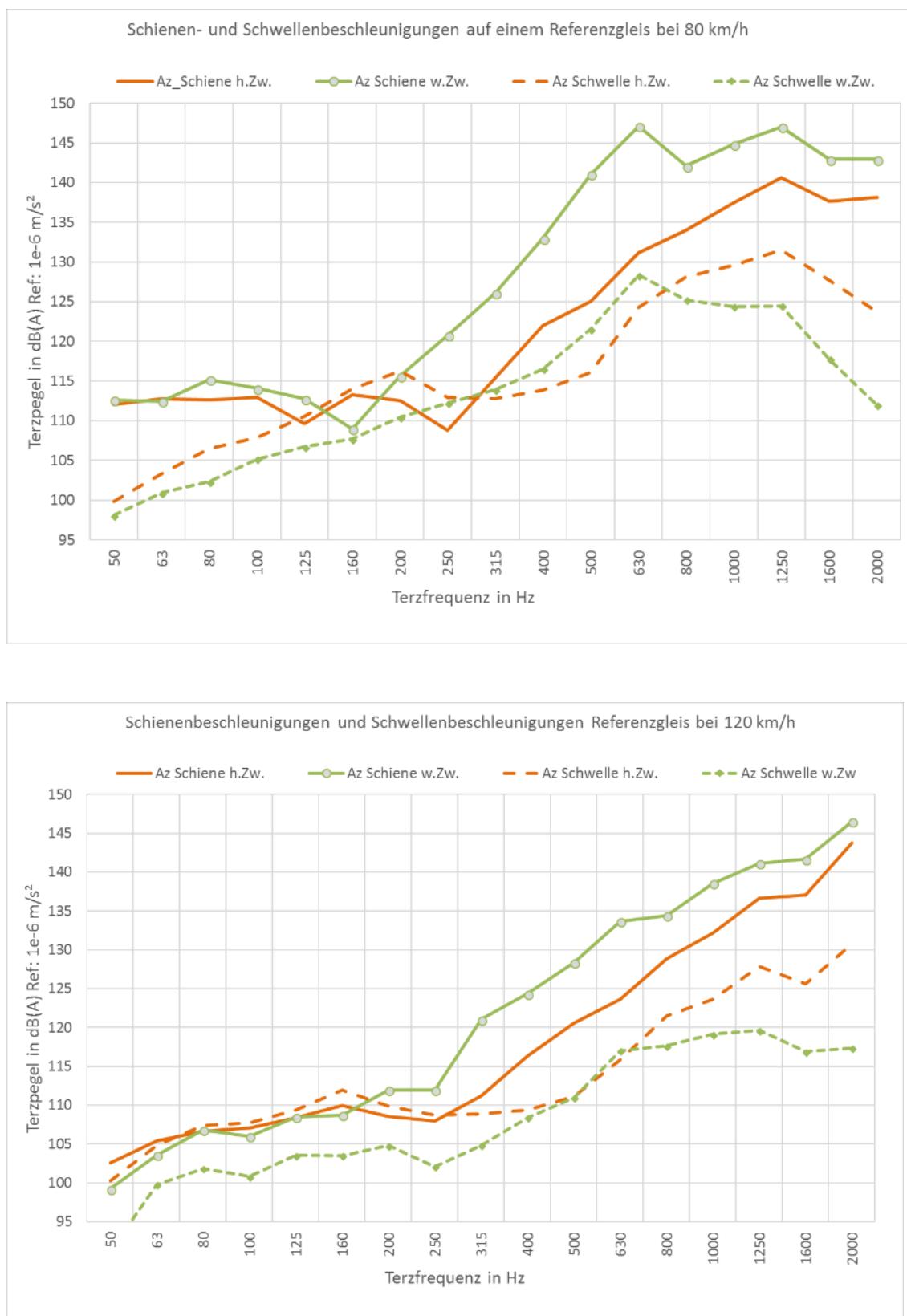


Abbildung 7-26: Schienen- und Schwellenbeschleunigungen bei Vorbeifahrmessungen von Kesselwagen

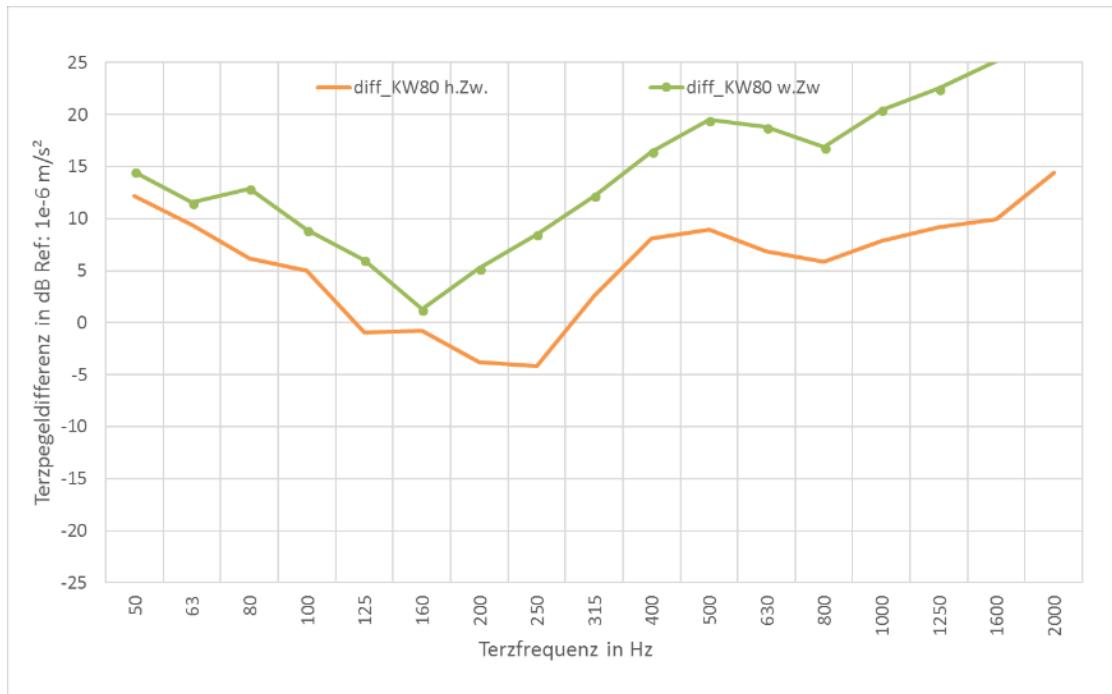


Abbildung 7-27: Differenz der Schienen- und Schwellenbeschleunigungen von Kesselwagen

Schienenschall kann sowohl während der Vorbeifahrt bestimmt werden, also mit Präsenz vom Fahrzeug und dem Radschallanteil, als auch unmittelbar nach der Vorbeifahrt. Bei der Messung des Schalls nach der Vorbeifahrt kann der Schienenschall isoliert betrachtet werden.

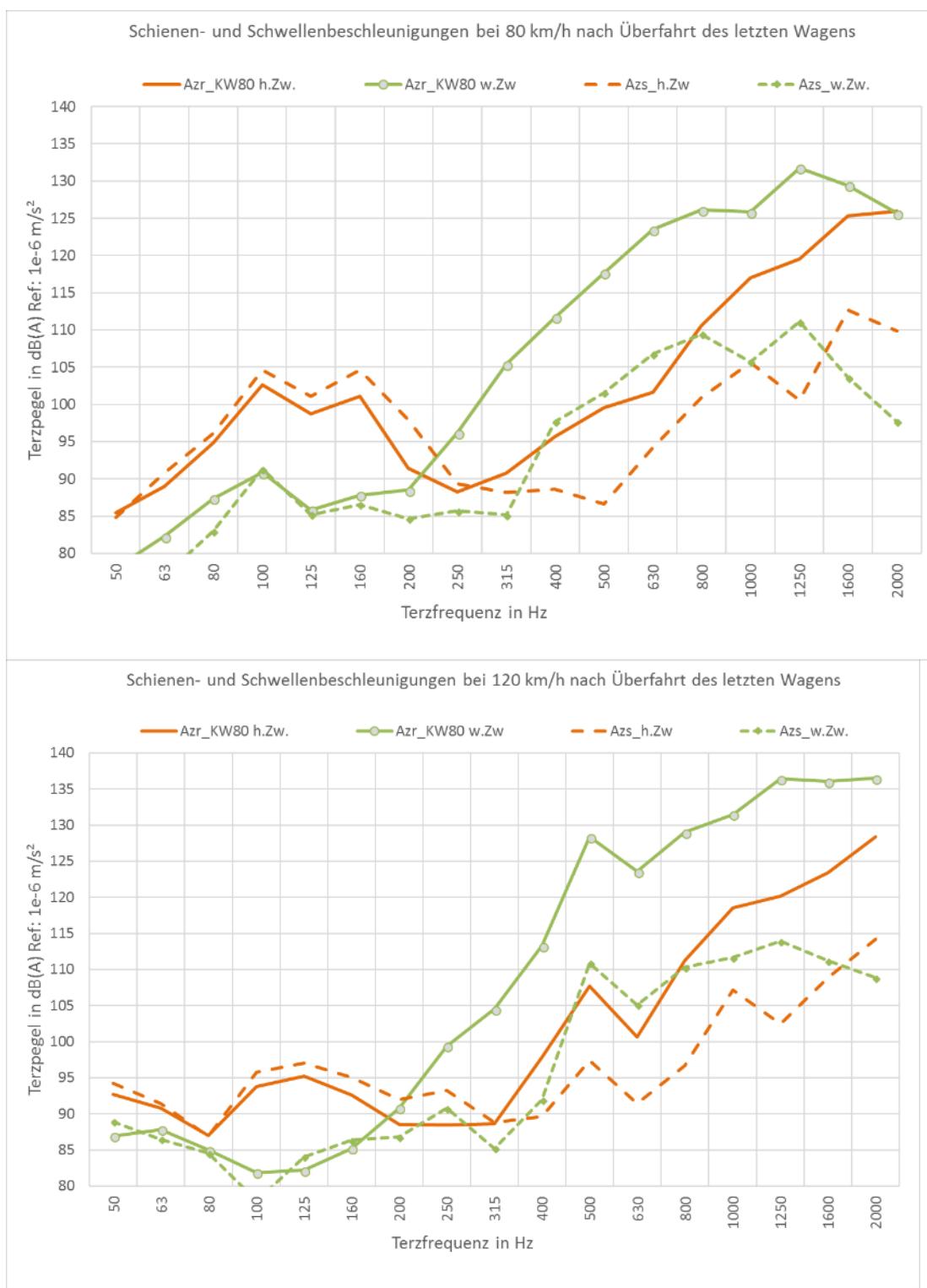


Abbildung 7-28: Schienen- und Schwellenbeschleunigungen nach Überfahrt des letzten Wagens

Die weichen Zwischenlagen führen etwa ab 250 Hz zu einer Erhöhung der Schienenschwingungen und damit zu höherem Luftschall.

7.5 Modalanalysen im eingebauten Zustand

Für einen Vergleich wurden hier die ersten 5 detektierten Eigenmoden dargestellt:

Tabelle 7-7: Eigenfrequenzen und Dämpfungen B70-Betonschwelle im Schotterbett Testgleis Schrey & Veit mit/ohne Schiene

Mode Nr	Mit Schiene			Ohne Schiene		
	f [Hz]	D [%]	Eigenform *	f [Hz]	D [%]	Eigenform *
1	182.22	14.18	1. Biegung vertikal (asymmetrisch)	130.03	14.88	1. Biegung vertikal (asymmetrisch)
2	422.13	8.37	2. Biegung vertikal	392.06	9.35	2. Biegung horizontal + vertikal
3	575.80	6.37	3. Biegung vertikal	768.12	3.85	3. Biegung horizontal + vertikal; längs
4	777.63	2.35	3. Biegung horizontal	1024.65	2.55	Torsion Mittelteil
5	1179.91	2.87	4. Biegung horizontal + vertikal	1141.3	3.58	4. Biegung horizontal

*keine eindeutige Identifizierung (besser erkennbar an der beschichteten Schwelle)

Tabelle 7-8: Eigenfrequenzen und Dämpfungen B91-Betonschwelle im Schotterbett Testgleis Vigier Rail mit/ohne Schiene

Mode Nr	Mit Schiene			Ohne Schiene		
	f [Hz]	D [%]	Eigenform *	f [Hz]	D [%]	Eigenform *
1	186.55	14.46	1. Biegung vertikal (asymmetrisch)	122.88	23.37	1. Biegung vertikal (asymmetrisch)
2	406.19	10.11	2. Biegung vertikal	399.44	12.7	2. Biegung vertikal
3	644.83	3.91	3. Biegung vertikal	694.1	6.59	3. Biegung vertikal
4	815.36	8.85	3. Biegung horizontal	948.34	4.08	keine klare Identifikation
5	1140.61	4.04	keine klare Identifikation	1052.09	3.73	4. Biegung vertikal

Tabelle 7-9: Eigenfrequenzen und Dämpfungen B91 Betonschwellen im Schotterbett und unterschiedliche Anzugsmomente der Schiene

Mode Nr	mit Schiene und 240 kN (korrekt)			mit Schiene und 50 kN (locker)		
	f [Hz]	D [%]	Eigenform *	f [Hz]	D [%]	Eigenform *
1	186.55	14.46	1. Biegung vertikal (asymmetrisch)	197.93	12.73	1. Biegung vertikal (asymmetrisch)
2	406.19	10.11	2. Biegung vertikal	393.7	15.31	2. Biegung vertikal
3	644.83	3.91	3. Biegung vertikal	597.8	10.72	3. Biegung vertikal
4	815.36	8.85	3. Biegung horizontal	769.74	4.63	3. Biegung horizontal
5	1140.61	4.04	keine klare Identifikation	1135.33	2.49	Torsion Mittelteil

*) Die Eigenformen der Betonschwellen im Schotterbett sind infolge der hohen Dämpfungswerte stark komplex. Die einzelnen Moden (Eigenformen) sind deshalb nicht mehr klar definierbar und z.T. stark überlagert. Die Eigenformen manifestieren sich nicht als stehende, sondern als wandernde Wellen. Die Charakterisierung des Modes erfolgt deshalb nur über den dominanten Anteil. Die Dämpfungen der Schwelle im Schotter sind gegenüber den frei gelagerten Schwellen deutlich höher, wohingegen die Eigenfrequenzen sich nur unwesentlich unterscheiden.

Tabelle 7-10: Eigenfrequenzen und Dämpfungen Betonschwellen frei gelagert und im Schotterbett mit / ohne Schiene

B70_1 frei		B70_2 frei		B70 Schotter + Schiene		B70 Schotter	
f [Hz]	D [%]	f [Hz]	D [%]	f [Hz]	D [%]	f [Hz]	D [%]
132.24	1.03	128.5	1.05	182.22	14.18	130.03	14.88
402.69	0.57	388.15	0.6	422.13	8.37	392.06	9.35
659.68	0.77	647.28	0.98	575.80	6.37	768.12	3.85
793.28	0.68	787.1	1.47	777.63	2.35	1024.65	2.55
1243.98	0.61	1212.63	0.83	1179.91	2.87	1141.3	3.58

B91 frei		B91.besohlt frei		B91 Schotter + Schiene		B91 Schotter	
f [Hz]	D [%]	f [Hz]	D [%]	f [Hz]	D [%]	f [Hz]	D [%]
118.42	1.6	122.48	2.09	186.55	14.46	122.88	23.37
369.92	0.61	378.21	1.02	406.19	10.11	399.44	12.7
720.07	1.33	741.82	0.96	644.83	3.91	694.1	6.59
734.45	1.38	798.81	1.53	815.36	8.85	948.34	4.08
1141.37	0.68	1159.04	0.54	1140.61	4.04	1052.09	3.73

Im Forschungsprojekt OST wurden auch Modalanalysen an Betonschwellen durchgeführt, wobei sich die Eigenfrequenzen ähnlich verhalten wie bei den Versuchen von PROSE.

Tabelle 7-11: Vertikale Biegeeigenformen der Schwelle Projekt OST – ZEV Rail 10/2018 [20]

Eigenform	Messung in Hz	Berechnet in Hz
Schwelle, 1. Biegeeigenform	131	113 - 135
Schwelle, 2. Biegeeigenform	312	310 - 352
Schwelle, 3. Biegeeigenform	685	684
Schwelle, 4. Biegeeigenform	1095	1094
Schwelle, 5. Biegeeigenform	1527	1535

Für die Messungen im Gleis inklusive Schiene und Schotter haben sie die folgenden Eigenformen gefunden.

Tabelle 7-12: Eigenformen des gesamten Gleises Projekt OST – ZEV Rail 10/2018 [20]

Eigenform	Messung in Hz	Berechnet in Hz
Schwelle Rotation um Gleissymmetriechse	41,3	30 - 41,2
Vertikale Durchbiegung des gesamten Gleises	51,3	31 - 51,3
Schwelle, 1. Biegeeigenform	131	113 - 135
1. laterale Pin-Pin-Biegeeigenform	494,0	494,6
1. vertikale asymmetrische Pin-Pin-Biegeeigenform	998,0	1015,8
1. vertikale symmetrische Pin-Pin-Biegeeigenform	1052,0	1063,6
1. laterale Pin-Pin-Biegeeigenform	1389,0	1438,1
2. laterale Pin-Pin-Biegeeigenform	1734,0	1764,3

7.6 Akustik Modell eines Gleisoberbaus

Die Schallabstrahlung des gesamten Gleises sollte analytisch mit Hilfe eines TWINS-Modells über die Schwingungsanteile der Schwellen und Schiene aus FEM-Modellen von PROSE berechnet werden. Eine realistische Anregung der Schiene mittels MKS-Modell (Fahrdynamik) und Rauheitsannahmen sowie eine numerische Berechnung des Luftschalls, wie im OST-Projekt durchgeführt, erscheint als zu komplex, da die Anzahl der Parameter schwer zu handhaben ist.

Da in den Messungen die Schallabstrahlung der Betonschwellen kaum erfasst werden kann, der Schienenschall dafür umso besser, ist der Wirkungsansatz einer optimierten Betonschwellen nun auf die Erhöhung der TDR ausgerichtet. Aus dem Projekt Shift2Rail und der Quellenidentifizierung ging der Zusammenhang TDR und Schienenschall hervor.

$$\Delta L_{Rail,V} = -10 \log_{10} \left(\frac{TDR_{V,STD}}{TDR_V} \right)$$

$$\Delta L_{Rail,L} = -10 \log_{10} \left(\frac{TDR_{L,STD}}{TDR_L} \right)$$

Formel 2

Die TDR ist einfach am Gleis bzw. Testgleis zu messen und kann in der FEM abgebildet werden, somit wurde entschieden, die Transferfunktionen einer Kraftanregung an einem 6m langem Testgleis analog zur Messung mit Impulshammer im FEM Modell für die unterschiedlichen Oberbautypen zu berechnen.

7.7 Einfluss der Klemmkräfte

Am 24.06.2019 wurden in Müntschemier Versuche bezgl. verschiedener Anzugsmomente der Klemmung W14 an einem Testgleis mit B91-Schwellen und UIC 60-Schiene gemacht. Dabei wurden von 150 Nm bis 250 Nm in 25-Nm-Schritten die TDR auf beiden Schienen gemessen.

Die Messwerte HL150 bedeuten z.B. "harte Zwischenlage linke Schiene mit 150 Nm Moment". Zum Vergleich ist die Messung HL vom Dezember 2018 mit angegeben.

Tabelle 7-13: Ergebnisse vertikale TDR bei unterschiedlichen Klemmkräften

Ri	Terz	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
	limit_TDz	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	6.0	6.0	6.0	2.1	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
Z	HL	3.7	3.5	4.0	4.9	4.7	4.9	5.2	5.3	5.3	5.5	4.5	5.1	4.5	2.1	1.1	1.9	1.1	0.5
Z	HL150	3.4	4.1	3.9	5.3	5.5	5.2	5.9	4.9	4.9	3.8	2.5	3.9	1.0	0.5	0.4	0.6	0.4	0.6
Z	HL175	3.2	4.0	4.0	5.0	5.3	5.3	5.9	5.3	5.1	4.1	2.8	3.5	1.1	0.6	0.6	0.7	0.5	0.8
Z	HL200	3.1	3.5	3.9	5.1	5.3	5.2	5.9	5.4	5.2	4.3	3.0	4.0	1.6	0.6	0.6	0.8	0.9	0.7
Z	HL225	3.7	4.2	4.3	5.8	6.1	6.0	5.9	5.8	5.3	4.1	3.1	4.4	1.5	0.7	0.5	0.9	0.9	0.8
Z	HL250	3.3	3.6	4.0	5.4	5.4	5.8	4.7	5.5	5.1	5.0	3.4	4.5	3.7	1.3	0.8	1.3	1.0	0.5
Z	HR250	3.4	3.3	4.2	6.1	5.0	5.8	5.8	6.3	5.7	4.9	2.8	4.1	2.2	1.6	0.6	2.1	0.4	0.6

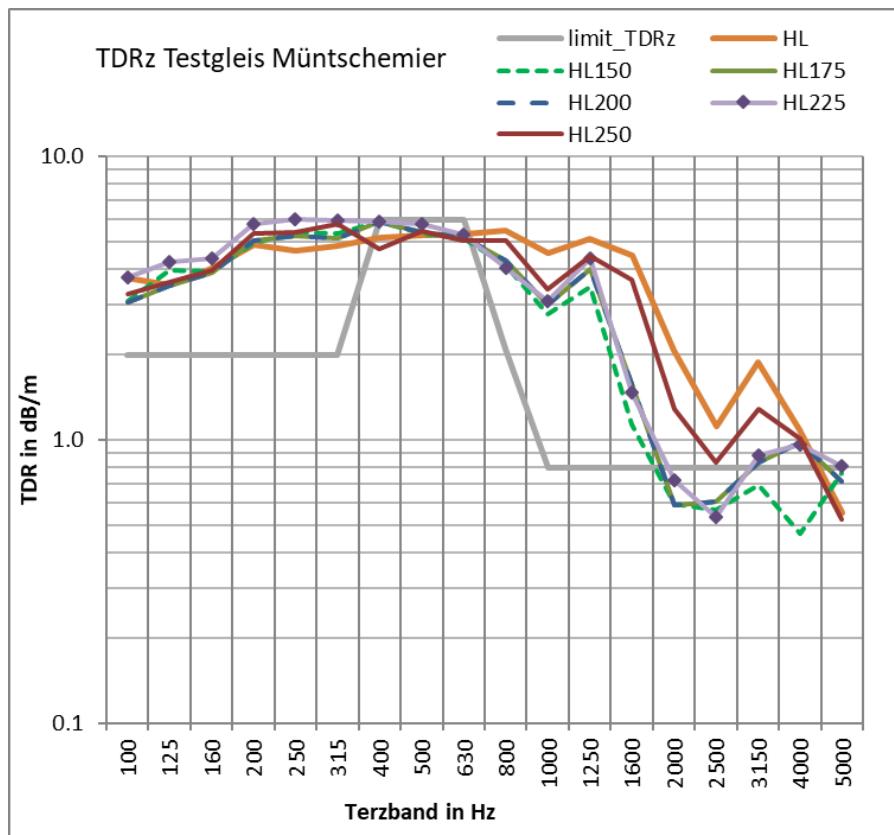


Abbildung 7-29: Messergebnis vertikale TDR am 6m Testgleis mit B91 und UIC60 bei unterschiedlichen Anzugsmomenten der Schrauben

Die Temperaturen waren am Messtag bei etwa 30 °C, sodass die Schiene etwa 45 °C hatte. Dies erklärt den etwas tieferen Verlauf der HL250 Kurve gegenüber der Messung im Dezember in der HL Kurve.

Tabelle 7-14: Ergebnisse laterale TDR bei unterschiedlichen Klemmkräften

Ri	Terz	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
	limit_TD	3.0	3.0	3.0	3.0	2.0	1.4	0.9	0.6	0.4	0.3	0.2	0.2	0.3	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
y	HL	3.2	5.5	6.0	6.4	6.0	3.8	0.9	0.7	0.4	0.2	0.1	0.0	0.5	0.7	1.7	1.7	2.3	0.7
y	HL150	4.7	5.8	5.9	5.3	2.2	1.2	0.5	0.4	0.3	0.3	0.1	0.0	0.7	0.6	1.5	2.8	2.1	1.5
y	HL175	4.7	5.6	6.0	5.6	2.3	1.3	0.6	0.4	0.3	0.4	0.1	0.0	0.6	0.6	1.5	2.7	2.2	1.6
y	HL200	4.6	5.4	5.7	5.3	2.4	1.3	0.5	0.3	0.2	0.3	0.1	0.0	0.6	0.6	1.2	2.1	1.7	0.9
y	HL225	4.5	5.4	6.1	5.5	2.4	1.3	0.5	0.4	0.3	0.3	0.1	0.0	0.6	0.6	1.2	2.1	1.8	1.1
y	HL250	4.6	4.8	6.2	6.0	3.7	2.6	0.5	0.5	0.3	0.2	0.0	0.0	0.6	0.6	1.5	2.3	2.2	1.1
y	HR250	3.1	6.0	5.9	4.7	3.3	0.7	0.3	0.1	0.4	0.1	0.1	0.0	0.4	0.7	1.0	2.6	1.7	0.6

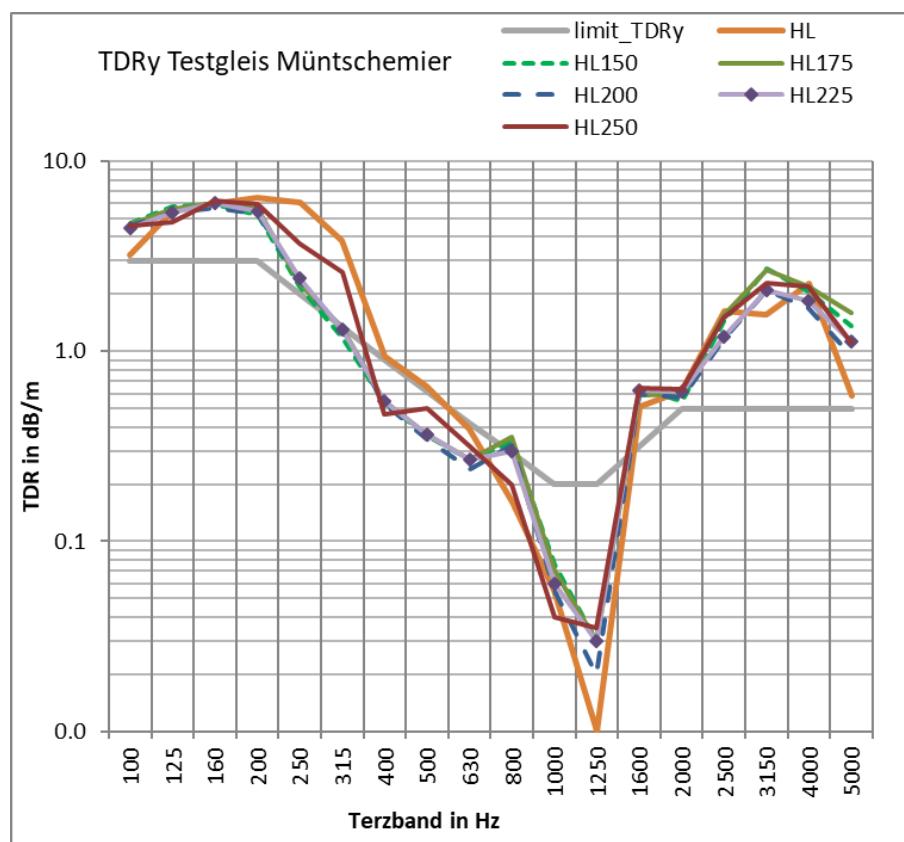


Abbildung 7-30: Messergebnis vertikale TDR am 6m Testgleis mit B91 und UIC60 bei unterschiedlichen Anzugsmomenten der Schrauben

In der vertikalen TDR ist der Effekt der Klemmung mit niedrigerem Drehmoment ab einem Frequenzbereich von 800 Hz zu erkennen. Besonders stark ist dies im Frequenzbereich zwischen 1600 Hz und 4000 Hz zu beobachten. In den lateralen TDR ist die Abhängigkeit zur Klemmkraft kaum erkennbar, die Kurven liegen sehr dicht beieinander.

Ein Verlust der Vorspannung an der Schienenklemmung, z.B. durch den Rückgang des Anzugsdrehmoments der Schrauben führt zur weniger Dämpfung und damit zu mehr Schienenschall.

8 Optimierungsprozess

8.1 Analyse und Bewertung

Mittels eines morphologischen Kastens wurden verschiedene Ansätze für Optimierungen analysiert und bewertet. Hier waren die gesamten Erfahrungen und Erkenntnisse der Messungen von grossem Vorteil, welche in den vorhergehenden Phasen gemacht wurden und oben beschrieben sind.

Bevor der morphologische Kasten in einem Workshop zwischen PROSE und Vigier Rail (plus einer projektfremden Person von PROSE) erarbeitet werden konnte, mussten die Kriterien für die Bewertung der Varianten festgelegt werden. Für jedes Kriterium können zwischen 0 und 3 Punkten vergeben werden, wobei die Bewertungskriterien für jede Punktzahl genau definiert wurden. Die Gewichtung dient dazu, um das Kriterium stärker oder schwächer zu bewerten.

Tabelle 8-1: Definition der Kriterien mit Gewichtung und Bewertung

Kriterium	Gewichtung	Punkte	Bewertung
Lärm	10	0	Schlechter als B91
		1	Gleich oder minim besser
		2	Etwas besser
		3	Massiv besser
LCC	5	0	Schlechter als B91
		1	Gleich oder minim besser
		2	Etwas besser
		3	Massiv besser
Umsetzung Vigier	7	0	Nicht umsetzbar
		1	Mit leicht mehr Aufwand
		2	Mit gleichem Aufwand
		3	Mit weniger Aufwand
Umsetzung Infrastruktur	5	0	Nicht umsetzbar
		1	Mit leicht mehr Aufwand
		2	Mit gleichem Aufwand
		3	Mit weniger Aufwand
Abgrenzung / Risiken	3	0	Unklar / Grosse Risiken
		1	Leichte Risiken
		2	Gleich
		3	Besser / kleine Risiken
Kosten/Nutzen	7	0	Keinen Nutzen
		1	Leichter Nutzen
		2	Etwas Nutzen
		3	Grosser Nutzen

Der morphologische Kasten wurde im gemeinsamen Workshop ausgefüllt. Dabei wurden - losgelöst von jeglichen Überlegungen zur Machbarkeit oder zum Sinn - alle Ideen aufgeschrieben. In einem zweiten Schritt wurden im selben Workshop alle Ideen mit der Tabelle von Tabelle 8-1 bewertet. Der gesamte morphologische Kasten ist im Anhang C zu finden.

Mit dem kompletten morphologischen Kasten wurden in einer Nutzwertanalyse die Ideen zueinander verglichen. Damit liessen sich die besten vier Ansätze herausnehmen. Diese haben die höchste Punktzahl. Die komplette Nutzwertanalyse ist in Anhang E.2 zu finden. Die Idee Nr. 36 und Nr. 38 unterscheiden sich nur minimal und werden deshalb gemeinsam bearbeitet.

Tabelle 8-2: Ergebnisse der Bewertung

		Lärm	LCC	Umsetzung Vigier	Umsetzung Infra	Klar abgegrenzt / Risiken	Kosten Nutzen	
	Gewichtung	10	5	7	5	3	7	
N	Bezeichnung	Punkte	Punkte	Punkte	Punkte	Punkte	Punkte	Punkte
1	Schwelle schwerer mit grosserem Volumen	3	3	2	1	3	3	94
6	breiter auf Befestigungsseite - Mit zusätzlicher Befestigung	3	3	2	1	2	3	80
36	Konstante Klemmkraft --> Setzen von Zwischenlage	3	3	2	2	1	3	80
38	Wandstärke Dübel	3	3	2	2	1	3	80

8.2 Optimierungsansätze

Es werden vorweg ein paar grundsätzliche Überlegungen zur Geometrie von Betonschwellen und deren technischer und akustischer Eigenschaften genannt.

Tabelle 8-3: Optimierungsansätze und technische / akustische Eigenschaften

Aspekt	Technische Eigenschaft	Akustische Eigenschaft / Wirkung
Form B91	Dauerfestigkeit	Bei harter Zw gute Ankopplung der Schiene
Enden breit	Optimale Materialnutzung	Hohe TDR
Mitte schlank tailliert	Hoher Querverschiebewiderstand	Verhältnis Beton / Schotter klein – gute Absorption
Höhe	Bester Kompromiss im Gleisbau	Dämpfung im Schotter
Masse	Transport und Logistik Liegestabilität	Sperrmasse TDR
Breite Kopfseite	Schwellenfach wird schmäler	Verhältnis Beton / Schotter gross – wenig Absorption
Schmale Kopfseite	Schwellenfach wird breiter	Verhältnis Beton / Schotter klein – gute Absorption
Absorb. Kopfseite	Keine Änderung Für Wartung und IS relevant	Erhöhung der Absorption zwischen den Schienen
Weniger Höhe	Schwellen mit geringerer Höhe benötigen weniger Unterschotterung – Tunnelbau	Soweit sich das Verhältnis Beton /Schotter nicht ändert Die Eigenfrequenzen verschieben sich leicht.
Mehr Höhe	Schwellen mit mehr Höhe benötigen Eine tiefere Unterschotterung, Freie Strecke	Schwellenabstand bleibt mit 60cm bestehen. Akustischer Effekt wird gering eingeschätzt.
Befestigung einfach	Bewährte Befestigung optimaler Materialeinsatz	Periodische Schienenbefestigung Ausgeprägte Schwingungsformen Pin-Pin
Befestigung doppelt	Neuartige Befestigung z.T doppelter Materialeinsatz	Aperiodische Befestigung oder doppelte Kraft Änderung der Schwingungsformen

8.2.1 Höhere Schwellenmasse

Eine B91-Schwelle wiegt 280 kg, wobei der grösste Teil der Masse vom Beton ausgeht.

Wenn die Schiene steif mit der Schwelle verbunden ist, z.B. mittels harter Zwischenlage, wird durch die Massenverhältnisse und Reibung im Schotterbett die Schwingungsausbreitung in der Schiene und damit deren Schallabstrahlung reduziert.

In dem ersten Optimierungsansatz wird die Schwelle massiv schwerer gemacht, es wird von einer Gesamtmasse von ca. 500 kg ausgegangen (+66%).

Das kostengünstigste Material bei der Schwelle ist der Beton, deshalb soll die Schwelle durch dieses Material schwerer gemacht werden. Die Geometrie, vor allem auf der oberen sichtbaren Seite, soll so wenig wie möglich verändert, darum ist es sinnvoll die Schwelle nach unten aufzudicken.

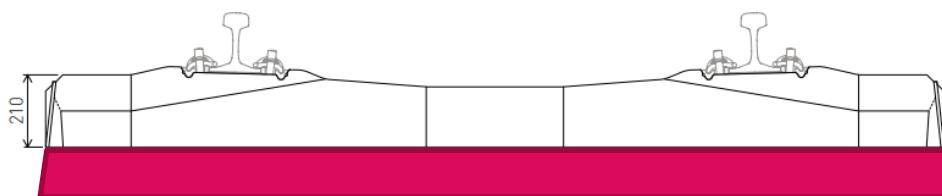


Abbildung 8-1: Mehr Masse der B91-Schwelle

In einem ersten Schritt sind Berechnungen mit einer schwereren Schwelle vorgesehen. Später sollen solche Schwellen bei Vigier Rail als Prototyp hergestellt werden, welcher im bestehenden Testaufbau gemessen werden kann.

8.2.2 Zusätzliche Befestigungen

Die Befestigung der Schiene erfolgt bei einer B91-Schwelle immer in der Mitte mit einer Schraube pro Seite. Dies ergibt durch einen konstanten Schwellenabstand von 60 cm eine regelmässige Fixierung der Schwelle bei 60 cm.

Dieser Ansatz verfolgt die Idee, dass ein weiterer Befestigungspunkt auf jeder Seite der Schiene realisiert wird. Dadurch muss die Schwelle lokal verbreitert werden.

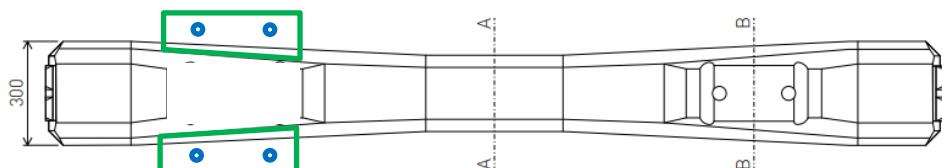


Abbildung 8-2: Verbreiterung mit zusätzlicher Schienenbefestigung (für beide Schienenenden umzusetzen)

Indem zwei Befestigungen auf jeder Seite der Schwelle ermöglicht werden, können mehrere Szenarien der Befestigungen ermöglicht werden:

1. Vier Schrauben statt zwei pro Schiene: Die Verdoppelung der Schrauben bewirkt eine Verkürzung der frei schwingenden Schiene. Zusätzlich wird durch die zusätzliche Befestigung die Schiene stärker an die Schwelle gebunden sowie die Stabilität des Gleisrostes erhöht.

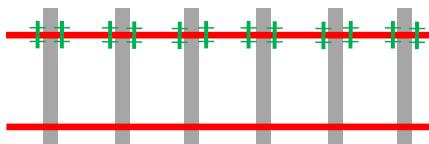


Abbildung 8-3: Doppelte Befestigungen

2. Verschraubung in unregelmässigen Abständen: Die Schiene könnte alternierend im anderen Schraubenloch befestigt werden.

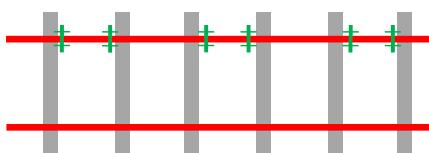


Abbildung 8-4: Unregelmässige Befestigungen

Durch die aperiodischen Abstände der Befestigungen bilden sich Eigenformen der Schiene anders aus. Unter dynamischen Gesichtspunkten sind Symmetrien möglichst zu vermeiden.

Da dies einen relevanten Einfluss auf die Schallabstrahlung der Schiene hat, haben die Berechnungen mit unserem FEM Modell gezeigt.

8.2.3 Schienenklemmung über der Zeit

Die Schienenklemmung W14 ist so ausgelegt, dass die Schiene im unbelasteten Zustand durch zwei Schrauben und der SKL14-Feder mit rund 18 kN fixiert wird. Dabei liegt die mittlere Lasche der SKL14 noch nicht auf dem Schienenfuss auf, sie dient als Kippsicherung bei besonders hohen Seitenkräften. Für die Herstellung dieser Spannkraft müssen die beiden Schrauben mit einem Drehmoment von 200 Nm angezogen sein. Durch die Vibrationen im Betrieb und Setzung geht über die Zeit etwas Spannkraft verloren, sodass Gleisbauer bei Unterhalt und Modernisierung die Schrauben i.d.R. mit 240 Nm anziehen.

In der Praxis können die Drehmomente der Klemmschrauben mitunter bis auf 150 Nm sinken, mit der Folge niedriger Klemmkräfte unter 15 kN. Dies hat zwar keine sicherheitsrelevante Auswirkung, jedoch unterscheidet sich die Schienenschallabstrahlung der beiden Zustände erheblich, da die Schienendämpfung direkt mit der Klemmkraft zusammenhängt.

PROSE hat neben der Schwellengeometrie auch noch Untersuchungen zur Schienenklemmung innerhalb dieses Projekts angestellt. Dieser Ansatz wurde messtechnisch am Testgleis über verschiedene Anzugsdrehmomenten ermittelt.

Bei den neuen Schwellentypen mit breitem Kopf sollen im ersten Ansatz Standardklemmungen (W14-Zwischenplatte und -Klemme) verwendet werden, da die Infrastruktur grosse Vorbehalte gegenüber neuen Bauteilen hat. Die Bohrungen für die Dübel müssen dann 150mm auseinander liegen und führen zu der Breite am Kopf von 320mm. Bei der Flachschwelle B06 liegen die Bohrungen enger zusammen, was jedoch ein neues Klemmsystem benötigt, da die Standardklemmung W14 mit 150mm zu breit hierfür ist. Diese Optimierung sollte im Anschluss an die Versuche mit Prototypen für die Serie angegangen werden.



Abbildung 8-5: W14-Klemmung Standardbauteil B91 Oberbau SBB

Eine Entwicklung einer neuen Klemmung benötigt jedoch erweitertes Wissen. Es wird angenommen, dass die Klemmung mit einem definierten Drehmoment (durch die Gleisbaufirmen) mittels eines drehmomentgesteuerten Geräts angezogen wird. Die Reduktion der Klemmkraft bzw. des Drehmomentes kann verschiedene Ursachen haben, z.B. Ausdrehen der Schraube, Nachlassen des Klemmbügels, Setzen der Zwischenlage, Setzen des BefestigungsdüBELS, etc. Die Erarbeitung dieses Wissens geht über den Arbeitsumfang der Entwicklung einer Betonschwelle hinaus und hat kaum noch etwas mit der Fertigung von bahnspezifischen Betonprodukten von Vigier Rail zu tun.

8.3 Designprozess

Im Projekt optimierte Betonschwelle soll ein neuer Betonschwellentyp entwickelt werden, mit dem die Schallabstrahlung des Gleises reduziert werden kann. Die Schallabstrahlung der Betonschwellen (B70, B91) und der Schiene wurden vorab messtechnisch am realen Gleis und an zwei Testgleisen untersucht. Bei Vigier Rail entstand im Frühjahr 2018 ein 6m langes Testgleis zur Messung der Schwingungsübertragung und Schallabstrahlung von Schwellen und Schiene.

Die daraus hervorgegangenen Designideen wurden anschliessend als FEM-Modelle umgesetzt und über die ermittelte TDR akustisch bewertet.

8.3.1 Messung der TDR am Testgleis

Mit dem 6m langem Testgleis bei Vigier Rail wurde ein realistischer, wenn auch kurzer Gleisabschnitt im Freien aufgebaut, an dem gefahrlos Schall- und Schwingungsmessungen durchgeführt werden können. Die TDR-Messung an einer 6m langen Schiene findet nach in Anlehnung an die EN 15641 statt, indem lediglich die Transfereigenschaften von einem

Schienenende zum anderen Schienenende gemessen werden (AB = von A nach B, BA = von B nach A). Dieses Verfahren wurde im Rahmen des STARDAMP-Forschungsprojektes entwickelt und auf den Parkplatztests der SBB-Schienenstegdämpfer-Erprobung angewandt.



Die Ergebnisse der TDR Messungen mit harter Zwischenlage sehen grundsätzlich plausibel aus. Bei der TDRy im Frequenzbereich zwischen 800 und 1600 Hz ist aufgrund der kurzen Schiene die Auswertung eingeschränkt möglich. Aufgrund der geringen Dämpfung an den Enden ist die Dämpfung hier sehr gering und geht gegen Null. Auf realem Gleis mit "unendlicher" Schienenlänge sind hier Dämpfungswerte oberhalb der Grenzkurve TDRy_Limit zu erwarten.

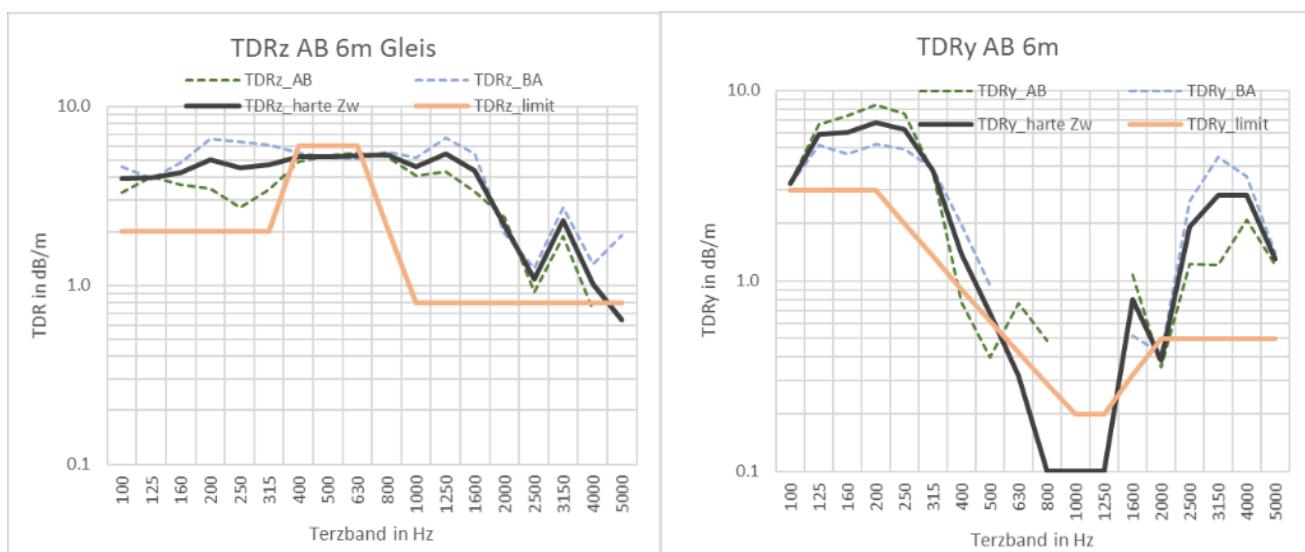


Abbildung 8-6: TDRz und TDRy gemessen am Testgleis von Vigier Rail 11-2018

In einer Veröffentlichung von David Thompson (ICSV25, Japan 2018) wurden die mechanischen Parameter für ein Betonschwellengleis mit harter und weicher Zwischenlage wie folgt angegeben:

Table 4: Track properties used in the TWINS models for assessment of rail shields

		Vertical	Lateral
Rail	Bending stiffness	6.42 MNm ²	1.07 MNm ²
	Damping loss factor	0.02	0.02
	Shear factor	0.4	0.4
	Mass per unit length	60 kg/m	
	Cross receptance factor	-7 dB	
Pad	Stiffness (soft pad)	150 MN/m	25 MN/m
	Stiffness (stiff pad)	800 MN/m	66 MN/m
	Damping loss factor	0.2	0.2
Sleeper	Mass*	150 kg	
	Spacing	0.6 m	
Ballast	Stiffness**	105 MN/m	35 MN/m
	Damping loss factor	1.0	2.0

*: flexible sleeper model is used

**: frequency dependent stiffness is used for vertical direction

Abbildung 8-7: D. Thompson et. al. Eingangsparameter Simulation TWINS

Daraus sind die Dimensionen der Steifigkeit bei vertikaler und lateraler Anregung zu entnehmen ($1 \text{ MN/m} = 1 \text{ kN/mm}$) und es können zwei Schlussfolgerungen für die TDR-Messung daraus abgeleitet werden:

1. Die Biegesteifigkeit der Schiene ist vertikal etwa 6x höher als lateral. Somit fallen die lateralen TDR im mittleren Frequenzbereich immer niedriger aus als die vertikalen TDR.
2. Die Steifigkeit bei den Zwischenlagen ist vertikal 6-12x höher als lateral und der Unterschied von weicher zu harter Zwischenlage fällt vertikal grösser aus als lateral. Damit fallen bei unterschiedlichen Klemmkräften der Schiene oder Zwischenlagenmaterialien die Unterschiede bei Messungen mit vertikaler Anregung grösser aus als bei lateraler Anregung.

Analog zum Testgleis wurde ein FEM-Modell mit aufgebaut. Hierzu wurden jeweils 9 Schwellen eines Typs mit 6m langen Schienenstücken verbunden, welche über diskrete Lagerpunkte durch Rigid Body Elements und einem Federelement angebunden sind. Ein Federelement zwischen Schwelle und Schiene repräsentiert dabei sowohl die harte Zwischenlage mit 700 kN/mm als auch die Klemmverbindung mit 18 kN. Die Eigenschaften dieses Elements wurden mit dem FEM-Modell für das Referenzgleis mit B91-Schwellen durch Parameteränderungen derart abgeglichen, so dass plausible TDR-Verläufe ähnlich zu den gemessenen Verläufen erzeugt werden konnten. Somit bildet es die Nullreferenz zur Beurteilung der vier Varianten mit neuartigen Betonschwellen. Der Schotter wurde auch durch Federelemente modelliert. Die Eigenschaften dieser Elemente wurden aus vorhandenen Daten berechnet und mit den gemessenen TDR-Verläufen plausibilisiert.

Typ	Beschreibung	Breite Schienenkopf (oben / unten) mm	Masse kg
B91	Referenz	160 / 300	300
Heavy Duty – BHD	Wie B91 mit 10cm tieferer Sohle	320 / 400	425
Railbone Dual Fixing BRBd	Wie B91 mit verbreiterten Köpfen, doppelte Schienenbefestigung	320 / 400	400
Railbone Asymmetric BRBa	Wie B91 mit verbreiterten Köpfen, asymmetrische Schienenbefestigung	320 / 400	400
Hammerhead Asymmetric BHH	Wie B91 mit einem schmalen und einem verbreiterten Kopf, einfache / doppelte Schienenbefestigung	160 / 300 vorne 320 / 400 hinten	350

Für die Bewertung der akustischen Eigenschaften der jeweils im Testgleis enthaltenen Betonschwellen und Zwischenlagen wurde die TDR herangezogen, die Schienendämpfung. Bei allen Modellen wurde eine harte Zwischenlage mit 150*160 mm Auflage und 700 kN/mm Steifigkeit angenommen.

Die TDR einer Schiene an einem realen Gleis wird normgerecht nach EN 15461 gemessen, wobei über 40m in vorgegebenen Intervallen Übertragungsfunktionen mittels Impulshammer gemessen werden. An einem kurzen Gleisstück von nur 6m Länge muss abweichend von der Norm gemessen werden, da Reflexionen an den Schienenenden das Ergebnis beeinflussen. Daher wird die TDR nach der STARDAMP-Methode über eine Messung der Übertragungsfunktion einer mechanischen Anregung von einem Schienenende zum anderen ermittelt.

Aus der FEM wurden dynamische Transferfunktionen bei einer Punktanregung an einem Schienenende zwischen 100 und 3000 Hz mit einer Auflösung von 6.25 Hz gerechnet. Diese Schmalbandspektren wurden dann in Terzspektren umgewandelt, mit denen die TDR-Kurven berechnet werden konnten.

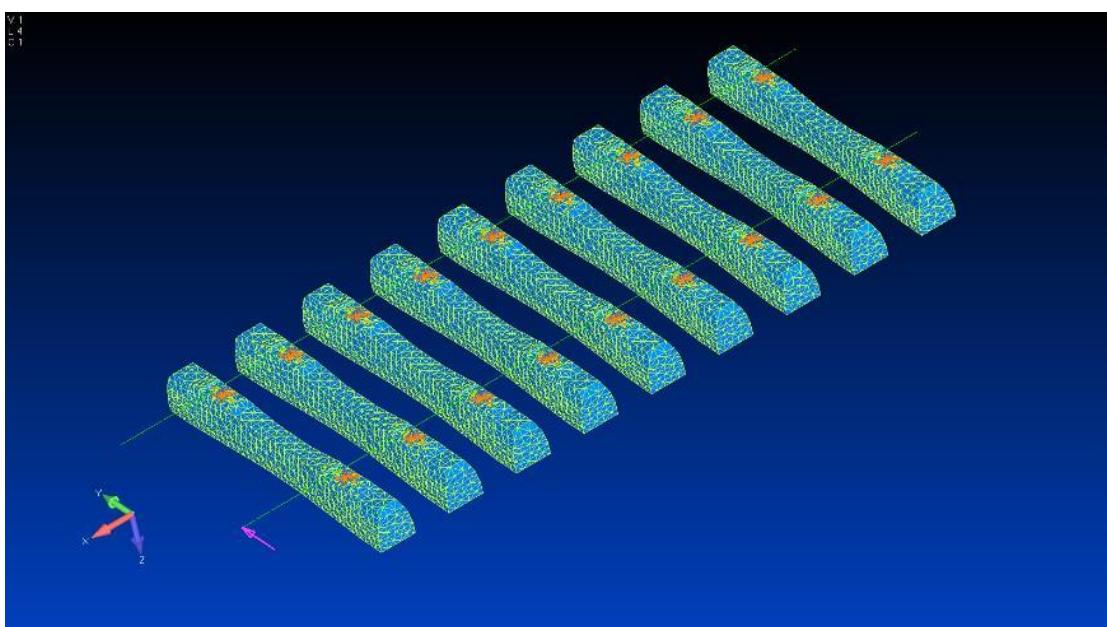


Abbildung 8-8: Heavy Duty, tiefere Schwelle

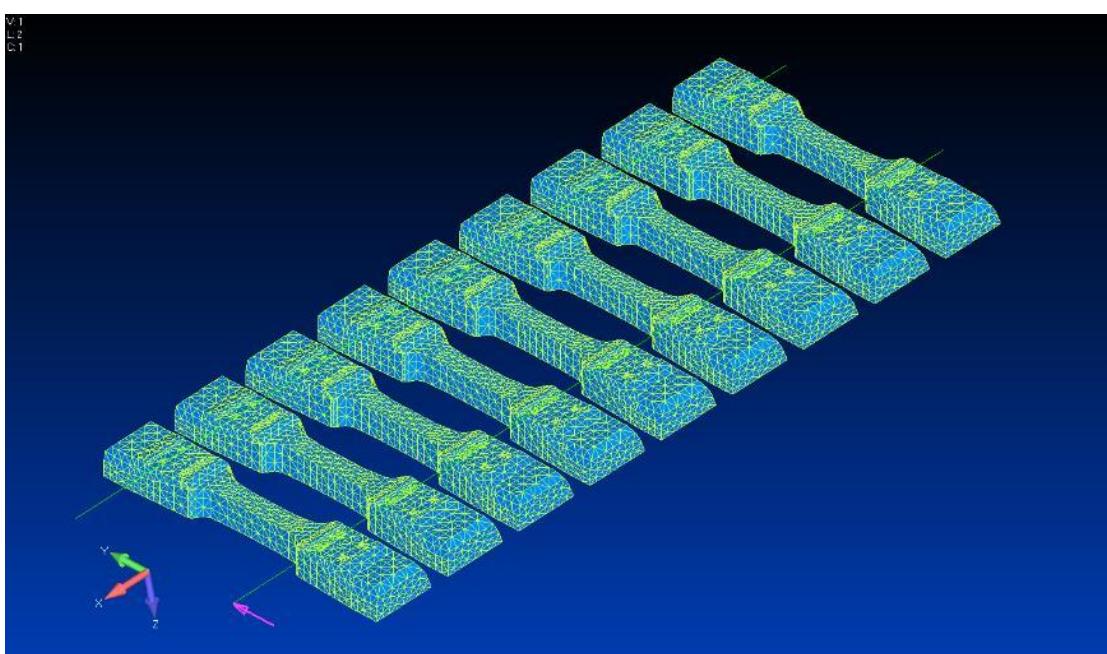


Abbildung 8-9: Railbone mit doppelter Schienenbefestigung

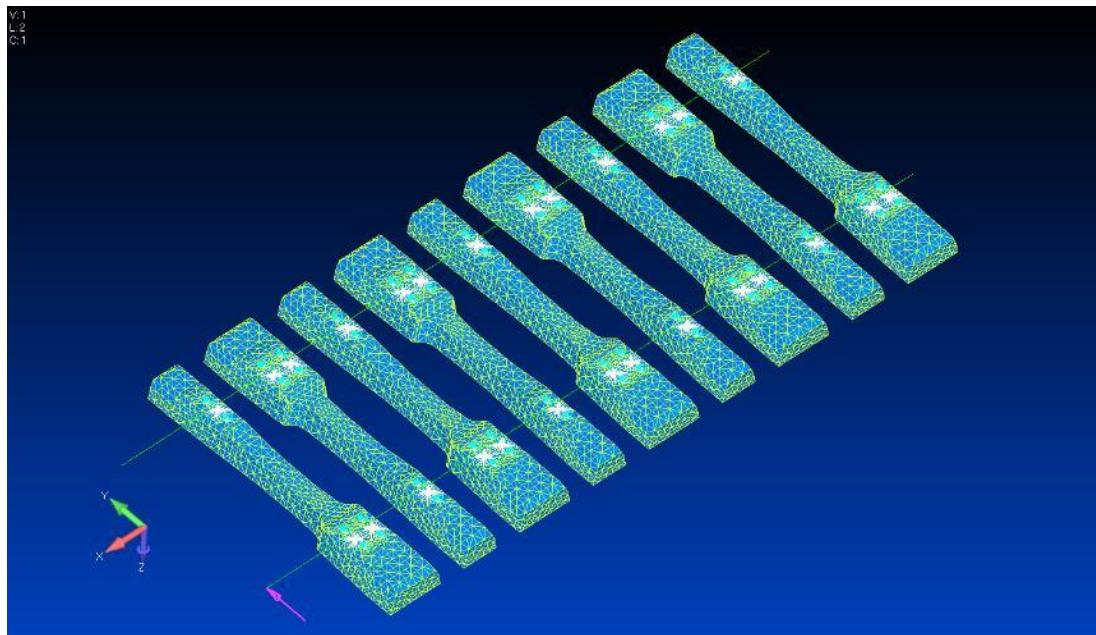


Abbildung 8-10: Hammerhead mit alternierender Verlegung

Die Berechnung der Hammerhead-Schwelle erfolgte mit einer entsprechenden Schwelle, die alternierend verlegt mit jeweils einer doppelten Schienenbefestigung und der einfachen Schienenbefestigung modelliert wurde.

8.3.2 Berechnung der TDR in den FEM Modellen

Aus den FEM Berechnungen wurden zunächst Schmalbandspektren zwischen 90 Hz und 3500 Hz berechnet, aus denen dann Terzspektren für die TDR bestimmt werden konnten.

