

Empa
Überlandstrasse 129
CH-8600 Dübendorf
T +41 58 765 11 11
F +41 58 765 11 22
www.empa.ch

Bundesamt für Umwelt BAFU
Abteilung Lärm / NIS
z.H. Herr Dominik Aeby
3003 Bern

sonRAIL 2x – Publikationsbericht

Untersuchungsbericht:	Empa-Nr. 5211.01845-6
Ihr Auftrag vom:	1. März 2021
Anzahl Seiten inkl. Beilagen:	17

Inhaltsverzeichnis

- 1 Zu diesem Bericht
- 2 Projektmotivation und –ziele
- 3 Umsetzung
- 4 Modellbeschreibung
- 5 Messtechnische Validierung
- 6 Wichtige Ergebnisse und Erkenntnisse
- 7 Diskussion und Ausblick

Disclaimer

Dieser Bericht wurde im Auftrag der Schweizerischen Eidgenossenschaft (BAFU und BAV) verfasst. Für den Inhalt ist alleine der Auftragnehmer verantwortlich.

Dübendorf, 22. Dezember 2023

Der Projektleiter:

Abteilung Akustik / Lärmminderung

Der Abteilungsleiter:

Dr. Andrea Bergamini

Dr. Jean Marc Wunderli

1 Zu diesem Bericht

In diesem Publikationsbericht in deutscher Sprache wird eine Übersicht über die Ergebnisse des sonRAIL 2X Projektes geboten und die Resultate werden eingeordnet. Die technischen Details zur Durchführung des Projektes, zu Zwischenergebnisse und der Methoden sind im Projektbericht mit Empa Nummer 5211.01845-5 in englischer Sprache dargestellt.

2 Projektmotivation und –ziele

Das Projekt sonRAIL2X wurde per Vertrag mit Nummer 1337000438 durch BAFU und BAV finanziert. Das Projekt startete Mitte 2020 und war auf eine Projektdauer von 30 Monaten ausgelegt. Grundlage für den Auftrag war ein Projektantrag der Empa vom 18. Juni 2019. In der Ausgangslage wird dort die Funktionsweise des aktuell in der Schweiz eingesetzten Eisenbahnlärmmodells sonRAIL beschrieben. Bei sonRAIL handelt es sich um ein Modell, welches gemäss Klassifizierung von STAIRRS¹ Level 2 erreicht. Dabei werden ausgehend von Messungen sogenannte Transferfunktionen für die Schallanteile von Fahrzeug und Oberbau zur Modellierung des Rollgeräusches bestimmt. Dieser Ansatz stösst an seine Grenzen, da zum einen die messtechnische Trennung der beiden Anteile Schwierigkeiten bereitet und zum anderen davon ausgegangen wird, dass die zwei Systeme voneinander entkoppelt sind. Diese Annahme ist jedoch nicht oder nur begrenzt gerechtfertigt und schränkt die freie Kombinierbarkeit dieser Transferfunktionen ein, wie beispielsweise die Übertragbarkeit von an einem Standort ermittelten Fahrzeugeigenschaften auf einen anderen Standort.

Ziel des Projektes ist es deshalb, ein neues Rollgeräusch-Emissionsmodell für Eisenbahnen zu entwickeln, welches STAIRRS Level 3 erreicht. Wie in Abbildung 1 schematisch dargestellt, besteht der zentrale Unterschied zwischen den beiden Modellierungsansätzen darin, dass bei Level 3 die Interaktion von Rad und Schiene explizit modelliert und die resultierenden Kontaktkräfte ausgewiesen werden. Gemäss STAIRRS Abschlussbericht wird Level 3 wie folgt beschrieben, wobei der Hinweis auf die Anwendbarkeit auch für Situationen ohne vorliegende Messdaten entscheidend ist.

«The vehicle and track are characterised by their acoustic and dynamic properties, which can be assessed by measurements or calculations. This method of separation is useful when the vehicle or track is not available for pass-by measurements.»

Im ursprünglichen sonRAIL Projekt waren sehr umfangreiche Vorbeifahrtmessungen durchgeführt worden, um einen Grossteil der Fahrzeugflotte auf unterschiedlichen Oberbautypen zu vermessen. Die Fahrzeug- und Oberbaudatenbank muss jedoch laufend aktualisiert werden und es zeigte sich, dass eine regelmässige Durchführung vergleichbarer Messkampagnen zu einem unverhältnismässigen Aufwand führt.

Ergänzend dazu kommen die bereits angetönten Probleme bei der Trennung der Anteile von Fahrzeug und Oberbau, welche sich umso mehr verschärfen, je akustisch optimierter die Oberbaukonstruktion ist. Ziel des Projektes war deshalb, ein Modell zu entwickeln, für welches die notwendigen Modellparameter für Fahrzeuge und Oberbaukonstruktionen mit deutlich weniger Messaufwand ermittelt werden können.

¹ Classification of rolling stock and track, 2nd draft, STAIRRS project, 2000.
(<https://uic.org/projects/article/stairrs>)

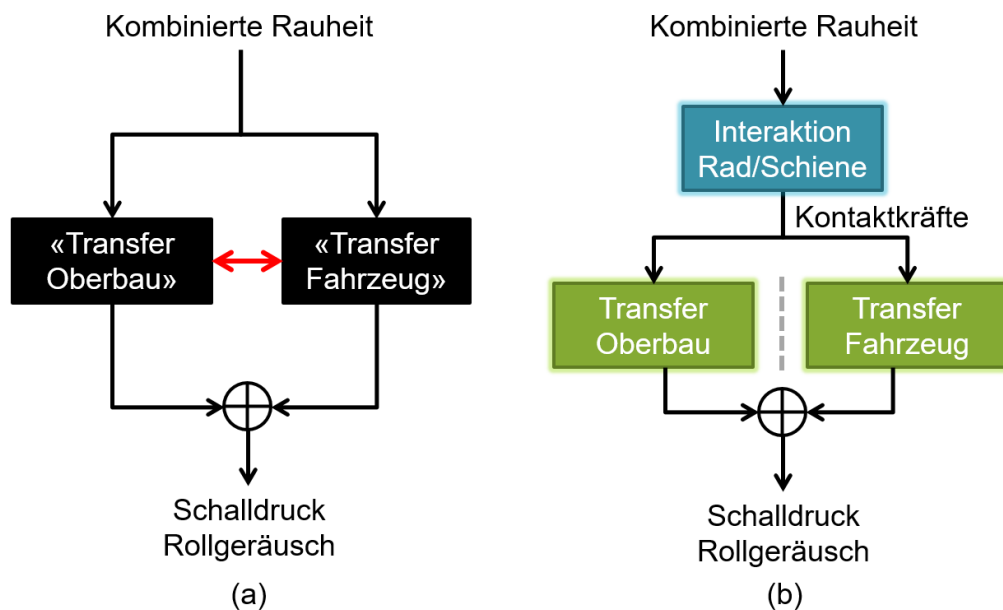


Abbildung 1: Graphische Darstellung der Weiterentwicklung des sonRAIL 2X Modells (rechts) im Vergleich zu sonRAIL. In den neuen Modellen wird die Rad/Schiene Interaktion explizit modelliert.

