

# Akustische Bewertung von Eisenbahnbrücken

## AcouBridge

Ein Projekt finanziert im Rahmen der  
Verkehrsinfrastrukturforschung 2019  
(VIF2019)


Dezember 2022



## Impressum:

### Herausgeber und Programmverantwortung:

Bundesministerium für Klimaschutz  
Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien  
Radetzkystraße 2  
A - 1030 Wien

 Bundesministerium  
Klimaschutz, Umwelt,  
Energie, Mobilität,  
Innovation und Technologie

ÖBB-Infrastruktur AG  
Praterstern 3  
A - 1020 Wien

 ÖBB  
INFRA

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs  
Aktiengesellschaft  
Rotenturmstraße 5-9  
A - 1010 Wien

 ASFiNAG

### Für den Inhalt verantwortlich:

AIT Austrian Institute of Technology GmbH  
Giefinggasse 4  
A - 1210 Wien

 AIT  
AUSTRIAN INSTITUTE  
OF TECHNOLOGY  
TOMORROW TODAY

Ziviltechnikerbüro DI Dr. Christian Kirisits  
Kolpinggasse 10  
A - 7423 Pinkafeld

 ZT KIRISITS

### Programmmanagement:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH  
Bereich Thematische Programme  
Sensengasse 1  
A - 1090 Wien

 FFG

# Akustische Bewertung von Eisenbahnbrücken

## AcouBridge

Ein Projekt finanziert im Rahmen der  
Verkehrsinfrastrukturforschung  
(VIF2019)

**Autoren:**

**Dott. Ing. Marco CONTER**

**Ao. Univ.-Prof. DI Dr. Christian KIRISITS**

**Dipl.-Ing. Martin CZUKA B.Sc.**

**DI Marian RALBOVSKY, PhD**

**DI Maciej KWAPISZ**

**DI Alfred LECHNER**

**Auftraggeber:**

Bundesministerium für Klimaschutz

ÖBB-Infrastruktur AG

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

**Auftragnehmer:**

AIT Austrian Institute of Technology GmbH

Ziviltechnikerbüro Dr. Kirisits

## Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung und Kurzfassung .....	6
1.1. Einleitung.....	6
1.2. Kurzfassung der Ergebnisse.....	7
1.3. Publizierbare Kurzfassung in englischer Sprache .....	8
2. Aufgabenstellung .....	9
2.1. Ausgangslage.....	9
2.2. Zielsetzung .....	9
3. Literaturrecherche.....	10
4. Messtechnische Erhebung.....	12
4.1. Anforderung zur Brückenauswahl .....	12
4.2. Anforderung an der Auswahl der Messpositionen für die Luftschallmessungen .....	13
4.3. Vibroakustische Messungen bei der Brücke in Achau.....	14
4.3.1. Allgemeines zur Messstelle in Achau.....	14
4.3.2. Akustische Messungen im Nahfeld und Fernfeld .....	15
4.3.3. Messungen und Auswertungen der Luftschallmessungen im Fernfeld.....	18
4.3.4. Vibrationsmessungen .....	19
4.3.5. Messungen der Track Decay Rate (TDR) in Achau .....	23
4.4. Vibro-akustische Messungen bei der Brücke in Knittelfeld .....	24
4.4.1. Allgemeines zur Messstelle .....	24
4.4.2. Akustische Messungen im Nahfeld und Fernfeld .....	25
4.4.3. Vibrationsmessungen .....	27
4.4.4. Messungen der Track Decay Rate (TDR) in Knittelfeld .....	31
5. Baudynamische Berechnungen .....	32
5.1. Allgemeines zu den FE Berechnungen .....	32
5.1.1. Bestimmung der Achslasten .....	32
5.2. Berechnungen mit einem Balkenmodell.....	33

5.3.	Berechnungen der Brücke in Achau .....	33
5.3.1.	Validierung des Modells durch Eigenformen des Stegs .....	35
5.3.2.	Simulation der Zugsüberfahrten.....	36
5.4.	Berechnungen der Brücke in Knittelfeld .....	39
5.4.1.	FE Überfahrtsberechnungen.....	40
6.	Auswahl der Brückentransferfunktion.....	47
6.1.	Schallausbreitungsberechnungen mit Ersatzschallquelle nach neuem RVE-Modell und Anpassung an die Messergebnisse .....	47
6.2.	Modellberechnung der Brücke in Achau .....	49
6.3.	Modellberechnung der Brücke in Knittelfeld .....	54
6.4.	Illustration möglicher Brückentransferfunktionen im Vergleich mit den Messergebnissen von Knittelfeld .....	56
6.5.	Einteilung der Brückenarten in akustisch relevanten Klassen und Kompatibilität mit existierenden Regelwerken .....	60
7.	Schlussfolgerungen und Empfehlungen für eine nationale Richtlinie .....	64
8.	Literaturverzeichnis.....	67
	Anhang A – Messung Achau: erfasste Züge .....	68
	Anhang B - Messung Knittelfeld: erfasste Züge .....	71
	Anhang C – Messprotokolle ZT KIRISITS .....	74
	Anhang D - Messung der Track Decay Rate bei der Brücke in Achau (AIT).....	79
	Anhang E – Messung der Track Decay Rate bei der Brücke in Knittelfeld (AIT).....	89
	Abbildungsverzeichnis .....	99

## 1. EINLEITUNG UND KURZFASSUNG

### 1.1. Einleitung

Das Berechnungsmodell für die Schallabstrahlung von Eisenbahnbrücken nach Anhang II, (EU 2015/996) der europäischen Umgebungslärmrichtlinie (2002/49/EC, auch END genannt) auf dem die RVE 04.01.02 weitgehend basiert, enthielt einen frequenzunabhängigen Zuschlag für das Rollgeräusch („C-Bridge“ Faktor in der alten Richtlinie). Dabei wurde sehr vereinfacht zwischen Brücken aus Beton und mit stählernem Überbau unterschieden.

Erfahrungen aus akustischen Messungen des Brückendröhnens zeigen, dass es zwischen Brückenbauweisen große Unterschiede gibt, die eine differenziertere und genauere Einteilung verlangen. Hier sollte zwischen verschiedenen Brückenbauweisen wie z.B. Stahlbetonbrücken, Verbundbrücken, Stahlbrücken und Brückensystemen wie Fachwerkbrücken, Rahmen oder Balkenbrücken in der Modellierung unterschieden werden können. Die ursprüngliche Regelung wurde mit einer Adaption des Anhangs II und daraufhin für die RVE 04.01.02 zwischenzeitlich entscheidend abgeändert. Dabei wurde der Zuschlag für das Rollgeräusch durch eine eigenständige Ersatzschallquelle aufbauend auf effektiver Gesamtraueheit und Brückentransferfunktion ersetzt.

Im Zuge des vorliegenden Forschungsprojektes *Acoubridge* wurde daher zur Schaffung einer breiteren Datenbasis eine nationale und internationale Recherche zum Thema Brückenabstrahlung durchgeführt: diese ist in Kapitel 3 „Literaturstudie“ zusammengefasst.

Zur Bestimmung der vibroakustischen Eigenschaften von Eisenbahnbrücken wurde eine Reihe messtechnischer Untersuchungen durchgeführt. Mit Hilfe eines umfangreichen Auswahlverfahrens fand eine Selektion von Eisenbahnbrücken statt, die für den Auftraggeber ÖBB eine hohe Relevanz besitzen, und die sich für vibroakustische Messungen als geeignet erwiesen. Bei jeder selektierten Eisenbahnbrücke wurden entlang eines Brückenquerschnittes und eines Referenzquerschnittes auf freier Strecke akustische Messungen durchgeführt. Zudem wurde für die Untersuchung des dynamischen Verhaltens jede Brücke mit einer Reihe von Vibrationssensoren bestückt.

Die Methodik sowie die Ergebnisse der einzelnen Messungen sind Teil von Kapitel 4 „Messtechnische Erhebung“. Die Analyse der durchgeführten Messungen floss dann direkt in die Simulationen, die sowohl für die baulastdynamischen Aspekte mittels FE-Berechnungen als auch für die Akustik mittels Schallausbreitungsberechnungen durchgeführt wurden.

In Kapitel 5 „Baudynamische Berechnungen“ wurden zuerst die Achslasten bestimmt, dann die Berechnungen mit einem Balkenmodell durchgeführt, und anschließend die FE-Modellierung inklusive Validierung des Modells durch die Eigenformen des Stegs, und die Simulation der Zugüberfahrten und die FE-Überfahrtberechnungen erarbeitet.

In Kapitel 6 „Auswahl der Brückentransferfunktion“ wurde die Bestimmung der Schallausbreitungsberechnungen mit Ersatzschallquellen nach RVE 04.01.02, sowie die Anpassung der Modelle an die Messergebnisse präsentiert. Darüber hinaus wurde hier eine erste Einteilung der Brückenbauweisen in akustisch relevanten Klassen vorgeschlagen und dabei die Kompatibilität mit existierenden Regelwerken überprüft.

Durch die Änderungen der neuen RVE 04.01.02 aus Februar 2022 ist ein Vorschlag für den sogenannten „C-Bridge Faktor“ (wie im eingereichten Antrag ursprünglich geplant) fachlich nicht mehr zeitgemäß. Stattdessen wurden für die jeweiligen Brückenklassen Transferfunktionen vorgeschlagen, die die akustische Emission der Brücke als eigenständige Ersatzschallquelle frequenzabhängig darstellen. Das Modell wurde dann als Vorschlag für eine mögliche Erweiterung der RVE 04.01.02 präsentiert. Der Vorschlag ist als wesentliches Ergebnis dieser Untersuchung zu betrachten und ist im Kapitel 7 „Schlussfolgerungen und Empfehlungen für eine nationale Richtlinie“ enthalten.

## 1.2. Kurzfassung der Ergebnisse

Die wesentliche Erkenntnis des vorliegenden Forschungsprojektes zeigt, dass die Anwendung der in der europäischen Richtlinie angegebenen Transferfunktionen für die untersuchten Stahlbrücken weit überhöhte Immissionswerte im Nahbereich der Brücke ergibt. Die Bauweise von Stahlbrücken im Schotterbett führt zu einer maßgeblichen Reduktion der abgestrahlten Schalleistung gegenüber Stahlbrücken mit direkter Befestigung der Gleise (wie z.B. bei Brücken mit offener Fahrbahn), welche Grundlage der europäischen Standardwerte waren.

So ergaben Messungen an einer Einfeld-Balkenbrücke in Verbundbauweise mit Längsträger aus Stahl-I-Profilen und Fahrbahnplatte aus Stahlbeton sowie konventionellen Schotteroberbau, bei Anwesenheit von Unterschottermatten und ohne zusätzlichen Stahlaufbauten (wie auch nicht konstruktiv bedingten Abdeckblechen) keine Notwendigkeit zur Berücksichtigung einer Brückenersatzschallquelle im schalltechnischen Modell.

Demgegenüber führt eine Brücke als Einfeld-Stahlfachwerk in Stahlbauweise zu relevanten Beiträgen des Brückengeräusches. Messungen und Simulationsberechnungen ergaben die Darstellung einer Brückentransferfunktion, welche derartige Brückenbauwerke im schalltechnischen Modell berücksichtigen könnte.

Das Projekt bietet darüber hinaus Vorschläge einer Klassifikation von Brückenbauweisen in akustisch relevanten Klassen für einer mögliche Erweiterung zur RVE 04.01.02. Diese bieten eine Grundlage für das Schallquellenmodell der strategischen Lärmkartierung sowie im Falle von Prognoseberechnungen.

Zusätzlich wurde eine nicht ausreichende Definition der Ermittlung der mittleren Bodenebene sowie Bodendämpfung im vorliegenden Verfahren identifiziert. So wäre die Höhe über dem Boden bzw. auch die Bodendämpfung am Emissionsort für Brücken mit Schotterbett zu jener für offene Bauweisen konkreter zu definieren. Hier könnte die Höhe über dem Boden und dessen Bodendämpfungsfaktor für die Ersatzschallquellen Rollgeräusch und Brückengeräusch im Detail unterschiedlich zu ermitteln sein. Es könnte eine unter der Brücke liegende akustisch harte Fläche wie beispielsweise ein Gewässer für die Abstrahlung der Brückenschallquelle berücksichtigt werden, während das poröse Schotterbett für die Rollgeräuschquelle maßgeblich ist.

Weiter ist zu beachten, dass im Rahmen dieser Untersuchung keine Brücken mit der Oberbauart fester Fahrbahn untersucht wurden. Für wissenschaftlich abgesicherte Erkenntnisse zur Schallabstrahlung dieser Oberbauart sowie für eine umfassende Beschreibung weiterer bestehender Brückenbauweisen sind weitere Untersuchungen

notwendig. Die im Rahmen dieses Projektes entwickelten Methoden erwiesen sich dafür geeignet. Die Autoren empfehlen daher dies als mögliches Thema für weitere Untersuchungen im Zuge zukünftiger Forschungsprojekte.

### 1.3. Publizierbare Kurzfassung in englischer Sprache

The calculation method for modelling sound emission of railway bridges in the Annex II of the European Guideline 2002/49/EC (also called END), on which the Austrian Directive RVE 04.01.02 is largely based, used initially a frequency independent adjustment for rolling noise (the so called “C-bridge” factor in the previous version).

In the RVE 04.01.02 bridges are separated in two categories in accordance with the European Noise Directive (END). Experience from acoustic measurements of railway bridges shows that there are large differences between different bridge construction types, which would require a more sophisticated regulation and a differentiation between e.g., steel bridges, cement concrete bridges, composite bridges, and other construction types. The original regulation in the meanwhile has been changed with the adaptation of Appendix II updated in the new version of the RVE 04.01.02 published in February 2022. The adjustment factor “C-bridge” for rolling noise was modified by an independent sound source based on the effective overall roughness and bridge transfer function.

The main finding of the present research show that the application of the values specified in the European Noise Directive (END) for the sound emission of steel bridges results in excessive immission values in the vicinity of the evaluated bridge. The construction of steel bridges with rails in the ballast leads to a significant reduction in the radiated sound power compared to steel bridges with direct attachment of the rails, which were the basis of the European Directive END.

Measurements on a single-span steel girder bridge in composite construction with a reinforced concrete roadway slab, with the presence of under ballast mat (UBM) and without additional steel structures revealed no need to consider a bridge noise source in the acoustic model. In contrast to that, a single-span steel framework bridge with ballast track leads to a relevant emission, which are significantly lower than the END default values. Measurements and simulations resulted in the definition of a new bridge values for the transfer function, which take such bridge construction values into account in the acoustic model. The project also offers a proposal for a more detailed classification of bridges in acoustically relevant classes for a possible extension of the current RVE 04.01.02. These provide a basis for the sound source model of strategic noise mapping as well as in the case of sound prediction.

In addition, an insufficient definition of the determination of the mean ground plane and ground coefficient was identified in the present procedure. For example, the height above the ground and the ground coefficient at the point of emission for bridges with a track ballast should be defined more specifically in relation to the construction methods. Here, the height above ground and its ground coefficient should also be able to be determined in detail for the sound sources of rolling noise and bridge noise. It should also be noted that no concrete bridges were examined within this study. The authors therefore recommend this as a possible topic for further investigations in future research projects on noise emission of railway bridges.



## 2. AUFGABENSTELLUNG

### 2.1. Ausgangslage

Das Modell für die Schallabstrahlung von Eisenbahnbrücken in der europäischen Richtlinie 2015/996/EU auf dem die RVE 04.01.02 aus 2019 enthielt einen frequenzunabhängigen Zuschlag für das Rollgeräusch („C-Bridge“ in der alten Richtlinie und Transferfunktion in Anhang II der neuen Richtlinie). Erfahrungen aus akustischen Messungen des Brückendröhnens zeigen, dass es zwischen verschiedenen Brückenkonstruktionen große Unterschiede gibt, die eine differenziertere Regelung verlangen würden.

Hier sollte zwischen verschiedenen Brückenbauweisen unterschieden werden, wie z.B. Stahlbetonbrücken, Verbundbrücken, Stahlbrücken und Brückensystemen wie Fachwerkbrücken, Rahmen oder Balkenbrücken in der Modellierung unterschieden werden können.

Weiterhin sollte untersucht werden, anstelle des frequenzunabhängigen Zuschlags eine zusätzliche Ersatzschallquelle mit entsprechendem Frequenzspektrum und Richtcharakteristik einzusetzen, die auf einer realitätsnahen Transferfunktion zur Ermittlung der Schalleistungspegel aufbauend auf der effektiven Gesamtrauheit basiert.

### 2.2. Zielsetzung

Durch die Änderungen des Anhangs II in der europäischen Umgebungslärmrichtlinie und der daraus resultierenden Neufassung der RVE im Februar 2022 ist ein Vorschlag für den sogenannten C-Bridge Faktor fachlich nicht mehr zeitgemäß. Stattdessen wurden für die jeweiligen Brückenklassen Transferfunktionen vorgeschlagen, die die akustische Emission der Brücke frequenzabhängig darstellen.

Das Endziel des Projektes ist daher, eine differenziertere Regelung zur Berücksichtigung der Brückenschallabstrahlung zu finden, in welcher einerseits unterschiedliche Brückenbauweisen berücksichtigt werden, und andererseits der Einfluss in einzelnen Terzbändern über eine Transferfunktion ausgedrückt wird. Das Modell wird dann als Vorschlag für eine mögliche Erweiterung zur RVE 04.01.02 präsentiert.

### 3. LITERATURRECHERCHE

Das aktuelle Verfahren der RVS 04.01.02 (Schallemission) bzw. ÖAL 28 (Schallausbreitung) beruht auf dem Annex II der europäischen Umgebungsärmrichtlinie. Dieser wurde erst als Richtlinie (EU) 2015/996 veröffentlicht und in weitere Folge durch die delegierte Richtlinie 2021/1226 der europäischen Kommission modifiziert und ergänzt.

Die Schallabstrahlung von Brückenbauwerken, bei der Überfahrt von Schienenverkehr, wird mittels einer eigenen Ersatzschallquelle berücksichtigt. Die Position der Ersatzschallquelle liegt auf Quelle A, welche nach dem Verfahren in 0,5 m Höhe über SOK (Schienenoberkante) in der Gleisachse liegt.

Die Schalleistung, welche im Gegensatz zu den Rollgeräuschen des Schienenverkehrs ungerichtet abgestrahlt wird, wird pro Fahrzeug wie folgt angegeben:

$$L_{W,0,bridge,i} = L_{R,TOT,i} + L_{H,bridge,i} + 10 \cdot \lg(Na) \text{ [dB]} \quad (Gl. 1)$$

Dabei ist  $L_{R,TOT,i}$  die effektive Gesamtraueheit,  $L_{H,bridge,i}$  die Brückentransferfunktion und  $Na$  die Anzahl der vorbeifahrenden Achsen. Das Brückengeräusch  $L_{W,0,bridge,i}$  stellt nur den durch die Brückenkonstruktion abgestrahlten Schall dar und nicht allenfalls durch die Konstruktion ergebende Veränderungen für die Schienenabstrahlung. So wird eine direkte Befestigung von Schienen an einer Stahlkonstruktion (ohne Schotterbett) durch eine eigene Transferfunktion berücksichtigt, welche damit Einfluss auf den Schalleistungspegel des Rollgeräusches hat.

Derzeit beinhaltet die RVS 04.01.02 eine Schienentransferfunktion für direkte Befestigung und zwei Brückentransferfunktionen bezeichnet mit „+10 dB(A)“ und „+15 dB(A)“. Die Daten dieser Funktionen stammen aus der Richtlinie 2021/1226, die wiederum die Werte aus dem niederländischen Bericht RIVM Letter report 2019-0024 (A. Kok und A. van Beek) übernommen hat.

Noch genauer wäre in diesem Zusammenhang auf einen Anhang dieses Berichts zu verweisen, welcher als Titel „Position paper – Improved source model for railway bridges for CNOSSOS“ aus Februar 2018 trägt (Autor: Edwin Verheijen). Dort werden Daten von 25 Brücken, gemessen an mindestens 5 Vorbeifahrten in den Jahren 2015 bis 2017 dargestellt. Konkrete Daten werden für 21 Stahlbrücken als Differenz der Vorbeifahrt auf Brücken zu normalem Oberbau präsentiert. Messposition und Methoden sind im Bericht nicht im Detail enthalten.

Aufgrund dieser Daten werden Mittelwerte für 3 Kategorien mit einer Anhebung der Pegel um 5, 10 und 15 dB A-bewertet gebildet (eine konkrete Spezifizierung an welchen Punkten gelang durch Studium der Unterlagen nicht). Erwähnt wird auch, dass beispielsweise eine „composite steel/concrete“ Brücke mit einer 30 cm dicken Betonplatte unter dem Schotterbett eine Erhöhung von 0 dB aufwies.

Im weiteren Teil des Berichtes wird auf Stahlbrücken mit direkter Befestigung fokussiert. Nur für diese, und konkret für die Bauweise in Niederlande ergeben die ermittelten

Transferfunktionen (für Brücke und Schiene) die entsprechende Emissionserhöhung, um zu den Messdaten zu passen. Zusammenfassend werden ausschließlich Daten für die +10 dB und +15 dB Klasse angegeben, da Gruppe +5 dB als zu inhomogen bezeichnet wird.

Für Betonbrücken werden deutlich geringere Brückengeräusche angegeben und keine weitere Analyse präsentiert. Damit sind die in der europäischen Richtlinie angegebenen Daten nur für Stahlbrücken mit offener Fahrbahn direkt anwendbar, wobei selbst dort ein Vergleich der niederländischen Bauweisen mit der österreichischen Bauweise zu erfolgen hätte.

## 4. MESSTECHNISCHE ERHEBUNG

Im Rahmen des Forschungsprojekts *AcouBridge* wurde zur Bestimmung der vibroakustischen Eigenschaften von Eisenbahnbrücken eine Reihe messtechnischer Untersuchungen durchgeführt. Mit Hilfe eines umfangreichen Auswahlverfahrens fand eine Selektion von Eisenbahnbrücken statt, die für den Auftraggeber eine hohe Relevanz besitzen, und die sich für vibroakustischen Messungen als geeignet erwiesen.

Bei jeder selektierten Eisenbahnbrücke wurden entlang eines Brückenquerschnittes und eines Referenzquerschnittes auf freier Strecke akustische Messungen durchgeführt. Zudem wurde zur Untersuchung des dynamischen Verhaltens jede Brücke mit einer Reihe von Vibrationssensoren bestückt.

Das vorliegende Kapitel beinhaltet sowohl die Beschreibung der durchgeführten vibroakustischen Messungen als auch des vorangegangenen Auswahlprozesses zur Selektion geeigneter Eisenbahnbrücken. Zudem beinhaltet dieser Abschnitt die wesentlichen Ergebnisse der Messungen, die eingehend nach Kriterien der technischen Akustik und der Schwingungstechnik analysiert wurden.

### 4.1. Anforderung zur Brückenauswahl

Die Untersuchung des vibroakustischen Verhaltens, welches zu einer potenziell relevanten Schallabstrahlung von Eisenbahnbrücken führt, ist mit einer Reihe an Anforderungen an die jeweilige Brücke verbunden. Dazu gehören etwa möglichst geringe Umgebungsgeräusche im Umfeld der Brücke, möglichst große Kurvenradien (falls nicht gänzlich vermeidbar), sowie eine leichte Zugänglichkeit.

In Abstimmung mit dem Auftraggeber wurden folgende Kriterien für potenziell zu untersuchende Eisenbahnbrücken festgelegt:

- Geringe Umgebungsgeräusche: möglichst geringer zusätzlicher Umgebungslärm (z.B. durch Straßenverkehr, Industrielärm) im Umfeld der Brücke;
- Brückenabmessungen: für die Platzierung von Mikrofonen im Umfeld der Brücke darf die Brücke nicht zu hoch sein (je nach Beschaffenheit des Bodens konnten Mikrofonhöhen von bis zu 15 m über dem Boden realisiert werden);
- Vegetation: kein hoher Bewuchs im Nahbereich (ca. 25 m) um die Gleise;
- Gewässer: mögliche Gewässer unter der Brücke sollten nicht tiefer als 50 cm sein und eine geringe Strömung besitzen, wenn Mikrofonpositionen oberhalb des Gewässers liegen;
- Kurvenradien: um und auf der Brücke sollte idealerweise keine Krümmung im Gleisverlauf vorliegen, beim Vorhandensein von Kurven sollten diese große Kurvenradien (min. 500 m) haben, damit es nicht zu Kurvenkreischen kommt;
- Homogenität der zu untersuchenden Querschnitte: die beiden Messquerschnitte sollen so homogen wie möglich sein;

- Bahnverkehr: für eine möglichst hohe Validität der Zugüberfahrtsmessungen sollte die Brücke Teil einer Strecke mit hoher Zugfrequenz sein.
- Lärmschutzwände: um und auf der Brücke sollten möglichst keine Lärmschutzwände installiert sein, da diese das Vibrationsverhalten sowie die potenzielle Schallabstrahlung der Brücke beeinflussen können.
- Brückensystem und -material: in Abstimmung mit dem Auftraggeber soll die Eisenbahnbrücke möglichst einer bestimmten Bauart und Materialzusammensetzung entsprechen

Unter Berücksichtigung der oben aufgelisteten Anforderungen wurde eine Reihe potenziell geeigneter Brücken vom Auftraggeber vorselektiert. Im nächsten Schritt fand eine detaillierte Bewertung dieser vorselektierten Brücken durch das Projektkonsortium statt. Anschließend wurden die vielversprechendsten Brücken vor Ort begutachtet, um insbesondere die Zugänglichkeit für die Installation der notwendigen Sensorik zu bewerten.

Als Ergebnis des Selektionsprozesses wurden die zwei geeignetsten Brücken für die vibroakustischen Untersuchungen ausgewählt:

- Brücke in Achau: Einfeld-Balkenbrücke in Verbundbauweise, bestehend aus geschweißten Stahlträgern mit Fahrbahnplatte aus Stahlbeton und Gleis im Schotterbett (mit Unterschottermatten);
- Brücke in Knittelfeld: Einfeld-Stahlfachwerkbrücke in Stahlbauweise mit orthotroper Fahrbahnplatte mit Gleis im Schotterbett.

Die finale Auswahl der beiden Eisenbahnbrücken fand in enger Abstimmung mit dem Auftraggeber statt.

## **4.2. Anforderung an der Auswahl der Messpositionen für die Luftschallmessungen**

Die akustischen Messpunkte sollen einen Vergleich der Luftschallemissionen mit und ohne Anwesenheit der Brücke ermöglichen, um auf die entsprechenden zusätzlichen Schallquellen und deren Schalleistungspegel zu schließen.

Demnach sind Messpunkte im Nahbereich zur Brücke bzw. an einer Referenzstelle notwendig. Oberbau (Schwellen, Gleisrauheiten), Gleislage (Kurven) und Betriebszustände (Geschwindigkeit) sollen soweit möglich ident sein, bzw. nur geringfügige und damit entweder vernachlässigbare oder korrigierbare Abweichungen aufweisen. Wesentlich ist weiters die Annahme eines Modells der Schallentstehung.

Dazu wird für Rollgeräusche ausgehend von Schienen, Rädern und Aufbauten ein Richtverhalten der Schallquellen angenommen, während die Abstrahlung durch die Brückenkonstruktion omnidirektional erfolgt. Diese Modellvorstellung liegt dem neuen europäischen Verfahren, übernommen in RVE 04.01.02 ebenfalls zugrunde. Daher wurden

zusätzliche mehrere Messpunkte in verschiedenen Winkeln zum Mittelpunkt der Brücke geplant.

Diese liegen nicht direkt neben dem Brückenbauwerk, inkludieren aber den abgestrahlten Schall im steilen Winkel zum vorbeifahrenden Zug, indem die Rollgeräusche entsprechend des dipolförmigen Richtverhaltens geringer anzunehmen sind.

Wesentlich waren möglichst geringe Dämpfungen durch Abschirmungen bzw. konstante akustische Bodenverhältnisse. Während Abschirmungen durch entsprechend hoch gelegene Mikrofonpositionen vermieden werden können, sind die Bodenverhältnisse durch die Anwesenheit der Brücke grundsätzlich beeinflusst.

So ändert sich die Bodendämpfung durch unter die Brücke führende Gewässer sowie Abstände der sich ausbreitenden Schallquellen vom Untergrund. Diese nicht konstanten Verhältnisse werden bei den Vergleichsberechnungen in Abschnitt 6 entsprechend zu berücksichtigen sein.

### **4.3. Vibroakustische Messungen bei der Brücke in Achau**

#### **4.3.1. Allgemeines zur Messstelle in Achau**

Der Aufbau der Messstelle fand am 5.11.2020 sowie am 9.11.2020 statt. Für die schwingungstechnischen Untersuchungen wurde an diesen Tagen ein SIPO von den ÖBB für die Montage von DMS (Dehnungsmessstreifen) und Beschleunigungssensoren an der Schiene bereitgestellt. Gemessen wurde am 9., 10. und 11.11.2020. Abbildung 1 zeigt die untersuchte Brücke sowie einen Teil der eingesetzten Sensorik.

Es wurden über 50 Zugüberfahrten erfasst, die meisten davon Nahverkehrszüge. Neben den vibroakustischen Messungen von Zugüberfahrten wurden Impulshammertests an zwei seitlichen Blechen der Brücke durchgeführt. Gemessen wurden die vertikalen Schwingungen der Schiene und des Tragwerks, sowie die für die akustische Abstrahlung der Brücke maßgeblichen horizontalen Schwingungen des Steges.



**Abbildung 1: Brücke über die Schwechat (Ansicht von Südwesten).**

### **4.3.2. Akustische Messungen im Nahfeld und Fernfeld**

Neben den Schwingungsmessungen wurde eine potenziell relevante Schallabstrahlung der Brücke in Achau mittels akustischer Messungen durchgeführt. Dafür kam der in Abbildung 2 und Abbildung 3 dargestellte Messaufbau am 9. und 10.11.2020 zum Einsatz. Die Messergebnisse dienten einerseits der Ermittlung der Schallabstrahlung der Brücke in geringer Entfernung, sowie als ergänzende Daten für die akustischen Messungen des Projektpartners ZT Kirisits.

Im angewandten Untersuchungskonzept wurden jeweils mittlere energieäquivalente Vorbeifahrtspegel über eine Vielzahl an Zugvorbeifahrten am Brückenquerschnitt sowie am freien Streckenquerschnitt berechnet (Querschnitt A und B in Abbildung 2), und die Differenz ( $\Delta L_{A,eq}$ ) daraus gebildet. Diese Differenzen ergeben sich prinzipiell zwischen den Mikrofonpaaren M2-M5, M3-M7, M4-M8.

Die ersten Datensichtungen zeigten jedoch, dass der akustische Einfluss der Böschung die Aufzeichnungen an M7 dominierte. Zudem war aufgrund der lokalen Strömung im Gewässer die Platzierung eines Mikrophons an der Position von M4 nicht ohne weiters gefahrenlos möglich. Eine zielführende Detailanalyse war daher für das Mikrofonpaar M2-M5 durchführbar.

Wie aus Abbildung 4 für die Mikrophone in 7,5 m Entfernung von der Gleismitte und 1,2 m über der Schienenoberkante dargestellt (M2 und M5 in Abbildung 4), konnten lediglich für Frequenzbänder mit Mittenfrequenzen  $\leq 400$  Hz partiell geringfügig höhere Pegel am Brückenquerschnitt festgestellt werden. Für Frequenzbänder mit Mittenfrequenzen über 400 Hz ergaben sich für die beiden Mikrofonpositionen durchgehend geringfügig niedrigere Vorbeifahrtspegel.

Unter Berücksichtigung üblicher Messunsicherheiten und der Messergebnisse an den restlichen Mikrofonpositionen konnte eine Schallabstrahlung der untersuchten Verbundbrücke nicht gänzlich ausgeschlossen werden.

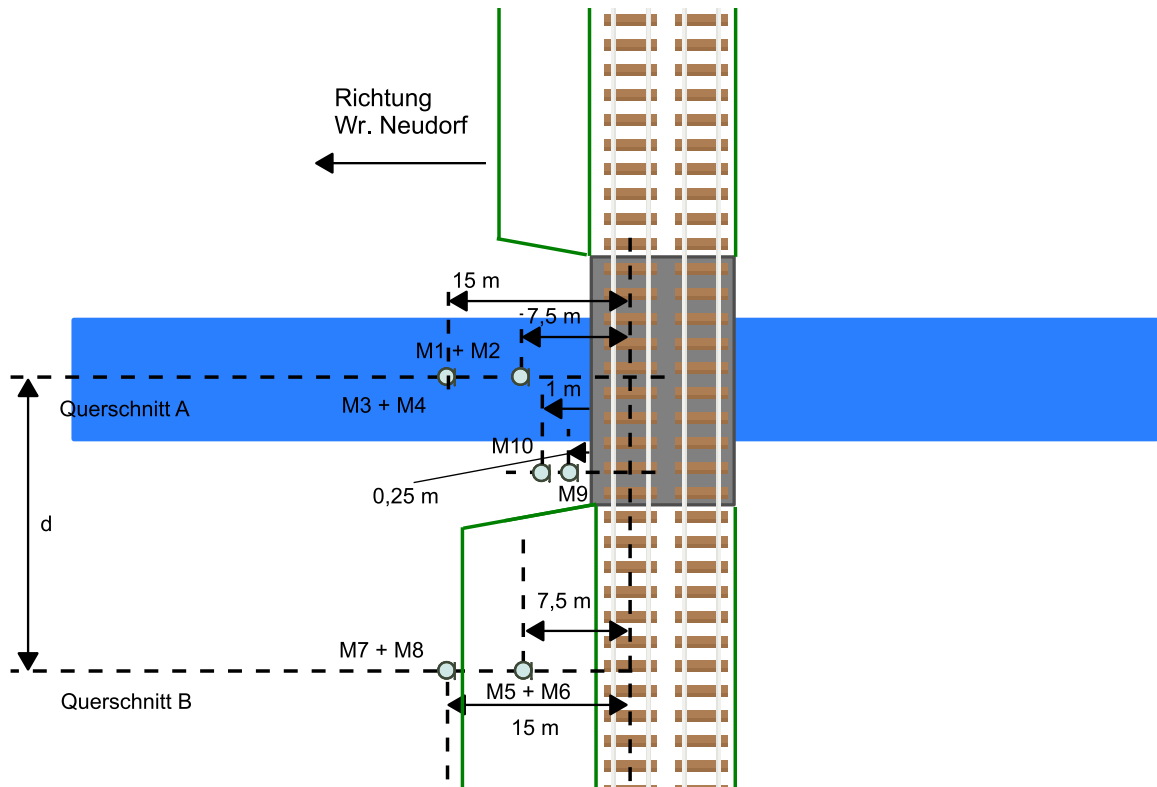


Abbildung 2: AIT-Messaufbau für akustische Messungen.

Tabelle 1: Messhöhen von AIT-Messaufbau für akustische Messungen. \* Messpunkt auf halber Höhe von Blech P2 der Brücke.

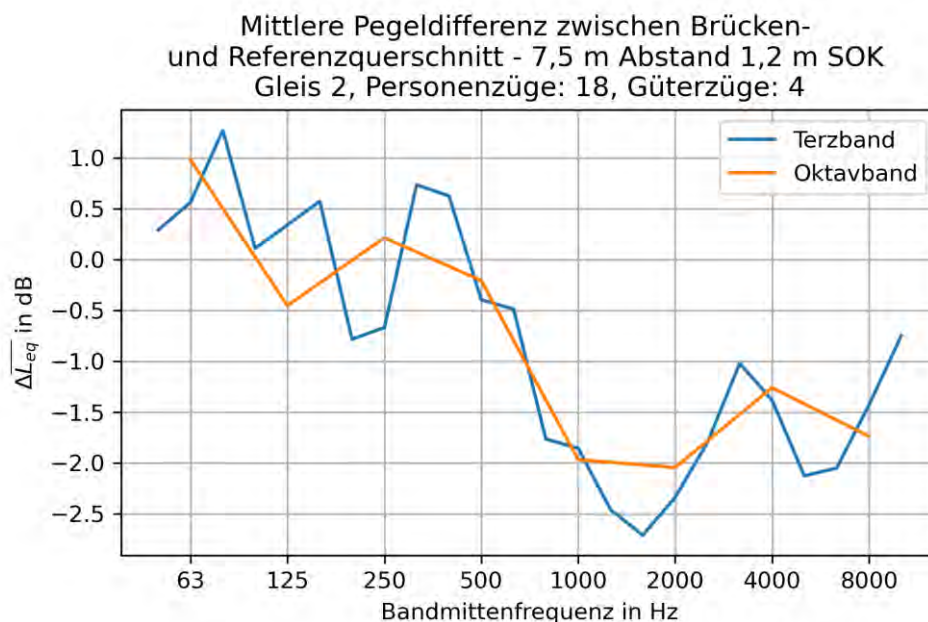
Messpunkt	Messhöhe bezogen auf SOK (m)	Messpunkt	Messhöhe bezogen auf SOK (m)
M1	*	M6	3,0 m
M2	1,2 m	M7	*
M3	*	M8	1,2 m
M4	1,2 m	M9	*
M5	1,2 m	M10	*





**Abbildung 3: akustische Messungen beim betrachteten Brückenquerschnitt (links) sowie beim Querschnitt auf freier Strecke (rechts).**

Die Ergebnisse der akustischen Messungen für die untersuchte Brücke in diesem Abschnitt geben jedoch Hinweise, dass der Beitrag des durch die Brücke abgestrahlten Schalls so gering ist, dass er von anderen Faktoren, wie unterschiedlicher Bodenbeschaffenheit zwischen Brückenquerschnitt und Querschnitt auf freier Strecke überlagert wird. Für wissenschaftlich abgesicherte Erkenntnisse zur Schallabstrahlung von Stahl-Verbundbrücken sind jedoch Untersuchungen an weiteren Brücken der gleichen Bauweise notwendig.



