

Messtechnische Untersuchung der Aussagekraft von Transferrezeptanzen an Gleisanlagen im Vergleich mit analytischen Gleismodellen

Ina Richter¹, Karlotta Proschitzki², Katja Stampka, Ennes Sarradj

TU Berlin, Fachgebiet Technische Akustik, Einsteinufer 25, 10587 Berlin

¹ i.richter@tu-berlin.de ² karlotta.proschitzki@tu-berlin.de

Einleitung

Um Gleise akustisch zu charakterisieren, ist in der DIN EN 15461 [1] das Messverfahren zur Bestimmung der *track decay rate* (TDR) festgelegt. Dort wird beschrieben, wie aus 29 gemessenen Transferrezeptanzen über eine gewichtete Summe die Abklingrate des Gleises bestimmt werden kann. Das in der DIN EN 15461 beschriebene Messverfahren ist sehr aufwändig, da an zwei verschiedenen Stellen des Gleises vertikal und horizontal die jeweils 29 Transferrezeptanzen gemessen werden müssen, wobei in den folgenden Untersuchungen ausschließlich die vertikalen Messungen betrachtet werden. Für jede Transferrezeptanz, also pro Anschlagpunkt, muss die Schiene mindestens drei Mal mit einem Prüfhammer angeregt werden. Die Handhabung beim Anschlagen wird durch die großen Kabellängen erschwert, da der letzte Anschlagpunkt etwa 40 m vom Beschleunigungsaufnehmer entfernt ist. Die Homogenität der Schiene wird beispielsweise durch unterschiedliche Verdichtung des Schotter oder durch Schwellen, die nicht vollständig vom Schotter unterfüttert sind, beeinflusst. Des Weiteren ist die Steifigkeit der Schienenzwischenlagen, womit die Schiene auf den Schwellen befestigt wird, allein durch ihre Temperaturabhängigkeit schwankend. Daher sind die Homogenitätsanforderungen der DIN an die Umgebung des Nullschwellenfaches, das Fach in dessen Mitte der Beschleunigungsaufnehmer befestigt wird, recht hoch und die Suche nach einem solchen Schwellenfach kann lange dauern. Die Homogenitätsbedingung wurde schon von Venghaus 2015 in [3] kritisiert und die Mitführung eines weiteren Beschleunigungsaufnehmers mit dem Impulshammer vorgeschlagen, um jeweils die Punkteingangsrezeptanzen am Anschlagpunkt mit zu messen und so Inhomogenitäten mit zu erfassen. Um den Aufwand des Verfahrens zu optimieren, gibt es bereits ein Verfahren der TDR-Messung während Zugvorbeifahrten [2]. Die hier gewonnene TDR ist jedoch eine eigenständige Größe zur akustischen Gleischarakterisierung und nicht direkt vergleichbar mit der TDR nach DIN 15461.

Es soll betrachtet werden, ob dieser erhebliche Messaufwand zu einer guten Qualität bezüglich der Reproduzierbarkeit führt. Dazu werden die Transferakzeleranzen, aus denen die TDR berechnet wird, näher betrachtet und mit analytischen Gleismodellen verglichen. Außerdem werden verschieden erhobene TDR miteinander verglichen. Des Weiteren stellen nicht genau bekannte Parameter (wie Schotter- und Zwischenlagensteifigkeiten und Verlustfaktoren) bei der Simulation des Schwingverhaltens von Gleisen ein Problem dar. Insbesondere ist die Schätzung der Steifigkeit der Gleiszwischenlagen von großer Wich-

tigkeit, weil dieser Parameter großen Einfluss auf das Schwingverhalten der Schiene hat. Die Herstellerangaben sind, sofern vorhanden, Einzahlwerte für statische Belastung. Mit diesen Einzahlwerten bzw. geschätzten Werten können nur ungenügende Simulationsergebnisse erzielt werden. Daher wird außerdem betrachtet, wie durch Messungen diese Parameter besser abgeschätzt werden können.

Modelle und Messungen

Im Folgenden sollen die beiden verwendeten analytischen Gleismodelle und die beiden durchgeführten Messkampagnen kurz vorgestellt werden. Nordborg hat ein Zeitbereichsmodell erarbeitet, welchem ein Euler-Bernoulli-Balken zugrunde liegt [4]. Im Modell von Thompson/Wu [5] wird die Schiene durch einen Timoschenko-Balken angenähert. Beide Modelle nutzen ein Feder-Masse-Feder-System zur Beschreibung des Oberbaus.