3 Umsetzung

Wie im Projektplan vorgesehen, wurden die Mobilitäten – also die Schwinggeschwindigkeit pro einwirkender Kraft – von Rad, Oberbau und Kontakt mittels Finiten Elementen Methode (FEM) Berechnungen vorhergesagt. Die Mobilitäten der Räder und Schienen wurden mit Experimenten (im Labor bzw. am Gleis) verglichen, um die Validität der Berechnungen zu bestätigen. Eine Validierung der berechneten Kontaktsteifigkeit war nicht in direkter Form möglich. Die in der Planungsphase vorgeschlagene Advanced Transfer Path Analysis (ATPA) hat sich im Rahmen des Projektes als unzugänglich erwiesen. Die Validierung der Modelle ist demnach auf indirektem Weg erfolgt, mit dem Vergleich der Ergebnissen des ganzen Modells mit den Daten aus den Vorbeifahrtmessungen.

Das 'Produkt' des Projektes besteht aus einer Reihe von numerischen (Finite Elemente) Modellen, welche die physikalischen Vorgänge beschreiben, die zur Emission von Rollgeräuschen führen. In diesen wird die Mobilität von Rädern und Oberbau separat ermittelt und aus der kombinierten Rauheit von Rad- und Schiene sowie aus dem Vorbeifahrtstempo die Schwingungsgeschwindigkeiten aller Komponenten berechnet. Zusätzlich wird ein weiteres numerisches (Boundary Element) Modell eingesetzt, welches die Ausbreitung des Schalls von der Oberfläche von Rad und Schiene hin zur Position der Messmikrofonen (in 7.5 m Abstand vom Gleis) beschreibt. (Weitere Informationen zu den beiden Modellierungsansätzen finden sich in Beilage B.1.) Die in diesem Projekt erarbeiteten Arbeitsabläufe lassen sich mit geeigneten Mitteln und den notwendigen Eingabedaten (siehe Beilage B.2) auf beliebige Kombinationen von Fahrzeugen und Oberbautypen umsetzen, wie in der Beschreibung von STAIRRS Level 3 angegeben.

4 Modellbeschreibung

Der Anspruch des hier beschriebenen Projektes ist, aus grundlegenden Angaben zu den beteiligten Systemen (Rad und Oberbau), mittels physikalischer Modelle, eine Berechnung des Schalldrucks an einem gegebenen Ort zu ermöglichen. Der von der Empa entwickelte Modellierungsablauf (graphisch in Abbildung 2 und Abbildung 3 dargestellt) stellt ein Beispiel der Implementation eines solchen Systems dar und liefert den Beweis, dass dieser Ansatz zur Berechnung von Emissionen praktikabel ist. Abbildung 2 zeigt eine Übersicht des Modellierungsablaufes; in Abbildung 3 sind die Hauptkomponenten einzeln dargestellt. Die physikalische Natur der verwendeten Ansätze bedeutet, dass in den Grenzen der üblichen Unterschiede zwischen den Implementationen der Modellierungsmethoden, unabhängig von der Wahl der Software für die Umsetzung der numerischen Modellen, gleichwertige Ergebnisse erzielt werden können.

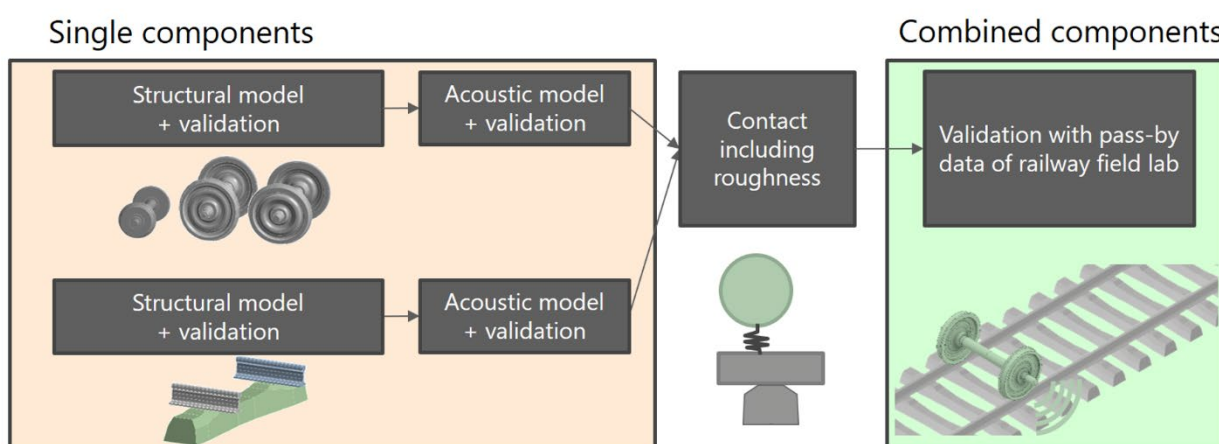


Abbildung 2: Übersicht der Bestandteile des Systems von numerischen Modellen, welche die Entstehung von Rollgeräuschen und ihre Ausbreitung zur Position eines Messmikrophons beschreiben.

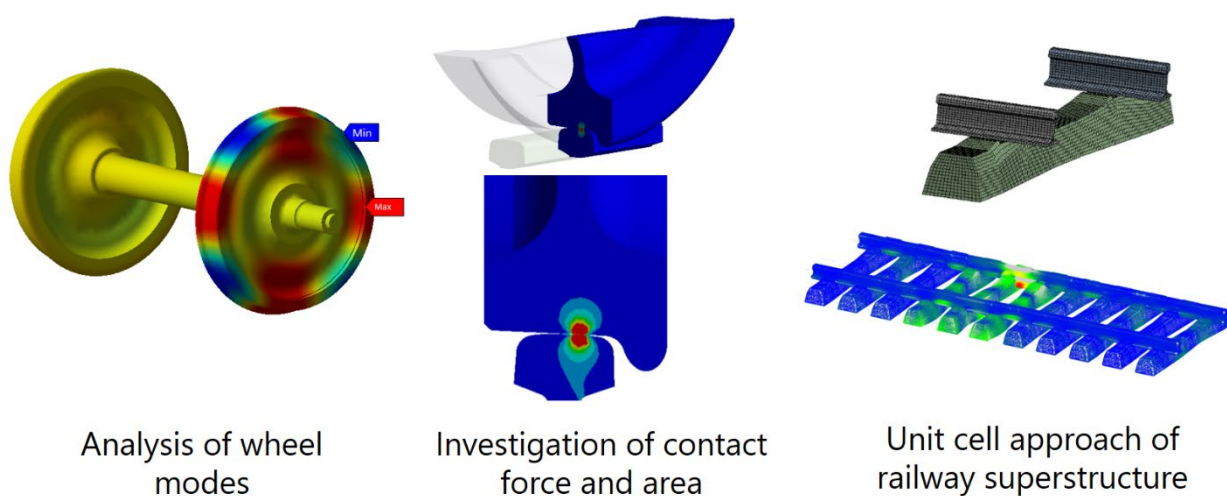


Abbildung 3: Detaillierte Darstellung der drei FE Modelle, welche die Grundlage für die Emissionsberechnungen bilden. Links: Berechnung der Mobilität der Räder, Mitte: Berechnung der Kräfte am Kontakt zwischen Rad und Schiene, Rechts: Berechnung der Mobilität des Oberbaus.

5 Messtechnische Validierung

In der Projektplanung wurde vorgesehen, Komponenten-Modelle für je einen Typ Güterwagen und einen Typ Passagierwagen aufzustellen und mit Experimenten zu validieren. Angesichts der einzigartigen Gelegenheit, die vollständige Kette von Modellerstellung bis zur experimentellen Validierung unter bestmöglichen Bedingungen zu bearbeiten, wurde ein zusätzlicher Wagentyp in das Projekt einbezogen. Für die Validierungsmessungen wurde dazu eigens ein Testzug gemäss Abbildung 4 oben zusammengestellt. Abbildung 4 unten zeigt die drei Radsätze, welche bei den aufgeführten Wagentypen eingesetzt werden und entsprechend im Rahmen des Projektes modelliert wurden.