**Abbildung 4: Pegeldifferenz zwischen Brückenquerschnitt (Mikrofon M2) und Querschnitt auf freier Strecke (Mikrofon M5). Positive Werte entsprechen höheren Pegeln am Brückenquerschnitt.**

### 4.3.3. Messungen und Auswertungen der Luftschallmessungen im Fernfeld

Die Messungen am 9. und 10. November 2020 waren aufgrund der Umgebungsbedingungen geeignet Differenzen zwischen Terzbandpegel an verschiedenen Messpunkten der Messstelle zu bilden. Die meteorologischen Bedingungen sind neutral zu klassifizieren (Windstill und Globalstrahlung < 60 W/m<sup>2</sup>).

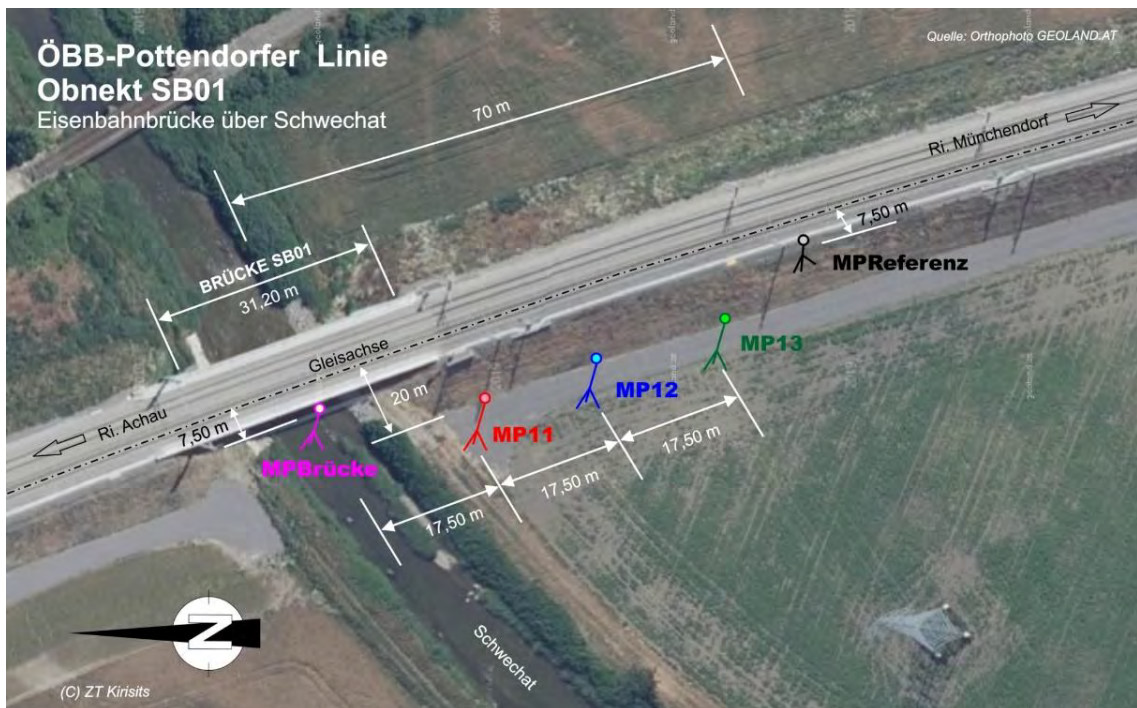


Abbildung 5: Luftbildaufnahme der Messstelle mit Lage und Bezeichnung der Messpunkte.

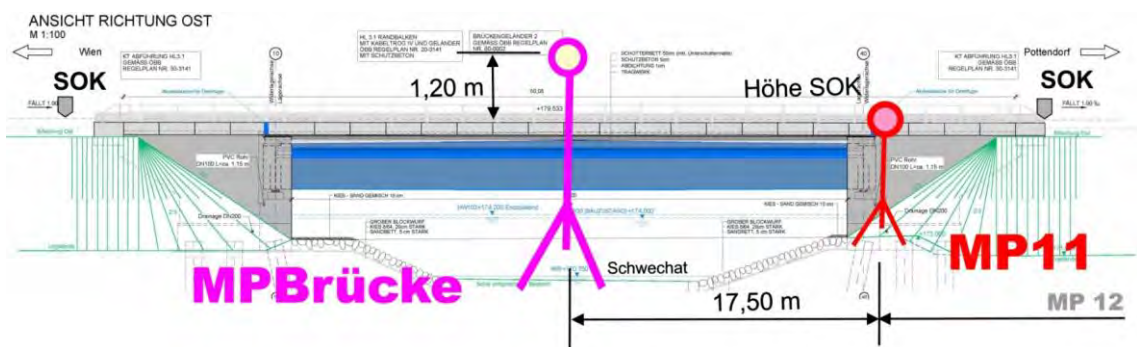


Abbildung 6: Schnitt der Messstelle mit Bezeichnung der Messpunkte.

Alle Differenzen beziehen sich gegenüber den Terzbandpegeln des Messpunktes MP-Referenz. Die Terzbandpegel wurden für die gesamte Vorbeifahrt inklusive 10 dB Abfall ermittelt, um jeweils die gesamte Schallenergie zu ermitteln die sich damit direkt den

Berechnungen von Richtlinien (ONR 305011 bzw. Anhang II nach RL 2002/49/EG) gegenüberstellen lassen.

Die größte Gruppe an Fahrzeugen aller Vorbeifahrten stellten Triebfahrzeuggarnituren des Nahverkehrs dar.

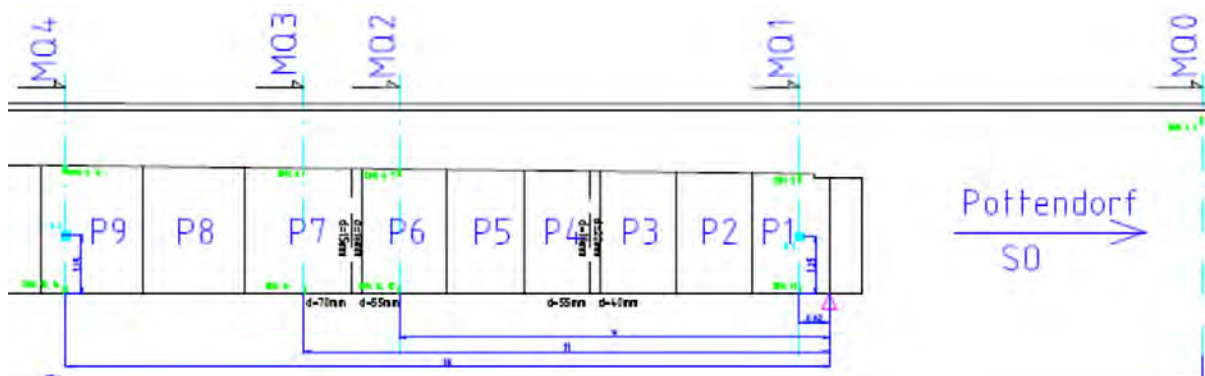
Die hier exemplarisch gezeigten Ergebnisse beziehen sich daher auf jene Fahrzeuggruppe und deren Vorbeifahrten auf dem Gleis in Richtung Münchendorf, zu welchem die Referenzpunkte MP-Referenz und MP-Brücke exakt in 7,5 m Abstand zur Gleisachse positioniert sind. Dafür waren 15 Vorbeifahrten voll auswertbar.

**Tabelle 2: Differenzen der gemessenen und berechneten A-bewerteten Gesamtpegel gegenüber dem Referenzpunkt.**

Messpunkt	Messungen Median (unteres / oberes Quartil) [dB]	Berechnung [dB]
MP-Brücke	-1,3 (-1,5 / -1,1)	-0,0
MP11	-4,4 (-5,3 / -4,0)	-4,6
MP12	-3,8 (-5,0 / -3,6)	-4,5
MP13	-5,1 (-5,7 / -4,2)	-4,5

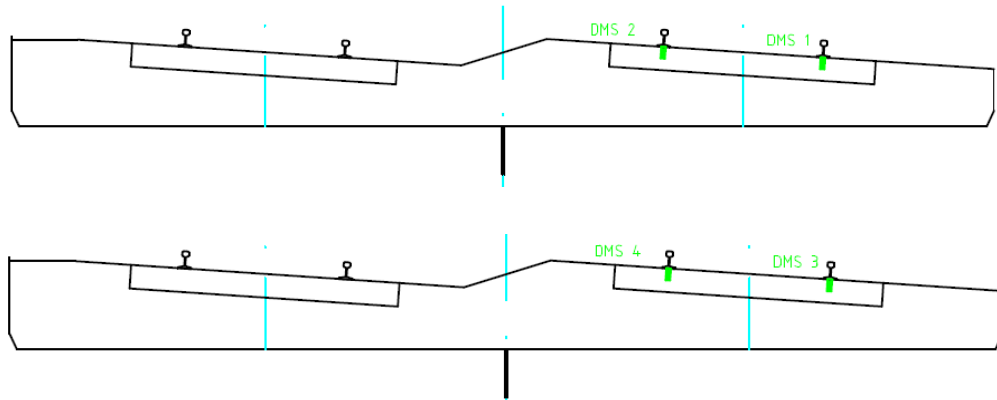
#### 4.3.4. Vibrationsmessungen

Es kamen 16 Beschleunigungssensoren, 16 Magnet DMS, 3 Neigungssensoren und 1 Laservibrometer zum Einsatz. Mit dem Laservibrometer wurden mehrere Punkte an einem Blech gemessen.



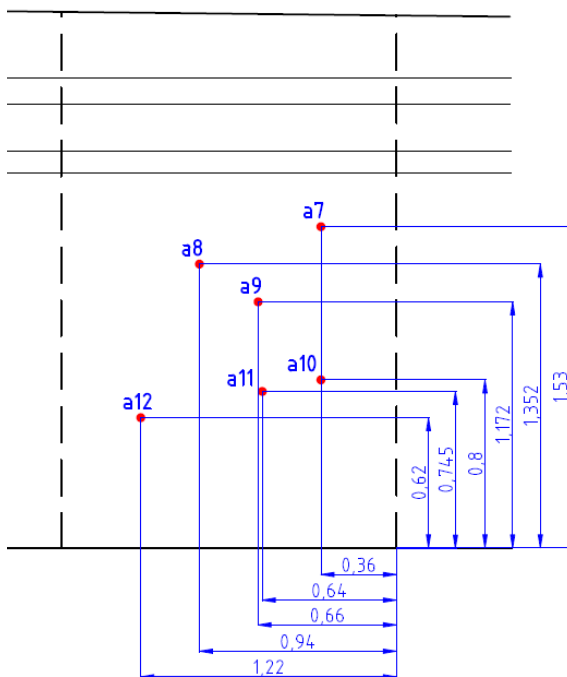
**Abbildung 7: Detailansicht Steg und MQ 1 bis 5.**

Die DMS unter der Schiene befanden sich in den MQ 0 und 5. Der Abstand zwischen MQ 0 und 5 betrug 50,4 m. Die DMS waren genau zwischen zwei Schwellen montiert. Eine Schematische Darstellung ist in Abbildung 8 zu sehen.

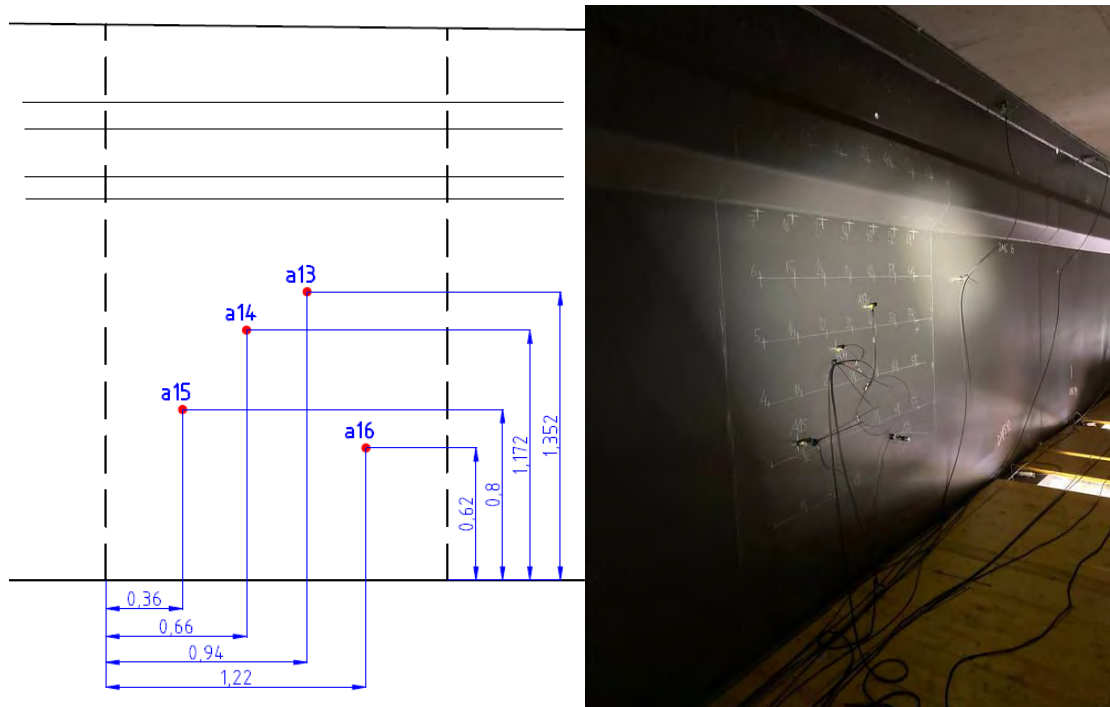


**Abbildung 8: Messquerschnitte 0 (oben) und 5 (unten).**

Im Messquerschnitt 1 waren 4 Beschleunigungssensoren, 2 DMS (5 und 11) und der Neigungssensor N1 montiert. Die Sensoren a1 und a2 waren unter den Schienen nahe an der Schwelle montiert. Die Sensoren a3 und a4 waren am Steg der Längsträger des SW-Tragwerks montiert. Die Schwingung des Stegs wurde in zwei Felder mittels sechs (P2: Abbildung 9) und vier (P5: Abbildung 9) Beschleunigungssensoren erfasst. Die Positionen wurden anhand einer Modalanalyse einer Platte so bestimmt, dass möglichst viele Eigenfrequenzen gemessen werden können.



**Abbildung 9: Beschleunigungssensoren a7 bis a12 am Blech P2.**



**Abbildung 10: Beschleunigungssensoren a13 bis a16 am Blech P5 zwischen den Tragwerken.**

Außer die Überfahrtmessungen wurde auch der Impulshammertest in zwei Abschnitten des Stags (P2 und P5) durchgeführt. Für den Impulshammertest wurden ein Messraster von 63 Messpunkten (P2: Abbildung 11) bzw. 56 Messpunkten (P5: Abbildung 12) mit einem Abstand von 20 x 25 cm erstellt. Sensor a7 war der Referenzsensor und blieb auf der Messposition a13, die Sensoren a8 bis a16 wurden der Reihe nach versetzt. Bei jeder Aufstellung wurden 10 Impulshammerschläge mit einer Kraftamplitude von ca. 500 - 1000 N mit einem Abstand von ca. 5 s an Position H1 und mit ca. 30 s Pause 1an der Position H2 eingeleitet. Die Messung ermöglichte eine sehr genaue Bestimmung der Eigenformen der jeweilige Platte, was sehr hilfreich für das Model Updaten war. Die Auswertungen sind in Kapitel 5.3 zusammengefasst.

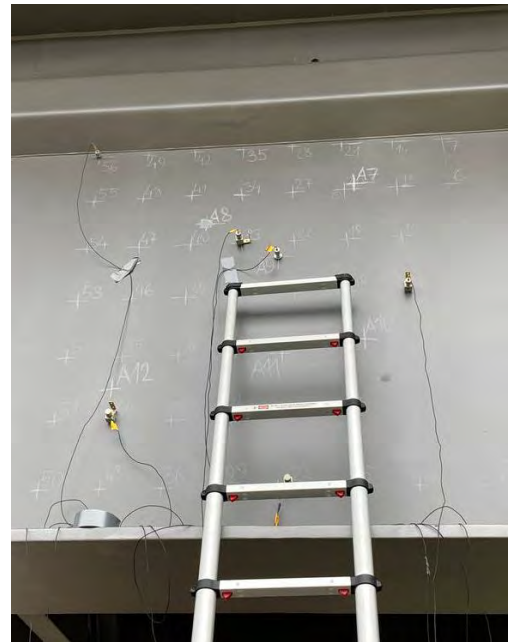
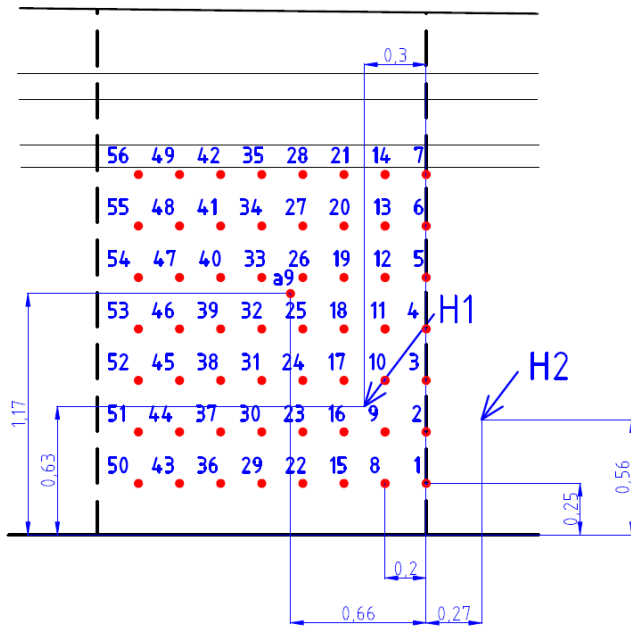


Abbildung 11: Messraster P2, Sensoraufstellung bei Impulshammer Test Nr. 12.

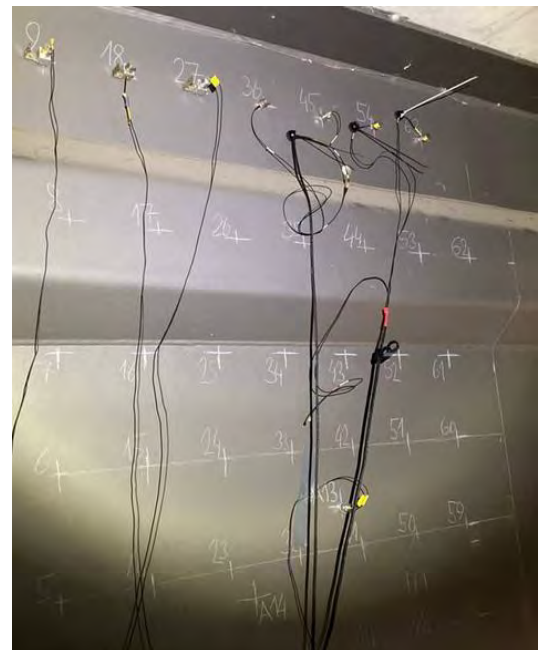
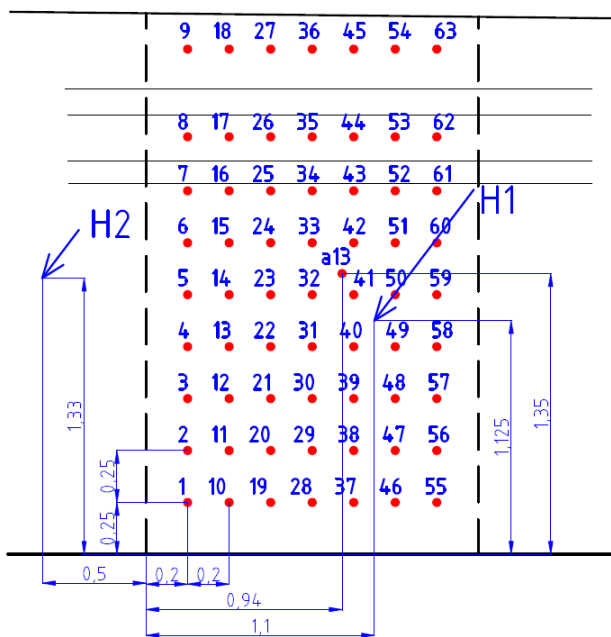


Abbildung 12: Messraster P2, Sensoraufstellung bei Impulshammer, P5.

### 4.3.5. Messungen der Track Decay Rate (TDR) in Achau

Die Bestimmung der Track Decay Rate an den Schienen bei der Brücke über der Schwechat hat einmal auf der Brücke und einmal am Bahndamm stattgefunden.

Insgesamt zeigt sich eine jeweils vergleichbare TDR, womit hinsichtlich der später durchgeführten Vergleiche mit Berechnungen keine Anpassungen der Schienentransferfunktion notwendig ist. Die Abstrahlung durch die Schienen ist im relevanten Untersuchungsgebiet konstant anzunehmen.

Abbildung 13 zeigt den Verlauf der vier gemessenen TDR jeweils an der Brücke und am Damm für die jeweils vertikale und horizontale Anregung. Zusätzlich sind auch die TSI Grenzwerte für den Bereich von 250 bis 5000 Hz dargestellt. Details zu den Messungen sind in Anhang D dargestellt.

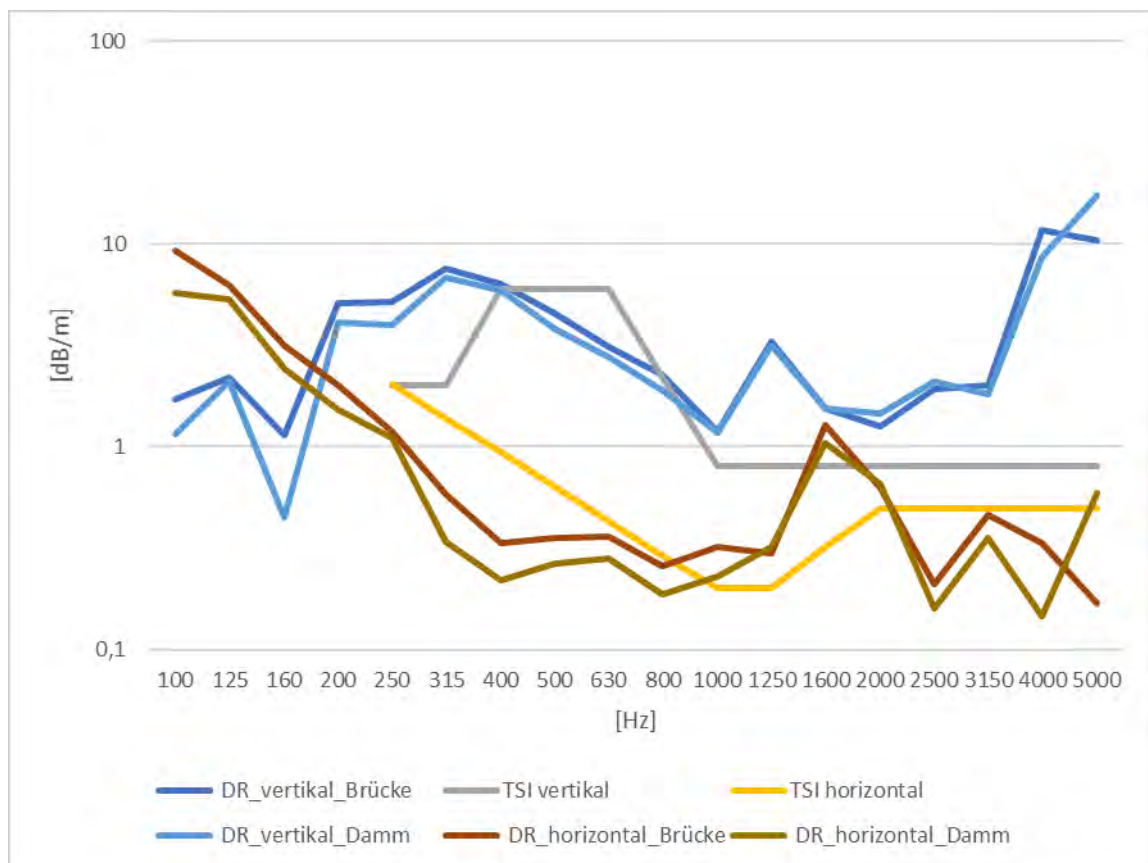


Abbildung 13: Ergebnisse der TDR Messungen in Achau.

## 4.4. Vibro-akustische Messungen bei der Brücke in Knittelfeld

### 4.4.1. Allgemeines zur Messstelle

Der Aufbau der Messstelle fand am 6.04.2022 statt. Hier wurde auch ein SIPO von den ÖBB für die Montage von DMS und Beschleunigungssensoren an der Schiene bereitgestellt. Gemessen wurde am 6., 7. und 8.4.2022. Eine Überfahrt der Brücke ist in der Abbildung 14 dargestellt.



**Abbildung 14: Brücke (oben) sowie Nahaufnahme von Zugüberfahrt (unten) (Ansicht von Süden).**



#### 4.4.2. Akustische Messungen im Nahfeld und Fernfeld

Die einzelnen Messungen ermöglichten zwar wie in Abschnitt 4.2 zur Brücke in Achau die geplanten Vergleichsuntersuchungen, waren aber durch wesentliche Kurvengeräusche am Referenzpunkt (M5-M8) beeinflusst (siehe Abbildung 15). Die Störgeräusche beeinflussen den gesamten A-bewerteten Pegel, liegen aber in den Terzbandanalysen wie erwartet in höheren Frequenzbändern über 1000 Hz während die erwarteten Brückengeräusche jedenfalls unter 1000 Hz aufzusuchen sind.

Die Vergleiche (Abbildung 16 und Abbildung 17) zeigen deutliche Differenzen entsprechend dieser Hypothesen und damit die zu erwartenden Charakteristik. Nachdem sich die Aufgabenstellung auf die Brückengeräusche beschränkt, wird sich die weitere Auswertung in Kapitel 6 auf den Bereich bis 1000 Hz beschränken, in dem eine Erhöhung der Pegel, angenommen aufgrund der Brückengeräusche, beobachtet wurde.

Es ist zu beachten, dass die Messungen, simultan stattgefunden haben. Die erfassten Züge (30 Personenzüge und 32 Güterzüge) sind daher die gleichen für beide Grafiken. Das Auftreten einzelner Peaks (wie beispielsweise bei 1000 Hz) im Frequenzspektrum tritt im Nahbereich wesentlich stärker auf als in größeren Abständen, welche eine viel breitere und damit ausgleichende Einwirkung von Geräuschen am gesamten vorbeifahrenden Zug als auch relevanten Streckenabschnitt beinhaltet.

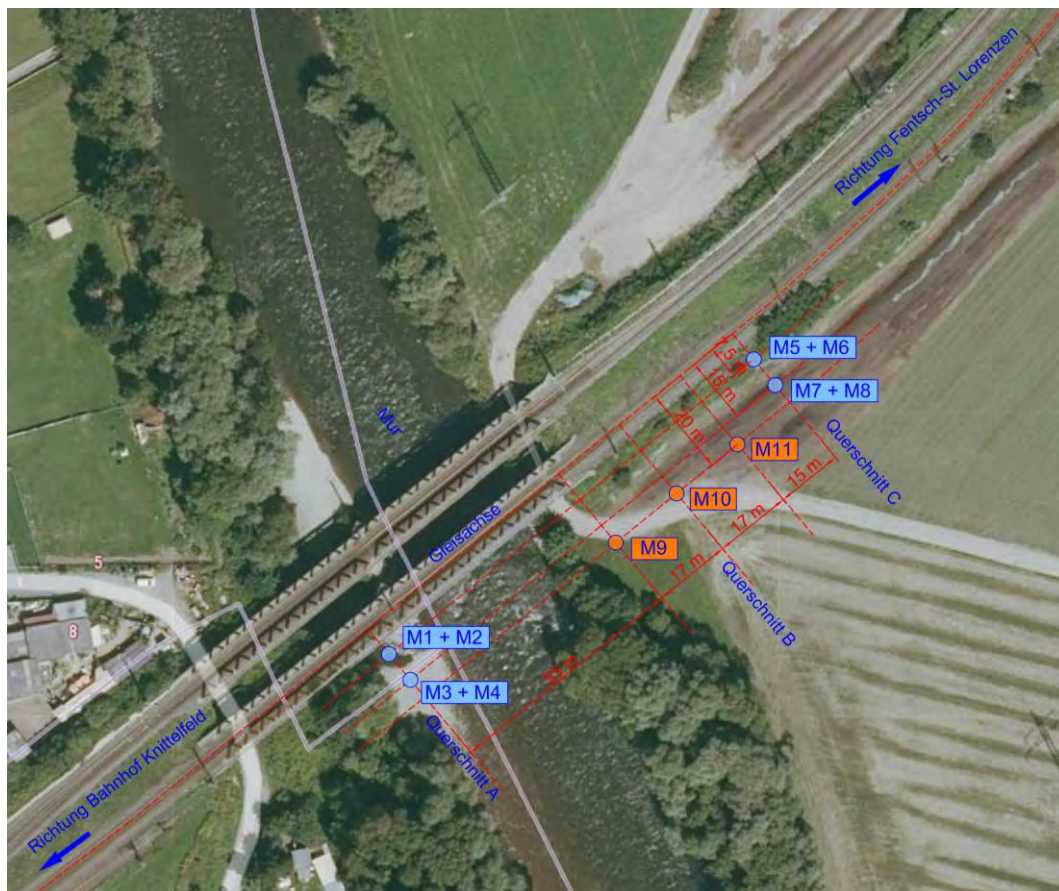
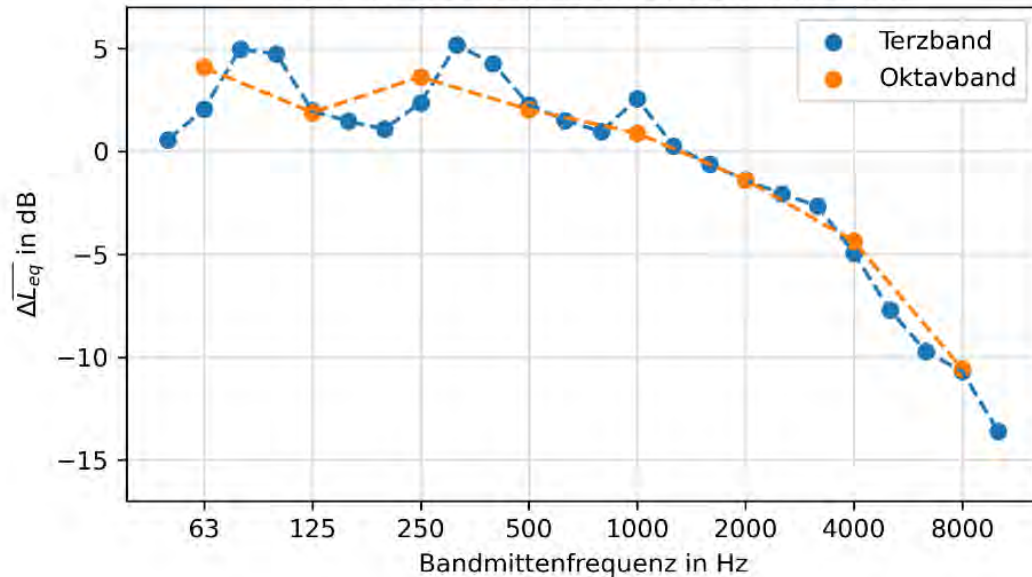


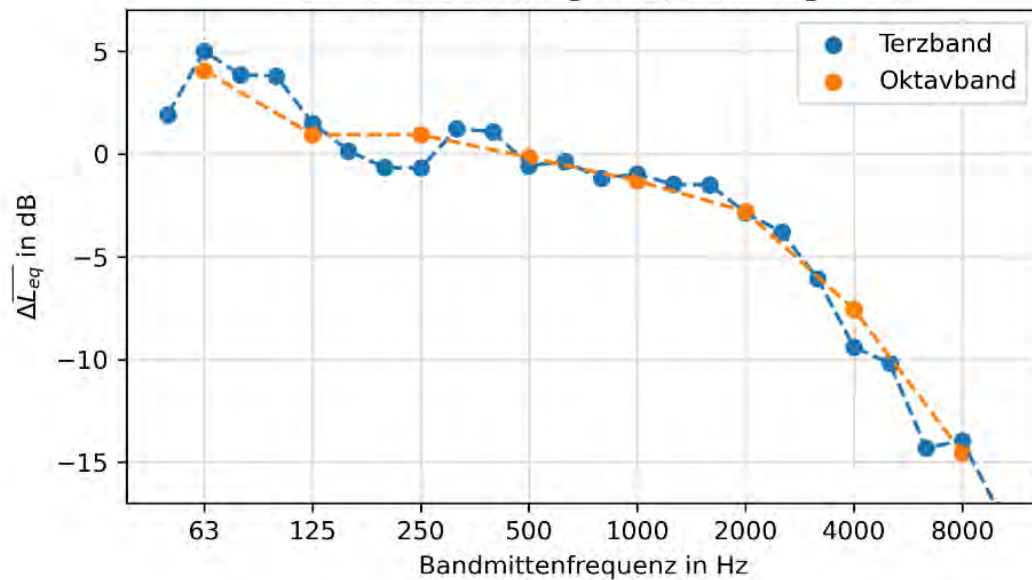
Abbildung 15: Luftbildaufnahme der Messstelle mit Lage und Bezeichnung der Messpunkte.

Mittlere Pegeldifferenz zwischen Brücken-  
 und Referenzquerschnitt - 7,5 m Abstand 1,2 m SOK  
 Gleis 1, Personenzüge: 30, Güterzüge: 32



**Abbildung 16: Pegeldifferenz zwischen Brückenquerschnitt und Querschnitt auf freier Strecke. Positive Werte entsprechen höheren Pegeln am Brückenquerschnitt.**

Mittlere Pegeldifferenz zwischen Brücken-  
 und Referenzquerschnitt - 15 m Abstand 1,2 m SOK  
 Gleis 1, Personenzüge: 30, Güterzüge: 32



**Abbildung 17: Pegeldifferenz zwischen Brückenquerschnitt und Querschnitt auf freier Strecke. Positive Werte entsprechen höheren Pegeln am Brückenquerschnitt.**

### 4.4.3. Vibrationsmessungen

Das Ziel der Vibrationsmessung war die Erfassung der Brückenbeschleunigung während mehreren Zugsüberfahrten. Der Fokus wurde auf drei Brückenelemente gelegt: Tragwerksmitte, Fachwerkskonstruktion und die seitlich montierte Abdeckbleche. Es kamen 16 Beschleunigungssensoren und 6 Magnet DMS zum Einsatz. Vier DMS wurden auf der Schienenunterkante montiert um die Achslasten, Achsabstände und Geschwindigkeit der überfahrenden Züge zu erfassen. Die DMS waren genau zwischen zwei Schwellen montiert, der Abstand zwischen denen betrug 29,6 m. Die Positionen der DMS und den zwei Beschleunigungssensoren, die ebenfalls auf der Schiene montiert wurden, sind in der Abbildung 18 und Abbildung 19 zu sehen.



Abbildung 18: DMS 3 und DMS 4 bei MQ3.

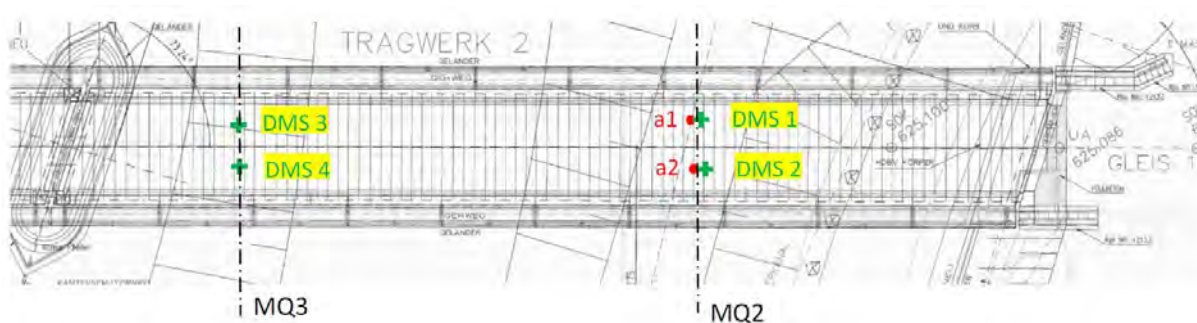


Abbildung 19: Beschleunigungssensoren a1 und a2 und die Magnet DMS 1 bis 4.