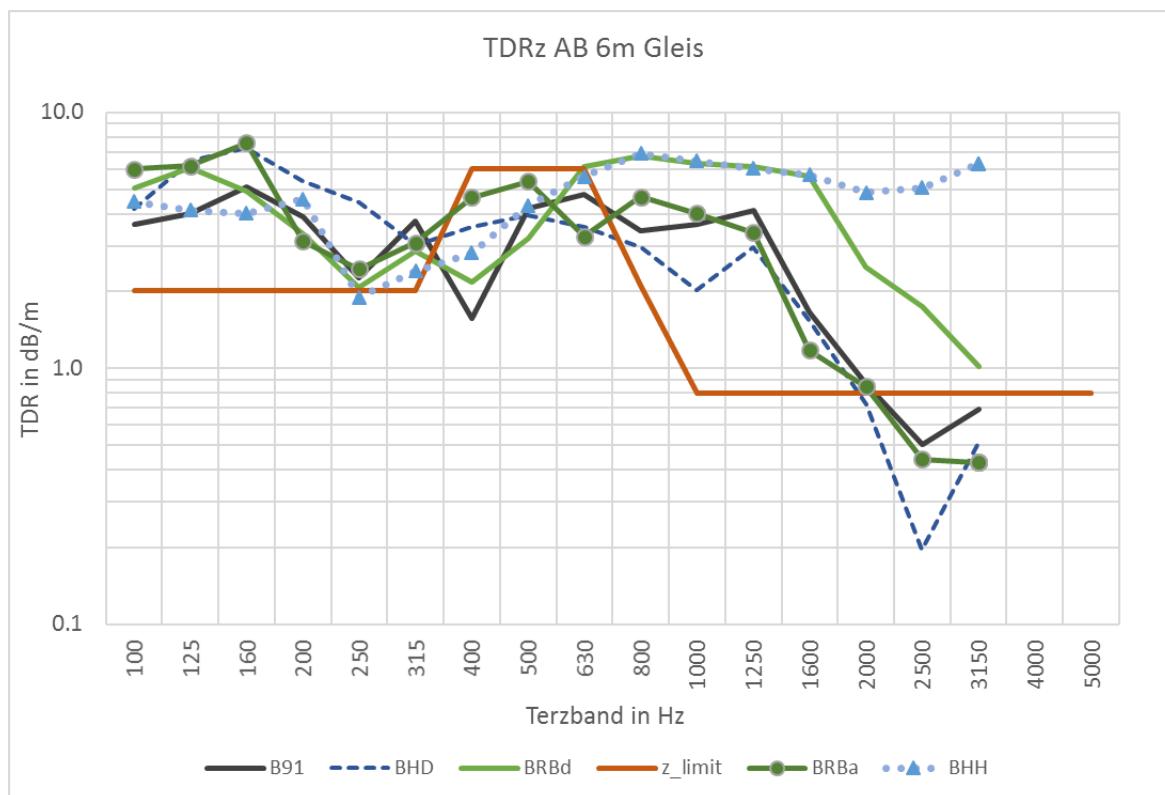


Abbildung 8-11: TDRz aus FEM Simulation mit den fünf Betonschwellenvarianten vom 7.2.2019

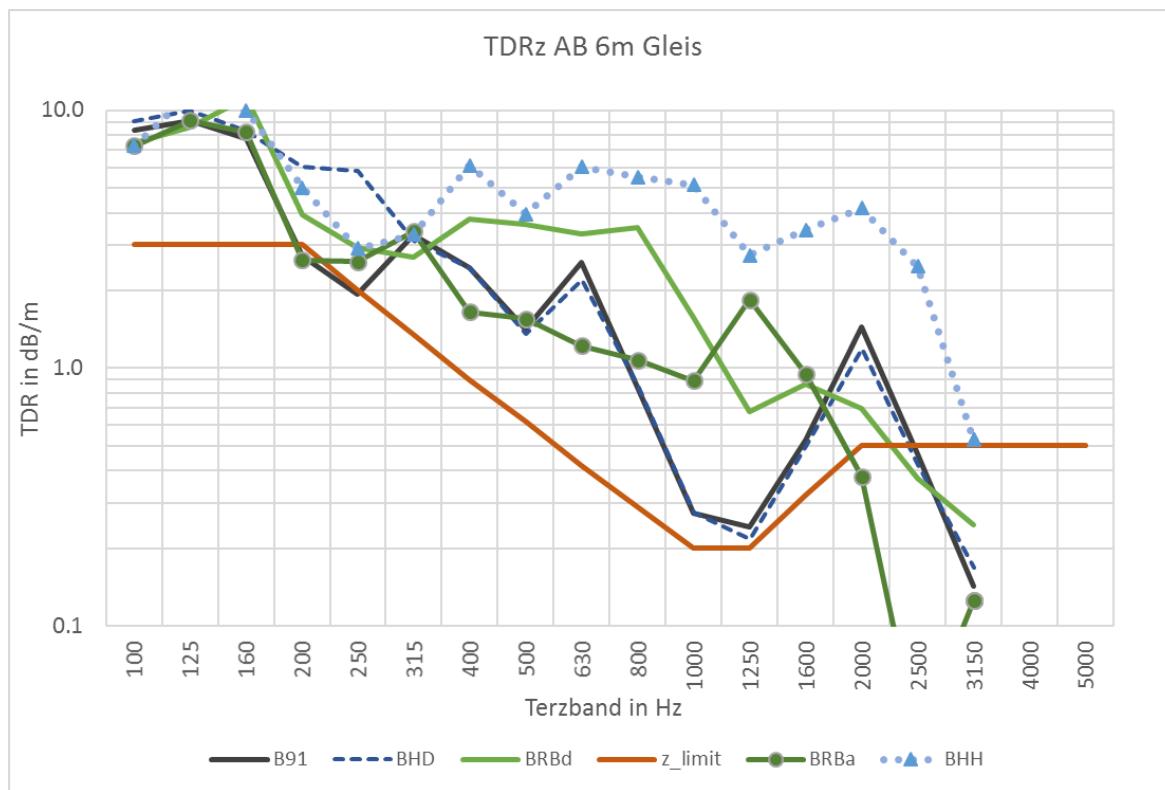


Abbildung 8-12: TDRy aus FEM Simulation der fünf Betonschwellenvarianten vom 7.2.2019

Die Hammerhead-BHH-Schwelle zeigt die höchste Änderung in vertikaler und horizontaler TDR, gefolgt von der Railbone mit doppelter Schienenbefestigung BRBd. Eine Schwelle mit höherer Masse Heavy Duty BHD erweist sich hingegen als kaum pegelmindernd, allenfalls im unteren Frequenzbereich zwischen 100 und 400 Hz hat diese Schwelle Vorteile. Auch die Railbone mit asymmetrischer Befestigung BRBa zeigt zu wenig Effekt in der Simulation.

Die TDR Werte können auch als Zahlen in Tabellenform ausgegeben werden.

Tabelle 8-4: Ergebnisse TDRz aus der FEM Simulation

Freq	B91	BHD	BRBd	BRBa	BHH	Ref
Hz	dB/m	dB/m	dB/m	dB/m	dB/m	z_limit
100	3.7	4.2	5.0	6.0	4.5	2
125	4.0	6.5	6.1	6.2	4.1	2
160	5.1	7.2	4.9	7.6	4.0	2
200	3.9	5.4	3.4	3.1	4.6	2
250	2.3	4.5	2.1	2.4	1.9	2
315	3.8	3.0	2.9	3.1	2.4	2
400	1.6	3.6	2.2	4.6	2.8	6
500	4.2	4.0	3.2	5.4	4.3	6
630	4.8	3.6	6.1	3.3	5.6	6
800	3.5	3.0	6.8	4.7	6.9	2.1
1000	3.6	2.0	6.3	4.0	6.4	0.8
1250	4.1	3.0	6.1	3.4	6.0	0.8
1600	1.7	1.5	5.6	1.2	5.7	0.8
2000	0.9	0.7	2.5	0.8	4.9	0.8
2500	0.5	0.2	1.7	0.4	5.1	0.8
3150	0.7	0.5	1.0	0.4	6.3	0.8
4000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8
5000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8

Tabelle 8-5: Ergebnisse TDRy aus der FEM Simulation

Freq	B91	BHD	BRBd	BRBa	BHH	y_limit
Hz	dB/m	dB/m	dB/m	dB/m	dB/m	dB/m
100	8.4	9.0	7.4	7.3	7.3	3
125	9.1	10.0	8.6	9.1	11.6	3
160	7.8	8.3	11.2	8.2	10.0	3
200	2.7	6.0	3.9	2.6	5.0	3
250	1.9	5.8	2.9	2.6	2.9	2
315	3.3	3.1	2.7	3.4	3.3	1.35
400	2.4	2.4	3.8	1.6	6.1	0.9
500	1.4	1.4	3.6	1.6	4.0	0.62
630	2.6	2.2	3.3	1.2	6.0	0.42
800	0.8	0.9	3.5	1.1	5.5	0.29
1000	0.3	0.3	1.6	0.9	5.1	0.2
1250	0.2	0.2	0.7	1.8	2.7	0.2
1600	0.5	0.5	0.9	0.9	3.4	0.32
2000	1.4	1.2	0.7	0.4	4.2	0.5
2500	0.5	0.4	0.4	0.0	2.5	0.5
3150	0.1	0.2	0.2	0.1	0.5	0.5
4000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5
5000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5

8.3.3 Beurteilung

Im Shift2Rail-Forschungsprojekt wurde ein Zusammenhang der TDR mit dem Rollgeräusch bzw. dem abgestrahlten Schienenschallanteil etabliert, der sich über die Formel 2 berechnen lässt:

$$\Delta L_{Rail,V} = -10 \log_{10} \left(\frac{TDR_{V,STD}}{TDR_V} \right) \quad TDR_V = \text{vertikale TDR} = TDR_z$$

$$\Delta L_{Rail,L} = -10 \log_{10} \left(\frac{TDR_{L,STD}}{TDR_L} \right) \quad TDR_L = \text{laterale TDR} = TDR_y$$

$TDR_{V,STD} / TDR_{L,STD}$ = Grenzkurven TDR nach EN ISO 3095:2013

Darin führen positive Abweichungen einer Dämpfung zu einer Pegelreduktion im Rollgeräusch. Als Beispiel wird hier die TDR_z B91 bei 125 Hz = 4.0 dB mit der $TDR_{V,STD}, 125 \text{ Hz} = 2 \text{ dB}$ verglichen: Demnach ergibt sich für diese Terzfrequenz eine Schallpegelreduktion von 3.0 dB.

Im Projekt "optimierte Betonschwelle" gehen wir jedoch von einem Referenzgleis mit B91-Betonschwellen und UIC60-Schiene aus, daher wird im zweiten Teil der Tabelle die TDR des FEM-Testgleises mit B91 als Referenz verwendet. Der Pegelunterschied in diesem Fall kann auch durch Subtraktion des vorher ermittelten delta TDR ermittelt werden, z.B. $\Delta L_{z,BHH,1000 \text{ Hz}} = 9.0 \text{ dB}$ minus $\Delta L_{z,B91,1000 \text{ Hz}} = 6.6 \text{ dB}$ mit dem Ergebnis 2.4 dB (laut Tabelle 2.5 dB durch Rundung).

Tabelle 8-6: Pegelreduktion im Schienenschallanteil des Rollgeräusches für die vertikale TDR – positive dB Werte

Freq	z_limit	delta mit TDR_z Limit als Referenz						delta mit B91 Testgleis als Referenz			
		B91	BHD	BRBd	BRBa	BHH	BHD	BRBd	BRBa	BHH	
Hz	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB	
100	2	2.6	3.2	4.0	4.8	3.5	0.6	1.4	2.2	0.9	
125	2	3.0	5.1	4.8	4.9	3.2	2.1	1.8	1.9	0.1	
160	2	4.1	5.6	3.9	5.8	3.0	1.5	-0.2	1.7	-1.0	
200	2	2.9	4.3	2.2	1.9	3.6	1.4	-0.7	-1.0	0.7	
250	2	0.5	3.5	0.1	0.9	-0.2	2.9	-0.4	0.3	-0.8	
315	2	2.7	1.8	1.6	1.9	0.8	-1.0	-1.2	-0.9	-2.0	
400	6	-5.8	-2.3	-4.4	-1.1	-3.3	3.6	1.4	4.7	2.6	
500	6	-1.6	-1.8	-2.7	-0.5	-1.4	-0.2	-1.1	1.1	0.1	
630	6	-1.0	-2.3	0.1	-2.6	-0.3	-1.2	1.1	-1.6	0.7	
800	2.1	2.2	1.5	5.1	3.5	5.2	-0.7	2.9	1.3	3.0	
1000	0.8	6.6	4.0	9.0	7.0	9.0	-2.6	2.4	0.4	2.5	
1250	0.8	7.1	5.7	8.8	6.3	8.8	-1.4	1.7	-0.9	1.6	
1600	0.8	3.2	2.8	8.5	1.7	8.5	-0.4	5.3	-1.5	5.4	
2000	0.8	0.3	-0.5	4.9	0.2	7.8	-0.8	4.6	-0.1	7.5	
2500	0.8	-2.0	-6.1	3.4	-2.6	8.0	-4.1	5.4	-0.6	10.0	
3150	0.8	-0.7	-1.9	1.0	-2.7	9.0	-1.3	1.7	-2.1	9.6	

Bezüglich TDR_z weisen die BRBd und BHH oberhalb von 800 Hz Pegelminderungen von 3 bis 10 dB gegenüber dem B91-Testgleis auf. Im tiefen Frequenzbereich bis 250 Hz erweisen sich BHD und BRBa als Testgleise mit höherer Pegelreduktion.

Bezüglich TDR_y weisen die BRBd, BRBa und BHH zwischen 800 und 1600 Hz Pegelminderungen von 2 bis 9 dB gegenüber dem B91-Testgleis auf. Die BHH erweist sich bereits ab 400 Hz als deutlich günstiger und weist Pegelreduktionen bis 13 dB auf. Die BHD kann gegenüber dem B91-Gleis keine bedeutenden Pegelminderungen in lateraler Richtung aufweisen.

Tabelle 8-7: Pegelreduktion im Schienenschallanteil vom Rollgeräusch für die laterale TDR – positive dB Werte

Freq Hz	y_limit dB/m	TDRy Limit als Referenz						B91 Testgleis als Referenz					
		B91	BHD	BRBd	BRBa	BHH	B91	BHD	BRBd	BRBa	BHH		
		dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB		
100	3	4.5	4.8	3.9	3.8	3.8	2.6	0.3	-0.5	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6
125	3	4.8	5.2	4.6	4.8	5.9	3.0	0.4	-0.2	0.0	0.0	0.0	1.1
160	3	4.1	4.4	5.7	4.4	5.2	4.1	0.3	1.6	0.2	0.2	0.2	1.1
200	3	-0.4	3.0	1.2	-0.6	2.2	2.9	3.5	1.6	-0.2	2.7	2.7	
250	2	-0.2	4.6	1.6	1.1	1.6	0.5	4.8	1.8	1.3	1.8		
315	1.35	3.9	3.6	3.0	4.0	3.9	2.7	-0.2	-0.9	0.1	0.0	0.0	
400	0.9	4.3	4.3	6.2	2.6	8.3	-5.8	0.0	1.9	-1.7	4.0	4.0	
500	0.62	3.6	3.4	7.6	4.0	8.1	-1.6	-0.2	4.1	0.4	4.5		
630	0.42	7.9	7.2	9.0	4.6	11.6	-1.0	-0.7	1.1	-3.2	3.7		
800	0.29	4.6	4.7	10.8	5.7	12.8	2.2	0.1	6.2	1.1	8.2		
1000	0.2	1.3	1.4	8.9	6.5	14.1	6.6	0.0	7.6	5.1	12.7		
1250	0.2	0.8	0.3	5.3	9.6	11.4	7.1	-0.5	4.5	8.8	10.5		
1600	0.32	2.2	1.9	4.3	4.7	10.3	3.2	-0.3	2.2	2.6	8.1		
2000	0.5	4.6	3.8	1.5	-1.2	9.2	0.3	-0.8	-3.2	-5.8	4.6		
2500	0.5	-0.3	-0.7	-1.3	-11.4	7.0	-2.0	-0.4	-1.0	-11.1	7.3		
3150	0.5	-5.5	-4.7	-3.1	-6.0	0.2	-0.7	0.7	2.4	-0.6	5.7		

Tabelle 8-8: Bewertung der Varianten

Typ	Z-Richtung	Y-Richtung
B91	Standardoberbau mit harter Zw gute Dämpfung	Standardoberbau mit harter Zw gute Dämpfung
Heavy Duty BHD	Verbesserungen im Bereich 100 bis 400 Hz, sonst eher schlechter als Referenz	Verbesserungen im Bereich 200 bis 250 Hz, sonst identisch zur B91
Railbone Dual Fixing BRBd	Verbesserungen im Bereich 100 bis 160 Hz, 630 bis 3150 Hz, Vereint Vorteile von B91 HD und hochfrequenter Wirkung	Verbesserungen im Bereich 160 bis 250 Hz, 400 bis 1600 Hz, somit gute Wirkung im hochfrequenten Bereich
Railbone Asymmetric BRBa	Verbesserungen im Bereich 100 bis 160 Hz, 400 bis 500 Hz, jedoch keine hochfrequente Wirkung	Verbesserungen im Bereich 800 bis 1600 Hz
Hammerhead BHH	Verbesserungen im Bereich 100 bis 125 Hz, 630 bis 3150 Hz, Vereint Vorteile von B91 HD und hochfrequenter Wirkung	Verbesserungen im Bereich 200 bis 250 Hz, 400 bis 3150 Hz, somit sehr gute Wirkung im hochfrequenten Bereich

Grundsätzlich erweist sich in dieser Parametervariation eine Masseerhöhung im tieffrequenten Bereich zwischen 100 und 400 Hz als wirksam, während eine Änderung der Schienenbefestigung bei gleichzeitiger Kopfverbreiterung Einfluss auf die Schienenschwingungen im höheren Frequenzbereich oberhalb von 630 Hz hat.

Durch eine verbreiterte Schwelle mit zwei Klemmungen werden die Schwellenfächer verkleinert, die Lagerpunkte verändert und die Klemmkraft verdoppelt, was in der Summe zur höheren Dämpfung oberhalb von 630 Hz führt. Die pin-pin-Mode, welche bei Standardgleisen bei 1100 Hz liegt, verlagert sich in einen anderen Frequenzbereich.

Die Heavy-Duty-Schwelle mit 10cm tieferer Sohle kann in der Simulation nicht überzeugen und da auch die Anwendung im Gleisbau wegen der Höhe schwierig ist, wird das Modell nicht weiterverfolgt.

Die Railbone mit doppelter Klemmung zeigt im tiefen wie auch hochfrequenten Bereich deutliche Pegelreduktionen im Schienenschall gegenüber der B91-Schwelle und soll daher als Prototyp gebaut werden. Die Breite des Schwellenkopfes ist mit der B06-Flachschwelle zu vergleichen und

hat daher bereits Akzeptanz im Gleisbau gefunden, obwohl der Schwellenfachabstand nur noch 20-30 cm beträgt.

Die Hammerhead-Schwelle mit alternierender Verlegeart erweist sich in der FEM-Berechnung als beste Variante hinsichtlich Pegelreduktion im Rollgeräusch und soll daher als zweiter Prototyp gebaut werden. Die Schwelle bietet gegenüber der Railbone auch Vorteile, da sie leichter ist und für den Gleisbau wieder mehr Schwellenabstand bzw. Schotterfläche hergibt.

8.3.4 CAD Modelle

Ausgehend von dem vorhandenen CAD-Modell der B91-Schwelle hat PROSE die beiden Designideen mit verbreiteter Schienenauflagefläche und doppelter Schienenbefestigung als CAD-Modelle entworfen. Am 8.2.2019 wurden diese Vigier Rail übermittelt, um weitere Detailkonstruktionen daran vorzunehmen und die Herstellung der Giessformen zu beauftragen.

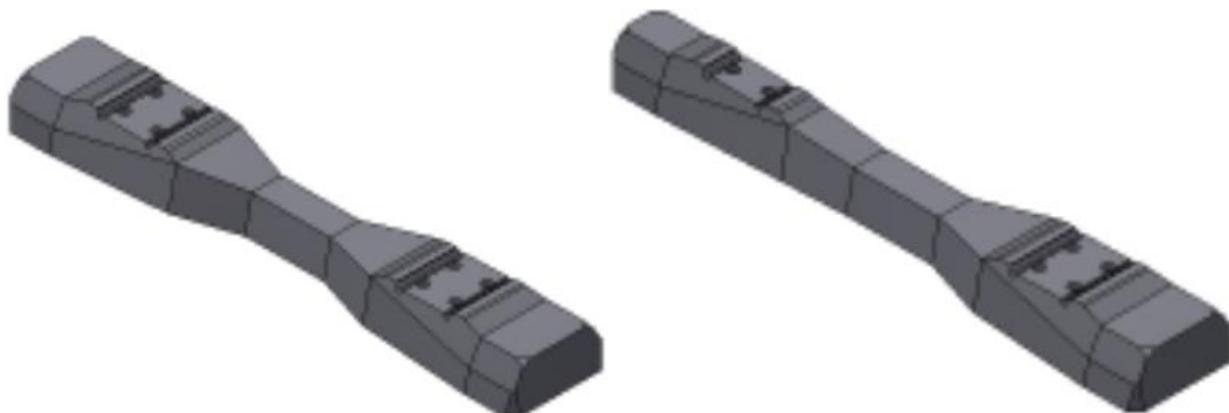


Abbildung 8-13: CAD-Modelle PROSE 02-2019: oben Rail-Bone- und unten Hammerhead-Betonschwelle

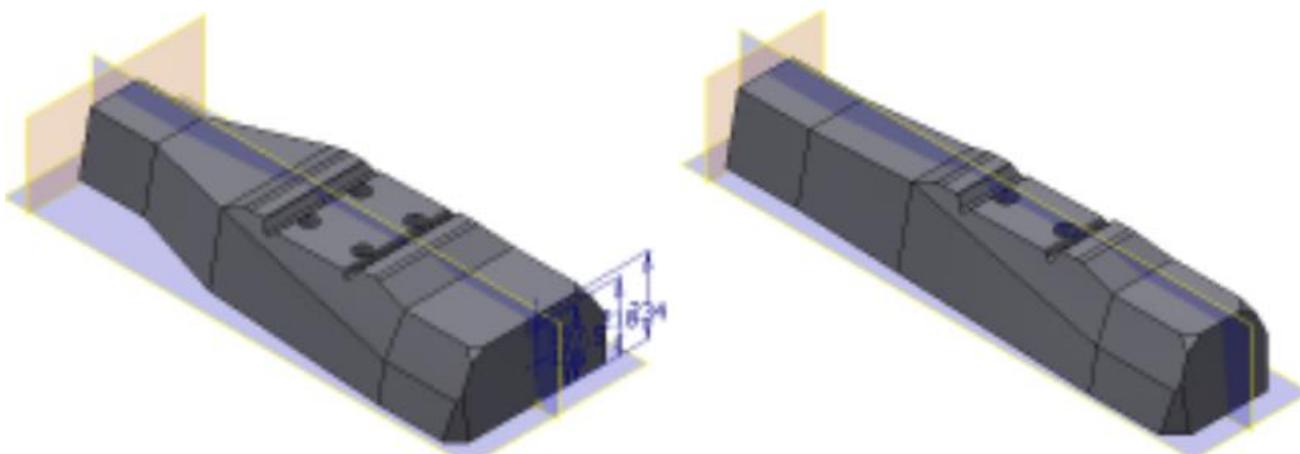


Abbildung 8-14: CAD-Modelle PROSE 02-2019: Breiter Kopf und schmaler Kopf

9 Prototypen

9.1 Design

Basierend auf den Entwürfen der zwei gewählten Schwellentypen hat Vigier Rail das Design überarbeitet und den konstruktiven und herstellungsbedingten Anforderungen angepasst. Entlang der Längsachse wurde die Höhe einer B91 übernommen. Für die Festlegung der Breiten musste die Lage der Vorspannelemente an die Position der Schwellendübel angepasst werden. Diese Parameter und die Berücksichtigung der Herstelltoleranzen und der Überdeckungsanforderungen haben die definitiven Abmessungen ergeben.

Als Vorspannsystem wurde das heute verwendete System für die Standardschwelle B91 – Direktverbund ohne Endverankerung – gewählt und die gleiche Anzahl, Festigkeit und Abmessungen der Spanndrähte sowie die gleiche Vorspannkraft wurden festgelegt. Damit erhält man eine leicht höhere Tragfähigkeit der Schwellen, da der Querschnitt im Vergleich zu einer B91 vergrössert ist. Optimierungen in dieser Hinsicht sind zu einem späteren Zeitpunkt weiterhin möglich.

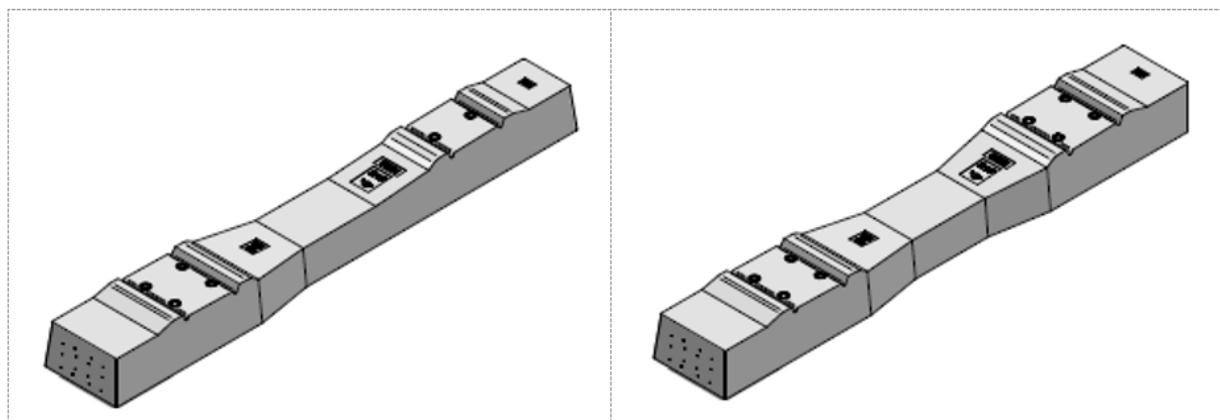


Abbildung 9-1 links B91-Hammerhead - rechts B91-Rail-Bone. Detailzeichnungen der 2 Schwellen sind im Anhang

9.2 Fertigung

Die Herstellung der Prototypen erfolgte nach dem Abetong-System in einem Langbett für Streckenschwellen B91. Dazu wurden je zwei Dreier-Stahlmodelle verwendet und im Juni 2019 an vier aufeinander folgenden Tagen mit Beton der Festigkeitsklasse C60/75 gefüllt. Dieser Beton wird auch für die B91- und Weichenschwellen verwendet und erfüllt alle Konformitätskriterien sowie die Dauerhaftigkeitsanforderungen gemäss SN EN 206. In Abweichung zur Herstellung der B91, mussten mehrere Produktionsschritte manuell erfolgen, da verschiedene Geräte nicht für Schwellen mit diesen Abmessungen und Gewichten ausgelegt sind.

In folgenden Abbildungen sind die Herstellschritte abgebildet.



Abbildung 9-2: Einbau im Langbett der Schalungsmodelle B19 Hammerhead und Railbone



Abbildung 9-3: Einzug der Spanndrähte



Abbildung 9-4: Vorspannung der Spanndrähte



Abbildung 9-5: Betonieren der Schwellen



Abbildung 9-6: Zuschnitt und Abstützung der Schwellen vor dem Heben aus dem Langbett



Abbildung 9-7: Lagerung der Schwellen

9.3 Messungen im Testgleis

Nach Produktion der Prototypen wurden die neuen Betonschwellen nacheinander in das Testgleis von Vigier Rail eingebaut. Zuerst die Betonschwelle Railbone und anschliessend die Betonschwelle Hammerhead.

Die am Testgleis durchgeföhrten Messungen sollten dem akustischen Vergleich zum Testgleis mit B91-Schwellen und harter Zwischenlage dienen. Wie in Kapitel 8.3.1 beschrieben, wurde dazu der Parameter der TDR, also die Schienendämpfung verwendet. Hierzu wurde jeweils an den Schienenenden mittels Impulshammer angeregt und die Transferfunktionen der Eingangsmobilitäten (Beschleunigung/Kraft) von einem Ende A zum anderen Ende B bestimmt.

In einem weiteren Versuch wurde dann das Schienenende A mit einem Shaker und einem rosa Rauschen angeregt, um die Schallabstrahlung der Schiene an der mittleren Schwelle S5 sowie im danebenliegenden Schwellenfach SF4 zu bestimmen. Zur besseren Trennung von Schienenschall und Hintergrundgeräusch wurde das Intensitätsmessverfahren verwendet.

Darüber hinaus wurden noch zwei neue Messverfahren an den Testgleisen angewandt, welche die Transfereigenschaften der Schiene untersuchen, d.h. Schallabstrahlung bei einer Schienenanregung. Zum einen wurden parallel zu den TDR-Messungen Mikrofone mittig am Gleis, einmal seitlich in 2.2m Entfernung und 0.5m über SOK und einmal 1.0m über der Schiene platziert, um die Schallabstrahlung bezogen auf eine Schienenbeschleunigung zu bestimmen. In einem weiteren Versuch wurde die Transferfunktion mittels reziproken Verfahrens untersucht, bei der das Gleis in 2.2m Entfernung mit einem Rauschen (Lautsprecher) beschallt wurde und die Beschleunigungen auf der Schiene gemessen wurden.

9.3.1 TDR-Messungen (und Vergleich)

Zunächst soll jedoch kurz der Einfluss der Umgebungstemperatur auf das Messergebnis verdeutlicht werden. Am Testgleis mit B91-Schwellen und harter Zwischenlage wurden zwei TDR-Messungen zu unterschiedlichen Außentemperaturen durchgeföhrte. Im November 2018 bei etwa 10 °C und im Juni 2019 bei über 30 °C.

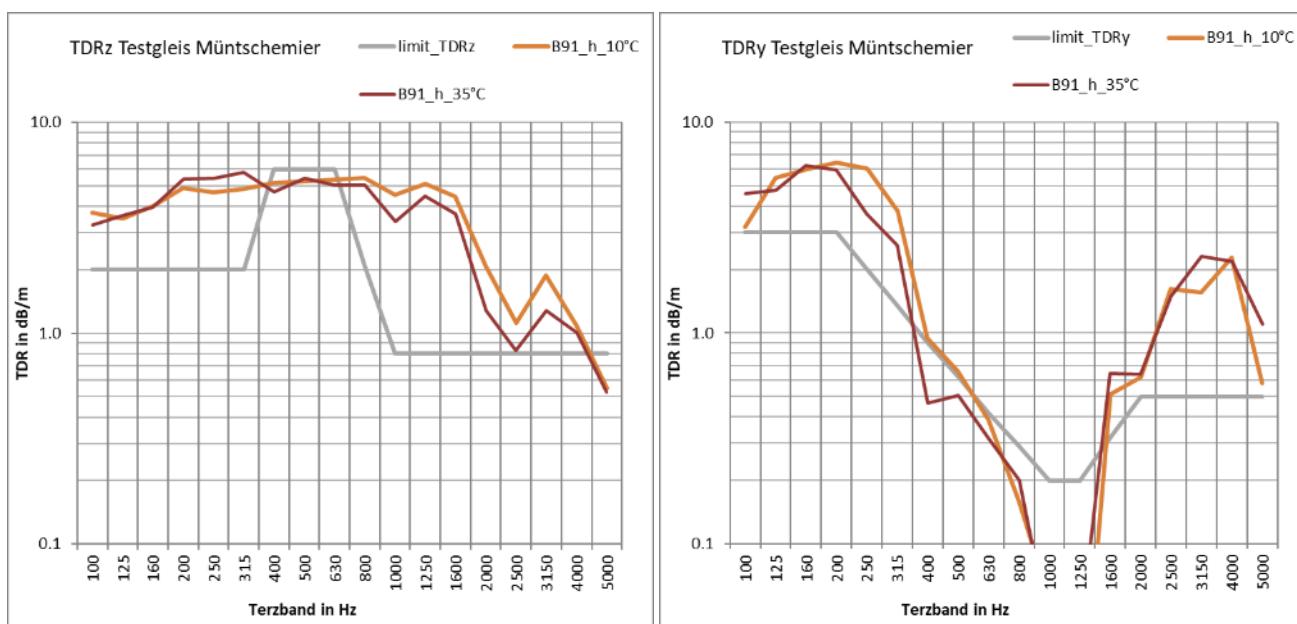


Abbildung 9-8: TDR am B91-Testgleis bei unterschiedlichen Temperaturen

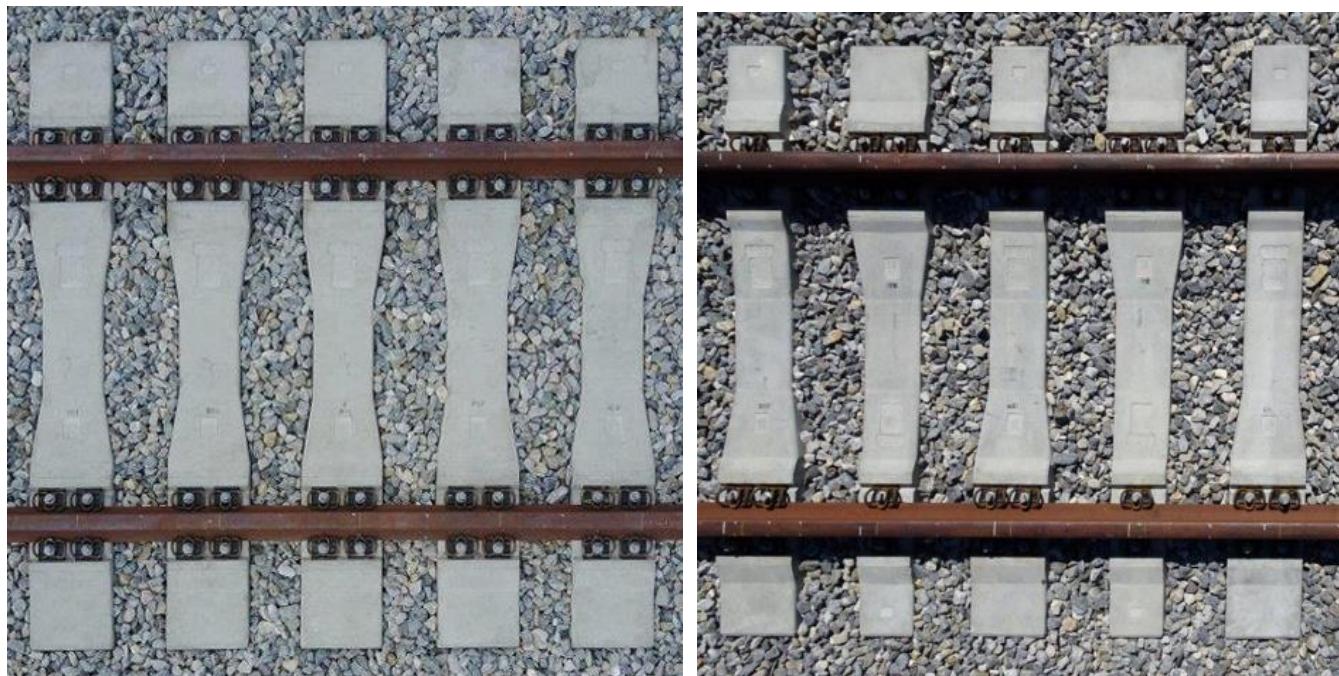


Tabelle 9-1: neue Betonschwellen im Testgleis Railbone (links) und Hammerhead (rechts)

Die hohen Temperaturen und die Sonneneinstrahlung bewirken Schienentemperaturen von über 45 °C, bei denen die harten Zwischenlagen dann nicht mehr ihre Nennsteifigkeit von 700 kN/mm erreichen. Das führt dazu, dass die TDR Werte in bestimmten Frequenzbereichen geringer ausfallen. Daher wurde für den Vergleich mit den neuen Schwellen die TDR vom B91-Gleis im Juni 2019 verwendet.

Weiter fällt auf, dass die TDRz-Werte im Bereich von 400 bis 800 Hz und die TDRy-Werte im Bereich 800 bis 1250 Hz zu niedrig für ein solches Gleis ausfallen. Dies wird auf die Testbedingungen mit einer relativ kurzen Schiene zurückgeführt, an deren Enden die Schwingungen reflektiert werden und modale Eigenformen bilden.

Folgende Kürzel wurden verwendet:

B91	B91-Schwellen mit harter Zwischenlage und 250 Nm Anzugsmoment
RBa	Railbone mit asymmetrischer Befestigung harter Zw und 250 Nm Anzugsmoment
RBx	Railbone mit kreuzweiser Befestigung harter Zw und 250 Nm Anzugsmoment
RBd	Railbone mit doppelter Befestigung harter Zw und 250 Nm Anzugsmoment
HH	Hammerhead mit harter Zw und 250 Nm Anzugsmoment

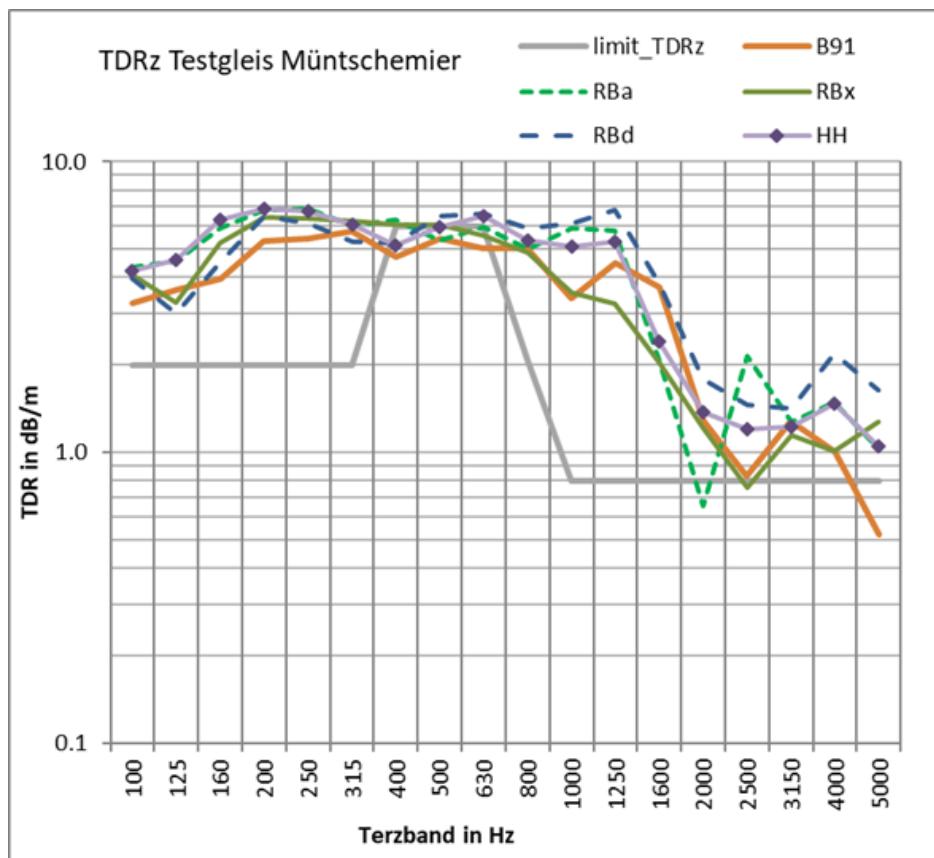


Abbildung 9-9: Ergebnisse vertikale TDR neue Betonschwellen Railbone und Hammerhead

Im Frequenzbereich von 100 bis 400 Hz liegen die TDRz-Werte relativ dicht beieinander. Hier ist in der Regel bereits eine gute Dämpfung vorhanden und die Effekte durch die höhere Schwellenmasse zeichnen sich wahrscheinlich im Frequenzbereich 100 bis 250 Hz ab. In den Terzbändern 400 Hz, 630 Hz und 1000 Hz konnten mit allen Varianten der neuen Schwellen positive Unterschiede zur TDR B91 ermittelt werden. Besonders für das Rollgeräusch sind die Minderungen bei 630, 1000 und 1250 Hz relevant.

Tabelle 9-2 TDR-Werte bei vertikaler Anregung am Testgleis und Differenz zum Gleis mit B91-Schwellen

	Terz	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
dB/m	limit_TD	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	6.0	6.0	6.0	2.1	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	
	B91	3.3	3.6	4.0	5.4	5.4	5.8	4.7	5.4	5.1	5.0	3.4	4.5	3.7	1.3	0.8	1.3	1.0	0.5
	RBa	4.3	4.6	5.9	6.9	6.8	6.0	6.2	5.3	6.0	5.0	5.9	5.6	2.1	0.7	2.1	1.2	1.4	1.0
	RBx	4.1	3.3	5.3	6.5	6.4	6.3	6.0	6.1	5.4	4.9	3.5	3.0	2.2	1.2	0.7	1.1	0.9	1.2
	RBd	4.0	3.0	4.5	6.5	6.2	5.3	5.3	6.5	6.6	5.9	6.1	6.8	3.8	1.8	1.5	1.4	2.2	1.6
	HH	4.2	4.6	6.3	6.9	6.8	6.1	5.1	6.0	6.5	5.3	5.1	5.3	2.4	1.4	1.2	1.5	1.0	
	delta RBa	1.1	0.9	1.9	1.5	1.4	0.2	1.5	-0.1	0.9	0.0	2.5	1.2	-1.6	-0.6	1.3	-0.1	0.4	0.5
	delta RBx	0.8	-0.3	1.3	1.1	1.0	0.5	1.3	0.7	0.4	-0.2	0.1	-1.5	-1.5	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.7
	delta RBd	0.7	-0.6	0.6	1.2	0.7	-0.5	0.6	1.1	1.6	0.9	2.7	2.3	0.1	0.5	0.6	0.1	1.2	1.1
	delta HH	1.0	1.0	2.4	1.6	1.3	0.3	0.4	0.5	1.4	0.3	1.7	0.8	-1.3	0.1	0.4	0.0	0.5	0.5
	delta HHw	0.8	0.5	1.8	1.5	1.5	1.1	1.4	-1.2	-3.0	-3.9	-2.7	-4.3	-3.6	-1.2	-0.6	-1.0	-0.8	0.2

Bei der Railbone Schwelle bietet die RBd mit doppelter Klemmung die beste Performance und weist eine Erhöhung der TDR gegenüber der B91-Schwelle fast im gesamten Spektrum auf sowie bei 1000 und 1250 Hz eine Erhöhung der TDR um etwa 2.5 dB. Soll eine Klemmung je Schiene eingespart werden, so ist die RBa mit asymmetrischer Klemmung zu empfehlen. Die RBx mit kreuzweiser Klemmung weist im hochfrequenten Bereich hingegen keine signifikante Verbesserung gegenüber der B91-Schwelle am Testgleis auf. Das Gleis mit Hammerhead-Schwellen HH ist vergleichbar mit dem Gleis mit RBa-Schwellen.

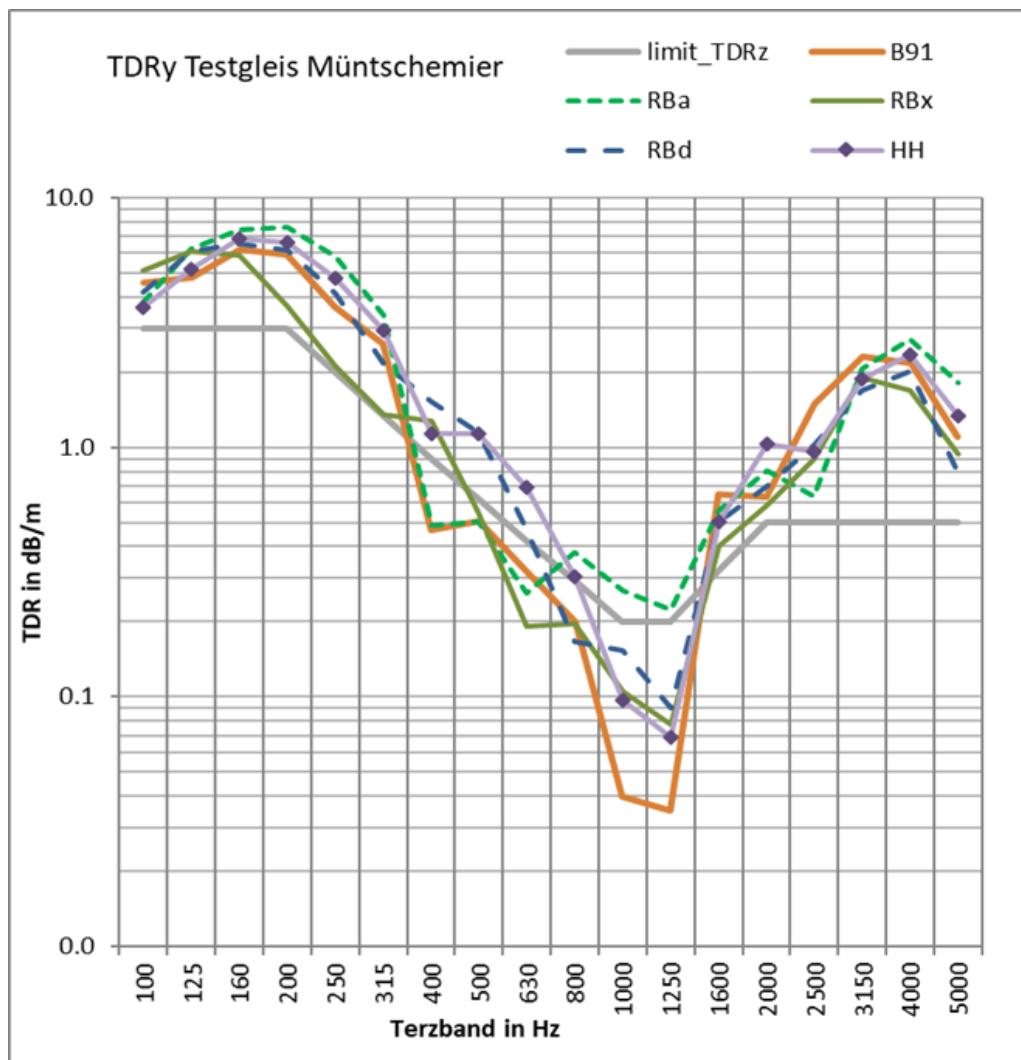


Abbildung 9-10 Ergebnisse laterale TDR neue Betonschwellen Railbone und Hammerhead

Bei der lateralen TDR sind die Unterschiede etwas geringer, aber dennoch kann eine leichte Verbesserung gegenüber dem Gleis mit B91-Schwellen festgestellt werden. Während der tieffrequente Bereich von 100 Hz bis 315 Hz bei allen Gleisen ähnlich verläuft, ist bei den zuvor genannten Schlüsselfrequenzen 400, 630, 1000 und 1250 Hz z.T. eine Erhöhung der Dämpfung erkennbar. Das Gleis mit RBa schneidet im tiefen Frequenzbereich am besten ab und zeigt auch zwischen 800 und 1600 Hz die beste Performance.

Tabelle 9-3: TDR-Werte bei lateraler Anregung

y	Terz	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
y	limit_TD	3.0	3.0	3.0	3.0	2.0	1.4	0.9	0.6	0.4	0.3	0.2	0.2	0.3	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
y	B91	4.6	4.8	6.2	6.0	3.7	2.6	0.5	0.5	0.3	0.2	0.0	0.0	0.6	0.6	1.5	2.3	2.2	1.1
y	RBa	3.8	6.3	7.4	7.6	5.8	3.4	0.5	0.5	0.3	0.4	0.3	0.2	0.6	0.8	0.6	2.1	2.7	1.8
y	RBx	5.1	6.1	5.9	3.7	2.1	1.3	1.3	0.5	0.2	0.2	0.1	0.1	0.4	0.6	0.9	1.9	1.7	0.9
y	RBd	4.2	6.1	6.5	6.2	4.2	2.2	1.5	1.1	0.5	0.2	0.2	0.1	0.5	0.7	1.0	1.7	2.0	0.8
y	HH	3.6	5.2	6.9	6.6	4.8	2.9	1.1	1.1	0.7	0.3	0.1	0.1	0.5	1.0	1.0	1.9	2.3	1.3

Zur Bewertung des akustischen Effekts sollen für die Situation im Testgleis die vertikalen TDR herangezogen werden, da die lateralen TDR Ergebnisse kleine Dämpfungswerte mit hohen Unsicherheiten enthalten.

Zunächst werden arithmetische Mittelwerte über den relevanten Frequenzbereich des Schienenschalls zwischen 400 und 2500 Hz gebildet. Anschliessend wird die zu erwartende Pegeländerung im Schienenschall über die Formel 2 berechnet und wieder über die Terzbänder von 400 Hz bis 2500 Hz gemittelt.

Tabelle 9-4: TDR-Werte bei vertikaler Anregung mit arithmetischen Mittelwert TDR zwischen 400 Hz und 2500 Hz

	Terz	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	Mittel
dB/m	limit_TD	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	6.0	6.0	6.0	2.1	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	2.7	
z	B91	3.3	3.6	4.0	5.4	5.4	5.8	4.7	5.4	5.1	5.0	3.4	4.5	3.7	1.3	0.8	1.3	1.0	0.5	3.8
z	RBa	4.3	4.6	5.9	6.9	6.8	6.0	6.2	5.3	6.0	5.0	5.9	5.6	2.1	0.7	2.1	1.2	1.4	1.0	4.3
z	RBx	4.1	3.3	5.3	6.5	6.4	6.3	6.0	6.1	5.4	4.9	3.5	3.0	2.2	1.2	0.7	1.1	0.9	1.2	3.7
z	RBd	4.0	3.0	4.5	6.5	6.2	5.3	5.3	6.5	6.6	5.9	6.1	6.8	3.8	1.8	1.5	1.4	2.2	1.6	4.9
z	HH	4.2	4.6	6.3	6.9	6.8	6.1	5.1	6.0	6.5	5.3	5.1	5.3	2.4	1.4	1.2	1.2	1.5	1.0	4.3
delta	RBa	1.1	0.9	1.9	1.5	1.4	0.2	1.5	-0.1	0.9	0.0	2.5	1.2	-1.6	-0.6	1.3	-0.1	0.4	0.5	0.6
delta	RBx	0.8	-0.3	1.3	1.1	1.0	0.5	1.3	0.7	0.4	-0.2	0.1	-1.5	-1.5	-0.1	-0.1	-0.1	0.7	-0.1	-0.1
delta	RBd	0.7	-0.6	0.6	1.2	0.7	-0.5	0.6	1.1	1.6	0.9	2.7	2.3	0.1	0.5	0.6	0.1	1.2	1.1	1.2
delta	HH	1.0	1.0	2.4	1.6	1.3	0.3	0.4	0.5	1.4	0.3	1.7	0.8	-1.3	0.1	0.4	0.0	0.5	0.5	0.5

Bei den Mittelwerten der TDR erzielt z.B. das Testgleis mit B91 Schwellen einen Pegel von 3.8 dB/m, während das Gleis mit Railbone Schwelle und doppelter Befestigung RBd hier 4.9 dB/m erreicht. Die beiden Varianten Railbone mit alternierender Befestigung RBa und Hammerhead zeigen auch noch eine um 0.5 dB/m höhere Dämpfung im Mittelwert. Für die Schallabstrahlung sind jedoch auch die Terzbänder 1000 und 1250 Hz bedeutend, da hier normalerweise ein Einbruch der Dämpfung durch die vertikale pin-pin Mode der Schiene existiert, so konnte die TDR gegenüber dem Testgleis mit B91 Schwellen teilweise um mehr als 2.5 dB/m erhöht werden.

Da die vorhandene TDR im Gleis stark frequenzabhängig ist, kann aus dem einfachen delta TDR nicht direkt auf die Wirkung in der Schallabstrahlung geschlossen werden. Dies Pegeländerung kann, wie zuvor erwähnt, durch Berechnung mit Formel 2 aus dem Verhältnis der TDR Ausgangszustand und Gleis mit neuen Schwellen berechnet werden.

Tabelle 9-5: Pegelminderung im Schienenschall durch die Änderung der vertikalen TDR-Werte nach Formel 2 mit arithmetischen Mittelwert zwischen 400 Hz und 2500 Hz – positive dB Werte

dB	Terz	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	Mittel
dL	RBa	1.2	1.0	1.7	1.1	1.0	0.2	1.2	-0.1	0.7	0.0	2.4	1.0	-2.5	-2.5	4.1	-0.3	1.4	2.9	0.9
dL	RBx	1.0	-0.4	1.2	0.8	0.7	0.4	1.1	0.5	0.3	-0.1	0.1	-1.7	-2.3	-0.2	-0.5	-0.5	-0.3	3.8	-0.2
dL	RBd	0.9	-0.8	0.6	0.8	0.5	-0.4	0.5	0.8	1.2	0.7	2.6	1.8	0.2	1.4	2.5	0.4	3.4	4.9	1.4
dL	HH	1.1	1.0	2.0	1.1	1.0	0.2	0.4	0.4	1.1	0.3	1.8	0.7	-1.8	0.3	1.6	-0.2	1.7	2.9	0.6

Bei der berechneten Pegelminderung in Tabelle 9-5 weist das Testgleis mit Railbone Schwellen mit 1.4 dB den höchsten Effekt im Mittelwert auf. Die beiden Testgleise mit Railbone alternierender Befestigung und Hammerhead weisen einen geringeren Effekt im Mittelwert auf, sie zeigen jedoch im bedeutenden Frequenzbereich 1000 und 1250 Hz auch eine beachtliche Wirkung. Bei den vertikalen TDR Werten ist die Berechnung nicht sinnvoll, da hier im relevanten Frequenzbereich nur geringe TDR Werte mit hohen Unsicherheiten ermittelt wurden.

9.3.2 Intensitätsmessungen

Bei den Intensitätsmessungen wurde das Schienenende A mit einem Shaker und einem bandpassgefilterten, rosa Rauschen angeregt. Die Messungen 2018 wurden mit einem grossen Shaker mit 1000 N Sinusanregung und 25mm Hub durchgeführt. Die Messungen an den neuen Betonschwellen 2019 wurden mit einem kleineren Shaker mit 200 N Sinusanregung und 12.5mm Hub durchgeführt, da bei den ersten Versuchen im Juni der Verstärker vom grossen Shaker defekt ging. Dies hat dazu geführt, dass sich das Anregungsspektrum am Schienenende insbesondere im tieffrequenten Bereich, jedoch auch bei 2500 Hz unterscheidet und natürlich im Ergebnis auch zu unterschiedlichen Intensitätsspektren geführt hat.

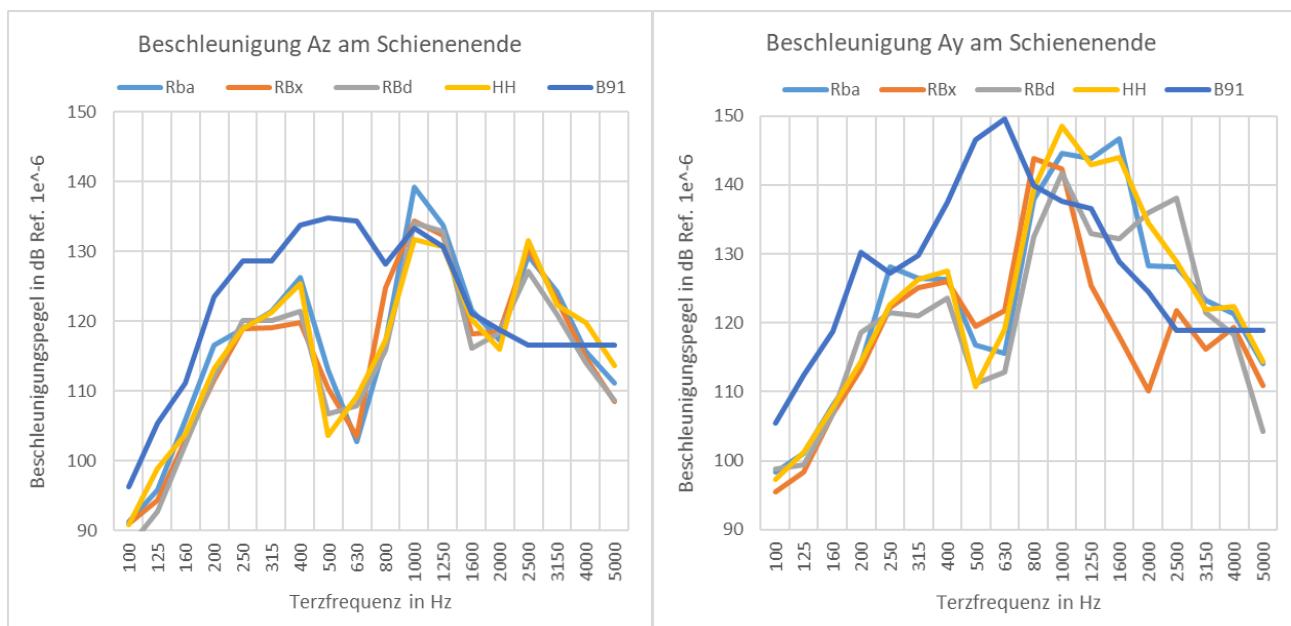


Abbildung 9-11: Beschleunigungspegel am Schienenende Seite A mit Shaker in z und y Richtung

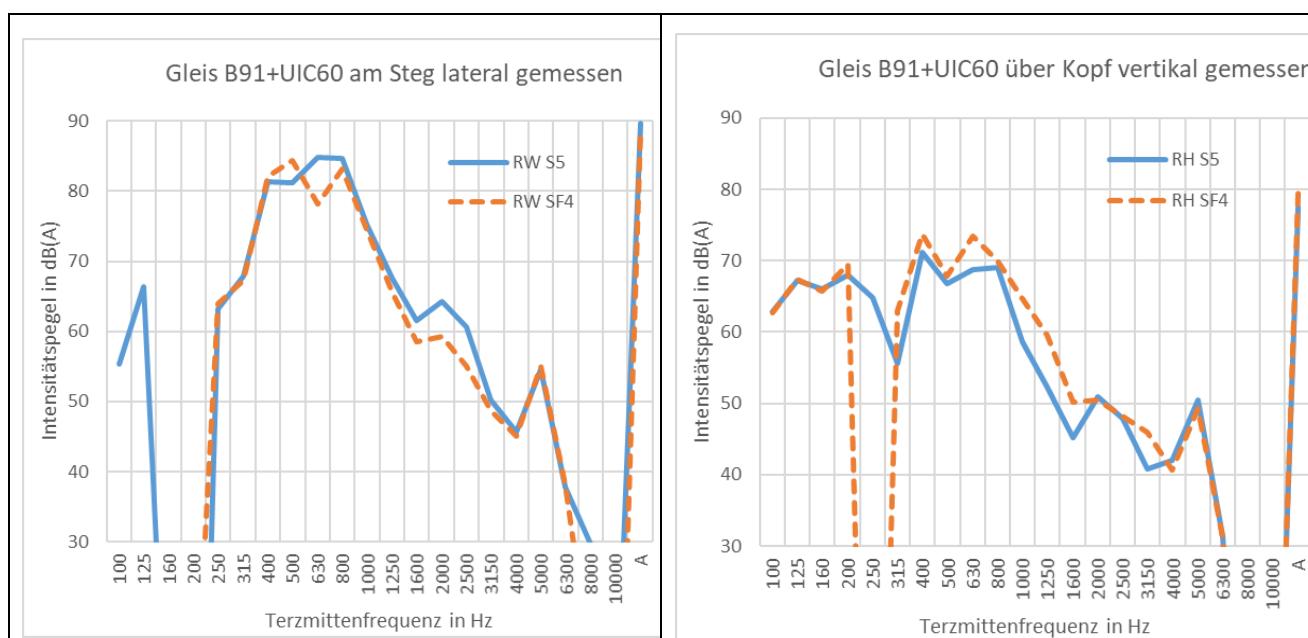


Abbildung 9-12: Intensitätspegel B91-Testgleis gemessen

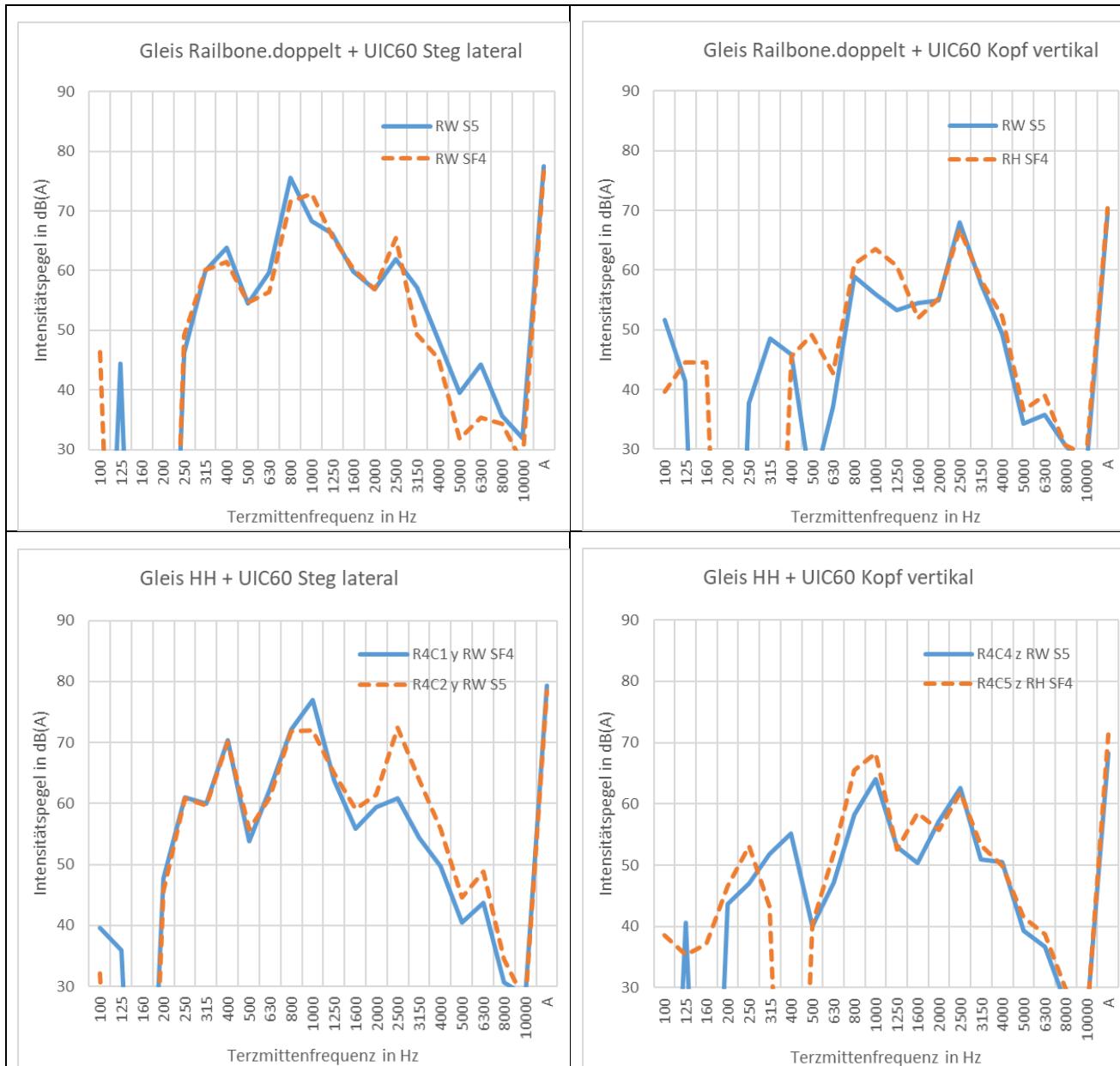
Damit das Anregungsspektrum im hochfrequenten Bereich von beiden Shakern wieder gleich verläuft, wurde zum besseren Vergleich der Spektren eine Pegelanpassung beim Gleis mit B91-Schwellen durchgeführt, indem die Pegeldifferenzen zwischen 100 Hz und 630 Hz vom Intensitätsspektrum subtrahiert wurden.