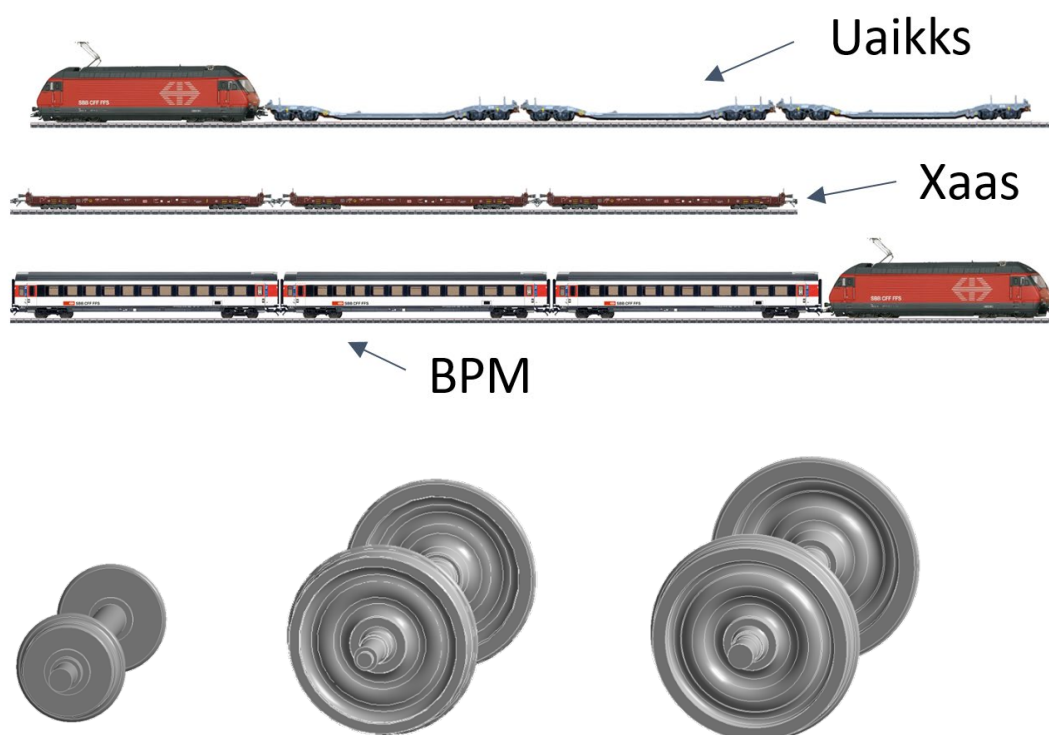


Abbildung 4: Oben: Zugkomposition bei den Vorbeifahrtsmessungen, Unten: Dazugehörige Radsätze Links: DB24 (Xaas/Saadkmms – 'RoLa' Wagen), Mitte: DB97 (Uaikk - Güterwagen) und Rechts: BPM (BPM - Passagierwagen).

Die Vorbeifahrtsmessungen wurden im Eisenbahn Feldlabor an der Bahnstrecke zwischen Sempach und Rothenburg durchgeführt. Vor Ort gibt es drei unterschiedliche Oberbauten, zwei mit Betonschwellen B91 (mit und ohne Schwellenbesohlung) und eine mit Holzschwellen. Die Daten zu Schall, Schwingungen und Beschleunigungen von Schienen, Schwellen und Schotter wurden an sieben Messquerschnitten erfasst. In jedem Querschnitt waren 22 Beschleunigungssensoren und zwei Mikrofone installiert. Insgesamt wurden bei jeder Vorbeifahrt mehr als 170 Zeitreihen von Messdaten erfasst, die untersucht und nachbearbeitet wurden.

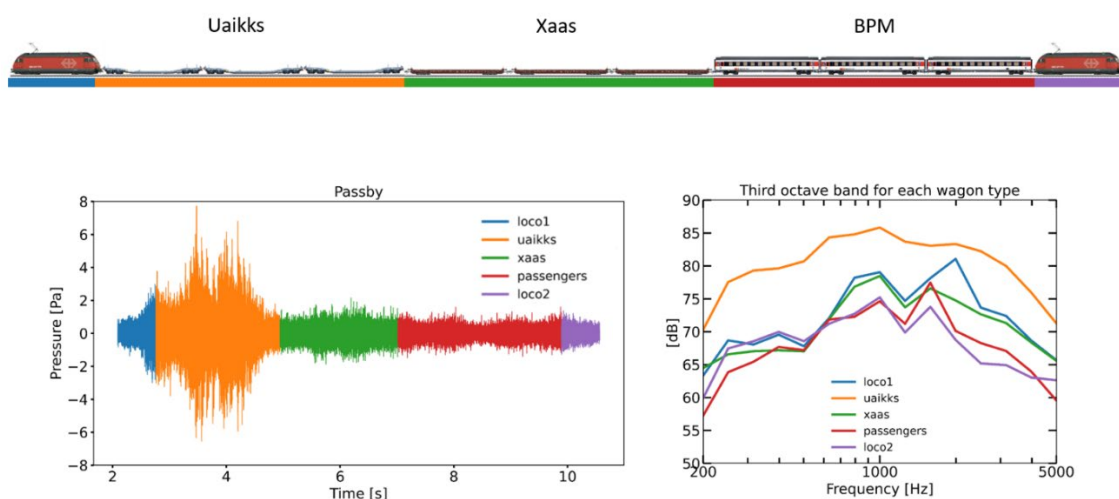


Abbildung 5: Beispiel eines Schalldruck Zeitsignals (Unten links), farbkodiert entsprechend des dazugehörigen Wagentyps (oben) und sich daraus ergebendes Terzbänderspektren (Unten rechts). Die Spektren sind ein Mittelwert von allen Fahrzeugen über vier Vorbeifahrten.

Der Testzug fuhr mit vier unterschiedlichen Geschwindigkeiten je vier Mal über die Strecke. Die Daten aus den Vorbeifahrtmessungen stellen die Grundlage für die Validierung der Modelle dar. Abbildung 5 zeigt exemplarisch den Schalldruckzeitlauf einer Vorbeifahrt (unten links) und die resultierenden Vorbeifahrtsspektren (unten rechts). Wie zu sehen ist, waren die aufgezeichneten Schalldruckwerte für die Wagen des Typs Uaikks wesentlich höher als bei den anderen Fahrzeugen (inklusive Lokomotiven). Nachforschungen und Nachmessungen an den Wagen von diesem Typ haben ergeben, dass einzelne Räder, trotz Bemühungen von Seite des Vermieters, von sogenannten Flachstellen betroffen waren, was zum Ausschluss dieses Wagentyps aus den Analysen geführt hat.

6 Wichtige Ergebnisse und Erkenntnisse

Der gesamte emittierte Schall ergibt sich aus einer Kombination der Abstrahlung, welche primär von Gleis (Schwellen und Schienen) und Rad stammt. Die Schwingungsgeschwindigkeit der Oberflächen wird als Eingangsgrosse für die Boundary Element Schallabstrahlungsmodelle verwendet.