Die Beschleunigung des Tragwerks in vertikaler Richtung wurde mittels vier DMS im Brückenmitte erfasst. Diese befanden sich auf dem Blech die direkt mit Schotter zugeschüttet wurde, als auch auf der unteren Seite des Stahlprofils (siehe Abbildung 20 und Abbildung 21).

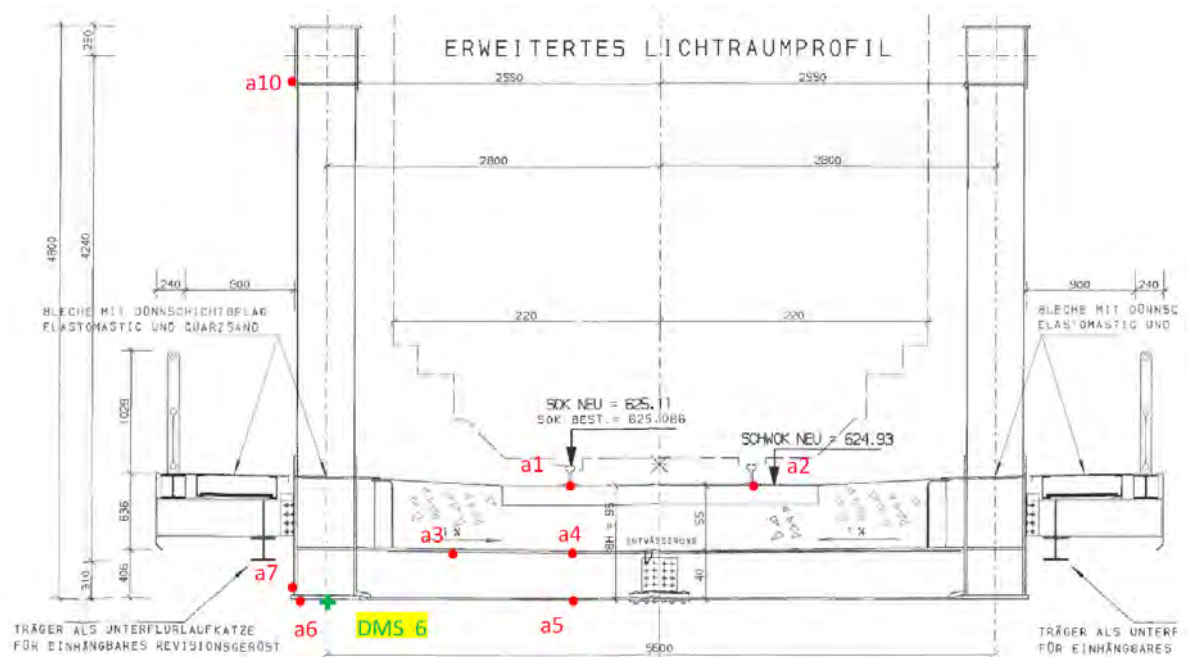


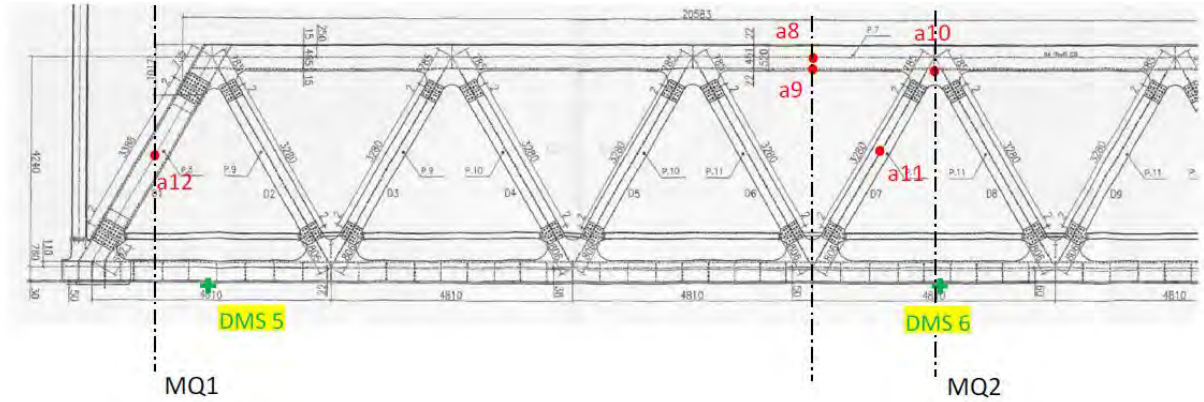
Abbildung 20: Übersicht der Sensoren im MQ2.



Abbildung 21: MQ 2, Unterseite.

Auf dem Fachwerk wurden fünf Beschleunigungssensoren montiert, die die Beschleunigung in horizontaler Richtung gemessen haben. Beschleunigungssensoren a11 und a12 sind in der Mitte der Diagonalen montiert, a8 ist in der Mitte des Obergurts, a9 ist an der Unterkante des

Obergurts, a10 ist in der Verlängerung der Unterkante des Obergurts. Die Positionen sind in der Abbildung 22 und Abbildung 23 zu sehen.

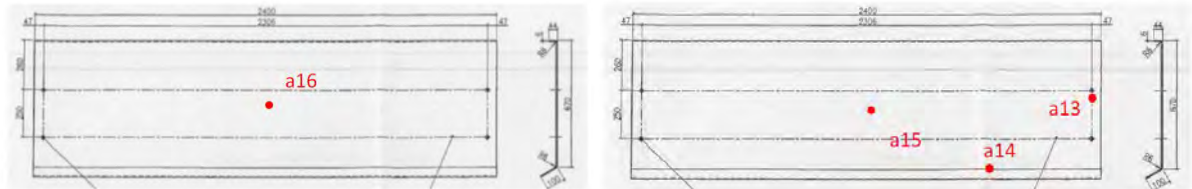


**Abbildung 22: Fachwerk bestückt mit 5 Beschleunigungssensoren a 8 bis a12.**



**Abbildung 23: Messquerschnitt 2 mit Beschleunigungssensoren a 8 bis a11.**

Als weitere potenzielle Lärmquelle wurden die Abdeckbleche identifiziert, die sich an beiden Seiten der Brücke befanden. Am 2. Blech von links wurde der Beschleunigungssensor a16 montiert und am 7. Blech von links befinden sich die Sensoren a13 bis a15. a15 und a16 sind jeweils in der Mitte, a14 beim Knick in 1/4 der Länge, a13 unterhalb der oberen Schraube (siehe Abbildung 24 und Abbildung 25).



**Abbildung 24: Abdeckbleche bei MQ1 (links) und MQ 2 (rechts).**



**Abbildung 25: MQ 2, Abdeckblech.**

Die Geräte und Sensoren werden im Rahmen der Qualitätssicherung regelmäßig kalibriert<sup>1</sup>. Die Daten wurden mit einer Samplerate von 10240 Hz erfasst. Die Zeitsignale wurden mit DasyLab 14.0.1 aufgezeichnet und für die spätere Auswertung gespeichert. Die Auswertungen der Messdaten wurden gemeinsam mit den Ergebnissen der Simulation im Kapitel 5.4 dargestellt.

<sup>1</sup> das AIT ist akkreditierte Prüfstelle im Bereich Akustik.

#### 4.4.4. Messungen der Track Decay Rate (TDR) in Knittelfeld

Die Bestimmung der Track Decay Rate an den Schienen bei der Brücke in Knittelfeld hat einmal auf der Brücke und einmal am Bahndamm stattgefunden. Details zu den Messungen sind in Anhang E dargestellt.

Abbildung 26 zeigt den Verlauf der vier gemessenen TDR jeweils an der Brücke und am Damm für die jeweils vertikale und horizontale Anregung. Zusätzlich sind auch die TSI Grenzwerte für den Bereich von 250 bis 5000 Hz dargestellt.

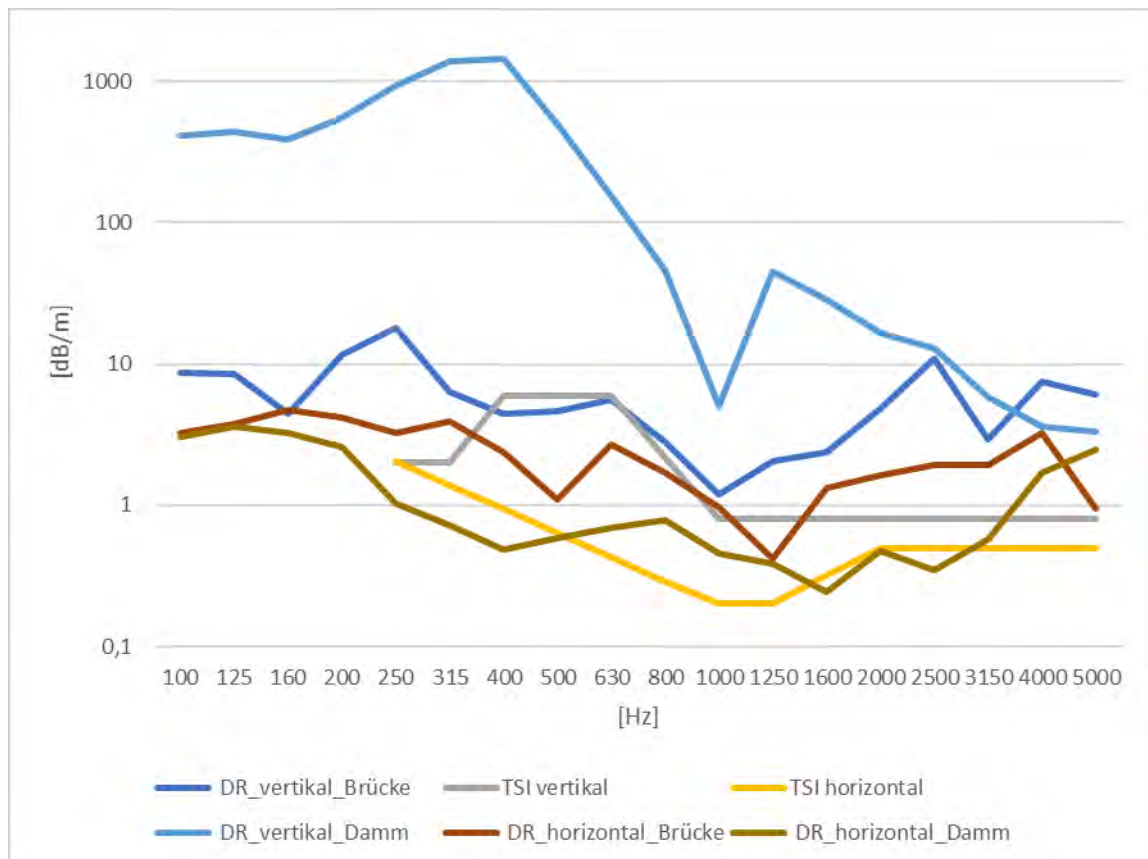


Abbildung 26: Ergebnisse der TDR-Messungen in Knittelfeld.

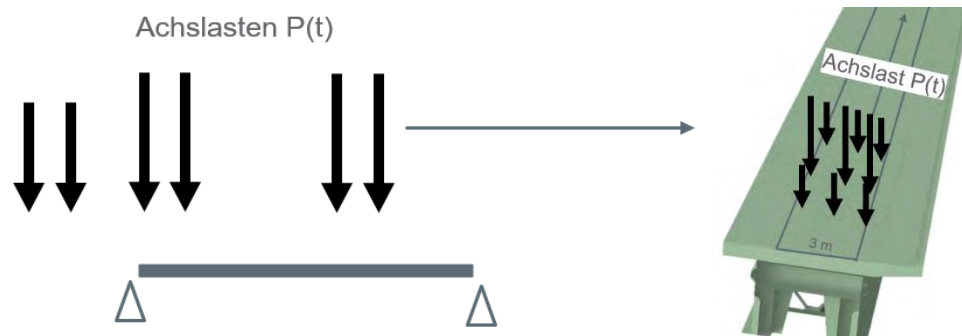
Der gemessene TDR-Pegel der vertikalen Anregung am Damm ist besonders hoch<sup>2</sup> und würden auf gänzlich andere Rollgeräusche aufgrund der Schienenabstrahlung (und damit Schienentransferfunktion in der Berechnung) hindeuten. Die Berücksichtigung dieser möglichen Einflussgröße erfolgte in Kapitel 6 jedoch durch Variation der Schienentransferfunktion und Beobachtung von Veränderungen in einzelnen Frequenzbändern der akustischen Immissionen entlang der Strecke.

<sup>2</sup> In diesem Zusammenhang sind folgende Unterschiede zwischen Damm und Brücke zu betrachten: während am Damm Betonschwellen vorhanden waren, waren auf der Brücke Holzschwellen eingebaut, am Damm war eine andere Schienentypen als auf der Brücke vorhanden und diese war beim Messpunkt 11 der TDR-Messung geschweißt (siehe Anhang E, Abbildungen 85 bis Abbildung 89).

## 5. BAUDYNAMISCHE BERECHNUNGEN

### 5.1. Allgemeines zu den FE Berechnungen

Begleitend zu den Messungen der zwei ausgewählten Brücken (Achau und Knittelfeld) wurden im Anschluss mehrere Überfahrtsberechnungen mit Hilfe von Finite-Elemente Software Ansys Mechanical 21R1 durchgeführt. Die mittels magnetischen DMS erfassten Züge wurden in Form von bewegten Lasten über die Brücken mit der gemessenen Überfahrtsgeschwindigkeit angebracht. Die Schienen, Schienenbefestigungen, Schwellen und Schotter wurden nicht explizit modelliert, sondern auf vereinfachte Weise abgebildet. Die Achslasten wurden Normgerecht (EN1991-2) in Längs- und Querrichtung verteilt und direkt auf die Betonplatte aufgebracht. Die Schienenrauigkeit und die Steifigkeit der Schienenbefestigungen wurden als durch eine zusätzliche zeitabhängige Komponente der Achslasten berücksichtigt. (siehe Abbildung 27).



**Abbildung 27: Schematische Darstellung der Achslasten.**

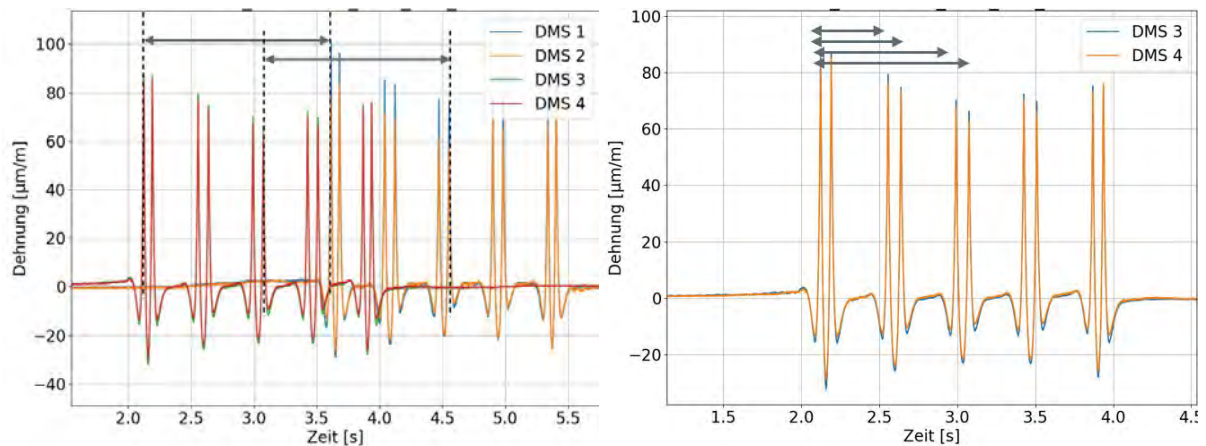
Die dynamischen Berechnungen wurden mit einem Zeitschritt von 0.001 Sekunden durchgeführt, damit alle relevanten Eigenformen richtig abgebildet werden können. Die Schienenrauigkeit wurde nicht direkt gemessen, ihre Auswirkung wurde aber annähernd als eine dynamische Kraft mit der Charakteristik vom weißen Rauschen berücksichtigt. Die Charakteristik wurde basierend auf dem Frequenzgehalt der gemessenen Schienenschwingung angepasst und in die Berechnung miteinbezogen.

#### 5.1.1. Bestimmung der Achslasten

Die tatsächlichen Achslasten, Achsabstände und Überfahrtsgeschwindigkeit des Zuges für jeweiliger Überfahrt wurden mit Hilfe der magnetischen DMS ermittelt, die vor und nach der Brücke auf der Schienenunterseite montiert wurden. Für die Kalibrierung wurden die Einzelüberfahrten einer Lok herangezogen, deren Achslasten dem Datenblatt entnommen wurden. Nachdem sich die Angaben zur Achslasten auf die maximale Radsatzlast beziehen, können die tatsächlichen Achslasten davon leicht Abweichen, was zur gewissen Unschärfe in der Achslasterkennung führt.



Die Brückenschwingungen werden jedoch von den Achsabständen und der Überfahrtsgeschwindigkeit maßgebend beeinflusst und diese konnten mit einer höheren Genauigkeit bestimmt werden. Ein Beispiel der Überfahrt ist in der Abbildung 28 dargestellt.



**Abbildung 28: Bestimmung der Zuggeschwindigkeit(links) und des Achsenabstands(rechts).**

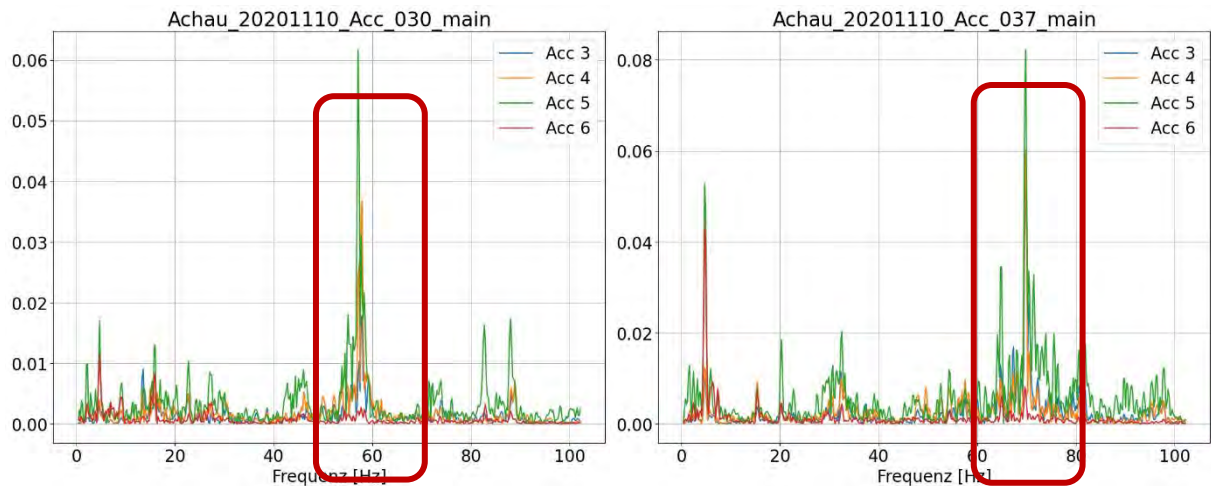
Eine vollständige Liste der erfassten Züge samt der Überfahrtsgeschwindigkeiten ist in Anhang A für Achau und Anhang B für Knittelfeld inkludiert.

## 5.2. Berechnungen mit einem Balkenmodell

Für die erste Überprüfung wurden beide Brücken durch Balkenmodelle abgebildet. Es wurden Überfahrtssimulationen von allen detektierten Zügen mit der gemessenen Geschwindigkeit durchgeführt und sowohl mit den Messdaten als auch mit dem dreidimensionalen Modell verglichen. Diese Simulationen dienen der Plausibilitätsprüfung der Achslasterkennung und der Auswahl des Ansatzes zur Berücksichtigung der Schienenrauigkeit.

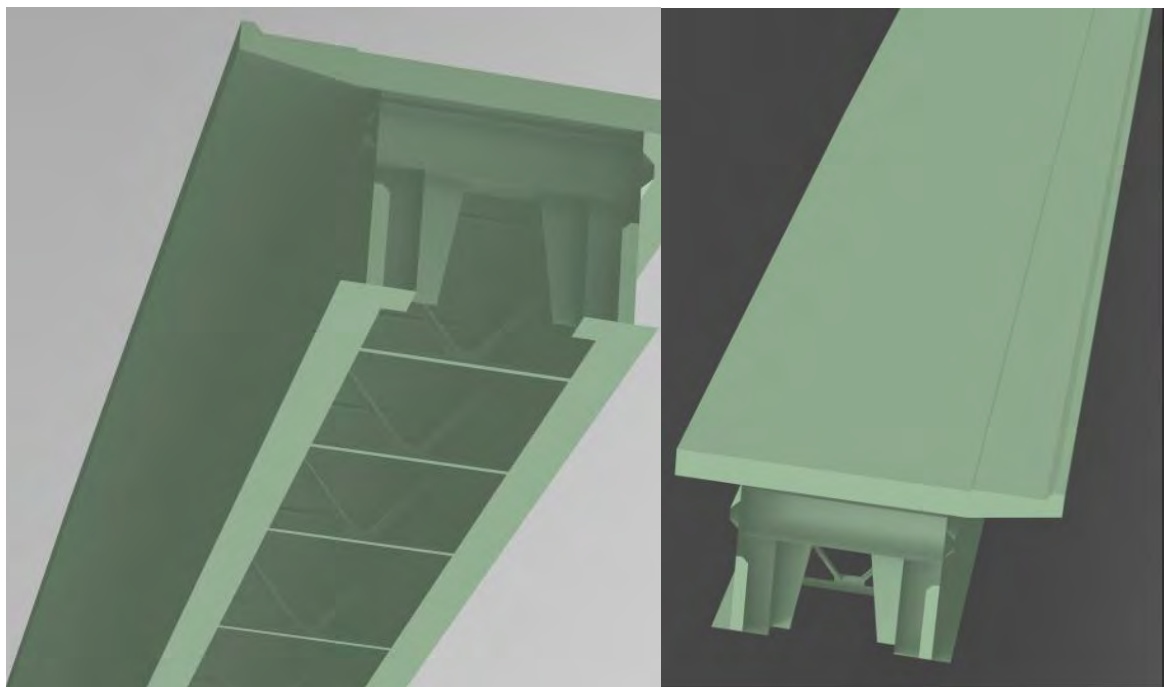
## 5.3. Berechnungen der Brücke in Achau

Die Hauptquelle der akustischen Abstrahlung der Brücke in Achau sind die fast 3 m hohen Stege. Um deren Schwinggeschwindigkeiten bei einer Überfahrt zu berechnen, wurde mit Ansys ein sehr detailliertes 3D FE-Modell mit Shell-Elementen erstellt (siehe Abbildung 30) und auf Basis der Messdaten validiert, wobei sich für die Validierung die Impulshammer Messung am besten eignete. Mehrere Überfahrten wurden dann simuliert und die Schwinggeschwindigkeiten des äußeren Stegs evaluiert. Basierend auf den Messdaten wurde der zu berücksichtigende Frequenzbereich auf 40-400 Hz beschränkt, wobei der Hauptfokus auf dem Bereich zwischen 40 und 120 Hz lag. Die Analyse der Messdaten und der Simulationen deutet darauf, dass der Einfluss der Anregung durch den Schwellenabstand von 60 cm dominant ist. Dies wurde exemplarisch in der Abbildung 29 dargestellt, indem der Frequenzgehalt zweier ähnlicher Züge mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten sich genau proportionell zum Unterschied der Geschwindigkeiten verschiebt. Dies wurde ebenfalls bei der Brücke in Knittelfeld beobachtet.



**Abbildung 29: Verschiebung der gemessenen Brückenbeschleunigung im Frequenzbereich.**

Es ist anzumerken, dass die gemessenen Zugsüberfahrten eine maximale Geschwindigkeit von 145 km/h hatten, was einer Anregungsfrequenz durch den Schwellenabstand von 67 Hz entspricht. Es ist zu erwarten, dass mit dem Anstieg der Überfahrtsgeschwindigkeit auf 200 km/h die Eigenfrequenzen des Stegs im Bereich 87-93 Hz stärker angeregt würden, was zu einer Erhöhung der akustischen Abstrahlung in diesem Frequenzbereich führen könnte.

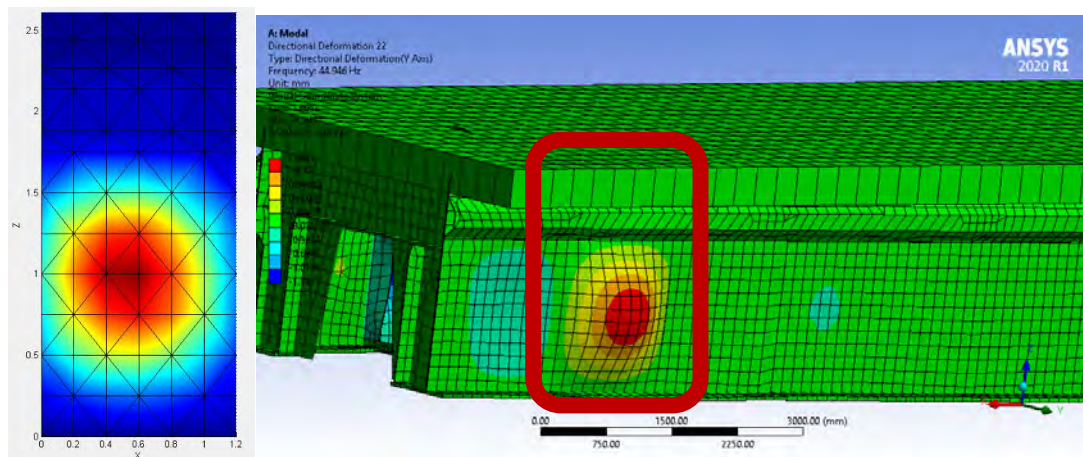


**Abbildung 30: FE-Modell der Brücke in Achau.**

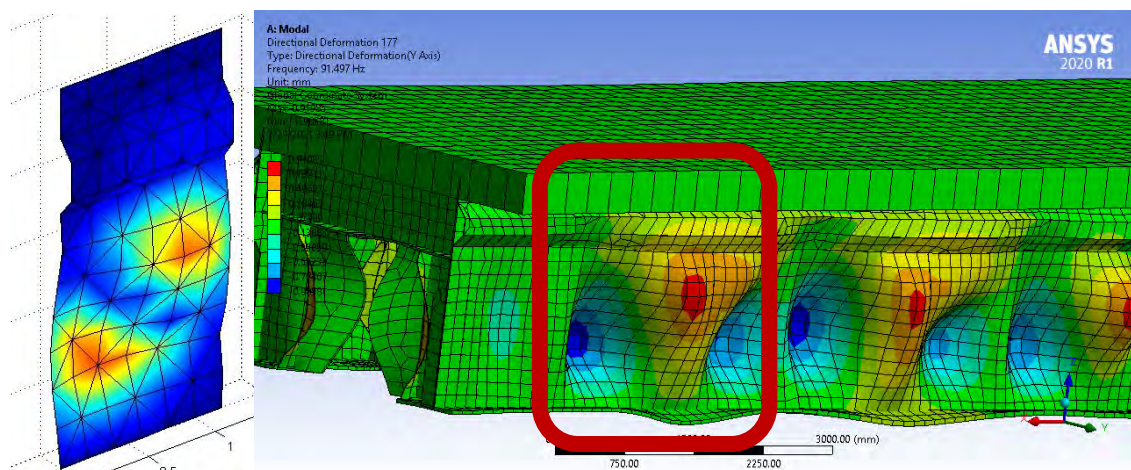
### 5.3.1. Validierung des Modells durch Eigenformen des Stegs

Die erste Validierung stütze sich auf den Vergleich der Eigenformen des Stegs. Diese wurden messtechnisch mittels Impulshammer unter Verwendung von 56 bis 63 Messpunkten pro Steg bestimmt. Dank genauer Modellierung und Berücksichtigung von allen Versteifungen wurde eine sehr gute Übereinstimmung erzielt. Diese ist visuell für die erste drei Eigenformen des Stegs in den Abbildung 31, Abbildung 32 und Abbildung 33 dargestellt.

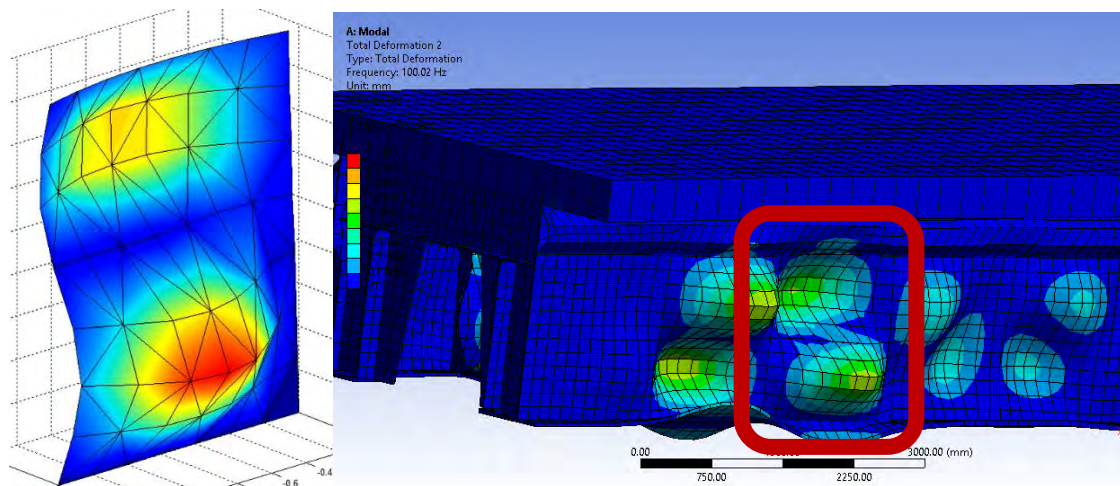
In Tabelle 3 ist der Vergleich der Eigenfrequenzen des Stegs bis 100 Hz aufgelistet.



**Abbildung 31: Vergleich zwischen der ersten gemessenen (links) und berechneten (rechts) Eigenform des Stegs.**



**Abbildung 32: Vergleich zwischen der zweiten gemessenen (links) und berechneten (rechts) Eigenform des Stegs.**



**Abbildung 33: Vergleich zwischen der dritten gemessenen (links) und berechneten (rechts) Eigenform des Stegs.**

**Tabelle 3: Vergleich der ersten vier gemessenen und berechneten Eigenfrequenzen.**

Eigenform	Messung [Hz]	Modell [Hz]	Abweichung
1	40.9 – 44.8	39.8 – 44.9	3 %
2	87.5	91.5	4 %
3	93.4	100.0 <sup>3</sup>	7 %
4	96.0	97.0	1 %

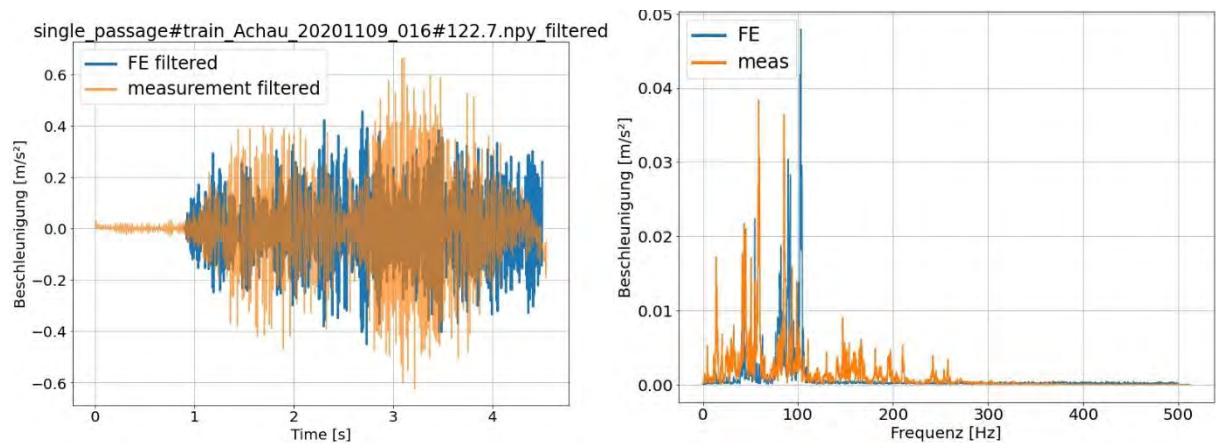
### 5.3.2. Simulation der Zugsüberfahrten

Nach der Verifikation vom Schwingungsverhalten der Stege mittels Eigenformen wurde die Verifikation auch auf den direkten Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Beschleunigungen bei ausgewählten Überfahrten ausgeweitet. Dieser Schritt dient der Überprüfung der korrekten Kraftübertragung zwischen Rad und Brücke. Bei wenigen Überfahrten konnte durch Analyse der Messdaten ein beschädigtes Rad (vermutlich einseitig abgeflacht) am Güterzug identifiziert werden. Dieses führte zur regelmäßigen, stoßartigen Belastung und verursachte eine erhebliche Erhöhung der auftretenden Beschleunigung. Diese Überfahrten wurden aus dem Prozess der Modellvalidierung ausgeschlossen.

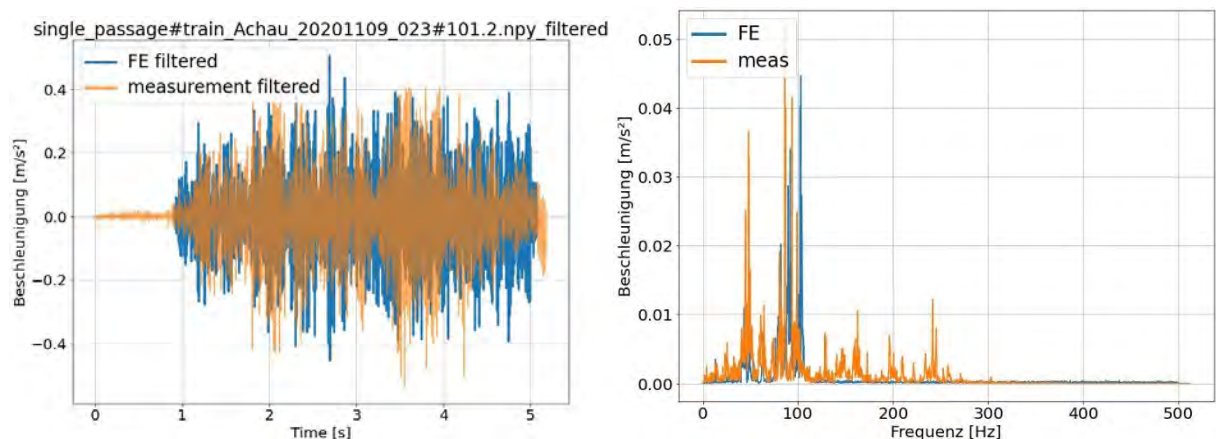
<sup>3</sup> Es ist zu beachten, dass 3. und 4. Eigenform gleicher (zweiter) Ordnung sind. Die Reihenfolge der Eigenfrequenzen hängt daher mit dem Verhältnis Höhe/Breite, sowie mit der Steifigkeit der Einspannung der Platte in den Randbereichen zusammen. Die siebenprozentige Abweichung der 3. Eigenform von der gemessenen ist vermutlich einer zu steif modellierten Verbindung im oberen Bereich geschuldet. Dies führt zur Änderung der Reihenfolge der aus FE-Simulation resultierenden Eigenfrequenzen im Vergleich zu der Messung. Die maximale Abweichung von 7% wurde trotzdem als durchaus akzeptabel bewertet, vor allem im Hinblick darauf, dass die anderen Eigenfrequenzen eine sehr gute Übereinstimmung vorweisen.

In der Abbildung 34 bis Abbildung 38 sind die Beschleunigungswerte bei ausgewählten Überfahrten dargestellt. Die Simulationsergebnisse sind im blau dargestellt, die Messdaten orange. Bei der Simulation wurden die Schwingungsformen bis zur Eigenfrequenz von 110 Hz berücksichtigt, während die dargestellten Messdaten Frequenzen bis 300 Hz beinhalten. Die Darstellung der gemessenen Beschleunigungen im Frequenzbereich zwischen 110 und 300 Hz diene der Überprüfung, ob maßgebende Schwingungskomponenten (die in der Simulation nicht berücksichtigt wurden) in diesem Frequenzbereich vorkommen.