Tabelle 9-6: Pegelkorrektur anhand der Eingangsbeschleunigungen in z und y Richtung

		Az Shaker					Ay Shaker						
Rba	RBx	RBd	HH	B91	Rba	RBx	RBd	HH	B91	dZ	dy	Korrektur	
dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB	
100	91	91	88	91	96	98	96	99	97	105	6	8	7
125	96	94	93	99	105	101	98	99	101	112	10	12	11
160	106	103	102	104	111	108	107	107	108	119	7	12	9
200	116	112	112	113	123	114	113	119	114	130	10	15	13
250	119	119	120	119	129	128	122	121	123	127	10	4	7
315	121	119	120	121	129	126	125	121	126	130	8	5	7
400	126	120	121	125	134	126	126	124	127	137	11	12	11
500	113	110	107	104	135	117	119	111	111	147	26	32	29
630	103	104	108	109	134	116	122	113	119	150	29	32	30
800	117	125	116	117	128	138	144	133	139	140	9	2	5
1000	139	134	134	132	133	145	142	142	148	138	-1	-7	-4
1250	134	132	133	131	131	144	125	133	143	137	-2	0	-1
1600	122	118	116	120	121	147	118	132	144	129	2	-6	-2
2000	117	118	118	116	119	128	110	136	135	124	1	-3	-1
2500	129	131	127	132	117	128	122	138	129	119	-13	-10	-12
3150	124	123	121	122	117	123	116	122	122	119	-6	-2	-4
4000	116	115	114	120	117	121	119	118	122	119	1	-2	-1
5000	111	109	109	114	117	114	111	104	114	119	6	8	7
6300	120	117	113	119	117	117	112	110	110	119	-1	6	3
8000	125	126	116	121	117	109	108	107	106	119	-5	11	3
10000	131	127	119	122	117	109	107	104	105	119	-8	12	2
Sum	141.6	138.7	137.6	137.4	141.5	150.4	146.3	145.0	151.1	152.2			

Das korrigierte Referenzspektrum von der Schiene auf B91-Schwelle sieht danach wie folgt aus.





Der Verlauf der Intensitäten ist grundlegend plausibel, die laterale Abstrahlung der Schiene beinhaltet mehr tieffrequente Komponenten, während die vertikale Abstrahlung im Bereich um 1000 Hz die grösste Energie aufweist. Alle Gleise mit neuen Betonschwellen weisen im Bereich 800 und 1000 Hz in der lateralen Richtung geringere Schallintensitäten auf. Die Auswirkung der Erhöhung der TDR im Bereich 1000 und 1250 Hz ist klar erkennbar.

Ein besserer Vergleich wird bei der Zusammenfassung der Intensitätspegel in tabellarischer Form erreicht, wobei die Differenz aus den Messungen am Testgleis mit den jeweiligen neuen Schwänen und dem Testgleis mit B91 Schwänen die Pegelreduktion durch negative Werte darstellt.

Tabelle 9-7: Pegeldifferenzen der Intensitätsmessungen der Testgleise mit neuen Schwellen und dem mit B91 Schwellen

	Intensitätsmessung in y-Richtung neben der Schiene									
y	delta Schwelle 5					y	delta Schwellenfach 4			
B91	Rba	RBx	RBd	HH	B91	Rba	RBx	RBd	HH	
dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB	
100	48	-54	-90	-85	-9	20	-51	12	26	19
125	55	-93	-13	-11	-19	19	-46	20	-62	17
160	17	-51	30	-64	-48	38	-4	6	-88	-69
200	72	-22	-13	-120	-24	12	39	46	-66	36
250	57	2	7	-11	4	57	4	5	-8	4
315	61	1	1	-1	-1	61	1	-2	-1	-1
400	70	5	3	-6	0	71	2	-2	-9	-1
500	52	12	11	2	2	55	8	10	-1	-1
630	54	2	0	5	8	48	7	5	9	14
800	79	-8	-11	-4	-7	78	-4	-1	-6	-6
1000	79	-6	-5	-11	-2	79	-2	-6	-6	-2
1250	68	3	4	-2	-4	66	-1	1	-1	-2
1600	64	0	-3	-4	-8	61	-2	-1	0	-5
2000	65	-2	-11	-8	-6	60	-3	-2	-3	-1
2500	72	-3	-6	-10	-11	67	-2	-4	-1	-6
3150	54	7	9	3	0	53	0	7	-3	2
4000	46	9	10	2	3	46	6	1	0	4
5000	47	-1	-3	-8	-7	48	-3	-4	-16	-7
Sum	83.6					82.0				
deltaM		0.2	-1.8	-4.2	-3.2		0.4	0.0	-2.1	-1.0

	Intensitätsmessung in z-Richtung über der Schiene									
z	delta Schwelle 5					z	delta Schwellenfach 4			
B91	Rba	RBx	RBd	HH	B91	Rba	RBx	RBd	HH	
dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB	
100	56	-93	-24	-4	-90	56	-16	-30	-16	-17
125	56	-96	-19	-15	-15	56	-98	-18	-12	-21
160	57	-13	-26	-102	-95	56	-19	-19	-12	-19
200	55	-11	-12	-107	-12	57	-9	-11	-102	-10
250	58	-10	-19	-20	-11	64	-12	-27	-113	-11
315	49	2	-77	0	3	56	-11	-90	-94	-13
400	60	0	-8	-14	-5	63	-5	-5	-17	-18
500	38	15	11	-15	2	39	6	8	10	2
630	38	7	1	-1	9	43	1	3	0	9
800	64	-1	-4	-5	-5	64	-4	-1	-3	1
1000	63	2	-5	-7	1	69	0	-4	-5	-1
1250	53	7	-1	0	0	60	3	-3	1	-8
1600	47	9	5	7	3	52	-1	2	0	6
2000	52	8	8	3	6	51	6	7	4	4
2500	60	4	6	8	3	60	3	9	7	2
3150	45	14	12	13	6	50	6	6	8	3
4000	42	9	8	7	8	41	10	9	11	9
5000	43	0	-4	-9	-4	42	-2	-3	-6	-1
Sum	69.5					72.9				
deltaM		5.6	1.4	-2.5	1.5		1.0	1.7	-0.5	-0.1

Bei den seitlich zur Schiene in lateraler Richtung gemessenen Intensitäten zeigt sich in mehreren Terzbändern durch negative Werte eine Pegelreduktion beim Einsatz neuer Betonschwellen. Werden die Pegeländerungen wieder zwischen 400 Hz und 2500 Hz gemittelt, so erzielt die Railbone Schwelle mit doppelter Befestigung den grössten Minderungseffekt mit -4.2 dB, gefolgt von der Hammerhead Schwelle mit -3.2 dB. In vertikaler Schwingungsrichtung sind die Pegeländerungen weniger stark ausgeprägt, zeigen jedoch eine gleiche Reihung der Varianten.

9.3.3 Transferfunktion Hammeranregung Schwelle

Während der Modalanalysen der neuen Betonschwellen wurde ein Mikrofon 1m mittig über der Schwelle platziert. So konnte die Schallabstrahlung bei Hammeranregung der Schwelle ermittelt werden. Ausserdem kann die Übertragungsfunktionen von Schallabstrahlung zu Beschleunigung auf der Schwelle bzw. Schallabstrahlung zu Anregungskraft bestimmt werden.

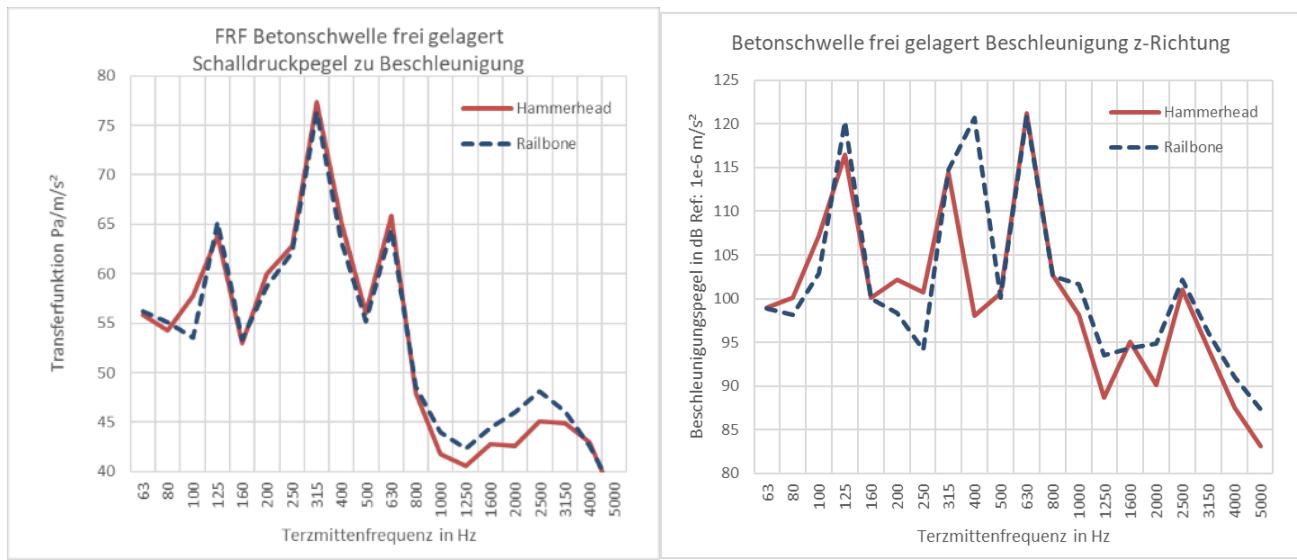


Abbildung 9-13: Schalldruckpegel und Beschleunigungspegel in z-Richtung bei Hammeranregung an der Seite

In den direkt gemessenen Schalldruck- und Beschleunigungspegeln der Schwelle ergeben sich in den Terzbändern 125 Hz, 315 Hz und 630 Hz die höchsten Pegel.

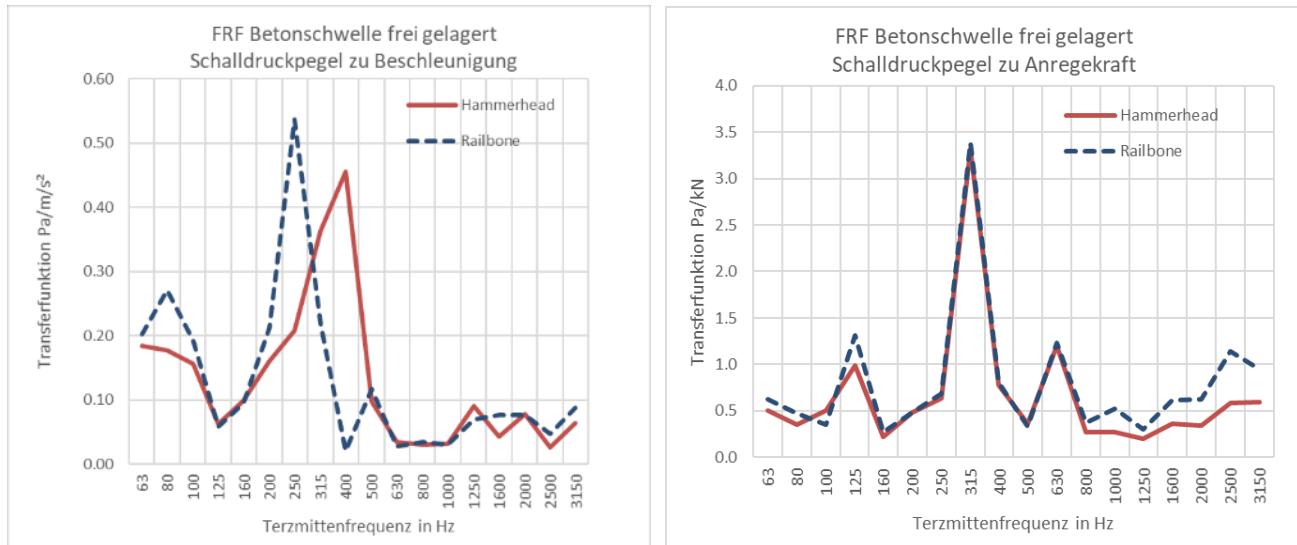


Abbildung 9-14: Übertragungsfunktionen frei schwingende Betonschwellen bei Impulsanregung an der Seite

Bezüglich Transfereigenschaften werden die höchsten Schalldruckpegel bei einer Kraftanregung bei 315 Hz erzeugt. Bei den Beschleunigungen fallen die Frequenzen mit maximaler Transfereigenschaft ebenfalls bei 315 Hz hoch aus, allerdings wandern die Maxima ins benachbarte Terzspektrum, bei der Railbone ist das bei 250 Hz und bei der Hammerhead bei 400 Hz.

9.3.4 Transferfunktion Hammeranregung Schiene im Gleis

Die Transferfunktionen werden aus Verhältnis der Schalldruckspektren zu Beschleunigungs- bzw. Kraftspektren gebildet. Hohe Werte in den Tabellen bedeuten eine hohe Übertragung. An der linken Schiene im Gleis (Schiene mit Shakeranregung) wurde das Mikrofon jeweils in 3m zur Gleismitte oder 2.2m zur Schienenkante in Höhe des 4. Schwellenfachs aufgebaut. An der rechten Schiene befand sich das Mikrofon immer 1m senkrecht über der Schiene und über dem 4. Schwellenfach.

	Transferfunktion Schalldruck 2.2m neben der Schiene/Schienenbeschleunigung Z-Richtung Pa/m/s ²																	
Terz	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
RBaL	6.2	3.5	6.0	8.6	6.7	6.5	5.0	17.4	6.2	6.8	1.2	0.6	0.5	0.4	0.2	0.3	0.4	0.4
RBxL	3.2	3.2	8.0	4.1	2.3	4.3	3.8	21.0	8.4	10.1	2.1	3.5	1.9	0.9	0.2	0.4	0.5	0.3
RBdL	9.2	3.8	4.0	13.1	11.1	8.7	6.1	13.8	4.0	3.5	1.0	1.2	0.7	0.1	0.1	0.2	0.3	0.7
HHL	2.9	1.9	3.1	10.1	5.2	2.7	1.5	15.1	4.3	2.1	1.6	1.9	0.7	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4

	Transferfunktion Schalldruck 2.2m neben der Schiene/Schienenbeschleunigung Y-Richtung Pa/m/s ²																	
Terz	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
RBaL	6.0	1.5	17.7	3.2	0.7	1.1	0.4	0.4	0.3	0.5	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.1
RBxL	6.0	14.0	6.0	1.7	0.9	0.4	0.4	0.4	0.8	0.5	0.3	0.6	0.3	0.3	0.1	0.3	0.4	0.1
RBdL	10.0	9.9	11.8	11.5	0.5	0.4	0.4	0.6	0.2	0.7	0.4	0.6	0.3	0.2	0.2	0.4	0.5	0.2
HHL	6.8	10.9	7.6	2.7	0.3	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.2	0.8	0.4	0.2	0.2	0.3	0.3	0.2

Abbildung 9-15: Transferfunktionen Schalldruck 2.2m neben der Schiene zu Schienenbeschleunigungen

	Transferfunktion Schalldruck 1m über der Schiene/Schienenbeschleunigung Z-Richtung Pa/m/s ²																	
Terz	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
RBaR	3.2	3.2	8.0	4.1	2.3	4.3	3.8	21.0	8.4	10.1	2.1	0.6	0.5	0.4	0.2	0.3	0.3	0.3
RBxR	3.7	1.8	7.8	21.6	11.6	28.7	20.1	19.7	1.7	1.8	0.5	0.3	0.3	0.4	0.3	0.2	0.4	0.6
RBdR	7.7	2.6	2.6	7.2	6.9	13.5	5.8	17.3	4.7	5.3	2.6	2.8	1.7	0.6	0.4	0.3	0.5	0.9
HHR	3.1	2.6	4.4	7.3	17.9	15.8	24.8	12.6	2.0	4.8	2.3	0.3	0.3	0.4	0.2	0.4	0.2	0.2

	Transferfunktion Schalldruck 1m über der Schiene/Schienenbeschleunigung Y-Richtung Pa/m/s ²																	
Terz	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
RBaR	2.8	6.6	10.2	0.7	0.4	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.4	0.4	0.2	0.3	0.6	0.1
RBxR	13.0	21.4	16.7	1.6	0.8	0.3	0.3	0.2	0.4	0.4	0.2	0.2	0.2	0.3	0.1	0.2	0.4	0.1
RBdR	19.5	17.8	29.2	5.7	0.7	0.6	0.7	0.7	0.3	0.5	0.5	0.9	0.4	0.2	0.1	0.3	0.5	0.2
HHR	3.1	3.8	18.1	2.0	0.7	0.2	0.1	0.3	0.2	0.3	0.4	1.1	0.7	0.3	0.2	0.5	0.4	0.3

Abbildung 9-16: Transferfunktionen Schalldruck 1m über der Schiene zu Schienenbeschleunigungen

Zunächst einmal ist erkennbar, dass die vertikalen Schienenschwingungen in Z-Richtung zu hohen Transferwerten im Frequenzbereich 200 bis 800 Hz führen, während die laterale Anregung in Y-Richtung im tieffrequenten Bereich bis 200 Hz höhere Transferwerte aufweist. Bei hohen Terzfrequenzen wird die Aussage schwierig, da die Transferwerte stark abnehmen. Mit steigender Frequenz werden die Beschleunigungen mitunter sehr hoch und die Schalldruckpegel klein.

	Transferfunktion Schalldruck 2.2m neben der Schiene/AnreSchienenbeschleunigung Z-Richtung Pa/kN																	
Terz	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
RBaL	7	5	4	3	3	3	3	4	7	6	10	10	14	17	16	19	33	35
RBxL	4	3	4	2	2	3	4	5	6	7	11	9	12	15	12	14	21	29
RBdL	10	7	4	3	3	3	3	3	8	5	4	3	4	6	6	8	8	20
HHL	4	2	1	2	2	4	6	5	6	6	5	4	5	6	10	9	8	24

	Transferfunktion Schalldruck 2.2m neben der Schiene/AnreSchienenbeschleunigung Y-Richtung Pa/kN																	
Terz	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
RBaL	7	3	8	4	4	6	22	22	62	44	18	18	22	23	32	24	30	37
RBxL	8	6	4	2	5	21	25	41	34	46	46	43	35	30	19	25	27	32
RBdL	19	14	10	7	10	12	14	17	46	42	36	30	36	28	25	27	30	40
HHL	5	4	6	4	7	11	21	27	43	46	50	44	34	31	33	34	27	35

Abbildung 9-17 Transferfunktionen Schalldruck in 2.2m neben der Schiene zu Anregungskraft am Schienenende

	Transferfunktion Schalldruck 1m über der Schiene/Anregungskraft Z-Richtung Pa/kN																	
Terz	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
RBaR	4	3	4	2	2	3	4	5	6	7	12	10	15	27	20	17	22	43
RBxR	8	5	4	5	5	6	4	6	4	6	7	4	12	22	19	14	12	23
RBdR	8	5	4	2	3	3	3	2	5	4	9	8	8	22	15	11	13	29
HHR	6	5	6	5	3	6	5	4	4	6	14	6	11	15	14	10	8	26

	Transferfunktion Schalldruck 1m über der Schiene/Anregungskraft Y-Richtung Pa/kN																	
Terz	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
RBaR	5	4	5	4	5	8	16	16	31	21	34	44	29	37	22	24	24	25
RBxR	21	21	19	16	14	14	17	20	22	19	24	17	22	32	24	21	21	22
RBdR	31	22	16	10	11	28	27	21	30	22	52	40	38	24	19	28	29	44
HHR	5	4	5	7	5	11	9	8	23	25	79	86	45	47	28	41	33	45

Abbildung 9-18 Transferfunktionen Schalldruck in 1m über der Schiene zu Anregungskraft am Schienenende

Bei den Transferfunktionen Schalldruck zu Kraftanregung kehrt sich das Verhältnis um, so sind die Werte bei höheren Frequenzen grösser als bei tieferen.

9.3.5 Transferfunktion Lautsprecheranregung

Bei dieser Messung wird die Schiene mit einem Lautsprecher in 2m Entfernung angeregt und der Schalldruck am Lautsprecher sowie am Schienensteg gemessen und die Übertragungsfunktion zu den Schienenbeschleunigungen gebildet. Dabei wurde die komplexe Transferfunktion berechnet und anschliessend in ein Frequenzspektrum überführt. Die Ergebnisse zeigen, dass im Frequenzbereich des Schienenschalls zwischen 500 und 2000 Hz eine gewisse Anregung durch Luftschall stattfindet. Das ist grundsätzlich plausibel. Die Messung ist jedoch nicht standardisiert und es gibt noch nicht viel Erfahrungswerte dabei, daher sind Unsicherheiten im Ergebnis zu berücksichtigen. Der Peak bei der Hammerhead-Schwelle bei 1600 Hz ist etwas stärker ausgeprägt, was hier nicht weiter erklärt werden kann.

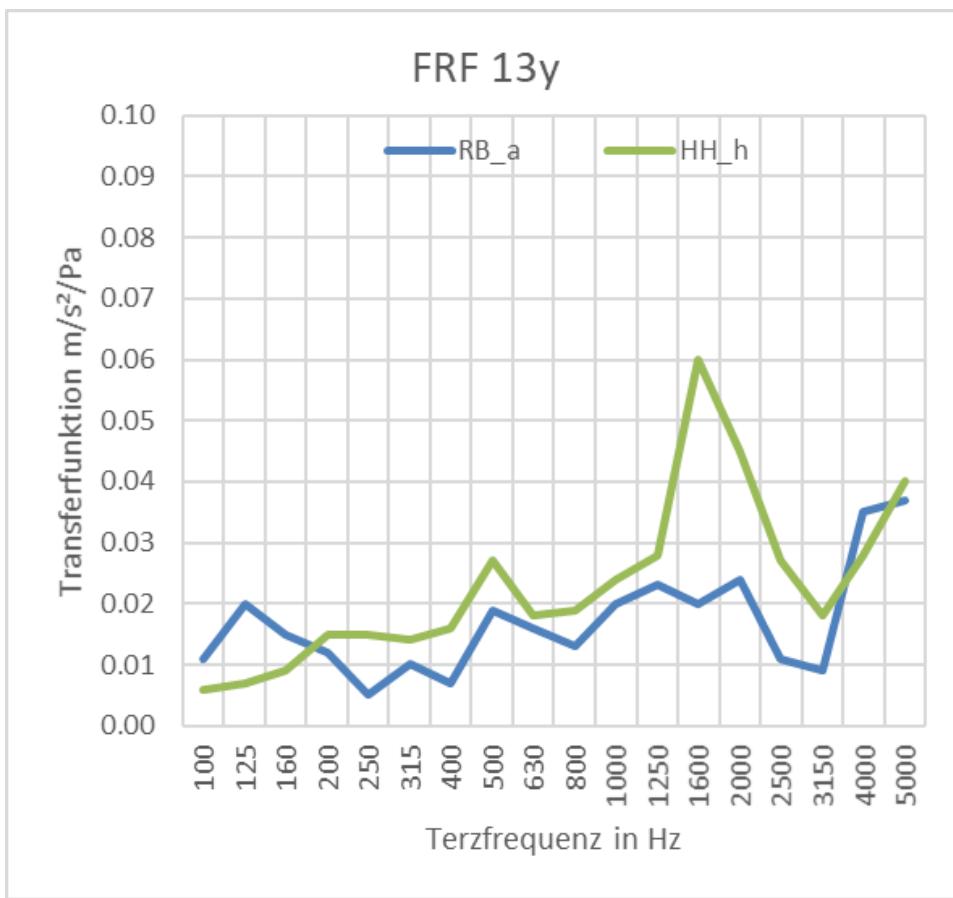


Abbildung 9-19: Transferfunktion Luftschall am Schienensteg zu Beschleunigung

9.3.6 Modalanalyse neue Schwellen

An den neuen Betonschwellen wurden zwei Modalanalysen durchgeführt. Zum einen wurden beide Betonschwellen tief abgestimmt gelagert (frei-frei), um die modalen Eigenschaften ohne externe Dämpfung durch den Schotter zu bestimmen. Dabei wurde noch ein zusätzliches Mikrofon 1m über der Schwelle für die Messung des durch die Schwelle abgestrahlten Schallanteils befestigt.

Tabelle 9-8: Gegenüberstellung der modalen Eigenformen der Betonschwellen Hammerhead, Railbone und B91

Hammerhead			Railbone			B91			B91 mit Besohlung		
f [Hz]	D [%]	Eigenform	f [Hz]	D [%]	Eigenform	f [Hz]	D [%]	Eigenform	f [Hz]	D [%]	Eigenform
110.8	0.9	1. Biegung, vertikal	114.4	0.7	1. Biegung, vertikal	111.9	2.1	1. Biegung, vertikal	113.0	2.5	1. Biegung, vertikal
182.0	0.8	1. Biegung, horizontal	180.9	0.9	1. Biegung, horizontal	118.4	1.6	1. Biegung, horizontal	122.5	2.1	1. Biegung, horizontal
			341.1	0.8	2. Biegung, vertikal	330.3	0.8	2. Biegung, vertikal	338.7	3.0	2. Biegung, vertikal
324.1	0.9	1. Torsion	377.9	0.7	1. Torsion	339.7	0.7	1. Torsion	349.8	1.2	1. Torsion
550.8	0.6	2. Biegung, horizontal	508.7	0.6	2. Biegung, horizontal	369.9	0.6	1. Torsion + 2. Biegung.h	378.2	1.0	1. Torsion + 2. Biegung.h
650.1	0.6	3. Biegung, vertikal	655.9	0.6	3. Biegung, vertikal						
761.1	0.6	Dehnschwingung	793.9	0.6	Dehnschwingung	734.5	1.4	Dehnschwingung	798.8	1.5	Dehnschwingung
			935.4	0.6	3. Biegung, horizontal	720.1	1.3	3. Biegung, horizontal	741.8	1.0	3. Biegung, horizontal
965.3	0.5	2. Torsion	972.1	0.5	2. Torsion	1010.7	0.8	4. Biegung, vertikal	1030.7	0.8	4. Biegung, vertikal
1014.4	0.6	keine Identifikation	1024.2	0.7	4. Biegung, vertikal	1100.9	0.6	2. Torsion + Biegung.h	1085.9	1.0	2. Torsion + Biegung.h
1243.0	0.5	3. Torsion	1317.7	0.5	3. Torsion	1141.4	0.7	4. Biegung, horizontal	1159.0	0.5	4. Biegung, horizontal
			1388.3	0.6	keine Identifikation	1100.9	0.6	2. Torsion + Biegung.h	1100.9	0.6	2. Torsion + Biegung.h
1432.8	0.5	keine Identifikation	1445.0	0.5	keine Identifikation	1141.4	0.7	4. Biegung, horizontal	1141.4	0.7	4. Biegung, horizontal

Die Identifikation der Eigenmoden ist bei der freien Lagerung einer Betonschwelle durch die niedrige Dämpfung noch einfach. Bei den ersten sechs Eigenmoden bis 800 Hz ergeben sich nur geringfügige Änderungen, welche keine wesentlichen Auswirkungen auf den Schienenschall haben dürften. Zwischen 800 und 1400 Hz wird es dann spannend.

Im eingebauten Zustand im Gleis ändern sich die Eigenfrequenzen der Betonschwelle nur wenig, die Dämpfung nimmt natürlich stark zu, teilweise so sehr, dass keine Schwingungsmoden mehr identifiziert werden können.

Tabelle 9-9: Modale Eigenformen der Betonschwellen im Schottergleis mit Schiene

Hammerhead im Gleis mit Schiene			B91 im Gleis mit Schiene			B70 im Gleis mit Schiene		
f [Hz]	D [%]	Eigenform	f [Hz]	D [%]	Eigenform	f [Hz]	D [%]	Eigenform
107.0	16.5	1. Biegung, vertikal	186.6	14.5	1. Biegung vertikal asym.	182.2	14.2	1. Biegung vertikal asym.
199.4	18.2	1. Biegung, horizontal						
335.0	11.8	1. Torsion	406.2	10.1	2. Biegung vertikal	422.1	8.4	2. Biegung vertikal
522.8	8.3	2. Biegung, horizontal						
599.0	1.6	2. Biegung, vertikal	644.8	3.9	3. Biegung vertikal	575.8	6.4	3. Biegung vertikal
810.8	3.0	"Längsschwingung"	815.4	8.9	3. Biegung horizontal	777.6	2.4	3. Biegung horizontal
996.4	4.6	2. Torsion						
		keine klare Identifikation	1140.6	4.0	Torsion Mittelteil	1179.9	2.9	4. Biegung horizontal/vertikal
1337.0	4.0	3. Torsion						
1453.3	2.5	keine klare Identifikation						

Allerdings ist eine Änderung der Torsionsschwingung im Frequenzbereich der vertikalen pin-pin-Mode der Schiene bei etwa 1070 Hz wesentlich. Zur Erinnerung: Die vertikale pin-pin-Mode ist vom Schienenprofil, hier UIC60, deren E-Modul und den Schwellenabständen (60 cm) abhängig und wird hier durch eine Torsionsschwingung der Schwelle unterstützt. Bei den beiden Betonschwellen B91 und B70 liegt diese Torsionsschwingung bei ca. 1100 Hz. Durch das neue Schwellendesign der Railbone und Hammerhead Schwelle mit breiterem Mittelschaft und breiteren Schwellenköpfen hat sich diese Torsionsschwingung nun von der pin-pin-Mode entfernt und liegt bei 970 Hz (2. Torsion) und 1270 Hz (3. Torsion). Dies ist aus schwingungstechnischer Sicht ein grosser Erfolg, da so die vertikale pin-pin-Mode der Schiene stärker entkoppelt wird.

9.4 Statische Prüfung und Nachweis

Die statischen Prüfungen an den Schwellen erfolgten im Labor Vigier Rail in Müntschemier in Anlehnung an die Norm EN 13230-2. Die Ergebnisse wurden mit jenen der Streckenschwelle B91 verglichen. Als Grundlage für die Beurteilung wurden die Anforderungen in den Technischen Spezifikationen der SBB hinzugezogen. In folgender Tabelle sind die Ergebnisse des Vergleichs der drei Schwellentypen zusammengefasst.

Tabelle 9-10: Ergebnisse der statischen Prüfungen im Schienenauflagerbereich gemäss Norm EN 13230 der drei Schwellentypen mit Angaben der Lasterhöhung im Vergleich zu den B91-Werten

Prüfparameter	B91	Hammerhead	Railbone	Anforderungen SBB
Risslast ¹	211 kN	265 kN +25%	320 kN +51%	≥ 160 kN
Last bei $Fr_{0.05}$ ²	378 kN	405 kN +9%	415 kN +11%	≥ 290 kN
Bruchlast ³	437 kN	481 kN +10%	509 kN +16%	≥ 400 kN

- 1 Positive Prüfkraft, die zum ersten Riss an der Unterseite des Schienenauflagerquerschnitts führt
- 2 Maximale Prüfkraft, bei der nach der Entlastung eine Rissbreite von 0,05 mm an der Unterseite des Schienenauflagerquerschnitts bestehen bleibt
- 3 Maximale positive Prüfkraft am Schienenauflagerquerschnitt, die nicht weiter erhöht werden kann

Erwartungsgemäss weisen die modifizierten B91-Schwellen eine höhere Tragfähigkeit gegenüber einer B91 auf. Auch die Anforderungen der SBB werden gut eingehalten; Optimierungspotenzial betreffend Vorspannung ist vorhanden. Die Abmessungen hingegen können kaum verändert werden, da Überdeckung der Spanndrähte und Toleranzen den Spielraum eingrenzen.

9.5 LCC Betrachtung

Der Hauptvorteil der neuen Betonschwellen bezüglich einer LCC Betrachtung liegt in der breiteren Auflagefläche im Schotterbett. Zunächst wird diese anhand analytischer Methoden berechnet.

Tabelle 9-11: Eingangsparameter für die Schwellendruckberechnung (Quelle: Eisenmann, Schiene als Träger und Fahrbahn)

Parameter	Kurz	Wert	Einheit
Bettungszahl	C	100	MN/m ³
Trägheitsmoment Schienenprofil	J	3.055E-05	m ⁴
Auflagefläche pro Seite	A1	0.284145	m ²
E-Modul Schiene	E	2.10E+11	N/m ²
Schwellenabstand	a	0.6	m
Äquivalente Auflagebreite	b	0.473575	m
Charakteristische Länge	L	0.85797658	m
Auflast	Q	100000	N
Einsenkung	dz	0.00123057	m
Druck auf Schotter	p Ballast	123057	N/m ²

Tabelle 9-12: Berechnung der Änderung im Schotterdruck für eine Auflast Q von 100 kN

	Fläche	Verhältnis	Schwellendruck / Auflast Q			Verhältnis Druck zu B91	Änderung
		A/A_B91	50	100	200	p/p_B91	p_B91/p
	m^2		MN/m^3	MN/m^3	MN/m^3		
Railbone	0.409775	1.442	78631	93509	111201	0.760	1.316
Hammerhead	0.362390	1.275	86223	102537	121937	0.833	1.200
B91	0.284145	1.000	103478	123057	146340	1.000	1.000
B70	0.296500	1.043	100227	119191	141742	0.969	1.032

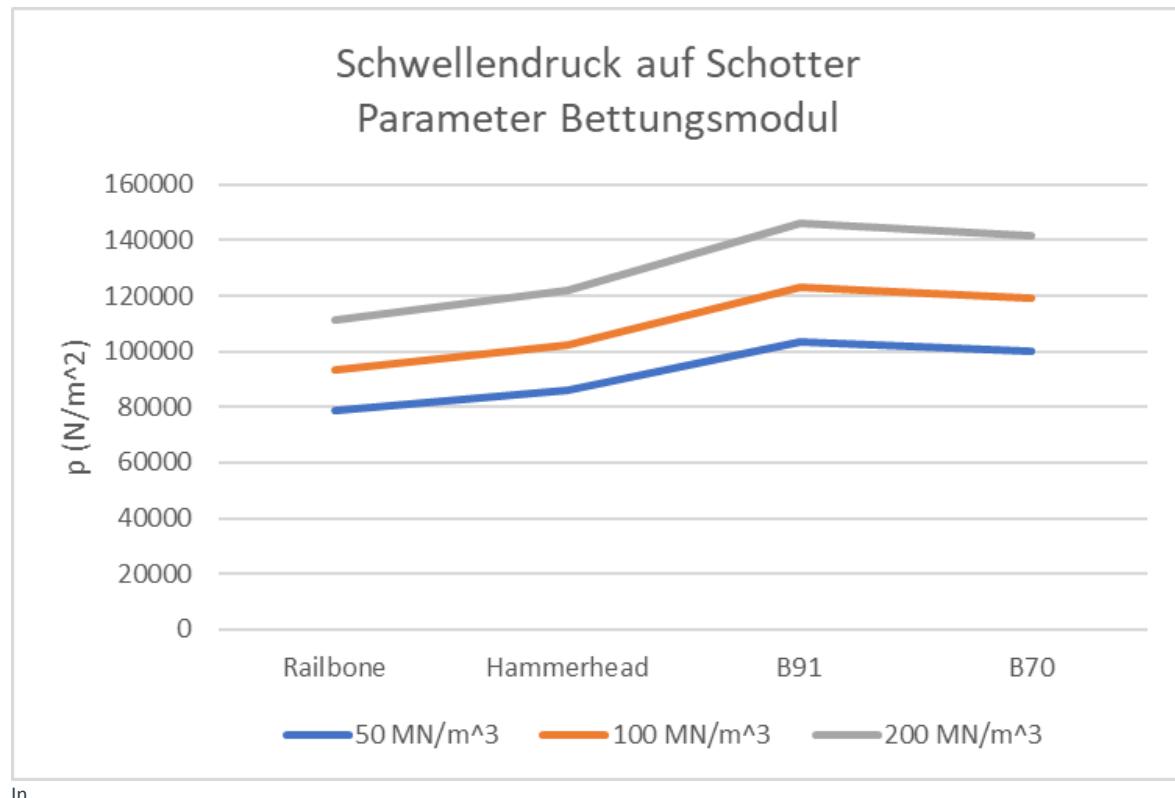


Tabelle 9-12 wurden die Schotterdrücke für drei Auflasten berechnet. 50 kN werden etwa von Personenzügen mit Scheibenbremsen, 10 kN von beladenen Güterwagen und Lokomotiven erreicht und 20 kN bilden die Ausnahmen bei hohen Erschütterungen durch unrunde Räder oder Flachstellen. Der Schotterdruck ändert sich annähernd proportional zur Auflast, daher wurde für die Berechnung der Druckänderung zur Betonschwelle B91 die mittlere Auflast $Q = 100 \text{ kN}$ verwendet.

Durch eine Vergrösserung der Auflageflächen kann der Schotterdruck bei regulärem Betrieb durch den Einsatz von Rail-Bbone-Schwellen um 32 % und von Hammerhead-Schwellen um 20 % gesenkt werden.

Geht man davon aus, dass der Schotterdruck direkt mit dem Verschleiss des Schotters sowie mit der Gleislageänderung zusammenhängt, so sollte die Zeitdauer von Wartungsintervallen um 25% verlängert werden.

Innerhalb einer Lebensdauer eines Gleises von 30 Jahren werden etwa alle 5 Jahre Wartungsarbeiten am Schotterbett zur Herstellung einer gewünschten Gleislagequalität durchgeführt. Mit den neuen Betonschwellen würde sich das Wartungsintervall auf 6.25 Jahre erhöhen, somit kann innerhalb der Gleislebensdauer eine Wartung eingespart werden.

Demgegenüber stehen etwas höhere Investitionskosten:

- Kosten der Betonschwelle im Gleisbau, wobei die anteiligen Kosten der Betonschwellen pro Meter Neubaugleis heute nur bei 6-10 % liegen.
- Transportkosten: B91 = 300 kg, Hammerhead = 410 kg, Railbone = 465 kg bedeuten auf einem CTW mit 69 Zuladung: 230 B91, 170 Hammerhead, 150 Railbone
- Die Schotterung ist aufwändiger zu füllen und zu stopfen, da der Schwellenzwischenraum kleiner wird.

In der LCC-Bilanz dürften die neuen Betonschwellen sehr wahrscheinlich positiv abschliessen.

10 Zusammenfassung

Im Laufe des Forschungsprojekts zur optimierten Betonschwelle wurden Erkenntnisse über das Schwingungsverhalten und die Schallabstrahlung von Gleiskomponenten zusammengetragen, die für lärmreduzierende Massnahmen in Betracht kommen. In der Zusammenarbeit mit dem Hersteller Vigier Rail wurden darauf zwei neue marktfähige Betonschwellen entwickelt und umfangreich gemessen.

In der ersten Projektphase wurden die funktionellen Grundlagen und akustischen Eigenschaften der Betonschwelle im Oberbautyp zusammengetragen, Messkonzepte ausgearbeitet und Vorbereitungen für die Vergleichsuntersuchungen getroffen. In der zweiten Projektphase wurden Modalanalysen an Betonschwellen B91 und B70 durchgeführt. Abweichend vom ursprünglichen Plan, weitere Messungen an realen Gleisen durchzuführen, wurden nun die Messungen an einem kurzen Testgleis von 6m Länge durchgeführt. Dazu wurde zunächst ein vorhandenes Testgleis der Firma Schrey&Veit in Sprendlingen mit B70-Betonschwellen untersucht und darauf ein neues Testgleis mit B91-Schwellen in Müntschemier bei Vigier Rail aufgebaut. Ziel war es, auch mit neuen bildgebenden Messverfahren wie akustischer Nahfeldholographie, die Schallanteile von Schiene und Schwelle zu bestimmen.

Messtechnisch sind die Schwingungen und deren Übertragung von Schiene zur Schwelle noch einfach mittels Beschleunigungssensoren zu bestimmen, während die Schallabstrahlung der Schwelle selbst kaum messbar ist. Nur bei isolierter Betrachtung der Schwelle in der Modalanalyse sind die Eigenmoden und die Dämpfungen erkennbar. Die ersten 8 Eigenmoden liegen im Frequenzbereich zwischen 125 Hz bis 1000 Hz, in welchem die Schwelle auch einen theoretisch nachgewiesenen Luftschallanteil am Rollgeräusch hat. Bei der Messung an den Testgleisen mit realistischer Schwingungsanregung über die Schiene konnten jedoch Eigenmoden und Luftschallabstrahlung nicht in Zusammenhang gebracht werden, da der Schienenschall ab 315 Hz den Anteil der Schwelle bereits überdeckt. Die Schwellen B70 und B91 sind in ihrer Geometrie und Schwingungsform nahezu identisch, demnach haben unterschiedliche Materialien, Herstellungsmethoden und Armierungen keinen Einfluss auf die Schallabstrahlung.

Wenn der Schwellenschall also kaum messbar ist und nur einen kleinen Anteil im tieffrequenten Bereich vom Rollgeräusch hat, so ist auch die Optimierung der Schallabstrahlung von Betonschwellen wenig sinnvoll. Der Schienenschall im Frequenzbereich zwischen 315 und 2000 Hz bestimmt massgeblich das Rollgeräusch, somit ist eine Reduktion im Rollgeräusch zunächst nur durch eine bessere Dämpfung der Schiene zu erreichen. Die TDR steht im direkten Zusammenhang mit der Schienenschallabstrahlung und wird damit zur zentralen Bewertungsgröße im Design einer neuen Schwelle. Neben der TDR stehen natürlich auch noch Eigenschaften bezüglich Absorption und Reflexion im Fokus.

Nach ersten Messungen im Testgleis mit B91-Schwellen von Vigier Rail wurden in der dritten Phase FE-Modelle der Betonschwelle und der Testgleise aufgebaut und die Schwingungseigenschaften, Eigenmoden und Dämpfungen mit den Ergebnissen aus den vorangegangenen Messungen abgeglichen. Aus den Erkenntnissen der Messungen bezüglich Schwingungsverhalten der Betonschwellen im Gleis und deren Luftschallabstrahlung wurde im Rahmen eines Workshops und nach Auswertung eines morphologischen Kastens das Design lärmoptimierter Schwellen festgelegt. Das Ergebnis eines morphologischen Kastens ergab drei Designideen mit hohen Marktchancen, welche zunächst im Rahmen der FEM-Simulation bewertet wurden und wovon später die beiden vielversprechenden Designs als Prototypen gebaut wurden.

Der Betonschwellentyp «Railbone» zeichnet sich durch breitere Köpfe mit je vier Befestigungspunkten pro Kopfseite aus, so dass doppelte Schienenklemmungen oder aperiodische Klemmungen möglich sind. Eine zweite Designidee «Hammerhead» ist asymmetrisch und hat nur einen verbreiterten Kopf mit vier Befestigungen und einen schmalen Kopf mit zwei Befestigungen, sie wird auch im Gleis im Wechsel der Kopflage verlegt.

Simulation und Messungen der Schienendämpfung von Testgleisen mit den neuen Schwellentypen haben gleichwertige Ergebnisse hervorgebracht. Durch die breiteren Schwellenköpfe und die doppelte Klemmung kann trotz Beibehalt des standardisierten Schwellenabstandes von 60 cm im relevanten Frequenzbereich der Schiene zwischen 800 und 1250 Hz die Dämpfung erhöht werden. Dies wird nach den akustischen Untersuchungen zum einen durch die grössere Auflagefläche der Schiene erreicht und zum anderen über eine Verlagerung von Torsionsschwingungsmoden der Schwelle weg von der kritischen vertikalen pin-pin-Mode der Schiene.

In der Praxis hat das Testgleis mit Railbone-Schwellen und doppelter Schienenbefestigung am besten abgeschnitten, gefolgt vom Gleis mit Hammerhead-Schwellen. Am Testgleis wurden im kritischen Bereich des Schienenschalls bei 1000 Hz somit über 2.5 dB höhere und bei 1250 Hz noch über 1.5 dB höhere TDR Werte-in lateraler Richtung gemessen als beim Gleis mit B91-Schwellen. Aus dem Verhältnis der ermittelten TDR Werte von Testgleis mit B91 Schwellen und den jeweiligen neuen Schwellen kann schliesslich die zu erwartende Pegeländerung im Schienenschall berechnet werden Tabelle 9-5. So erzielt das Testgleis mit Railbone Schwellen und doppelter Befestigung im relevanten Frequenzbereich von 400 Hz bis 2500 Hz eine mittlere Pegelminderung von 1.4 dB über die Betrachtung der vertikalen TDR Werte. Über die Intensitätsmessungen konnte die Pegelminderung in beiden Schwingungsrichtungen bei den neuen Betonschwellen ermittelt werden. Hier zeigte die laterale Richtung eine breitere Wirkung als die vertikale Richtung. Aus den Intensitätsmessungen geht erneut das Testgleis mit Railbone und doppelter Befestigung als Favorit mit Pegelminderungen von 2.5 bis 4.2 dB hervor, dicht gefolgt vom Testgleis mit Hammerhead.

Da dieser Frequenzbereich im Rollgeräusch im A-bewerteten Spektrum i.d.R. die höchsten Terzpegel aufweist, wirken sich diese Änderungen direkt auf den Summenpegel aus, sodass eine Pegelminderung durch die Betonschwelle von 1-2 dB realistisch ist. Im tieffrequenten Bereich gibt es leichte Pegelreduktionen durch die höhere Schwellenmasse und Dämpfung.

Die Wirkung von elastischer Schwellenbesohlung wurde im Rahmen des Projekts am Anfang in der Modalanalyse der B91-Betonschwellen untersucht, da bei mehreren Untersuchungen eine Zunahme des Schienenschallanteils beobachtet wurde. Im Gleis haben beide Schwellenarten durch ihre Geometrie, Masse und Oberfläche eine annähernd gleiche Dämpfung, zumindest wenn sie mit Modalhämmer angeregt werden. Die Modalanalyse besohlter B91-Schwellen bei freier Aufhängung hat allerdings gezeigt, dass durch die Besohlung Frequenzverschiebungen in den Schwingungsmoden auftreten, da sie die Biegesteifigkeit der Schwelle geringfügig erhöhen. Nach unseren Messungen verschiebt sich die 2. Torsionsmode bei besohlten Schwellen dann genau auf die vertikale pin-pin-Mode der UIC60-Schiene und wirkt dann möglicherweise als verstärkender Faktor. Mit den neuen Betonschwellentypen wird das nicht passieren, da deren Torsionsschwingungsmoden bereits um 100 Hz tiefer liegen.

Aus akustischer Sicht wird mit neuen Betonschwellen vom Typ Railbone oder vom Typ Hammerhead sowie bei Verwendung von harten Zwischenlagen somit ein lärmärmer Gleisaufbau möglich, an dem 1-2 dB niedrigere Vorbeifahrpegel als bei einem konventionellen Gleis mit B91-Schwellen realistisch sind.

Durch die höhere Auflagefläche beider Schwellen verringert sich die Schotterpressung bei den neuen Betonschwellen vom Typ Railbone um 32 % und Hammerhead um 20 %. Dies ermöglicht zum einen längere Wartungsintervalle oder auch den Einsatz von bereits vorhandener Technologie, wie z.B. harten Zwischenlagen oder Schwellenbesohlung.

Die Schwellen haben die nötigen Prüfungen für die Festigkeit bestanden und sind damit für eine Erprobung im Feldversuch einsatzbereit.

10.1 Ausblick

Die Messungen am Testgleis können nicht das volle Spektrum der Umgebungsbedingungen eines realen Gleises abbilden, aber für das unterschiedliche Schwingungsverhalten, z.B. Betonschwelle frei-frei, im Schotterbett mit/ohne Schiene, liefert es plausible Ergebnisse. Die TDR ist neben den verwendeten Bauteilen auch von einer Einfahrphase durch realen Betrieb abhängig, so nimmt die TDR eines neuen Gleises in den ersten Wochen zu, da sich Schwellen und Schotter dann einarbeiten. Weiter ist die Schiene im realen Gleis quasi unendlich lang, was einen erheblichen Unterschied auf die Ausbreitung der Biegewellen hat, sie können sich dann ohne Reflexion ausbreiten. Im Testgleis werden die Biegewellen an den Schienenenden reflektiert und innerhalb eines Messintervalls mehrfach hin und her gespiegelt.

Sobald die notwendigen Labortests erfolgt sind, können die Schwellen in einem Feldversuch eingesetzt werden. Daher ist ein konsequenter nächster Schritt, der Einbau eines der beiden neuen Betonschwellen in einem Gleisabschnitt auf mindestens 100m Länge.

10.2 Bewertung Marktchancen

Das Design der neuen Betonschwellen wurde stets auch mit Kenntnissen über Oberbautypen, Wartungsmassnahmen und Marktanteilen abgestimmt. Andere Schwellenabstände oder komplexe Geometrien, wie auch Verbundschwellen wurden vermieden.

In der Vergangenheit wurden bereits ähnliche Schwellen mit Kopfverbreiterungen entwickelt, meist jedoch mit nur einer Befestigung und mit dem Zweck der Erhöhung des Querverschiebewiderstandes und Verringerung der Schotterkräfte. Die Heavy-Duty-Schwelle HDS von der österreichischen Firma SSL kommt dem Design von PROSE/Vigier Rail am nächsten.

Tabelle 10-1: Vergleich Betonschwellen

Parameter	Railbone	Hammerhead	HDS	B91
Masse	450	400	450	290
Höhe	210 mm	210 mm	230 mm	210 mm
Breite	400 mm	300/400 mm	550 mm	300 mm
Länge	2600 mm	2600 mm	2600 mm	2600 mm

Im Vergleich zur HDS-Schwelle bieten Railbone und Hammerhead jedoch mehr Schwellenfachvolumen, da die Köpfe schmäler sind, was das Stopfen und das Verlegen erleichtern sollte. Die Hammerhead-Schwelle bietet bei ähnlicher akustischer Performance wie Railbone zudem noch einen weiteren Massevorteil von 50 kg pro Schwelle.

Aus historischer Sicht wäre ein Gleis mit alternierend verlegten Hammerhead-Betonschwellen eine gewisse Neuheit mit dem höchsten Innovationsgrad.

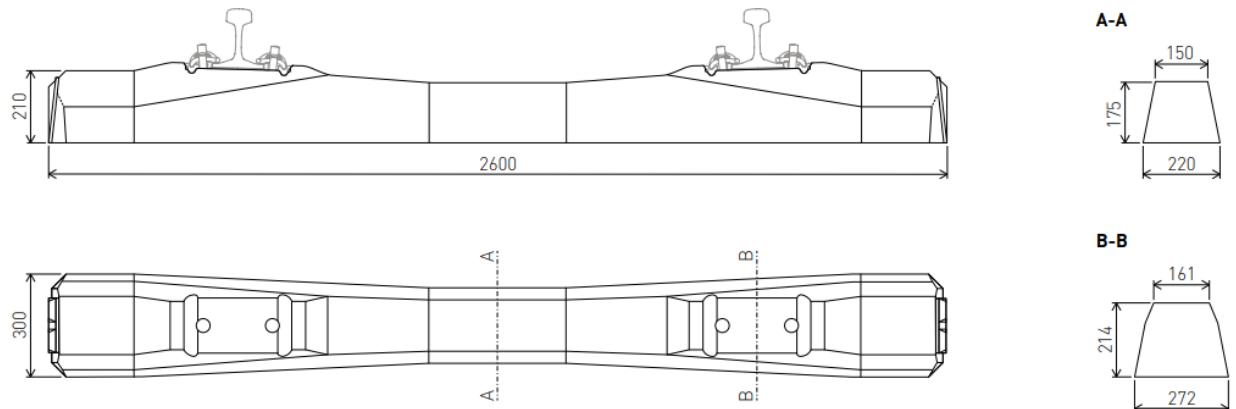
Für die Ermittlung der Mehrkosten im Gleisbau wurde eine grobe Berechnung durchgeführt, welche auf den geschätzten Investitionskosten für 100m Gleis aus dem Netzzustandsbericht der SBB 2016 [25] basieren – siehe Anhang E.3. Bei einem Standardoberbau haben die Betonschwellen einen Kostenanteil von 8.3 %. Angenommen ein neues Gleis würde mit Railbone Schwellen ausgestattet, so betragen der Anteil der Betonschwellen durch Mehrkosten in der Herstellung, Logistik und beim Einbau dann 16.2 %. Mit den Railbone Schwellen lassen sich jedoch auch Gleise mit höherem Schwellenabstand realisieren, bei einem Abstand von 75cm würde der Kostenanteil der Betonschwellen dann wieder etwas sinken und auf 12.7% kommen.