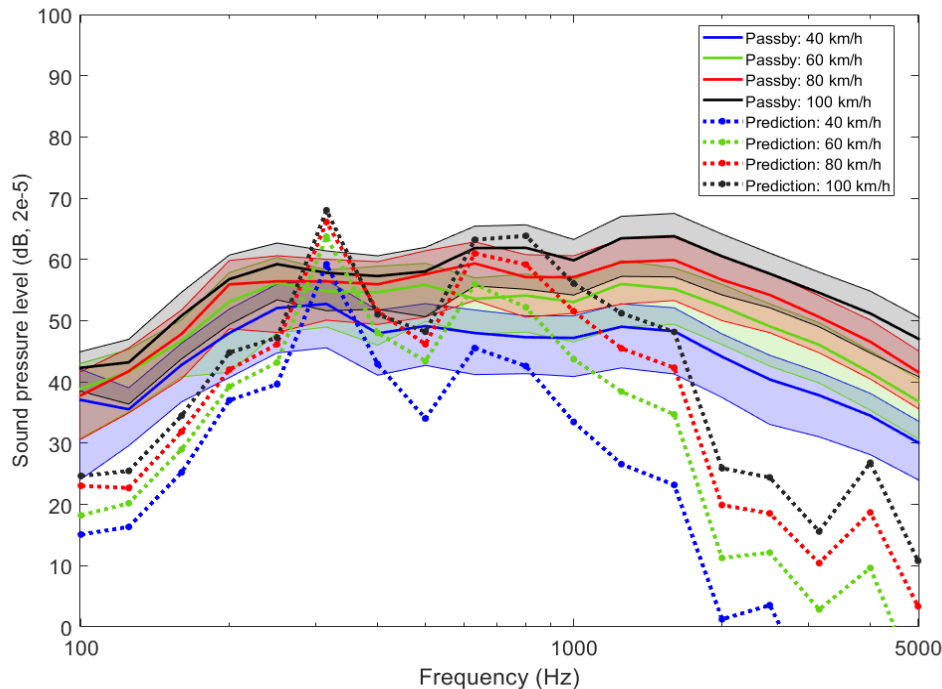


Abbildung 8 und **Error! Reference source not found.** zeigen den Vergleich von gemessenen und berechneten Schalldruckwerten für die zwei Wagentypen, für welche eine Auswertung der experimentellen Daten sinnvoll war, für die Messquerschnitte mit Betonschwellen B91 (mit und ohne Schwellenbesohlung). Diese Informationen ergeben sich aus der Bearbeitung der zahlreichen Vorbeifahrtmessungen und liefern wichtige Hinweise auf die Fähigkeiten und Grenzen der entwickelten Modelle. Aus dem Vergleich mit den Messungen können folgende Erkenntnisse abgeleitet werden:

- 1) Ein typischer Gleisabschnitt mit harten Zwischenlagen und Betonschwellen B91 trägt deutlich weniger zur Gesamtgeräuschemission bei als die Räder. Nur im Bereich von 400-700 Hz trägt das Gleis aufgrund des Vorhandenseins von Schwellen und der seitlichen Pin-Pin-Mode, wie Abbildung 6 zeigt..

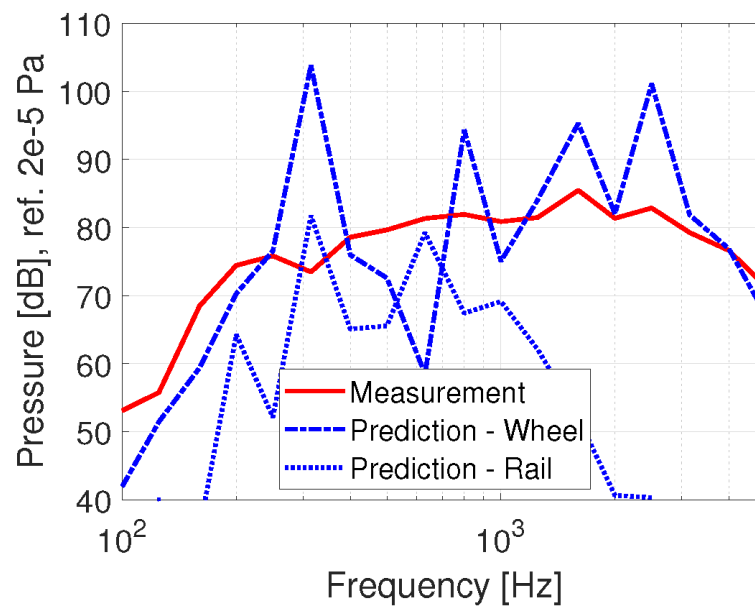
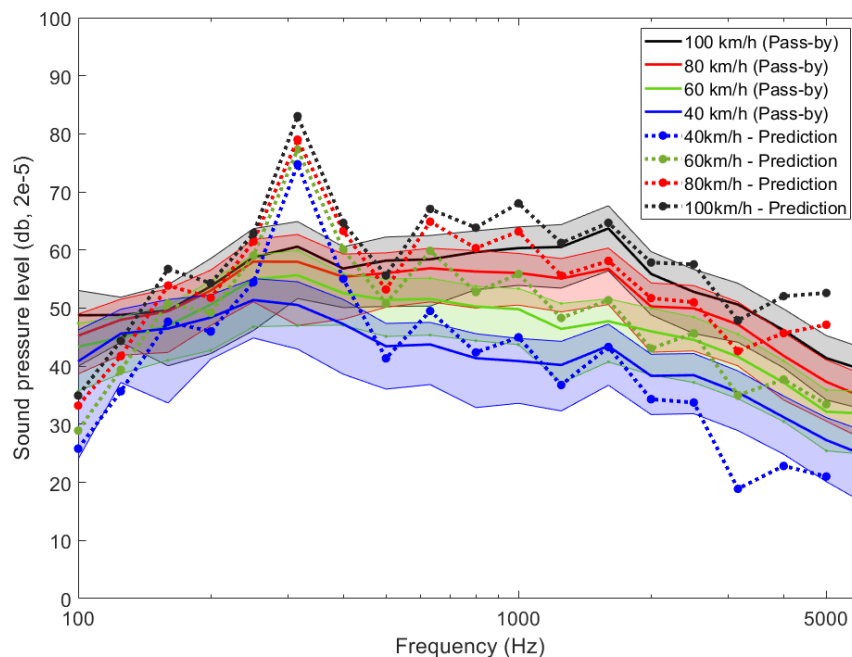


Abbildung 6: Numerisch berechnete Beiträge von Schiene und Rad zum Schalldruck, Terzbänder

- 2) Für die Personenwagen liefern die Modelle eine genaue Vorhersage innerhalb der Messunsicherheit der Geräuschemission über den gesamten Frequenzbereich von 100 bis 5000 Hz (siehe



- 3) Abbildung 7 **Error! Reference source not found.**). Nur das Terzband bei 300 Hz wird stark überschätzt. Dieses kann auf die ungenaue Abbildung der Randbedingungen der Achse im Drehgestell zurückgeführt werden, die zu einer Überschätzung der Oberflächenschnelle des Rads bei dieser Frequenz führt.