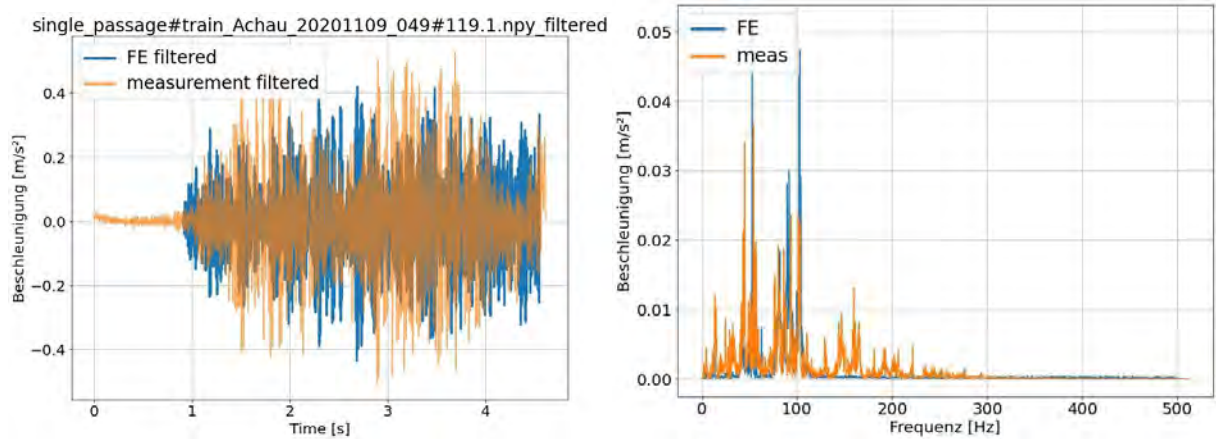
Dies war nicht der Fall. Es konnte eine gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und berechneten Beschleunigungswerten erzielt werden, vor allem im Falle der Personenzüge (Abbildung 34 bis Abbildung 37). Die Abbildung 38 zeigt dagegen ein Beispiel einer Güterzugsüberfahrt, bei der wesentlich höhere Beschleunigungen im Vergleich zur Simulation gemessen wurden. Dieser Unterschied kann mit dem oben genannten schlechteren Zustand der Räder begründet werden.



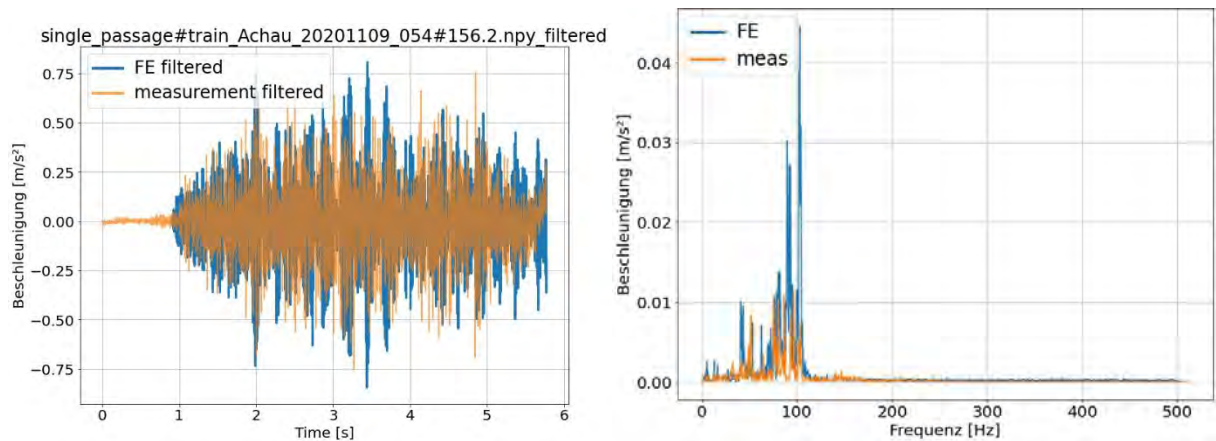
**Abbildung 34: Brückenschwingungen bei einer Zugsüberfahrt mit 122 km/h im Zeitbereich (links) und Frequenzbereich (rechts).**



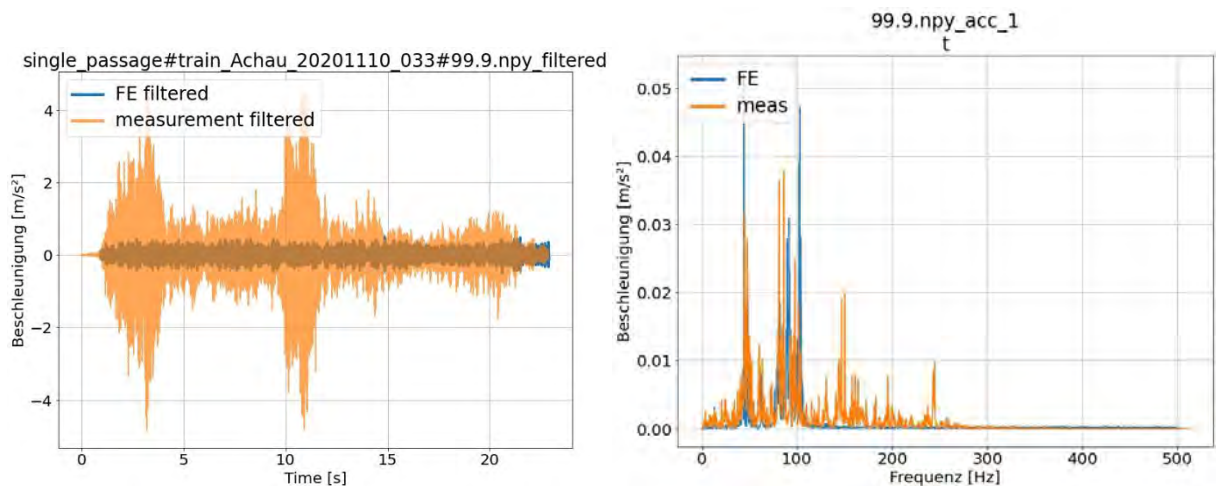
**Abbildung 35: Brückenschwingungen bei einer Zugsüberfahrt mit 101 km/h im Zeitbereich (links) und Frequenzbereich (rechts).**



**Abbildung 36: Brückenschwingungen bei einer Zugsüberfahrt mit 119 km/h im Zeitbereich (links) und Frequenzbereich (rechts).**



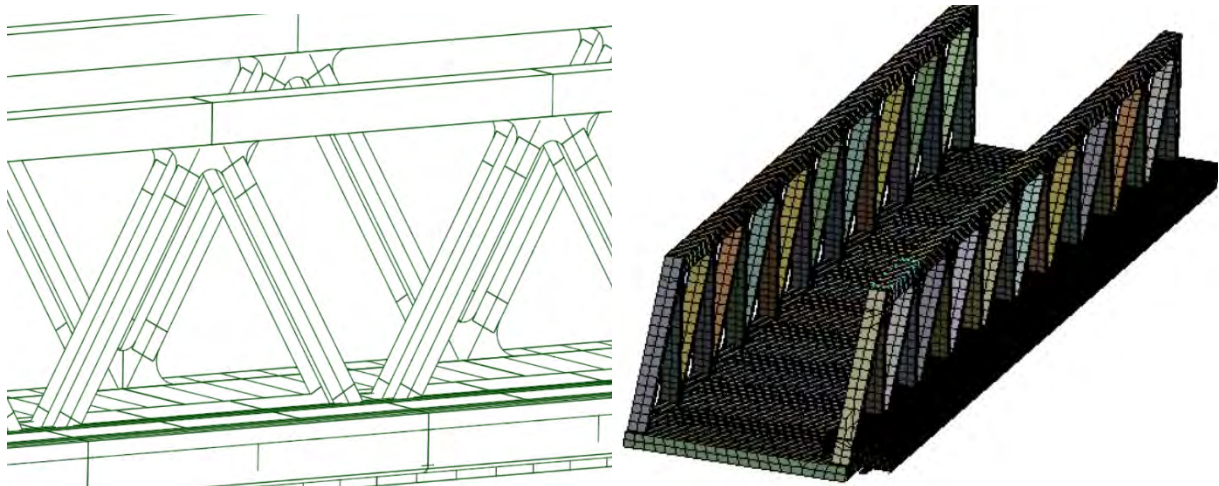
**Abbildung 37: Brückenschwingungen bei einer Zugsüberfahrt mit 156 km/h im Zeitbereich (links) und Frequenzbereich (rechts).**



**Abbildung 38: Brückenschwingungen bei einer Güterzugsüberfahrt mit 100 km/h im Zeitbereich (links) und Frequenzbereich (rechts).**

#### 5.4. Berechnungen der Brücke in Knittelfeld

Die Brücke im Knittelfeld befindet sich auf der Südbahnstrecke in einem Abschnitt mit maximaler örtlich zugelassener Geschwindigkeit von 110 km/h, wobei aufgrund einer Geschwindigkeitsbeschränkung im benachbarten Streckenabschnitt die Geschwindigkeiten kleiner als 90 km/h zu erwarten sind. Es ist eine 30 m lange Fachwerkbrücke über den Fluss Mur (siehe Abbildung 39).



**Abbildung 39: Dreidimensionales FE-Modell von der Knittelfeldbrücke.**

Im Gegensatz zur Achau-Brücke, konnten hier die Brückenkomponenten, die die Schallabstrahlung maßgeblich bestimmen, im Vorfeld nicht eindeutig identifiziert werden.

Daher wurden sowohl die seitlich montierte Abdeckbleche als auch das Fachwerk mit insgesamt 10 Beschleunigungssensoren bestückt und weiters für den Vergleich mit den FE-Simulationen herangezogen.

#### 5.4.1. FE Überfahrtsberechnungen

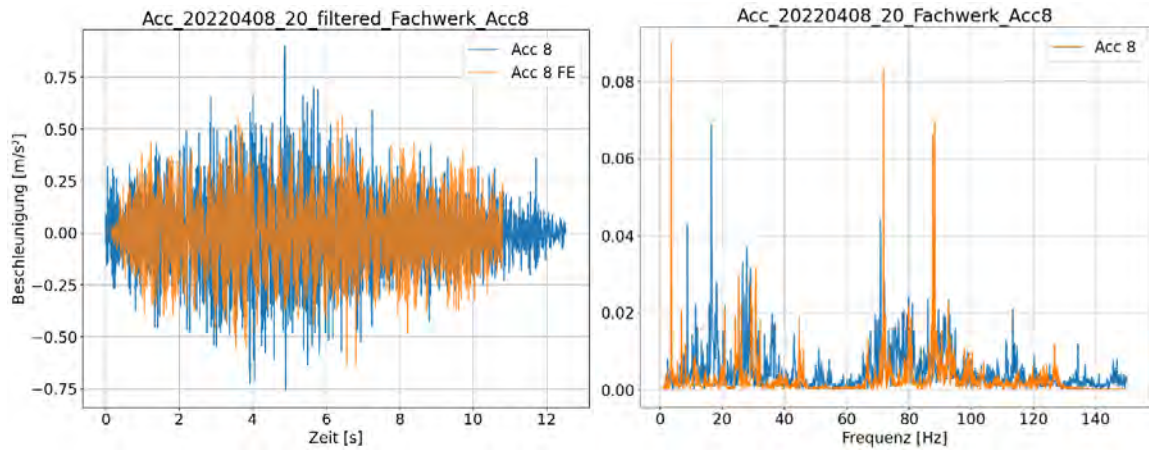
Es wurden über 80 Zugsüberfahrten aufgezeichnet, für die auch alle Zugparameter identifiziert werden konnten. Es handelt sich dabei um Rail-Jets, Talent, Desiro, sowie verschiedene Güterzüge, die in etwa die Hälfte aller Überfahrten ausmachten. Nach dem Erstellen und einer geringfügigen Anpassung des FE-Modells wurden alle Überfahrten nachgerechnet. Es wurde beobachtet, dass eine Vielzahl von Zügen einen Brems- oder Beschleunigungsvorgang während der Brückenüberfahrt vornimmt, was vermutlich mit dem naheliegenden Bahnhof, bzw. einer naheliegenden Kurve begründet ist. Diese Änderungen der Fahrtgeschwindigkeit konnten aufgrund ihrer Unregelmäßigkeit in der Simulation nicht abgebildet werden.

Die Brückenschwingungen, die eine Zugsüberfahrt mit variabler Geschwindigkeit verursacht, sind meist von geringerer Amplitude, da sich hier keine Resonanz einstellen kann. Das erschwert den Vergleich mit FE-Simulationen.

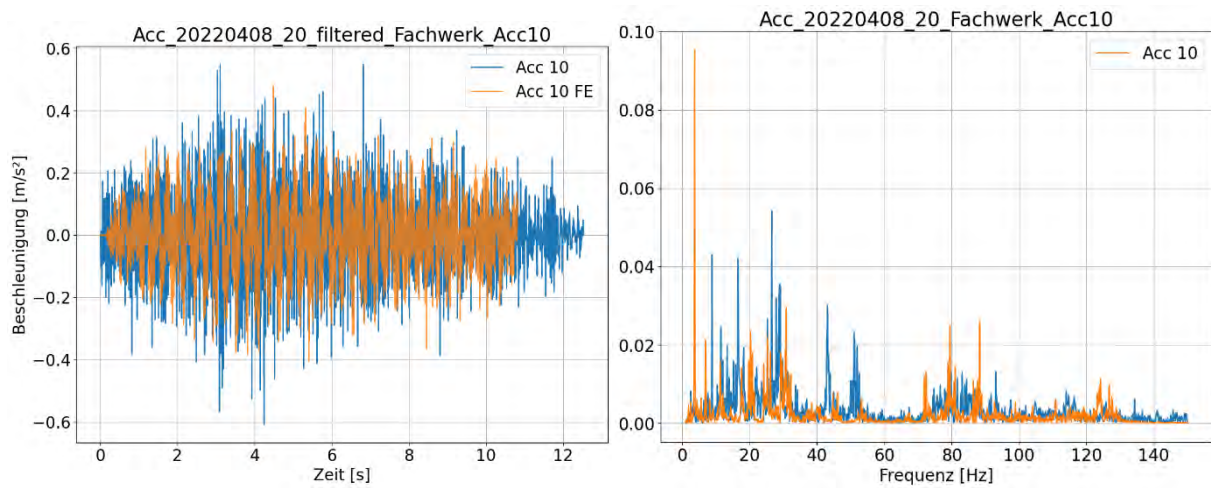
Es handelt sich um mittlere Zuggeschwindigkeit. Die zeitabhängige Geschwindigkeit, die aus der Betrachtung einzelnen Achse resultiert, wurde ebenfalls erhoben und in der Form von minimaler, mittlerer und maximaler Überfahrtsgeschwindigkeit ausgewertet. Die veränderliche Zuggeschwindigkeit wurde nicht direkt in den Simulationen verwendet, sondern als Grenzwertbetrachtung wurden jeweils drei separate Berechnungen für die erfassten Geschwindigkeiten durchgeführt. Es ist zu erwarten, dass die tatsächliche Brückenschwingung aufgrund der veränderlicher Anregungsfrequenz etwas kleinere Amplituden aufweist als die berechneten. Dies ist vor allem bei schwach gedämpften Systemen wie die Stegbleche (gemessene Dämpfung < 1%) zu erwarten.

In der Abbildung 40 bis Abbildung 50 sind die ausgewählten Überfahrtsimulationen (orange) mit den Messdaten (blau) verglichen. Dabei wurden separat die Beschleunigungssensoren am Fachwerk, am Hauptträger und den Abdeckblechen herangezogen. In der Simulation wurden die Eigenformen im Frequenzbereich bis 130 Hz berücksichtigt; der Vergleich mit Messdaten ist bis 150 Hz dargestellt. Bei den Messpunkten am Fachwerk und am Hauptträger konnte eine gute Übereinstimmung erzielt werden. Bei den Messpunkten an den Abdeckblechen war die Diskrepanz wesentlich höher, wobei die gemessenen Daten im Vergleich zur FE-Simulation eine höhere Amplitude aufwiesen. Als möglicher Grund dieser Diskrepanz wird die unklare Definition der Randbedingungen der Abdeckbleche angesehen, welche eine genauere Simulation verhindern. Die Randbedingungen, die durch die Wirkungsweise der Befestigung der Bleche an der Brückenkonstruktion bestimmt werden, sind schwierig abzuschätzen.

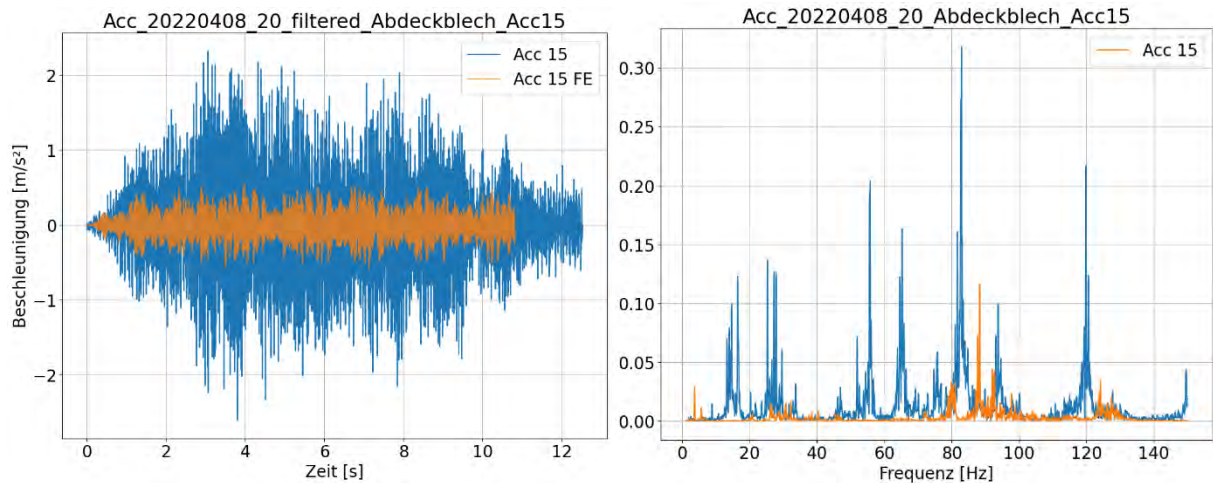




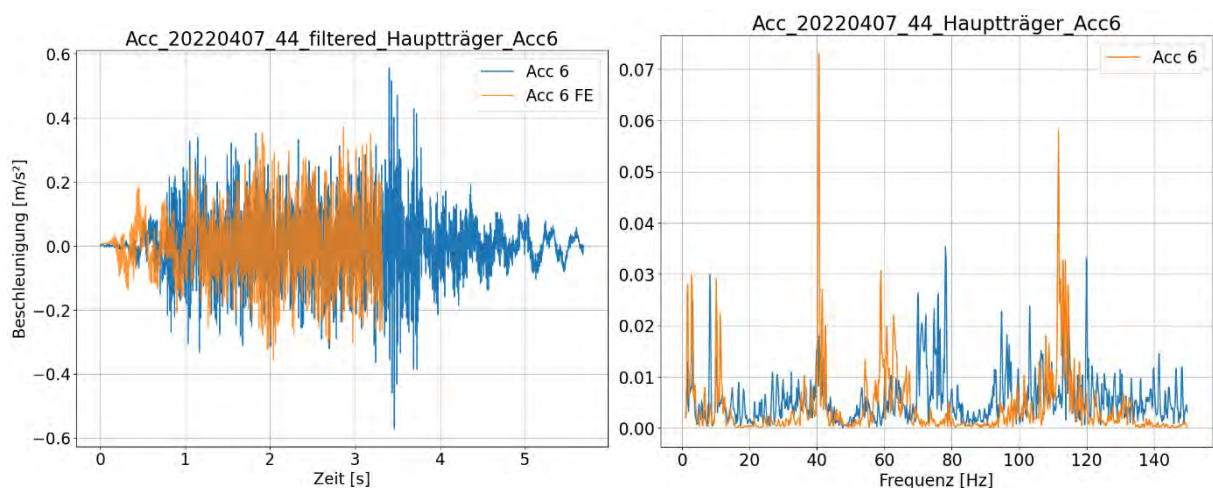
**Abbildung 40: Beschleunigungen am Fachwerk (Messpunkt a8) bei einer Überfahrt von Desiro mit 59 km/h im Zeitbereich (links) und Frequenzbereich (rechts).**



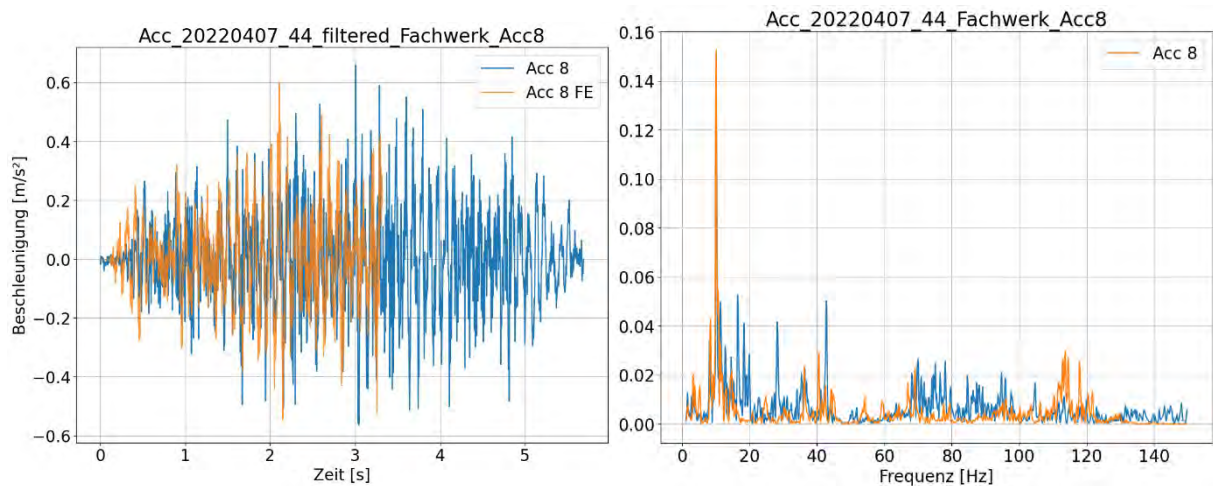
**Abbildung 41: Beschleunigungen am Fachwerk (Messpunkt a10) bei einer Überfahrt vom Desiro mit 59 km/h im Zeitbereich (links) und Frequenzbereich (rechts).**



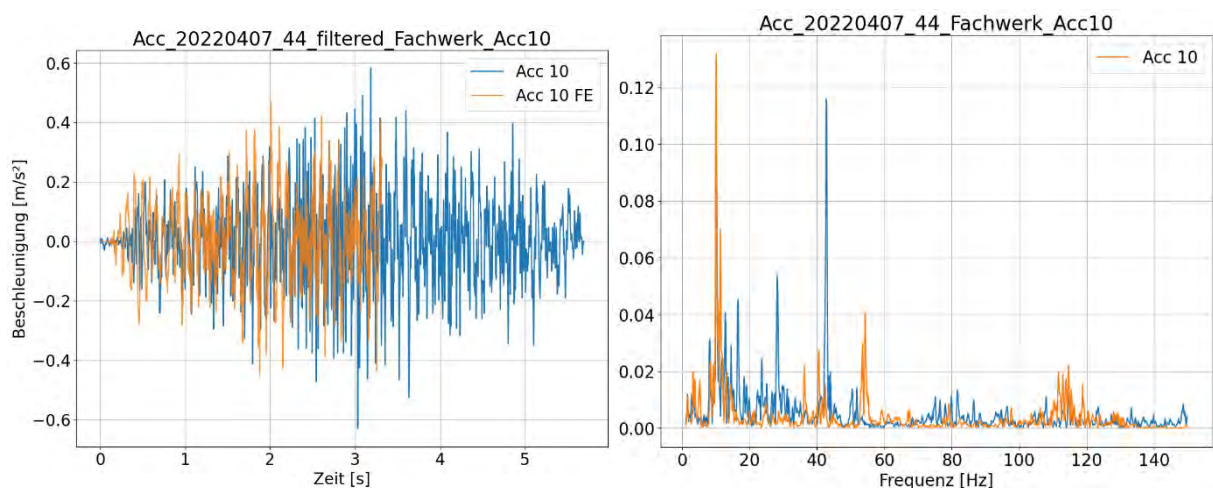
**Abbildung 42: Beschleunigungen am Abdeckblech (Messpunkt a15) bei einer Überfahrt vom Desiro mit 59 km/h im Zeitbereich (links) und Frequenzbereich (rechts).**



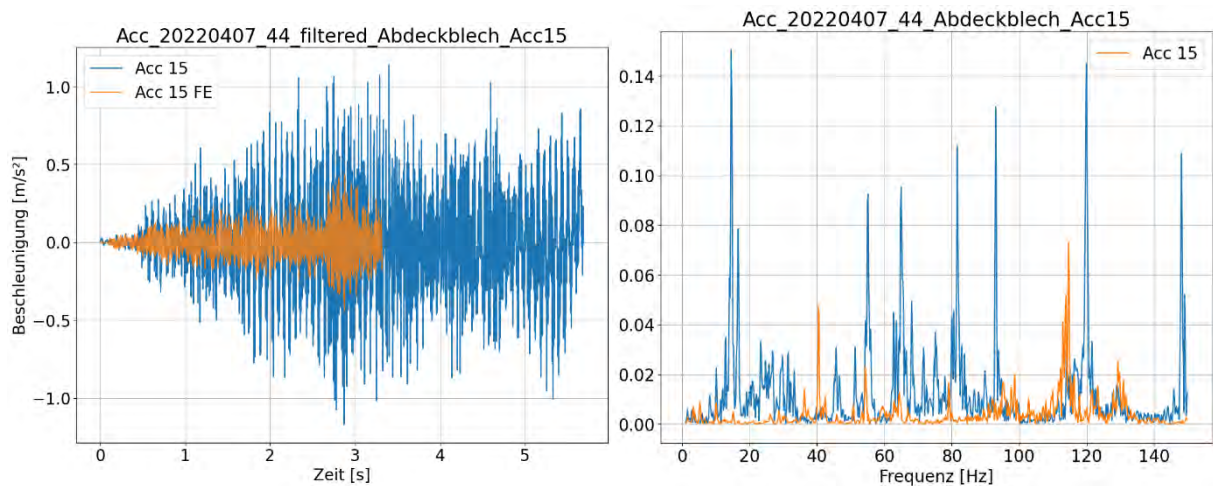
**Abbildung 43: Beschleunigungen am Hauptträger (Messpunkt a6) bei einer Überfahrt vom Talent mit 89 km/h im Zeitbereich (links) und Frequenzbereich (rechts).**



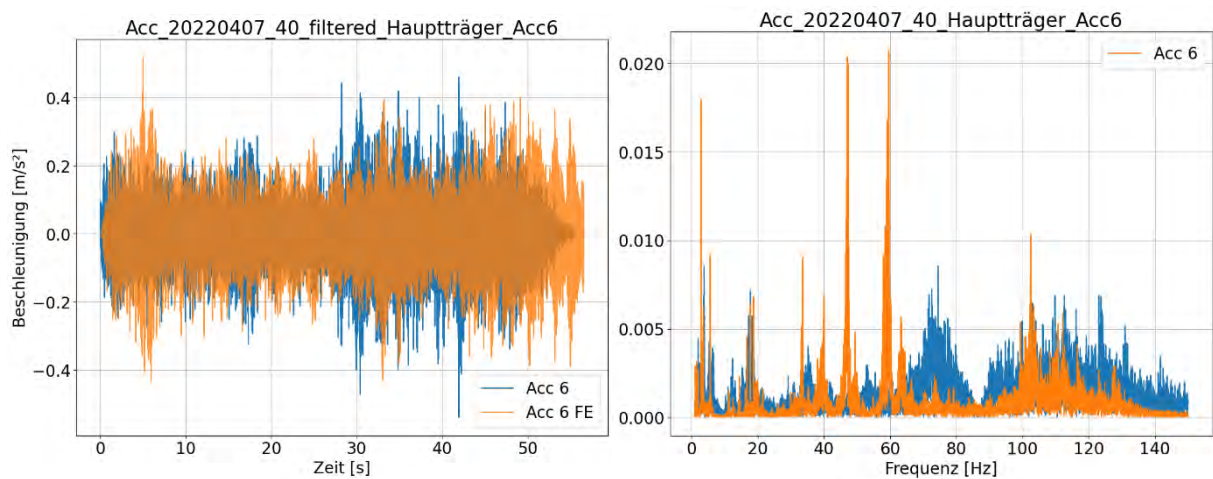
**Abbildung 44: Beschleunigungen am Fachwerk (Messpunkt a8) bei einer Überfahrt vom Talent mit 89 km/h im Zeitbereich (links) und Frequenzbereich (rechts).**



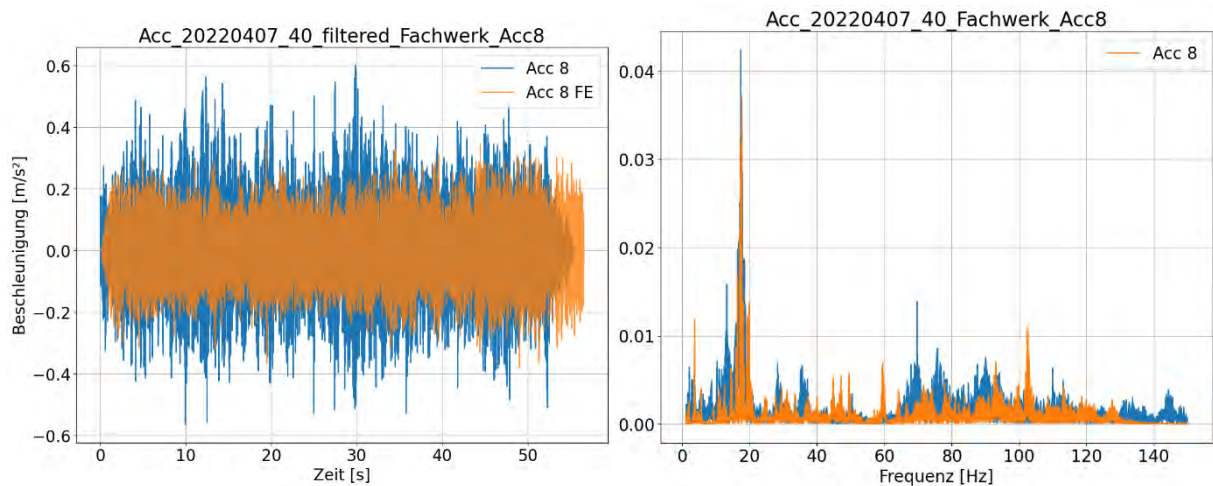
**Abbildung 45: Beschleunigungen am Fachwerk (Messpunkt a10) bei einer Überfahrt vom Talent mit 89 km/h im Zeitbereich (links) und Frequenzbereich (rechts).**



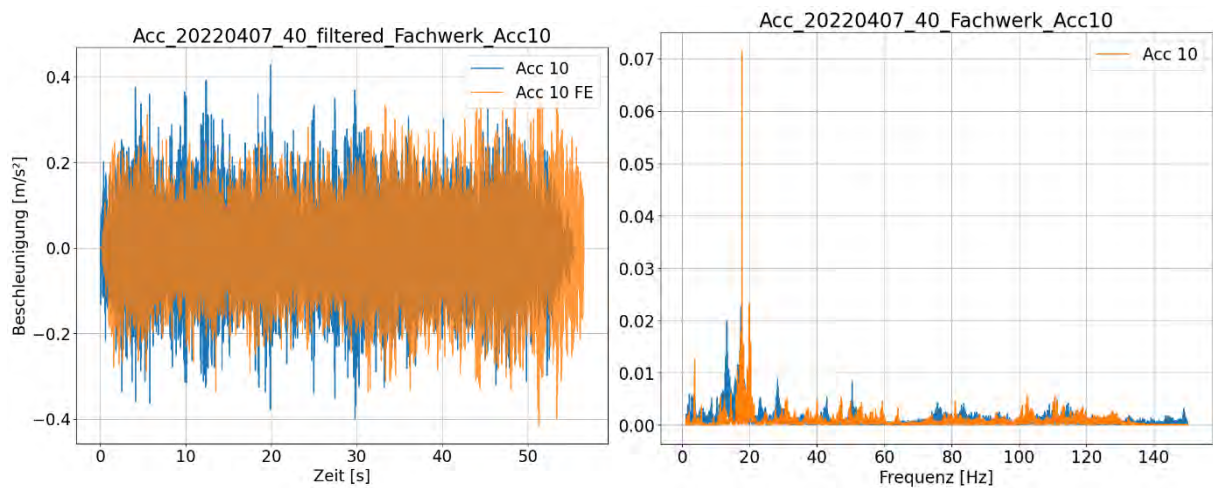
**Abbildung 46: Beschleunigungen am Abdeckblech (Messpunkt a15) bei einer Überfahrt vom Talent mit 89 km/h im Zeitbereich (links) und Frequenzbereich (rechts).**



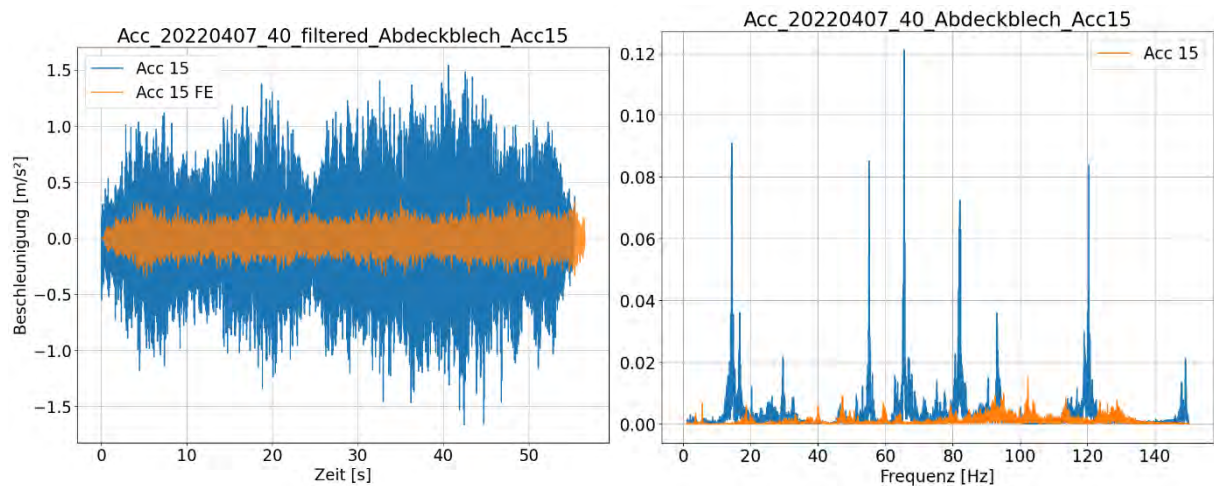
**Abbildung 47: Beschleunigungen am Hauptträger (Messpunkt a6) bei einer Überfahrt vom Güterzug mit 35 km/h im Zeitbereich (links) und Frequenzbereich (rechts).**



**Abbildung 48: Beschleunigungen am Fachwerk (Messpunkt a8) bei einer Überfahrt vom Güterzug mit 35 km/h im Zeitbereich (links) und Frequenzbereich (rechts).**



**Abbildung 49: Beschleunigungen am Fachwerk (Messpunkt a10) bei einer Überfahrt vom Güterzug mit 35 km/h im Zeitbereich (links) und Frequenzbereich (rechts).**



**Abbildung 50: Beschleunigungen am Abdeckblech (Messpunkt a15) bei einer Überfahrt vom Güterzug mit 35 km/h im Zeitbereich (links) und Frequenzbereich (rechts).**

Aus dem Vergleich der gemessenen Beschleunigungen mit Ergebnissen der Simulationen geht hervor, dass die Schwingung der Abdeckbleche als potenziell maßgebende Schallabstrahlungsquelle anzusehen ist. Die wesentlich größere Amplitude der Schwingung an den Abdeckblechen im Vergleich zu Messpunkten am Fachwerk und am Hauptträger, sowie das ausgeprägte Resonanzverhalten (d.h. Konzentration der Amplituden im Bereich der Eigenfrequenzen der Abdeckbleche), lassen zusammen mit der Gesamtfläche der Abdeckbleche die Schlussfolgerung zu, dass eine Schallabstrahlung maßgeblich durch dieses Brückenelement geprägt wird. Auch die Schallmessung bei der Stahlbrücke in Knittelfeld konnten diese Schlussfolgerung bestätigen (siehe dazu Kapitel 4.4).

## 6. AUSWAHL DER BRÜCKENTRANSFERFUNKTION

### 6.1. Schallausbreitungsberechnungen mit Ersatzschallquelle nach neuem RVE-Modell und Anpassung an die Messergebnisse

Die Berechnungen erfolgen nach bzw. in Anlehnung an die Richtlinie RVS 04.01.02 (in Verbindung mit der Richtlinie ÖAL 28) und das dort beschriebene schalltechnischen Ersatzmodell für Brückengeräusche. Diese beruhen auf einer Berücksichtigung der Brückengeräusche mittels eigener Ersatzschallquelle und einem Schalleistungspegel basierend auf der effektiven Gesamtraueheit für die überfahrenden Schienenfahrzeuge, einer Brückentransferfunktion und der Anzahl der überfahrenden Achsen:

$$L_{W,0,bridge,i} = L_{R,TOT,i} + L_{H,bridge,i} + 10 \times \lg(N_a)$$

Zusätzlich sind Abweichungen von der üblichen Lage des Gleises im Schotterbau auch für die Schienentransferfunktion zur Rollgeräuschemittlung zu berücksichtigen. Zur Erstellung des Berechnungsmodells (mittels Matlab Umgebung) wurden die Erfahrungen und Empfehlungen des FFG VIF Forschungsprojekts ELSEC berücksichtigt (Maly et al. 2020).