11 Literatur

- [1] *Harmonoise, EU Projekt, <https://cordis.europa.eu/project/rcn/57829/factsheet/de>*
- [2] *B. Lichtenberger, Handbuch Gleis, 2004*
- [3] *IMAGINE EU Forschungsprojekt Improved Methods for the Assessment of Generic Impact of Noise in the Environment, EU 2006, <https://cordis.europa.eu/project/rcn/73857/reporting/en>*
- [4] *F. Auer. Diss. Zur Verschleißreduktion von Gleisen in engen Bögen, TU Graz 2010, <https://diglib.tugraz.at/download.php?id=57ff5f64547d4&location=browse>*
- [5] *David Thompson, Railway Noise and Vibration, 2009*
- [6] *BAFU, sonRAIL Projektdokumentation 2010*
- [7] *C. Gramowski, Diss Gleisseitige Schallemission - Experimentelle Quantifizierung, 2013 https://depositonce.tu-berlin.de/bitstream/11303/3861/1/Dokument_37.pdf*
- [8] *STARDAMP – Standardisation of damping technologies for reduction of rolling noise, 05-2013 <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/49442/?clsId0=0&clsId1=0&clsId2=0&clsId3=0>*
- [9] *SBB, Schlussbericht Erprobung Schienendämpfer 04-2016*
- [10] *PROSE, 02-00952 Vergleich Zwischenlagen, Projekt 15.043*
- [11] *PROSE, 02-00933 Lärmzunahme Unterschottermatten, Projekt 14.138 und 14.140*
- [12] *PROSE, 04-03-01033 Lärmzunahme bei Schwellenbesohlung, Projekt 14.105*
- [13] *C. Czolbe, H-R. Graf, Schienenschall Messungen, DAGA 2018*
- [14] *PROSE, 04-03-01718, Akustische Wirkung von Betonschwellen B70 und B91, 2018*
- [15] *PROSE, 04-03-01959, Messung Schallabstrahlung B70 Schwellen, 12-2018*
- [16] *EMPA, TU-Berlin, TU-München, Oberbau-Schallsimulationstool OST, ZEV-Rail, 10-2018 und Bahnakustik Tagung MBBM 2018*
- [17] *PROSE, 02-01329, Akustische Wirkung von Zwischenlagen in engen Bögen der BLS AG, 2018*
- [18] *G. Schleinzer et.al., Roll²Rail Projekt, MBBM Bahnakustik Tagungsband 11-2018*
- [19] *M. Hecht, S. Sohr; Schlussbericht - Bericht Nr. 37 / 2017 Projekt „Entwicklung eines Simulationstools zur Auslegung lärmärmer Gleiskonstruktionen“*
- [20] *Sohr, Hecht, Zhang, Lechner, Hannema, Zemp, Wunderli, Entwicklung eines Simulationstool zur Entwicklung lärmärmer Gleisoberbautypen, ZEV Rail 10-2018*
- [21] *E. Jansen, M. Dittrich, C. Czolbe, characterisation of the effect of rail web shielding, IWRN13, KU Leuven 09-2019*
- [22] *PROSE, 02-01319, Schienenstegabsorber (SSA), Bestimmung Einfügedämmmass an 6m Schiene 07-2018*
- [23] *H.R. Graf, C.Czolbe, Sound radiation from the rail, ICA 2019*
- [24] *X. Zhang, D. Thompson, J. Ryue, H. Jeong, G. Squicciarini, M. Stangl et al. The Sound RADIATION OF A RAILWAY RAIL FITTED WITH ACOUSTIC SHIELDING, ICSV25 Japan 2018*
- [25] *SBB Infrastruktur Netzzustandsbericht 2016, Zusammenfassender Jahresbericht 2015, 03.2016*

A Technische Daten

A.1 B91-Schwelle

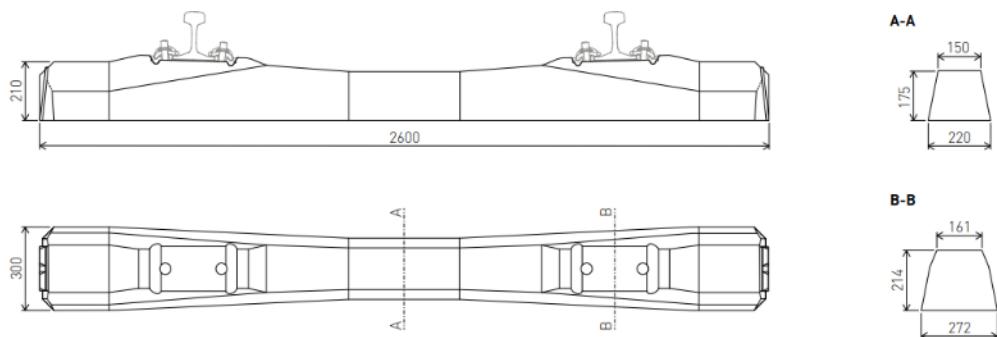


TECHNISCHE DATEN

Zulässige Achslast	225 kN
Spurweite	1435 mm
Schienenneigung	1:40
Normalerweise verwendete Schienen	54 E 2, 60 E 1
Befestigungen	Oberbauform W3 oder W14
Schwellenlänge	2600 mm
Schwellenbreite	300 mm
Schwellenhöhe unter der Schiene	214 mm
Gewicht mit Befestigung	286 kg
Verlegeabstand	600 mm

A.2 B70-Schwelle

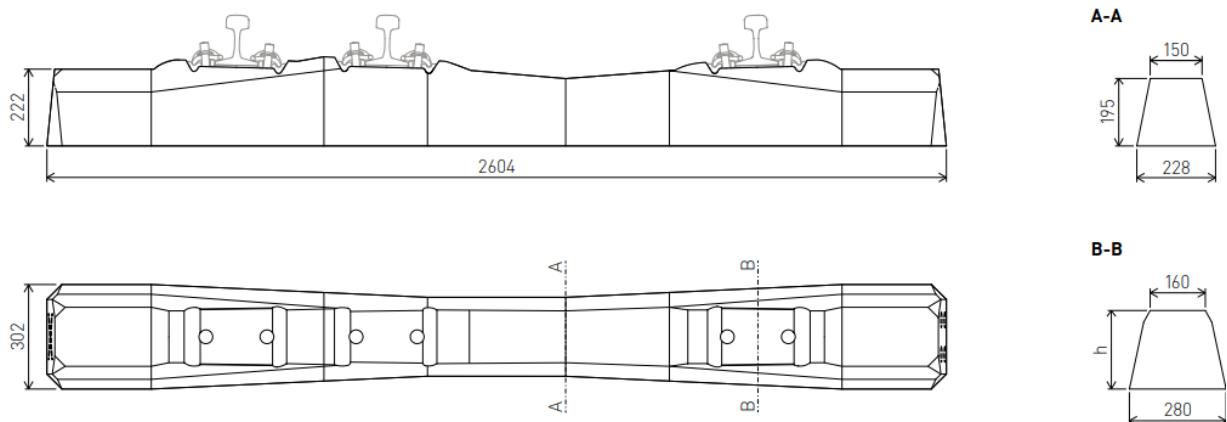
Masse und Gewichte identisch zur B91-Schwelle (wird noch ergänzt).



TECHNISCHE DATEN

Zulässige Achslast	225 kN
Spurweite	1435 mm
Schienenneigung	1:40
Normalerweise verwendete Schienen	54 E 2, 60 E 1
Befestigungen	Oberbauform W3 oder W14
Schwellenlänge	2600 mm
Schwellenbreite	300 mm
Schwellenhöhe unter der Schiene	214 mm
Gewicht mit Befestigung	286 kg
Verlegeabstand	600 mm

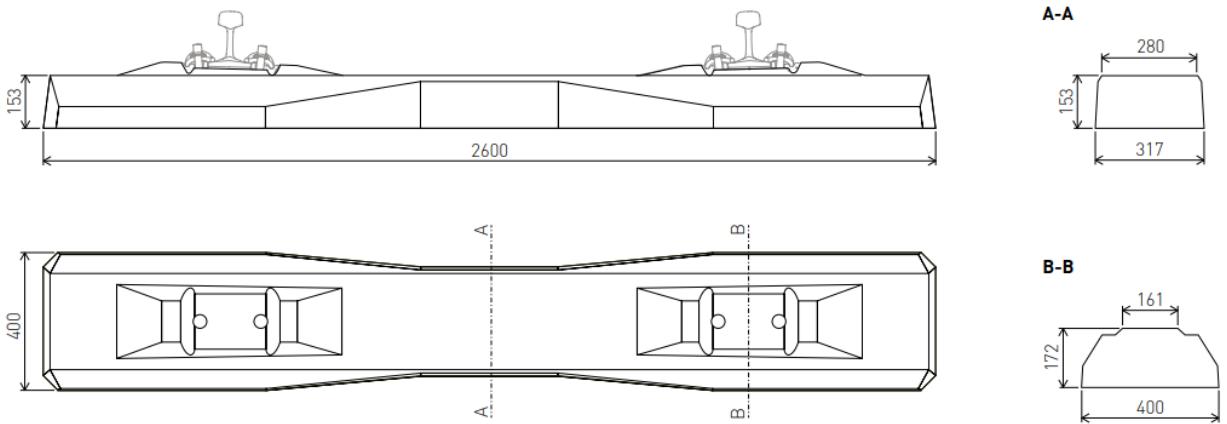
A.3 B70-MN-Schwelle



TECHNISCHE DATEN

Zulässige Achslasten	225 und 160 kN
Spurweiten	1435 und 1000 mm
Schienenneigung	1:40 / 1:20
Normalerweise verwendete Schienen	46 E 1, 54 E 2, 60 E 1
Befestigung	Oberbauform W3 oder W14
Schwellenlänge	2604 mm
Schwellenbreite	302 mm
Schwellenhöhe unter der Schiene (h)	227 mm / 231 mm
Gewicht mit Befestigung	328 kg
Verlegeabstand	600 mm

A.4 S06-Schwelle

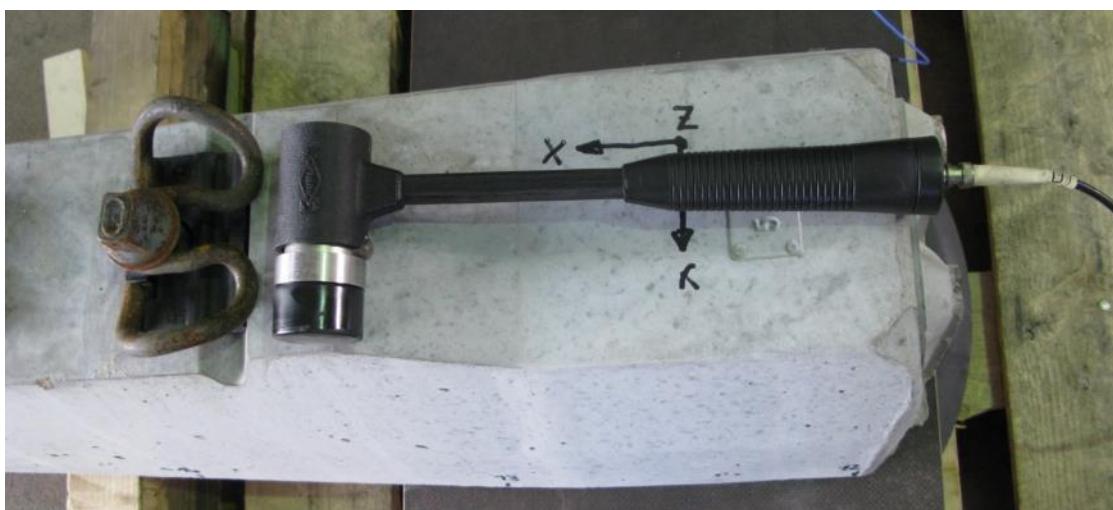


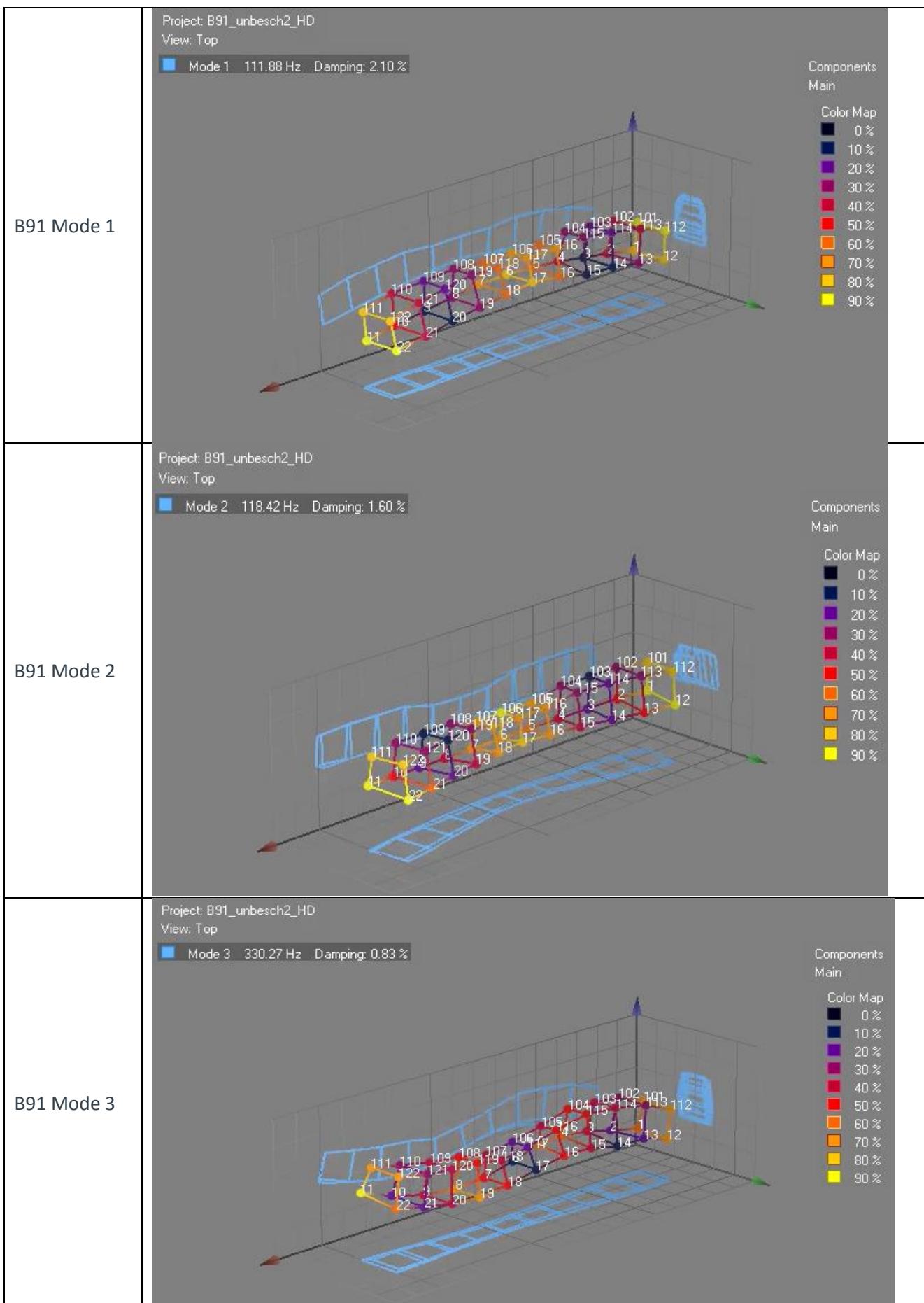
TECHNISCHE DATEN

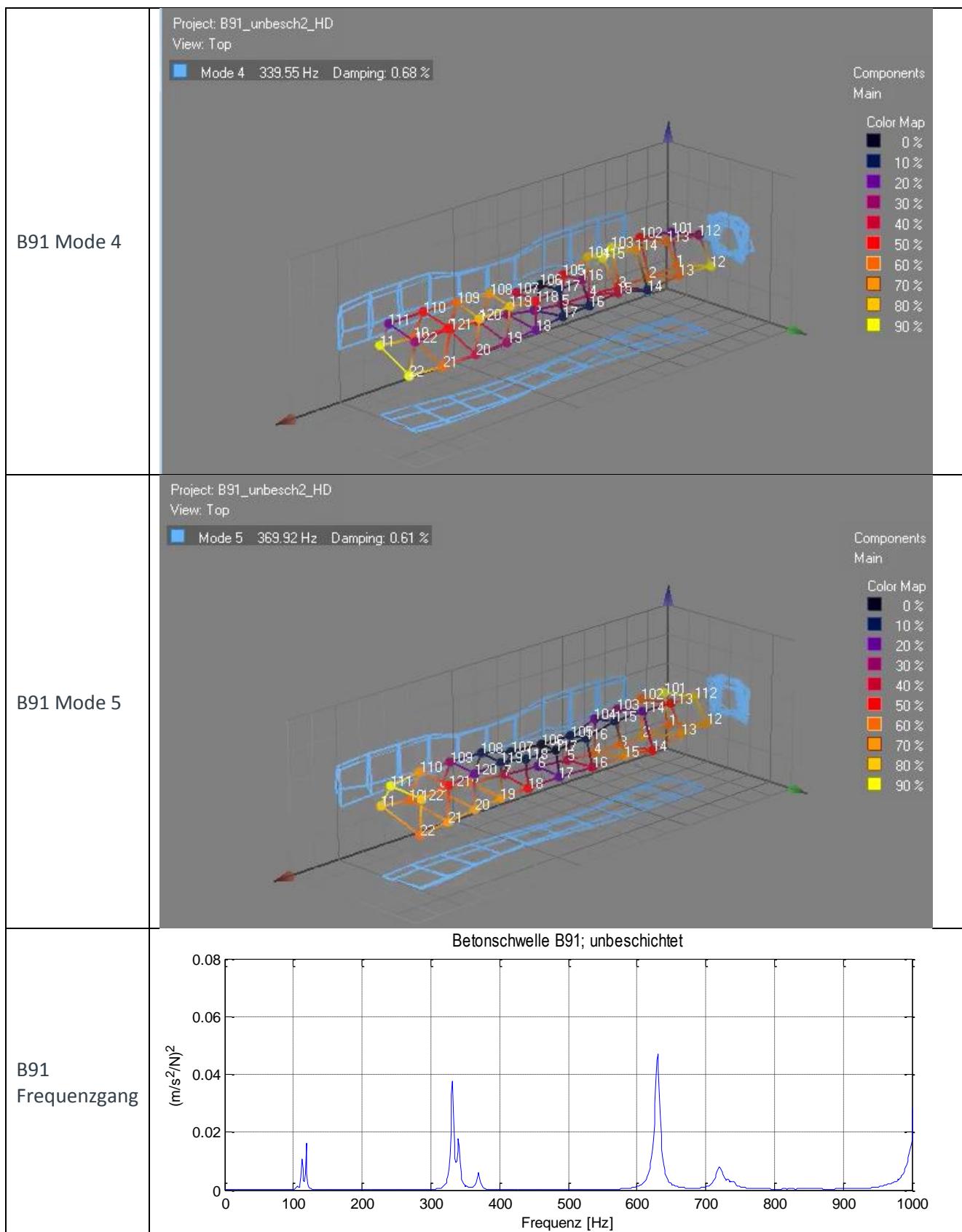
Zulässige Achslast	225 kN
Spurweite	1435 mm
Schienenneigung	1:40
Normalerweise verwendete Schienen	54 E 2, 60 E 1
Befestigungen	Oberbauform W3 oder W14
Schwellenlänge	2600 mm
Schwellenbreite	400 mm
Schwellenhöhe unter der Schiene	172 mm
Gewicht mit Befestigung	361 kg
Verlegeabstand	600 mm

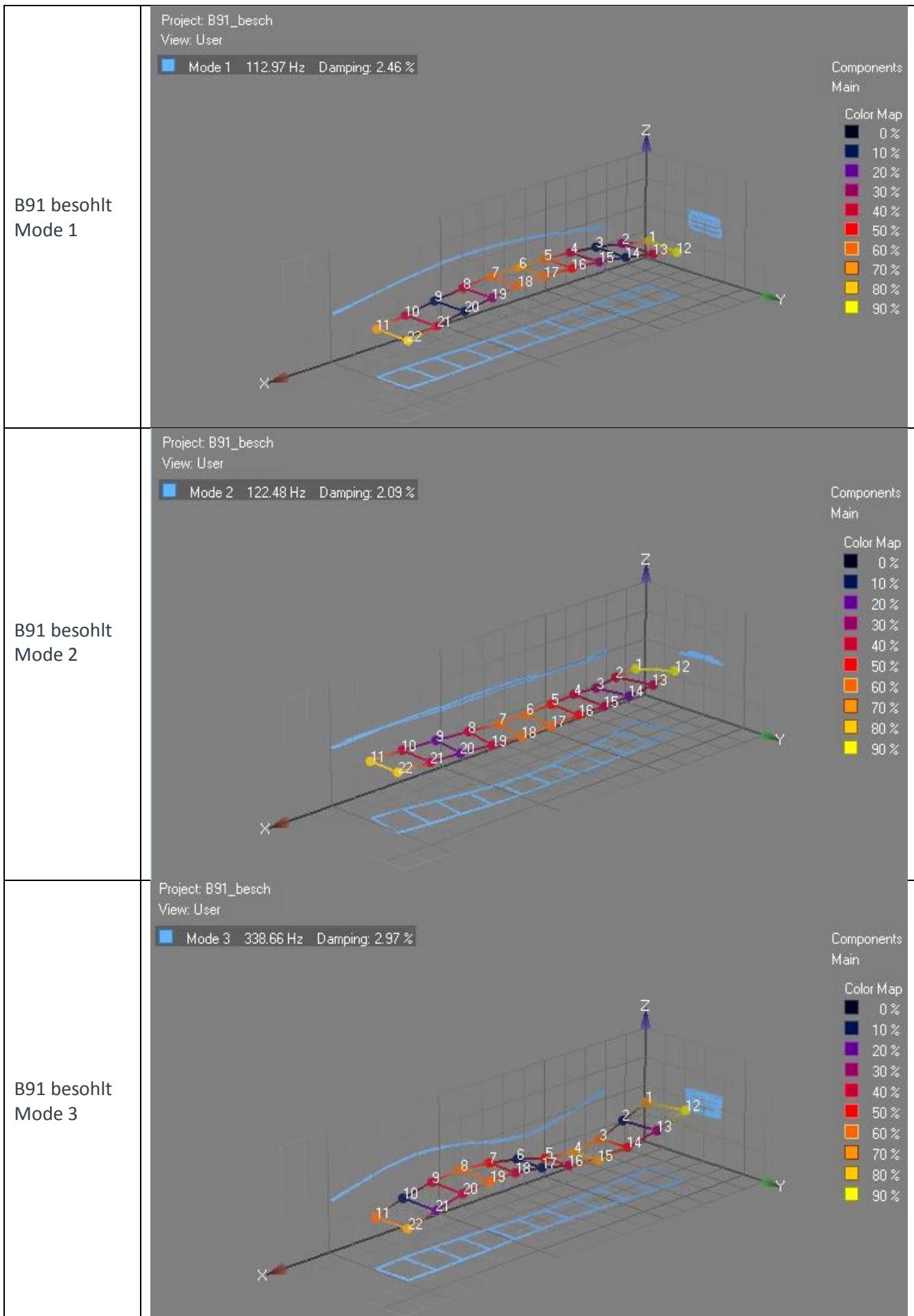
B Experimentelle Modalanalysen

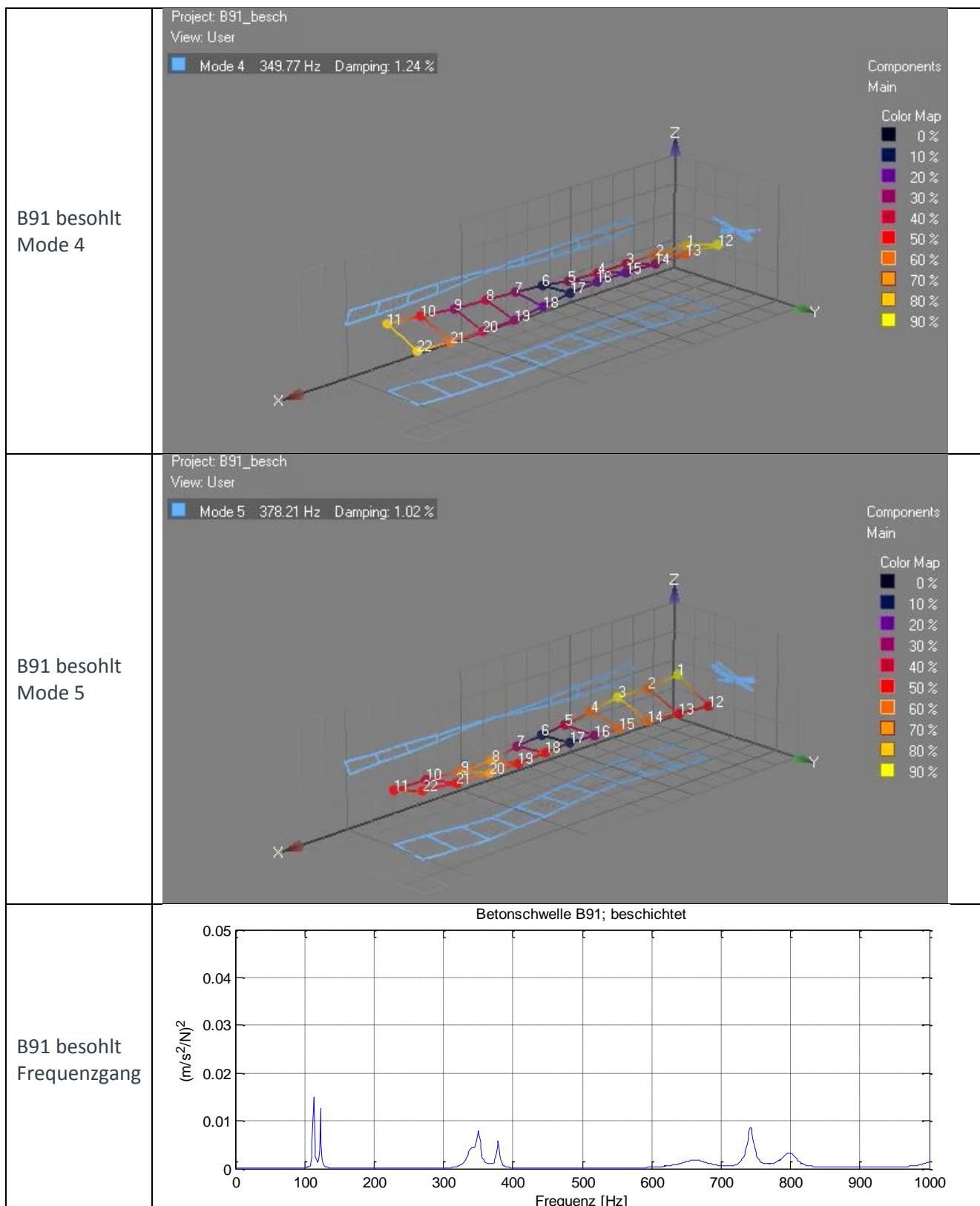
B.1 B91-Schwelle





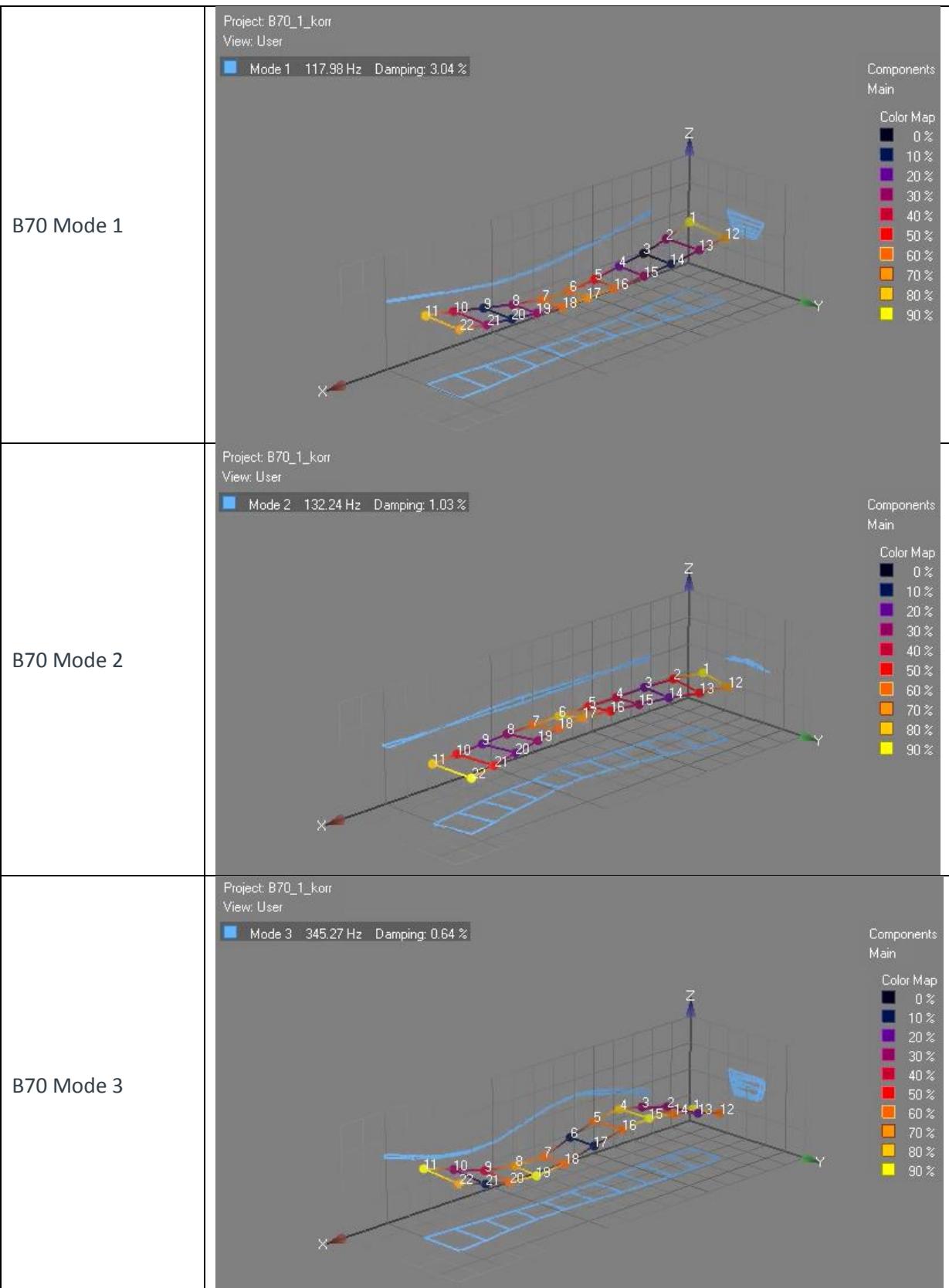


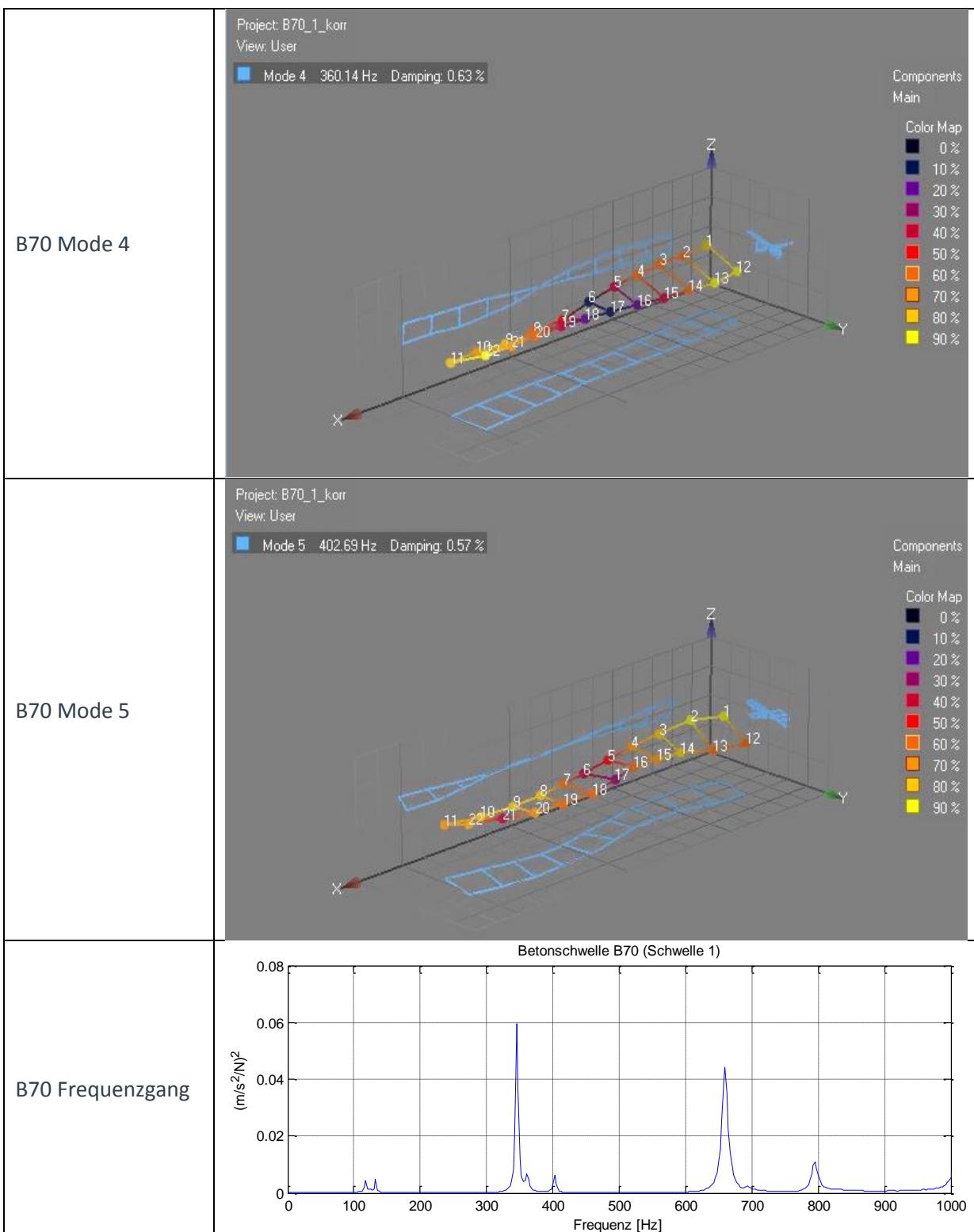




B.2 B70 Schwelle

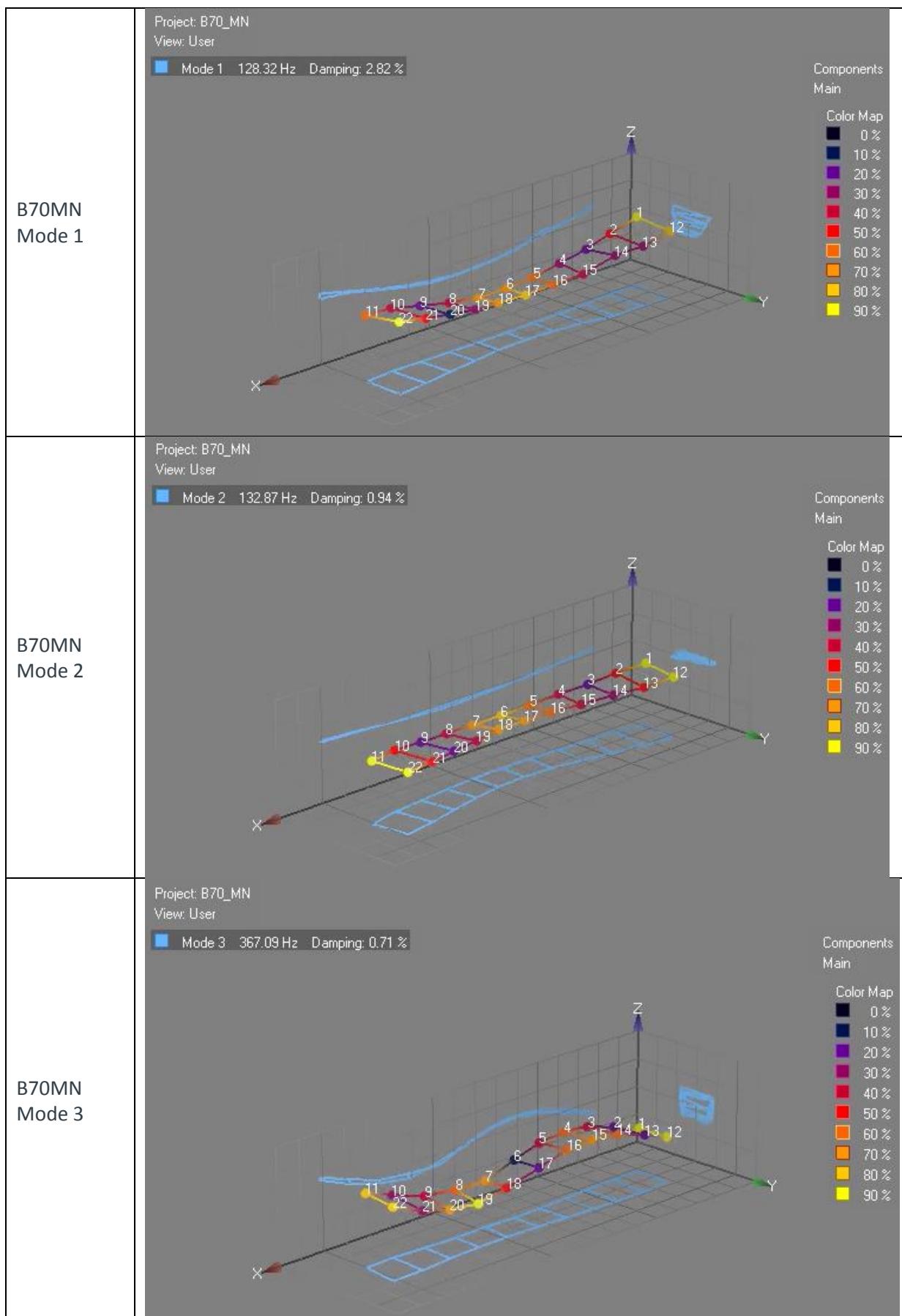


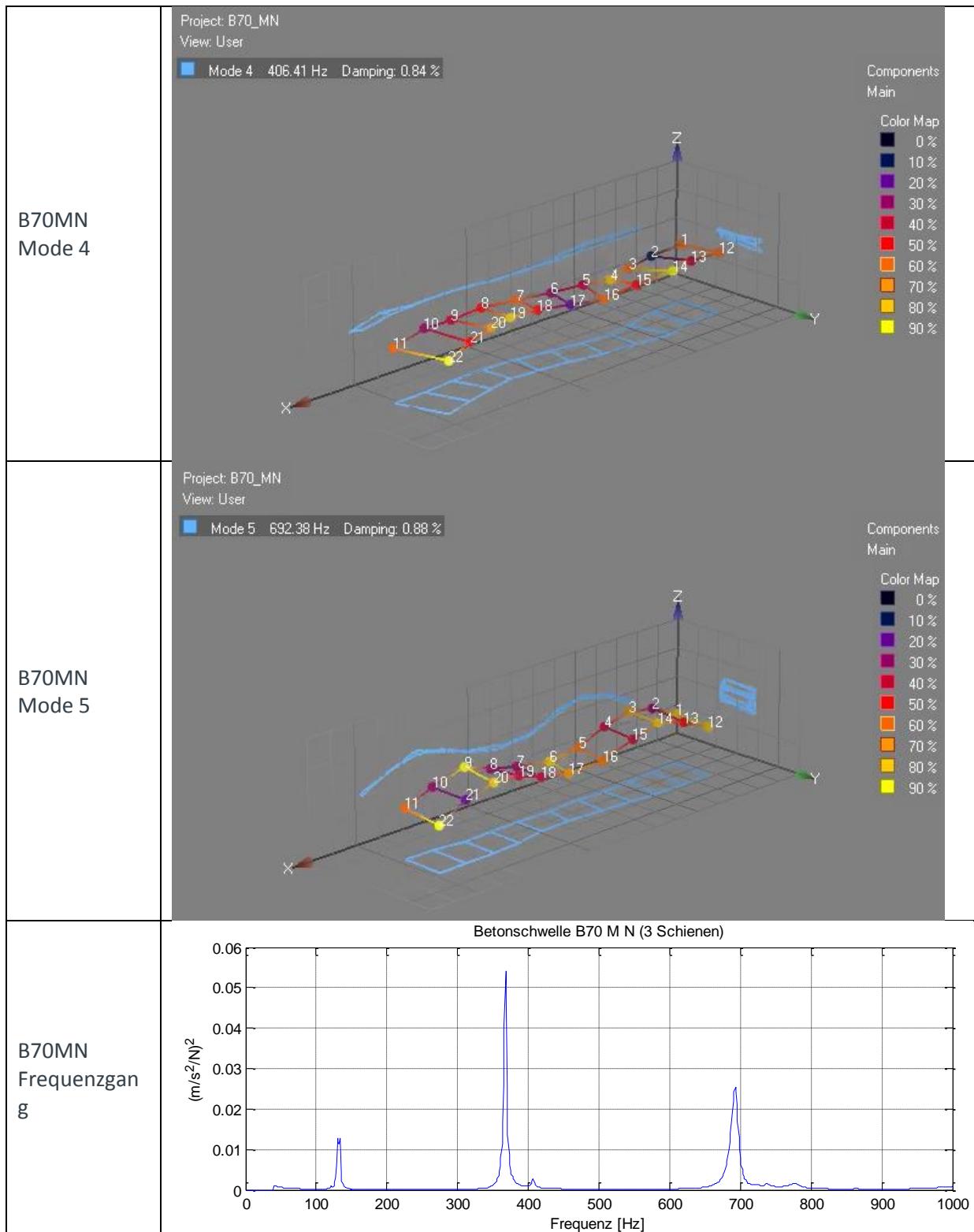




B.3 B70-MN-Schwelle

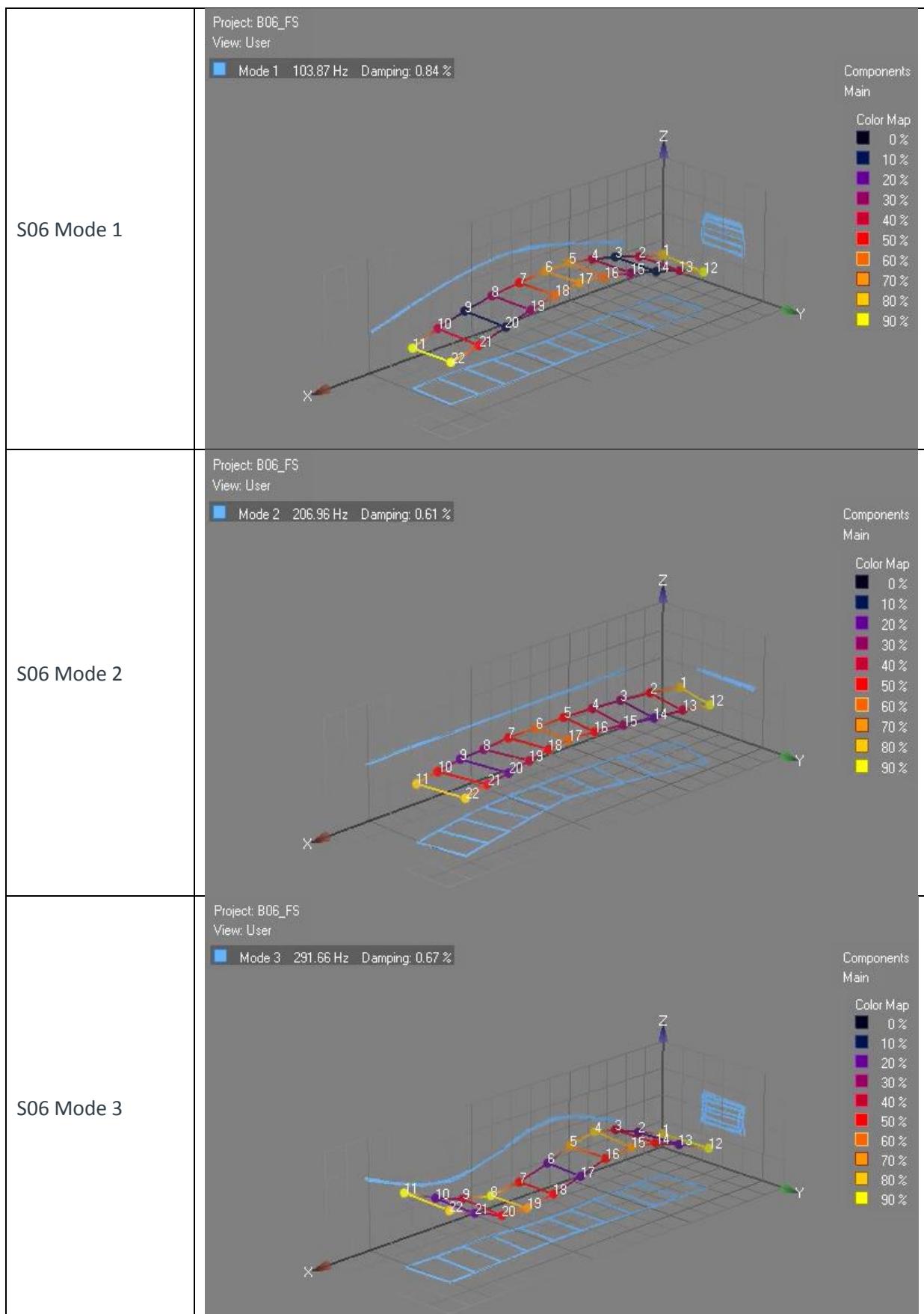






B.4 S06-Schwelle





The figure consists of three vertically stacked panels. The top two panels show 3D finite element models of a bridge deck with numbered nodes (1 through 22) and colored according to their displacement magnitude. The top panel is labeled "S06 Mode 4" and shows Mode 4 at 357.76 Hz with 0.62% damping. The bottom panel is labeled "S06 Mode 5" and shows Mode 5 at 561.26 Hz with 0.91% damping. Both panels have X, Y, and Z axes. A color map on the right indicates displacement percentages from 0% (dark blue) to 90% (yellow). The bottom panel also includes a legend for "Component Main". The third panel at the bottom is a line graph titled "Betonschwelle B06; Flachschwelle" showing Frequency Response (m/s²/N)² versus Frequency (Hz). The x-axis ranges from 0 to 1000 Hz, and the y-axis ranges from 0 to 0.08. The graph displays several sharp peaks, with the most prominent one around 350 Hz reaching approximately 0.08 m/s²/N².

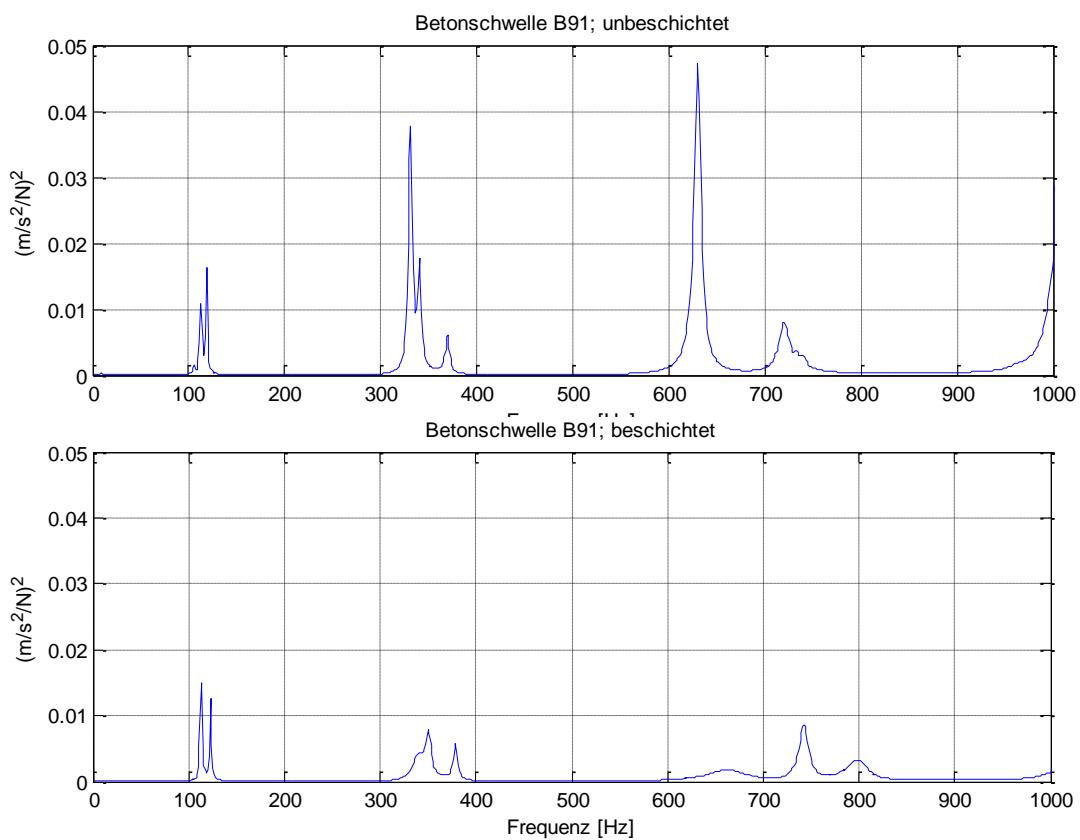


Abbildung 11-1: Globale Transfermatrizen B91 mit/ohne Besohlung

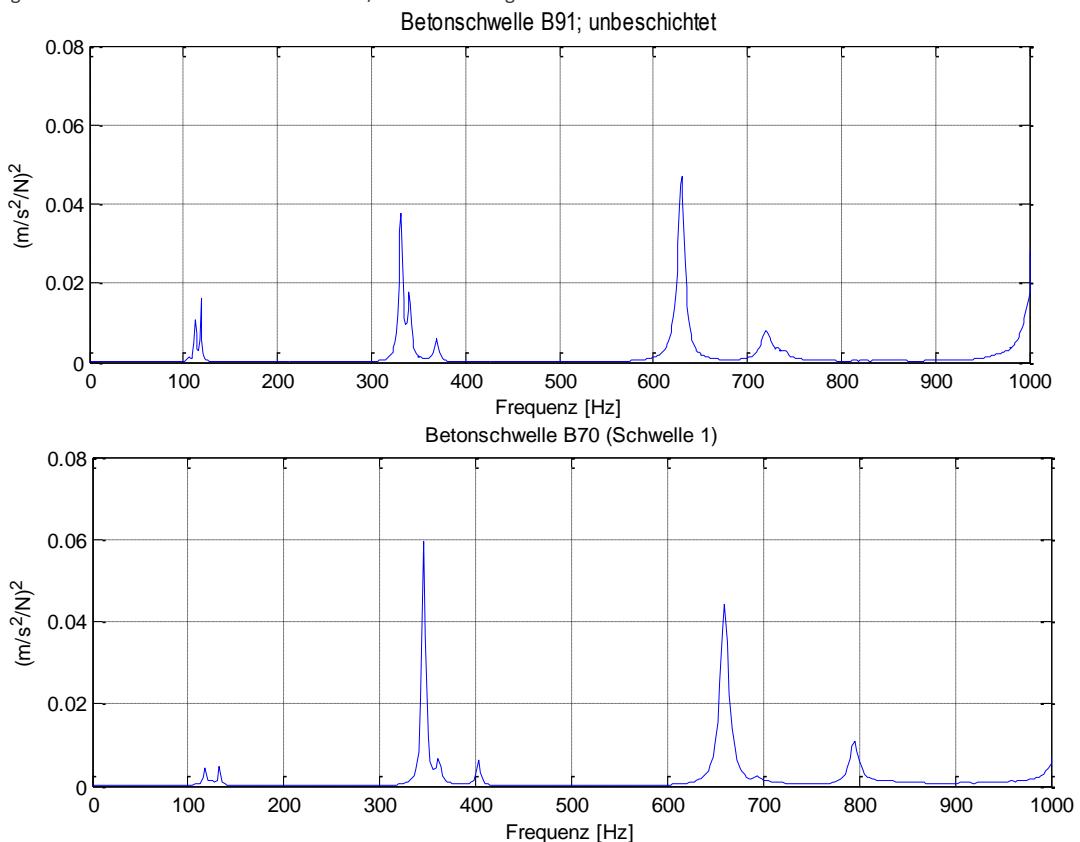


Abbildung 11-2: Globale Transfermatrizen B91 und B70 ohne Besohlung

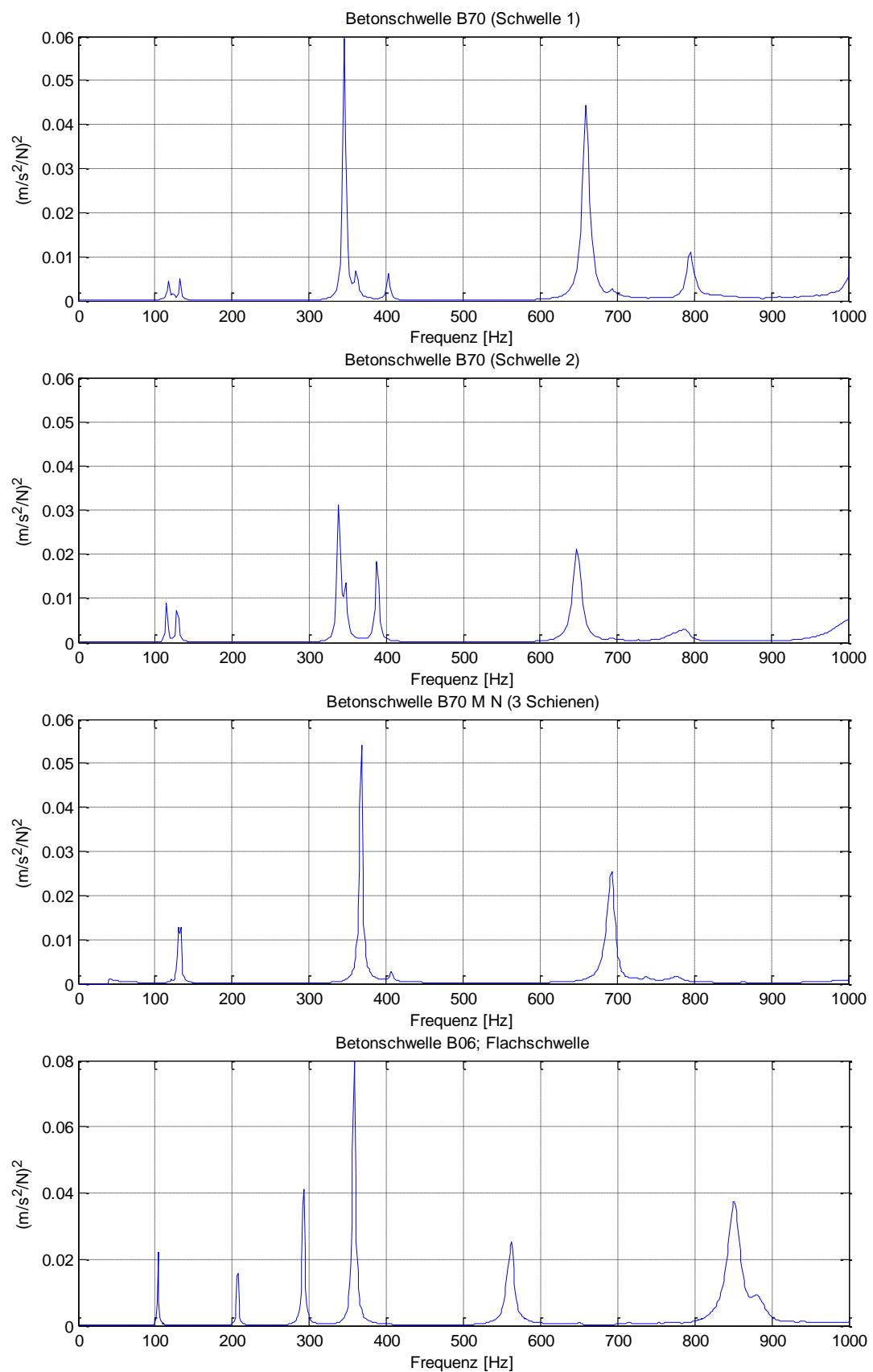


Abbildung 11-3: Globale Transfermatrizen B70, B70MN und B06_FS

Vergleich der 5 ersten Moden bei B91- und B70-Betonschwellen:

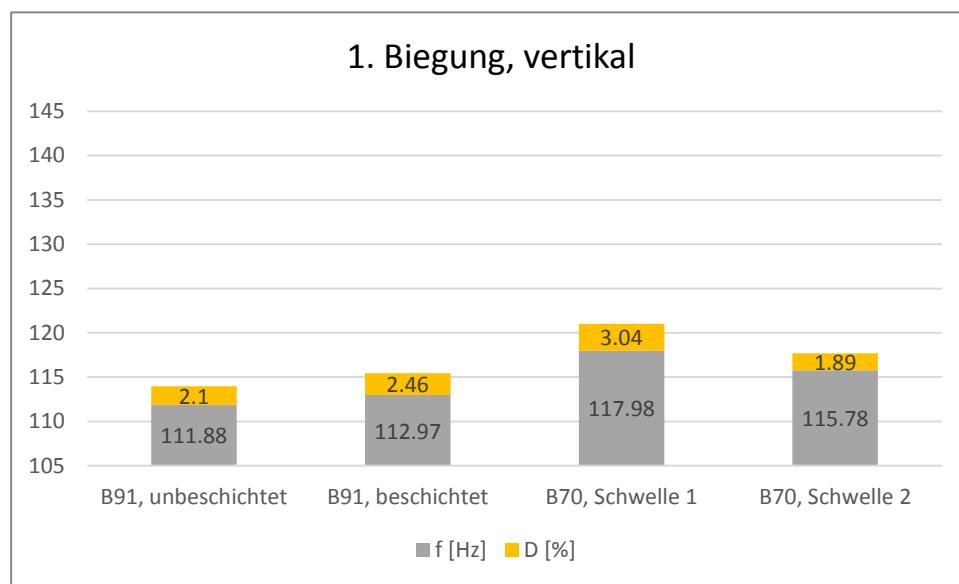


Abbildung 11-4: Mode 1 bei B91 und B70 Betonschwellen

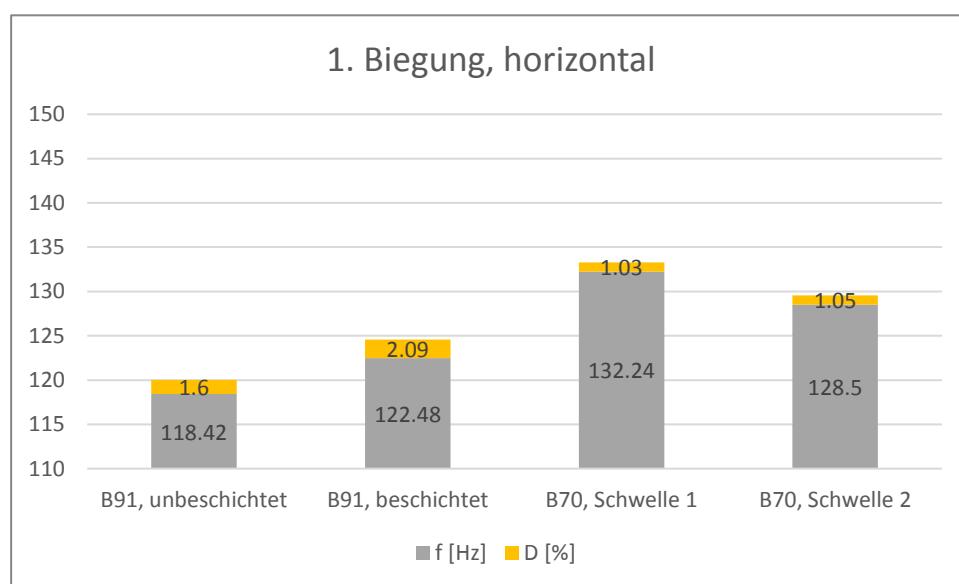


Abbildung 11-5: Mode 2 bei B91 und B70 Betonschwellen

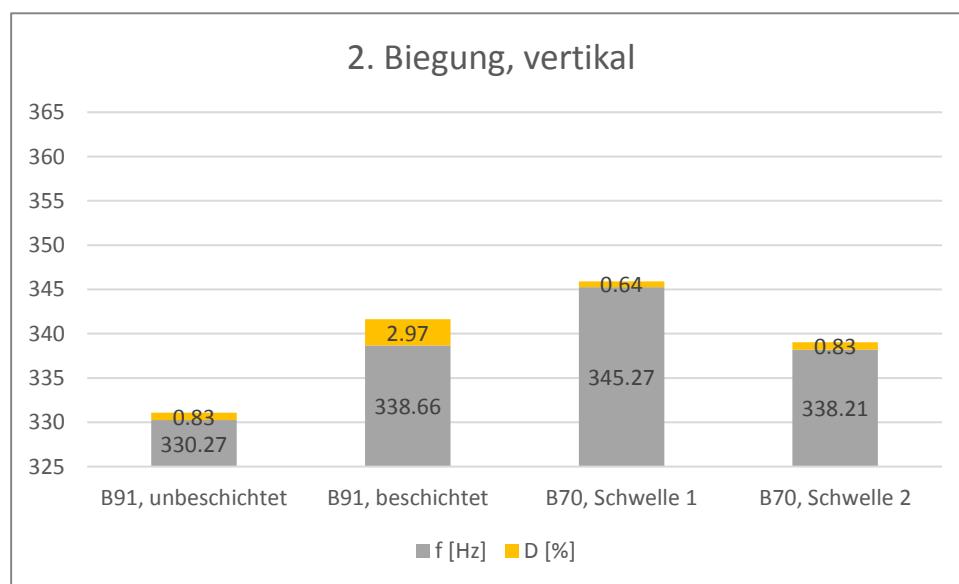


Abbildung 11-6: Mode 3 bei B91 und B70 Betonschwellen

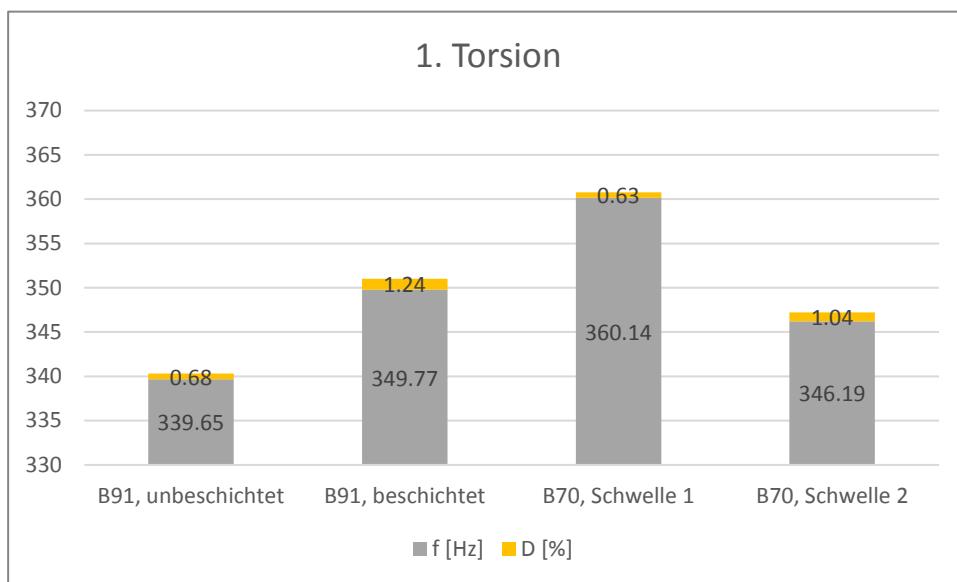


Abbildung 11-7: Mode 4 bei B91 und B70 Betonschwellen

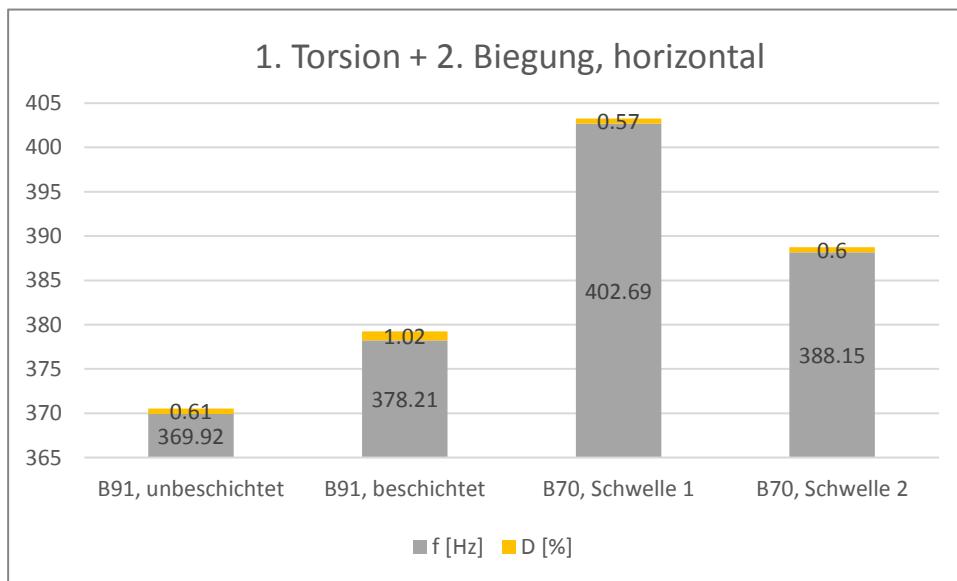


Abbildung 11-8: Mode 5 bei B91 und B70 Betonschwellen

Anmerkung zu den Diagrammen: In den Säulendiagrammen (Tabelle 7-6 bis Tabelle 7-10) sind die Frequenzen (grau [Hz]) und die Dämpfungen (gelb [%]) dargestellt, wobei der Dämpfungswert auf den Frequenzwert 'aufgesetzt' ist. Somit lassen sich Frequenzen und Dämpfungen der einzelnen Varianten dieser geometrischen identischen Schwellen direkt vergleichen.