Eine der Messungen fand in Uelzen im Abschnitt Nienendorf an Gleisen im guten Zustand statt. In Braunschweig wurde an Gleisen der Hafenbahn gemessen, die einige Fehlstellen aufwies. In Uelzen war eine UIC60-Schiene verbaut, die genau wie die B70W-Schwellen und die Zwischenlagen von Vossloh Standard bei Nahverkehrsstrecken sind. In Braunschweig war eine leichtere Schiene vom Typ S49 verbaut. Im Messbereich in Braunschweig lagen die gleichen Schwellen wie in Uelzen. Allerdings fand in einiger Entfernung ein Wechsel auf einen anderen Schwellentyp statt (B70G). Über die Art der Zwischenlagen ließen sich keine Aussagen treffen. In Uelzen wurden zwei separate Messreihen jeweils mit großem und kleinem Prüfhammer durchgeführt. Es gab jeweils einen Beschleunigungsaufnehmer im Nullschwellenfach, wie in der Norm vorgesehen. In Braunschweig wurde die TDR mit kleinem Prüfhammer gemessen. Es wurden drei nebeneinander liegende Nullschwellenfächer definiert, in deren Mitte jeweils ein Beschleunigungsaufnehmer befestigt war. Dadurch konnten drei TDR-Messungen parallel durchgeführt werden. In Braunschweig wurden zusätzlich die Punkteingangsrezeptanzen auf 16 verschiedenen Schwellen erfasst. Eine Übersicht über beide Messkampagnen gibt Tabelle 1.

Ergebnisse und Diskussion

Im Folgenden sollen die gemessenen Transferakzeleranzen aus den Messungen in Uelzen und Braunschweig vorgestellt und mit den beiden analytischen Gleismodellen nach Nordborg und Thompson verglichen werden. Anschließend werden die aus den Transferrezeptanzen berechneten Abklingraten der Gleise in Braun-

Tabelle 1: Übersicht über die Messkampagnen

Uelzen Abschnitt Niendorf	Braunschweig Hafenhahn
UIC60 B70W Zw687a	S49 B70W - 2.4 / 98 und B70G / 91 unbekannt
kleiner (160 g) Prüfhammer und großer (1,1 kg) Prüfhammer zwei separate Messreihen ein Nullschwellenfach	kleiner (160 g) Prüfhammer mit Zusatzmasse (+75 g) drei nebeneinander liegende Nullschwellenfächer

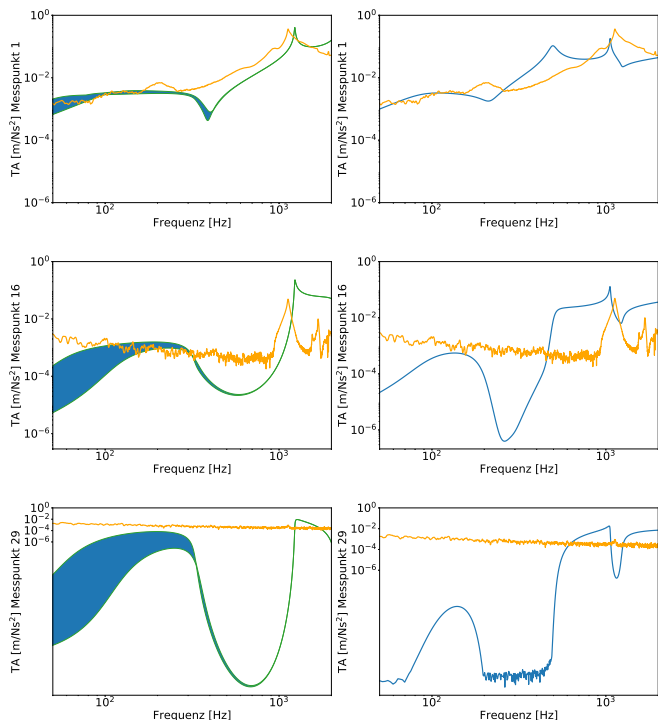


Abbildung 1: Vergleich der Messdaten aus Uelzen in orange mit dem Modell nach Nordborg in blau mit grüner Umrandung (links) und dem Modell nach Thompson in blau (rechts) anhand der Transferakzeleranzen der Anschlagpunkte 1,16 und 29

schweig und Uelzen betrachtet und berechnete TDR aus verschiedenen Messreihen miteinander verglichen. Da für die analytischen Gleismodelle auch der Eingangsparameter Zwischenlagensteifigkeit abgeschätzt werden musste, wird hierzu eine Untersuchung für verschiedene Abschätzungen durchgeführt.