Für die softwaretechnische Modellierung der Brücken sind danach mehrere Angaben notwendig. Ein 3-dimensionales Geländemodell (Höhenlinien, Höhenpunkte) beschreibt die wesentlichen Bedingungen für die Ausbreitungsrechnung, inklusive abschirmender Kanten und der jeweiligen Bodendämpfung. Die Umgebung beider Brücken weist wie der Oberbau (Schotter) und Damm porösen Untergrund ( $G=1$ ) auf. Aufgrund der Wahl der Messpunkte liegen keine abschirmenden Kanten vor. Abschirmende Kanten definieren sich nicht allein durch verdeckte Sichtverbindung zwischen Quelle und Empfänger, sondern durch die Abfrage des Rayleigh-Kriteriums (für den konkreten Fall wie in ÖAL 28 definiert) für gerade (neutrale Ausbreitungsbedingungen) und gekrümmte Schallausbreitungswege (ausbreitungsgünstige Bedingungen) über die Kante. Selbst bei den kurzen Abständen zum Messort kann die Kante des Bahndamms das Ergebnis beeinflussen. Eine mögliche Abschirmung wäre deshalb von Bedeutung, da diese für ausbreitungsgünstige und neutrale Bedingungen jeweils unterschiedliche Änderungen der Immissionspegel bewirkt. Die konkrete Ausbreitungsbedingung während der Messungen wäre damit von wesentlicher Bedeutung.

Die Berechnungen nach ÖAL 28 wurden für die Brücken mit beiden Ausbreitungsbedingungen durchgeführt. Dabei ergaben sich keine Änderungen  $> 0,1$  dB, womit gezeigt wurde, dass für die Messpositionen und Lage der Ersatzschallquellen keine Abschirmungen vorliegen. Diese mögliche Unsicherheit konnte aufgrund der Messgeometrie damit vermieden werden.

Dennoch ist die Modellierung mit Höhenlinien (bzw. Höhenpunkten) wesentlich, da diese zur Ermittlung der Topographie und damit der Bodenebene für die Bodendämpfung dienen. Hier ergibt sich bereits eine Unsicherheit bei der Interpretation des Ausbreitungsmodells. Die Höhe der Schallausbreitung über Boden, beginnend von der Quellhöhe beeinflusst die Bodendämpfung.

Für eine offene Stahlbrücke mit direkter Befestigung ohne Schotterbett erscheint es schalltechnisch plausibel die Höhe der Quelle über Boden  $h_s$  nach ÖAL 28 ausgehend vom Boden unter der Brücke zu ermitteln.

Für eine Brücke mit Schotterbett ist dies nicht ausreichend definiert. So könnte der Brückenkörper selbst zur Bestimmung von  $h_s$  eingehen (z.B. mit Höhen von SOK über dem Schotterbett plus 0,5 m für Quelle A somit  $z_B \sim 0,7$  m).

Anhand einer Berechnung eines schematischen Beispiels wurde der Einfluss dieser Unklarheit in der Richtlinie geprüft. Eine Brücke, welche die SOK auf 4 m hebt und über porösem Grund liegt kann mit entsprechenden Werten für  $z_s = 4$  m (SOK) + 0,5 m (Quelle A) = 4,5 m und einem  $z_r$  für einen Referenzpunkt in 7,5 m Abstand, somit  $z_r = 4$  m (SOK) + 1,2 m (Referenzposition) = 5,2 m simuliert werden. Berücksichtigt man dafür die Brücke als Gelände und nicht als wie softwaretechnisch vorgesehen als „schwebenden“ Bauteil (über die Hälfte der Distanz zum Messpunkt, also  $7.5 \text{ m} / 2 = 3.75 \text{ m}$ ), so ergibt sich eine Verringerung beider Werte auf  $z = 2.5$  m und  $z_r = 3.2$  m. Die Auswirkungen bleiben jedoch für niedrigere Frequenzen vernachlässigbar ( $< 0,01$  dB) und selbst im Maximalfall  $< 0.1$  dB. Erhöht man die Brücke auf SOK 10 m über Grund wird der Effekt größer und reicht von 0,5 dB bei 50 Hz bis 1,9 dB bei 10 kHz.

Eine weitere Problemstellung ergibt sich aufgrund der Anwesenheit von Wasser unter den Brücken, welche richtlinienkonform als akustisch harte Flächen mit  $G = 0$  zu berücksichtigen sind. Der Wechsel von  $G=1$  auf  $G=0$  am Ort des Empfängers wirkt sich für die 4 m hohe Brücke ohne Berücksichtigung der Brücke als Gelände mit konstant  $\sim 0,07$  dB Erhöhung auf. Der Unterschied mit und ohne Berücksichtigung der Brücke ergibt für 4 m als auch 10 m vergleichbare Werte zur Situation mit einheitlicher Bodendämpfung  $G = 1$ . Die Beispiele wurden für neutrale Ausbreitungsbedingungen wiederholt und auf  $< 0,1$  dB genau reproduziert.

Auch wenn die exakte Modellierung der entsprechenden mittleren Ausgleichsebene in Softwareprodukten aufgrund fehlender Richtlinien unpräzise, und damit von Produkt zu Produkt verschieden sein kann, bleibt die richtige Definition von Bodendämpfungselementen jedenfalls wesentlich. Für die konkret betrachteten Brücken wurde dabei das Schotterbett auf der Brücke terrestrisch vermessen und mit  $G = 1$  porös eingegeben. Der Teil des Brückentragwerks parallel zum Schotterbett wurde akustisch hart mit  $G = 0$  definiert.

Anhand der Brücke Knittelfeld wurde folgende Differenzen berechnet, wenn man den darunter liegenden Fluss Mur akustisch hart oder unberücksichtigt, und damit wie die restliche Umgebung porös definiert belässt (siehe Tabelle 4).

**Tabelle 4: Unsicherheitsanalyse bzgl. Modellierung der Wasserfläche unter der Brücke als akustisch harte Bodenfläche.**

	63 Hz	1000 Hz	8000 Hz
Schallausbreitung günstig, Fluss hart versus absorbierend	0,4 dB	0,0 dB	0,0 dB
Schallausbreitung neutral Fluss hart versus absorbierend	0,4 dB	0,0 dB	0,0 dB



Die Abweichungen gelten für den Brückenpunkt MP2 direkt neben der Brücke und werden für weiter entfernt liegende Punkte kleiner. Somit ist die Modellierung der genauen Wasserlinie von untergeordneter Bedeutung. Zusammengefasst verbleibt aber aufgrund der unklaren Definition der mittleren Bodenebene im Falle von Brückenabstrahlung für die Frequenzbänder bis 1000 Hz eine Unsicherheit von etwa 1 dB für den MP 2 bestehen.

**Anmerkung als Ausblick auf zukünftige Überlegungen bei Novellen zur gegenständlichen Richtlinie:** *Plausibel wäre die Bestimmung der mittleren Bodenebene für das Rollgeräusch ausgehend vom Schotterbett (bzw. bei offenen Brücken dem darunterliegenden Boden), für das Brückengeräusch aber jedenfalls immer ausgehend vom tatsächlichen Grund. Damit würde die Bodendämpfung des Schotterbettes den direkt darüberfahrenden Fahrzeugen und ihrem Rollgeräusch zugeordnet und die Bodendämpfung unter der Brücke dem Geräusch durch die in Schwingung versetzte Brückenkonstruktion.*

Die weiteren Emissionsparameter für Schienen allgemein wurden, wenn nicht anders bezeichnet, wie folgt festgelegt:

- Schienentransferfunktion: Monoblock-Schwelle auf mittlerer Zwischenlage;
- Schienenrauheit: Durchschnittliches Netz.

Die Schienenrauheit ist gleichermaßen für Roll- als auch Brückengeräusch ein wesentlicher Ausgangswert und wurde einheitlich angenommen.

## 6.2. Modellberechnung der Brücke in Achau

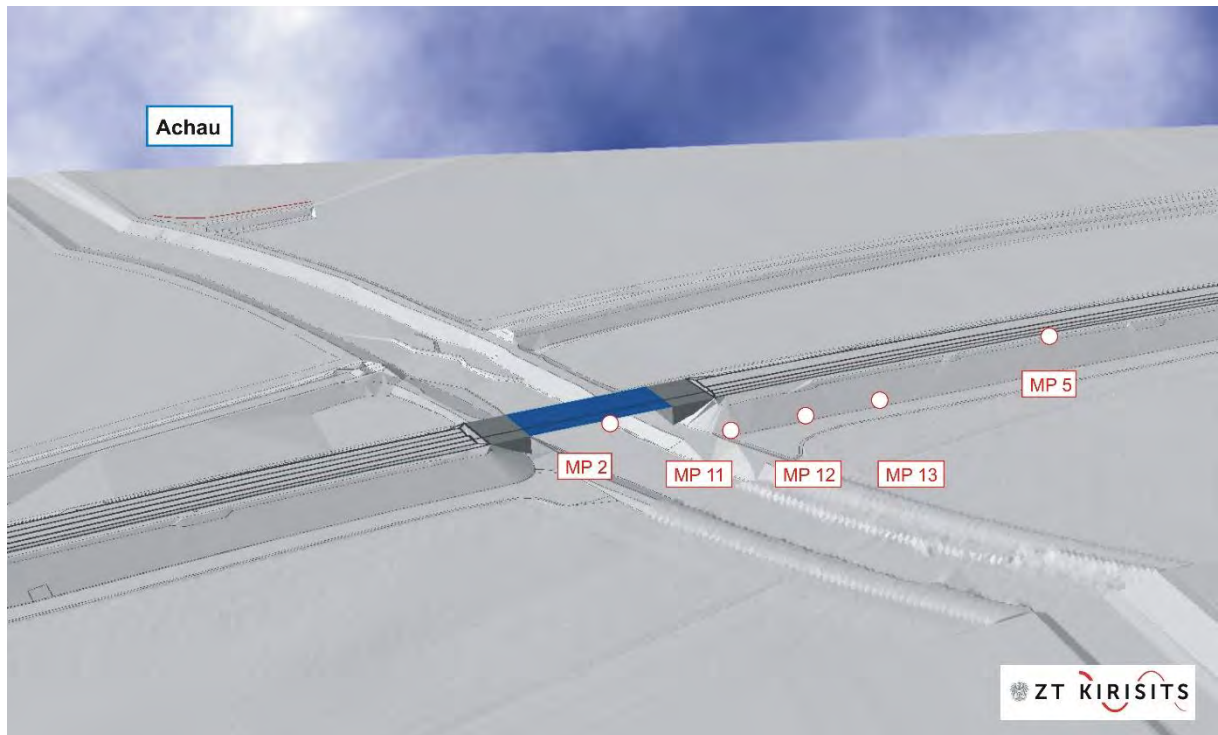
Die Modellberechnungen wurden mit dem in Kapitel 6.1 erklärten Ansatz durchgeführt.

Abbildung 51 zeigt das 3-dimensionale Modell für die Berechnungen bei der Brücke in Achau. Es basiert auf einem detaillierten Geländemodell (Laserscan) sowie der Bahntrasse inklusive Brückenbauwerk aus den Plänen zum Ausführungsprojekt (Lagepläne, Schnitte, Werksplanung).

Abbildung 52 zeigt die Lage der Messpunkte und der einzelnen Streckenabschnitte. Die Emission der Strecke erfolgte RVE-konform mit Schienenrauheit für Netz im Durchschnitt und einer Schienentransferfunktion für Monoblockschwellen mit mittleren Zwischenlagen. Für den gelb gekennzeichneten Bereich wurde die entsprechende zusätzliche Brückengeräuschquelle angenommen.

Die Lage der Messpunkte wurde exakt terrestrisch vermessen und in das Modell integriert. Nachdem die Vorbeifahrten der Triebwagengarnituren die geringsten Variationen in den Messergebnissen ergaben, wurde entsprechend RVE die Baureihe 4023 mit Scheibenbremsen sowie aufgrund der Messungen eine mittlere Geschwindigkeit von 120 km/h angenommen.

Aus den Vorbeifahrtspegeln (entsprechend ÖNORM S5005 inklusive 10 dB Pegelabfall) und Vorbeifahrtszeiten wurden SEL Werte gebildet. Weiter betrachtet werden Differenzen jeweils aus dem Pegelwert in einem Frequenzband an einem Messpunkt zum Pegelwert am Referenzpunkt. Dargestellt werden in der Regel der Median sowie der obere und untere Quartilwert (25% und 75% Perzentile).

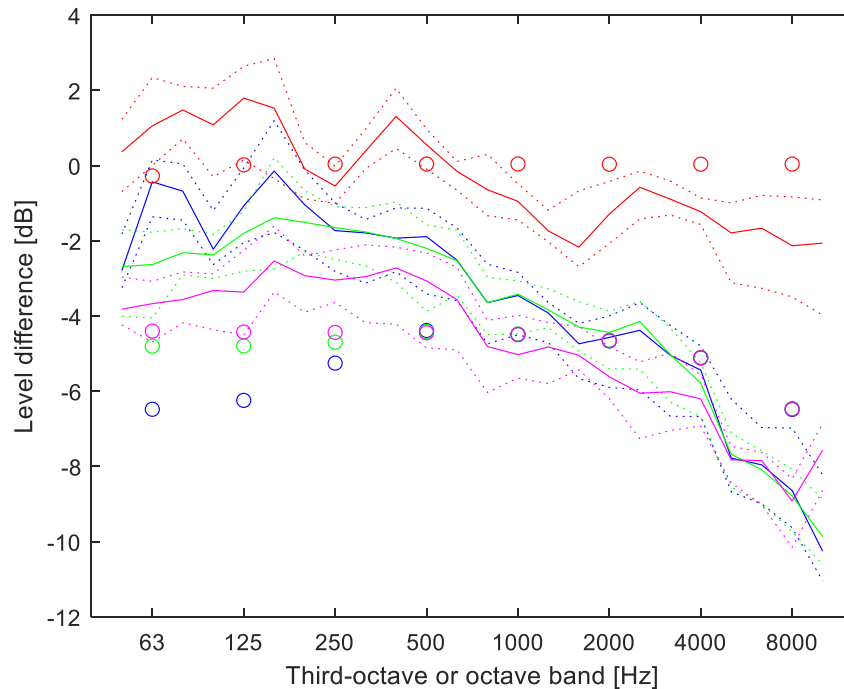


**Abbildung 51: 3-dimensionales Geländemodell des Untersuchungsraumes an der Brücke in Achau. MP bezeichnen die Messpunkte, welche für das Vergleichsberechnungsmodell herangezogen wurden.**



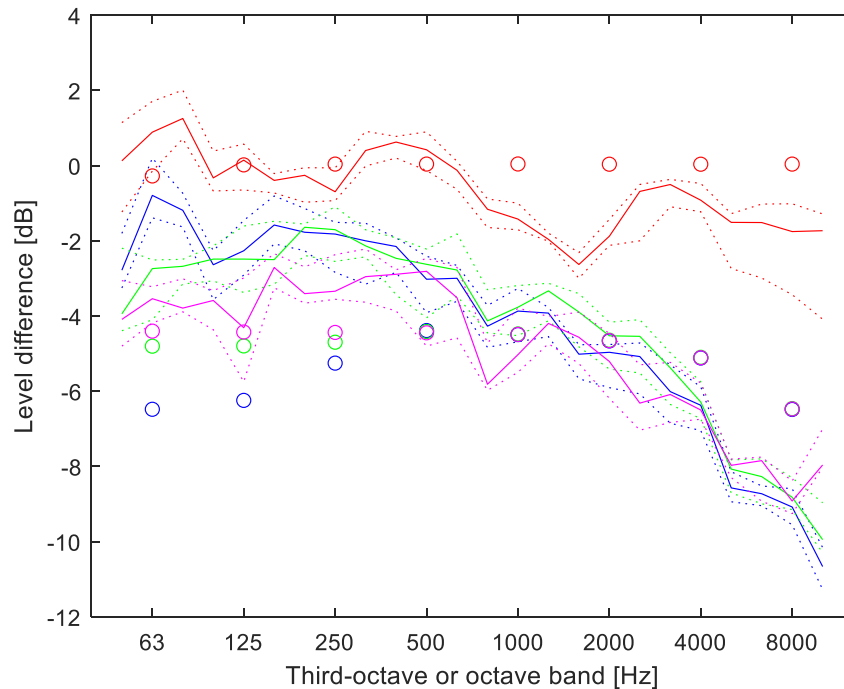
**Abbildung 52: Lageplan des Untersuchungsraumes an der Brücke in Achau. Neben den Positionen der Messpunkte (MP) ist die modellierte Schienenstrecke, sowie der Bereich möglicher Brückenzuschläge (Ersatzquelle für Brückengeräusche) farblich markiert.**

Die Messergebnisse sind für alle Vorbeifahrten unabhängig von Fahrtrichtung und Zugtyp (siehe Abbildung 53) sowie für alle Vorbeifahrten am näheren Gleis in 7,5 m zum Referenzpunkt und eingeschränkt auf Fahrten von Nahverkehrstriebwagengarnituren mit Scheibenbremsen (siehe Abbildung 54) ausgewertet.



**Abbildung 53: Pegeldifferenz zwischen dem MP direkt an der Brücke (rot) und den drei MPs (blau, grün und violett) parallel zur Strecke für alle Zugvorbeifahrten in Achau. Gemessene Werte sind durch ihren Median (durchgezogene Linie) sowie dem 25% und 75% Perzentile (punktierter Linien) dargestellt. Kreise entsprechen den berechneten Werten.**

Der weitere Vergleich mit Berechnungen wird auf die Vorbeifahrten der Nahverkehrstriebwagengarnituren eingeschränkt (siehe Abbildung 54). Für den Messpunkt neben der Brücke ergibt sich insbesondere im Bereich des vermuteten Brückengeräuschs von 50 Hz bis 1000 Hz keine Differenz > 1,5 dB vom Messwert im Referenzpunkt. Dies deckt sich mit den berechneten Werten, die hier ebenso keine Differenzen ergeben, wenn für die Brücke kein zusätzlicher Schalleistungspegel angenommen wird. Bildet man den Mittelwert all dieser Differenzen in diesen Frequenzbändern ergibt sich 0,0 dB. Ein potenziell vorhandenes Brückengeräusch liegt damit jedenfalls unter der Messtoleranz.



**Abbildung 54: Pegeldifferenz zwischen dem MP direkt an der Brücke (rot) und den drei MPs (blau, grün und violett) parallel zur Strecke für Vorbeifahrten von Fahrzeugen mit Scheibenbremsen am nächstgelegenen Gleis in Achau.**

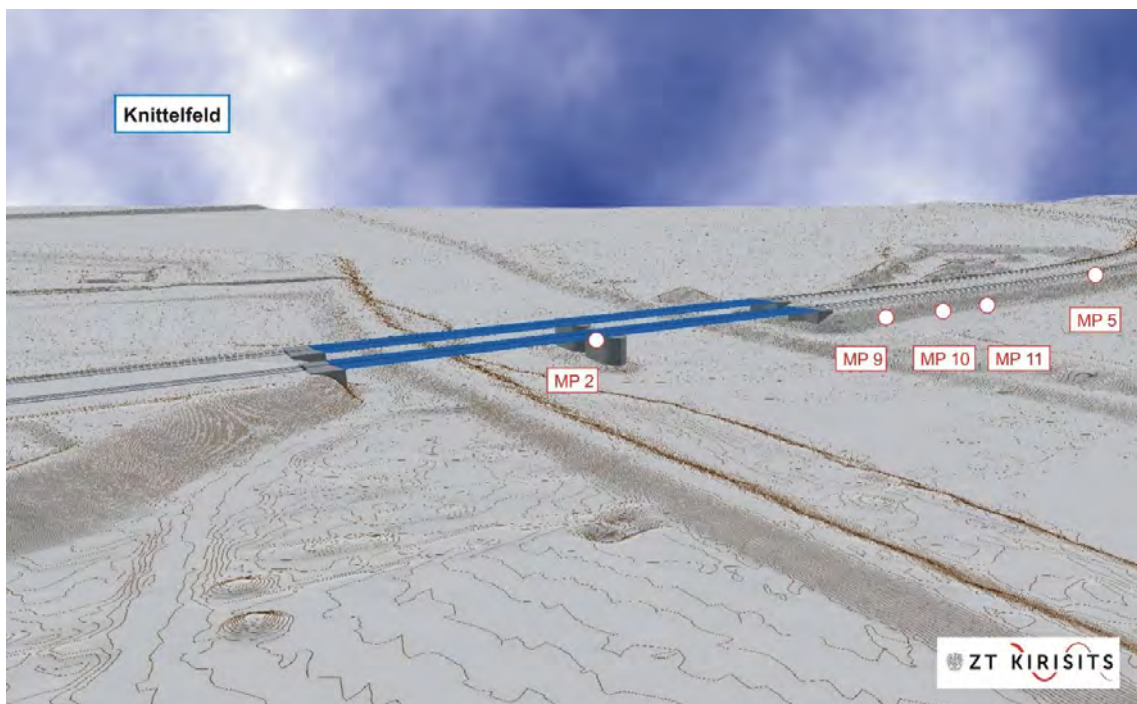
Anders ergibt sich der Vergleich in den Messpunkten in größerem Abstand. Für Messpunkt 13 liegen die berechneten Differenzen bis 1000 Hz zwar weiterhin  $< 1,5$  dB zu den gemessenen Medianwerten, für MP11 (blaue Linie), der am nächsten zur Brücke liegt ergeben sich jedoch höhere Werte die bei 125 Hz  $\sim 4$  dB annehmen. Bei MP11 ergibt sich ein gegenläufiger Effekt, da mit sinkender Frequenz die gemessenen Differenzen betragsmäßig sinken, die berechneten Differenzen jedoch ansteigen.

Der Unterschied der Berechnung in MP11 liegt vermutlich an den veränderten Abständen der Schallausbreitungswege von der Bodenebene, die am MP11 bereits deutlich im Uferbereich zur Schwechat absinken. Die gleichzeitig ansteigenden Messwerte, die aufgrund der Messungen in MP2 nicht von der Brücke stammen können, müssen ebenfalls auf Dämpfungseffekte zurückzuführen sein. Eine detaillierte Erklärung dieser Abweichungen ist nicht gelungen, muss aber am ehesten der Modellierung der Bodeneffekte zugeordnet werden, die im speziellen Fall von Brücken Unsicherheiten unterliegt (siehe Diskussion oben zur mittleren Ausgleichsebene).

### 6.3. Modellberechnung der Brücke in Knittelfeld

Analog zur Brücke in Achau erfolgte die Modellierung des Geländes, der Gleistrasse und Brücke bei Knittelfeld (siehe Abbildung 54). Der Lageplan (siehe Abbildung 56) zeigt eine Besonderheit für die Modellierung der Strecken. So wechselt der Oberbau von Monoblockschwellen auf Holzschwellen. Dies wurde im Modell durch Auswahl der entsprechenden Schienentransferfunktionen nach RVE berücksichtigt.

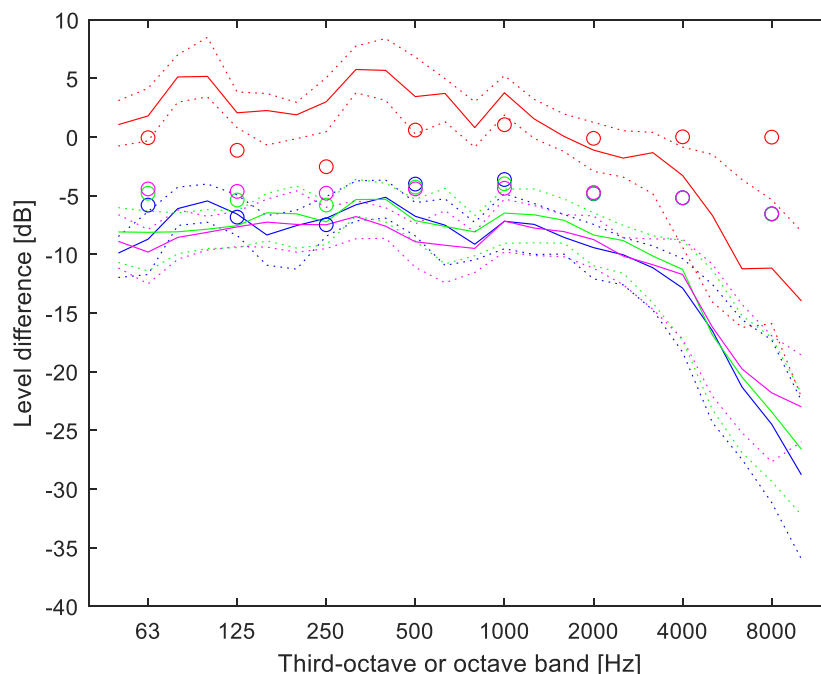
Ausgewertet wurden sowohl alle am näheren Gleis vorbeifahrenden Züge (siehe Abbildung 57) als auch ausschließlich Triebwagengarnituren (siehe Abbildung 58). In allen Darstellungen sind große Abweichungen oberhalb von 2000 Hz ersichtlich. Dies deshalb, da am Referenzpunkt Kurvengeräusche aus einem naheliegenden Bogen vorlagen, die die Pegel in diesen Frequenzbändern im Mittel angehoben haben, wodurch sich eine höhere, negative Differenz zu den anderen Messpunkten ohne Kurvenkreischen ergibt. Die weitere Betrachtung fokussiert daher auf den Bereich bis 1000 Hz, in dem auch ein Brückengeräusch erwartet wird. Während die ohne Brückengeräusch prognostizierten Differenzen gut mit den Messdaten für die Messpunkte MP9 bis MP11 übereinstimmen, erkennt man für den an der Brücke liegenden MP2 eine Erhöhung.



**Abbildung 55: 3-dimensionales Geländemodell des Untersuchungsraumes an der Brücke in Knittelfeld. MP bezeichnen die Messpunkte, welche für das Vergleichsberechnungsmodell herangezogen wurden.**

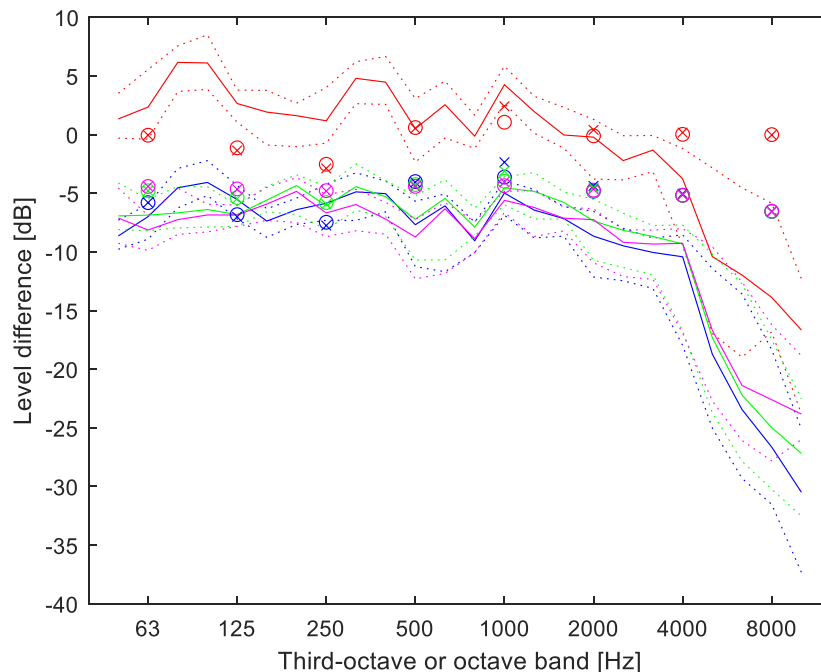


**Abbildung 56:** Lageplan des Untersuchungsraumes an der Brücke in Knittelfeld. Neben den Positionen der Messpunkte (MP) ist die modellierte Schienenstrecke, der dort vorliegende Schwellentyp, sowie der Bereich möglicher Brückenzusläge (Ersatzquelle für Brückengeräusche) farblich markiert.



**Abbildung 57:** Pegeldifferenz zwischen dem MP direkt an der Brücke (rot) und den drei MPs (blau, grün und violett) parallel zur Strecke (für alle Zugvorbeifahrten am nächstgelegenen Gleis in Knittelfeld). Gemessene Werte sind durch ihren Median (durchgezogene Linie) sowie dem 25% und 75% Perzentile (punktierter Linien) dargestellt. Kreise entsprechen den berechneten Werten.

In Abbildung 58 ist eine weitere mögliche Unsicherheitsbetrachtung inkludiert. So finden sich zusätzlich zur Berechnung mit dem nach RVE definierten Standardeinstellungen auch die Berücksichtigung einer Schienentransferfunktion für Monoblock-Schwellen auf harter Zwischenlage am Referenzpunkt MP5. Dies soll eine mögliche Abweichung aufgrund der messtechnisch festgestellten hohen Unterschiede der TDR für diesen Messquerschnitt illustrieren. Dabei ist ein relevanter Einfluss nur im 1000 Hz Band zu beobachten.

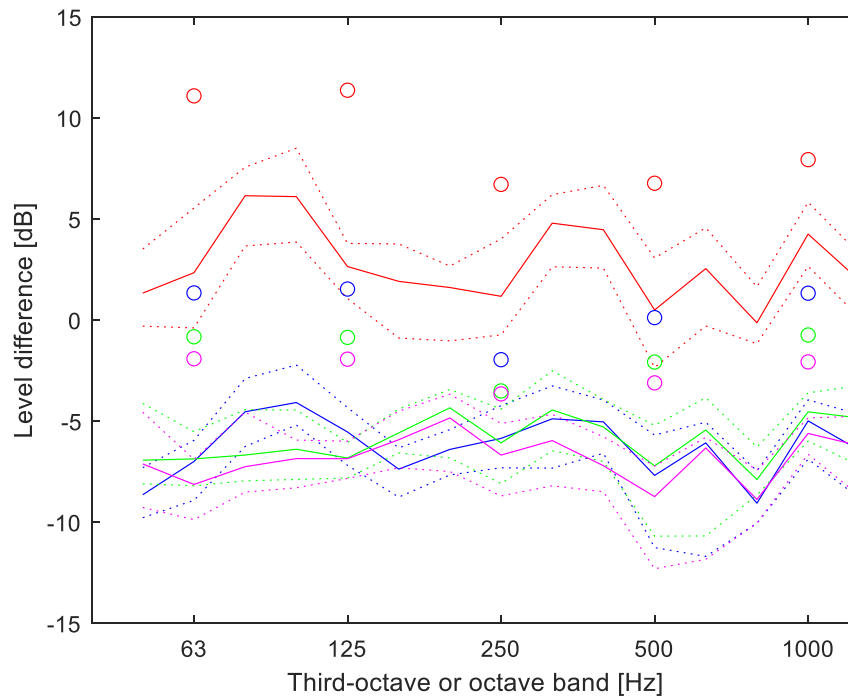


**Abbildung 58: Pegeldifferenz zwischen dem MP direkt an der Brücke (rot) und den drei MPs (blau, grün und violett) parallel zur Strecke für Vorbeifahrten von Fahrzeugen mit Scheibenbremsen am nächstgelegenen Gleis in Knittelfeld. Zusätzlich dargestellt sind Berechnungswerte unter der Annahme einer harten Zwischenlage im Referenzpunkt (Kreuze).**

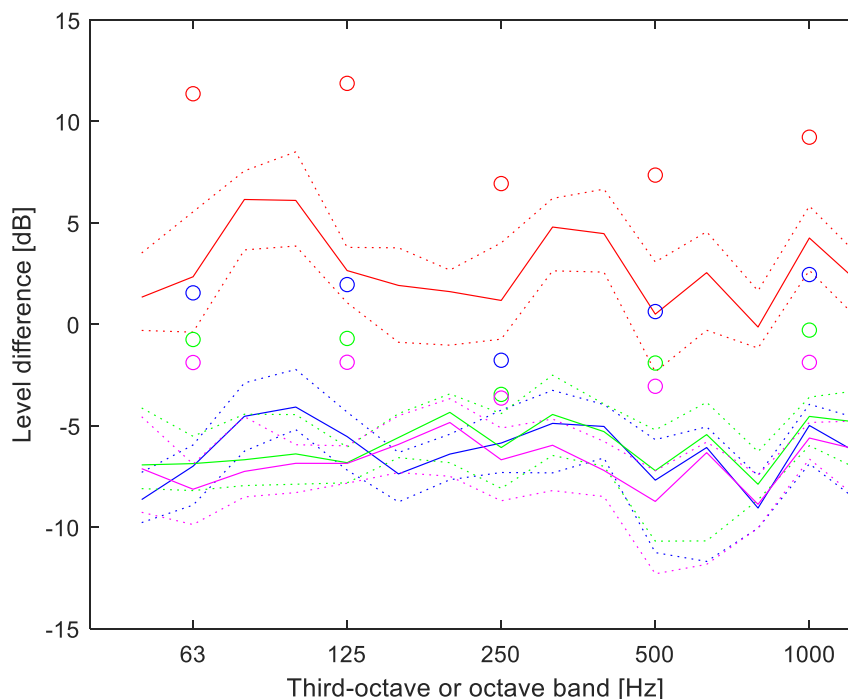
#### 6.4. Illustration möglicher Brückentransferfunktionen im Vergleich mit den Messergebnissen von Knittelfeld

Wendet man die nach RVE angebotene Kategorie „+10 dB“ für die Brückentransferfunktion an, so ergeben sich die Werte wie in Abbildung 59 dargestellt. Die Brücke verursacht in dieser Prognoserechnung deutlich höhere Pegel als messtechnisch nachgewiesen wurde. Würde man zusätzlich noch eine direkte Befestigung der Gleise auf einer Stahlbrücke annehmen (Schienentransferfunktion für direkte Befestigung) wird diese Erhöhung noch höher ausfallen (siehe Abbildung 60).





**Abbildung 59: Pegeldifferenz zwischen dem MP direkt an der Brücke (rot) und den drei MPs (blau, grün und violett) parallel zur Strecke für Vorbeifahrten von Fahrzeugen mit Scheibenbremsen am nächstgelegenen Gleis in Knittelfeld. Die berechneten Werte (Kreise) entsprechen dem Fall mit Brückenzuslag „+10 dB“.**



**Abbildung 60: Pegeldifferenz zwischen dem MP direkt an der Brücke (rot) und den drei MPs (blau, grün und violett) parallel zur Strecke für Vorbeifahrten von Fahrzeugen mit Scheibenbremsen am nächstgelegenen Gleis in Knittelfeld. Die berechneten Werte (Kreise) entsprechen dem Fall mit Brückenzuslag „+10 dB“ und Schienentransferfunktion für direkte Befestigung.**

Senkt man die Pegelwerte der Brückentransferfunktion über alle Frequenzbänder konstant um 3 dB ergibt sich der Vergleich in Abbildung 61 (ident zu LB/NB<sup>4</sup>). Auch dabei liegen die berechneten Werte über den gemessenen, für MP2 auch jedenfalls höher als das obere Quartil. Eine weitere Senkung um 3 dB, und somit eine Brückentransferfunktion durchgehend um 6 dB niedriger als die „+10dB Klasse“ ergibt den Vergleich in Abbildung 62 (ident zu LB-BM<sup>5</sup>). Diese Variante ergibt gerade eine Lösung, in der für den brückennahen MP2 die gemessenen Mediandifferenzen in den Oktavbändern jedenfalls nicht unter den berechneten Werten zu liegen kommen und sich gleichzeitig aber eine gute Übereinstimmung zwischen Median und oberem Quartil ergibt.

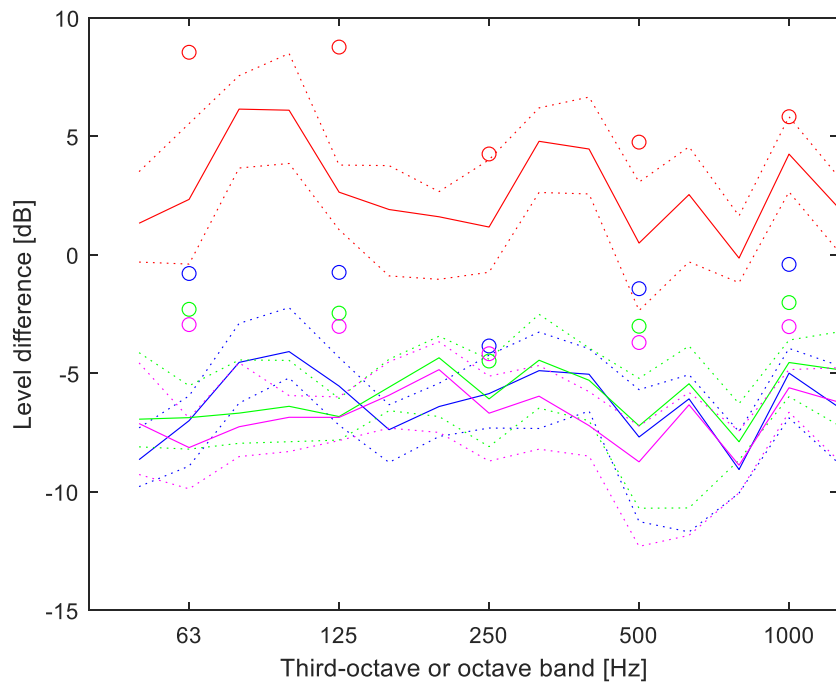
Es ist zu beachten, dass die um 6 dB reduzierte Brückentransferfunktion entspricht keiner „+4dB“ Variante, da sich die grobe Bezeichnung „+10dB“ aus den niederländischen Untersuchungen auf den Gesamtpegel beziehen und nicht auf das Brückengeräusch allein. So unterscheiden sich die Brückentransferfunktion „+10dB“ und „+15dB“ auch nicht um 5 dB, sondern um Beträge von bis zu 9 dB.