B.5 Messergebnisse Testgleis B70-Betonschwelle Schrey & Veit

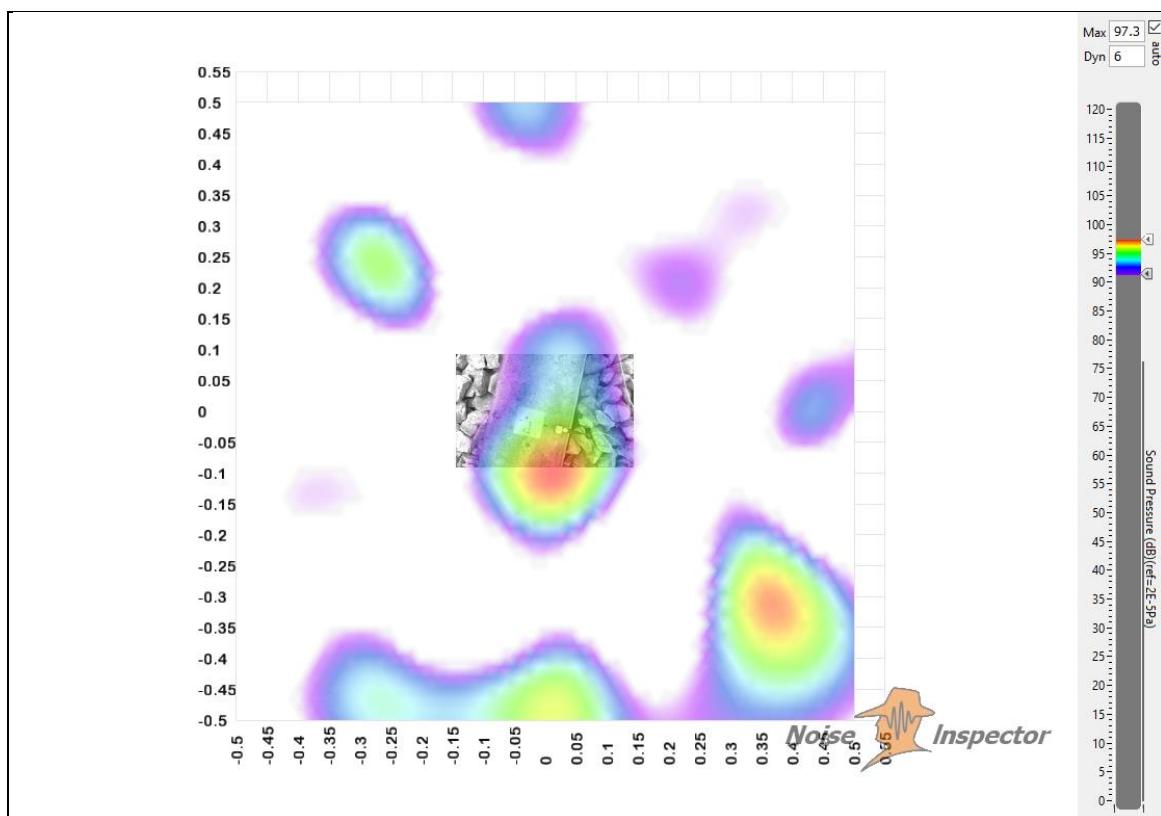


Abbildung 11-9: measurements/BS0008.tdms, SONAH - Sound Pressure (FD) - Linear, time settings: 15.000 -25.000 s (duration: 10.000s), distance: 0.12 m, Frequency Settings: 105 Hz -140 Hz

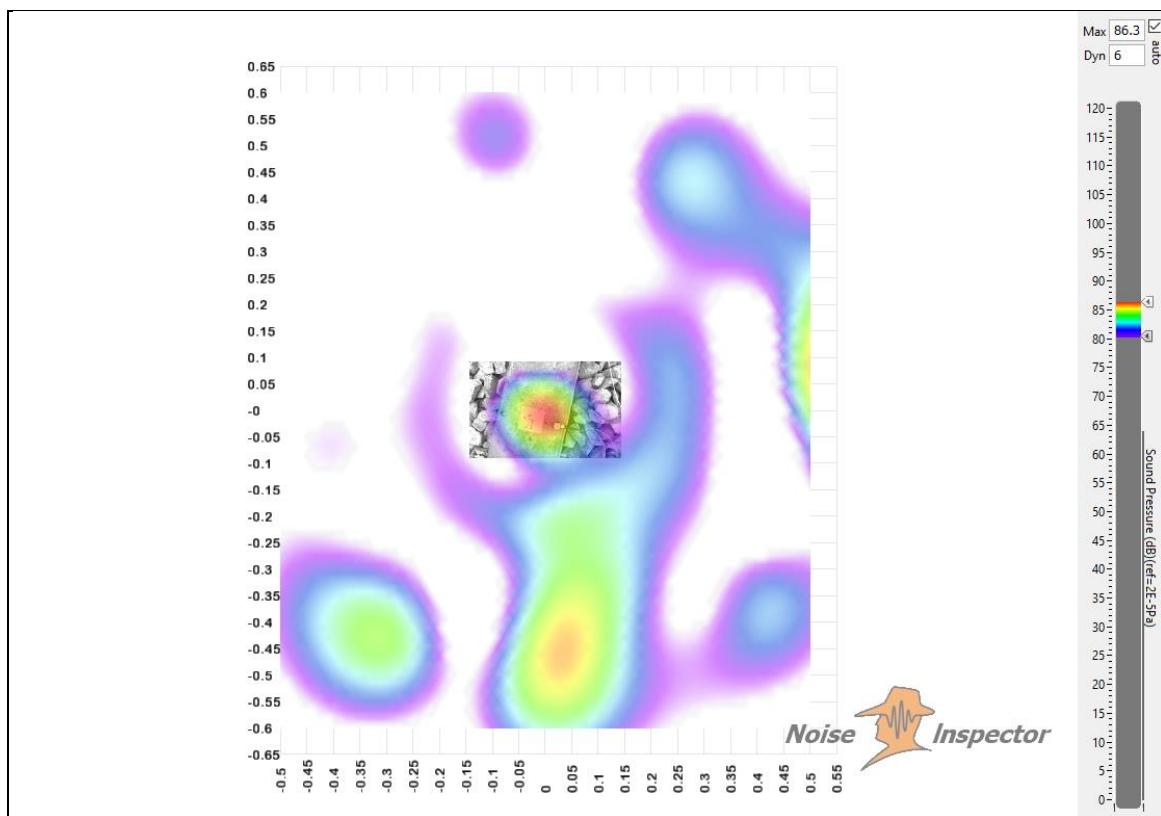


Abbildung 11-10: measurements/BS0008.tdms, SONAH - Sound Pressure (FD) - Linear, time settings: 15.000 -25.000 s (duration: 10.000s), distance: 0.12 m, Frequency Settings: 225 Hz -280 Hz

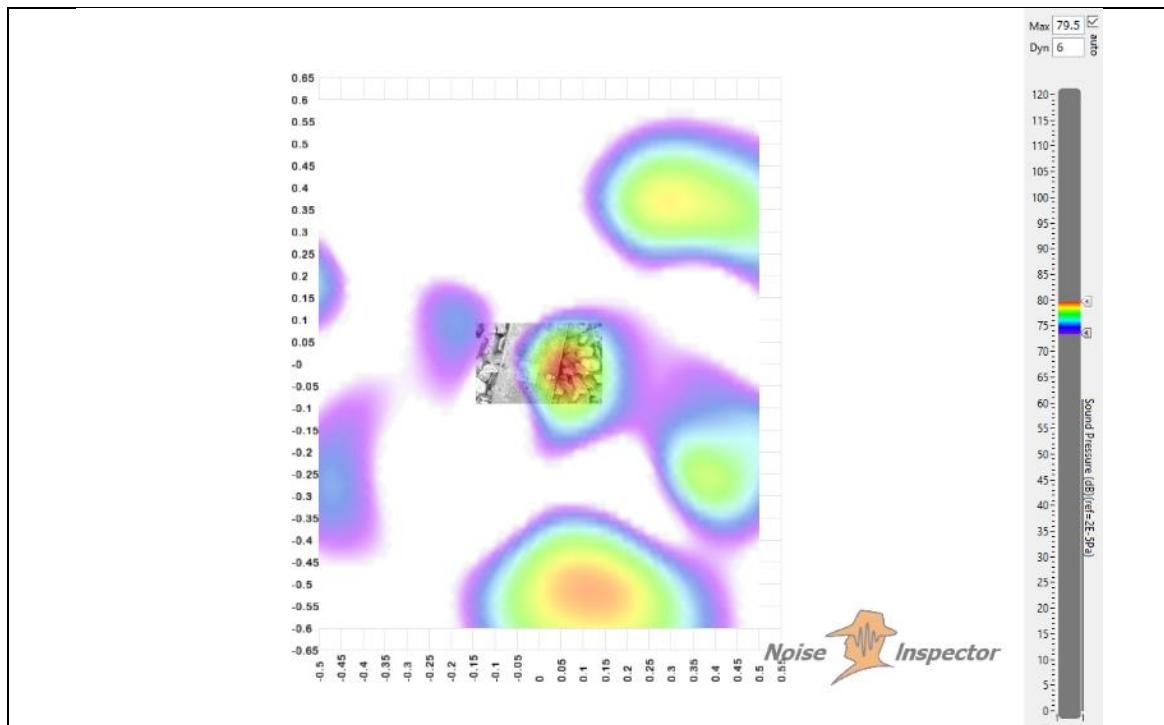


Abbildung 11-11: measurements/BS0008.tdms, SONAH - Sound Pressure (FD) - Linear, time settings: 15.000 -25.000 s (duration: 10.000s), distance: 0.12 m, Frequency Settings: 320 Hz -380 Hz

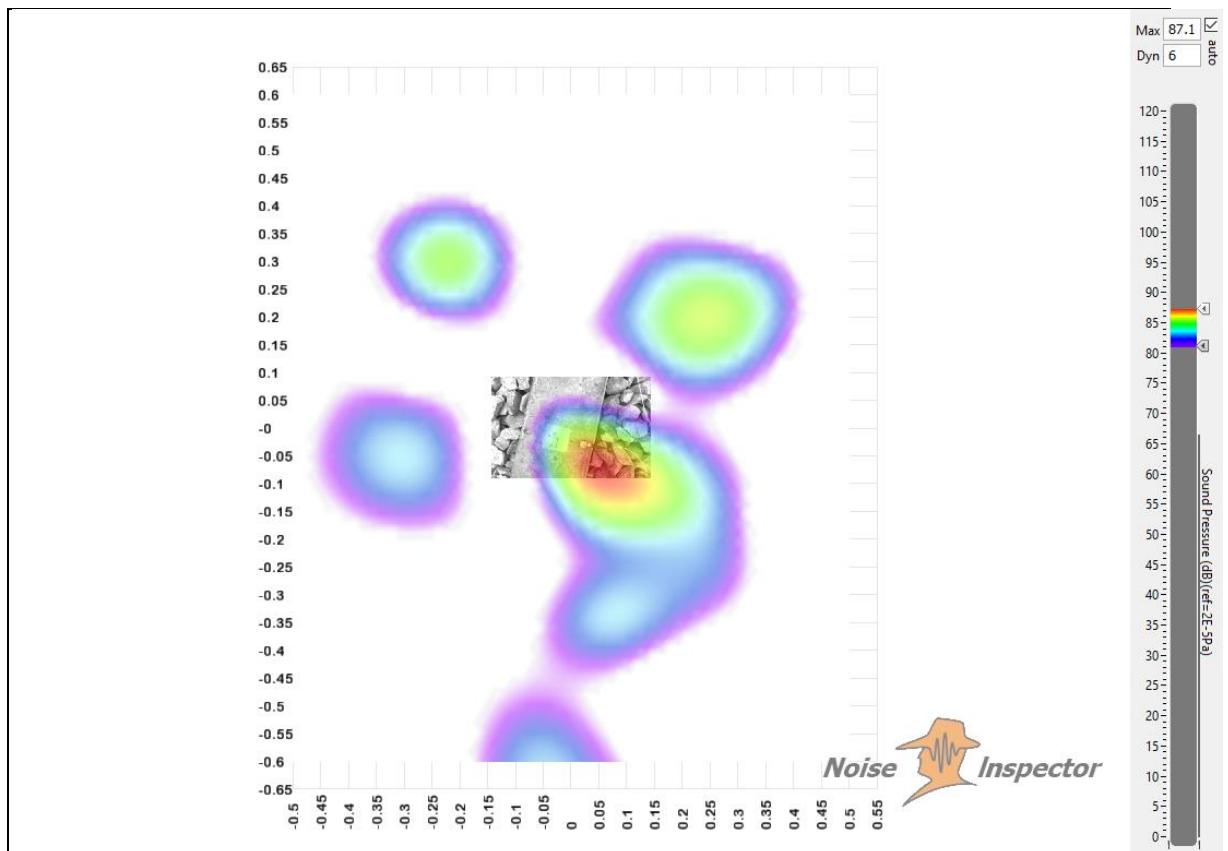


Abbildung 11-12: measurements/BS0009.tdms SONAH - Sound Pressure (FD) - Linear, time settings: 0.000 -4.779 s (duration: 4.779s) distance: 0.28 m, Frequency Settings: 470 Hz -530 Hz

Frequency Settings: 570 Hz -670 Hz

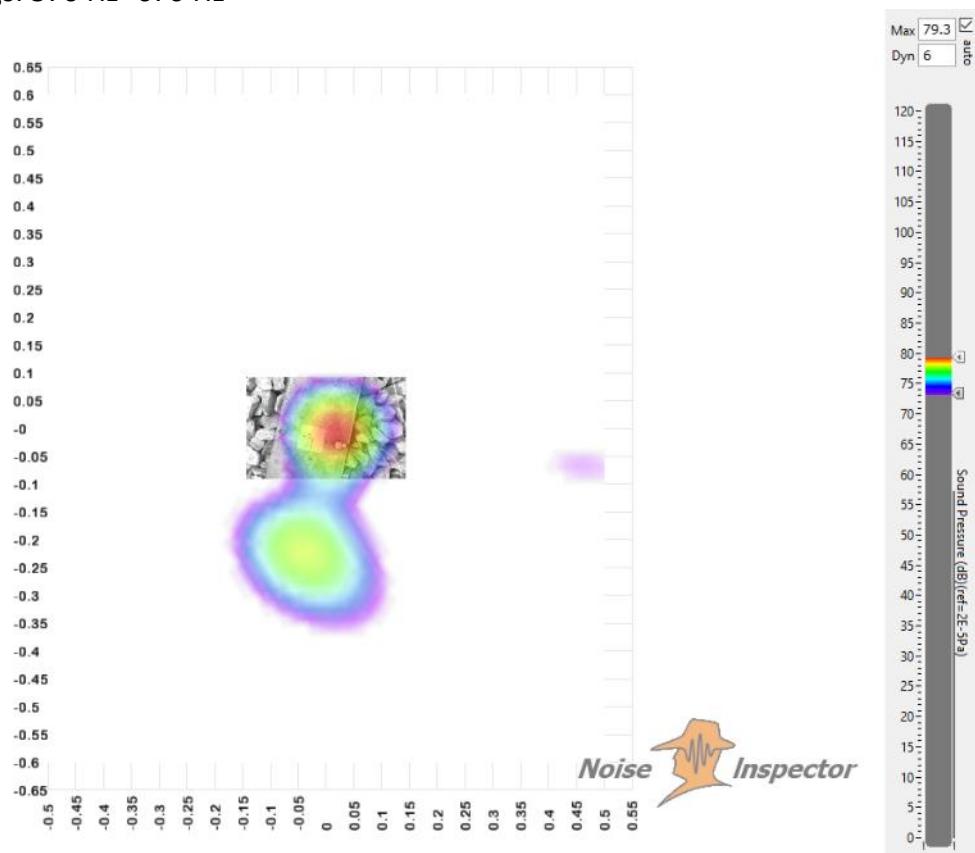


Abbildung 11-13: measurements/BS0008.tdms, SONAH - Sound Pressure (FD) - Linear, time settings: 15.000 -25.000 s (duration: 10.000s), distance: 0.12 m, Frequency Settings: 790 Hz -870 Hz

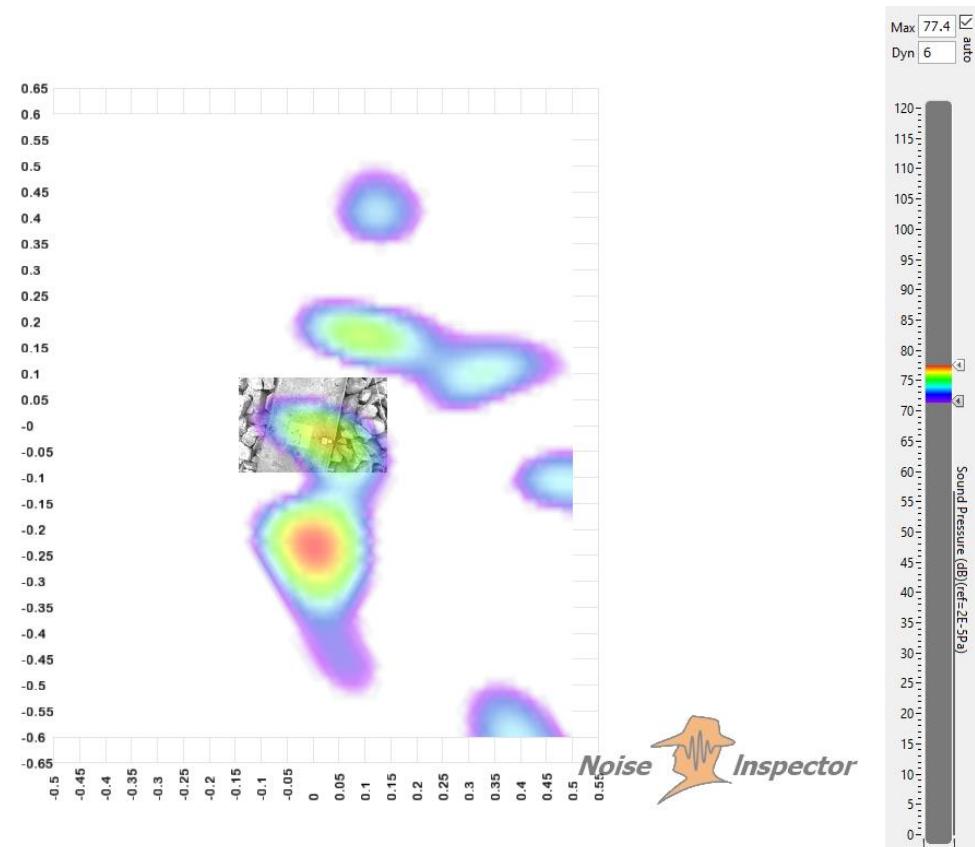


Abbildung 11-14: measurements/BS0008.tdms, SONAH - Sound Pressure (FD) - Linear, time settings: 15.000 -25.000 s (duration: 10.000s), distance: 0.12 m, Frequency Settings: 790 Hz -870 Hz

Nahfeldmessung über der Schiene links (Shakeranregung)

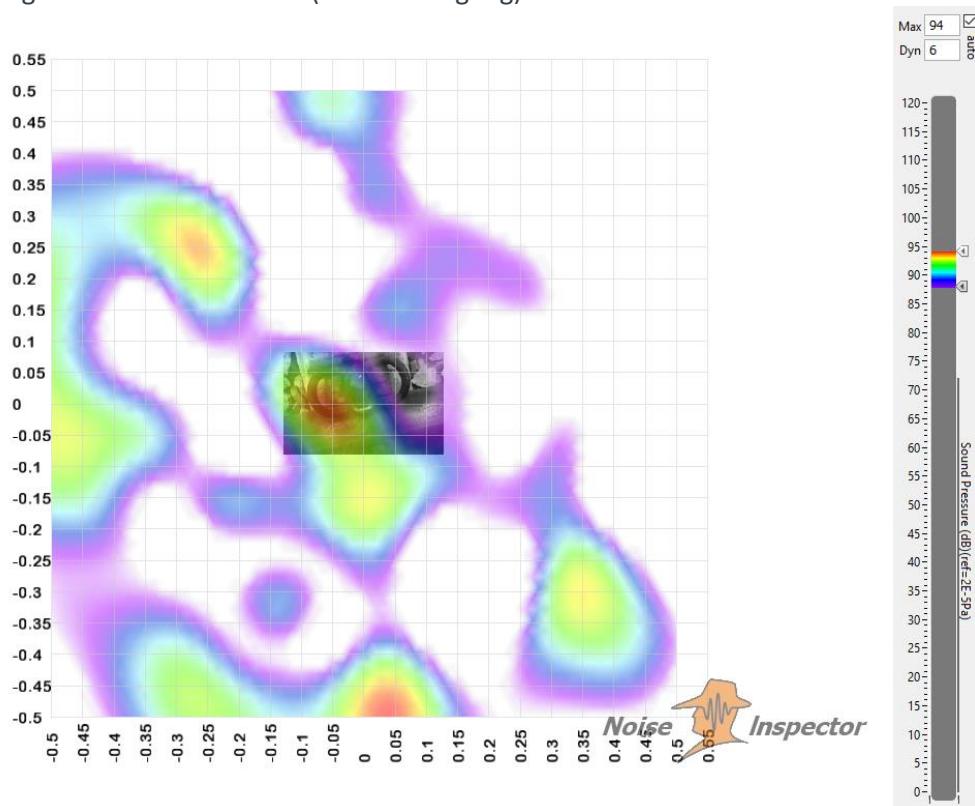


Abbildung 11-15: measurements/BS0016.tdmsSONAH - Sound Pressure (FD) - Linear time settings: 0.000 -4.779 s (duration: 4.779s) distance: 0.25 m Frequency Settings: 3rd octave: 125 Hz

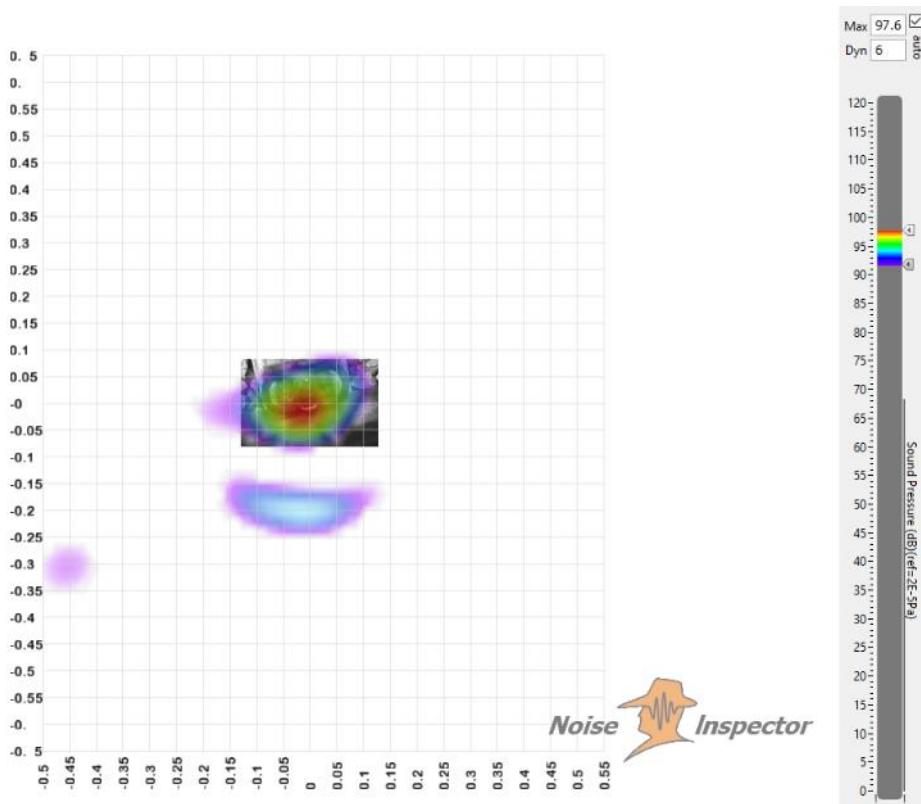


Abbildung 11-16: measurements/BS0016.tdmsSONAH - Sound Pressure (FD) - Linear time settings: 0.000 -4.779 s (duration: 4.779s) distance: 0.25 m Frequency Settings: 3rd octave: 250 Hz

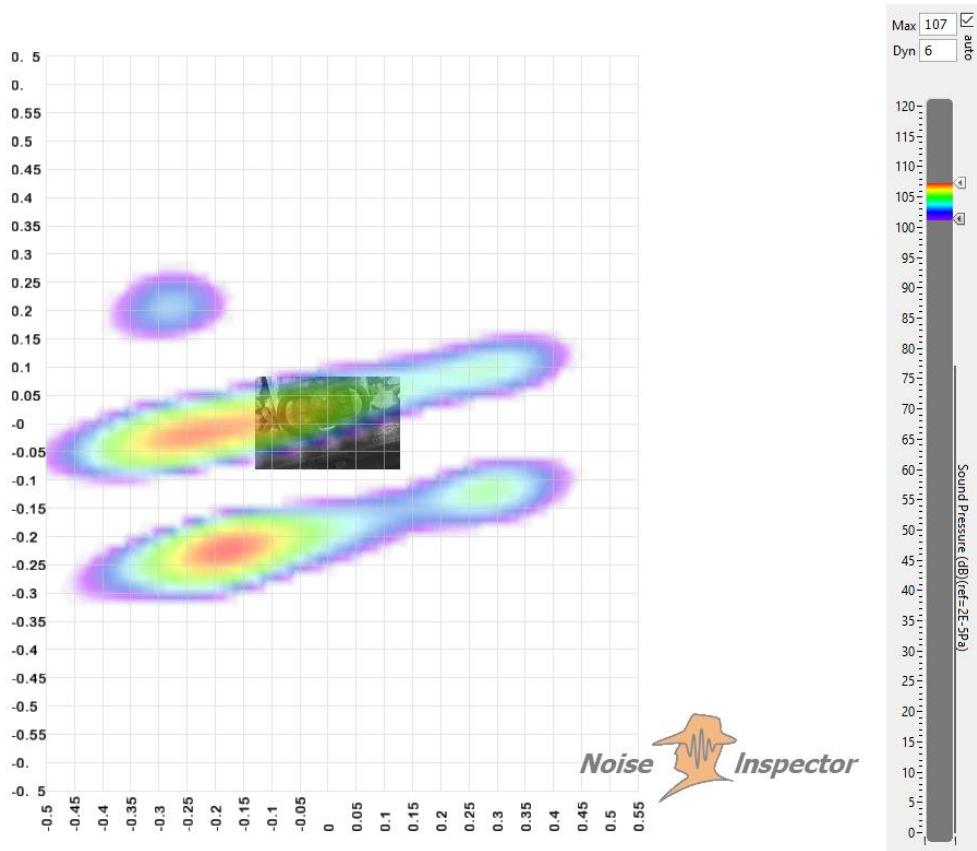


Abbildung 11-17: measurements/BS0016.tdmsSONAH - Sound Pressure (FD) - Linear time settings: 0.000 -4.779 s (duration: 4.779s) distance: 0.25 m Frequency Settings: 3rd octave: 500 Hz

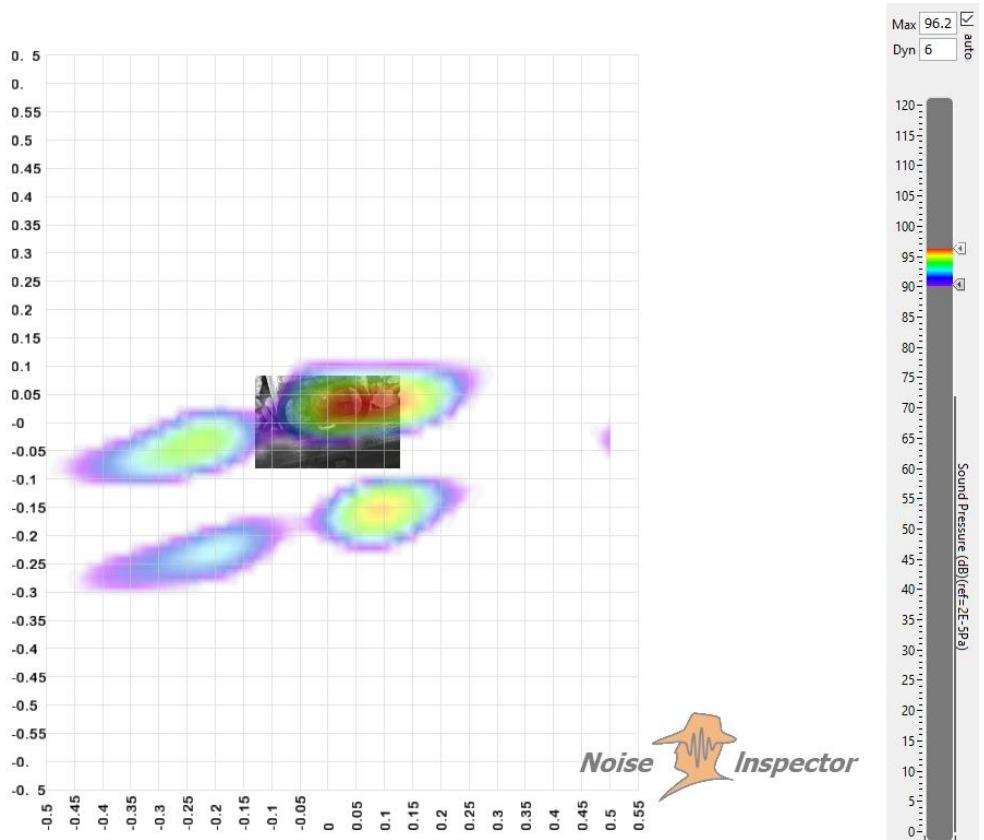
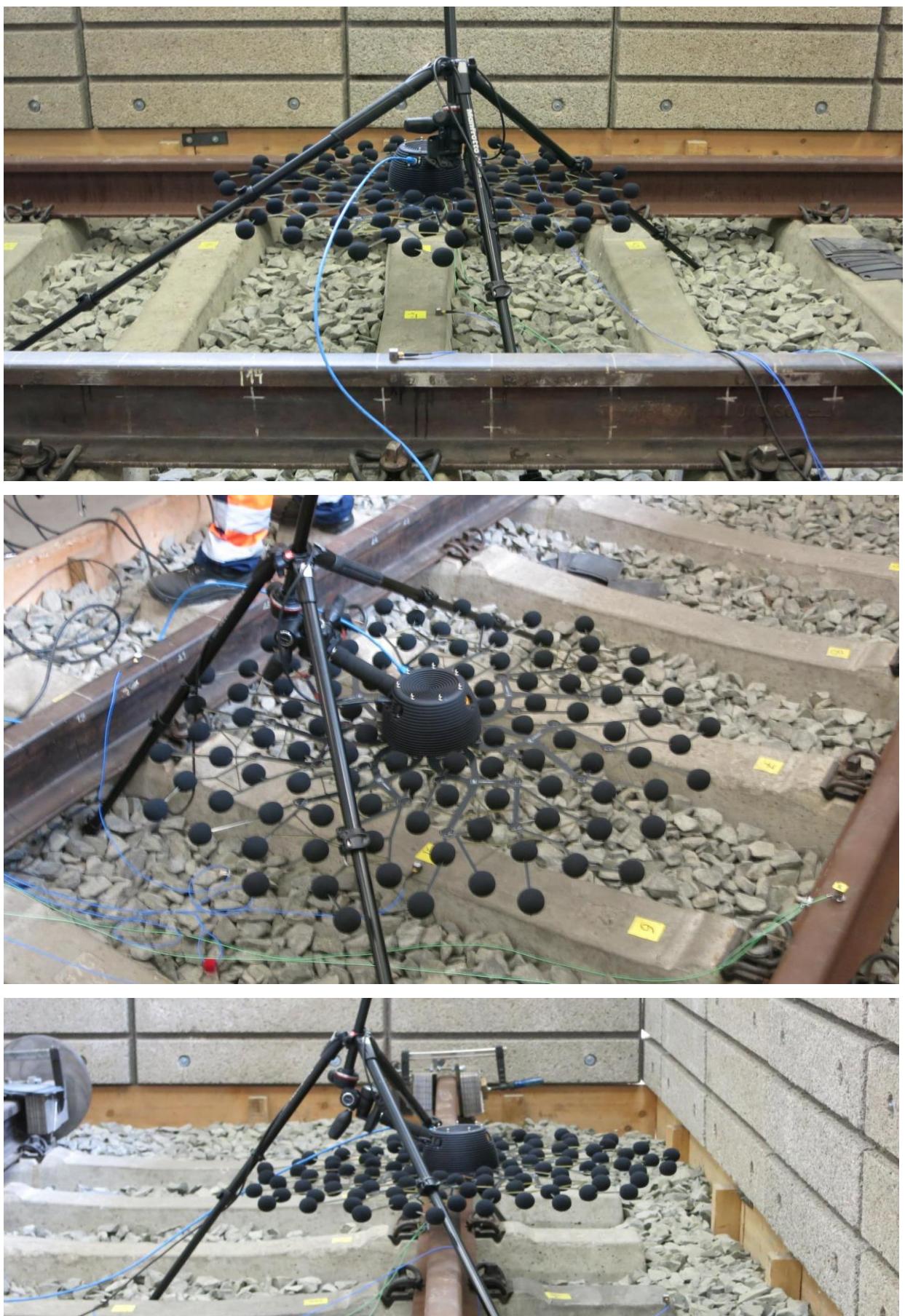
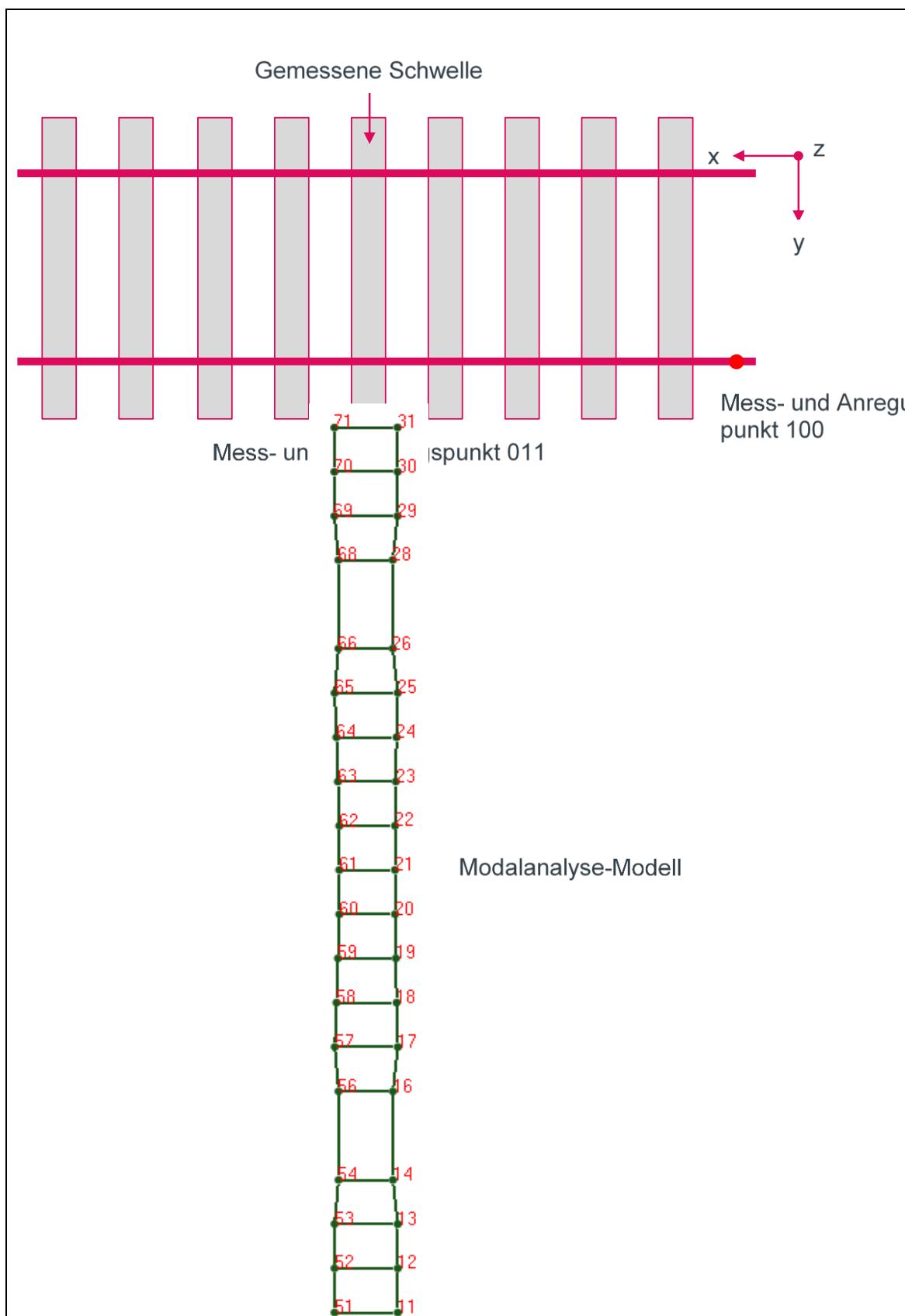


Abbildung 11-18: measurements/BS0016.tdmsSONAH - Sound Pressure (FD) - Linear time settings: 0.000 -4.779 s (duration: 4.779s) distance: 0.25 m Frequency Settings: 3rd octave: 1000 Hz

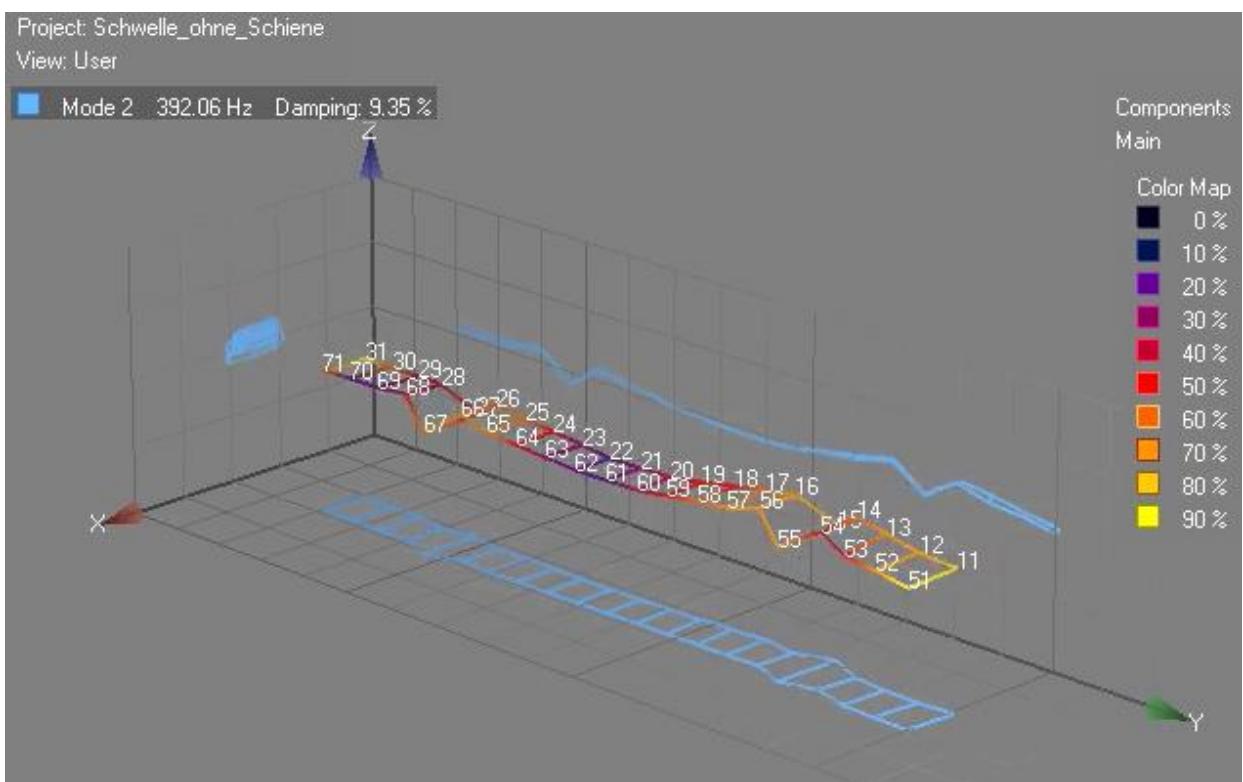
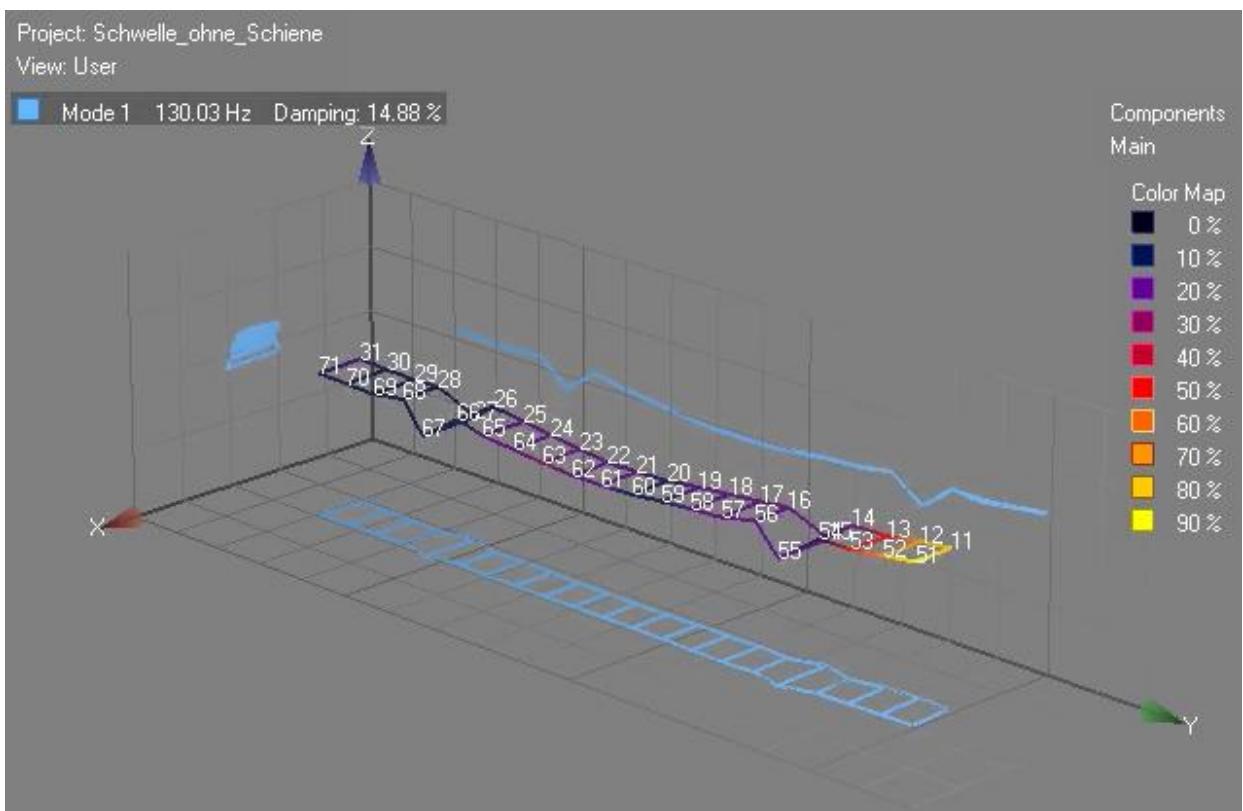


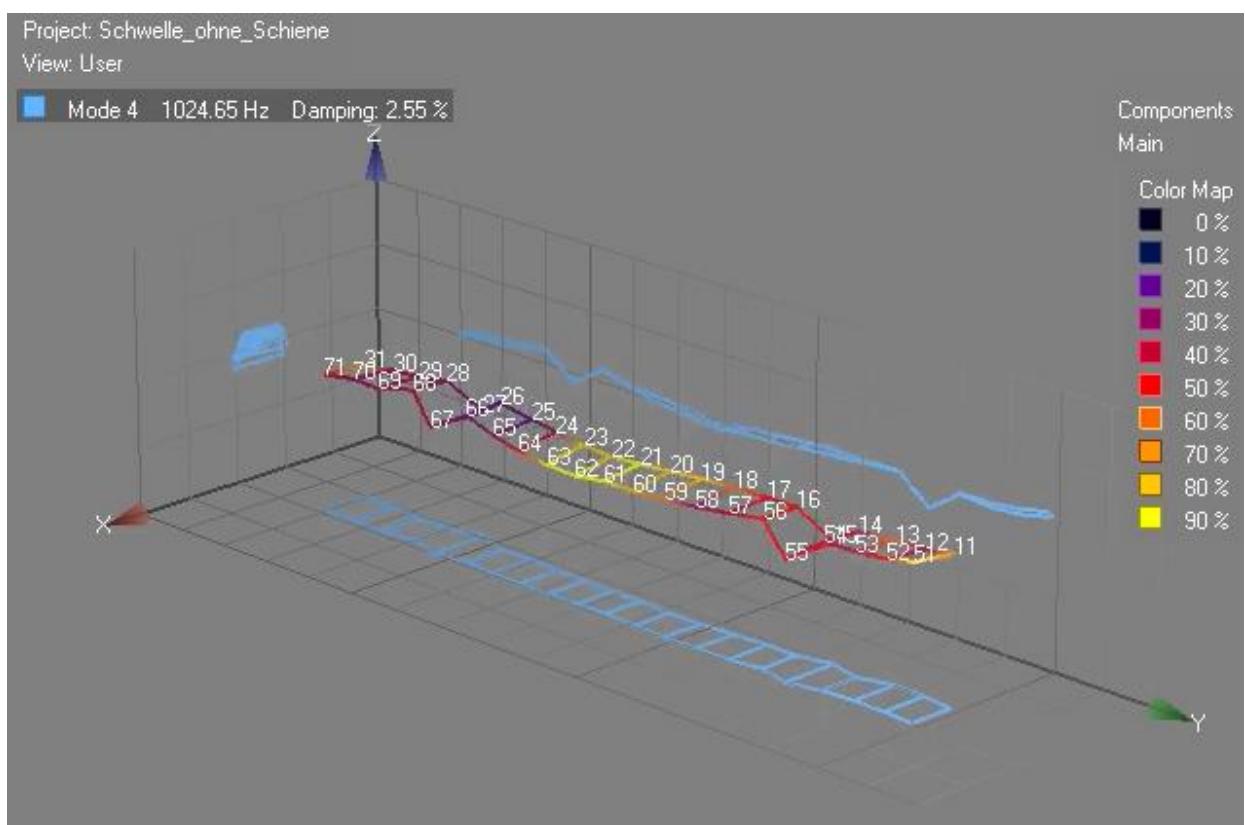
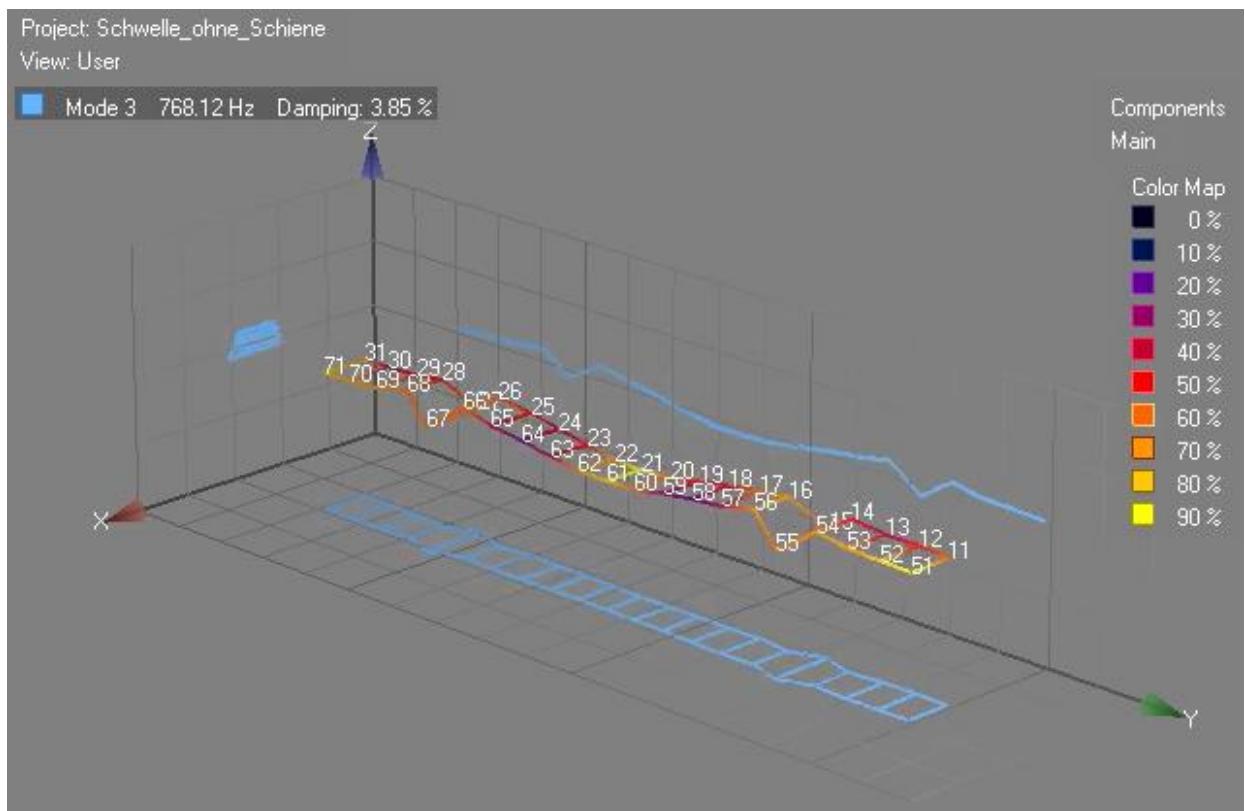
Anordnung der Mikrofonarrays am Testgleis

B.6 Modalanalyse Testgleis B70 Betonschwelle Schrey & Veit

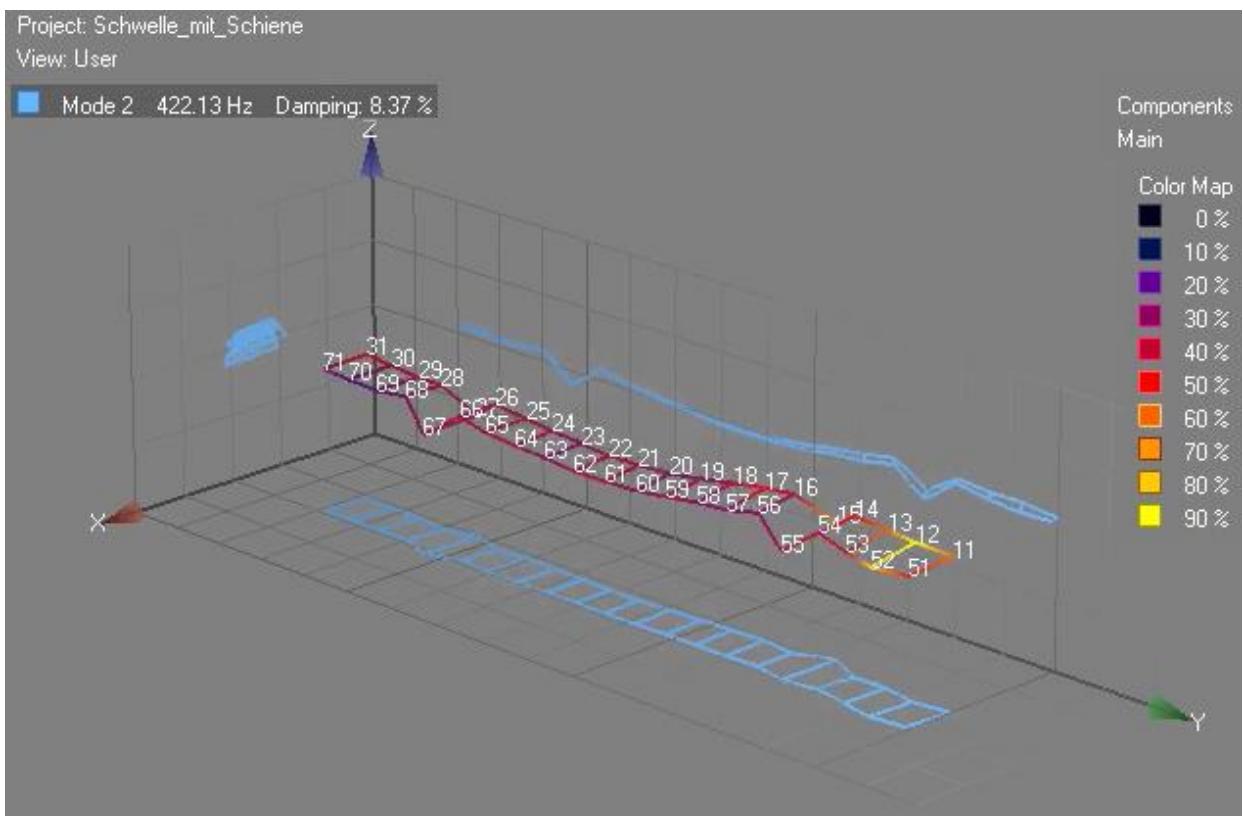
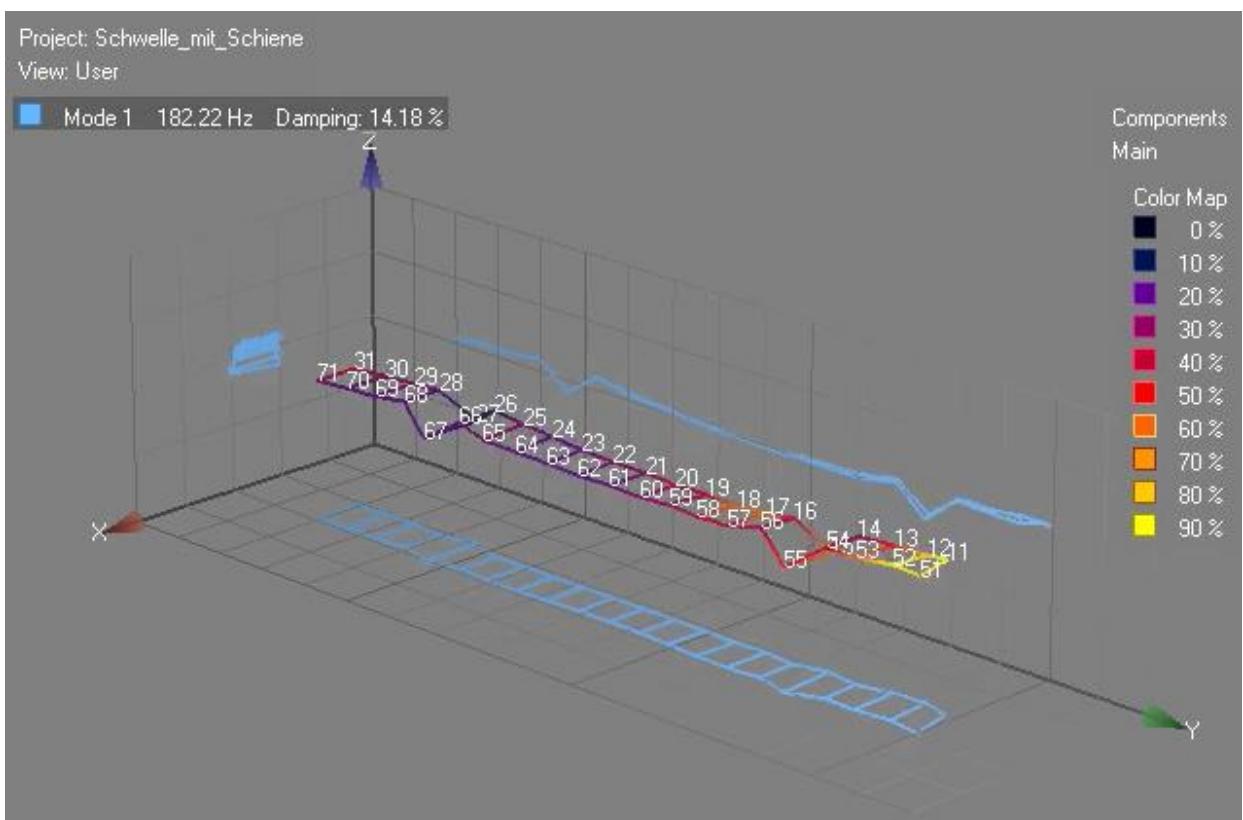