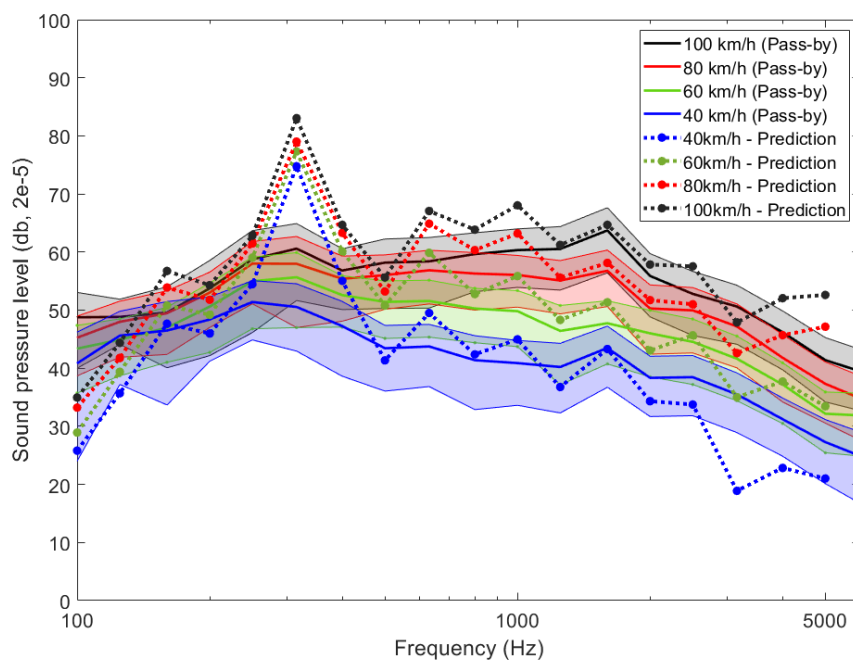


Abbildung 7: Personenwagen (BPM Radsätze) an den Messquerschnitten mit Betonschwellen B91, Vergleich der numerischen Vorhersage der Schalldruckspektren (gestrichelte Linien) (Terzbänder) und bei den Verbeifahrten gemessenen Spektren (durchgezogenen Linien). Die schattierten Flächen um die durchgezogenen Linien stellen die Messstreuung dar.

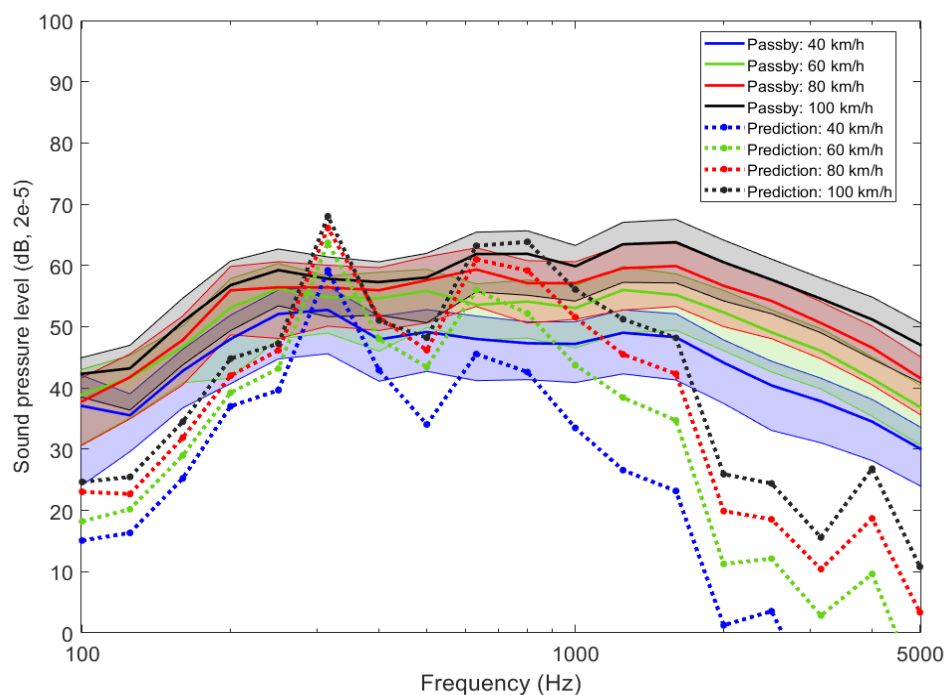


Abbildung 8: Güterwagen Typ (DB 24 Radsätze) an den Messquerschnitten mit Betonschwellen B91, Vergleich der numerischen Vorhersage der Schalldruckspektren (gestrichelte Linien) (Terzbänder) und bei den Verbeifahrten gemessenen Spektren (durchgezogenen Linien). Die schattierten Flächen um die durchgezogenen Linien stellen die Messstreuung dar.

3. Die berechneten Geräuschemissionen von DB24-Rädern sind deutlich niedriger als die gemessenen Werte (siehe

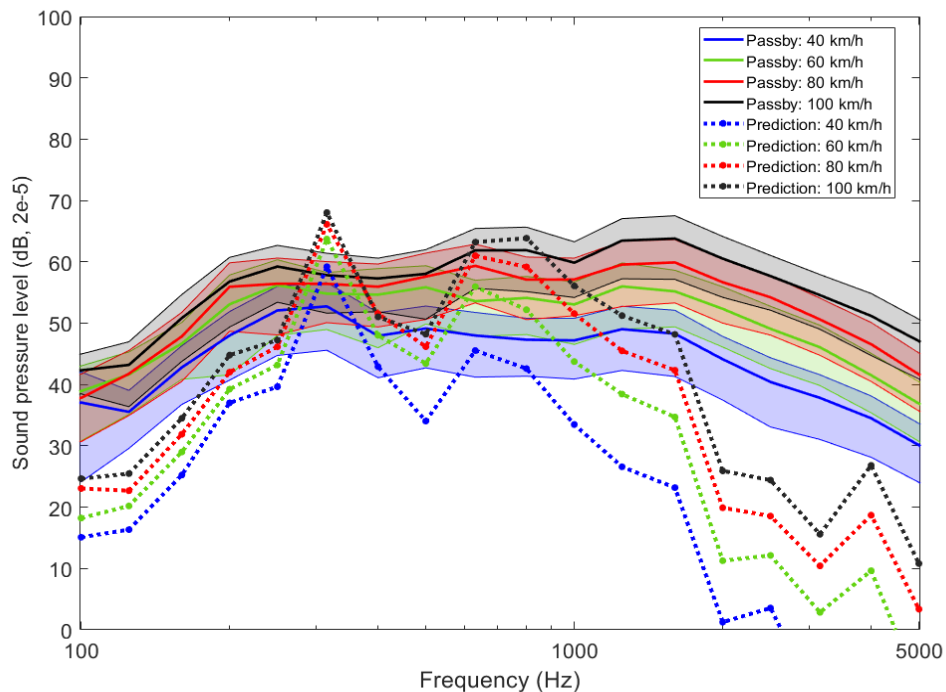
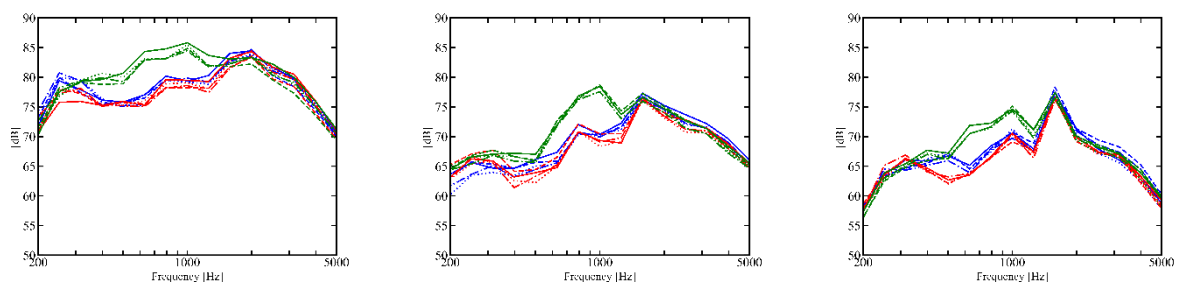


Abbildung 8). Das Modell berücksichtigt jedoch nur den Beitrag der Räder, nicht aber eine allfällige Abstrahlung des Fahrzeugkastens. Die Vorbeifahrtsmessungen zeigen, dass die Waggonen selbst einen grossen Beitrag zur gesamten Lärmabstrahlung leisten, dies primär bei Frequenzen oberhalb 1 kHz. Dies sollte als –nicht vernachlässigbare- Sekundärquelle behandelt werden. Da die Rauheit der Güterwagenräder jedoch nicht vor Ort gemessen werden konnten, ist es möglich dass die angenommene Rauheitswerte nicht genau sind. Eine Erhöhung der Rauheit könnte auch einen Teil der Unterschätzung des gesamten emittierten Lärms erklären.