Messergebnisse Uelzen und Braunschweig

Zunächst werden die Ergebnisse aus der Messkampagne in Uelzen vorgestellt. Abbildung 1 (links) zeigt exemplarisch einige gemessene Transferakzeleranzen im Vergleich mit dem Modell nach Nordborg. Der blaue Bereich stellt eine Art Vertrauensintervall, berechnet mit Fuzzy Arithmetic [8], für die unbekannt, also im Modell unscharfe, Schottersteifigkeit dar. Mit Fortschreiten des Abstandes von Mess- und Anschlagpunkt fällt auf, dass niemals Werte unterhalb von $10^{-4} m/Ns^2$ gemessen wurden, das Modell aber mit zunehmender Entfernung deutlich kleinere Amplituden simuliert. Das Messgrundra-

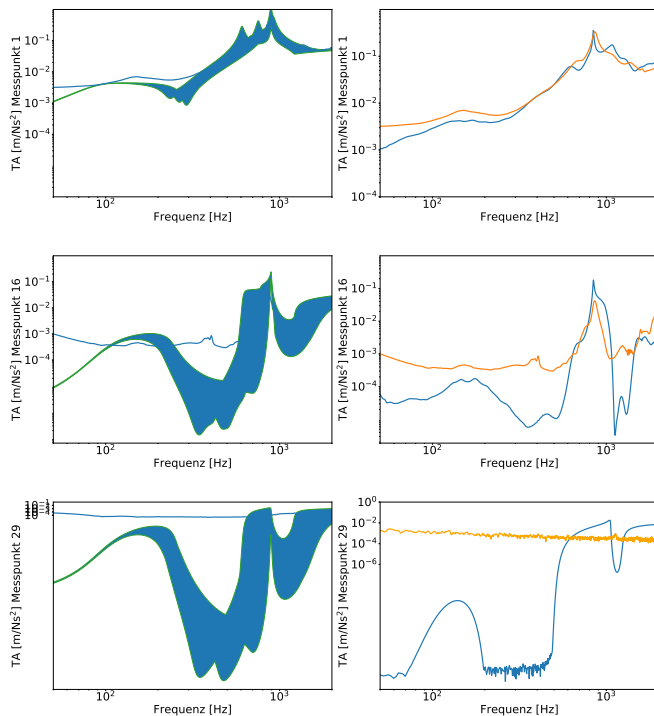


Abbildung 2: Vergleich der Messdaten aus Braunschweig in orange mit dem Modell nach Nordborg in blau mit grüner Umrandung (links) und dem Modell nach Thompson in blau (rechts) anhand der Transferakzeleranzen der Anschlagpunkte 1,16 und 29

schon lässt eine Erfassung von Schwingungen unterhalb von $10^{-4} m/Ns^2$ offenbar nicht zu. Das bestätigt auch der Vergleich mit dem Modell nach Thompson (siehe Abbildung 1 rechts).

Auch für Braunschweig treffen die Beobachtungen zu, die schon für die Transferakzeleranzen in Uelzen gemacht wurden. Da für das Gleis in Braunschweig keine Angaben über die Zwischenlagen bekannt waren, gingen deren Verlustfaktor und Steifigkeit als unscharfe Parameter in die Simulation nach Nordborg ein. Der blaue Bereich in Abbildung 2 links zeigt das Vertrauensintervall dieser beiden Parameter. Das Nordborgmodell simuliert das Schwingverhalten der Schiene bei Anschlägen nah am Messpunkt sehr gut. Bis Messpunkt 16 (Abbildung 2 links mitte) ist der Verlauf der beiden Kurven der Transferakzeleranzen noch ähnlich, doch bei größeren Entfernungen divergieren die Kurven gravierend, da das Messrauschen über den tatsächlich durch den Hammer induzierten Ausschlägen liegt. Da dieses Problem bei der Messung bekannt war, wurde hier mit zunehmender Entfernung der Messbereich angepasst, was im Vergleich mit der Messung in Uelzen, aber zu keiner signifikanten Verbesserung führte. Ausschläge von unter $10^{-4} m/Ns^2$ bleiben vom Messrauschen überdeckt. Das bestätigt sich auch beim Vergleich mit dem Modell nach Thompson in Abbildung 2 rechts.