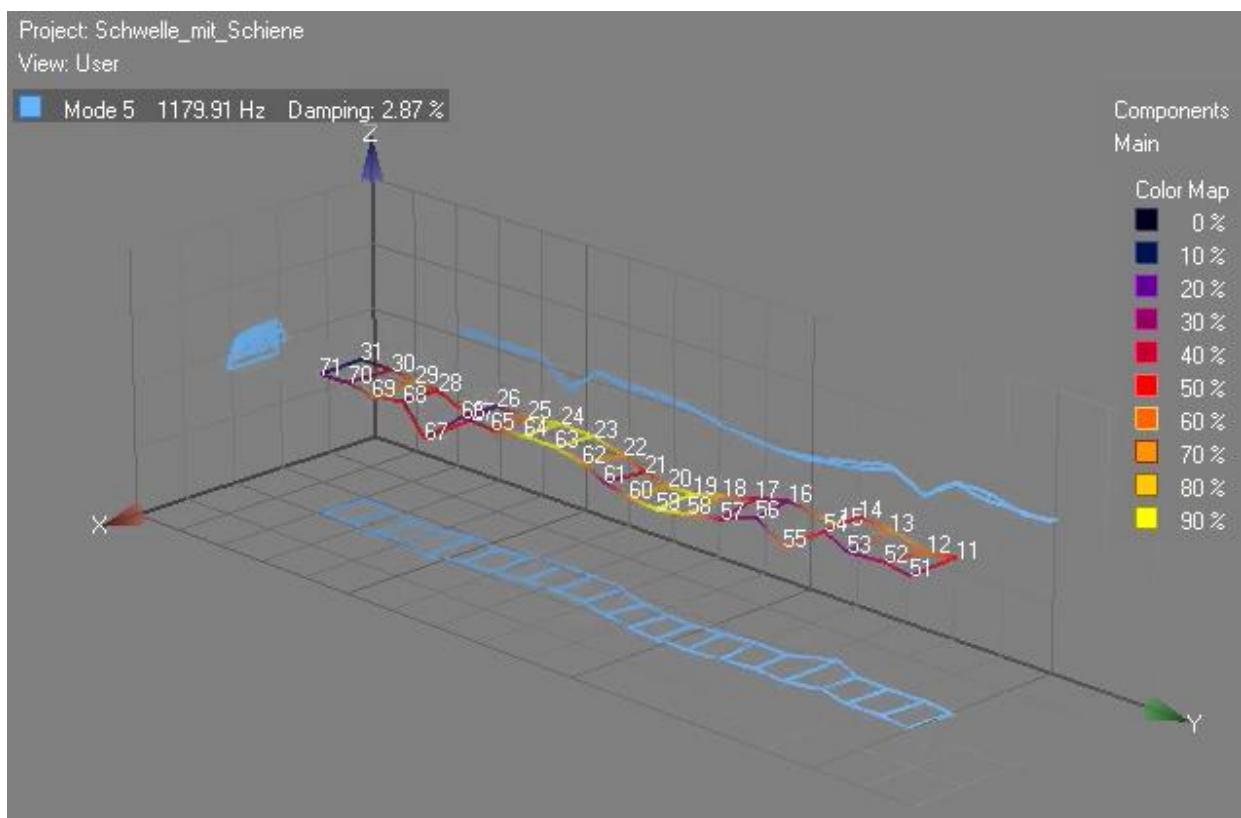
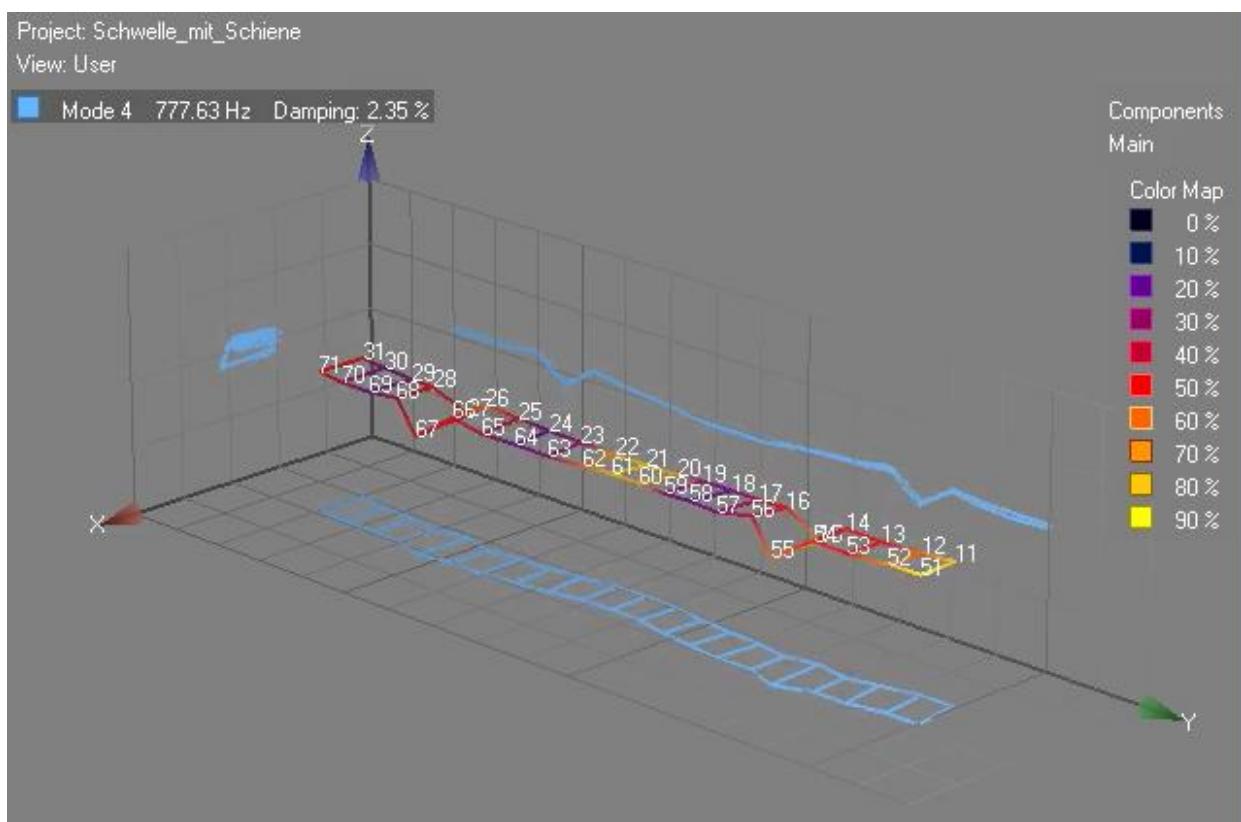
B.6.1 Ergebnisse ohne Schiene



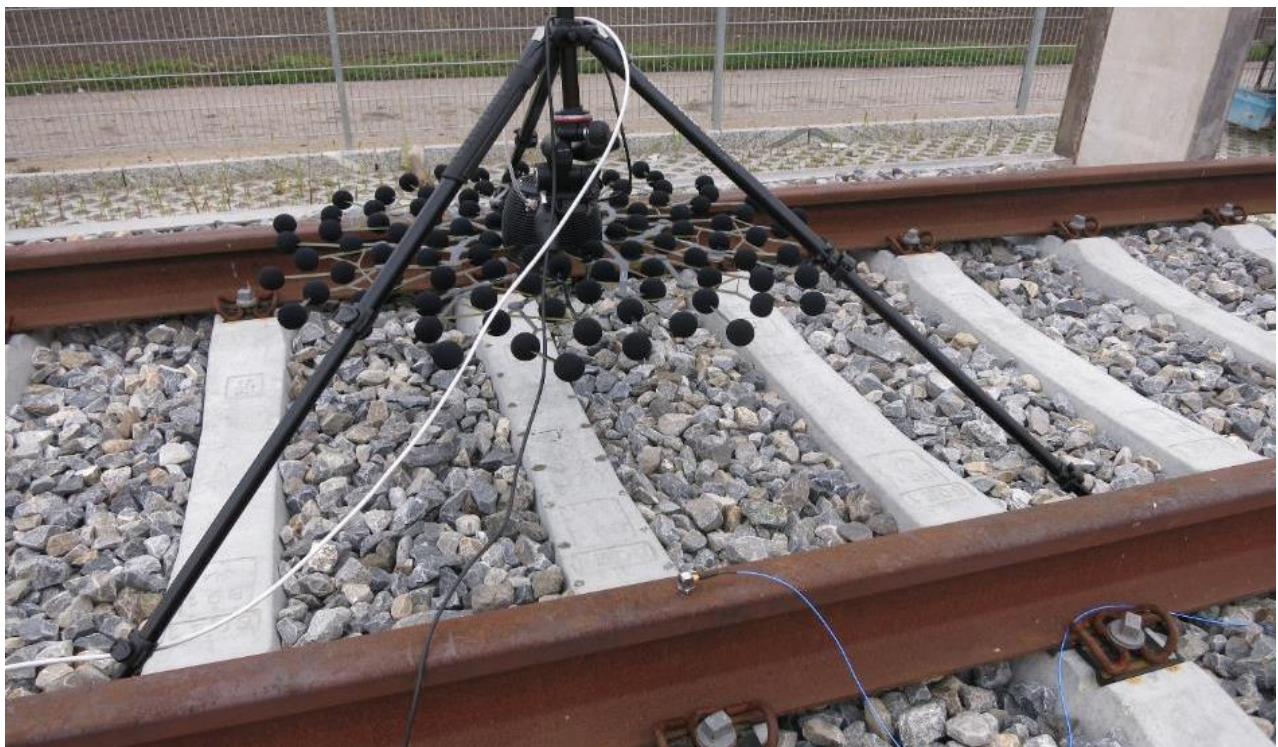


B.6.2 Messung mit Schiene





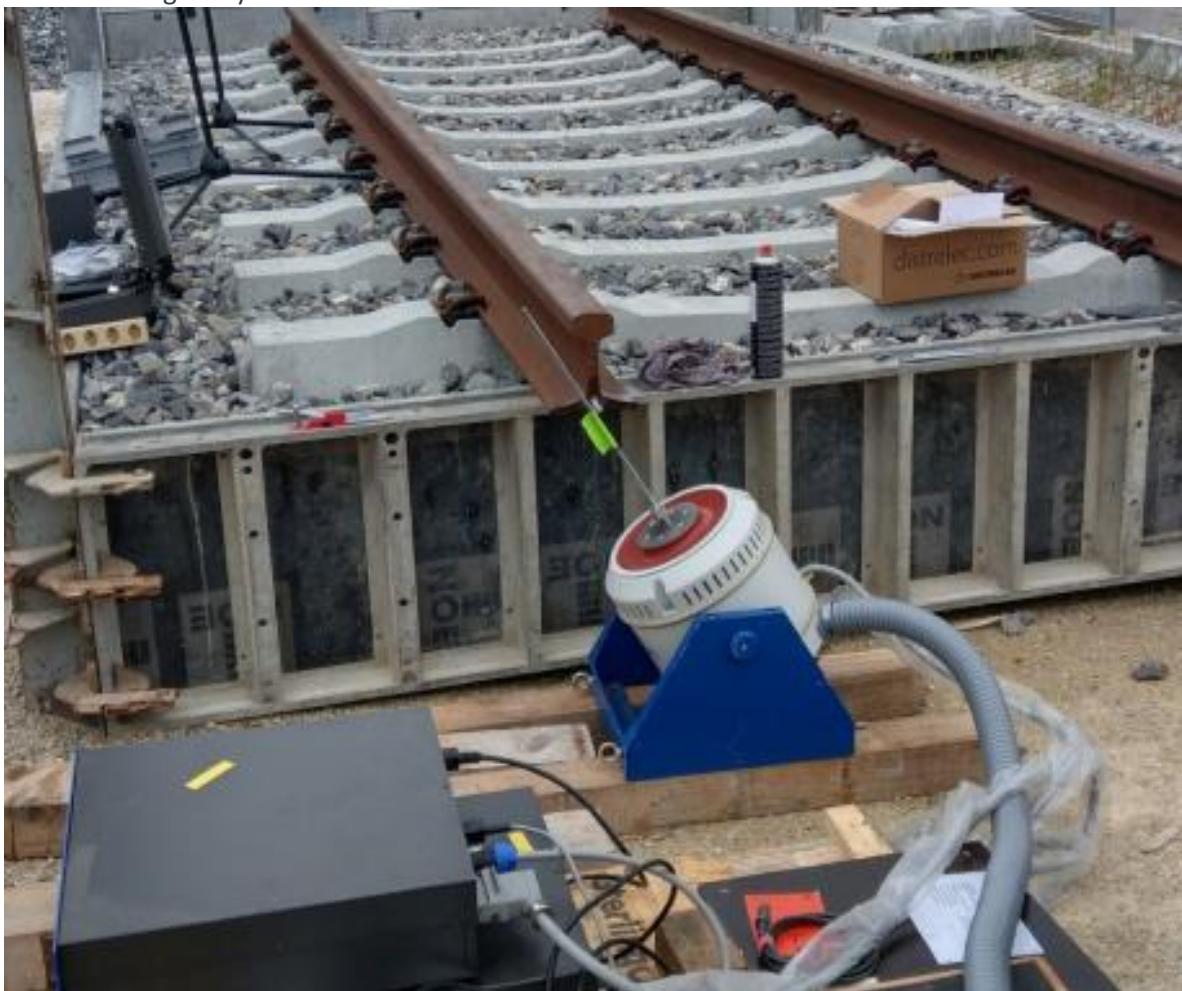
B.7 Messergebnisse Testgleis B91-Betonschwelle Vigier Rail



Messaufbau Mikrofonarray auf dem Testgleis in Müntschemier



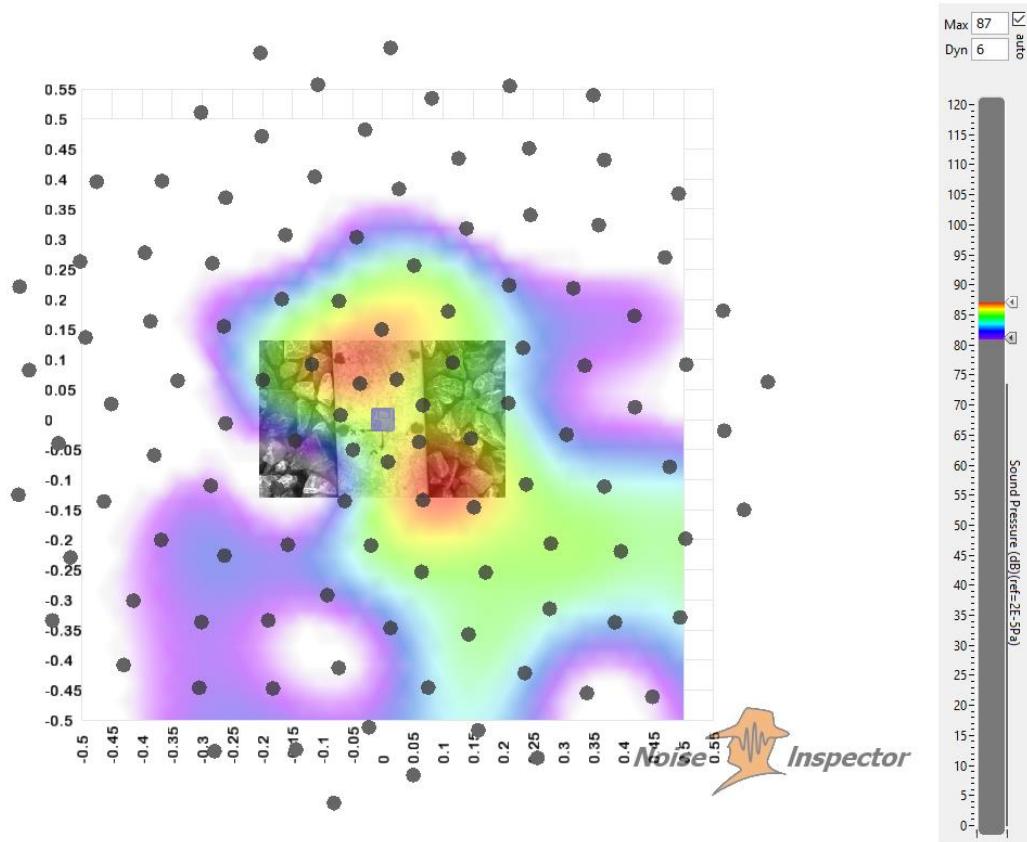
Positionierung Array über der 5. Betonschwelle



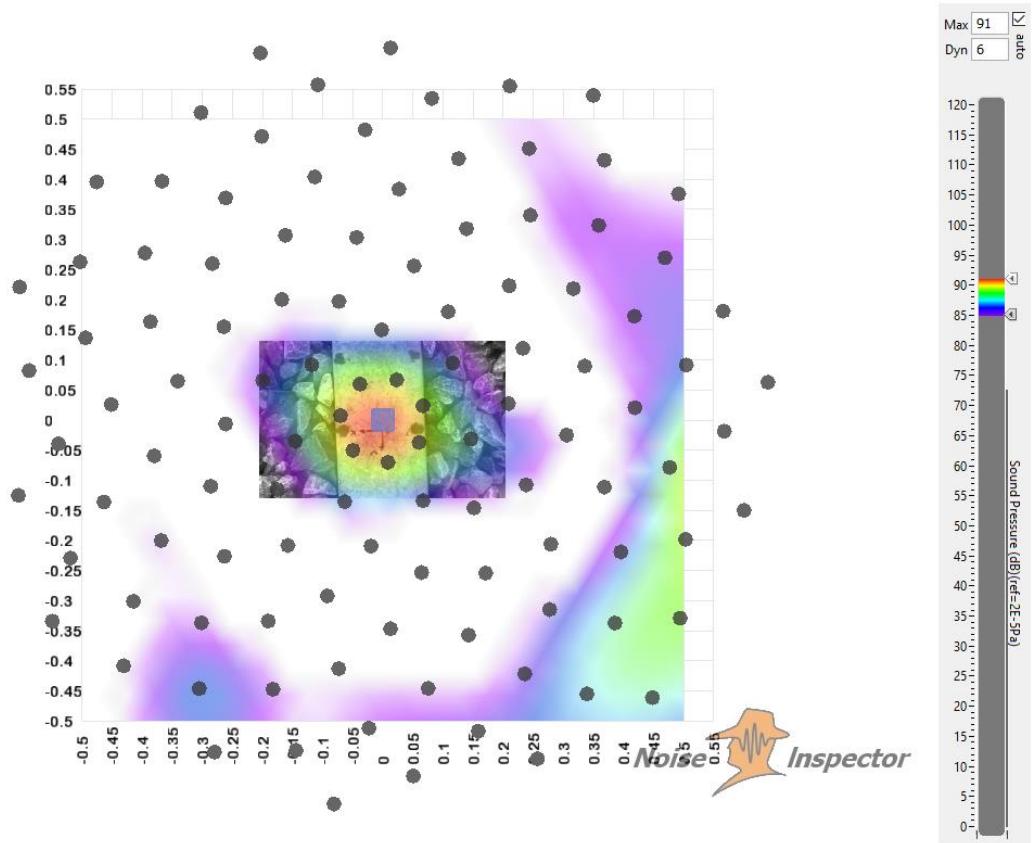
Shakeranregung Betonschwelle



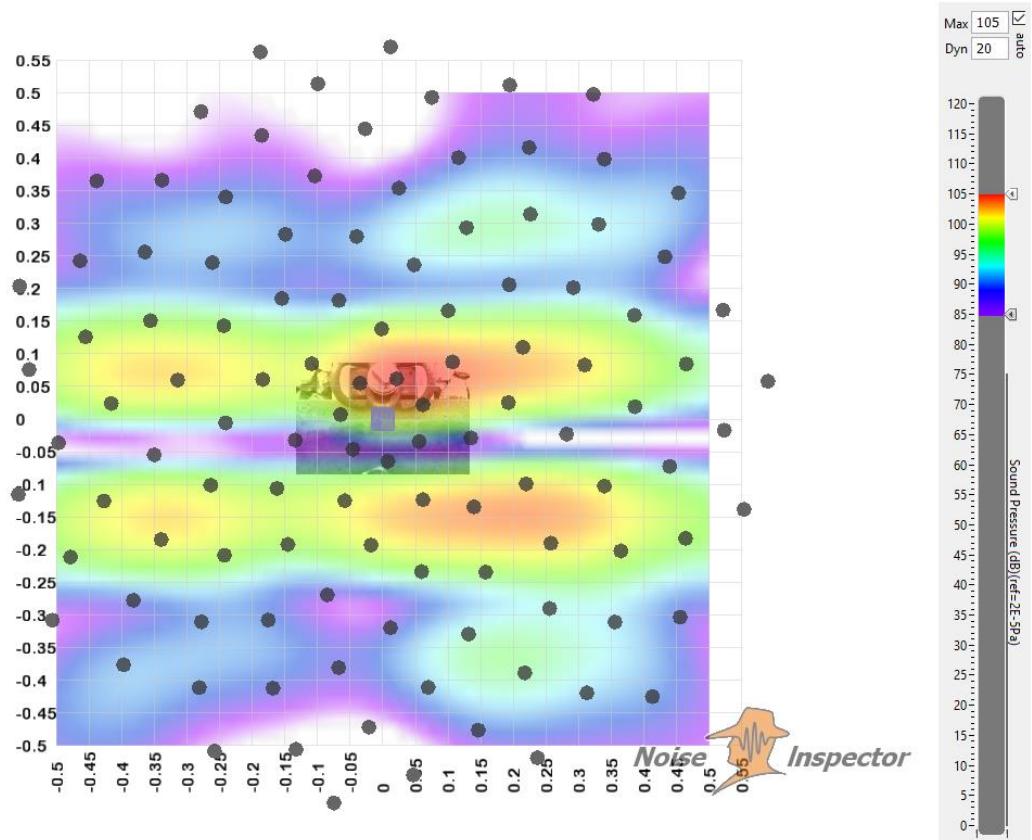
Teilabschirmung der Schiene bringt auch keine merkliche Verbesserung



Betonschwelle 17: 0.4m Abstand, 500 Hz Oktave



Betonschwelle 17: 0.4m Abstand, 125 Hz Oktave

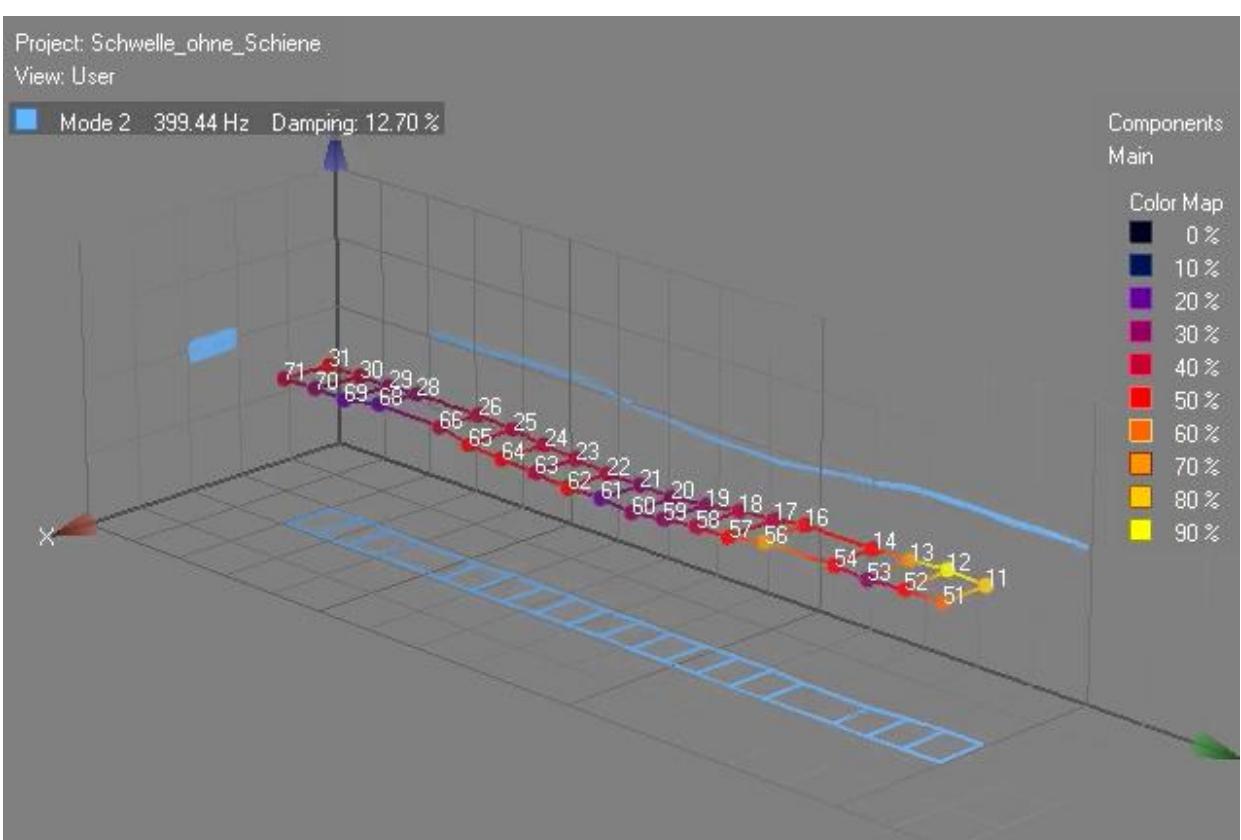
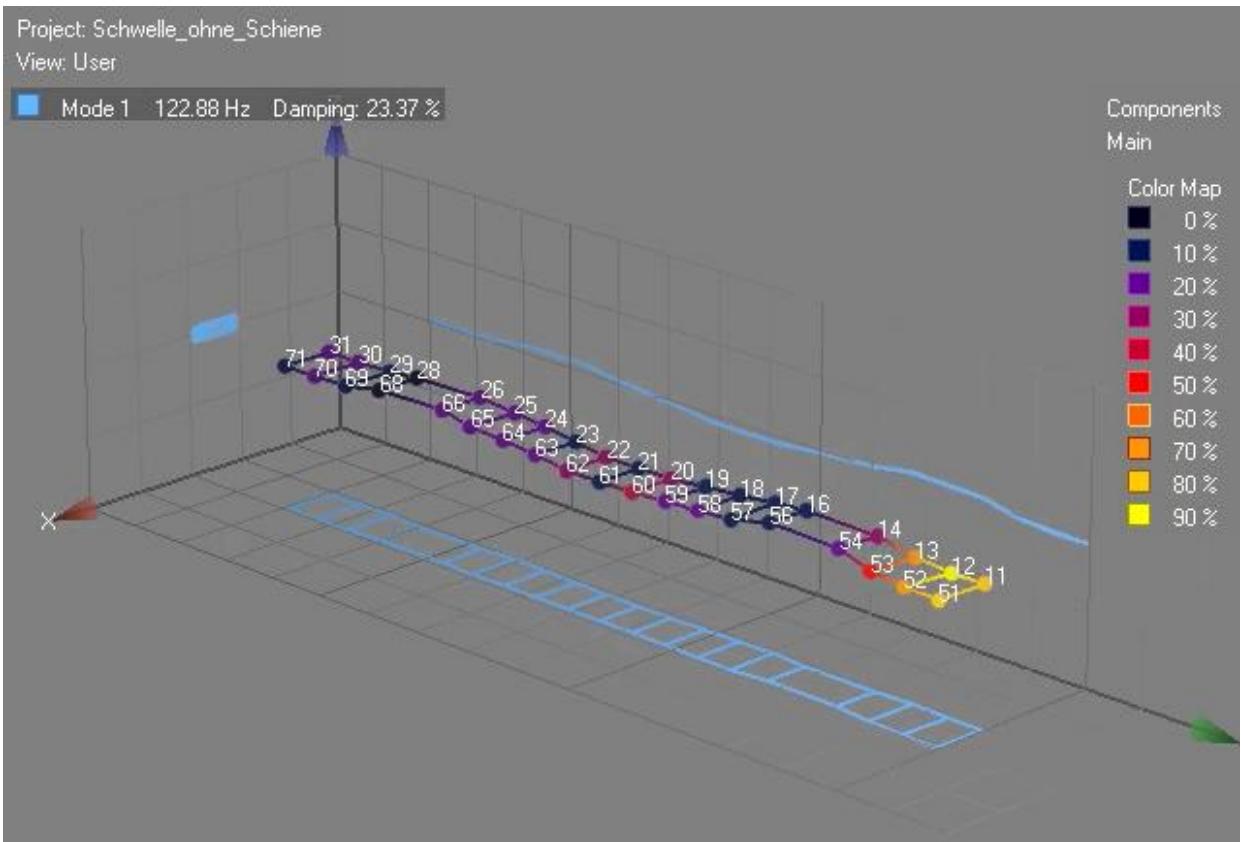


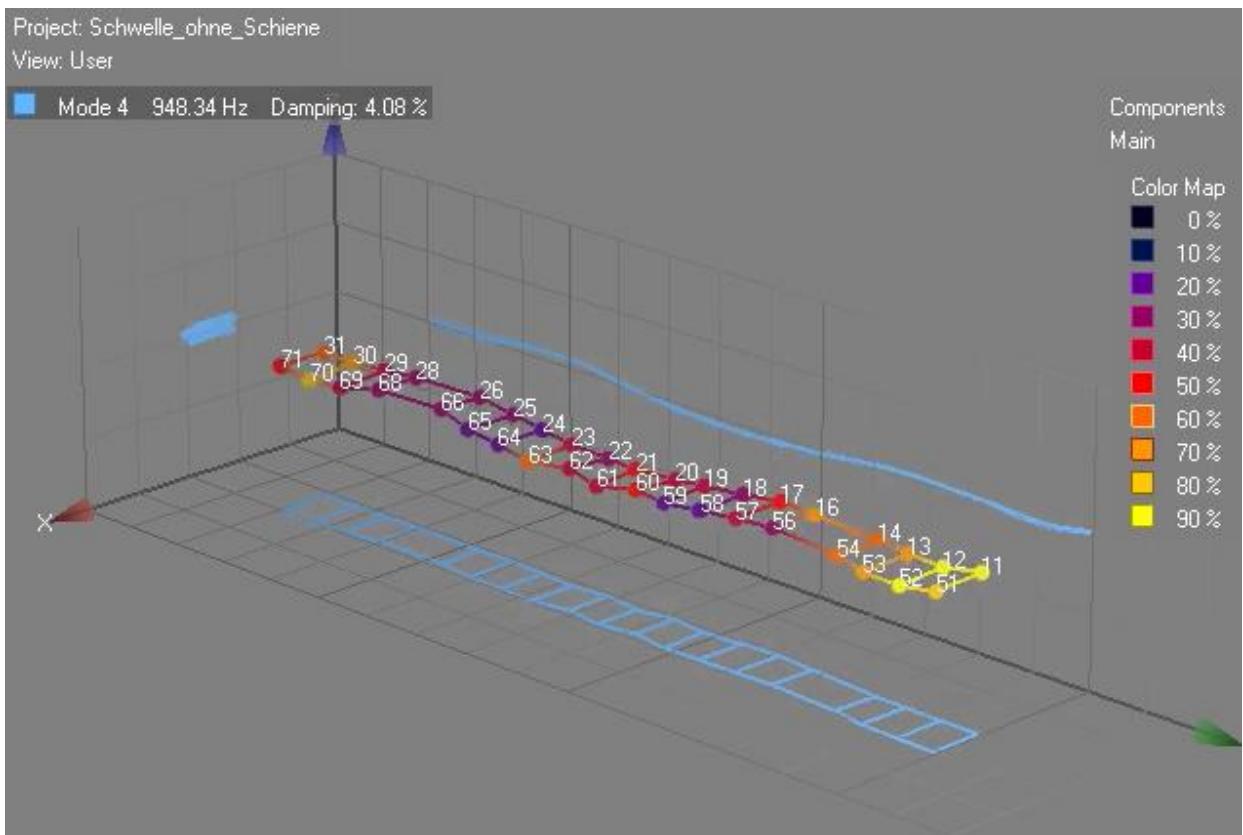
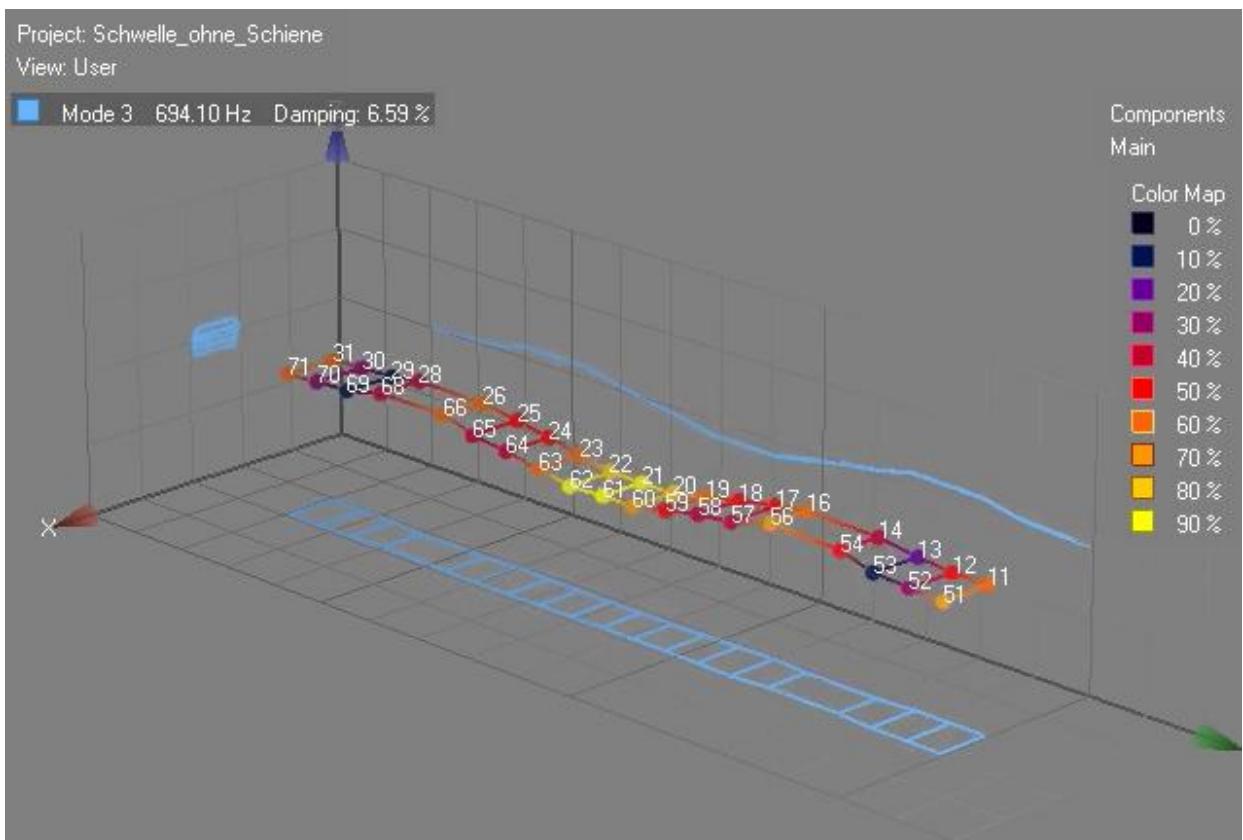
Betonschwelle 13: 0.26m Abstand, 500 Hz Oktave → Resultat scheint sinnvoll. Schienenfuss strahlt, Schienenkopf strahlt kaum, Schwelle aber nicht erkennbar.

B.8 Modalanalyse Testgleis B91 Betonschwelle Vigier Rail

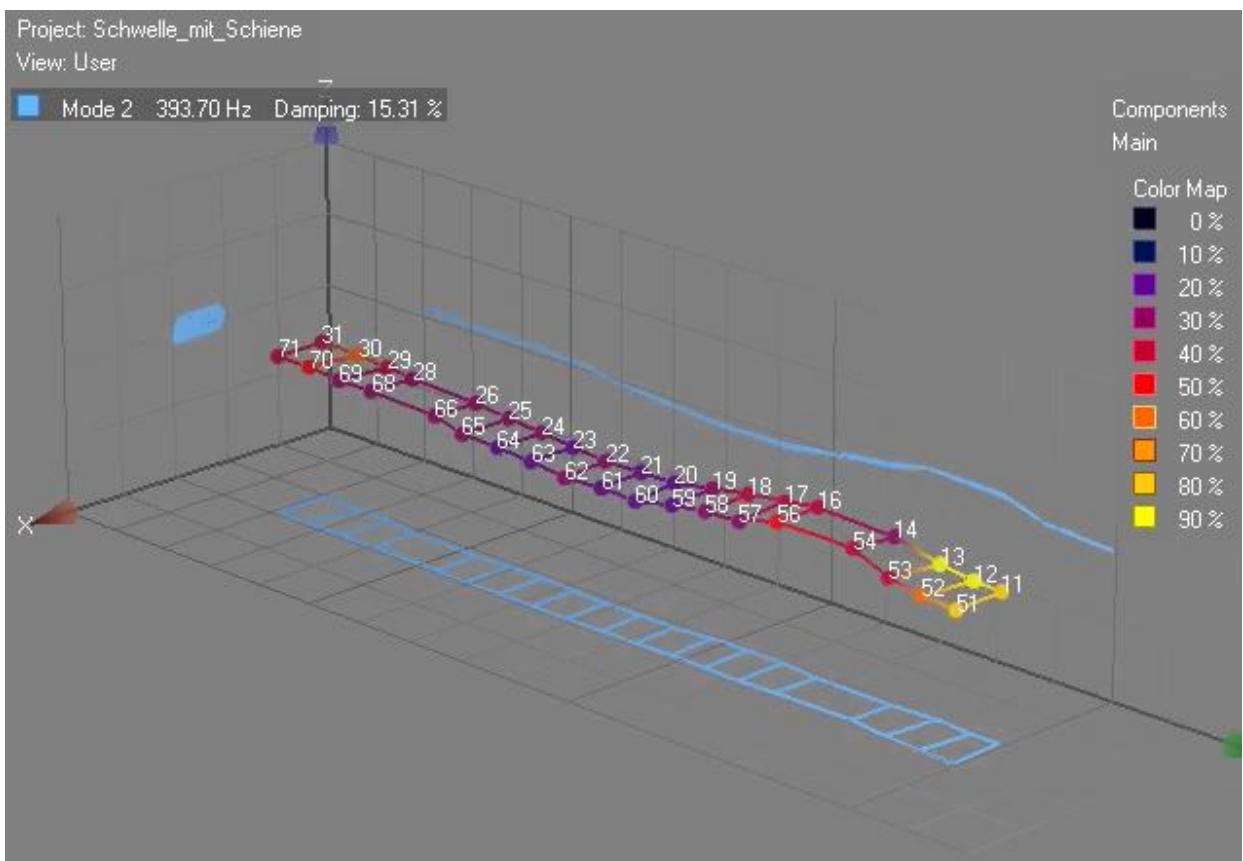
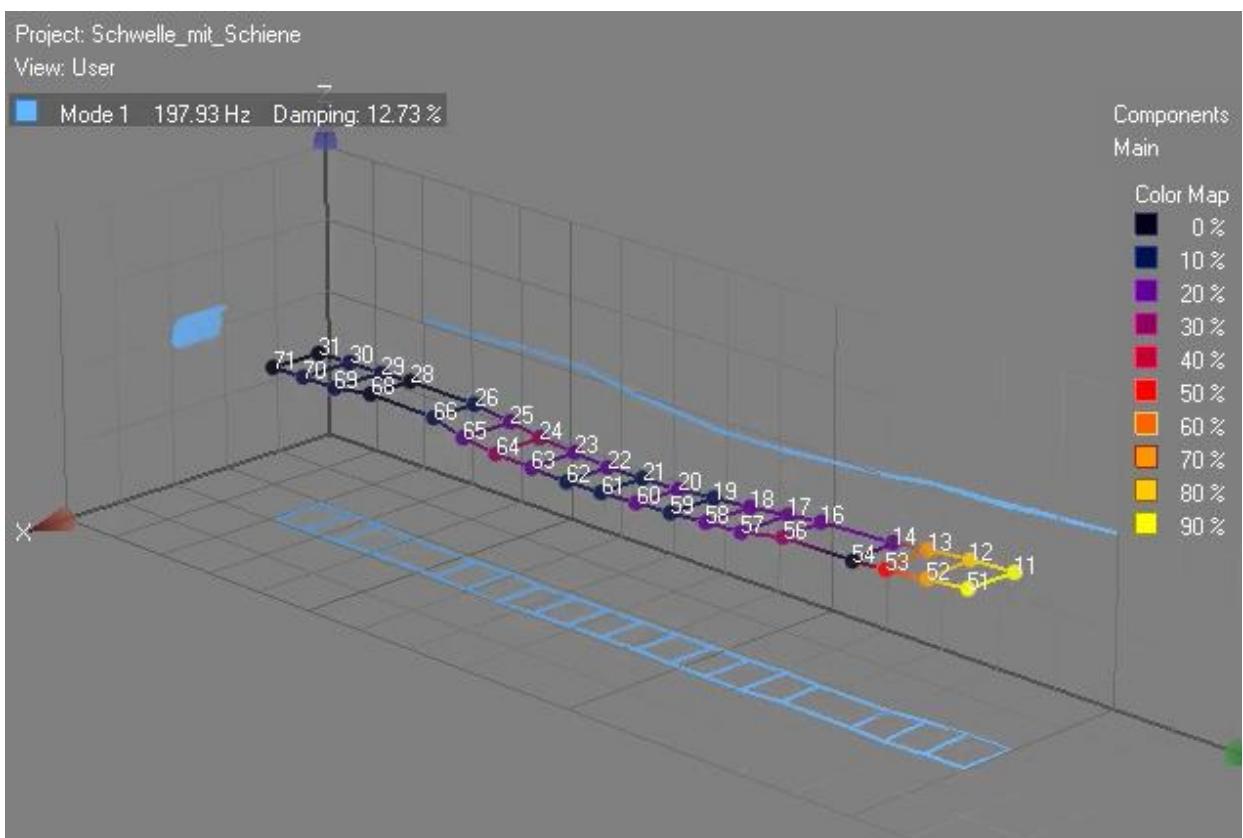
Der Messaufbau war analog zu Anhang B.6

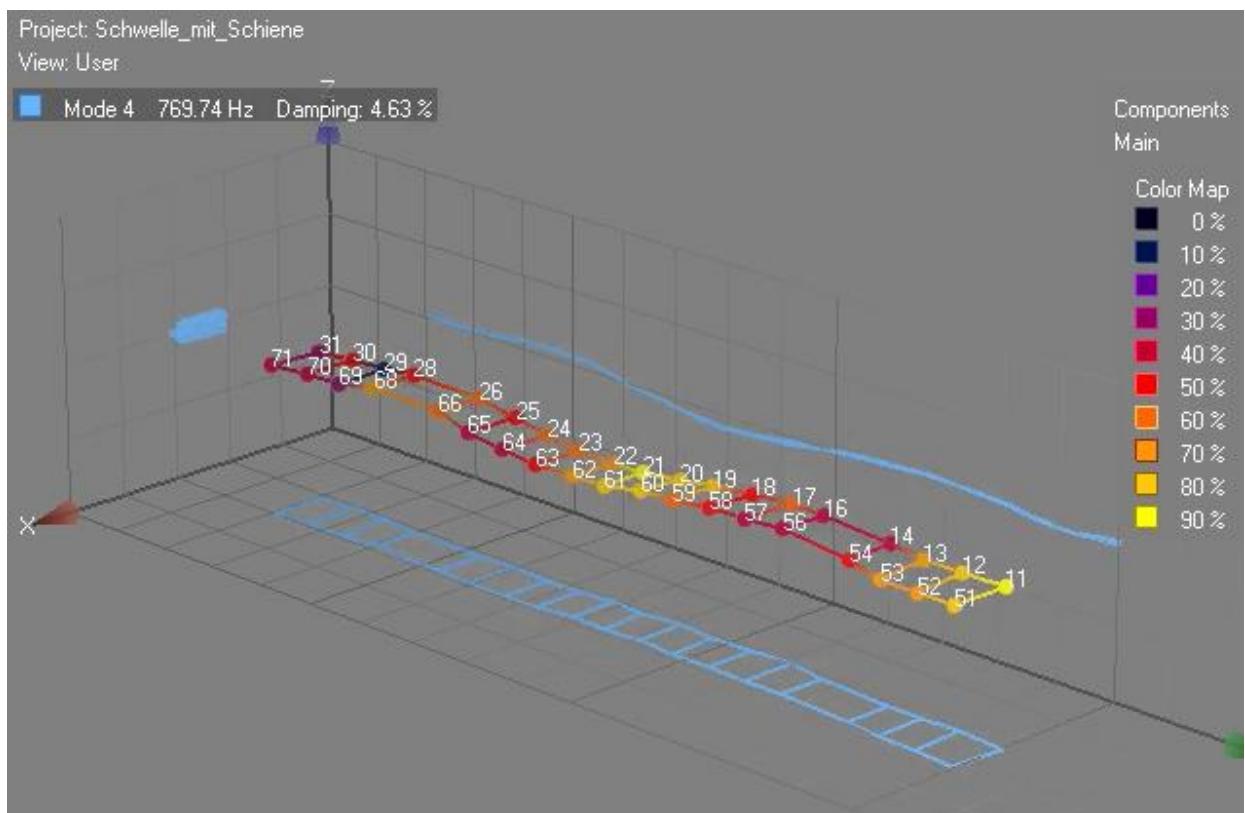
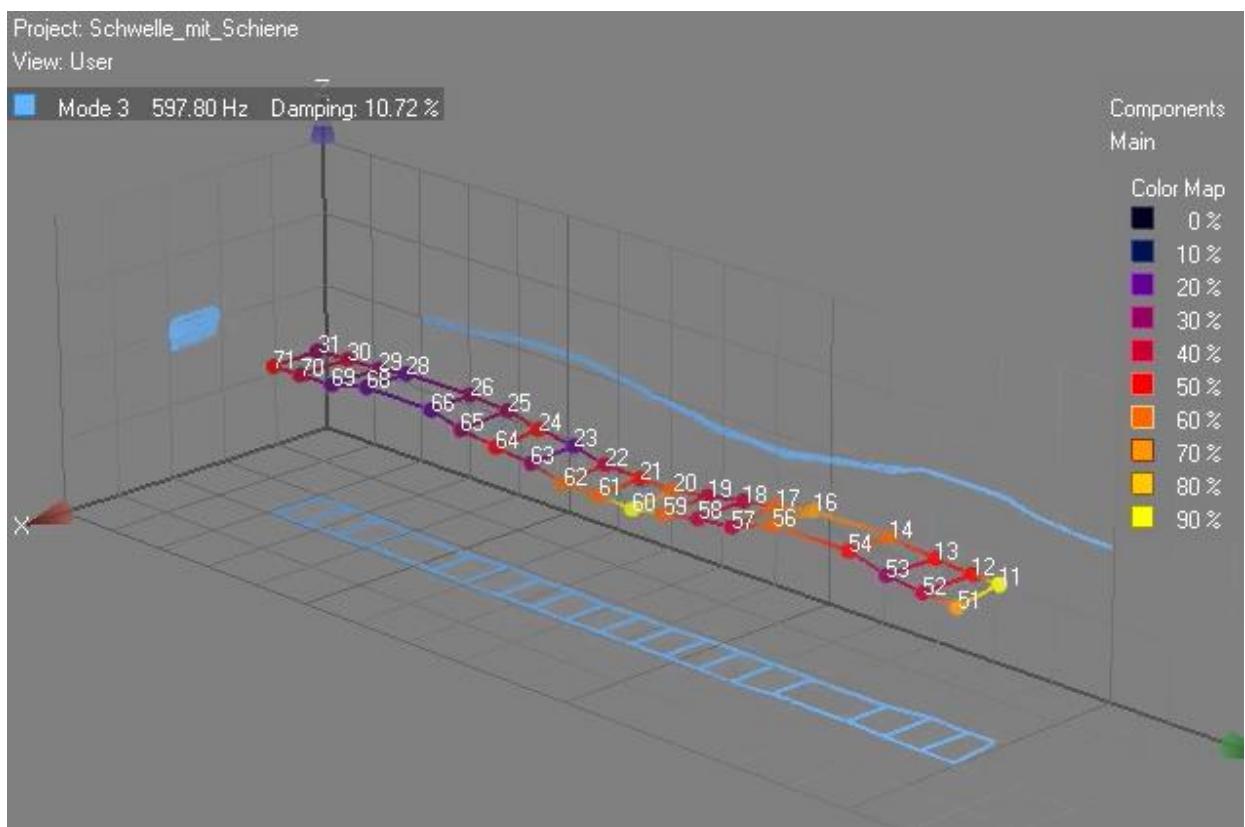
B.8.1 Messung ohne Schiene





B.8.2 Messung mit Schiene





B.9 Modalanalyse Betonschwelle Railbone

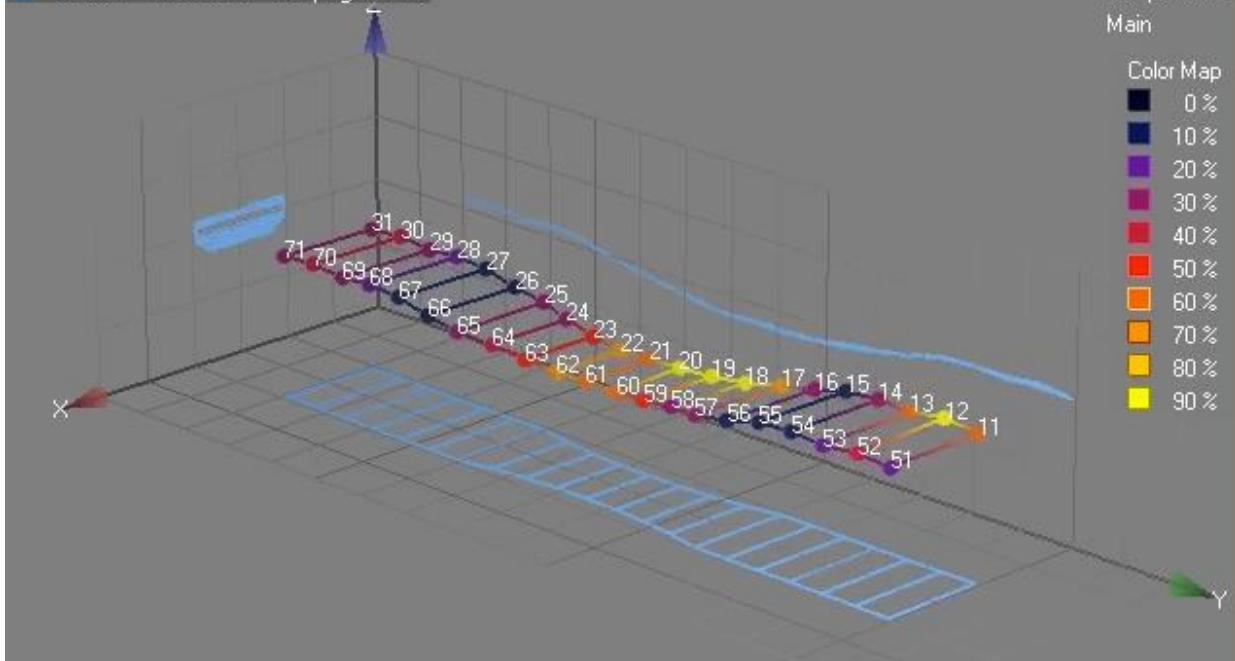
Der Messaufbau war frei gelagert.