4. Das Modell liefert bei der Vorhersage der Unterschiede zwischen den Szenarien gute Resultate. So wird die Zunahme der Lärmemissionen in Abhängigkeit der Zuggeschwindigkeit für alle untersuchten Räder gut erfasst. Gleiches gilt für den Unterschied zwischen Holz- und Betonschwellen, wobei die Holzschwellen einen deutlich höheren Lärmpegel zwischen 600 und 1500 Hz aufweisen, während Betonschwellen zu einem verhältnismässig 'flachen' Spektrum führen.



3rd octave band of Uaiks.(DB97)	3rd octave band of Xaas.(DB24)	3rd octave band of BPM (BPM)
— MQ12 2022-06-28 22:40:00	— MQ22 2022-06-28 22:40:00	— REF 2022-06-28 22:40:00
... MQ12 2022-06-29 00:55:00	... MQ22 2022-06-29 00:55:00	... REF 2022-06-29 00:55:00
- - MQ12 2022-06-29 23:44:00	- - MQ22 2022-06-29 23:44:00	- - REF 2022-06-29 23:44:00
- . MQ12 2022-06-29 23:58:19	- . MQ22 2022-06-29 23:58:19	- . REF 2022-06-29 23:58:19

Abbildung 9: Vergleich der Ergebnisse der Vorbeifahrtsmessungen (hier: 100km/h) auf den drei vorhandenen Oberbautypen (Holz, Grün, B91 besohlt/unbesohlt, Rot bzw. Blau). Die drei Graphiken zeigen die Ergebnisse für die untersuchten drei Fahrzeugtypen.

- Die Variation des Vorbeifahrgeräusches kann, durch aufgrund der linearen Natur der Mehrheit der betrachteten Prozesse, mit der Varianz der kombinierten Rauheit (siehe Abbildung 10) in Verbindung gebracht werden. Durch Speisen des Modells mit der minimalen und maximalen gemessenen kombinierten Rauheit können die modellierten und gemessenen Immissionspegel in Übereinstimmung gebracht werden.

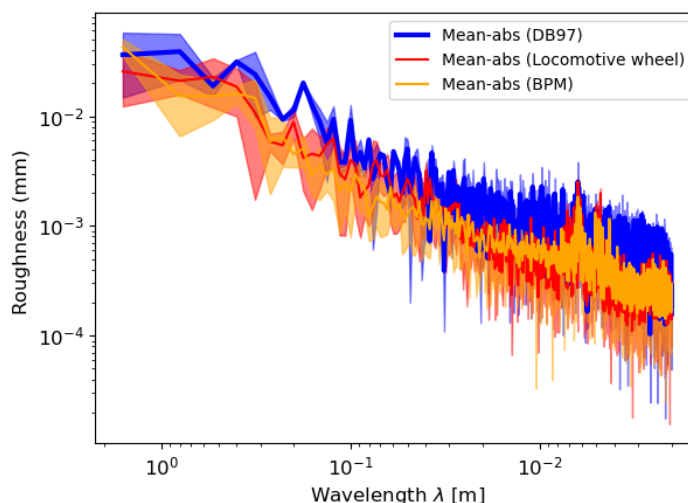


Abbildung 10: Mittlere Rauheit und Standardabweichung der Räder der drei untersuchten Typen.

7 Diskussion und Ausblick

Die Validierungen haben bestätigt, dass das sonRAIL2X Modell dazu in der Lage ist, die wichtigen physikalischen Phänomene der Rollgeräusch-Entstehung bei Eisenbahnen zu erfassen und korrekt nachzubilden. Die Mittel dazu sind numerische Berechnungsprogramme für FEM und BEM, die als kommerzielle (z.B. ANSYS) oder als open Source Produkte (z.B. Code_Aster für FEM und OpenBEM für BEM Berechnungen) ohne Einschränkung der Allgemeinheit zur Verfügung. Die Berechnungen beruhen einzig auf Eingangsparametern wie Geometrie und Materialeigenschaften der Komponenten, der Fahrgeschwindigkeit sowie den Rauheiten von Rad und Schiene. Im Gegensatz zu anderen Eisenbahnlärmmodellen wie sonRAIL oder TWINS ist sonRAIL2X somit kein empirisches Modell, welches sich auf Parameter abstützt, die aus Vorbeifahrtsmessungen bestimmt werden müssen.

Vor dem Hintergrund dieses fundamentalen Wechsels beim Modellierungsansatz ist die im Vergleich zu den Messungen erzielte Übereinstimmung erstaunlich gut und ermutigend. Im Rahmen des Projektes konnte allerdings aufgrund der Verfügbarkeit des Testzuges nur eine begrenzte Validierung durchgeführt

werden. Bei künftigen Arbeiten sollten viel mehr Vorbeifahrten ausgewertet und mit den modellierten Werten verglichen werden. Somit kann zum Zeitpunkt des Projektabschlusses noch keine abschliessende Aussage zur erzielbaren Genauigkeit des Modells gemacht werden. Die vorliegenden Resultate haben jedoch gewisse Schwachstellen aufgezeigt und lassen vermuten, dass die Genauigkeit bei der Nachbildung von absoluten Vorbeifahrtspegeln noch nicht den Anforderungen an ein zuverlässiges Emissionsmodell entsprechen. Wir gehen davon aus, dass die ausgewiesenen Abweichungen ein Folge verschiedener vereinfachender Annahmen, z. B. über die Achsrandbedingungen oder das Fehlen des Klemmsystems, sind, welche im Rahmen weitergehender Modelloptimierungen verbessert werden können.

Das sonRAIL2X-Modell ist somit in der vorliegenden Form noch nicht genügend ausgereift, um in jedem Fall belastbare Prognosen von absoluten Vorbeifahrtspegeln zu liefern. Aufgrund seines Physik-basierten Ansatzes ist, kann das Modell jedoch dazu eingesetzt werden, resultierende Pegeldifferenzen vorherzusagen, welche sich für verschiedene Radgeometrien oder der Schwellentypen ergeben. Diese Parameter lassen sich auf komplexere Komponenten wie Zwischenlagen, Schwellenunterlagen oder Schienenklemmen erweitern. Somit kann sonRAIL2X für Vorhersagezwecke und für die Optimierung von Komponenten verwendet werden.

Aufgrund seines Physik-basierten Ansatzes ist die Modellerstellung sehr aufwändig und der Rechenaufwand entsprechend gross. sonRAIL2X kann somit nicht als Berechnungsmodell für die Lärmkartierung verwendet werden und kann folglich auch das aktuell eingesetzte Modell sonRAIL nicht ablösen. Wir sehen jedoch für sonRAIL2X bzw. einem verbesserten Nachfolgemodell folgende Anwendungen:

- a) Als Referenzmodell, welches zur Plausibilisierung von Messungen und im Vergleich zu empirischen Berechnungsmodellen wie sonRAIL verwendet werden kann.
- b) Als Werkzeug zur Ermittlung von Eingangsgrössen, namentlich Transferfunktion von Fahrzeug und Oberbau, wie sie sonRAIL und anderen STAIRRS Level 2 Modellen verwendet werden.
- c) Als Forschungsplattform zur Optimierung des Schwingverhaltens der an der Fahrzeug-Oberbau-Interaktion beteiligten Komponenten.