TDR-Betrachtungen

Abbildung 3 zeigt die berechnete Abklingrate für das Gleis in Uelzen. Gemessen wurde hier zunächst mit dem kleinen Prüfhammer (Abbildung 3 links). Es zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen linker und rechter Schie-

ne, wobei die rechte Schiene die höhere Abklingrate aufweist. Die grüne Kurve ist eine international festgelegte Grenzkurve, die die gemessene TDR nicht unterschreiten sollte [7]. Im Vergleich mit der Messung mit dem großen Hammer (Abbildung 3 rechts) zeigt sich, dass sich der prinzipielle Verlauf der Abklingraten zwar noch ähnelt, aber hier auf dem linken Gleis die höhere TDR gemessen wurde. Sowohl Messungen am linken und rechten Gleis als auch die Art des Prüfhammers führen zu unterschiedlichen Abklingraten.

Werden nun die Abklingraten von Uelzen und Braunschweig miteinander verglichen (Abbildungen 3 links und 4) – beide gemessen mit dem kleinen Prüfhammer – unterscheiden sich die prinzipiellen Verläufe deutlich stärker voneinander, als bei der Messung mit großem und kleinem Prüfhammer in Uelzen. Was hervorzuheben ist, ist dass in Braunschweig auf dem weniger homogenen Gleisabschnitt sich das linke und rechte Gleis akustisch ähnlicher sind als in Uelzen, einem Gleis in ausgesprochen gutem Zustand. Außerdem ist die Abklingrate in Braunschweig insgesamt höher, was zunächst unerwartet erscheinen könnte, aber die starken Inhomogenitäten im Braunschweiger Gleis erschweren eine Wellenausbreitung.

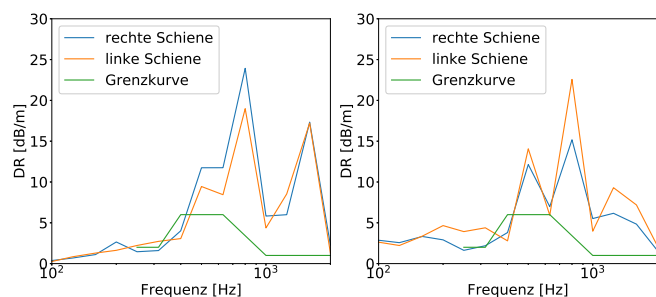


Abbildung 3: TDR für das linke und rechte Gleis in Uelzen, gemessen mit dem kleinen (links) und dem großen (rechts) Prüfhammer

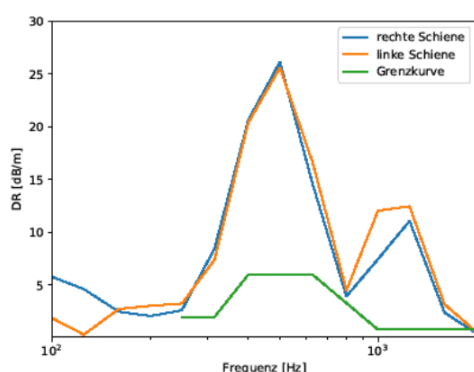


Abbildung 4: TDR für das linke und rechte Gleis in Braunschweig, gemessen mit dem kleinen Prüfhammer

Zwischenlagenuntersuchungen

Die Gleiszwischenlagen, die in Uelzen verbaut wurden, wurden von Thompson [6] bereits genauer untersucht. Für den statischen Belastungsfall gibt Thompson je

nach Vorlast verschiedene Steifigkeiten an, anhand derer sich für den Fall ohne Vorlast, was dem Zustand des Gleises bei der Messung entspricht, eine Steifigkeit von 300 MN/m ermitteln lässt [6]. Im Frequenzbereich 600-1000 Hz wurde durch Thompson eine dynamische Steifigkeit von 3550 MN/m angegeben, der Verlustfaktor beträgt 0,1 [6]. Aus dem statischen Wert, also der Steifigkeit bei 0 Hz und der dynamischen Steifigkeit bei etwa 800 Hz lässt sich diese Größe linear approximieren, was in den in Abbildung 1 verwendeten Simulationen auch berücksichtigt wurde. Abbildung 6 zeigt die Verbesserung exemplarisch an Messpunkt 1 (oben) und Messpunkt 5 (unten) für das Modell nach Thompson. Links wurde in der Simulation ein Einzahlwert von 500 MN/m angenommen und rechts der linear approximierten Steifigkeitsverlauf. Es ist deutlich zu sehen, dass mit dieser einfachen Approximation das Modell bereits deutlich bessere Ergebnisse zeigt.