Der Vergleich in den fernen Messpunkten MP9 bis MP11 zeigt aber auch für diese Wahl keine gute Übereinstimmung, da die prognostizierten Werte meist über dem oberen Quartil zu liegen kommen. Andererseits konnte für das 250 Hz gute Übereinstimmung gefunden werden, die Bänder ab 500 Hz aufwärts zeigen bereits ohne rechnerische Berücksichtigung der Brücke Abweichungen. Im Hinblick auf den Gesamtpegel, der durch die A-Bewertung insbesondere die Bänder unter 250 Hz gering beinhaltet, zeigt die Wahl dieser um 6 dB reduzierten Brückentransferfunktion ein zufriedenstellendes Ergebnis.

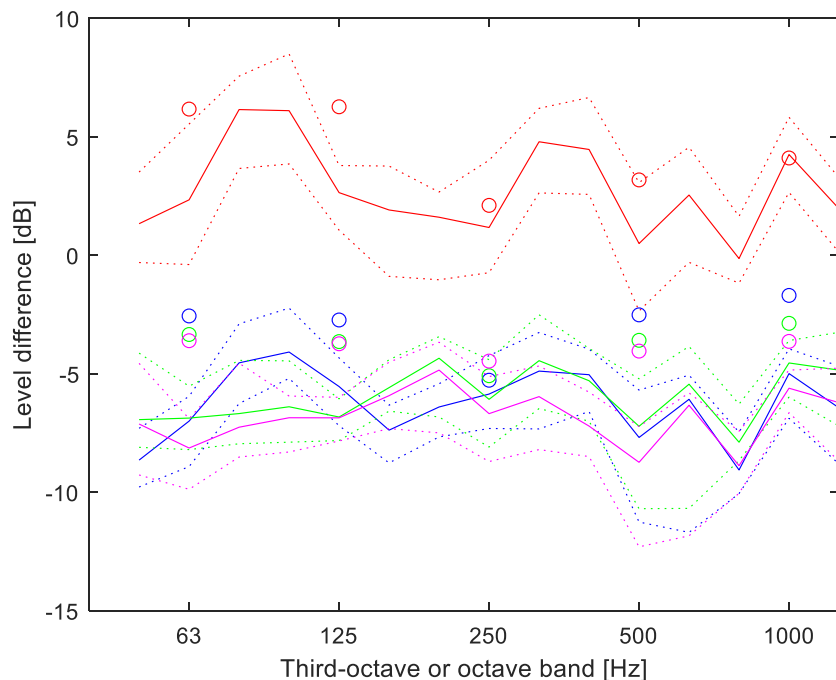
---

<sup>4</sup> LB/NB: Brückenzuschlag für Brücke aus Beton oder Mauerwerk nach BUB-D (Datenbank für die Berechnungsmethode für den Umgebungslärm von bodennahen Quellen).

<sup>5</sup> LB-BM: Brückenzuschlag für Brücke aus Beton oder Mauerwerk mit hochelastischen Schienenbefestigungen oder Unterschottermatten nach BUB-D.



**Abbildung 61: Pegeldifferenz zwischen dem MP direkt an der Brücke (rot) und den drei MPs (blau, grün und violett) parallel zur Strecke für Vorbeifahrten von Fahrzeugen mit Scheibenbremsen am nächstgelegenen Gleis in Knittelfeld. Die berechneten Werte (Kreise) entsprechen dem Fall einer um 3 dB reduzierten „+10dB“ Brückentransferfunktion**



**Abbildung 62: Pegeldifferenz zwischen dem MP direkt an der Brücke (rot) und den drei MPs (blau, grün und violett) parallel zur Strecke für Vorbeifahrten von Fahrzeugen mit Scheibenbremsen am nächstgelegenen Gleis in Knittelfeld. Die berechneten Werte (Kreise) entsprechen dem Fall einer um 6 dB reduzierten „+10dB“ Brückentransferfunktion**

## 6.5. Einteilung der Brückenarten in akustisch relevanten Klassen und Kompatibilität mit existierenden Regelwerken

Die Ergebnisse der beiden Brücken zeigen einen maßgeblichen Unterschied in den abgestrahlten Luftschallemissionen.

Ihre Bauweise unterscheidet sich nachweislich wie folgt:

- Brücke in Achau: Einfeld-Balkenbrücke in Verbundbauweise, bestehend aus geschweißten Stahlträgern mit Fahrbahnplatte aus Stahlbeton und Gleis im Schotterbett (mit Unterschottermatten);
- Brücke in Knittelfeld: Einfeld-Stahlfachwerk in Stahlbauweise mit orthotroper Fahrbahnplatte mit Gleis im Schotterbett (mit Unterschottermatten).

Plausibel wäre eine schalltechnische Klassifizierung in:

- (1) Betonbrücken und Stahlverbundbrücken mit Fahrbahnplatten aus Beton sowie mit Schwellengleis im Schotterbett (keine Zuschläge) gegenüber
- (2) Stahlbrücken mit Schotterbett (wie in Knittelfeld).

Beiden Klassen gemeinsam ist das Vorhandensein eines Gleises im Schotterbett.

Darüber hinaus könnte man für reine Betonbrücken ein jedenfalls nicht höheres Brückengeräusch als für Einfeld-Balkenbrücke in Verbundbauweise annehmen.

Stahlbrücken ohne Schotterbett also mit direkter Befestigung der Gleise auf dem Brückentragwerk wiederum wären entsprechend der Untersuchungen aus den Niederlanden (siehe Kapitel 3) mit entsprechen höheren Emissionen anzunehmen, welche im gegenständlichen Projekt nicht untersucht wurden.

Die Anwesenheit von Unterschottermatten ist ein weiterer Einflussfaktor, der für beide untersuchten Stahlbrücken bestätigt wurde. Für den Brückentyp in Achau ist die Annahme der für die Knittelfeldbrücke gefundenen Korrektur weit überschätzend, wie Abbildung 63 zeigt.

Ein Einfluss der konkreten Dämpfungseigenschaft durch die Unterschottermatten kann nicht ausgeschlossen werden, jedoch werden höhere Unterschiede aufgrund der Brückenkonstruktion sowie der nicht konstruktiv bedingten Abdeckblechen in Knittelfeld angenommen.

Teilt man auf der sicheren Seite für die Immissionsprognose liegend, die Brücken in Kategorien ein, die mit den vorliegenden Resultaten argumentiert werden können, ergibt sich eine mögliche Klassifizierung, die im Kapitel 7 vorgeschlagen wird.

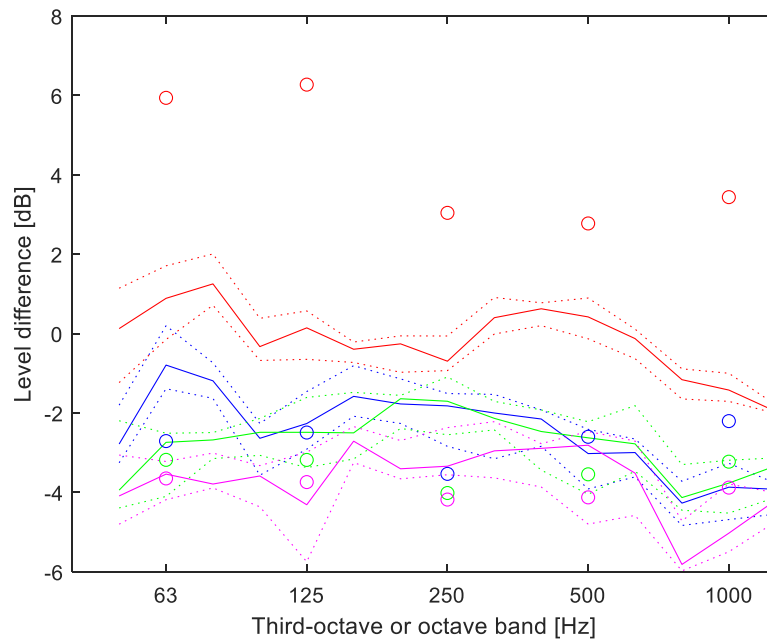
Abbildung 64 zeigt eine Differenzlärnkarte für das Untersuchungsgebiet Knittelfeld. Die Differenz bezieht sich auf die Berücksichtigung der Brücke mit einer gegenüber der „+10dB“ Klasse um 6 dB verminderten Brückentransferfunktion (entspricht LB-BM nach BUB-D<sup>6</sup>) für

---

<sup>6</sup> LB-BM: Brückenzuschlag für Brücke aus Beton oder Mauerwerk mit hochelastischen Schienenbefestigungen oder Unterschottermatten nach BUB-D (Datenbank für die Berechnungsmethode für den Umgebungslärm von bodennahen Quellen).

den A-bewerteten Gesamtpegel durch K-Sohlen gebremste Fahrzeuge (exemplarisch damit für jegliche Fahrzeuge mit Radrauheiten vergleichbar zu Scheibenbremsen bzw. KL Sohle).

Im Nahbereich, der auch messtechnisch verifiziert wurde, ergeben sich die bereits in Abschnitt 6.4 dargestellten Auswirkungen. Mit steigender Entfernung, insbesondere vor und nach der Brücke, sinken die Pegelerhöhungen rasch ab.



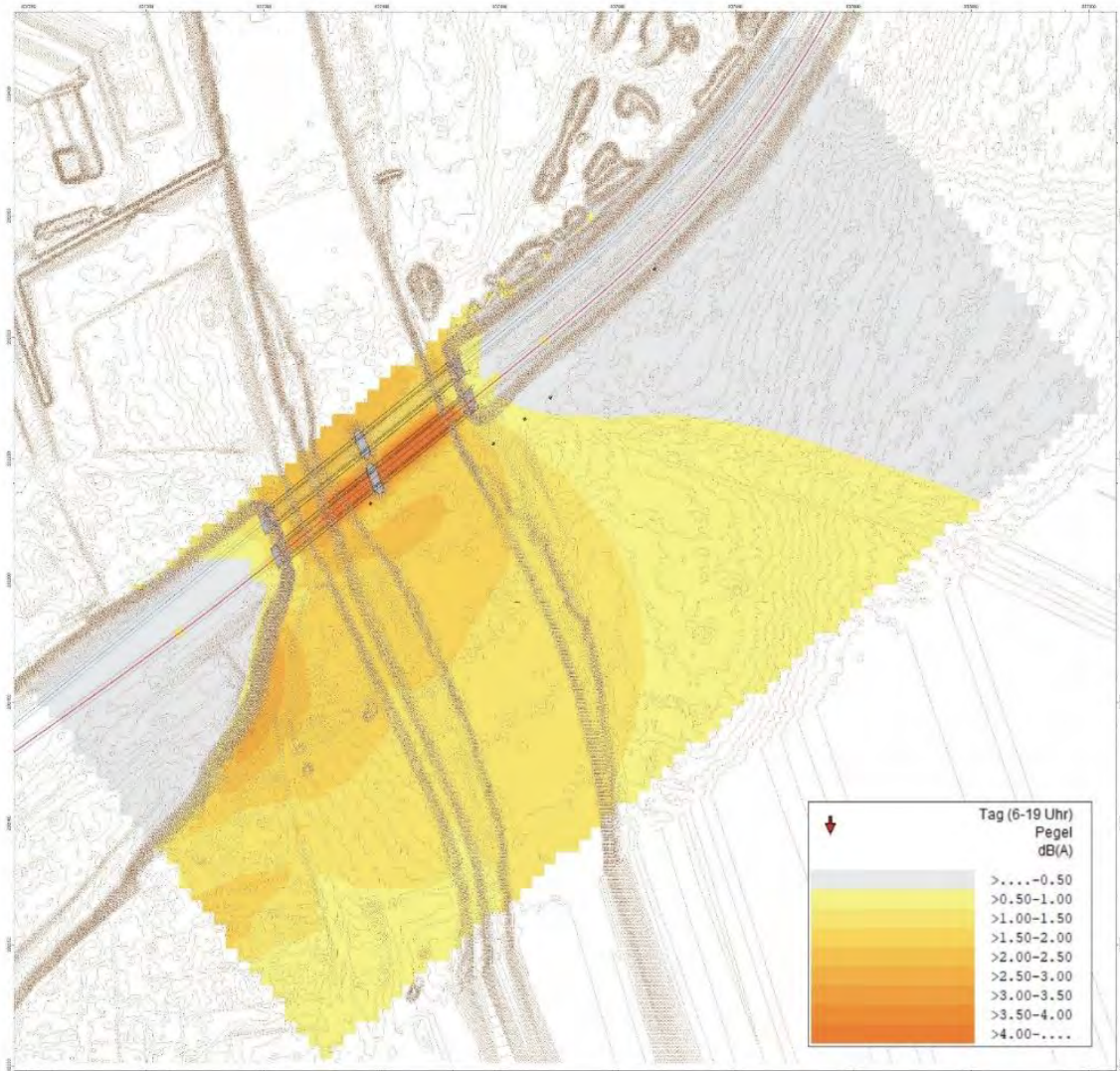
**Abbildung 63: Pegeldifferenz zwischen dem MP direkt an der Brücke (rot) und den drei MPs (blau, grün und violett) parallel zur Strecke für Vorbeifahrten von Fahrzeugen mit Scheibenbremsen am nächstgelegenen Gleis in Achau. Die berechneten Werte (Kreise) entsprechen dem Fall mit Brückenzuschlag LB-BM.**

Eine Beibehaltung des relativen Spektrums wie für die „+10 dB“ Klasse aber entsprechender Anpassung mit konstanten Minderungstermen erfolgte bereits bei der Umsetzung des aktuellen Anhangs II der Umgebungslärmrichtlinie in Deutschland. Die entsprechende Berechnungsmethode für den Umgebungslärm von bodennahen Quellen (BUB) [Zitat Bundesanzeiger, BAnz AT 05.10.2021 B4 enthält in Anlage 4 die Datenbank für die Berechnungsmethode für den Umgebungslärm von bodennahen Quellen (BUB-D) und Werte für Brückentransferfunktionen.

Für die Klasse „LS“ Brücken mit stählernem Überbau, Schwellengleis im Schotterbett werden Werte ident zur Klasse „+10 dB“ der RVE 04.01.02 angegeben. Liegt jedoch eine Brücke aus Beton oder Mauerwerk vor „LB/NB“ so werden die Terzbandwerte der Transferfunktion um 3 dB vermindert.

Liegen zusätzliche Schallschutzmaßnahmen vor (hochelastische Schienenbefestigungen oder Unterschottermatten) so wird für eine Kategorie „LB-BM“ eine weitere Verminderung um 3 dB – somit 6 dB unter den Werten der „+10 dB“ Kategorie durchgeführt. Die Werte dieser Kategorie decken sich jedoch mit den gemessenen Ergebnissen der Brücke in Knittelfeld. Für

die Brücke in Achau, ausgehend von der Beschreibung der deutschen Richtlinie in dieser LB-BM Kategorie, wären jedoch keine Korrekturen anzunehmen.



**Abbildung 64: Rasterkarte in Knittelfeld.**

Die Messdaten dieses Projekt zeigen damit geringere Brückengeräusche als nach der deutschen Umsetzung der europäischen Richtlinie für die deutsche Umgebungslärmkartierung zu erwarten wäre.

Dies deckt sich nicht direkt mit den Regelungen der deutschen Schall 03, bei der beispielsweise „Brücken mit massiver Fahrbahnplatte oder mit besonderem stählernem Überbau, Gleise auf Schwellengleis im Schotterbett“ zwar eine kombinierte Brücken- und Fahrbahnkorrektur von +3 dB, aber auch eine mögliche Minderung durch Maßnahmen um – 3 dB vorsehen. Selbst „Brücken mit stählernem Überbau und Schwellengleis im Schotterbett“ werden um +6 dB korrigiert, mit Maßnahmen aber die – 3 dB vorgesehen.

Man muss bei all diesen Angaben aber sorgfältig zwischen einer direkten Pegelkorrektur der Gesamtemission (oder zumindest jener des Rollgeräusches) und der Addierung eines Geräusches mittels eigener Ersatzschallquelle und Schalleistungspegel unterscheiden. Die Angabe einer Kategorie „+10 dB“ bezieht sich nicht auf eine direkte Anhebung, sondern auf eine Transferfunktion, die an bestimmten Punkten und Bedingungen in etwa zu 10 dB Erhöhung führte (für teilweise nachvollziehbare Erläuterung siehe Erläuterung und Zitate in Abschnitt 3).

Dennoch kann man bei den annähernd ähnlich beschriebenen Brücken in Schall 03 auf geringere Pegelanhebungen schließen, als dies nach BUB-D zu erwarten ist. Die Erkenntnisse dieses Projektes sind somit eher mit jenen der Regelungen nach Schall 03 zu vergleichen.

Dennoch ergibt sich durch das Vorhandensein der BUB-D Werte ein praktischer Vorteil für die Anwendung von existierenden Softwareprodukten in Österreich. Weist man Brücken die in kommerzieller Software existierende deutsche Kategorie „LB-BM“ zu ergeben sich die Berechnungen mit guter Übereinstimmung zu den Messergebnissen in Knittelfeld. Auf diese Weise sind Immissionsprognosen mit vorhandenen Methoden möglich.

## 7. SCHLUSSFOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN FÜR EINE NATIONALE RICHTLINIE

Die durchgeführten baulastdynamischen und akustischen Messungen an zwei Stahlbrücken erlaubten eine detaillierte Analyse der zusätzlichen Schienenverkehrslärmemissionen aufgrund der Anwesenheit einer Brücke. Zusätzlich zu den bekannten Rollgeräuschen ausgehend von Schienen, Rädern und Drehgestell sowie Fahrzeugaufbauten entsteht ein Brückengeräusch.

Dieses Brückengeräusch wird in der schalltechnischen Modellbildung zweckmäßigerweise einer eigenen Ersatzschallquelle als Linie entlang der Schienenachse auf der Brücke mit omnidirektionaler Richtcharakteristik zugewiesen. Dafür bietet der Anhang II der europäischen Umgebungslärmrichtlinie eine passende Rechenvorschrift, die in die österreichische RVE 04.01.02 (Schienenverkehrslärmemissionen) und ÖAL 28 (Schallausbreitung) übernommen wurde.

Bei der schalltechnischen Modellbildung wurden im Rahmen dieses Projektes fehlende Definitionen identifiziert, die zu einer entsprechenden Unsicherheit bzw. fehlender Präzision und Reproduzierbarkeit der ermittelten Immissionspegel führen können. Dies betrifft die Bestimmung der mittleren Bodendämpfung nach ÖAL 28 bei Lage der Emissionsquellen auf einer Brücke. So könnte die Höhe über Boden sowohl über dem Fahrweg als auch über dem Boden unter der Brücke definiert werden.

Für Stahlbrücken in offener Bauweise ohne Schotterbett (z.B. mit offener Fahrbahn) ergibt sich dadurch keine Unsicherheit, da korrekterweise immer auf den Boden unter der Brücke bezogen wird.

Für Brücken mit Gleis im Schotterbett wird dieselbe Vorgangsweise bei der Verwendung kommerzieller Software angenommen. Die Lage der Ersatzschallquelle Brücke über Boden ist schlüssig, jene der Höhe über Boden für das Rollgeräusch könnte aber ebenso nachvollziehbar auf das Schotterbett bezogen werden. Die damit einhergehende Unsicherheit wurde mit rund  $\sim 1$  dB für Messpunkte im Nahbereich (7,5 m Abstand) zum Gleis auf der Brücke abgeschätzt. Eine Klärung zur korrekten Modellbildung ist aufgrund dieser Variation und den Gesamtschwankungsbreiten bei Messungen dieser Art nicht möglich.

Es verbleibt jedoch der Bedarf einer einheitlichen Regelung, nicht primär mit dem Zweck einer Erhöhung der Genauigkeit des Verfahrens, aber um die Präzision bei der Anwendung durch verschiedene Bearbeiter mit unterschiedlichen Softwareprodukten zu maximieren.

Für die konkrete Bestimmung eines Schalleistungspegel für das Brückengeräusch wurden die Vorbeifahrtspegel für beide Brücken analysiert. Dabei konnten für die Einfeld-Balkenbrücke in Verbundbauweise (Stahlverbundbrücke) in Achau keine relevanten Beiträge durch das Brückengeräusch im Vergleich zur freien Strecke detektiert werden.

Für die Einfeld-Stahlfachwerk in Stahlbauweise in Knittelfeld erwies sich die Anwendung eines Modells, in Erweiterung nach RVE 04.01.02 und einer zusätzlichen Brückentransferfunktion, als geeignet, um die tatsächlich gemessenen Immissionen nachzubilden.



Für beide Brücken ist die Anwesenheit einer Unterschottermatte vom Auftraggeber bestätigt worden. Diese bewirkt eine mögliche Dämpfung. Dagegen führt die Anwesenheit von nicht konstruktiv bedingten Abdeckblechen an der Brücke in Knittelfeld zu maßgeblichen Emissionen, die durch die baulastdynamischen Messungen dokumentiert wurden.

Die Ergebnisse dieses Projekts zeigen, wie wesentlich eine detaillierte vor-Ort Erhebung der Brückenemissionen wäre, um ein möglichst genaues Ergebnis zu erhalten. Gerade im Anwendungsbereich der Lärmkartierung nach Umgebungslärmschutzgesetz als auch im Prognose Verfahren bei eisenbahnrechtlichen bzw. UVP-Verfahren zählt eine möglichst präzise, reproduzierbare und nachvollziehbare Berechnung. Liegt diese bei Unsicherheiten im Sinne der Anrainer auf der oberen Pegelschwelle der mit hoher Wahrscheinlichkeit auftretenden Immissionen, sind Vereinfachung im Detailgrad der Brückenklassifizierung möglich. Für eine strategische Kartierung wäre die Detailerhebung vor Ort aufgrund des Aufwandes praktisch nicht durchführbar und im Falle einer erst zu errichtenden Brücke gar nicht möglich.

Während für Stahlbrücken ohne Schotterbett und direkt aufgelagerten Schienen (z.B. mit offener Fahrbahn) keine Evidenz für eine Abweichung von den in Anhang II der Umgebungslärmrichtlinie (bzw. übernommen in RVE 04.01.02) enthaltenen Transferfunktionen vorliegen (sowohl für Brückentransferfunktion als auch Schienentransferfunktion für direkte Befestigung), ergeben die in diesem Projekt untersuchten Stahlbrücken ein deutlich geringeres Brückengeräusch.

Für Einfeld-Balkenbrücke in Verbundbauweise mit Längsträger aus Stahl-I-Profilen und Fahrbahnplatte aus Stahlbeton sowie konventionellen Schotteroberbau darf aufgrund der Messungen in Achau angenommen werden, dass bei Anwesenheit von Unterschottermatten und ohne zusätzlichen Stahlaufbauten (wie auch nicht konstruktiv bedingten Abdeckblechen) keine Brückenersatzschallquelle ins schalltechnische Modell aufgenommen werden muss.

Für Betonbrücken liegen zwar keine Messergebnisse vor, es liegt jedoch aufgrund der noch massiveren Bauweise nahe, auch dafür keine Ersatzschallquelle vorzusehen.

Eine nachvollziehbare Klassifikation wäre jedenfalls die Einteilung von Stahlbrücken mit Schwellengleis im Schotterbett, in eine einzige Klasse. Dafür wird eine Brückentransferfunktion wie folgt vorgeschlagen (siehe Tabelle 5). Diese Transferfunktion wurde aus den Messungen in Knittelfeld abgeleitet. Zusätzlich einzuschränken wäre diese Klasse auf die Anwesenheit von Unterschottermatten.

Tabelle 6 fasst den Vorschlag zur Einteilung der Brückenbauweisen in akustisch relevanten Klassen zusammen und kann als konkreter Input für eine mögliche Erweiterung zur aktuellen RVS 04.01.02 dienen.

Weiter ist zu beachten, dass im Rahmen dieser Untersuchung keine Brücken mit der Oberbauart fester Fahrbahn untersucht wurden (in der Regel wird diese Bauweise in Österreich nur im Tunnel gebaut und auf freier Strecke, wenn es zwischen 2 Tunnels ist). Für wissenschaftlich abgesicherte Erkenntnisse zur Schallabstrahlung dieser Oberbauart sowie für eine umfassende Beschreibung weiterer bestehender Brückenbauweisen sind weitere Untersuchungen notwendig. Die Autoren empfehlen daher dies als mögliches Thema für weitere Untersuchungen im Zuge zukünftiger Forschungsprojekte.

**Tabelle 5: Brückentransferfunktion für Stahlbrücken mit Schwellengleis im Schotterbett (Terzbänder von 50 Hz bis 10000 Hz).**

Frequenz [Hz]	Brückentransferfunktion $L_{H,bridge,i}$
50	79,2
63	81,1
80	85,0
100	88,0
125	88,4
160	90,0
200	86,5
250	90,7
315	91,4
400	93,4
500	94,7
630	96,5
800	101,1
1000	103,8
1250	106,0
1600	101,2
2000	100,8
2500	101,3
3150	93,3
4000	85,4
5000	80,9
6300	73,7
8000	69,1
10000	64,8

**Tabelle 6: Vorschlag zur Einteilung der Brückenbauweisen in akustisch relevanten Klassen.**

Brückenbauweise	Korrektur bzw. Brückentransferfunktion
Betonbrücken und Stahlverbundbrücken mit Fahrbahnplatten aus Beton, sowie mit Schwellengleis im Schotterbett <sup>7,8</sup>	Keine Korrektur
Stahlbrücken mit Schwellengleis im Schotterbett <sup>4</sup>	Brückentransferfunktion aus der bestehenden Untersuchung (siehe Tabelle 5)
Stahlbrücken, Gleise direkt am Tragwerk befestigt (z.B. Brücken mit offener Fahrbahn)	„+10 dB“ Klasse nach RVE 04.01.02 (bzw. „+15 dB“ falls in speziellen Situationen anzunehmen) – siehe RVE 04.01.02

<sup>7</sup>Zusätzlich Unterschottermatten vorhanden.

<sup>8</sup>Keine Anwesenheit von nicht konstruktiv wirkenden Abdeckblechen mit möglicher Schallemission.

## 8. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] D. Thompson: Railway Noise and Vibration: Mechanisms, Modelling, and Means of Control, Elsevier, 2009, ISBN-13: 978-0-08-045147-3
- [2] World Health Organization. Environmental Noise Guidelines for the European Region. Copenhagen, 2018
- [3] Europäisches Parlament und Rat: "Richtlinie (EU) 2002/49/EG über die Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm", Amtsblatt L 189 der Europäischen Gemeinschaft vom 18. Juli 2002, 25. Juni 2002.
- [4] Europäische Kommission: "Richtlinie (EU) 2015/996 zur Festlegung gemeinsamer Lärmbewertungsmethoden gemäß der Richtlinie 2002/49/EG des Europäischen Parlaments und des Rates", Amtsblatt L 168 der Europäischen Gemeinschaft vom 1. Juli 2015, 19. Mai 2015.
- [5] Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr (FSV), Arbeitsausschuss Schienenverkehrslärm: "RVE 04.01.02 - Berechnung von Schienenverkehrslärmemissionen", Feb. 2019
- [6] Sechzehnte Verordnung zur Durchführung des deutschen Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verkehrslärmschutzverordnung - 16. BImSchV), Anlage 2 (zu § 4) - Berechnung des Beurteilungspegels für Schienenwege (Schall 03)
- [7] Arnaud Kok und A. van Beek: "Amendments for CNOSSOS-EU - Description of issues and proposed solutions (RIVM Letter report 2019-0023)", National Institute for Public Health and the Environment, Bilthoven, Niederlande, 2019, DOI 10.21945/RIVM-2019-0023
- [8] Optimierte Lärmreduktionsmaßnahmen an Eisenbahnbrücken (OLME), MdZ 2015, <https://projekte.ffg.at/projekt/1705839>
- [9] Shift2Rail Joint Undertaking, grant agreement no. 826250 - Assets4Rail, <http://www.assets4rail.eu>
- [10] Q. Liu, X. Li, X. Zhang, Z. Zhang: Structure-borne noise study of composite steel bridge on high-speed railway, Proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics, Porto, Portugal, 30 June - 2 July 2014, ISBN: 978-972-752-165-4
- [11] Christian Kirisits, Günter Dinhobl und Christoph Lechner: "The Implementation of EC Directive 2015/996 for the Austrian Railway Network", in Proceedings of the 47th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering (INTER-NOISE 2018), Chicago, USA, 2018, S. 2950-2960.
- [12] Maly et al.: VIF Projekt ELSEC: "Ermittlung von längenbezogenen Schalleistungspegeln und Eingangsparameter für CNOSSOS-EU" (verfügbar unter <https://projekte.ffg.at/projekt/1695860>).
- [13] Bundesanzeiger, BAnz AT 05.10.2021 B4, Datenbank für die Berechnungsmethoden für den Umgebungslärm von bodennahen Quellen (Straßen, Schienenwege, Industrie und Gewerbe) (BUB-D)

## ANHANG A – MESSUNG ACHAU: ERFASSTE ZÜGE

Tabelle 7: Erfasste Züge am 09.11.2020.

Datum:	09.11.2020					Brücke:	Achau	mittlere Zuggeschwindigkeit	
Nr.	Uhrzeit	Zugtyp	Achsen	Gleis	Richtung	Laser	file	dt (s)	v (km/h)
1	08:24	GZ*	84	2	M	-	4	2.093	87
2	08:32		10	2	M	-	10	1.5	121
3	08:41		24	2	M	-	11	1.17	155
4	08:59		12	2	M	-	12	1.51	120
5	09:32		10	2	M	-	14	1.81	100
6	09:40		12	2	M	-	15	1.16	156
7	10:32		10	2	M	-	16	1.49	122
8	10:40		12	2	M	-	17	1.16	156
9	11:21		24	2	A	L1	21	1.18	154
10	11:33		10	2	M	L1	23	1.8	101
11	11:42		12	2	M	L1	25	1.16	156
12	12:32		10	2	M	L2	27	1.85	98
13	12:39		10	2	M	L2	29	1.3	140
14	12:55	GZ	116	2	M	L2	31	1.897	96
15	13:20			1	A	L2	34		
16	13:25			1	A	L2	37		
17	13:32		10	2	M	L2	39	1.56	116
18	13:40		24	2	M	L2	40	1.16	156
19	14:21			1	A	L2	41		
20	14:26			1	A	L2	42		
21	14:32		10	2	M	L2	43	1.49	122
22	14:42		24	2	M	L3	44	1.16	156
23	14:48	GZ	92	2	M	L3	45	1.833	99
24	14:56	GZ	68	2	M	L3	46	1.828	99
25	15:20			1	A	L3	47		
26	15:25			1	A	L3	48		
27	15:32		10	2	M	L3	49	1.52	119
28	15:43		24	2	M	L3	50	1.18	154
29	16:20			1	A	L3	51		
30	16:26			1	A	L3	52		
31	16:33		10	2	M	L4	53	1.49	122
32	16:39		24	2	M	L4	54	1.16	156
33	17:14	GZ	72	2	M	L4	55	1.849	98
34	17:18	GZ		1	A	L4	56		
35	17:22			1	A	L4	57		
36	17:26			1	A	L4	58		
37	17:33		10	2	M	L4	59	1.95	93
38	17:37	GZ		1	A	L4	60		
39	17:41		24	2	M	L4	61	1.3	140

**Tabelle 8: Erfasste Züge am 10.11.2020.**

Datum :	10.11.2020					Brücke :	Achse	mittlere Zuggeschwindigkeit	
Nr.	Uhrzeit	Zugtyp	Achsen	Gleis	Richtung	Laser	file	dt (s)	v (km/h)
1	09:20			1	A	-	1		
2	09:25			1	A	-	3		
3	09:33		10	2	M	-	5	1.58	115
4	09:39		12	2	M	L5	6	1.18	154
5	10:20			1	A	L5	8		
6	10:25			1	A	L5	9		
7	10:32		10	2	M	L5	10	1.50	121
8	10:40		12	2	M	L5	12	1.20	151
9	11:21			1	A	L5	13		
10	11:26			1	A	L5	14		
11	11:32		12	2	M	L5	15	1.48	123
12	11:40		12	2	M	L5	16	1.34	135
13	12:19			1	A	L5	17		
14	12:25			1	A	L5	18		
15	12:29	GZ		1	A	L5	19		
16	12:32		10	2	M	L5	20	1.81	100
17	12:39		10	2	M	L5	21	1.29	141
18	13:20			1	A	L6	22		
19	13:25			1	A	L6	23		
20	13:32		10	2	M	L6	24	1.49	122
21	13:40		24	2	M	L6	25	1.16	156
22	14:19			1	A	L6	26		
23	14:25			1	A	L6	28		
24	14:30	Lok		1	A	L6	29		
25	14:32		10	2	M	L6	30	1.51	120
26	14:40		24	2	M	L6	31	1.32	137
27	15:05	GZ	69	2	M	L6	33	1.818	100
28	15:20			1	A	L6	34		
29	15:25			1	A	L6	35		
30	15:32		10	2	M	L6	36	1.82	100
31	15:39		12	2	M	L7	37	1.25	145
32	16:25			1	A	-	38		
33	16:32		10	2	M	-	39	1.48	123
34	16:39			1	A	-	40		
35	16:42		24	2	M	-	41	1.14	159

**Tabelle 9: Erfasste Züge am 10.11.2020**

Datum:	10.11.2020					Brücke:	Achau	mittlere Zuggeschwindigkeit	
Nr.	Uhrzeit	Zugtyp	Achsen	Gleis	Richtung	Laser	file	dt (s)	v (km/h)
1	10:20			1	A	-	2		
2	10:26			1	A	-	3		
3	10:32		10	2	M	unter	5	1.64	111
4	10:39		12	2	M	unter	6	1.22	149
5	11:25			1	A	unter	8		
6	11:33		10	2	M	unter	9	1.57	116
7	12:17	GZ		1	A	unter	11		
8	12:22	Lok	4	2	M	unter	12	1.81	100
9	12:22			1	A	unter	12		
10	12:25			1	A	unter	13		
11	12:31	GZ		1	A	unter	14		
12	12:32		10	2	M	unter	15	1.99	91
13	12:41		10	2	M	unter	16	1.29	141
14	13:20			1	A	unter	18		
15	13:26			1	A	unter	19		
16	13:32		10	2	M	unter	20	1.5	121
17	13:38			1	A	unter	21		
18	13:40		24	2	M	unter	22	1.16	156
19	14:21		20	2	M	unter	23	1.29	141
20	14:21			1	A	unter	23		
21	14:25			1	A	unter	24		
22	14:32		10	2	M	unter	25	1.88	97
23	14:38	GZ		1	A	unter	26		
24	14:39		24	2	M	unter	27	1.15	158

## ANHANG B - MESSUNG KNITTELFELD: ERFASSTE ZÜGE

Tabelle 10: Zugsvorbeifahrten 06.04.2022.