Project: Messung1

View: User

■ Mode 1 114.35 Hz Damping: 0.73 %

Components
Main

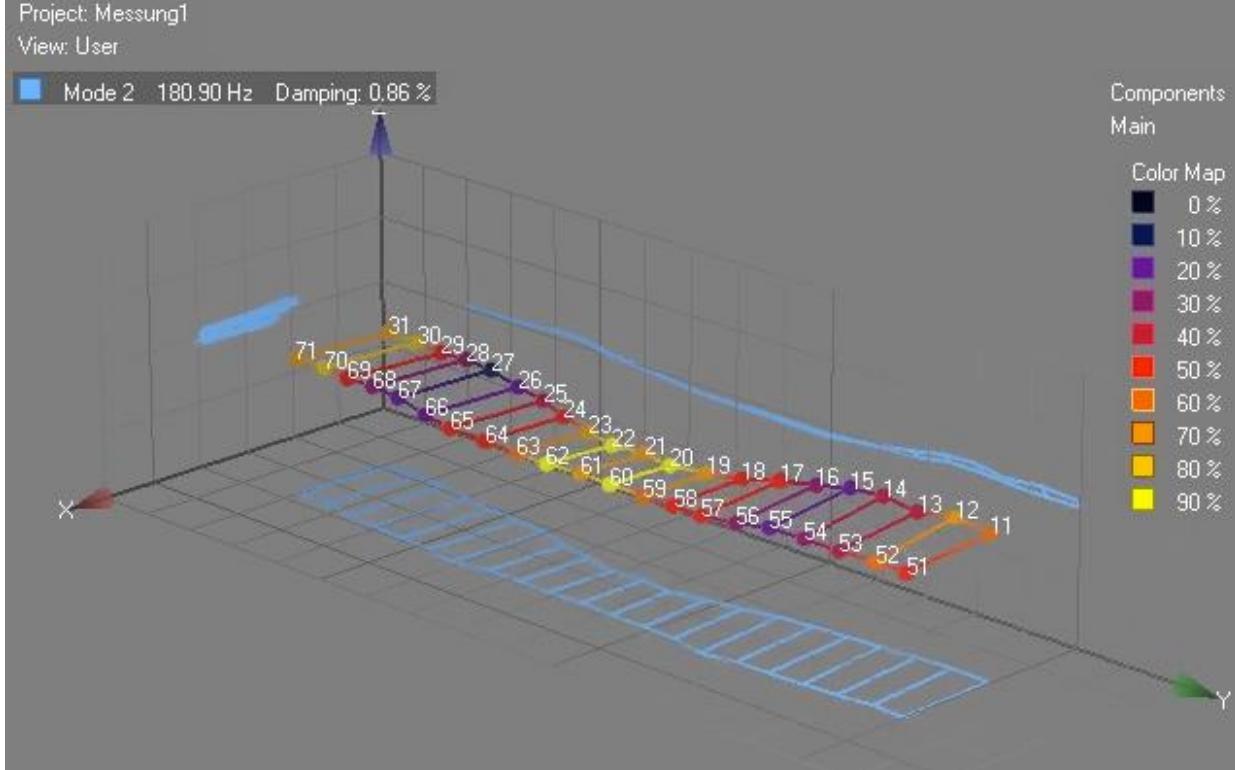
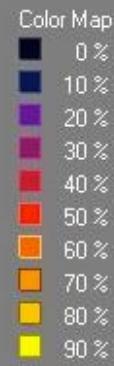


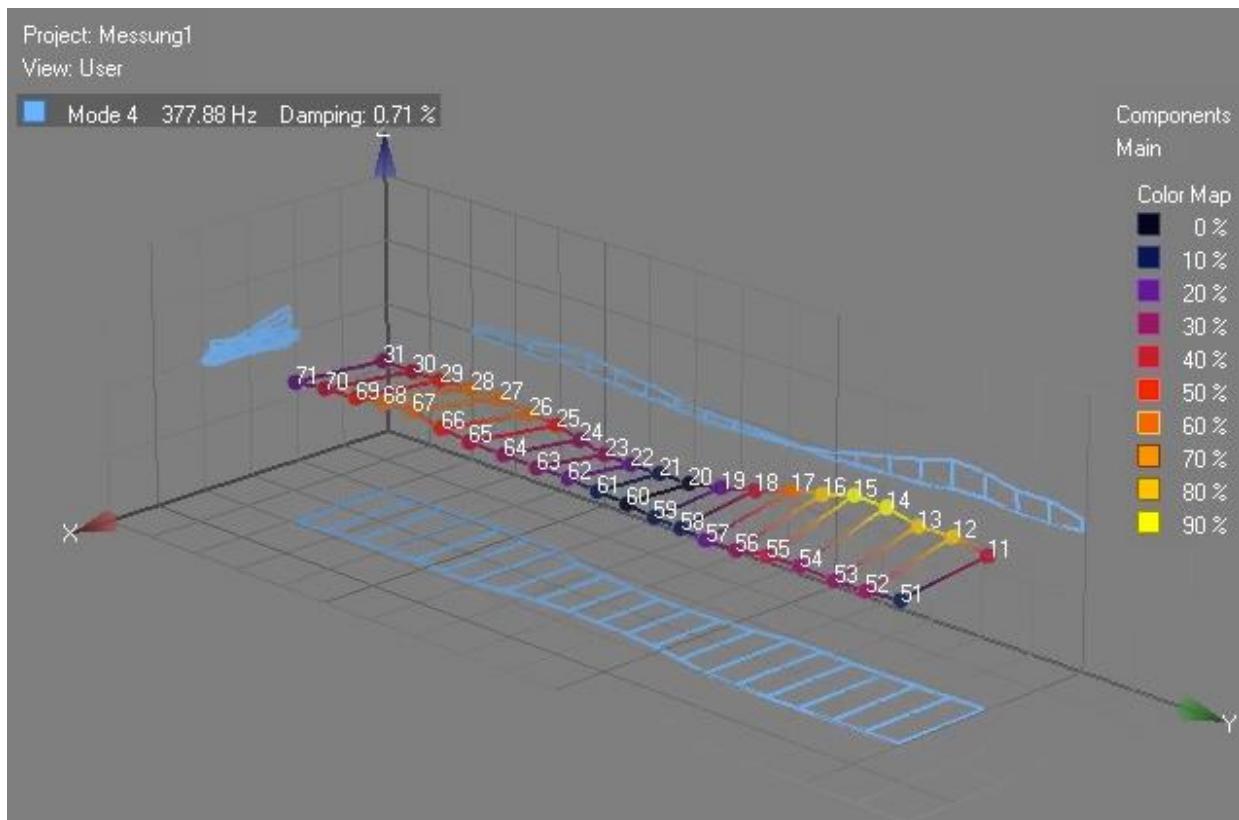
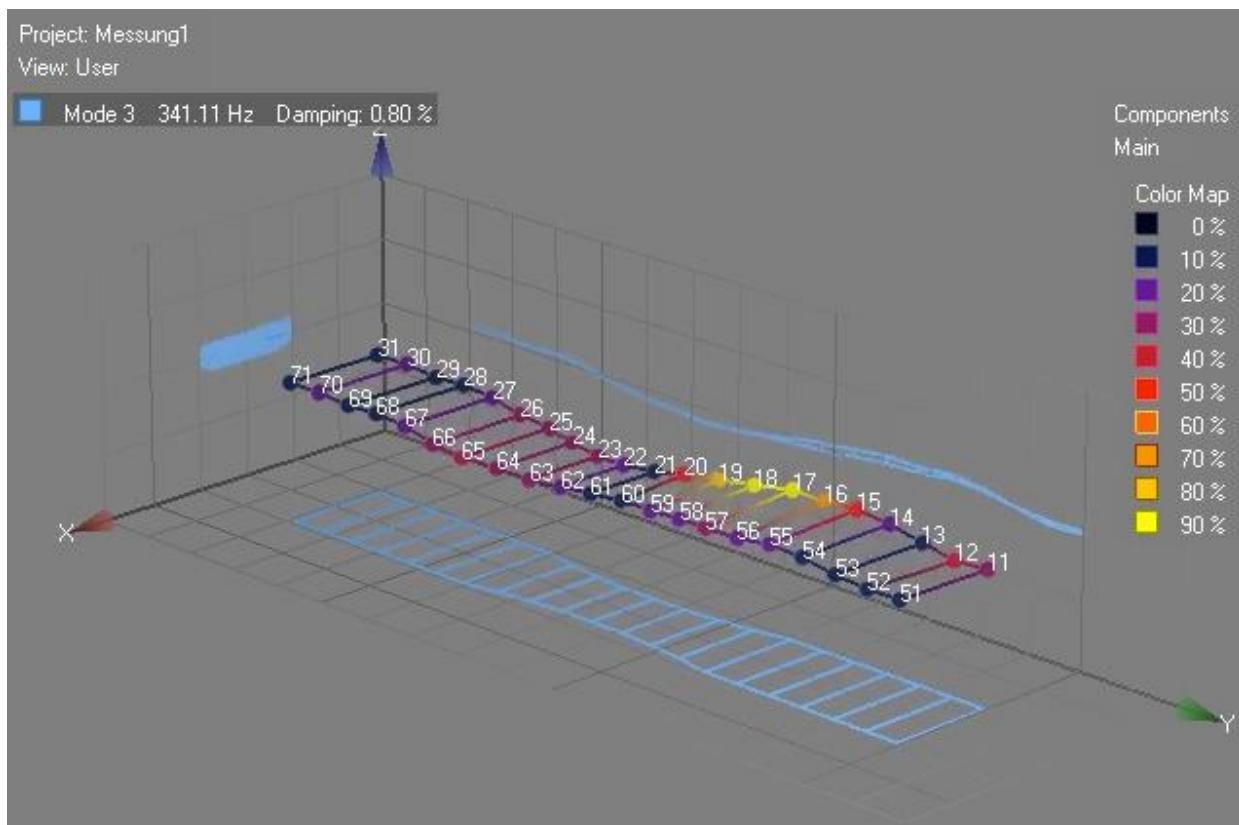
Project: Messung1

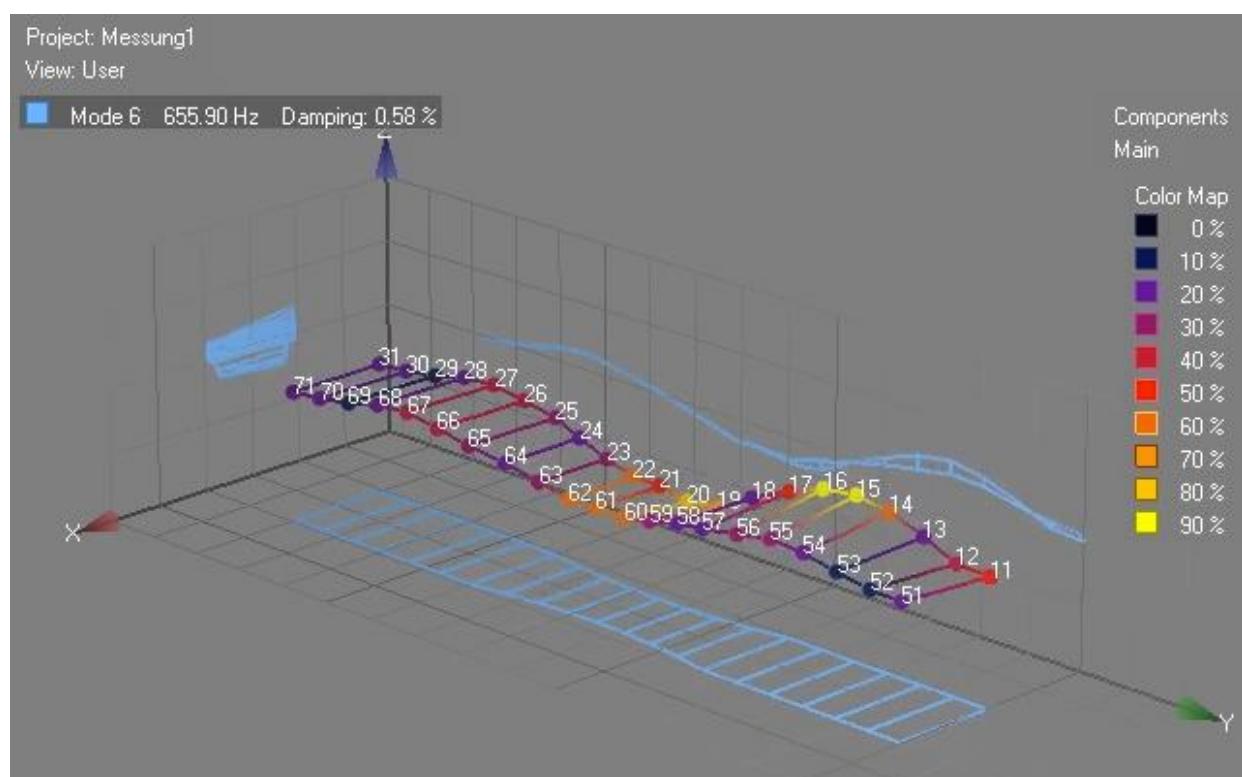
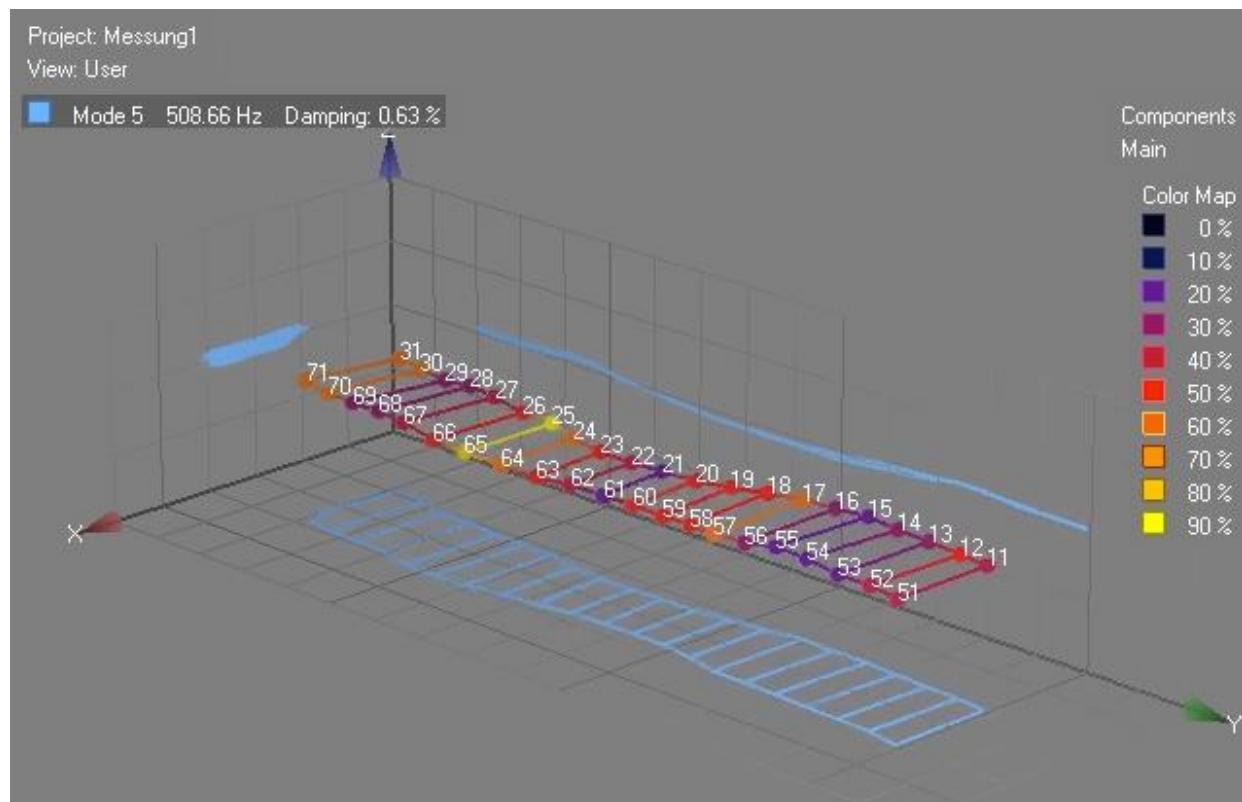
View: User

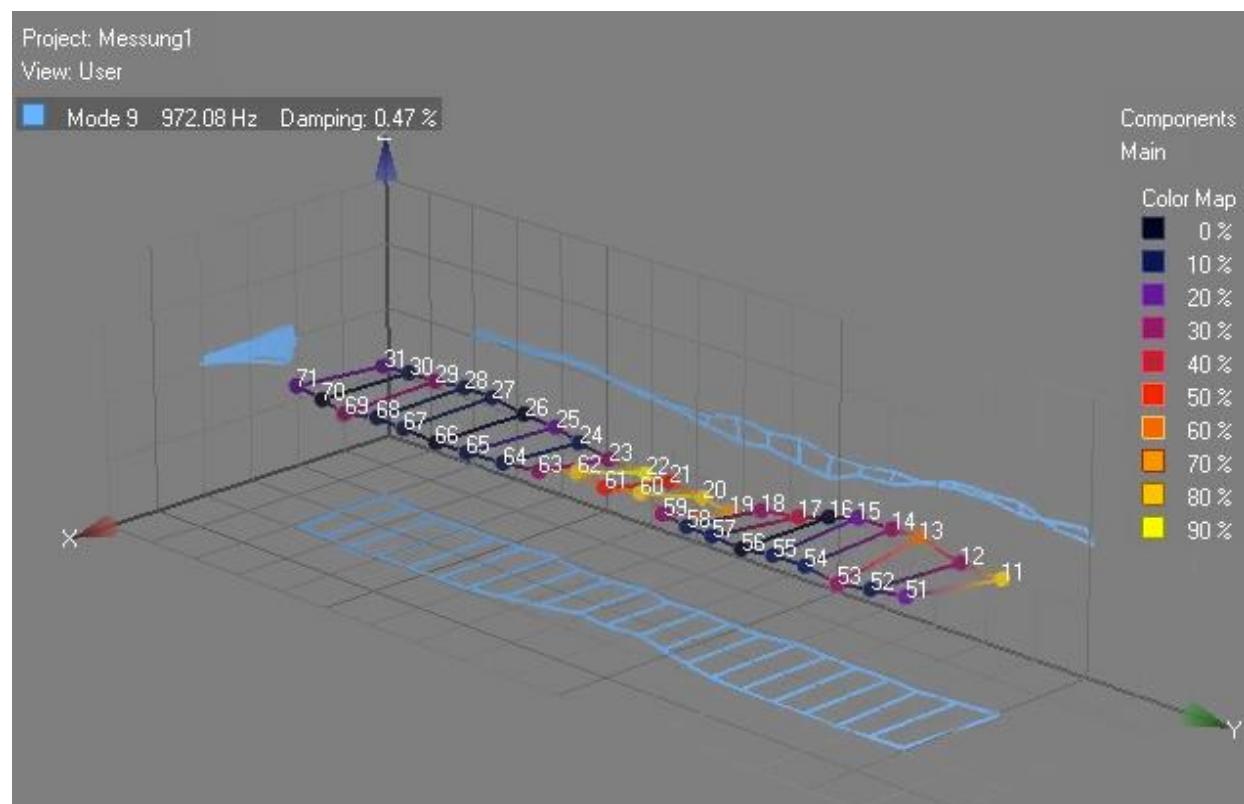
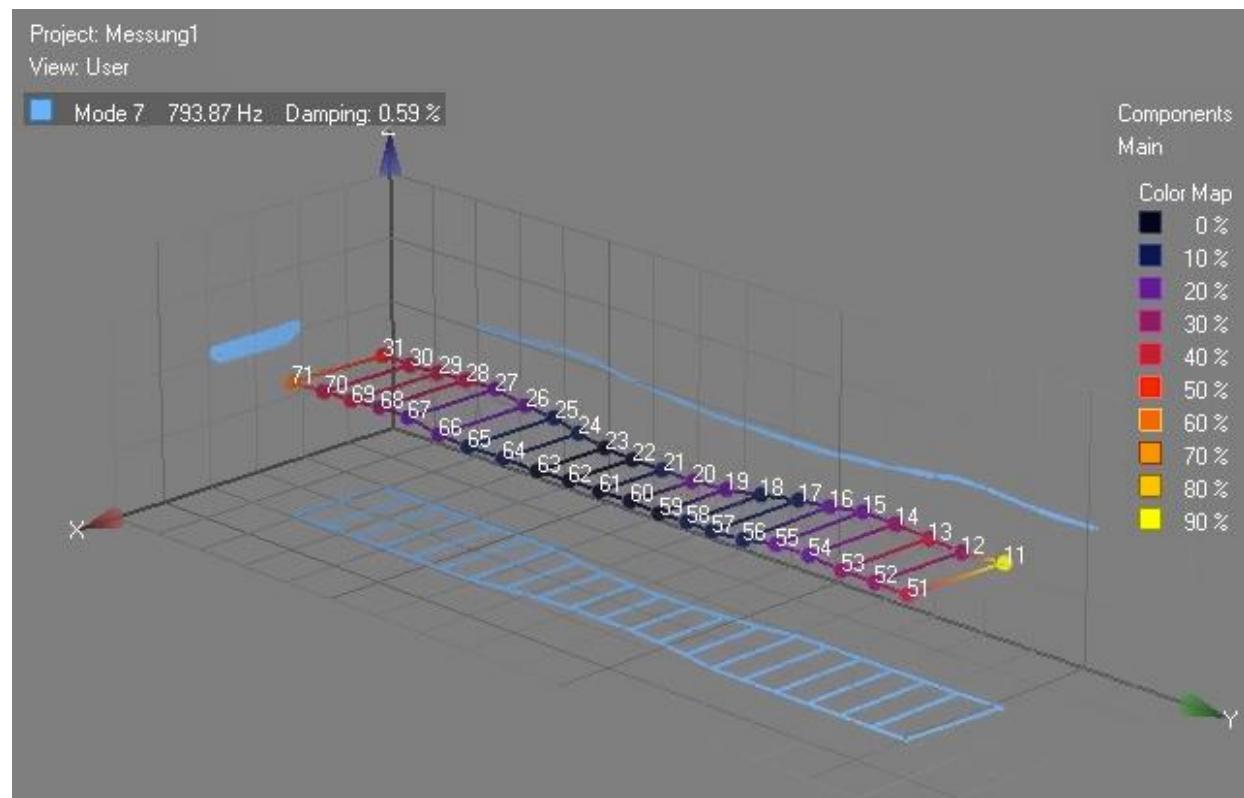
■ Mode 2 180.90 Hz Damping: 0.86 %

Components
Main









B.10 Modalanalyse Betonschwelle Hammerhead

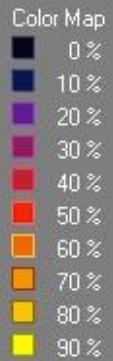
Der Messaufbau war frei gelagert,

Project: Messung1

View: User

Mode 1 110.78 Hz Damping: 0.92 %

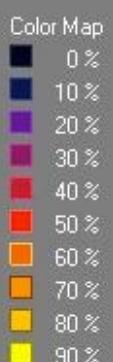
Components
Main

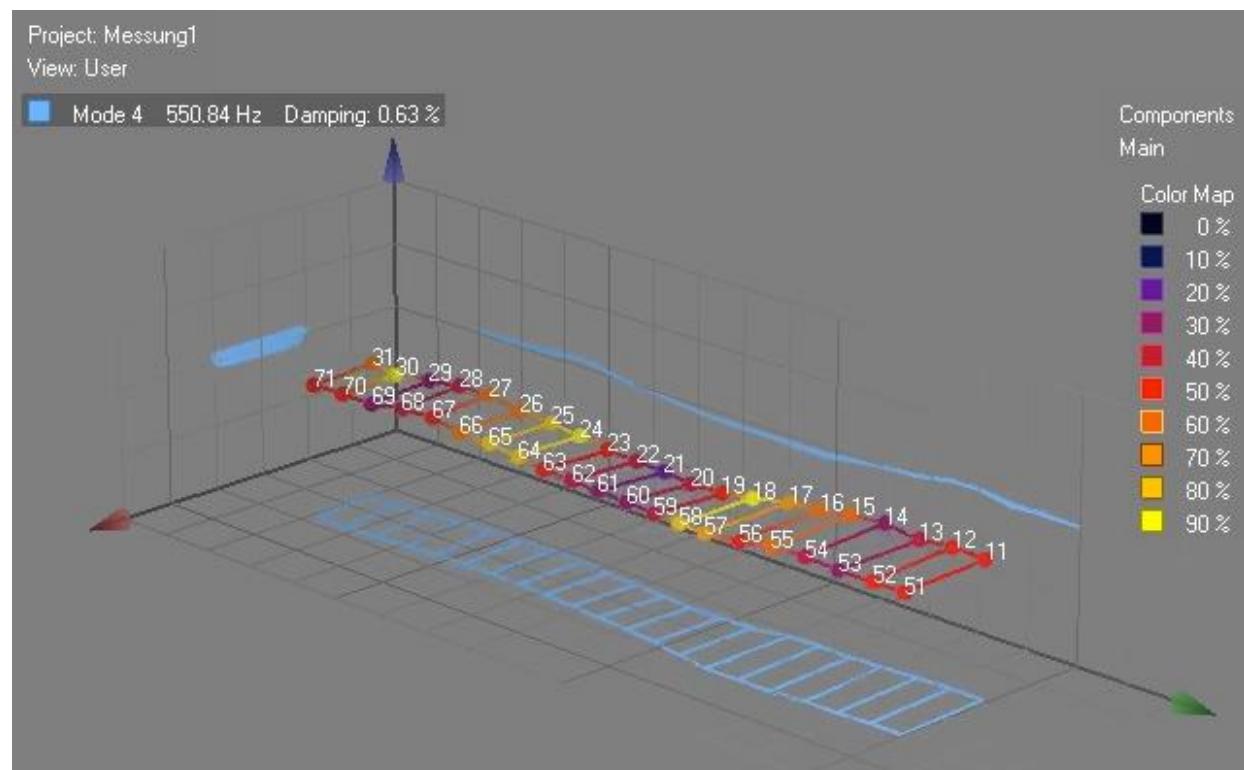
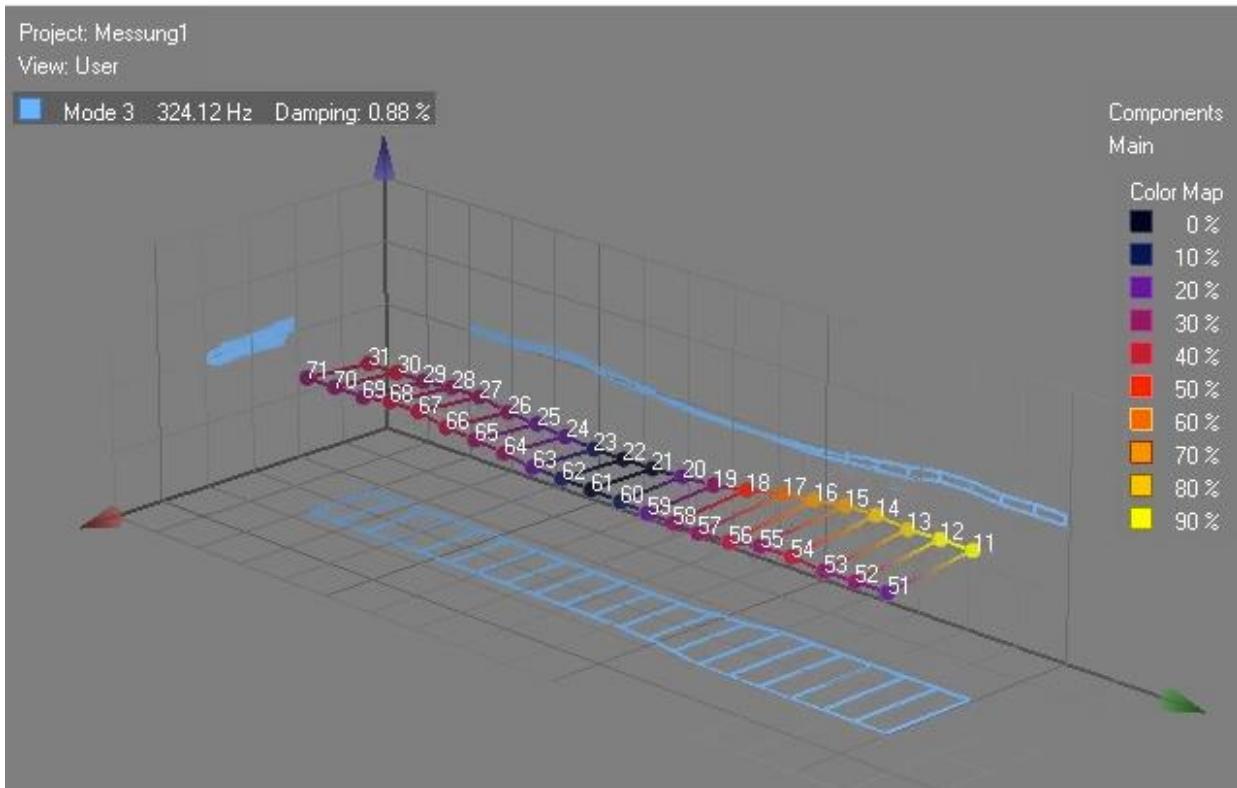


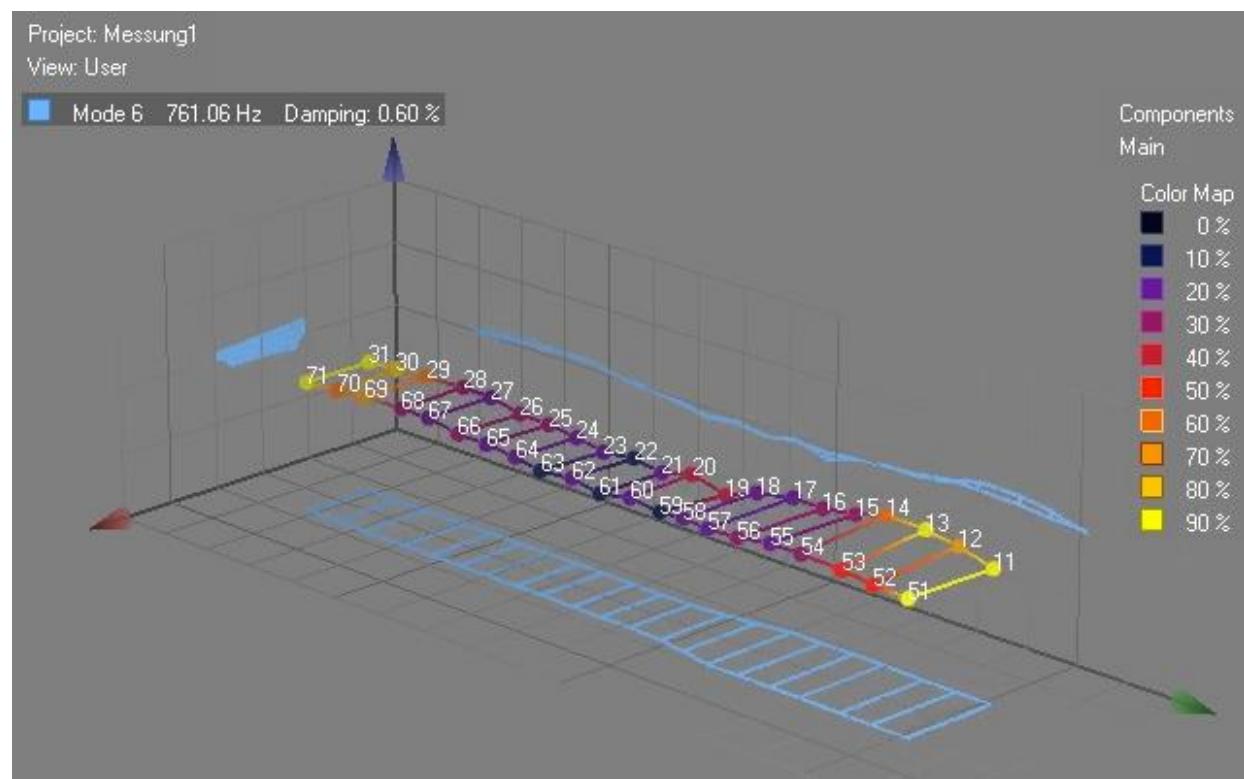
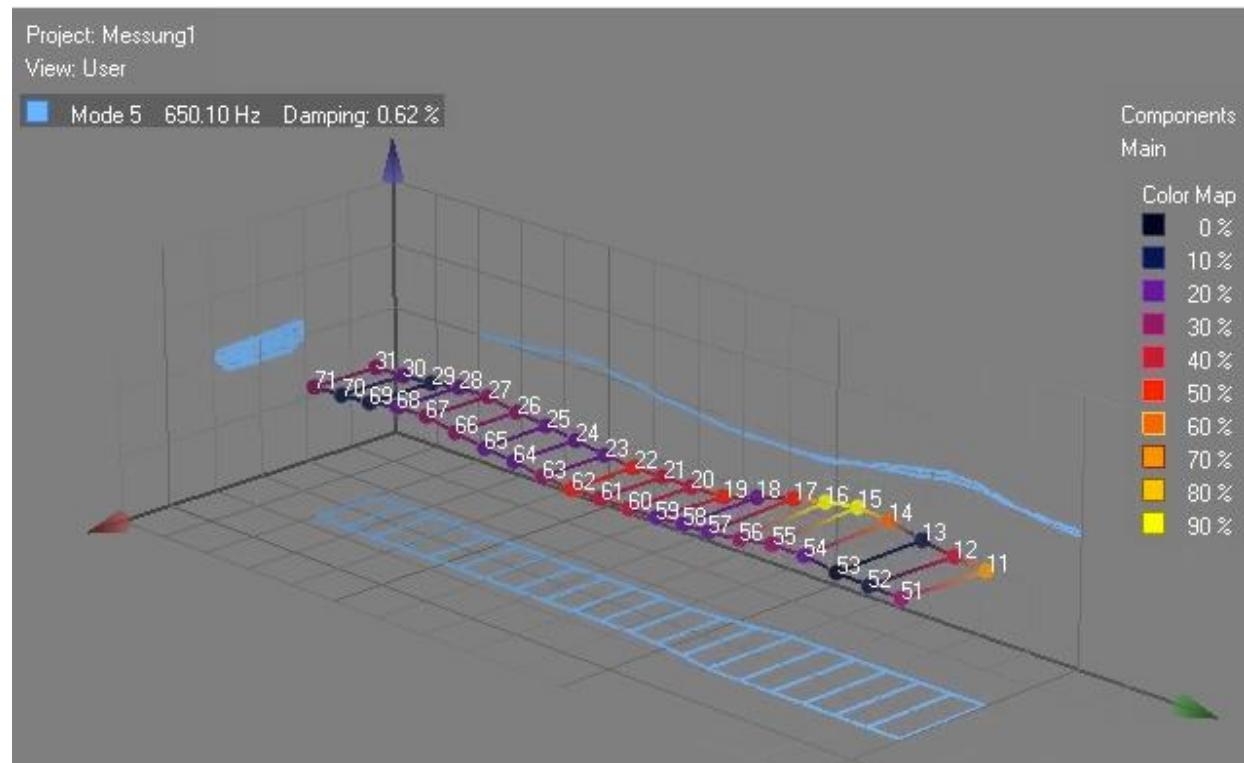
Project: Messung1
View: User

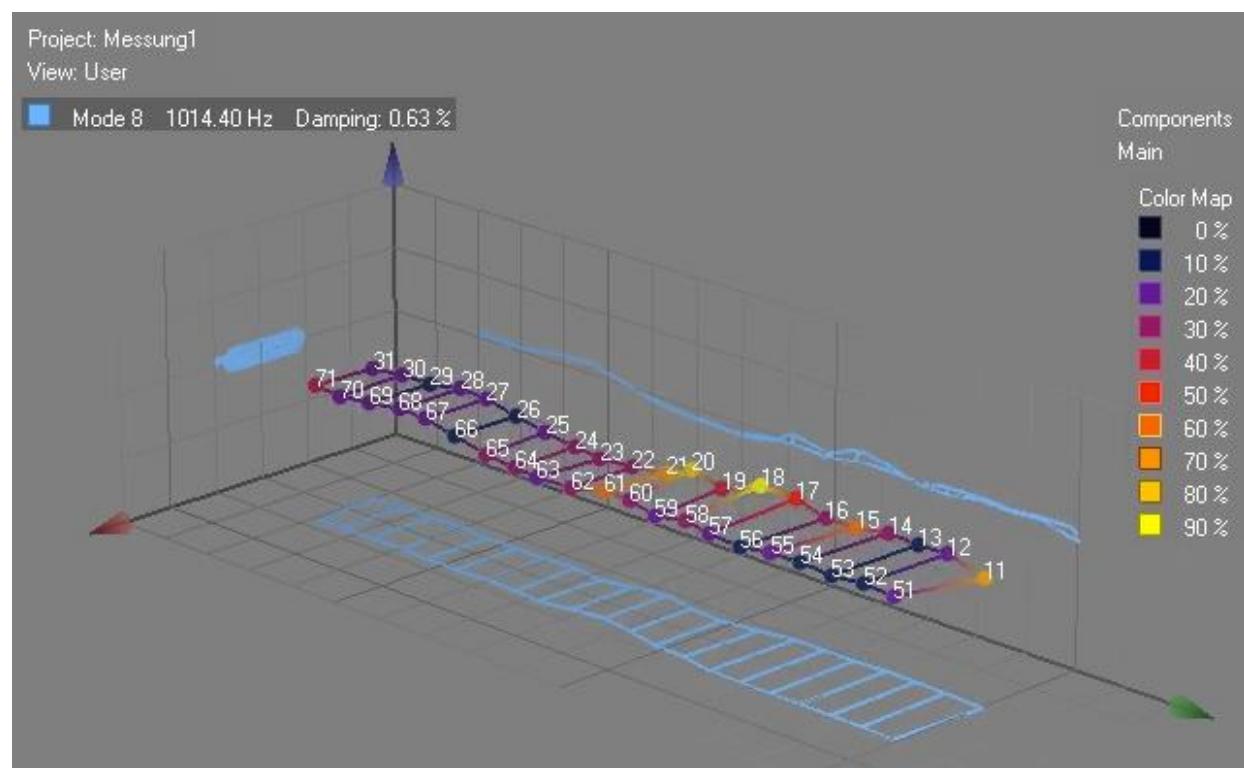
Mode 2 182.01 Hz Damping: 0.82 %

Components
Main









C Akustik-Messungen an Testgleisen

C.1 Testgleis mit B70-Schwellen



Anregung mit unterschiedlichem Rauschen und Messung mit 12mm Intensitätssonde

Frequenzbereich Intensität 125 bis 5000 Hz

	Tiefrosa	TiefRosa	Tiefrosa	TiefRosa	Weiss	Weiss								
Freq	S6-100	S-25	S6-125	S-50	S6-100	S-25	S0	S50	S6-125	S-50	S25	S100	S6125	
I [dB]	I [dB]	I [dB]	I [dB]	I [dB]	I [dB]	I [dB]	I [dB]	I [dB]	I [dB]	I [dB]	I [dB]	I [dB]	I [dB]	
50	63.9	-69.1	-58.3	-74.1	62.8	-63.1	-62.2	68.1	-57.1	-55.9	-68.1	-70.3	-69.8	-64.7
63	66.6	-70.2	64.3	-77.5	-59.6	-70.0	-70.3	66.7	71.8	45.2	-71.5	-71.5	58.0	62.7
80	73.3	-76.3	68.0	73.9	69.2	-72.5	-53.1	72.1	76.7	58.8	67.7	-67.7	61.1	62.7
100	77.0	-77.8	-59.1	-67.1	-68.2	-72.9	-72.0	74.9	-71.7	-64.6	-66.1	-73.3	-63.6	-73.8
125	71.1	-90.2	-69.3	-83.8	78.1	-87.2	-77.0	84.9	87.2	-74.1	-81.4	-79.9	-74.8	-77.0
160	62.0	-84.8	-72.3	-78.3	71.5	-82.6	77.3	77.9	82.7	-74.7	-77.3	-73.8	77.8	-77.1
200	-58.0	-65.7	-59.0	72.7	61.3	-62.2	-67.0	78.2	78.5	63.3	72.7	63.6	71.9	-69.0
250	-64.2	-67.8	-58.3	68.3	-67.9	-72.3	-71.7	64.1	72.1	69.3	69.2	-72.9	-71.3	-73.5
315	-52.3	60.4	-48.1	66.5	-58.1	65.9	-61.8	64.0	51.9	49.9	72.0	-63.7	63.5	65.3
400	-60.5	-71.0	56.1	75.3	-67.4	-78.9	-75.7	78.1	67.3	64.9	82.7	-75.3	-60.0	74.9
500	-55.2	-68.4	-56.3	67.6	-66.0	-76.5	-80.6	76.3	79.4	-63.7	77.2	75.1	76.1	-75.0
630	-53.0	-54.5	-52.8	-55.6	-65.5	-67.1	78.9	70.2	-69.9	-64.0	-69.3	68.6	73.7	-70.7
800	-51.1	59.3	-45.0	67.4	-66.9	75.1	79.4	67.5	-74.9	-60.1	83.6	-73.9	-76.3	-69.7
1000	-39.7	60.0	42.0	54.6	-55.8	76.4	77.0	69.9	80.8	58.6	70.8	-69.1	-72.8	62.9
1250	-34.4	46.6	-33.4	48.2	-48.0	62.8	65.2	66.5	75.4	-48.3	63.1	-61.6	65.3	-55.6
1600	30.8	45.2	-27.2	46.3	46.0	60.4	60.8	64.7	62.7	-39.5	60.6	-61.7	50.2	-46.2
2000	-32.6	46.5	11.5	44.1	-49.9	61.9	63.8	65.9	70.6	43.9	55.5	59.2	-59.6	50.1
2500	-29.3	-33.6	14.1	-24.9	-37.0	43.9	45.9	54.7	54.9	34.5	-49.8	-40.5	-48.2	-34.5
3150	-26.8	-33.7	22.5	25.4	-27.6	-32.6	-32.5	42.5	39.3	27.3	36.8	32.5	32.9	-35.7
4000	-27.0	-30.8	-21.9	27.1	-29.4	-32.4	-35.5	42.4	34.8	-15.8	34.5	-30.4	21.5	-33.6
5000	-25.7	-28.8	-14.8	-20.4	-27.2	-31.2	-29.5	42.1	33.8	14.1	23.4	-30.3	27.6	26.7
6300	-20.3	-24.6	-12.2	17.1	-20.9	-25.4	-25.3	25.3	21.5	-10.4	24.4	-23.1	-24.9	-23.5
8000	8.5	-18.9	-14.3	-19.1	10.2	-13.4	-17.6	17.5	18.3	-13.9	-16.4	-21.9	-22.7	-20.8
10000	-15.6	-21.1	-14.8	-20.0	-15.7	-20.7	-21.1	22.3	-19.8	-14.1	-20.0	-21.7	-22.0	-21.4
L	71.6	64.8	56.3	78.8	79.1	79.3	84.4	87.9	90.2	71.6	87.2	75.5	81.6	75.6
A	-61.3	-76.8	-61.3	71.1	-69.7	63.6	80.5	74.6	83.3	-64.1	84.6	-75.8	-72.0	-74.1

Abbildung 11-19: Schallintensitäten B70 Betonschwelle bei Anregung mit unterschiedlichem Rauschen

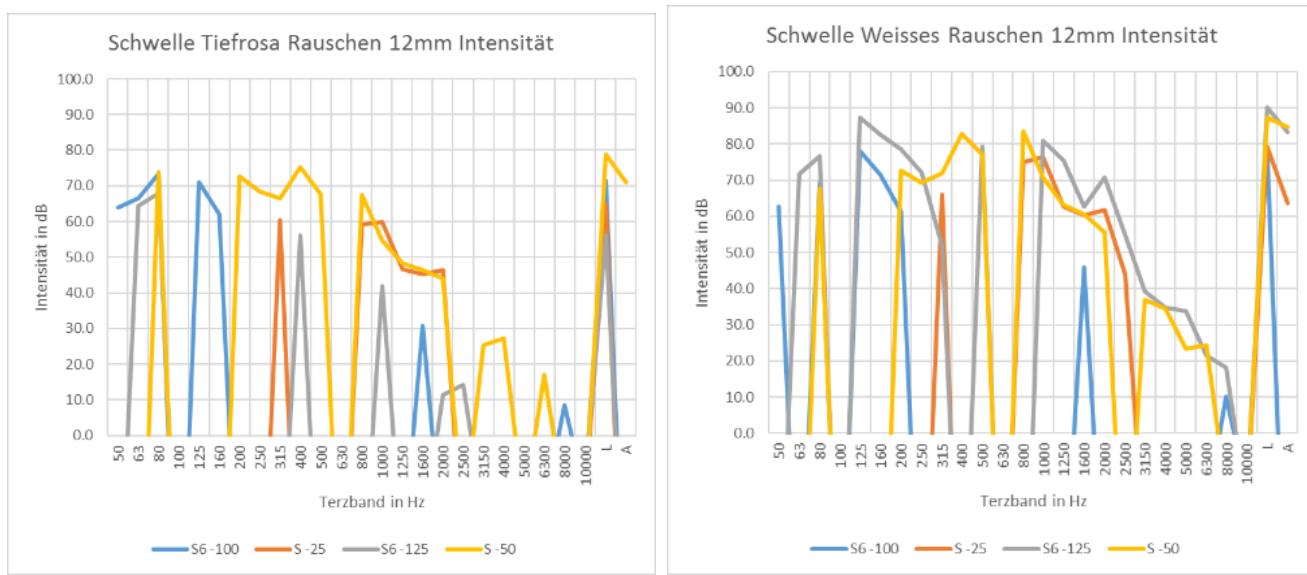


Abbildung 11-20: Schallintensität der Schwelle bei unterschiedlicher Anregung mit 12mm Distanzstück gemessen: 125 Hz bis 10000 Hz

Intensitätsmessungen an der Schiene

Von der angeregten Schiene wurden Schallintensitätsmessungen durchgeführt und die Schallabstrahlung in y-und z-Richtung gemessen.

	Tiefrosa	TiefRosa	Tiefrosa	TiefRosa	Weiss	Weiss	Weiss	Weiss	Weiss	Weiss	Weiss	Weiss	Weiss	Weiss	Weiss	Weiss	Weiss	Weiss	Weiss	Weiss	Weiss	Weiss	Weiss	Weiss	
Freq	R Rechts Y	R Links Y	R Rechts z	R Links z	R Rechts Y	R Links Y	R Links Y	R Rechts z	R Links z	R Rechts y	R Rechts Z	R Rechts Z	bg	I [dB]											
50	64.1	58.1	-62.5	61.0	56.5	57.3	57.2	60.0	-57.4	52.6	61.7	68.7	68.7	68.7	68.7	68.7	68.7	68.7	68.7	68.7	68.7	68.7	68.7	68.7	
63	66.5	-69.7	-75.9	-68.4	58.4	52.7	64.8	67.0	-68.3	-62.2	68.7	-73.7	-73.7	-73.7	-73.7	-73.7	-73.7	-73.7	-73.7	-73.7	-73.7	-73.7	-73.7	-73.7	-73.7
80	64.4	56.4	-70.9	-63.3	57.6	48.1	67.4	61.6	-65.0	-63.7	66.6	-66.9	-66.9	-66.9	-66.9	-66.9	-66.9	-66.9	-66.9	-66.9	-66.9	-66.9	-66.9	-66.9	-66.9
100	-66.1	-66.9	63.2	-73.9	-61.6	57.9	69.1	75.9	63.4	-70.3	73.4	-75.5	-75.5	-75.5	-75.5	-75.5	-75.5	-75.5	-75.5	-75.5	-75.5	-75.5	-75.5	-75.5	-75.5
125	-74.1	71.9	-78.9	80.0	-70.8	66.5	-74.7	-75.8	-76.4	77.7	77.9	86.8	86.8	86.8	86.8	86.8	86.8	86.8	86.8	86.8	86.8	86.8	86.8	86.8	86.8
160	69.9	72.6	-70.7	74.1	66.8	70.5	74.6	-69.0	-68.5	72.5	70.3	78.4	78.4	78.4	78.4	78.4	78.4	78.4	78.4	78.4	78.4	78.4	78.4	78.4	78.4
200	-67.1	68.4	61.3	-58.7	-67.9	69.5	-72.3	-74.5	62.4	-60.8	73.9	71.7	71.7	71.7	71.7	71.7	71.7	71.7	71.7	71.7	71.7	71.7	71.7	71.7	71.7
250	-54.2	-67.3	64.0	-66.2	52.4	66.7	-70.4	70.2	66.0	-68.8	70.8	-67.1	-67.1	-67.1	-67.1	-67.1	-67.1	-67.1	-67.1	-67.1	-67.1	-67.1	-67.1	-67.1	-67.1
315	57.6	54.4	60.6	54.6	59.3	64.4	-69.4	72.2	63.2	59.7	78.1	-65.1	-65.1	-65.1	-65.1	-65.1	-65.1	-65.1	-65.1	-65.1	-65.1	-65.1	-65.1	-65.1	-65.1
400	63.6	74.2	65.0	59.5	71.1	81.9	74.3	78.9	72.7	67.1	89.1	74.6	74.6	74.6	74.6	74.6	74.6	74.6	74.6	74.6	74.6	74.6	74.6	74.6	74.6
500	63.6	76.8	64.3	65.9	72.1	85.5	80.4	75.5	73.6	74.6	93.0	75.8	75.8	75.8	75.8	75.8	75.8	75.8	75.8	75.8	75.8	75.8	75.8	75.8	75.8
630	52.9	68.3	54.9	56.2	66.2	80.4	72.1	71.6	67.2	67.8	88.5	63.9	63.9	63.9	63.9	63.9	63.9	63.9	63.9	63.9	63.9	63.9	63.9	63.9	63.9
800	53.7	68.2	53.7	55.2	69.1	83.8	-77.1	77.4	69.8	70.7	92.9	76.3	76.3	76.3	76.3	76.3	76.3	76.3	76.3	76.3	76.3	76.3	76.3	76.3	76.3
1000	50.6	69.0	50.0	50.2	66.9	85.4	69.4	69.3	66.2	66.5	90.5	68.3	68.3	68.3	68.3	68.3	68.3	68.3	68.3	68.3	68.3	68.3	68.3	68.3	68.3
1250	-29.2	60.8	41.6	39.0	-42.1	76.5	-44.9	63.8	57.6	54.7	84.1	61.3	61.3	61.3	61.3	61.3	61.3	61.3	61.3	61.3	61.3	61.3	61.3	61.3	61.3
1600	27.5	51.2	38.0	47.9	44.5	64.8	-47.9	57.2	52.4	61.5	71.3	67.3	67.3	67.3	67.3	67.3	67.3	67.3	67.3	67.3	67.3	67.3	67.3	67.3	67.3
2000	21.9	46.1	-33.9	50.8	28.9	62.7	-48.2	-48.1	-46.5	65.0	72.8	69.1	69.1	69.1	69.1	69.1	69.1	69.1	69.1	69.1	69.1	69.1	69.1	69.1	69.1
2500	-18.3	24.3	-27.0	28.6	-31.4	53.2	35.8	49.7	40.5	48.6	60.8	57.0	57.0	57.0	57.0	57.0	57.0	57.0	57.0	57.0	57.0	57.0	57.0	57.0	57.0
3150	13.3	17.5	-26.2	21.0	18.0	48.2	34.6	32.8	25.5	33.6	40.0	39.0	39.0	39.0	39.0	39.0	39.0	39.0	39.0	39.0	39.0	39.0	39.0	39.0	39.0
4000	-16.6	-18.8	-23.5	14.5	-20.3	45.6	-27.1	-31.1	-20.3	27.6	36.7	32.4	32.4	32.4	32.4	32.4	32.4	32.4	32.4	32.4	32.4	32.4	32.4	32.4	32.4
5000	-18.6	-17.8	-21.3	-16.6	-18.7	43.0	-17.1	-30.3	-21.7	20.0	29.9	-10.8	-10.8	-10.8	-10.8	-10.8	-10.8	-10.8	-10.8	-10.8	-10.8	-10.8	-10.8	-10.8	-10.8
6300	-13.6	-14.1	-15.8	-13.9	-8.4	31.5	-23.6	-26.9	-11.0	15.0	33.0	-20.1	-20.1	-20.1	-20.1	-20.1	-20.1	-20.1	-20.1	-20.1	-20.1	-20.1	-20.1	-20.1	-20.1
8000	-14.5	-14.0	14.5	15.8	-14.6	24.2	-24.6	-25.8	18.3	19.5	22.3	-18.1	-18.1	-18.1	-18.1	-18.1	-18.1	-18.1	-18.1	-18.1	-18.1	-18.1	-18.1	-18.1	-18.1
10000	-15.2	-14.6	-14.9	-14.0	-15.1	13.3	-26.3	-26.2	-14.6	-13.7	24.3	-25.3	-25.3	-25.3	-25.3	-25.3	-25.3	-25.3	-25.3	-25.3	-25.3	-25.3	-25.3	-25.3	-25.3
L	71.9	81.4	71.3	81.2	77.2	91.1	82.9	84.1	78.5	81.4	98.5	88.4	88.4	88.4	88.4	88.4	88.4	88.4	88.4	88.4	88.4	88.4	88.4	88.4	88.4
A	62.5	77.1	60.0	67.6	74.2	89.6	75.2	80.5	75.2	76.1	96.8	80.2	80.2	80.2	80.2	80.2	80.2	80.2	80.2	80.2	80.2	80.2	80.2	80.2	80.2

Abbildung 11-21: Schallintensitäten B70-Betonschwelle bei Anregung mit unterschiedlichem Rauschen

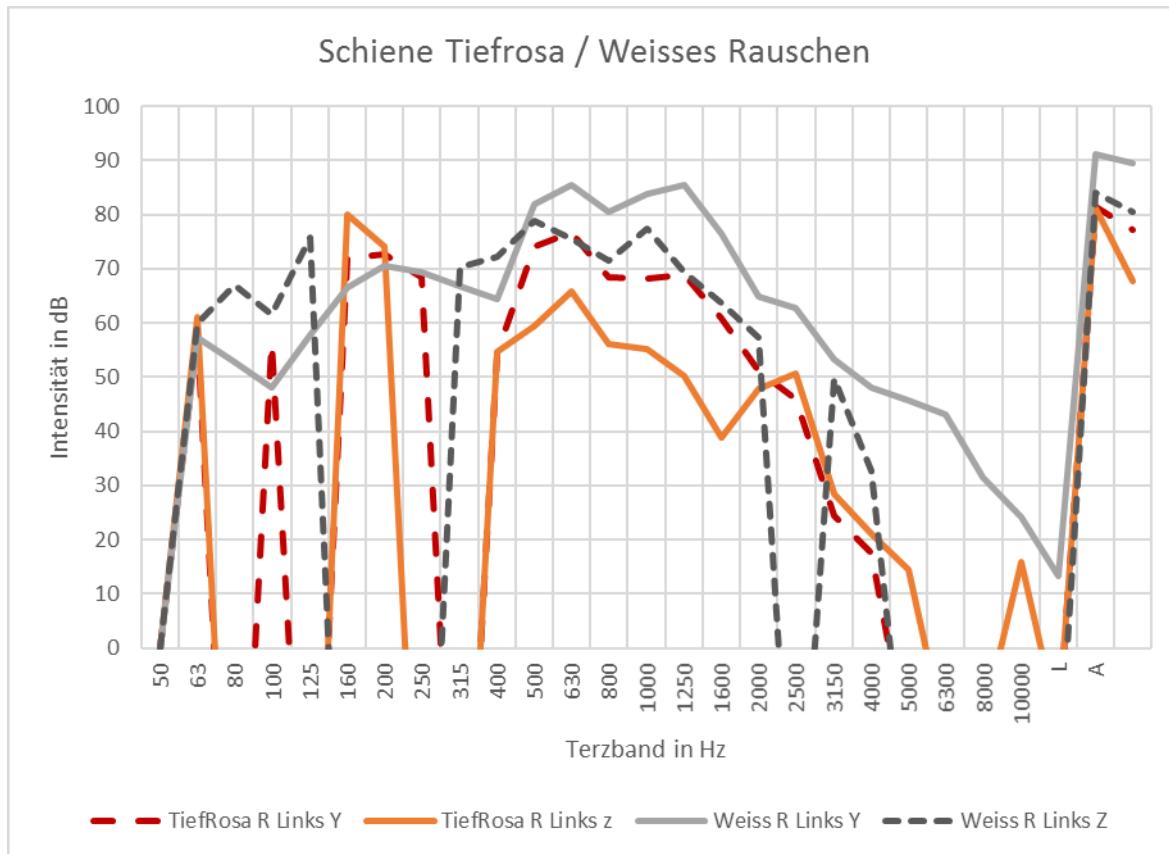
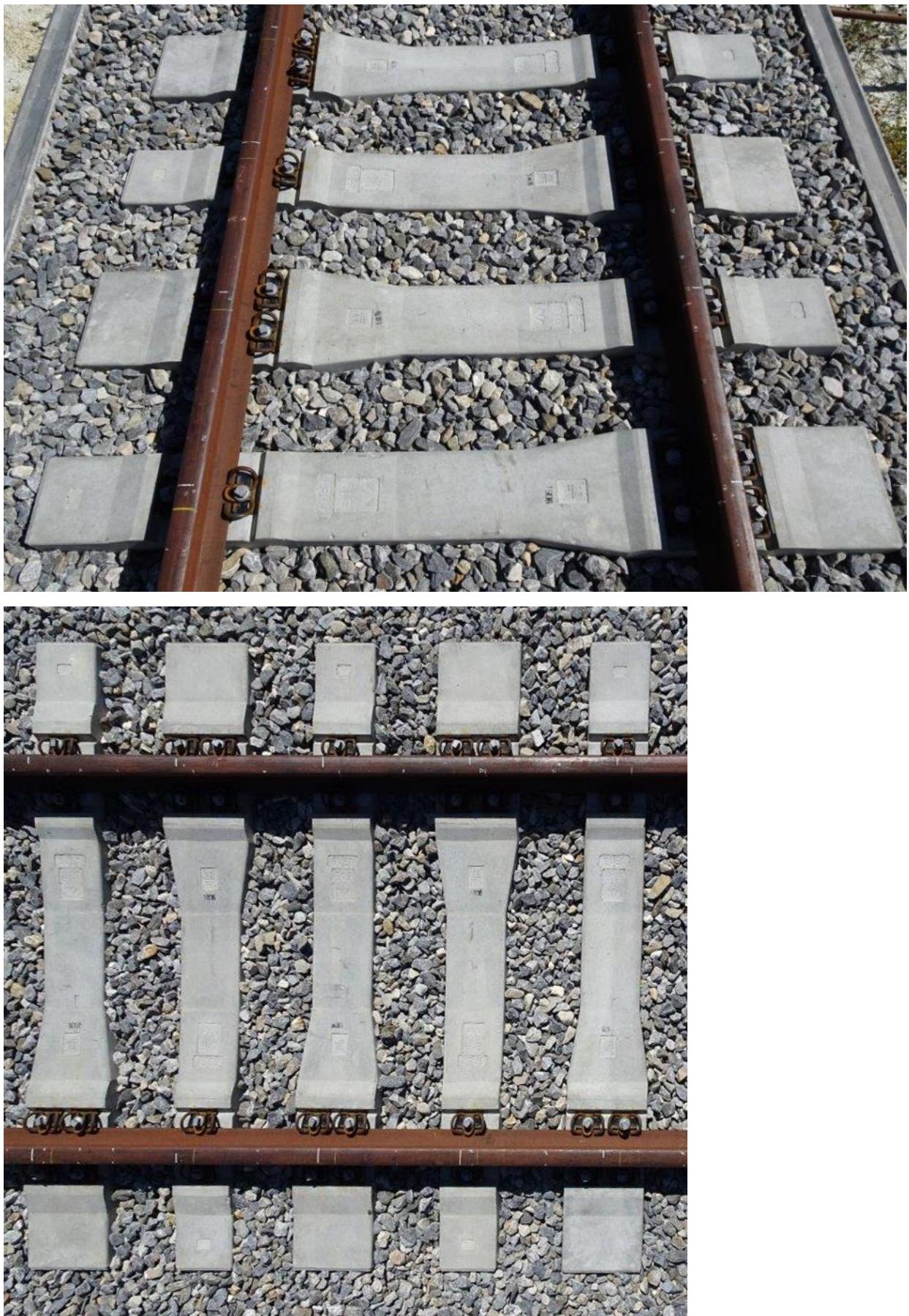


Abbildung 11-22: Schallintensitäten B70-Betonschwelle bei Anregung mit unterschiedlichem Rauschen

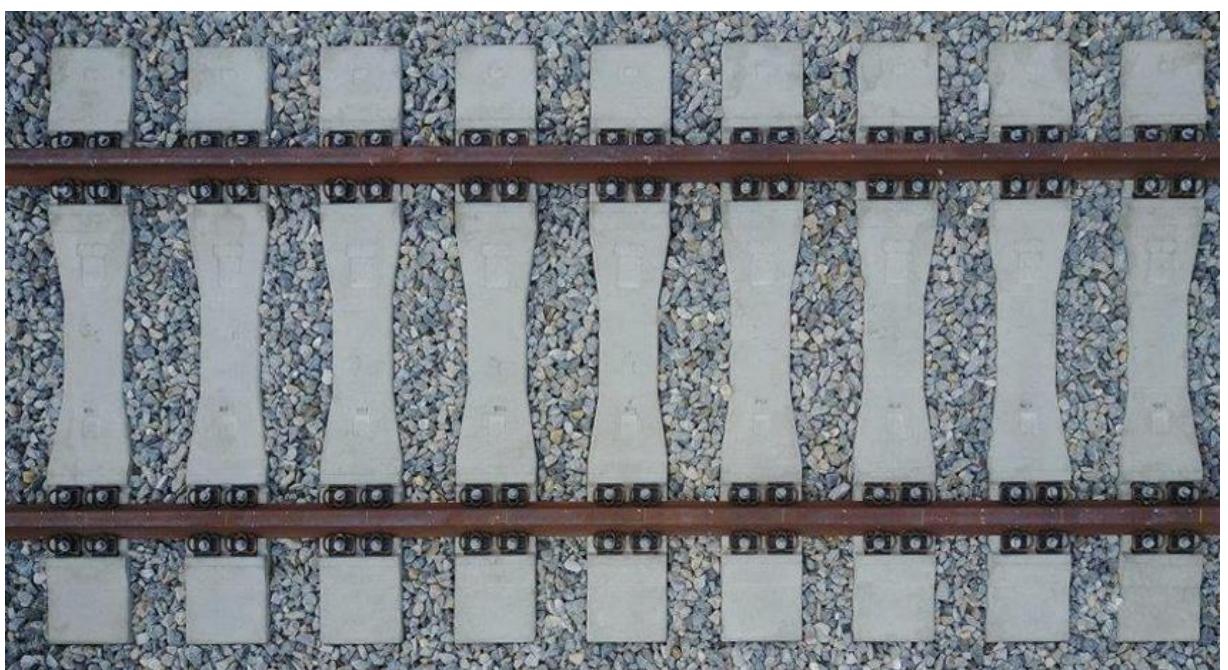
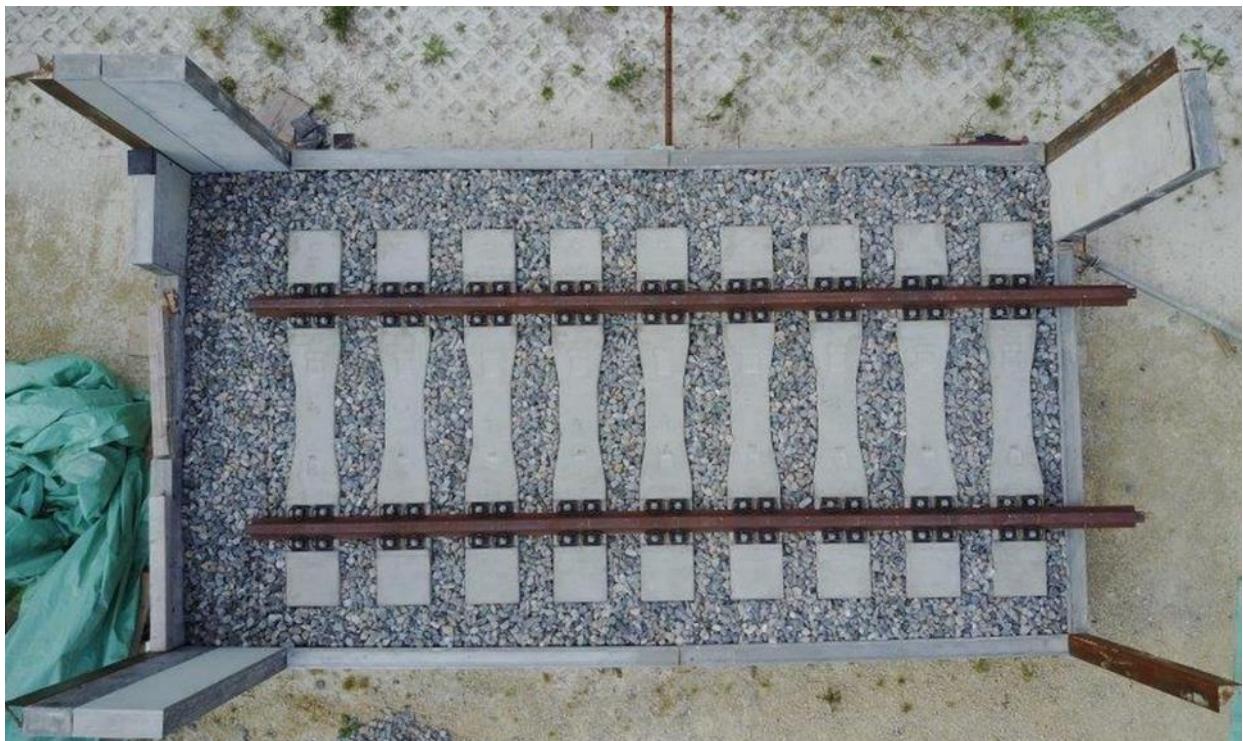
C.2 Testgleis mit B91Schwellen