Auch für die Messdaten in Braunschweig wurden verschiedene Schätzungen der Zwischenlagensteifigkeit vorgenommen und exemplarisch an Messpunkt 1 (Abbildung 5 oben) und 5 (Abbildung 5 unten) dargestellt. Im Unterschied zu Uelzen konnte in Braunschweig durch ausreichend viele gemessene Punkteingangsrezeptanzen auf verschiedenen Schwellen die gemittelte dynamische Steifigkeit des gesamten Oberbaus abgeschätzt und somit als Feder-Masse-Feder-System in das Modell von Thompson eingepflegt werden. Links in Abbildung 5 sind die Simulationen mit dem Einzahlwert für die Zwischenlagensteifigkeit von 500 MN/m zu sehen und rechts die Simulationen mit der gemessenen dynamischen Steifigkeit des gesamten Oberbaus, was eine sehr gute Prognose als Resultat hat. Interessant ist, dass bereits eine Simulation mit linearer Approximation des gemessenen Frequenzverlaufs der dynamischen Steifigkeit des Oberbaus (Abbildung 5 mitte) zu einer deutlichen Verbesserung in Vergleich zum Einzahlwert führt.

Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend gilt es zu sagen, dass die bisherige akustische Charakterisierung von Gleisen nicht nur sehr aufwändig ist, sondern auch keine gute Reproduzierbarkeit zeigt. Die in der Norm geforderte hohe Homogenität begünstigt eine gute Wellenausbreitung und ist aus akustischer Sicht eigentlich unerwünscht. Im Umkehrschluss heißt das, dass bei Gleisen mit hoher TDR die Homogenitätsbedingung oft nicht erfüllt ist. Außerdem bleibt festzuhalten, dass es auf Grund der geringen Kohärenz von Prüfhammer- und Beschleunigungsaufnehmersignal für entfernte Messpunkte messtechnisch schwierig ist Transferrezeptanzen über größere Entfernungen als sechs Schwellen hinweg zu messen. Ein Ansatz wäre es, einen sensitiveren Beschleunigungsaufnehmer ab Schwellenfach 6 zu nutzen, wobei zu beachten ist, dass ein Wechsel des Messequipments während einer Messreihe fehlerbehaftet sein kann. Da das Messrauschen über große Entfernungen die Schwingungen der Schiene überdeckt, sollten große Messentfernungen vermieden werden. Stattdessen ist es sinnvoll, mehrere kürzere Strecken zu vermessen und dabei gezielte die Varianz in den dynamischen Steifigkeiten auf den Schwellen, also des