Datum:	06.04.2022				Knittelfeld	Geschwindigkeit	
Nr.	Uhrzeit	Zugtyp	Achsen	Richtung	file	dt (s)	v (km/h)
1	11:56		4	Wien	19	2,479	43
2	12:34	GZ	52	Wien	30	2,751	39
3	12:58		36	Knittelfeld	35	2,911	37
4	13:10		10	Wien	36	1,641	65
5	13:16	RJ	32	Wien	38	1,175	91
6	13:21	GZ	52	Wien	39	1,77	60
7	14:09		10	Wien	44	1,34	80
8	14:31	GZ	48	Wien	45	2,67	40
9	14:48		24	Wien	46	1,548	69
10	15:08		10	Wien	50	1,2	89
11	15:16	RJ	32	Wien	51	1,414	75
12	15:21	Lok	2	Wien	52	1,828	58
13	15:30	GZ	122	Wien	53	1,311	81
14	15:37		4	Wien	54	1,468	73
15	16:09		10	Wien	57	1,647	65
16	16:20	GZ	124	Wien	58	2,701	39
17	17:10		20	Wien	60	1,833	58
18	17:16	RJ	32	Wien	61	1,204	89
19	17:24	GZ	56	Wien	64	1,179	90
20	18:10		12	Wien	66	1,653	64
21	18:31	GZ	72	Wien	68	1,22	87
22	18:37	GZ	110	Wien	69	2,638	40
23	18:59	GZ	102	Wien	70	3,235	33
24	19:12		10	Wien	72	1,205	88
25	19:16	RJ	32	Wien	73	1,508	71
26	19:23	GZ	52	Wien	74	1,6	67

**Tabelle 11: Zugsvorbeifahrten 07.04.2022.**

Datum:	07.04.2022				Knittelfeld	Geschwindigkeit	
Nr.	Uhrzeit	Zugtyp	Achsen	Richtung	file	dt (s)	v (km/h)
1	09:08	Talent	10	Wien	5	1,254	85
2	09:17	RJ	32	Wien	6	1,332	80
3	09:32	GZ?	52	Wien	7	1,31	81
4	09:59	GZ	63	Wien	11	2,841	38
5	10:09	Talent	10	Wien	12	1,704	63
6	10:19	GZ	80	Wien	13	2,553	42
7	10:46	Lok	4	Wien	17	1,45	73
8	11:09	Talent	10	Wien	18	2,04	52
9	11:14	RJ	32	Wien	19	1,179	90
10	11:22	Talent-doppel	20	Wien	20	2,037	52
11	11:44	GZ	77	Wien	22	2,676	40
12	11:58	Lok	4	Wien	23	2,756	39
13	12:08	Desiro	12	Wien	24	1,226	87
14	13:09	Talent	10	Wien	29	1,397	76
15	13:15	RJ	32	Wien	30	1,49	72
16	13:20	GZ?	31	Wien	31	1,352	79
17	13:28	GZ	65	Wien	32	2,884	37
18	14:09	Talent	10	Wien	33	1,804	59
19	14:25	GZ	41	Wien	35	1,784	60
20	14:49	Talent	10	Knittelfeld	37	1,616	66
21	14:57	GZ	21	Wien	38	1,9	56
22	15:08	Talent	10	Wien	39	1,188	90
23	15:13	GZ	96	Wien	40	3,04	35
24	15:20	Lok	4	Wien	42	1,954	55
25	15:31	RJ	32	Wien	43	1,308	81
26	16:09	Talent	10	Wien	44	1,2	89
27	16:20	GZ	107	Wien	45	3,56	30
28	16:29	GZ	74	Wien	46	2,9	37
29	16:35	Lok	4	Wien	47	1,19	90
30	16:47	GZ	66	Wien	48	2,63	41
31	17:09	Talent-doppel	20	Wien	49	1,302	82
32	17:15	RJ	32	Wien	50	1,73	62
33	17:28	GZ	53	Wien	51	1,22	87
34	17:45	GZ	58	Wien	52	2,5	43
35	18:09	Desiro	12	Wien	53	1,59	67
36	18:34	GZ	72	Wien	55	1,2	89
37	18:52	GZ	63	Wien	56	2,5	43
38	19:10	Talent	10	Wien	57	2,2	48
39	19:15	RJ	32	Wien	58	1,61	66
40	19:33	Lok	4	Wien	59	2,11	51
41	19:41	GZ	37	Wien	60	2,63	41
42	20:03	GZ	72	Wien	61	2,87	37
43	20:10	Talent	10	Wien	62	1,615	66



**Tabelle 12: Zugsvorbeifahrten 08.04.2022.**

<b>Datum:</b>	08.04.2022				<b>Knittelfeld</b>	<b>Geschwindigkeit</b>	
<b>Nr.</b>	<b>Uhrzeit</b>	<b>Zugtyp</b>	<b>Achsen</b>	<b>Richtung</b>	<b>file</b>	<b>dt (s)</b>	<b>v (km/h)</b>
1	06:20		12	Wien	2	1,743	61
2	06:39		12	Wien	3	1,314	81
3	07:04		10	Wien	4	1,269	84
4	07:08	GZ	66	Wien	5	2,773	38
5	07:30		34	Wien	6	1,172	91
6	07:37		4	Wien	7	1,187	90
7	07:45		10	Wien	8	1,18	90
8	08:09		10	Wien	9	1,29	83
9	08:23		8	Wien	10	1,18	90
10	08:28	GZ	76	Wien	11	2,813	38
11	09:09		10	Wien	13	1,183	90
12	09:15	RJ	32	Wien	15	1,553	69
13	09:26	GZ	120	Wien	16	3,015	35
14	09:32	GZ	52	Wien	17	1,626	66
15	09:39		4	Wien	18	2,773	38
16	09:43		4	Wien	19	1,707	62
17	10:07		24	Wien	20	1,792	59
18	10:14		10	Wien	22	1,695	63

## ANHANG C – MESSPROTOKOLLE ZT KIRISITS



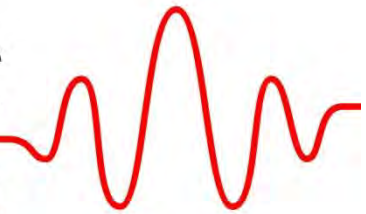
DIPL.-ING. DR.

**KIRISITS**

**AKUSTIK - LÄRMSCHUTZ - BAUPHYSIK**

7423 PINKAFELD

WWW.AKUSTIK-KIRI.AT



## MESSPROTOKOLLE

AcouBridge

## Verwendete Messgeräte Achau

### *Schallpegelmessgerät - MP 11*

Schallpegelmessgerät: Norsonic, Typ 140, SN: 1403767

Mikrofon: Norsonic, Typ 1225, SN: 225490

Vorverstärker: Norsonic, Typ 1209, SN: 20591

Datum der Eichung: 02.01.2020

Akustische Kalibrator: Norsonic, Typ 1251, SN: 31500

Datum der Eichung: 02.01.2020

### *Schallpegelmessgerät - MP 12*

Schallpegelmessgerät: Norsonic, Typ 140, SN: 1405965

Mikrofon: Norsonic, Typ 1225, SN: 208249

Vorverstärker: Norsonic, Typ 1209, SN: 15827

Datum der Eichung: 02.01.2020

Akustische Kalibrator: Norsonic, Typ 1251, SN: 31500

Datum der Eichung: 02.01.2020

### *Schallpegelmessgerät - MP 13*

Schallpegelmessgerät: Norsonic, Typ 140, SN: 1406328

Mikrofon: Norsonic, Typ 1225, SN: 106917

Vorverstärker: Norsonic, Typ 1209, SN: 12998

Datum der Eichung: 02.01.2020

Akustische Kalibrator: Norsonic, Typ 1251, SN: 31500

Datum der Eichung: 02.01.2020

*Messtechniker*



Karner Rainer

## Verwendete Messgeräte Knittelfeld

### *Schallpegelmessgerät - MP 9*

Schallpegelmessgerät: Norsonic, Typ 140, SN: 1403767  
Mikrofon: Norsonic, Typ 1225, SN: 225490  
Vorverstärker: Norsonic, Typ 1209, SN: 20591  
Datum der Eichung: 02.01.2020  
Akustische Kalibrator: Norsonic, Typ 1251, SN: 31500  
Datum der Eichung: 04.01.2022

### *Schallpegelmessgerät - MP 10*

Schallpegelmessgerät: Norsonic, Typ 140, SN: 1405965  
Mikrofon: Norsonic, Typ 1225, SN: 208249  
Vorverstärker: Norsonic, Typ 1209, SN: 15827  
Datum der Eichung: 02.01.2020  
Akustische Kalibrator: Norsonic, Typ 1251, SN: 31500  
Datum der Eichung: 04.01.2022

### *Schallpegelmessgerät - MP 11*

Schallpegelmessgerät: Norsonic, Typ 140, SN: 1406328  
Mikrofon: Norsonic, Typ 1225, SN: 106917  
Vorverstärker: Norsonic, Typ 1209, SN: 12998  
Datum der Eichung: 02.01.2020  
Akustische Kalibrator: Norsonic, Typ 1251, SN: 31500  
Datum der Eichung: 04.01.2022

*Messtechniker*



Karner Rainer

## Meteorologie Achau - 09. bis 10. November 2021

Montag 09.11.2020:	bewölkt, Hochnebel
Temperatur:	zwischen 5 und 6 °C
Luftfeuchtigkeit:	zwischen 92 und 95 %
Wind Durchschnitt:	windstill bis 0,5 m/s
Wind Spitzen:	vereinzelt bis max. 1,0 m/s
Windrichtung:	O, O
Niederschlag:	0 mm/m <sup>2</sup>
Dienstag 10.11.2020:	bewölkt, Hochnebel
Temperatur:	zwischen 4 und 5 °C
Luftfeuchtigkeit:	zwischen 90 und 92 %
Wind Durchschnitt:	windstill bis 0,8 m/s
Wind Spitzen:	vereinzelt bis max. 1,0 m/s
Windrichtung:	SO, S
Niederschlag:	0 mm/m <sup>2</sup>

---

## Meteorologie Knittelfeld - 06. bis 08. April 2022

Mittwoch 06.04.2022:	sonnig, vereinzelte Wolken
Temperatur:	zwischen 10 und 18 °C
Luftfeuchtigkeit:	zwischen 32 und 55 %
Wind Durchschnitt:	windstill bis 1,2 m/s
Wind Spitzen:	vereinzelt bis max. 4,0 m/s
Windrichtung:	SW, NO
Niederschlag:	0 mm/m <sup>2</sup>
Donnerstag 07.04.2022:	sonnig, teilw. bewölkt
Temperatur:	zwischen 5 und 18 °C
Luftfeuchtigkeit:	zwischen 32 und 80 %
Wind Durchschnitt:	windstill bis 1,4 m/s
Wind Spitzen:	vereinzelt bis max. 5,0 m/s
Windrichtung:	O, NW, S
Niederschlag:	0 mm/m <sup>2</sup>
Freitag 08.04.2022:	sonnig, teilw. bewölkt,
Temperatur:	zwischen 5 und 10 °C
Luftfeuchtigkeit:	zwischen 55 und 80 %
Wind Durchschnitt:	windstill bis 1,2 m/s
Wind Spitzen:	vereinzelt bis max. 3,0 m/s
Windrichtung:	N
Niederschlag:	0 mm/m <sup>2</sup>

## Beobachtungen Achau - 09. bis 10. November 2021

### *Beobachtungen Montag 09.11.2020*

- Verkehrsgeräusche Bundesstraße (nicht von Relevanz, da sich das Vorbeifahrtsgeräusch deutlich (> 10 dB) vom Umgebungsgeräusch abhebt)
- Flugverkehr
- Bachrauschen
- Vögel

### *Beobachtungen Dienstag 10.11.2020*

- Verkehrsgeräusche Bundesstraße
  - Flugverkehr
  - Bachrauschen
  - Vögel
- 

## Beobachtungen Knittelfeld - 06. bis 08. April 2022

### *Beobachtungen Mittwoch 06.04.2022*

- entfernte Verkehrsgeräusche
- Flugverkehr
- Bachrauschen
- Vögel
- Bauarbeiten entfernt hörbar
- LKW-Fahrten auf Güterweg

### *Beobachtungen Donnerstag 07.04.2022*

- entfernte Verkehrsgeräusche
- Flugverkehr
- Bachrauschen
- Vögel
- Bauarbeiten bei Güterwegsaniegerung
- Traktor auf Feld
- LKW-Fahrten auf Güterweg
- Motorsäge entfernt hörbar

### *Beobachtungen Freitag 08.04.2022*

- entfernte Verkehrsgeräusche
- Flugverkehr
- Bachrauschen
- Vögel
- LKW-Fahrten auf Güterweg

## ANHANG D - MESSUNG DER TRACK DECAY RATE BEI DER BRÜCKE IN ACHAU (AIT)

### Aufgabenstellung

Bestimmung der Track Decay Rate an den Schienen bei der Brücke über der Schwechat. Einmal auf der Brücke, einmal am Bahndamm.

### Messobjekt

Gemessen wurde am Objekt SB01 bei Achau, Eisenbahnbrücke über die Schwechat bei km 14,813 der Pottendorfer Linie. Die Messstelle Brücke befand sich auf der Brücke, die Messstelle Freie Strecke ca. 140 m südlicher.

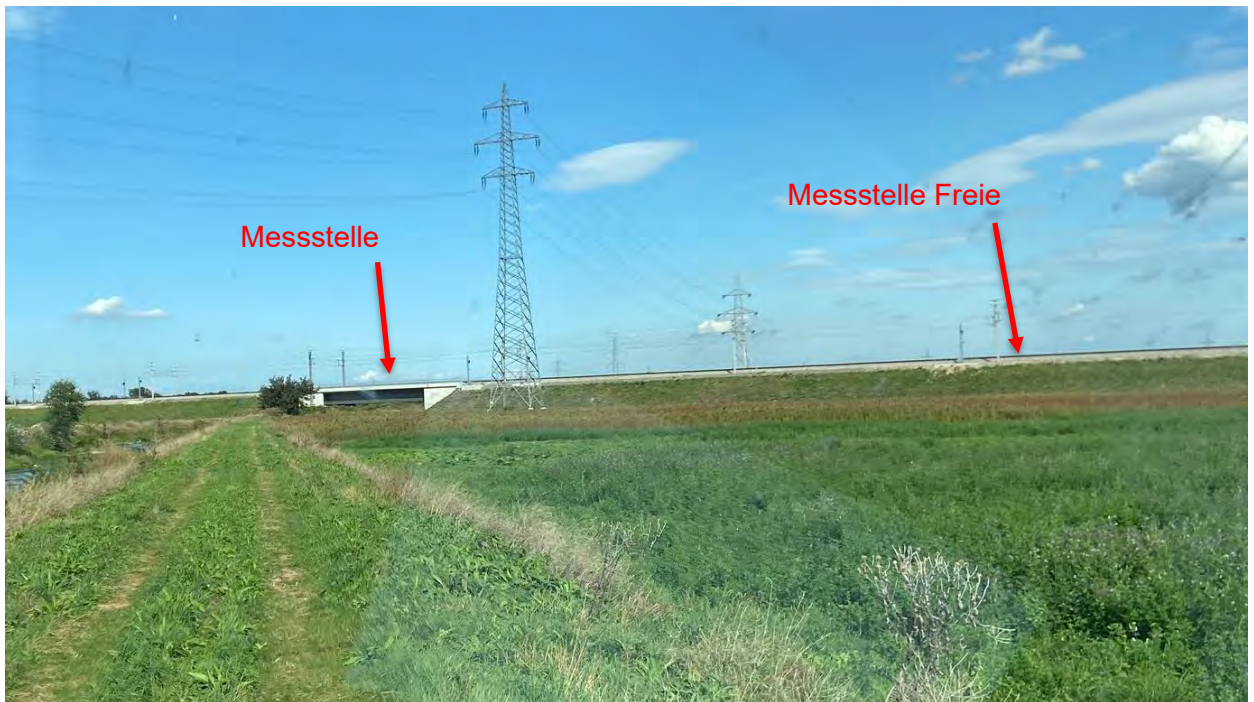


Abbildung 65: Messobjekt.

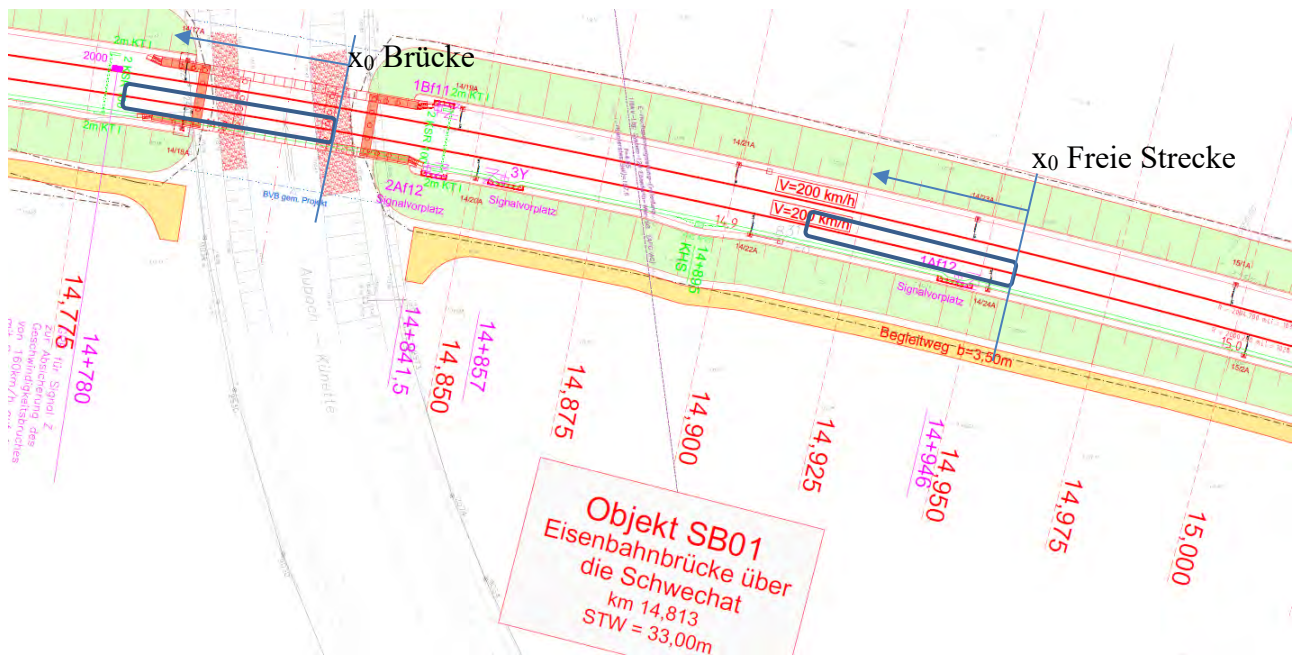


Abbildung 66: Übersichtplan (Quelle: ÖBB Plan Nr. PE3311-AF30-AUBFSP-02-1025-F01).



Abbildung 67: Brücke über die Schwechat (Ansicht von Nordwesten).





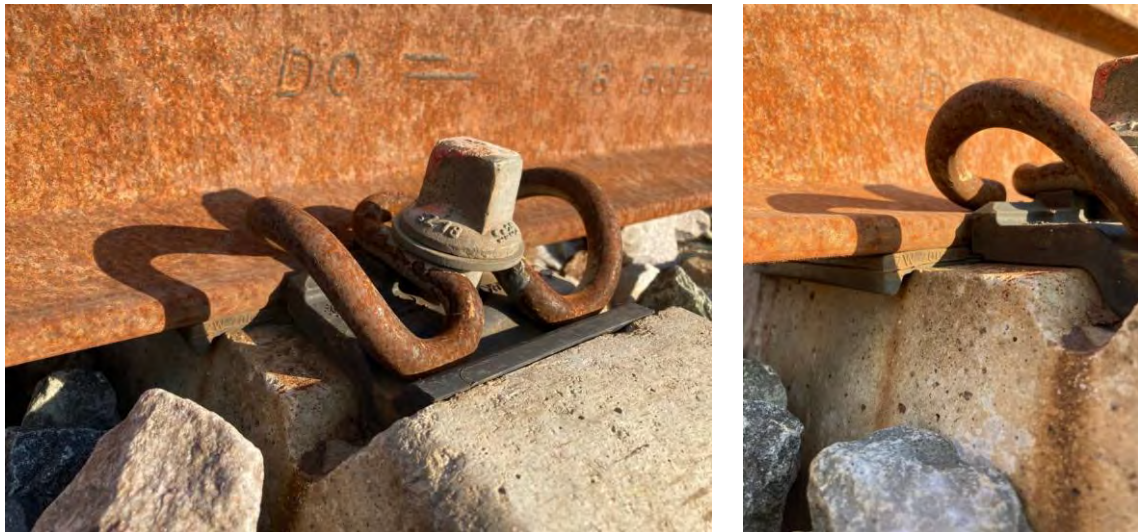
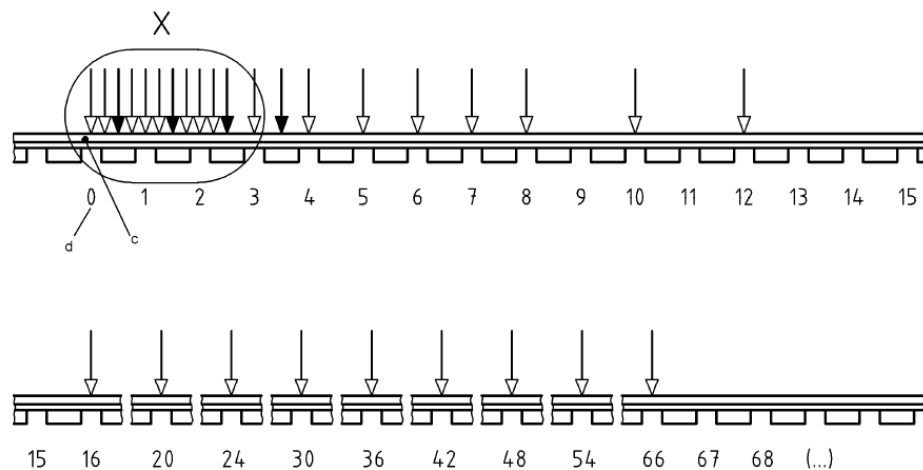
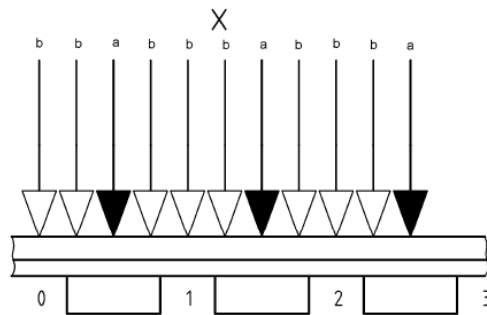


Abbildung 70: Schienenzwischenlage der Type ZW700.

### Messaufstellung

Die Beschleunigungssensoren a1 und a2 wurden in der Mitte des Schwellenfaches 0 mit Magnet an der Unterseite (a1) und seitlich (a2) der Schiene montiert. Mit dem Impulshammer (mit Stahlspitze) wurden die Anregungspunkte lt. ÖNORM EN 15461 ausgewählt.



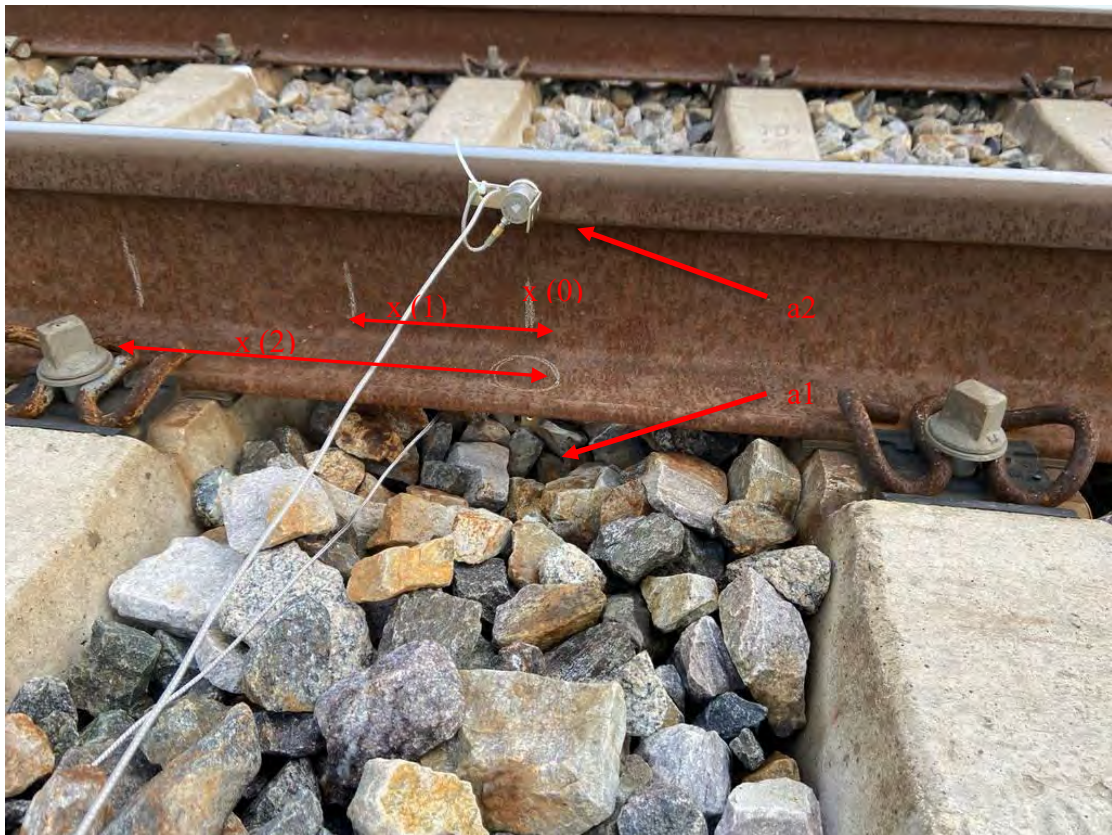


Legende

- a ↓ Hammerschlagimpuls auf der Schiene oberhalb der Schwelle
- b ↓ Hammerschlagimpuls auf der Schiene zwischen den Schwellen
- c Position des Beschleunigungsaufnehmers
- d Index des Schwellenfaches

**Abbildung 71: Gleisabklingraten: Positionsraster der Anregungspunkte im Verhältnis zum festen.**

Messpunkt der Impulsantwort, Quelle: ÖNORM EN 15461:2008



**Abbildung 72: Beschleunigungssensor a2 an der Schiene (MQ 1) bei Schwellenfach 0.**



**Abbildung 73: Messung mit Impulshammer auf der Brücke.**



**Abbildung 74: Messung mit Impulshammer auf der freien Strecke am Damm.**

Die Temperatur lag etwa bei 0°C, es war bewölkt und windig.

## Messkette

### Verwendete Geräte

Es kamen folgende Geräte zum Einsatz:

- Messnotebook Dell Latitude 14, (SN: D9RJTG2)
- 1 NI cDAQ-9178 Gehäuse für Messmodule (SN: 1E161A2)
- 1 Messmodule NI 9234 (SN: 13A5BBD)
- 2 Beschl.-sensor BK4381 (SN: siehe Kanalbelegung)
- 1 Impulshammer BK 8202 (SN: 1231910)
- 2 Messverstärker BK 2635 (SN: 1674870, 814923)

Die Geräte und Sensoren werden im Rahmen der Qualitätssicherung regelmäßig kalibriert.

### Durchführung der Messung

Die Messungen fanden am 2.12. 2020 bei Achau statt. Hier wurde auch ein SIPO von den ÖBB für Messung an der Schiene bereitgestellt.

Die Daten wurden mit einer Samplerate von 25600 Hz erfasst. Die Zeitsignale wurden mit DasyLab 14.0.1 aufgezeichnet und für die spätere Auswertung gespeichert.

**Tabelle 13: Kanalbelegung.**

Ch	Name	Sensor	SN	Empf.		Einheit	HP	TP
0	Impulshammer	BK 8202	1231910	1	pC/N	N	2	10000
1	a 1 (vertikal)	BK 4381	30451	10,030	pC/m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	2	10000
2	a 2 (horizontal)	BK 4381	30462	10,000	pC/m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	2	10000

Pro Messposition wurden 4 Hammerschläge mit ca. 1000 – 3000 N eingeleitet. Die Zeitsignale wurden getriggert aufgezeichnet. Eine Datei ist 1,25 s lang.

**Tabelle 14: Ablauf der Messung.**

Nr.	Uhrzeit	Bemerkung
1	10:08	Brücke Vertikal
2	10:28	Brücke Horizontal
3	10:46	Brücke Vertikal - 2
4	11:35	Damm Vertikal
5	11:44	Damm Horizontal



## Ergebnisse der TRD Messungen in Achau

Zeitsignale Brücke, vertikale Anregung.

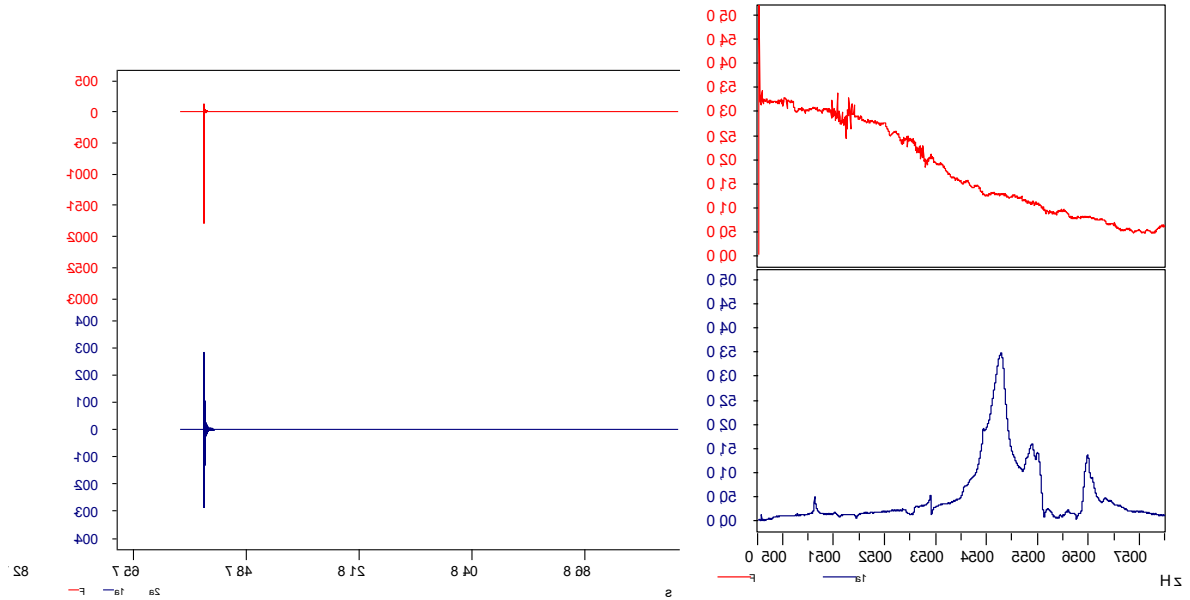


Abbildung 76: Getriggertes Zeitsignal und FFT bei MP0 in Achau (vertikale Anregung).

Zeitsignale Brücke, horizontale Anregung.

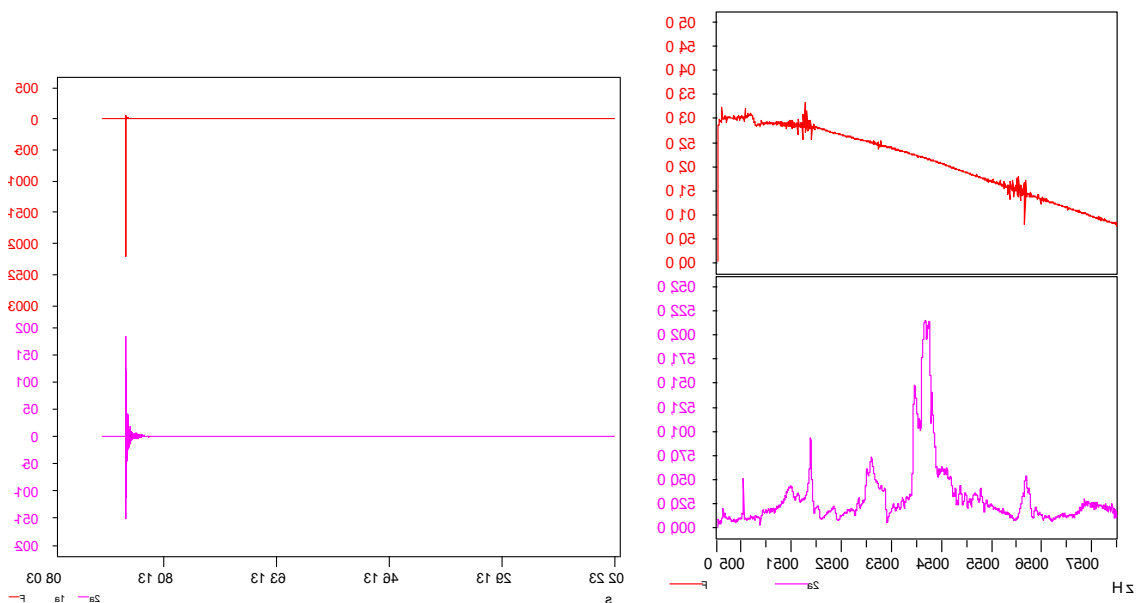


Abbildung 77: Getriggertes Zeitsignal und FFT bei MP0 in Achau (horizontale Anregung).

Zeitsignale Freie Strecke, vertikale Anregung.

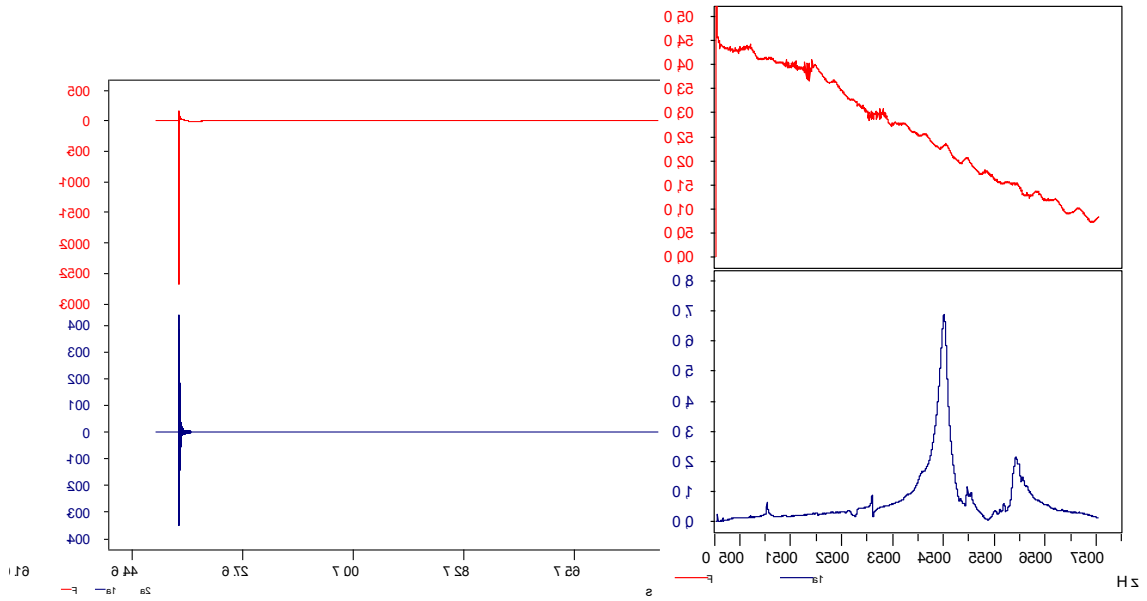


Abbildung 78: Getriggertes Zeitsignal und FFT bei MP0 in Achau (vertikale Anregung).

Zeitsignale Freie Strecke, horizontale Anregung.

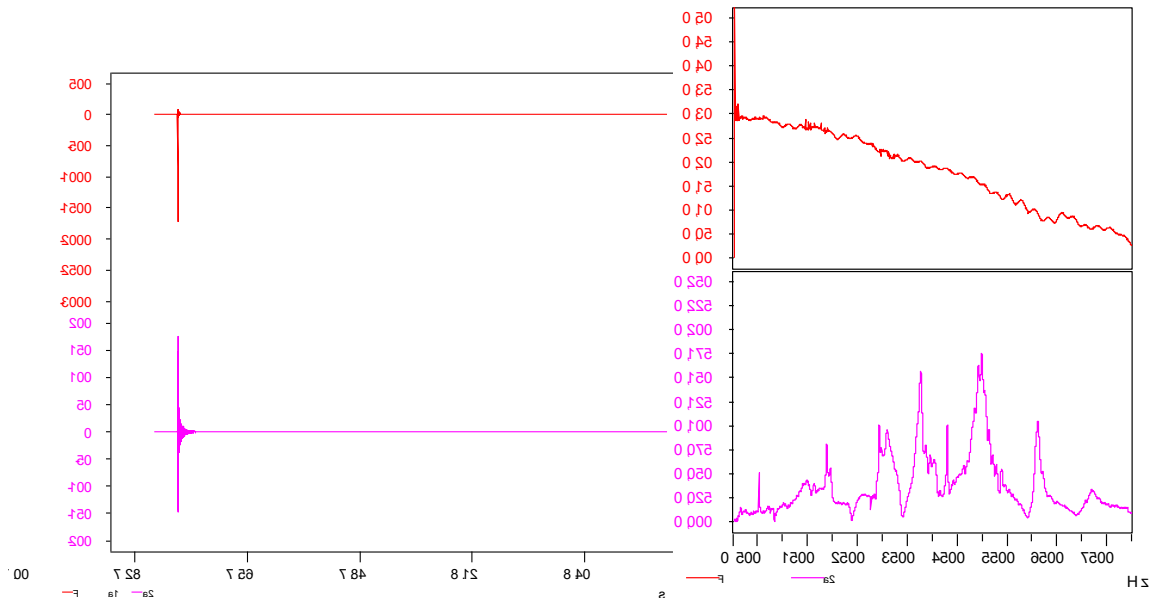


Abbildung 79: Getriggertes Zeitsignal und FFT bei MP0 in Achau (horizontale Anregung).



## ANHANG E – MESSUNG DER TRACK DECAY RATE BEI DER BRÜCKE IN KNITTELFELD (AIT)

### Aufgabenstellung

Bestimmung der Track Decay Rate an den Schienen bei der Murbrücke in Knittelfeld. Einmal auf der Brücke, einmal am Bahndamm.

### Messobjekt

Gemessen wurde auf und bei der Eisenbahnbrücke über die in Knittelfeld der ÖBB Südbahnstrecke. Die Messtelle Brücke befand sich auf der Brücke, die Messtelle Freie Strecke ca. 140 m östlicher.