Ein Aspekt, der bei einem Vergleich mit Messungen und Berechnungen mit anderen Modellen berücksichtigt werden muss, ist, dass sonRAIL2X ein reines Rollgeräuschmodell ist. Das Rollgeräusch ist beim Eisenbahnlärm zwar zumeist die dominante Schallquelle. Wie aber u.a. die Validierungsmessungen gemäss Kapitel 5 gezeigt haben, treten an den Schienenfahrzeugen zusätzliche Schallquellen auf, welche je nach Situation nicht vernachlässigt werden können. Entsprechend werden in sonRAIL neben dem Rollgeräusch solche Sekundärquellen auf verschiedenen Höhen entlang des Fahrzeuges modelliert.

Wie dies bei Physik-basierten Berechnungsmethoden zu erwarten ist, hat sich auch bei der Entwicklung der vorliegenden Modelle gezeigt, dass die Genauigkeit der Ergebnisse massgeblich von der Qualität der Anfangsdaten abhängt. Wie es bei der physikalischen Betrachtung von komplexen Systemen üblich ist, ergibt sich auch in diesem Fall, dass aus der genaueren Untersuchung der Vorgänge mehr Klarheit über die Grössen, welche für die Beschreibung eines des Systems kritisch sind, entsteht. Daraus konnten Hinweise für die Wahl der Themen abgeleitet werden, welche im bereits bewilligten Nachfolgeprojekt von sonRAIL2X mit der Bezeichnung Top-Noise angepackt und optimiert werden.

Abschliessend kann festgehalten werden, dass es bei der Umsetzung des Projektes sonRAIL2X im Vergleich zum originalen Projektplan zu grundlegenden Anpassungen gekommen ist und schlussendlich andere Werkzeuge als geplant zum Einsatz gekommen sind. Das ursprüngliche Projektziel, ein STAIRRS Level 3 Modell zu entwickeln, wurde jedoch erreicht, die Funktionsfähigkeit des Modelles demonstriert und im Vergleich zu Messungen eine sehr ansprechende Übereinstimmung gezeigt. Somit sind die wesentlichen Ziele des Projektes erreicht worden. Zusätzlich kann das Projekt eindeutig als Erfolg bezeichnet werden, da es den Weg für einen fundamental anderen Modellierungsansatz geebnet hat, der künftig die Notwendigkeit von aufwändigen Messungen (mit gleichwohl oft widersprüchliche Resultaten) deutlich reduzieren wird.

Beilagen

B.1 Zu den Methoden

Für die Durchführung der in diesem Bericht vorgestellten Arbeiten wurden zwei numerische Methoden eingesetzt: Finite-Elemente-Methode (FEM) und Boundary Element Methode (BEM). Die beiden Ansätze zur Simulation physikalischer Prozesse, wie zum Beispiel die Ausbreitung von Wellen in Festkörpern und Flüssigkeiten, ergänzen sich in gewisser Weise und eignen sich für unterschiedliche Probleme. Im vorliegenden Projekt wurde das strukturdynamische Verhalten von Rädern und Schienen mit FEM berechnet, während die Ausbreitung des Schalls von den Rad- und Schienenoberflächen durch die umgebende Luft mit BEM berechnet wurde, ausgehend von den berechneten Oberflächengeschwindigkeiten von Rad und Schiene. Es gibt viele kommerzielle FEM-Implementierungen, die üblicherweise im Bauwesen, in der Automobilindustrie und in der Luft- und Raumfahrt eingesetzt werden. Die für dieses Projekt verwendete kommerzielle Implementierung ist ANSYS, spezifisch die 2. Version vom Jahr 2020 (ANSYS 2020R2).

Im weitesten Sinne werden Finite-Element-Berechnungen durch Unterteilung der betrachteten Strukturen in kleine Elemente diskretisiert (Vernetzung). Zusammen mit den Randbedingungen, werden die Gleichgewichtsbedingungen im System berechnet, indem ein System algebraischer Gleichungen gelöst wird. In diesem System werden die Eigenschaften der betrachteten Strukturen in Form von Massen- und Steifigkeitsmatrizen dargestellt. In aufeinanderfolgenden Iterationen werden die Kräfte und Verschiebungen jedes Knotens (Punkte an den Ecken eines Elements) innerhalb eines Netzes so berechnet, dass die Gleichgewichtsbedingungen mit einem hinreichend kleinen Fehler erreicht werden. In diesem Sinne wird das Modell grob in Form von (sehr grossen) Matrizen von Steifigkeits- und Massenwerten dargestellt. Die Lösung des Problems erhält man durch Anwendung der Gesetze der Mechanik auf die Lösung eines Gleichungssystems. Dies ist eine sehr gute Methode für die Analyse der Reaktion von Ingenieurbauwerken auf statische und dynamische Lasten.

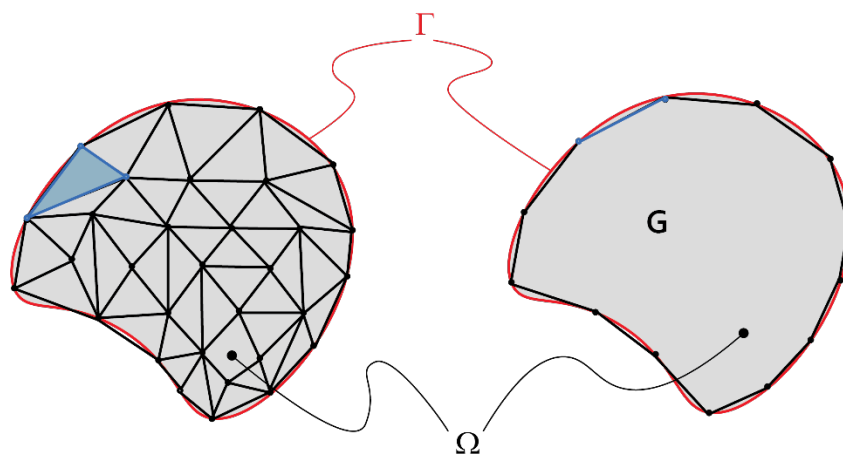


Abbildung 11: Schematische Darstellung der Diskretisierung einer Domäne in FEM (links) und deren Ränder für BEM (rechts). Bei BEM sind die physikalischen Zusammenhänge durch analytische Beziehungen in 'G' widergeben. Ω beschreibt das diskretisierte Volumen und Γ die Umhüllende.

Die Anregung und Ausbreitung von Wellen im akustischen Bereich ist mit verschiedenen Herausforderungen verbunden, insbesondere mit der Notwendigkeit, physikalische Grössen mit hoher räumlicher Auflösung über sehr grosse Bereiche zu berechnen. Dies ist bei einem Ansatz wie der FEM, bei dem der gesamte betrachtete Bereich Ω (siehe Abbildung 11) mit der erforderlichen Auflösung (z. B. sechs Elemente pro Wellen-

lenlänge) diskretisiert wird, eine grosse Herausforderung, da die Berechnungskosten mit zunehmender Anzahl von Elementen (oder Knoten) drastisch ansteigen. Für diese Art von Berechnungen wird die Randelementmethode als effizienter angesehen. Bei der Randelementmethode wird nur der Rand Γ in Elemente unterteilt. Die numerische Lösung baut auf den analytischen Lösungen auf, die bereits für einfache singuläre Probleme bekannt sind. Diese Lösung erfüllt die spezifizierten Randbedingungen an jedem Element auf G . Da jede der singulären Lösungen die geltende partiellen Differentialgleichungen G in Ω erfüllt, ist eine Aufteilung in ein Netzwerk von Elementen nicht erforderlich."