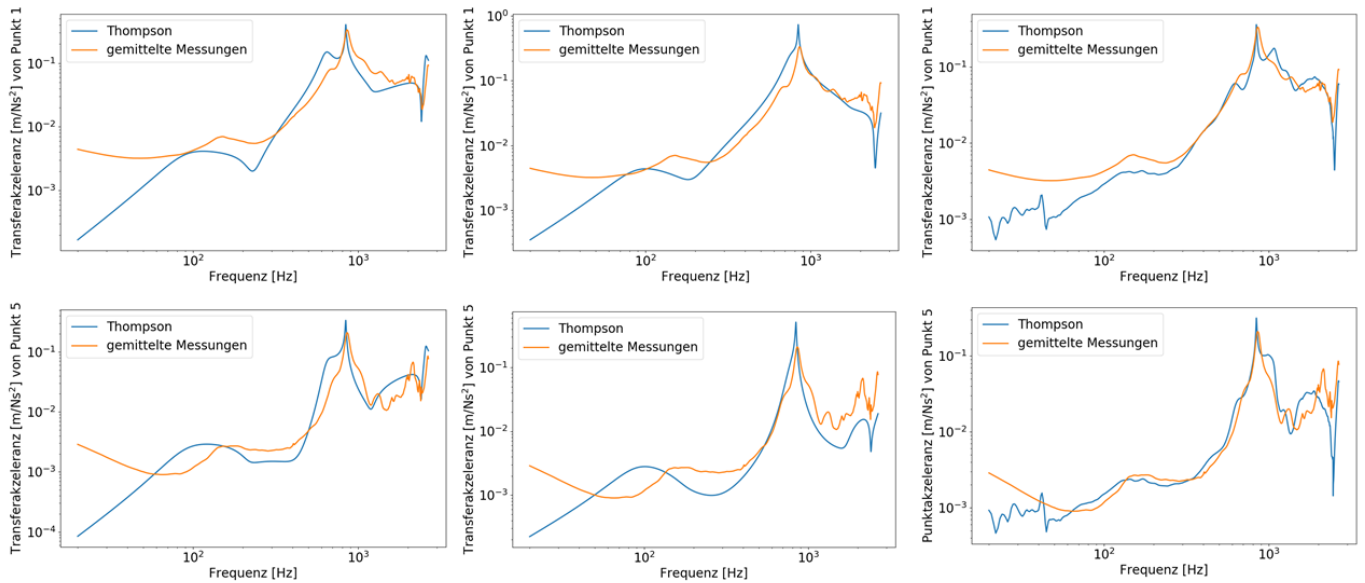


Abbildung 5: Messpunkte 1 (oben) und 5 (unten) aus der Messung in Braunschweig (orange) im Vergleich mit dem Modell nach Thompson (blau); links: Padsteifigkeit konstant bei 500 MN/m, mittig: linearisierte gemessene Gesamtsteifigkeit des Oberbaus, rechts: gemessene frequenzabhängige Gesamtsteifigkeit des Oberbaus

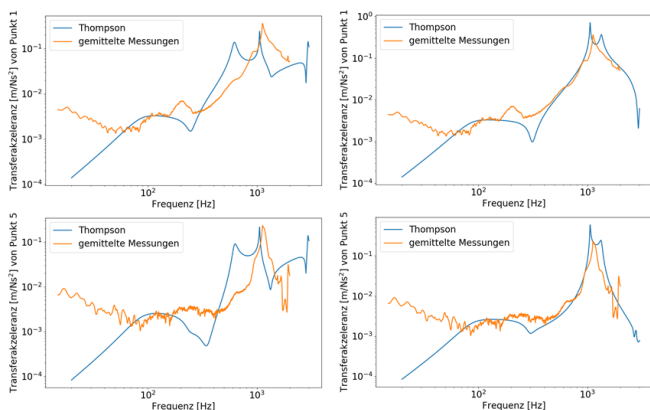


Abbildung 6: Messpunkte 1 (oben) und 5 (unten) aus der Messung in Uelzen (orange) im Vergleich mit dem Modell nach Thompson (blau); links: Padsteifigkeit konstant bei 500 MN/m, rechts: Padsteifigkeit linearisiert anhand von Zwischenlagen-Messungen aus Untersuchungen von Thompson [6]

gesamten Oberbaus, mit zu erfassen. Über diese Varianz lassen sich Aussagen über die Inhomogenität des Gleises treffen und entsprechend auch über die akustische Charakteristik.

Außerdem wurde beim Vergleich der Transferakzeleranzen mit den Modellen festgestellt, dass bei guter Kenntnis der Steifigkeit des Oberbaus die Modelle deutlich bessere Simulationsergebnisse liefern und die gemessenen Transferakzeleranzen sehr gut approximieren.

Danksagung

Wir danken Benjamin Baasch vom DLR e.V. (Institut für Verkehrssystemtechnik) für die Zusammenarbeit bei der gemeinsamen Messkampagne in Braunschweig, sowie Christoph Eichenlaub für seine Unterstützung.

Literatur

- [1] DIN EN 15461: Bahnanwendungen – Schallemission – Charakterisierung der dynamischen Eigenschaften von Gleisabschnitten für Vorbeifahrtgeräuschmessungen. 2008
- [2] CEN/TR 16891: Railway applications - Acoustics - Measurement method for combined roughness, track decay rates and transfer functions. 2016
- [3] Venghaus, H.: Messung der Track Decay Rate und die erreichbare Genauigkeit. DAGA Nürnberg, 2015
- [4] Nordborg, A.: Vertical Rail Vibrations: Noise and Structure-borne Sound Generation. TRITA-FKT report, Kungliga Tekniska Högskolan Institute of Technology, Department of Vehicle Engineering, 1995
- [5] Thompson, D.J.; Wu, X.T.: A double Timoshenko beam model for vertical vibration analysis of railway track at high frequencies. *Journal of Sound and Vibration* 224 (1999), 329-348
- [6] Thompson, D.J.; Verheij, J.W.: The Dynamic Behaviour of Rail Fasteners at High Frequencies. *Applied Acoustics* 52 (1997), 1-17
- [7] Technische Spezifikation für die Interoperabilität (TSI) zum Teilsystem „Fahrzeuge-Lärm“ des konventionellen transeuropäischen Bahnsystems (1304/2014).
- [8] Radmann, V.: Auswirkung von unscharfen Parametern auf die Rollgeräuschsimulation bei Schienenfahrzeugen. DAGA Wien, 2021