C.3 Testgleis mit Hammerhead Schwellen



C.4 Testgleis mit Rail-Bone-Schwellen



D TDR-Messungen an Testgleisen

D.1 Testgleis mit B91-Schwellen

2	3	4	5	6	7	25	26	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	
Date	time	File	Zw	R	Ex	F	Tips	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	
							KN																			
01.11.2018	16:07:02	Trace_000130	B55	Z	A	1.4	6	3.8	3.5	4.5	5.9	7.4	8.0	7.5	6.7	4.3	3.5	1.0	2.7	2.1	1.2	1.1	1.4	1.3	-0.4	
01.11.2018	16:14:22	Trace_000154	B55	Z	B	1.7	7	4.9	4.9	5.3	7.4	7.7	7.5	7.9	6.9	4.6	3.7	2.4	3.8	2.0	1.1	1.4	2.0	2.6	0.9	
01.11.2018	15:38:33	Trace_000978	B60	Z	A	1.4	8	4.4	3.2	3.9	5.1	6.9	7.2	7.6	6.2	4.4	3.6	1.5	2.8	1.7	1.1	1.0	1.4	1.0	-0.2	
01.11.2018	15:51:33	Trace_000105	B60	Z	A	1.8	8	4.3	3.2	3.7	4.5	6.5	7.0	7.3	6.3	4.6	4.1	1.7	2.9	1.7	1.0	0.9	1.5	1.2	-0.2	
01.11.2018	15:48:00	Trace_000101	B60	Z	B	1.9	10	6.4	4.5	5.2	7.7	8.0	8.0	7.6	6.7	4.6	3.7	2.7	4.4	1.7	1.1	1.1	2.2	2.7	0.8	
01.11.2018	15:50:42	Trace_000102	B60	Z	B	1.9	10	5.9	4.1	5.0	7.5	7.7	7.6	7.5	6.5	4.3	3.3	2.5	4.2	1.2	0.8	1.1	2.1	2.7	1.0	
01.11.2018	13:54	Trace_000912	hart	Z	A	2.2	6	3.0	3.3	3.5	3.5	3.1	3.8	5.0	5.6	5.7	5.4	3.8	4.1	3.7	2.3	0.9	1.5	0.8	-0.7	
01.11.2018	14:29	Trace_000954	hart	Z	B	1.1	9	4.5	3.7	4.6	6.3	6.2	5.9	5.4	5.0	5.0	5.6	5.3	6.2	5.2	1.9	1.3	2.3	1.4	1.8	
01.11.2018	17:09:50	Trace_000191	WL	Z	A	2.5	10	6.3	5.7	5.9	5.8	7.1	7.4	5.1	3.1	2.3	1.2	0.9	0.6	0.4	0.0	0.1	-0.2	0.3	0.1	
01.11.2018	17:15:53	Trace_000214	WL	Z	B	1.5	11	3.1	3.3	6.0	7.2	5.4	5.0	3.5	1.3	0.7	0.3	1.0	-0.1	0.0	0.0	0.4	1.5	0.7		
01.11.2018	17:38:33	Trace_000239	WR	Z	A	1.5	10	3.0	3.3	5.1	6.6	7.5	6.9	4.0	1.9	1.0	0.2	-0.3	0.8	0.1	0.0	0.1	-0.4	-1.3	0.3	
01.11.2018	17:45:46	Trace_000262	WR	Z	B	1.9	10	3.0	3.9	7.0	6.6	6.0	6.1	3.5	1.7	1.0	0.5	0.9	0.3	0.4	0.3	0.7	1.6	4.0	0.1	
24.06.2019	16:43:00	Trace_000032	B100	z	A	1.6	13	4.3	5.5	6.0	5.8	3.6	1.5	0.5	0.1	0.2	0.2	0.5	-0.1	0.1	0.3	0.5	0.6	1.2	1.2	
24.06.2019	16:53:05	Trace_000037	B100	z	A	1.6	9	4.3	5.8	5.9	5.3	3.3	1.7	0.5	0.1	0.3	0.3	0.6	0.1	0.2	0.3	0.2	0.4	1.5	1.4	
24.06.2019	17:20:03	Trace_000056	B100	z	A	1.1	13	4.8	6.3	6.1	5.9	4.3	1.8	0.8	0.4	0.4	0.3	0.6	0.1	0.2	0.4	0.9	1.4	1.2	0.7	
24.06.2019	16:42:27	Trace_000031	B100	z	B	1.8	13	5.4	5.7	5.1	6.2	5.4	2.9	1.7	1.1	0.9	0.5	0.2	0.2	0.0	-0.3	-0.2	0.5	1.7	0.1	
24.06.2019	16:53:30	Trace_000038	B100	z	B	1.4	13	4.7	5.4	5.1	6.5	5.1	2.2	1.0	0.5	0.4	0.1	-0.2	0.2	-0.1	-0.3	0.2	0.6	0.7	-0.2	
24.06.2019	17:20:26	Trace_000057	B100	z	B	1.0	13	5.7	5.7	5.8	6.4	5.2	2.2	1.0	0.5	0.4	0.2	-0.2	0.4	0.3	0.5	0.9	0.7	0.5	-0.2	
24.06.2019	17:26:11	Trace_000059	B100	z	A	1.3	13	3.8	5.9	6.1	6.0	4.4	1.9	0.9	0.3	0.3	0.6	-0.1	0.0	0.2	0.4	0.7	2.1	1.2		
24.06.2019	17:25:26	Trace_000058	B100	z	B	1.8	13	3.5	4.9	4.3	5.6	6.6	3.2	1.8	1.1	0.8	0.4	0.0	0.3	0.0	-0.2	0.0	0.5	1.7	-0.1	
24.06.2019	17:02:17	Trace_000040	B200	z	A	1.5	13	2.1	2.6	4.2	4.1	3.2	2.8	2.8	2.1	0.9	0.4	0.5	0.2	-0.1	-0.2	0.3	0.6	1.4	1.9	
24.06.2019	17:02:37	Trace_000041	B200	z	A	1.2	2	1.6	2.1	3.8	3.5	2.8	2.1	2.8	2.5	1.0	0.4	0.5	0.2	-0.1	-0.2	0.3	0.5	1.4	1.9	
24.06.2019	17:10:21	Trace_000047	B200	z	A	1.2	13	4.2	4.4	6.2	6.6	6.1	5.3	3.9	2.0	1.1	0.6	0.8	0.6	0.3	0.2	0.4	0.5	1.0	1.1	
24.06.2019	17:14:16	Trace_000050	B200	z	A	1.0	13	4.6	4.9	7.2	7.6	6.9	5.9	3.9	2.0	1.3	0.8	0.8	0.7	0.4	0.5	0.9	1.0	1.0	0.9	
24.06.2019	17:01:44	Trace_000039	B200	z	B	1.4	13	3.8	4.2	5.5	6.1	6.8	6.1	4.6	2.8	1.6	0.8	0.1	0.9	0.5	0.0	0.1	0.1	-0.4	-0.5	
24.06.2019	17:10:48	Trace_000048	B200	z	B	1.1	13	4.2	4.6	5.5	6.2	6.6	6.0	4.5	2.5	1.3	0.6	-0.1	0.9	0.4	0.1	0.2	0.4	1.1	0.1	
24.06.2019	17:13:46	Trace_000049	B200	z	B	0.8	13	4.9	5.0	6.5	7.1	8.5	6.6	4.6	2.6	1.4	0.6	0.1	0.9	0.5	0.3	0.1	0.4	0.2	0.3	
24.06.2019	15:02:29	Trace_000011	h150	z	A	1.3	13	3.3	4.5	4.3	6.1	6.0	4.8	5.3	4.4	4.5	3.6	3.5	5.0	0.9	0.5	0.9	1.2	0.2	1.2	
24.06.2019	15:00:22	Trace_000010	h150	z	B	1.3	13	3.6	3.8	3.5	4.4	4.9	5.7	6.6	5.4	5.2	4.1	1.6	2.8	1.2	0.4	0.0	0.1	0.7	0.1	
24.06.2019	15:14:48	Trace_000016	h175	z	A	1.6	7	3.1	4.6	4.6	6.2	6.2	4.9	5.2	4.5	4.8	4.1	4.0	5.6	1.6	0.5	1.0	1.5	1.7	1.3	
24.06.2019	15:15:14	Trace_000017	h175	z	B	1.4	13	3.1	3.3	3.3	3.8	4.6	5.7	6.6	6.2	5.4	4.2	1.6	1.3	0.7	0.7	0.1	-0.2	-0.7	0.2	
24.06.2019	15:21:41	Trace_000019	h200	z	A	1.6	6	3.3	4.0	4.6	6.5	6.3	5.0	5.3	4.6	4.8	4.1	4.1	5.8	2.3	0.5	1.0	1.7	2.4	1.3	
24.06.2019	15:21:18	Trace_000018	h200	z	B	1.9	13	2.8	3.0	3.1	3.7	4.2	5.3	6.5	6.2	5.7	4.4	1.9	2.3	0.8	0.7	0.2	0.0	-0.5	0.2	
24.06.2019	15:29:05	Trace_000024	h225	z	A	1.7	13	3.2	4.2	4.5	6.3	6.4	5.4	5.5	4.7	4.7	3.6	3.9	4.9	1.1	1.1	1.1	1.5	1.8	1.8	
24.06.2019	15:29:31	Trace_000025	h225	z	B	1.7	13	4.4	4.3	4.3	5.3	5.6	6.5	6.3	6.9	5.9	4.5	2.3	3.9	1.8	0.4	0.0	0.2	0.1	-0.2	
24.06.2019	12:20:13	Trace_000006	h250	z	A	1.3	10	3.5	4.0	4.3	5.6	5.7	5.7	4.3	4.7	4.5	4.8	4.4	6.3	3.1	1.1	1.0	1.7	1.5	2.0	
24.06.2019	12:18:11	Trace_000004	h250	z	B	1.6	7	3.0	3.2	3.6	5.1	5.2	5.8	5.1	6.2	5.6	5.2	2.4	2.7	4.3	1.4	0.7	0.9	0.5	-1.0	
24.06.2019	15:32:23	Trace_000027	h250r	z	A	1.8	3	0.5	1.0	0.9	2.0	3.1	2.2	1.6	1.3	1.0	2.9	4.0	1.8	0.8	0.6	0.5	1.0	1.3		
24.06.2019	15:31:54	Trace_000026	h250r	z	B	1.9	13	3.6	3.3	4.3	6.0	5.1	5.9	5.8	6.4	5.8	5.0	2.9	4.2	2.2	1.6	0.7	2.1	0.4	0.0	

2	3	4	5	6	7	25	26	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
Date	time	File	Zw	R	Ex	F	Tips	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
						kN		dB/m																	
01.11.2018	16:15:18	Trace_000155	B55	Y	A	1.1	10	4.9	3.5	2.4	0.7	0.8	0.5	0.4	-0.2	0.2	0.0	-0.1	-0.1	0.4	0.3	0.6	2.2	0.6	0.5
01.11.2018	16:20:35	Trace_000178	B55	Y	B	1.3	10	4.2	2.5	1.7	2.3	1.0	0.5	0.4	0.2	0.1	0.2	0.1	0.0	0.4	0.6	1.1	3.3	2.1	0.8
01.11.2018	15:55:26	Trace_000106	B60	Y	A	0.8	10	4.8	6.0	4.5	1.9	0.5	0.8	0.4	0.0	0.2	0.0	-0.1	-0.1	0.6	0.2	0.7	2.5	0.9	0.6
01.11.2018	16:01:46	Trace_000129	B60	Y	B	1.2	11	3.5	4.9	2.9	2.3	1.5	0.5	0.5	0.6	0.1	0.2	0.1	0.1	0.5	0.6	1.3	3.3	1.8	0.3
01.11.2018	14:41:19	Trace_000977	hart	Y	A	0.7	10	3.0	6.0	7.0	7.8	7.2	3.7	0.4	0.3	0.8	0.6	-0.1	-0.1	0.5	0.3	1.2	1.1	1.9	1.1
01.11.2018	14:30	Trace_000955	hart	Y	B	0.3	5	3.4	4.9	4.9	5.0	4.9	3.9	1.5	1.1	0.0	-0.3	0.2	0.1	0.5	0.9	2.0	2.0	2.7	0.1
01.11.2018	17:23:39	Trace_000215	WL	Y	A	0.7	10	4.0	5.3	3.5	1.1	0.5	0.1	-0.2	-0.5	-0.1	-0.2	-0.2	-0.2	0.0	0.0	0.2	1.1	-0.1	0.5
01.11.2018	17:30:27	Trace_000238	WL	Y	B	1.3	10	2.6	4.3	1.9	1.6	0.9	0.1	0.2	0.2	0.1	0.3	0.2	0.2	0.3	0.2	0.3	2.0	1.8	0.5
01.11.2018	17:47:44	Trace_000263	WR	Y	A	0.9	10	5.1	3.4	2.9	0.1	0.4	0.5	0.1	-0.3	0.0	-0.1	0.0	-0.1	0.1	0.1	0.6	1.9	0.7	0.2
01.11.2018	17:55:32	Trace_000286	WR	Y	B	1.3	10	3.9	2.2	1.5	1.7	0.2	0.6	0.1	0.1	0.1	0.2	0.0	0.1	0.2	0.2	0.2	1.6	1.1	0.5
24.06.2019	16:43:55	Trace_000033	B100	y	A	1.4	4	3.6	3.2	2.6	1.6	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.0	0.1	0.1	0.4	0.3	0.8	2.8	1.9	2.0
24.06.2019	16:52:13	Trace_000036	B100	y	A	0.8	8	2.7	2.8	2.6	1.5	0.0	0.0	0.1	0.2	0.1	0.0	0.0	0.1	0.4	0.3	0.8	2.7	1.8	1.8
24.06.2019	17:19:14	Trace_000055	B100	Y	A	0.7	13	4.7	3.0	2.5	1.6	0.0	0.0	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.4	0.5	0.7	2.8	2.5	2.0
24.06.2019	16:45:53	Trace_000034	B100	y	B	1.7	6	5.2	5.2	1.5	0.7	0.4	0.0	-0.2	-0.3	0.0	0.0	0.0	-0.1	0.2	0.3	0.8	2.2	1.3	-0.1
24.06.2019	16:51:42	Trace_000035	B100	y	B	0.8	13	5.3	4.9	1.7	0.7	0.4	0.1	-0.1	-0.3	0.0	0.0	0.0	-0.1	0.1	0.2	0.8	2.4	1.4	0.3
24.06.2019	17:18:43	Trace_000054	B100	Y	B	0.5	13	6.0	4.5	1.9	0.8	0.5	0.2	-0.1	-0.3	0.1	0.1	0.0	-0.1	0.3	0.3	1.3	1.7	0.4	-0.4
24.06.2019	17:26:57	Trace_000060	B100	Y	A	0.7	6	2.7	3.3	2.6	1.6	0.1	0.0	0.1	0.2	0.1	0.0	0.0	0.1	0.4	0.3	0.7	2.8	2.3	2.0
24.06.2019	17:27:24	Trace_000061	B100	Y	B	0.8	13	5.0	5.6	2.1	0.5	0.6	0.2	-0.1	-0.3	0.0	0.0	0.0	-0.1	0.1	0.0	0.5	2.0	0.6	-0.6
24.06.2019	17:03:29	Trace_000042	B200	y	A	0.6	9	4.2	2.3	1.8	1.8	0.3	0.4	0.0	-0.1	0.0	-0.1	-0.2	-0.3	0.0	-0.1	0.4	2.5	1.5	1.3
24.06.2019	17:09:29	Trace_000046	B200	y	A	0.6	13	4.3	2.3	1.6	1.8	0.3	0.4	0.0	-0.1	0.1	0.0	-0.1	-0.1	0.2	0.2	0.5	2.4	1.4	1.1
24.06.2019	17:15:02	Trace_000051	B200	y	A	1.2	13	5.6	2.1	1.8	1.8	0.3	0.4	0.0	-0.1	0.0	-0.1	-0.1	-0.1	0.2	0.5	1.2	2.4	1.3	1.3
24.06.2019	17:03:49	Trace_000043	B200	y	B	0.7	2	4.8	3.0	1.9	1.4	0.8	0.7	0.2	-0.1	0.1	0.2	0.3	0.2	0.6	0.7	1.2	2.0	0.7	-0.3
24.06.2019	17:04:09	Trace_000044	B200	y	B	0.9	12	5.1	3.1	1.9	1.2	0.7	0.6	0.2	-0.1	0.1	0.2	0.3	0.2	0.6	0.7	1.2	2.0	0.7	-0.2
24.06.2019	17:08:56	Trace_000045	B200	y	B	0.7	13	5.2	3.1	1.8	1.3	0.8	0.7	0.2	-0.1	0.1	0.2	0.3	0.2	0.6	0.6	1.3	2.0	0.7	-0.2
24.06.2019	17:15:22	Trace_000052	B200	y	B	1.0	12	6.6	2.7	1.8	1.4	0.6	0.6	0.2	-0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.6	0.8	1.8	2.3	0.9	0.2
24.06.2019	17:15:42	Trace_000053	B200	y	B	1.2	12	6.6	2.7	1.8	1.5	0.7	0.6	0.3	-0.1	0.0	0.1	0.2	0.1	0.5	0.5	1.5	2.5	1.8	0.6
24.06.2019	15:04:12	Trace_000012	h150	y	A	1.0	13	3.8	5.1	5.3	4.7	3.0	1.2	0.2	1.0	0.0	0.4	0.3	0.3	1.1	1.2	1.2	2.7	2.3	1.3
24.06.2019	15:04:39	Trace_000013	h150	y	B	0.9	13	5.6	6.5	6.7	5.8	1.4	1.2	0.8	-0.3	0.6	0.3	-0.1	-0.2	0.2	-0.1	1.7	2.7	1.8	1.5
24.06.2019	15:13:55	Trace_000015	h175	y	A	1.2	4	3.8	4.9	5.5	5.0	3.0	1.4	0.2	1.0	0.0	0.4	0.3	0.3	0.9	1.5	1.4	2.8	2.5	2.0
24.06.2019	15:13:27	Trace_000014	h175	y	B	1.3	3	5.5	6.3	6.5	6.2	1.6	1.2	0.9	-0.3	0.5	0.4	-0.1	-0.2	0.3	-0.3	1.7	2.6	1.8	1.2
24.06.2019	15:22:39	Trace_000020	h200	y	A	0.7	13	3.6	4.6	5.0	4.8	3.1	1.4	0.2	1.1	0.0	0.4	0.3	0.3	0.8	1.1	1.3	2.6	2.3	1.8
24.06.2019	15:23:03	Trace_000021	h200	y	B	1.1	5	5.5	6.3	6.4	5.8	1.6	1.2	0.8	-0.4	0.5	0.3	-0.2	-0.3	0.3	0.1	1.0	1.6	1.0	0.1
24.06.2019	15:28:24	Trace_000023	h225	y	A	1.0	4	3.7	4.8	5.6	4.8	3.1	1.4	0.3	1.1	0.0	0.3	0.3	0.3	0.9	1.1	1.3	2.4	2.5	1.9
24.06.2019	15:27:56	Trace_000022	h225	y	B	1.1	13	5.3	6.1	6.5	6.2	1.7	1.2	0.8	-0.4	0.5	0.3	-0.2	-0.2	0.4	0.2	1.1	1.7	1.2	0.3
24.06.2019	12:21:36	Trace_000007	h250	y	A	1.0	5	4.6	4.1	5.7	5.2	3.5	3.3	0.2	1.2	-0.1	-0.1	0.2	0.1	0.7	0.9	1.5	2.7	2.7	1.9
24.06.2019	12:22:08	Trace_000008	h250	y	B	0.7	13	4.5	5.4	6.8	6.7	3.9	1.9	0.7	-0.2	0.7	0.5	-0.1	-0.1	0.6	0.3	1.5	2.0	1.7	0.3
24.06.2019	15:33:11	Trace_000028	h250r	y	A	0.8	3	2.4	5.8	6.0	4.7	3.5	0.6	0.4	0.5	-0.1	-0.2	0.1	0.0	0.0	0.8	1.1	2.9	2.4	1.7
24.06.2019	15:33:35	Trace_000029	h250r	y	B	1.0	9	3.7	6.1	5.7	4.8	3.1	0.8	0.3	-0.2	0.8	0.4	0.0	0.1	0.7	0.6	0.8	2.3	1.1	-0.4

D.2 Testgleis mit Hammerhead-Schwellen

Date	time	File	Zw	R	Ex	F	Tips	TDR																		
								100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	
						kN	dB/m																			
01.07.2019	13:33:37	TDR_000003	RbaL	z	A	1.4	9	3.9	4.8	6.0	6.2	6.6	6.8	6.2	5.5	5.5	4.2	5.4	4.5	0.3	0.1	1.0	0.3	1.0	0.9	
01.07.2019	13:33:07	TDR_000002	RbaL	z	B	1.3	10	2.1	3.3	4.2	4.2	5.1	6.3	7.5	6.4	6.4	6.1	3.8	2.6	0.7	1.9	0.6	0.8	0.4	1.0	
01.07.2019	14:00:17	TDR_000014	RbaR	z	A	1.3	7	3.7	5.0	5.5	5.6	6.2	5.9	6.0	5.8	4.9	4.9	4.2	4.6	1.0	0.6	1.5	0.7	1.3	0.9	
01.07.2019	13:59:25	TDR_000012	RbaR	z	B	1.5	8	1.0	2.2	3.3	3.5	5.3	5.6	7.1	7.4	6.1	5.1	3.3	2.7	1.0	1.9	0.9	0.7	0.3	0.4	
08.07.2019	10:38:43	TDR_000043	RbaL	z	A	0.6	8	4.5	4.3	5.2	7.3	7.1	5.8	6.1	4.4	4.2	3.6	5.1	4.8	2.1	1.3	2.3	1.2	1.2	1.4	
08.07.2019	11:11:50	TDR_000067	RbaR	z	A	1.3	11	4.6	4.2	5.8	6.5	6.5	5.5	6.0	4.6	5.8	5.0	6.6	7.3	2.0	0.2	2.2	1.2	1.7	0.7	
08.07.2019	11:13:45	TDR_000069	RbaR	z	A	0.6	11	4.4	4.3	6.0	6.8	6.6	5.8	6.7	5.2	6.2	4.8	6.5	5.7	2.1	0.2	1.8	1.2	1.4	0.6	
08.07.2019	11:15:48	TDR_000071	RbaR	z	A	0.6	12	4.5	4.5	6.2	7.5	6.9	5.7	6.2	4.8	4.7	3.4	5.4	4.8	2.3	0.4	2.1	1.5	0.6	0.6	
08.07.2019	11:11:10	TDR_000066	RbaR	z	B	1.8	11	4.7	3.9	5.1	5.0	5.0	5.4	6.8	7.1	6.6	6.1	5.2	2.9	0.7	2.6	1.9	1.0	0.9	0.9	
08.07.2019	11:13:03	TDR_000068	RbaR	z	B	0.9	13	2.4	2.3	4.8	4.7	5.0	5.5	7.8	6.8	7.4	6.3	3.5	2.2	1.1	2.4	1.8	1.4	0.9	0.8	
08.07.2019	11:14:31	TDR_000070	RbaR	z	B	0.5	11	2.4	2.6	4.7	4.7	5.0	5.4	6.9	6.5	5.3	4.5	2.2	1.1	0.5	2.3	0.8	0.1	0.4	0.9	
08.07.2019	17:57:39	TDR_000141	RbdL	z	A	1.7	11	4.1	2.8	4.5	6.7	6.5	5.9	5.8	6.1	5.7	5.0	6.3	7.0	4.2	2.2	1.1	1.1	3.3	1.5	
08.07.2019	17:58:55	TDR_000143	RbdL	z	A	1.1	11	3.9	3.0	5.0	6.8	6.6	5.9	5.6	5.4	3.9	3.1	5.6	4.5	2.7	3.2	2.5	1.6	2.4	1.7	
08.07.2019	17:59:58	TDR_000145	RbdL	z	A	2.3	11	4.3	2.7	4.1	6.3	6.5	6.1	5.9	5.9	5.2	4.6	6.4	7.1	3.8	2.3	1.0	0.8	3.9	1.8	
08.07.2019	17:56:53	TDR_000140	RbdL	z	B	1.8	13	2.0	1.1	2.5	4.8	3.8	4.3	5.2	7.0	8.1	7.2	4.8	4.4	2.3	-0.1	1.1	1.5	0.4	1.4	
08.07.2019	17:58:23	TDR_000142	RbdL	z	B	1.3	11	1.7	1.2	2.6	4.8	3.8	4.2	5.3	6.9	7.1	5.4	4.8	3.4	1.8	-0.4	0.6	1.1	-0.6	1.5	
08.07.2019	17:59:32	TDR_000144	RbdL	z	B	2.1	12	4.6	3.4	4.5	6.1	5.0	4.3	4.5	6.1	7.6	6.9	5.9	5.5	3.1	-0.3	1.0	1.6	1.4	1.5	
08.07.2019	17:41:17	TDR_000123	RbdR	z	A	2.3	13	4.2	2.9	4.4	6.2	6.9	5.9	5.5	5.2	5.6	4.9	6.4	7.4	3.7	1.0	1.8	2.1	3.0	2.0	
08.07.2019	17:42:18	TDR_000125	RbdR	z	A	1.1	13	3.7	3.4	4.7	7.6	7.5	5.8	5.3	4.4	4.2	3.6	5.8	4.6	3.3	1.7	2.2	2.4	3.0	1.6	
08.07.2019	17:43:12	TDR_000127	RbdR	z	A	1.2	13	3.8	2.9	4.6	6.9	7.4	6.0	5.7	5.5	5.8	5.2	6.7	7.1	3.7	1.2	2.0	2.2	3.2	1.7	
08.07.2019	17:40:55	TDR_000122	RbdR	z	B	2.0	13	3.7	2.4	3.5	5.2	4.7	4.4	4.8	7.6	7.4	7.0	5.6	5.1	3.5	1.6	1.8	1.9	1.0	1.5	
08.07.2019	17:41:56	TDR_000124	RbdR	z	B	1.3	13	1.3	0.9	2.7	4.7	4.8	4.7	5.7	7.5	7.3	6.1	5.1	3.2	2.8	1.0	1.3	1.2	-0.5	1.2	
08.07.2019	17:42:51	TDR_000126	RbdR	z	B	1.1	13	1.4	0.8	2.5	4.4	4.5	4.9	5.7	7.7	8.3	7.8	5.4	5.8	3.6	1.7	2.0	1.6	0.4	1.2	
08.07.2019	17:03:44	TDR_000095	RbxL	z	A	2.1	13	4.9	3.7	5.2	6.0	6.8	6.3	5.6	5.9	3.1	3.4	2.8	2.6	1.8	1.0	0.1	0.5	2.7	2.0	
08.07.2019	17:06:20	TDR_000099	RbxL	z	A	1.0	13	4.6	3.9	5.7	6.8	6.3	6.2	5.6	5.8	3.8	3.2	3.5	2.9	2.7	2.4	1.4	0.3	0.0	0.2	1.2
08.07.2019	17:07:28	TDR_000101	RbxL	z	A	1.5	13	4.6	3.7	5.4	6.6	6.8	7.2	5.9	4.9	3.3	3.6	2.8	2.7	1.5	1.1	0.4	0.2	0.8	1.3	
08.07.2019	17:03:16	TDR_000094	RbxL	z	B	2.2	13	3.7	2.8	4.4	4.0	3.2	3.8	4.2	5.4	6.1	4.9	2.5	1.5	0.4	0.0	0.7	1.4	0.4	0.6	
08.07.2019	17:05:56	TDR_000098	RbxL	z	B	0.9	13	2.1	1.7	3.3	3.8	4.4	6.8	5.6	6.7	5.7	4.3	2.8	0.8	0.4	0.6	2.3	2.4	1.4	0.9	
08.07.2019	17:06:58	TDR_000100	RbxL	z	B	1.5	13	2.1	1.6	3.2	3.9	4.3	6.9	5.4	5.7	6.2	4.6	2.9	1.4	0.8	-0.2	0.8	1.6	1.4	0.6	
08.07.2019	17:20:27	TDR_000117	RbxR	z	A	0.8	13	3.8	3.0	5.3	7.0	7.0	6.8	6.9	5.1	4.6	4.7	4.5	3.8	1.2	1.1	0.6	1.5	2.1	2.0	
08.07.2019	17:21:29	TDR_000119	RbxR	z	A	0.8	13	3.5	3.4	5.7	7.2	7.2	6.7	6.6	3.6	4.0	4.0	4.4	3.5	1.5	1.2	1.0	1.7	1.7	1.6	
08.07.2019	17:22:33	TDR_000121	RbxR	z	A	1.8	13	3.9	2.9	5.2	6.9	6.7	6.6	6.5	4.7	4.4	4.4	4.4	3.8	1.2	0.8	0.5	1.3	2.7	2.1	
08.07.2019	17:20:00	TDR_000116	RbxR	z	B	0.9	13	1.3	0.7	2.8	4.3	4.4	6.2	7.6	6.9	5.2	3.9	2.9	1.9	0.5	1.3	-0.2	-0.5	1.0		
08.07.2019	17:21:02	TDR_000118	RbxR	z	B	0.9	13	1.2	0.8	3.0	4.9	4.4	6.3	7.8	7.3	6.1	4.5	3.8	2.9	2.2	-0.1	1.4	0.4	-0.3	0.9	
08.07.2019	17:22:10	TDR_000120	RbxR	z	B	2.7	13	4.4	3.5	5.9	6.1	5.6	5.3	6.3	7.8	6.9	5.7	4.5	3.4	1.8	0.4	0.8	0.8	0.8	1.2	

D.3 Testgleis mit Rail-BoneSchwellen

E Begleitende Untersuchungen

E.1 Morphologischer Kasten

Komponenten	Parameter	Nr.	Veränderung	Vorteile / Nachteile	Lärm	LCC	Umsetzung Vigier	Umsetzung Infra	Klar abgegrenzt / Rükken	Kosten Nutzen	Bemerkungen
Schwelle	Masse der Schwelle	1	Schwelle schwerer mit grosserem Volumen	+ Mehr Masse unter der Schiene die angeregt werden muss + Höhere Dämpfung der Schiene + Weniger Bewegung in der Schwelle -> LCC - Mehr Volumen (Beton) - Logistik - höhere Schwelle -> mehr Schotterhöhe	3	3	2	1	3	3	Betrachtet als Feder-Massen system. 5 cm höhere Schwelle ca 1/3 mehr Masse.
		2	Schwelle schwerer ohne Verjüngungen	+ Mehr Masse unter der Schiene die angeregt werden muss + Höhere Dämpfung der Schiene + Weniger Bewegung in der Schwelle -> LCC - Mehr Volumen (Beton) - Logistik - tieferen Querverschiebungswiderstand	2	3	3	1	3	2	
		3	Schwelle schwerer kleineren Anzug	+ Mehr Masse unter der Schiene die angeregt werden muss + Höhere Dämpfung der Schiene + Weniger Bewegung in der Schwelle -> LCC - Mehr Volumen (Beton) - Logistik	2	3	2	2	2	2	
	Gewicht Schwelle (Dichte)	4	Metallkern	+ Mehr Masse unter der Schiene die angeregt werden muss + Höhere Dämpfung der Schiene + Weniger Bewegung in der Schwelle -> LCC - Mehr teures Material - Logistik	3	3	1	2	3	1	Das kg Metall ist viel teurer als das kg Beton.
		5	Schwerbeton (schwerere Gesteinskörnungen, Schwermetallschlacken)	+ Mehr Masse unter der Schiene die angeregt werden muss + Höhere Dämpfung der Schiene + Weniger Bewegung in der Schwelle -> LCC - Mehr teures Material ?? - Herstellverfahren??	2	2	1	2	2	1	
	Schwelle	6	breiter auf Befestigungsseite - Mit zusätzlicher Befestigung	+ Die Lagerpunkte können geändert werden - kurze schlingende Schienelänge - Mehr Beton - Braucht mehrere Befestigungen - Montage- und Stopfprozess anders - Logistik	3	3	2	1	2	3	ähnlich Heavy Duty Sleeper
		7	länger	+ Höhere Masse + Aufstandsfläche grösser - durch Logistik nicht handhabbar (keinen Platz quer auf Wagen)	3	3	2	0	1	0	Durch Logistik zu verwerfen.
		8	asymmetrische Form (S-Schwelle - Käfig, Diagonale der Schwelle)	+ Feste Kastenbildung + Formstabil - Logistik und Einbau - Kurvenradius	3	2	1	1	1	2	Y-Schwelle
		9	asymmetrische Form (Querverschraubung)	+ Feste Kastenbildung + Formstabil - Logistik und Einbau - Kurvenradius	3	2	2	1	1	2	Schwelle mit Verstrebung
		10	konstanter Querschnitt über Länge	Siehe ersten Punkt xx							
		11	Vertiefungen oben	- Schwelle leichter - Absorption gleich - Form komplizierter	0	1	1	2	2	0	
		12	Vertiefungen unten/seitlich	- Schwelle leichter - Form komplizierter + Reibung zu Schotter höher	0	2	1	2	2	0	

Material	13	Hybridschwelle: 2 versch. Betone unten und oben	- Masse bleibt konstant - keinen Einfluss auf Schwingung	1	1	1	2	2	1		
	14	Hybridschwelle: 2 versch. Betone links und rechts	- Masse bleibt konstant - keinen Einfluss auf Schwingung	1	1	1	2	2	1		
	15	Hybridschwelle: Beton und Holz	- Keine höhere Masse - keine bessere Langlebigkeit - teurer	0	0	1	2	2	1		
	16	Hybridschwelle: Beton und Kunststoff / PET	- Keine höhere Masse - keine bessere Langlebigkeit - teurer	0	0	1	2	2	1		
	17	Stahlummantelung	+ höhere Masse - Teure als Beton - Umwelteinfluss	3	3	1	2	1	1		
	18	Gummiummantelung	- Umwelteinflüsse	2	3	1	1	1	1	www.greenrailgroup.com	
	19	Absorbermaterial auf Oberfläche	+ Weniger Reflexion - Umwelteinflüsse - Recycling	1	2	1	2	2	2		
	20	Schwingungstilger - Auf Schwellen aufgebracht (Masse-Federelement)	+ Kann auf spezifische Schwingungsfrequenz angewendet werden + Nachrüstbar - Effekt fragwürdig - Im Gesamtsystem keine Eigenfrequenz identifizierbar	2	2	2	2	0	1		
	21	Monoblock	Ist aktuelle Schwelle								
	22	Biblock	- Dickes Material für Verbindung der zwei Blöcke - Korrosion	2	1	2	2	2	1		
Oberfläche	23	Trennung der Schwelle in der Mitte (Ähnlich zu Gelenk in der Verjüngung)	+ Eigenfrequenz tiefer - Herstellungsvorgang schwierig - Spannrähte durchgehend, Beton getrennt	3	2	1	2	1	2		
	24	höhere Rauigkeit	- Keinen Einfluss auf Schall	1	1	1	2	2	0		
	25	Oberflächenporen	- Keinen Einfluss auf Schall	1	1	1	2	2	0		
Statik	26	unregelmäßige Oberfläche	- Keinen Einfluss auf Schall	1	1	1	2	2	0		
	27	größere Vorspannung	- Keinen Einfluss auf Schall	1	1	1	2	2	0		
	28	größeres Trägheitsmoment	Veränderbar über Form und Masse, siehe andere Punkte								
Aufsätze	29	starre Elemente auf Oberkante	+ Massenelement auf Oberkante + Verstrebung + Vorgefertigtes Element	3	2	2	1	1	3		
	30	Schallschutzelement auf OK nur über Schwelle	Siehe Oben								
	31	aktives Dämpfungselement	Siehe Oben								
Befestigung	32	Kappen (Querverschiebungswiderstand)	+ Erhöhung der Querverschiebungswiderstand - Kein Einfluss auf Schall - Logistik und Aufwand	1	2	2	1	1	1		
	33	Längere Schrauben	Kein Einfluss	1	1	1	1	2	0		
	34	Elastischere Schrauben	- Entspricht einer reduzierungen der Klemmkraft und somit Erhöhung des Schienenschalls	0	1	1	1	2	0		
	35	Mehrere Schrauben - Alternierend befestigt	+ Braucht keinen anderen Prozess für Gleisbauer - Verbesserung nicht gegeben	2	2	1	2	2	2	Durch alternierende Befestigung wird unterschiedlicher "Schwellenabstand" Simuliert	
	36	Konstante Klemmkraft --> Setzen von Zwischenlage	Einfluss von Schraube, Dübel, Klemmbügel nicht klar	3	3	2	2	1	3	Die Klemmkraft ist über Zeit nicht konstant. --> Einfluss und Massnahmen??	
Dübel	37	Andere Materialpaarung	+ Durch anderes Material kleinere Setzung	2	3	2	2	1	3		
	38	Wandstärke Dübel	+ Durch kleiner Wandstärke mehr Kraftübertragung in Beton	3	3	2	2	1	3		
Drehmoment	39	Höheres Drehmoment	+ Festere Verbindung zwischen Schiene und Schwelle - Höhere Setzung möglich - frühere Erhöhung des Schienenschalls	1	1	2	2	1	0		
	40	Kleineres Drehmoment	- Erhöhung des Schienenschalls	1	1	2	2	1	0		
Beschölung	Material	41	Material mit höherer Dämpfung	+ Schotterschonung (tiefe Dämpfung bei tiefen Frequenzen) + Weniger Schienenschall (hohe Dämpfung bei hohen Frequenzen)	3	1	2	2	1	2	
		42	Dickere Beschölung	+ Schotterschonung - elastischere Lagerung - höherer Schienenschall	0	1	2	2	1	0	
	Lage	43	Nur Teile besohlt	Keinen Einfluss, da sich die Kraft gleichmäßig unter der Schwelle verteilt	0	1	2	2	1	0	
		44	unregelmäßige Lage	Keinen Einfluss, da sich die Kraft gleichmäßig unter der Schwelle verteilt	0	1	2	2	1	0	

	Einschotterung	45 Schwellen tiefer eingeschottert	Keinen Einfluss identifizierbar	1	1	2	2	1	0	
Schwellen Abstand		46 kleiner 60cm	+ unterscheidet sich von üblichen Güterwagen-Achsabstand von 1.8m + Schwellenfachfrequenz wird erhöht - Mehr Schwellen/Material benötigt - Logistik erschwert	2	1	2	1	1	2	
		47 unregelmässig	+ unterscheidet sich von üblichen Güterwagen-Achsabstand von 1.8m - Logistik und Wartung erschwert	2	1	2	1	1	2	Es ist nicht aschätzbar was das im Gesamtsystem bedeuten würde.
Einbau	Schotter	48 grober	- weniger Auflagefläche --> Schnellere Abnutzung - Schlechter verdichtet	1	0	2	1	0	0	
		49 feiner	- Drainage weniger wirksam - tieferer Querverschiebungswiderstand	1	0	2	1	0	0	
		50 Schottergemisch (z.B. Hyprid-Schotter-Gummi oder Schotter-Kunststoff)	- Reduzierung der Reibung im Schotter schlechter für Schall, besser für Verschleiss - Dichte des Schotter tiefer - Stopfen und Warten schwieriger - Umwelt und Entsorgung offen	0	3	2	1	1	1	
Schwellentyp	51 gleiche Typen	Stand wie heute								
	52 abwechslungsweise verschiedene Typen (regelmässige Verteilung)	Siehe oben								
Schiene	Schienschlagentyp	53 Andere Schiene	Zu viele Einflussfaktoren							
Zwischenlage		54 Siehe separates Projekt								

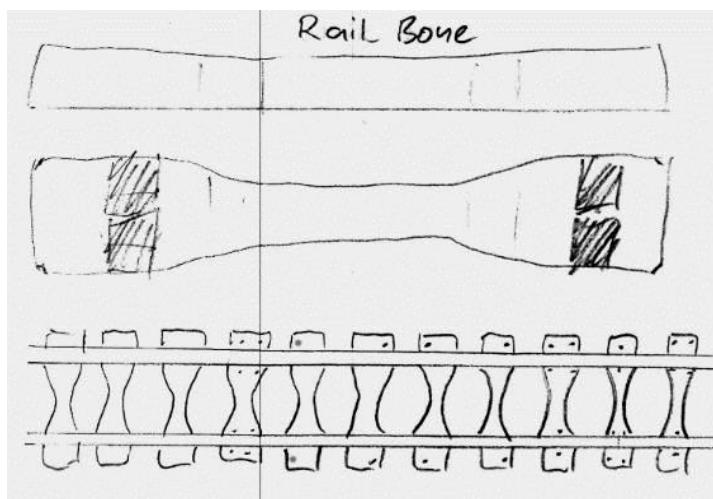


Abbildung 11-23: Skizze Railbone und Gleis

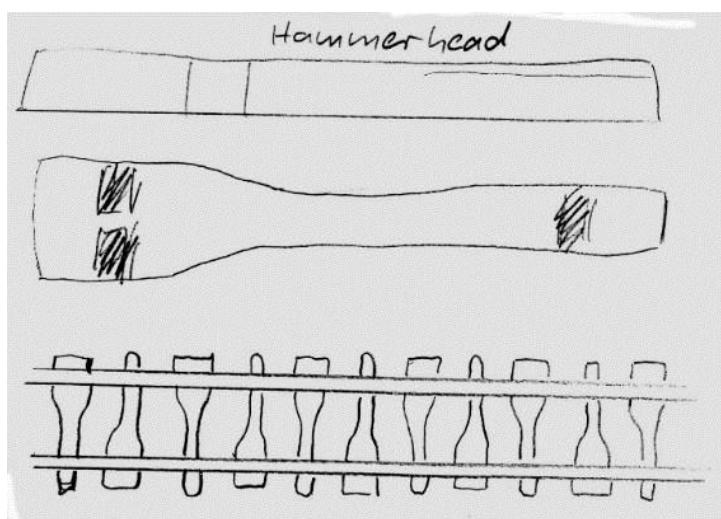


Abbildung 11-24: Skizze Hammerhead mit alternierender Verlegung

E.2 Nutzwertanalyse

		Lärm	LCC	Umsetzung Vigier	Umsetzung Infra	Klar abgegrenzt / Risiken	Kosten Nutzen	
	Gewichtung	10	5	7	5	3	7	
N	Bezeichnung	Punkte	Punkte	Punkte	Punkte	Punkte	Punkte	Punkte
1	Schwelle schwerer mit grosserem Volumen	3	3	2	1	3	3	94
2	Schwelle schwerer ohne Verjüngungen	2	3	3	1	3	2	70
3	Schwelle schwerer kleineren Anzug	2	3	2	2	2	2	63
4	Metallkern	3	3	1	2	3	1	59
5	Schwerbeton (schwerere Gesteinskörnungen, Schwermetallschlacken)	2	2	1	2	2	1	44
6	breiter auf Befestigungsseite - Mit zusätzlicher Befestigung	3	3	2	1	2	3	80
7	länger	3	3	2	0	1	0	59
8	asymmetrische Form (S-Schwelle - Käfig, Diagonale der Schwelle)	3	2	1	1	1	2	61
9	asymmetrische Form (Querverschraubung)	3	2	2	1	1	2	68
10	konstanter Querschnitt über Länge	0	0	0	0	0	0	0
11	Vertiefungen oben	0	1	1	2	2	0	12
12	Vertiefungen unten/seitlich	0	2	1	2	2	0	17
13	Hybridschwelle: 2 versch. Betone unten und oben	1	1	1	2	2	1	29
14	Hybridschwelle: 2 versch. Betone links und rechts	1	1	1	2	2	1	29
15	Hybridschwelle: Beton und Holz	0	0	1	2	2	1	14
16	Hybridschwelle: Beton und Kunststoff / PET	0	0	1	2	2	1	14
17	Stahlummantelung	3	3	1	2	1	1	59
18	Gummiummantelung	2	3	1	1	1	1	49
19	Absorbermaterial auf Oberfläche	1	2	1	2	2	2	41
20	Schwingungstilger - Auf Schwelle aufgebracht (Masse-Federelement)	2	2	2	2	0	1	51
21	Monoblock	0	0	0	0	0	0	0
22	Biblock	2	1	2	2	2	1	46
23	Trennung der Schwelle in der Mitte (Ähnlich zu Gelenk in der Verjüngung)	3	2	1	2	1	2	61
24	höhere Rauhigkeit	1	1	1	2	2	0	22
25	Oberflächenporen	1	1	1	2	2	0	22
26	unregelmässige Oberfläche	1	1	1	2	2	0	22
27	grössere Vorspannung	1	1	1	2	2	0	22
28	grösseres Trägheitsmoment	0	0	0	0	0	0	0
29	starre Elemente auf Oberkante	3	2	2	1	1	3	75
30	Schallschutzelement auf OK nur über Schwelle	0	0	0	0	0	0	0
31	aktives Dämpfungselement	0	0	0	0	0	0	0
32	Kappen (Querverschiebungswiderstand)	1	2	2	1	1	1	41
33	Längere Schrauben	1	1	1	1	2	0	22
34	Elastischere Schrauben	0	1	1	1	2	0	12
35	Mehrere Schrauben - Alternierend befestigt	2	2	1	2	2	2	51
36	Konstante Klemmkraft --> Setzen von Zwischenlage	3	3	2	2	1	3	80
37	Andere Materialpaarung	2	3	2	2	1	3	70
38	Wandstärke Dübel	3	3	2	2	1	3	80
39	Höheres Drehmoment	1	1	2	2	1	0	29
40	kleineres Drehmoment	1	1	2	2	1	0	29
41	Material mit höherer Dämpfung	3	1	2	2	1	2	63
42	Dickere Besohlung	0	1	2	2	1	0	19
43	Nur Teile besohlt	0	1	2	2	1	0	19
44	unregelmässige Lage	0	1	2	2	1	0	19
45	Schwelle tiefer eingeschotet	1	1	2	2	1	0	29
46	kleiner 60cm	2	1	2	1	1	2	53
47	unregelmässig	2	1	2	1	1	2	53
48	grober	1	0	2	1	0	0	24
49	feiner	1	0	2	1	0	0	24
50	Schottergemisch (z.B. Hybrid-Schotter-Gummi oder Schotter-Kunststoff)	0	3	2	1	1	1	36
51	gleiche Typen	0	0	0	0	0	0	0
52	abwechselungsweise verschiedene Typen (regelmässige Verteilung)	0	0	0	0	0	0	0
53	Andere Schiene	0	0	0	0	0	0	0
54	Siehe separates Projekt	0	0	0	0	0	0	0

E.3 Mehrkostenabschätzung mit neuer Schwelle

					Schwelle B90				
Wiederbeschaffungswert Gleise*	Streckenlänge km*	Schienenwechsel CHF/m*	Kosten Oberbau /100m*	Anzahl Schwellen /100m	Kosten/Schwelle ohne Befestigung**	Anzahl Befestigungen	Kosten Befestigung/Stk**	Kostenanteil Arbeit Befestigung (Schätzung CHF15/Bef)	Kostenanteil Oberbau B91
CHF 15'742'000'000	6670	246	CHF 236'012	167 (bei 60cm Abstand)					
Gleis mit B91 Schwellen					CHF 70	2	CHF 15	CHF 18	8.3%
Gleis mit Hammerhead Schwellen				167 (bei 60cm Abstand)	CHF 130	4	CHF 15	CHF 36	16.0%
Gleis mit Hammerhead Schwellen				133 (bei 75cm Abstand)	CHF 130	4	CHF 15	CHF 36	12.7%

F Lösungsansätze Schienenbefestigung

PROSE wurde vom BAFU mit Untersuchungen zu einer akustisch optimierten Betonschwelle beauftragt. Bisherige Untersuchungen lassen u. a. den Rückschluss zu, dass die Steifigkeit der Befestigung der Schiene an die Schwelle das Abstrahlverhalten der Schiene beeinflusst. Ziel ist deshalb eine möglichst steife Befestigung der Schiene an die Schwelle. Im Folgenden werden mögliche Ansätze gezeigt, wie die Steifigkeit erhöht werden kann.

F.1 Zusammenfassung der bisherigen Schienenbefestigung

Die Schiene wird über eine Zwischenlage auf der Betonschwelle gelagert. Die Zwischenlage dient zur gleichmässigeren Verteilung der Kräfte, die von der Schiene in den Unterbau eingeleitet werden sollen. Je Schwelle wird jede Schiene beidseitig über Klemmen und Befestigungsschrauben an der Schwelle befestigt. Die Befestigungsschrauben sind über Kunststoffdübel in den Schwellen eingeschraubt. Dadurch wird das Kippen des Schienenprofils verhindert und die Schiene in Längsrichtung gesichert. Die Spurweite zwischen den beiden Schienen ist durch die Form der Betonschwelle und die Höhe des Schienenprofils bereits vorgegeben. Ebenso werden dadurch und über die Winkelführungsplatten die Querkräfte übertragen. Die nötige Isolation zwischen Schiene und Erde für die Gleisfreimeldeeinrichtung wird durch die Zwischenlage, die Kunststoffdübel und die Winkelführungsplatten aus Kunststoff sichergestellt.

Die Zwischenlage ist wegen der Kraftaufnahme nötig und kann nicht eliminiert werden. Wohl aber könnte die eigentliche Befestigung optimiert werden.

F.2 Übersicht zu den Lösungsansätzen

F.2.1 Minimierung des Klemmkraftverlusts durch geändertes Material für die Dübel

Da die einbetonierten Dübel aus Kunststoff sind, kann im Laufe der Zeit von Kriechen des Materials und dadurch von einer Lockerung der Schrauben ausgegangen werden. Mit einem anderen Material könnte das Kriechen zumindest minimiert werden.

- Faserverstärkter Kunststoff: nein!
- Keramik, Keramikbeschichteter Stahldübel

Noch kein alternatives Material gefunden.

F.2.2 Minimierung des Klemmkraftverlusts durch federnde Verbindung unter Befestigungsschraube

Ein Befestigungsbauteil, das die Setzung geometrisch ausgleicht und dabei der Befestigungsschraube ihre Klemmkraft erhält, z. B. ähnlich einer Tellerfeder resp. Spannscheibe. Die Kennlinie muss möglichst flach sein (nur kleine Kraftänderung bei grosser Wegänderung), das Teil muss dann jedoch stark vorgespannt sein.

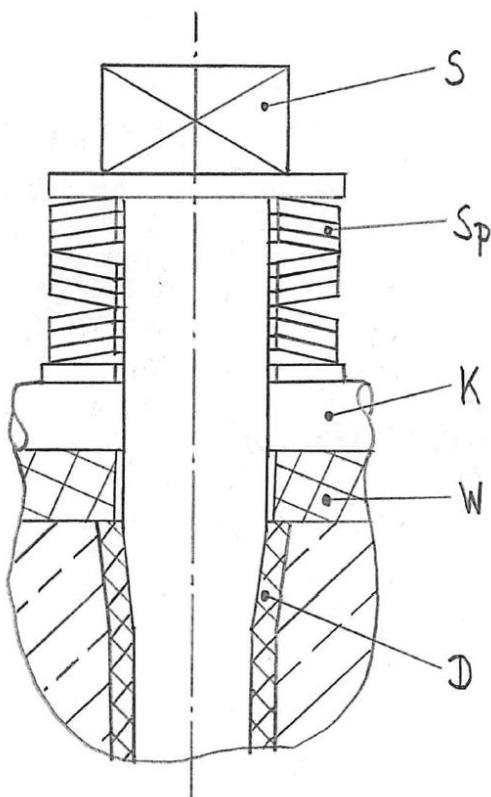


Abbildung 25: Federnde Verbindung unter Befestigungsschraube: S: Schwellenschraube; Sp: Federnde Verbindung unter Befestigungsschraube, hier als verschieden geschichtete Spannscheiben dargestellt; K: Spannklemme; W: Winkelführungsplatte; D: Dübel

F.2.3 Dübel weglassen

Betonschrauben direkt in Schwelle einschrauben. Isolation via Kunststoffscheibe zwischen zwei Stahlscheiben unter dem Schraubenkopf und über Isolierhülse gegenüber Spannklemme.

F.3 Dickere Befestigungsschrauben

Dickere Schrauben sind steifer als dünnere und haben eine grössere Klemmkraft.

F.4 Änderung der Gewindegometrie der Befestigungsschrauben

Befestigungsschrauben haben allgemein einen grossen Flankenwinkel. Dadurch sind die Normalkraft und damit die Gewindereibung relativ hoch, was dem Gewinde seine Selbsthemmung gibt. Die hohe Normalkraft begünstigt jedoch sicherlich auch das Kriechen des Materials des KunststoffdüBELS. Ziel wäre es, den Flankenwinkel zu reduzieren ohne die Selbsthemmung zu vermindern. Dies könnte durch eine zusätzliche Reduzierung der Gewindesteigung erreicht werden («flachere Rampe»).

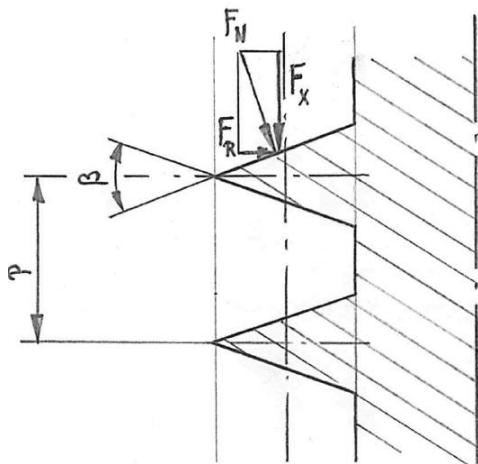


Abbildung 26: Kraftkomponenten am Gewinde: P: Gewindesteigung; β : Flankenwinkel; F_x : Axialkraft; F_R : Radialkraft; F_N : Normalkraft $=F_x/\cos(\beta/2)$

F.5 Einbetonieren von Gewindestangen anstelle von Dübeln

Die Befestigung kann dann mit Hilfe einer Mutter mit Scheibe erfolgen. Die Isolation zur Erde wird durch zwei Stahlscheiben und eine Kunststoffscheibe dazwischen unter der Mutter gewährleistet sowie einer Kunststoffhülse. Die Stahlscheiben müssen möglichst gross und dick ausgeführt werden, um mittels gleichmässiger und geringer Flächenpressung das Kriechen der Kunststoffscheibe zu minimieren.

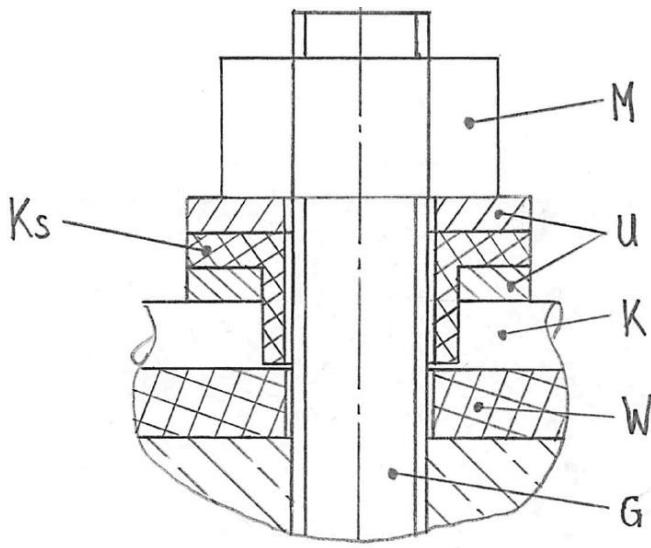


Abbildung 27: Einbetonierte Gewindestange: M: Mutter; Ks: Kunststoffscheibe und -hülse; U: Stahlscheiben; K: Spannklemme; W: Winkelführungsplatte; G: Gewindestange

F.6 Lagerung der Schiene auf der Schwelle in einer Nut resp. auch am Steg

Dadurch kann die Schiene nicht nur am unteren Flansch, sondern auch am Steg fixiert werden, die Anbindung ist steifer und der Steg hat weniger Möglichkeit zu schwingen.

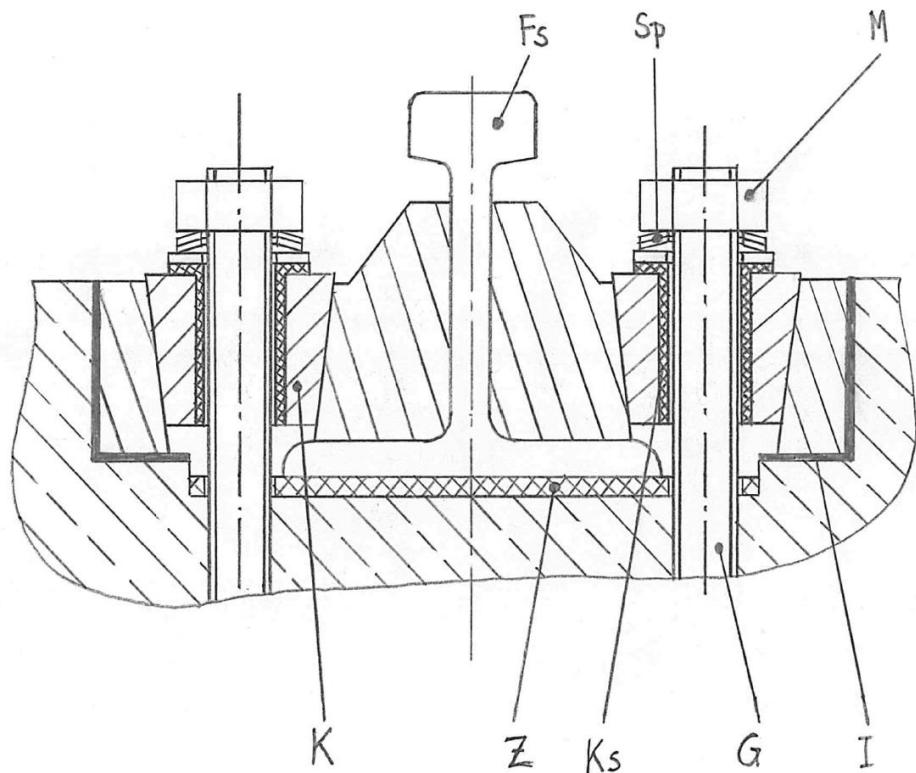


Abbildung 28: Lagerung der Schiene auf der Schwelle in einer Nut: Fs: Fahrtschiene; M: Mutter; Ks: Kunststoffscheibe und -hülse (Buchse mit Bund); Sp: Spannscheiben; K: Verspannkeil; Z: Zwischenlage; G: Gewindestange; I: Isolierung

G Zeichnungen (externer Anhang)