Die numerischen Modelle werden durch Gleichungssätze dargestellt, die in Form von Matrizen gespeichert werden, welche die notwendigen Informationen für die Lösung des Problems enthalten. Im Falle von Finite-Elemente-Modellen sind dies Massen- und Steifigkeitsmatrizen sowie Vektoren, welche die Randbedingungen darstellen. Diese Informationen werden in der Regel in proprietären Dateiformaten gespeichert, auf die die entsprechenden numerischen Löser zugreifen. Die erwähnten Matrizen und die Netze, die die Geometrie der untersuchten Körper definieren, können extrahiert und im Matrixformat gespeichert werden, um sie in einem anderen kommerziellen Solver zu verwenden. In diesem Sinne können die Modelle nicht durch geschlossenen Formeln dargestellt werden, wie dies bei klassischen Akustikmodellen der Fall ist.

B.2 Eingabedaten für die Modelle

Die beschriebenen Modellierungsmethoden weisen eine gewissen Komplexität auf, welche nur Dank Computeranwendungen gemeistert werden kann, dafür ist die Definition der Bereiche Ω und Grenzen Γ mehrheitlich einfach und intuitiv, wie in der Folge dargestellt wird. Diese Bereiche, die in Abbildung 11 sehr abstrakt als Ω und Γ dargestellt sind, sind im vorliegenden Fall die Radsätze der Waggonen und der Oberbau (Schotter, Schwellen, Zwischenschichten und Schienen) mit den entsprechenden mechanischen Randbedingungen für die strukturdynamischen Simulationen (Abbildung 11, links). In der akustischen Domäne charakterisiert die das Rad-Schiene-System umgebende Luft mit den Oberflächen von Rad und Schiene und Schiene als untersuchten Ränder das Problem (Abbildung 11, rechts). Die erforderlichen Eingangsdaten für die in dieser Arbeit vorgestellten Modelle sind die Beschreibungen der untersuchten mechanischen und akustischen Komponenten. Diese Komponenten werden durch ihre Geometrie, ihre physikalischen Eigenschaften und die Bedingungen an ihren Rändern definiert.

Die Art und Weise, wie diese drei Gruppen von Eingabedaten praktisch bereitgestellt werden, ist hier kurz beschrieben:

a) Geometrie

Die Geometrie der Strukturelemente wird durch ihre Form bestimmt, z. B. durch den Querschnitt der Räder, zusammen mit ihrer Rotationssymmetrie, dem Querschnitt der Schienenprofile, der 3D-Geometrie der Schwellen. Heutzutage werden alle diese Geometrien in technischen Zeichnungen beschrieben, die in der Regel in elektronischen 2D- oder 3D-Formaten vorliegen, wie z. B. .dxf, .dwg für zweidimensionale Geometrien, .stp, .iges für dreidimensionale. Analoge Formate, wie die in Abbildung 12 Zeichnung eines Schienenquerschnittes, sind ebenfalls verfügbar und können bei Bedarf zur Verwendung in den oben beschriebenen numerischen Modellen digitalisiert werden.

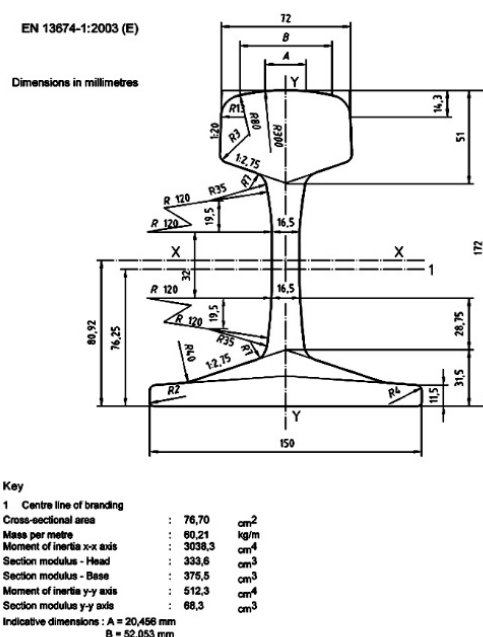


Figure A.21 — Rail profile 60 E 1

Abbildung 12: Bemastete Zeichnung des Querschnittes einer UIC 60 Schiene. Mit diesen Angaben liefert die technische Zeichnung die notwendigen Angaben auch in analoger Form.

b) Materialeigenschaften

Diese lassen sich im Wesentlichen mit den elastischen und viskosen Eigenschaften (letztere besonders relevant und kritisch für polymere Bauteile) und der Massendichte beschreiben. In den meisten Fällen (z. B. Stahl bei Schiene und Rad) ist ihr Wert bekannt ($E_{\text{Stahl}}=200\text{GPa}$) oder kann vom Hersteller des Bauteils erfragt werden (z. B. die mechanischen Eigenschaften von Schwellen). Die Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von Zwischenlagen oder des Schotters ist im Allgemeinen schwieriger, da es sich um komplexe Materialien handelt (viskoelastisch im ersten Fall, granular im zweiten Fall). Diese waren Gegenstand separater Projekte (z. B. des Railpad Projekts und des Rail Evaluation Projekts). Die aus den genannten Projekten gewonnenen Erkenntnisse wurden bei den im vorliegenden Projekt verwendeten Modellen berücksichtigt.

c) Grenzflächen und Randbedingungen

Diese beschreiben die Freiheitsgrade der Körper, beispielsweise wie sie durch den "festen Boden" oder andere Körper in ihrem Schwingverhalten eingeschränkt werden. Die Extreme dieser Interaktion sind ziemlich offensichtlich:

Bindung, bei der Relativbewegung zwischen den beiden Körpern erlaubt ist, so dass sie praktisch ein einziger Körper bilden, auch wenn sie aus unterschiedlichen Materialien bestehen.

frei: die beiden Teile können sich ohne Zwang relativ zueinander bewegen.

Sofern nicht explizit modelliert, wird der Kontakt in diesem Fall nicht berücksichtigt. Hier berücksichtigt die Modellierungsumgebung den Zusammenstoß zweier Körper nicht, die sich also durcheinander bewegen können. Diese Situation wäre offensichtlich unphysikalisch.

Die Realität der Interaktion der Teile eines komplexen Systems, wie z. B. eines Fahrzeugs, ist komplexer als die beiden oben genannten Extreme und liegt dazwischen. Zu diesem Zweck stehen verschiedene Arten von Modellen (wie z. B. (visko)elastische Verbindungen zur Simulation einer Verbindung mit bestimmter Steifigkeit mit oder ohne Dämpfung) und Kontaktmodelle (mit oder ohne Reibungskomponenten) zur Verfügung. Erstere verhalten sich linear, während letztere ein nichtlineares Verhalten aufweisen. Diese Modellierungsansätze werden häufig für die Lösung einer Reihe von Problemen verwendet. Die Bestimmung realistischer Parameter zur Beschreibung

des realen Geschehens stellt jedoch nach wie vor eine grosse Herausforderung dar, wie z. B. der Abschnitt über den Rad-Schiene-Kontakt zeigt.