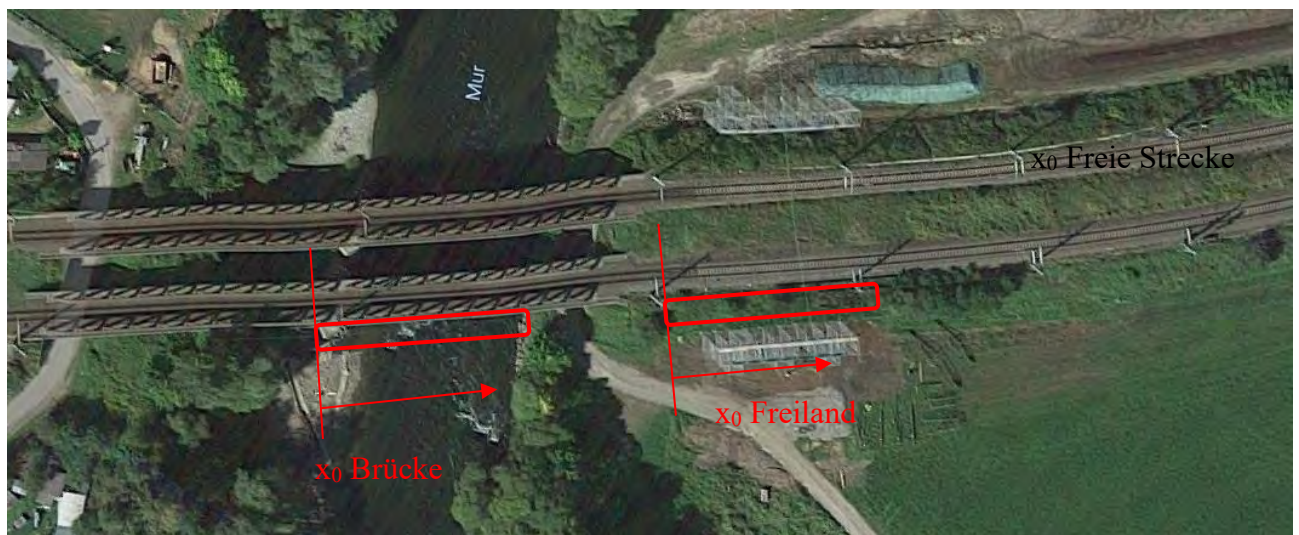


Abbildung 80: Übersichtplan (Quelle: Google Maps vom 09.06.2022).



Abbildung 81: Brücke über die Mur (Ansicht von Süden).

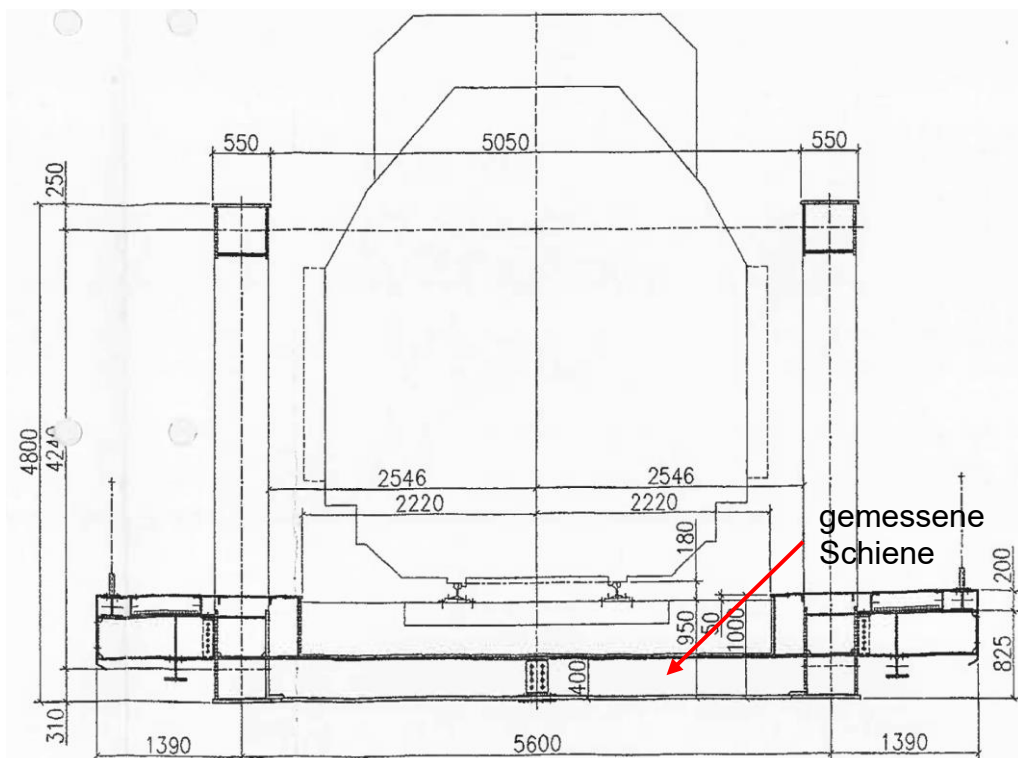


Abbildung 82: Querschnitt von Brücke (aus ÖBB Plan Nr.: 01/011-01-02/D).



Abbildung 83: Holzschwellen auf Schotteroberbau (Brücke).



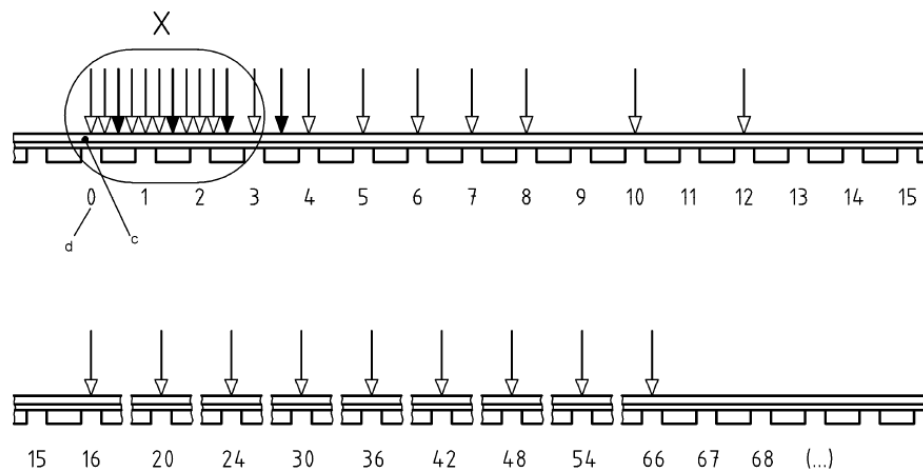
Abbildung 84: Betonschwellen auf Schotteroberbau (Freie Strecke).

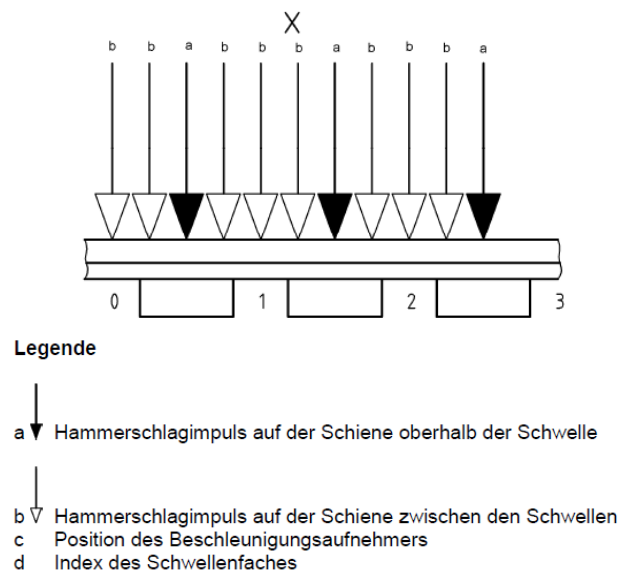


**Abbildung 85: Übergang von Schienen- und Schwellentyp kurz nach der Brücke Richtung Osten.**

## Messaufstellung

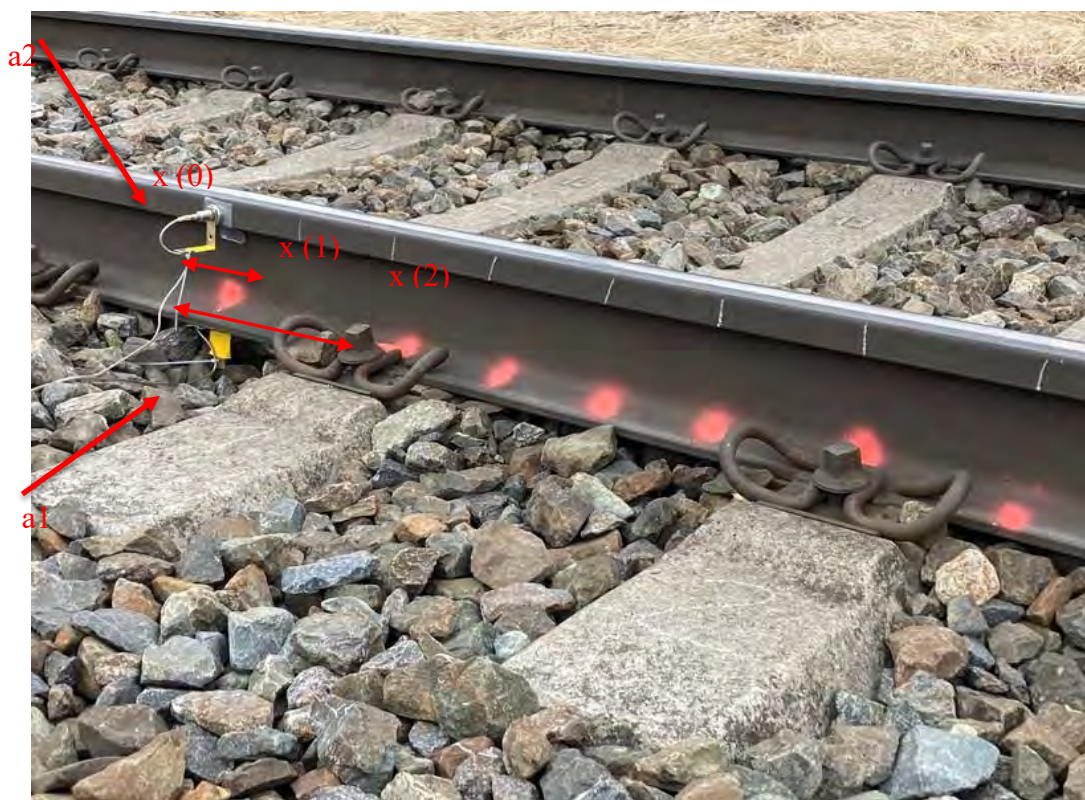
Die Beschleunigungssensoren a1 und a2 wurden in der Mitte des Schwellenfaches 0 mit Magnet an der Unterseite (a1) und seitlich (a2) der Schiene montiert. Mit dem Impulshammer (mit Stahlspitze) wurden die Anregungspunkte lt. ÖNORM EN 15461 ausgewählt.





**Abbildung 86: Gleisabklingraten: Positions raster der Anregungspunkte im Verhältnis zum festen.**

Messpunkt der Impulsantwort, Quelle: ÖNORM EN 15461:2008



**Abbildung 87: Beschleunigungssensor a2 an der Schiene (MQ 1) auf der Freien Strecke.**



**Abbildung 88: Messung mit Impulshammer auf der Freien Strecke.**

Die Temperatur lag etwa bei 10°C.



**Abbildung 89: Schweißnaht bei Anregepunkt 11**

## Messkette

### Verwendete Geräte

Es kamen folgende Geräte zum Einsatz:

- Messnotebook Dell Latitude 14, (SN: D9RJTG2)
- 1 NI cDAQ-9178 Gehäuse für Messmodule (SN: 1E161A2)
- 1 Messmodule NI 9234 (SN: 13A5BBD)
- 2 Beschl.-sensor BK4381 (SN: siehe Kanalbelegung)
- 1 Impulshammer BK 8202 (SN: 1231910)
- 2 Messverstärker BK 2635 (SN: 1674870, 814923)

Die Geräte und Sensoren werden im Rahmen der Qualitätssicherung regelmäßig kalibriert.

### Durchführung der Messung

Die Messungen fanden am 08.04.2022 bei Knittelfeld statt. Hier wurde auch ein SIPO von den ÖBB für Messung an der Schiene bereitgestellt.

Die Daten wurden mit einer Samplerate von 25600 Hz erfasst. Die Zeitsignale wurden mit DasyLab 14.0.1 aufgezeichnet und für die spätere Auswertung gespeichert.

**Tabelle 15: Kanalbelegung**

Ch	Name	Sensor	SN	Empf.		Einheit	HP	TP
0	Impulshammer	BK 8202	1231910	1	pC/N	N	2	10000
1	a 1 (vertikal)	Kistler 8702B100M1	2025309	5,036	mV/m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	2	10000
2	a 2 (horizontal)	Kistler 8704B100M1	C197263	5,110	mV/m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	2	10000

Pro Messposition wurden 4 Hammerschläge mit ca. 1000 – 3000 N eingeleitet. Die Zeitsignale wurden getriggert aufgezeichnet. Eine Datei ist 1,25 s lang.

**Tabelle 16: Ablauf der Messung**

Nr.	Uhrzeit	Bemerkung
1	08:30	Brücke Vertikal
2	08:45	Brücke Horizontal
3	09:36	Damm Vertikal
4	09:51	Damm Horizontal





## Ergebnisse der TRD Messungen in Knittelfeld

Zeitsignale Brücke, vertikale Anregung.

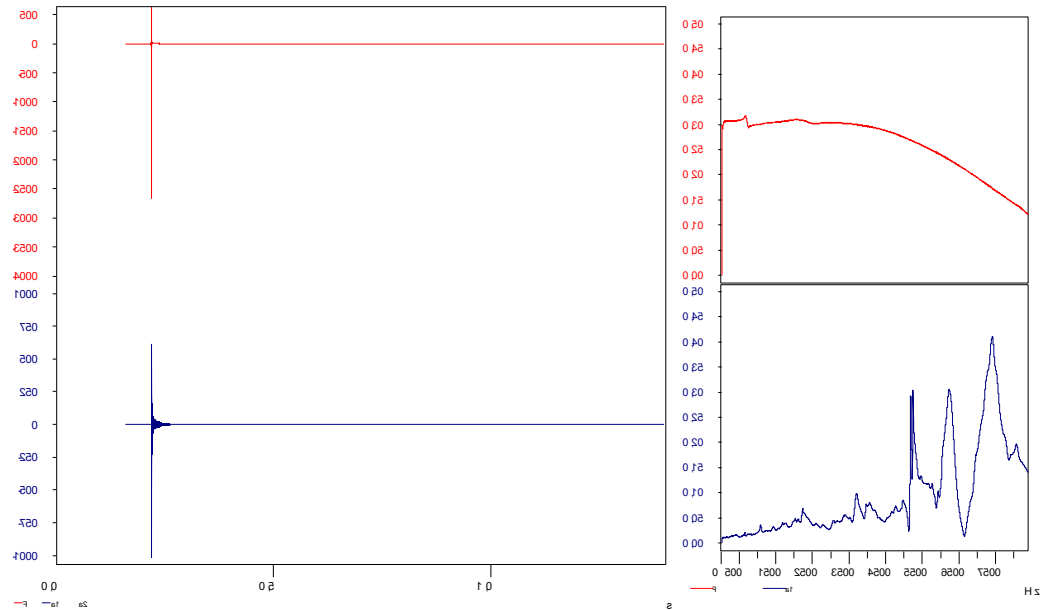


Abbildung 91: Getriggertes Zeitsignal und FFT bei MP0 in Knittelfeld (vertikale Anregung).

Zeitsignale Brücke, horizontale Anregung.

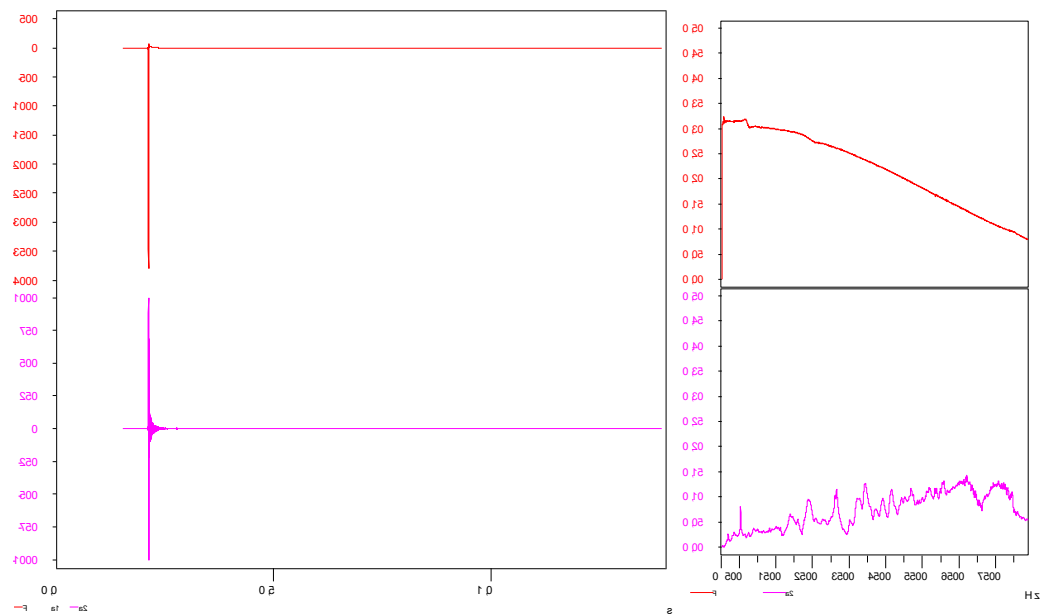


Abbildung 92: Getriggertes Zeitsignal und FFT bei MP0 in Knittelfeld (horizontale Anregung).

Zeitsignale Freie Strecke, vertikale Anregung.

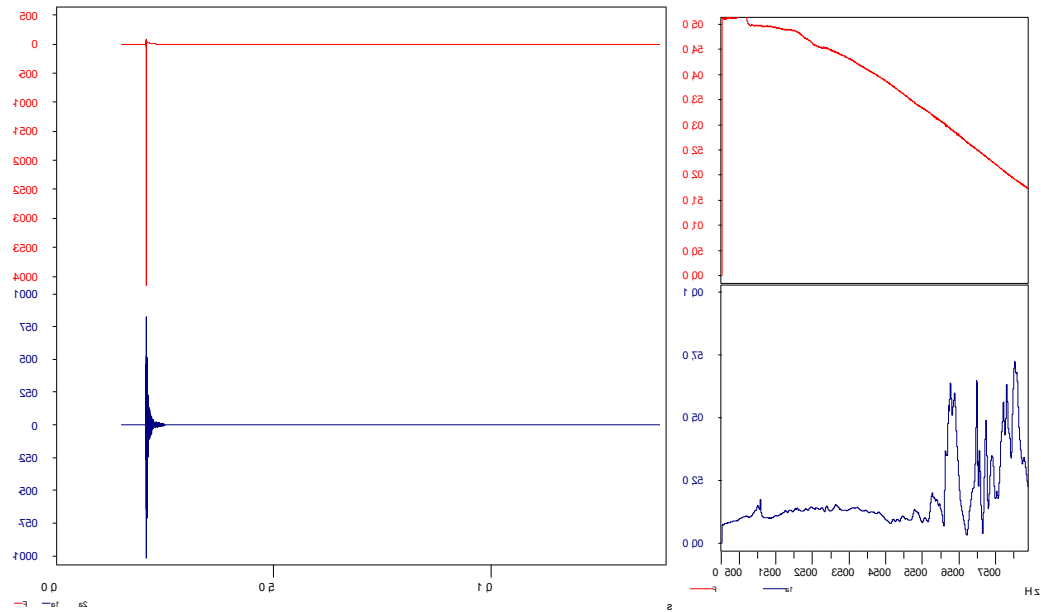


Abbildung 93: Getriggertes Zeitsignal und FFT bei MP0 in Knittelfeld (vertikale Anregung).

Zeitsignale Freie Strecke, horizontale Anregung.

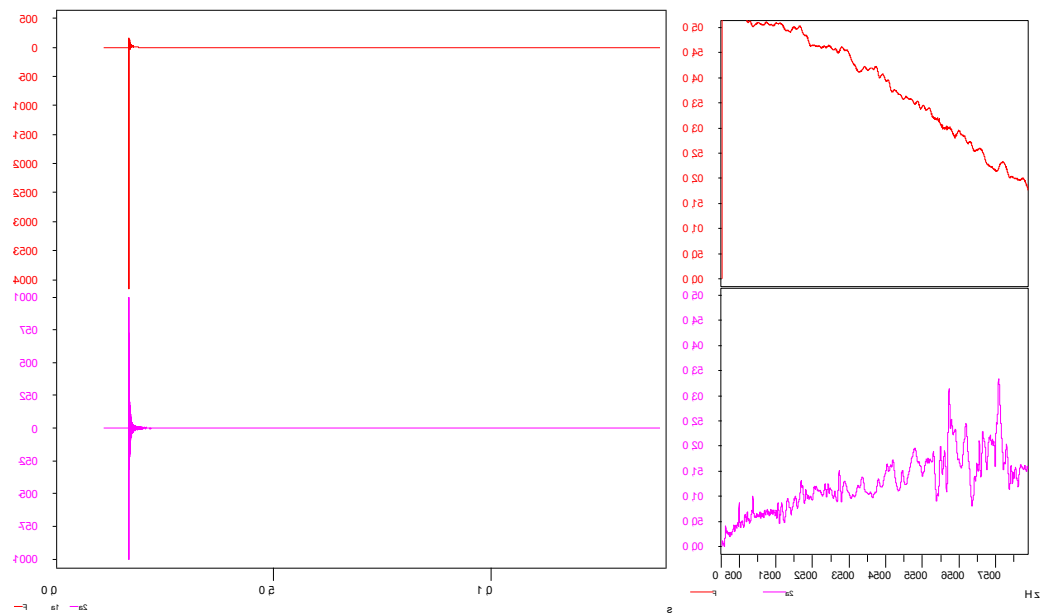


Abbildung 94: Getriggertes Zeitsignal und FFT bei MP0 in Knittelfeld (horizontale Anregung).

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Brücke über die Schwechat (Ansicht von Südwesten).....	15
Abbildung 2: AIT-Messaufbau für akustische Messungen. ....	16
Abbildung 3: akustische Messungen beim betrachteten Brückenquerschnitt (links) sowie beim Querschnitt auf freier Strecke (rechts).....	17
Abbildung 4: Pegeldifferenz zwischen Brückenquerschnitt (Mikrophon M2) und Querschnitt auf freier Strecke (Mikrophon M5). Positive Werte entsprechen höheren Pegeln am Brückenquerschnitt. ....	17
Abbildung 5: Luftbilddaufnahme der Messstelle mit Lage und Bezeichnung der Messpunkte.	18
Abbildung 6: Schnitt der Messstelle mit Bezeichnung der Messpunkte. ....	18
Abbildung 7: Detailansicht Steg und MQ 1 bis 5.....	19
Abbildung 8: Messquerschnitte 0 (oben) und 5 (unten). ....	20
Abbildung 9: Beschleunigungssensoren a7 bis a12 am Blech P2. ....	20
Abbildung 10: Beschleunigungssensoren a13 bis a16 am Blech P5 zwischen den Tragwerken. ....	21
Abbildung 11: Messraster P2, Sensoraufstellung bei Impulshammer Test Nr. 12. ....	22
Abbildung 12: Messraster P2, Sensoraufstellung bei Impulshammer, P5. ....	22
Abbildung 13: Ergebnisse der TDR Messungen in Achau.....	23
Abbildung 14: Brücke (oben) sowie Nahaufnahme von Zugüberfahrt (unten) (Ansicht von Süden).....	24
Abbildung 15: Luftbilddaufnahme der Messstelle mit Lage und Bezeichnung der Messpunkte. ....	25
Abbildung 16: Pegeldifferenz zwischen Brückenquerschnitt und Querschnitt auf freier Strecke. Positive Werte entsprechen höheren Pegeln am Brückenquerschnitt. ....	26
Abbildung 17: Pegeldifferenz zwischen Brückenquerschnitt und Querschnitt auf freier Strecke. Positive Werte entsprechen höheren Pegeln am Brückenquerschnitt. ....	26
Abbildung 18: DMS 3 und DMS 4 bei MQ3. ....	27
Abbildung 19: Beschleunigungssensoren a1 und a2 und die Magnet DMS 1 bis 4.....	27
Abbildung 20: Übersicht der Sensoren im MQ2. ....	28
Abbildung 21: MQ 2, Unterseite. ....	28
Abbildung 22: Fachwerk bestückt mit 5 Beschleunigungssensoren a 8 bis a12. ....	29
Abbildung 23: Messquerschnitt 2 mit Beschleunigungssensoren a 8 bis a11. ....	29
Abbildung 24: Abdeckbleche bei MQ1 (links) und MQ 2 (rechts).....	30
Abbildung 25: MQ 2, Abdeckblech. ....	30
Abbildung 26: Ergebnisse der TDR Messungen in Knittelfeld.....	31

Abbildung 27: Schematische Darstellung der Achslasten.....	32
Abbildung 28: Bestimmung der Zugsgeschwindigkeit(links) und des Achsenabstands(rechts). .....	33
Abbildung 29: Verschiebung der gemessenen Brückenbeschleunigung im Frequenzbereich.	34
Abbildung 30: FE-Modell der Brücke in Achau. ....	34
Abbildung 31: Vergleich zwischen der ersten gemessenen (links) und berechneten (rechts) Eigenform des Stags. ....	35
Abbildung 32: Vergleich zwischen der zweiten gemessenen (links) und berechneten (rechts) Eigenform des Stags. ....	35
Abbildung 33: Vergleich zwischen der dritten gemessenen (links) und berechneten (rechts) Eigenform des Stags. ....	36
Abbildung 34: Brückenschwingungen bei einer Zugüberfahrt mit 122 km/h im Zeitbereich (links) und Frequenzbereich (rechts).....	37
Abbildung 35: Brückenschwingungen bei einer Zugüberfahrt mit 101 km/h im Zeitbereich (links) und Frequenzbereich (rechts).....	37
Abbildung 36: Brückenschwingungen bei einer Zugüberfahrt mit 119 km/h im Zeitbereich (links) und Frequenzbereich (rechts).....	38
Abbildung 37: Brückenschwingungen bei einer Zugüberfahrt mit 156 km/h im Zeitbereich (links) und Frequenzbereich (rechts).....	38
Abbildung 38: Brückenschwingungen bei einer Güterzugsüberfahrt mit 100 km/h im Zeitbereich (links) und Frequenzbereich (rechts).....	39
Abbildung 39: Dreidimensionales FE-Modell von der Knittelfeldbrücke. ....	39
Abbildung 40: Beschleunigungen am Fachwerk (Messpunkt a8) bei einer Überfahrt von Desiro mit 59 km/h im Zeitbereich (links) und Frequenzbereich (rechts). ....	41
Abbildung 41: Beschleunigungen am Fachwerk (Messpunkt a10) bei einer Überfahrt vom Desiro mit 59 km/h im Zeitbereich (links) und Frequenzbereich (rechts). ....	41
Abbildung 42: Beschleunigungen am Abdeckblech (Messpunkt a15) bei einer Überfahrt vom Desiro mit 59 km/h im Zeitbereich (links) und Frequenzbereich (rechts). ....	42
Abbildung 43: Beschleunigungen am Hauptträger (Messpunkt a6) bei einer Überfahrt vom Talent mit 89 km/h im Zeitbereich (links) und Frequenzbereich (rechts).....	42
Abbildung 44: Beschleunigungen am Fachwerk (Messpunkt a8) bei einer Überfahrt vom Talent mit 89 km/h im Zeitbereich (links) und Frequenzbereich (rechts).....	43
Abbildung 45: Beschleunigungen am Fachwerk (Messpunkt a10) bei einer Überfahrt vom Talent mit 89 km/h im Zeitbereich (links) und Frequenzbereich (rechts).....	43
Abbildung 46: Beschleunigungen am Abdeckblech (Messpunkt a15) bei einer Überfahrt vom Talent mit 89 km/h im Zeitbereich (links) und Frequenzbereich (rechts).....	44
Abbildung 47: Beschleunigungen am Hauptträger (Messpunkt a6) bei einer Überfahrt vom Güterzug mit 35 km/h im Zeitbereich (links) und Frequenzbereich (rechts).....	44

Abbildung 48: Beschleunigungen am Fachwerk (Messpunkt a8) bei einer Überfahrt vom Güterzug mit 35 km/h im Zeitbereich (links) und Frequenzbereich (rechts).....	45
Abbildung 49: Beschleunigungen am Fachwerk (Messpunkt a10) bei einer Überfahrt vom Güterzug mit 35 km/h im Zeitbereich (links) und Frequenzbereich (rechts).....	45
Abbildung 50: Beschleunigungen am Abdeckblech (Messpunkt a15) bei einer Überfahrt vom Güterzug mit 35 km/h im Zeitbereich (links) und Frequenzbereich (rechts).....	46
Abbildung 51: 3-dimensionales Geländemodell des Untersuchungsraumes an der Brücke in Achau. MP bezeichnen die Messpunkte, welche für das Vergleichsberechnungsmodell herangezogen wurden. ....	50
Abbildung 52: Lageplan des Untersuchungsraumes an der Brücke in Achau. Neben den Positionen der Messpunkte (MP) ist die modellierte Schienenstrecke, sowie der Bereich möglicher Brückenzuschläge (Ersatzquelle für Brückengeräusche) farblich markiert. ....	51
Abbildung 53: Pegeldifferenz zwischen dem MP direkt an der Brücke (rot) und den drei MPs (blau, grün und violett) parallel zur Strecke für alle Zugvorbeifahrten in Achau. Gemessene Werte sind durch ihren Median (durchgezogene Linie) sowie dem 25% und 75% Perzentile (punktierte Linien) dargestellt. Kreise entsprechen den berechneten Werten. ....	52
Abbildung 54: Pegeldifferenz zwischen dem MP direkt an der Brücke (rot) und den drei MPs (blau, grün und violett) parallel zur Strecke für Vorbeifahrten von Fahrzeugen mit Scheibenbremsen am nächstgelegenen Gleis in Achau.....	53
Abbildung 55: 3-dimensionales Geländemodell des Untersuchungsraumes an der Brücke in Knittelfeld. MP bezeichnen die Messpunkte, welche für das Vergleichsberechnungsmodell herangezogen wurden. ....	54
Abbildung 56: Lageplan des Untersuchungsraumes an der Brücke in Knittelfeld. Neben den Positionen der Messpunkte (MP) ist die modellierte Schienenstrecke, der dort vorliegende Schwellentyp, sowie der Bereich möglicher Brückenzuschläge (Ersatzquelle für Brückengeräusche) farblich markiert. ....	55
Abbildung 57: Pegeldifferenz zwischen dem MP direkt an der Brücke (rot) und den drei MPs (blau, grün und violett) parallel zur Strecke (für alle Zugvorbeifahrten am nächstgelegenen Gleis in Knittelfeld. Gemessene Werte sind durch ihren Median (durchgezogene Linie) sowie dem 25% und 75% Perzentile (punktierte Linien) dargestellt. Kreise entsprechen den berechneten Werten. ....	55
Abbildung 58: Pegeldifferenz zwischen dem MP direkt an der Brücke (rot) und den drei MPs (blau, grün und violett) parallel zur Strecke für Vorbeifahrten von Fahrzeugen mit Scheibenbremsen am nächstgelegenen Gleis in Knittelfeld. Zusätzlich dargestellt sind Berechnungswerte unter der Annahme einer harten Zwischenlage im Referenzpunkt (Kreuze). ....	56
Abbildung 59: Pegeldifferenz zwischen dem MP direkt an der Brücke (rot) und den drei MPs (blau, grün und violett) parallel zur Strecke für Vorbeifahrten von Fahrzeugen mit Scheibenbremsen am nächstgelegenen Gleis in Knittelfeld. Die berechneten Werte (Kreise) entsprechen dem Fall mit Brückenzuschlag „+10 dB“.....	57
Abbildung 60: Pegeldifferenz zwischen dem MP direkt an der Brücke (rot) und den drei MPs (blau, grün und violett) parallel zur Strecke für Vorbeifahrten von Fahrzeugen mit	

Scheibenbremsen am nächstgelegenen Gleis in Knittelfeld. Die berechneten Werte (Kreise) entsprechen dem Fall mit Brückenzuschlag „+10 dB“ und Schienentransferfunktion für direkte Befestigung.....	57
Abbildung 61: Pegeldifferenz zwischen dem MP direkt an der Brücke (rot) und den drei MPs (blau, grün und violett) parallel zur Strecke für Vorbeifahrten von Fahrzeugen mit Scheibenbremsen am nächstgelegenen Gleis in Knittelfeld. Die berechneten Werte (Kreise) entsprechen dem Fall einer um 3 dB reduzierten „+10dB“ Brückentransferfunktion .....	59
Abbildung 62: Pegeldifferenz zwischen dem MP direkt an der Brücke (rot) und den drei MPs (blau, grün und violett) parallel zur Strecke für Vorbeifahrten von Fahrzeugen mit Scheibenbremsen am nächstgelegenen Gleis in Knittelfeld. Die berechneten Werte (Kreise) entsprechen dem Fall einer um 6 dB reduzierten „+10dB“ Brückentransferfunktion .....	59
Abbildung 63: Pegeldifferenz zwischen dem MP direkt an der Brücke (rot) und den drei MPs (blau, grün und violett) parallel zur Strecke für Vorbeifahrten von Fahrzeugen mit Scheibenbremsen am nächstgelegenen Gleis in Achau. Die berechneten Werte (Kreise) entsprechen dem Fall mit Brückenzuschlag LB-BM. ....	61
Abbildung 64: Rasterkarte in Knittelfeld. ....	62
Abbildung 65: Messobjekt. ....	79
Abbildung 66: Übersichtplan (Quelle: ÖBB Plan Nr. PE3311-AF30-AUBFSP-02-1025-F01). ....	80
Abbildung 67: Brücke über die Schwechat (Ansicht von Nordwesten).....	80
Abbildung 68: Querschnitt in Brückenmitte (aus ÖBB Plan Nr.: PE3311-AF30-SB01KI-02-2210-F00). ....	81
Abbildung 69: Betonschwellen auf Schotteroberbaue (Brücke und Freie Strecke).....	81
Abbildung 70: Schienenzwischenlage der Type ZW700. ....	82
Abbildung 71: Gleisabklingraten: Positionsraaster der Anregungspunkte im Verhältnis zum festen.....	83
Abbildung 72: Beschleunigungssensor a2 an der Schiene (MQ 1) bei Schwellenfach 0.....	83
Abbildung 73: Messung mit Impulshammer auf der Brücke. ....	84
Abbildung 74: Messung mit Impulshammer auf der freien Strecke am Damm.....	84
Abbildung 75: Anregungspositionen und Messdateizuordnung .....	86
Abbildung 76: Getriggertes Zeitsignal und FFT bei MP0 in Achau (vertikale Anregung). ....	87
Abbildung 77: Getriggertes Zeitsignal und FFT bei MP0 in Achau (horizontale Anregung). ....	87
Abbildung 78: Getriggertes Zeitsignal und FFT bei MP0 in Achau (vertikale Anregung). ....	88
Abbildung 79: Getriggertes Zeitsignal und FFT bei MP0 in Achau (horizontale Anregung). ....	88
Abbildung 80: Übersichtplan (Quelle: Google Maps vom 09.06.2022). ....	89
Abbildung 81: Brücke über die Mur (Ansicht von Süden). ....	90
Abbildung 82: Querschnitt von Brücke (aus ÖBB Plan Nr.: 01/011-01-02/D). ....	90

Abbildung 83: Holzschwellen auf Schotteroberbau (Brücke).....	91
Abbildung 84: Betonschwellen auf Schotteroberbau (Freie Strecke). ....	91
Abbildung 85: Übergang von Schienen- und Schwellentyp kurz nach der Brücke Richtung Osten.....	92
Abbildung 86: Gleisabklingraten: Positionsraaster der Anregungspunkte im Verhältnis zum festen.....	93
Abbildung 87: Beschleunigungssensor a2 an der Schiene (MQ 1) auf der Freien Strecke.....	93
Abbildung 88: Messung mit Impulshammer auf der Freien Strecke. ....	94
Abbildung 89: Schweißnaht bei Anregepunkt 11.....	94
Abbildung 90: Anregungspositionen und Messdateizuordnung. ....	96
Abbildung 91: Getriggertes Zeitsignal und FFT bei MP0 in Knittelfeld (vertikale Anregung). .....	97
Abbildung 92: Getriggertes Zeitsignal und FFT bei MP0 in Knittelfeld (horizontale Anregung).....	97
Abbildung 93: Getriggertes Zeitsignal und FFT bei MP0 in Knittelfeld (vertikale Anregung). .....	98
Abbildung 94: Getriggertes Zeitsignal und FFT bei MP0 in Knittelfeld (horizontale Anregung).....	98