

## Schienenkopfkonditionierung im Bogen – Auftrittshäufigkeiten auffälliger Bogengeräusche

Thomas Maly<sup>1</sup>, Michael Ostermann<sup>2</sup>, Florian Biebl<sup>3</sup>, Manuel Gunacker<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Technische Universität Wien, 1040 Wien, E-Mail: [thomas.maly@tuwien.ac.at](mailto:thomas.maly@tuwien.ac.at)

<sup>2</sup> Technische Universität Wien, 1040 Wien, E-Mail: [michael.ostermann@tuwien.ac.at](mailto:michael.ostermann@tuwien.ac.at)

<sup>3</sup> *psiacoustic Umweltforschung und Engineering GmbH*, 1210 Wien, E-Mail: [biebl@psia.at](mailto:biebl@psia.at)

<sup>4</sup> *HY-POWER Produktions und Handels GmbH*, 3021 Pressbaum, E-Mail: [m.gunacker@hypower.at](mailto:m.gunacker@hypower.at)

### Einleitung

Schienenfahrzeuge können bei Bogenfahrten, insbesondere in engen Bögen, Vorbeifahrtgeräusche hervorrufen, die gegenüber den Emissionen in der Geraden zusätzlich hochfrequente und zum Teil tonale Anteile mit hohen Terzbandpegeln aufweisen. Die Entstehungsmechanismen derartiger, auffälliger Bogengeräusche sind weitgehend bekannt. So werden tonale Komponenten dem sogenannten „Stick-Slip“ Effekt zugeschrieben, bei welchem es zu einem ruckweisen Quergleiten des Rades am Schienenkopf kommt und dadurch die Radscheibe angeregt wird, in einer ihrer Eigenfrequenzen zu schwingen (beispielsweise [1][2][3][4]). Die beiden in jüngeren Werken zumeist genannten Anregungsmechanismen beruhen auf einem mit dem Schlupf sinkenden Reibungskoeffizienten („falling friction law“) und der Kopplung von Radmoden („mode-coupling“) [2][3]. Die erforderliche Energie für die Radschwingungen stammt dabei vorrangig vom lateralen Quergleiten, weshalb der Reibkoeffizient zwischen Rad und Schiene wesentlichen Einfluss auf das Entstehen von tonalen Emissionskomponenten hat [2][3].

Die bei Spurkranzanlauf durch Reibung zwischen Rad und Schienenkopfflanke hervorgerufenen Geräusche werden in der Literatur oft als separates Phänomen beschrieben, welches breitbandigere und intermittierendere Komponenten mit höheren Fundamentalfrequenzen hervorruft [1][2]. Allerdings kann Spurkranzanlauf auch die Intensität tonaler Komponenten senken oder bei hohen Anlaufwinkeln tonale Komponenten verhindern [3].

Im Folgenden werden tonale und breitbandige Komponenten unter dem Begriff der auffälligen Bogengeräusche subsummiert. Diese Bogengeräusche werden von Anrainern oftmals als besonders störend empfunden, weshalb häufig der Wunsch nach (technischen) Minderungsmaßnahmen besteht. Ein vielversprechender Ansatz zielt auf die Beeinflussung des Reibwerts ab, wobei zwischen (Schmier-)Stoffen zur Senkung des Reibwerts und Reibwertmodifizierern zur Verhinderung von mit dem Schlupf sinkenden Reibwerten zu unterscheiden ist [4]. Für die Minderung tonaler Komponenten ist aufgrund des Quergleitens eine reine Flankenschmierung unzureichend, sondern eine Benetzung der Fahrfläche essentiell [4]. Infrastruktureitige Einrichtungen zur Beeinflussung des Reibwertes auf der Schienenfahrfläche – sogenannte Schienenkopfkonditionieranlagen – gelten als Stand der Technik [5]. Verschiedene Untersuchungen bescheinigen diesen Anlagen grundsätzlich eine hohe Effektivität zur

Senkung tonaler Auffälligkeiten [1][2][3][4][5], jedoch hängt diese von verschiedenen Einflüssen wie der aufgetragenen Menge oder den Witterungsbedingungen ab [4][5] und kann daher nicht allgemein angegeben werden.

Vor diesem Hintergrund wurden im Rahmen des vom Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie und von der ÖBB Infrastruktur AG geförderten Forschungsprojekts „Einflüsse auf Schallemissionen in Bögen“ (ESB, FFG-Projekt 850558) die Minderungswirkung einer Schienenkopfkonditionierung unter realen Bedingungen vertiefend untersucht. Nachfolgend wird ein Überblick über diese Untersuchungen und über wesentliche Erkenntnisse gegeben, wobei das Hauptaugenmerk auf Auftrittshäufigkeiten akustisch auffälliger Bogenfahrten liegt.

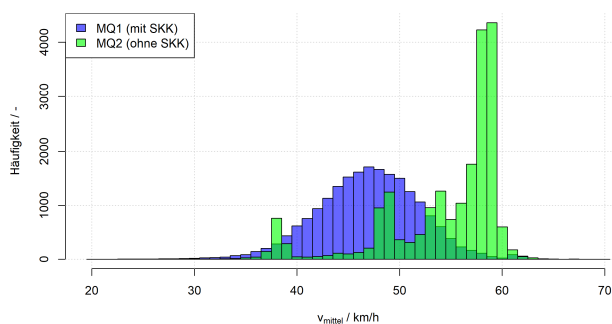
### Messtechnische Erhebungen

Zur Beurteilung der Wirkung einer Schienenkopfkonditionierung (SKK) wurden Schallemissionsmessungen über elf Monate zeitlich parallel an zwei engen Bögen der Wiener Vorortelinie (Gleis 2) durchgeführt. Die gewählten Bögen wiesen mit 226 m und 230 m beinahe idente Radien, gleiche Krümmungsrichtungen (Linksbögen), weitestgehend übereinstimmende Oberbaueigenschaften (Schotterbett, Holzschwellen, Schientyp S49, Überhöhung 90 - 95 mm und Neigung in Regelfahrtrichtung von 0 bzw. -10 ‰), sowie vergleichbare Schienenrauheiten und Gleisabklingraten auf. Vor dem 1. Bogen war eine Konditionieranlage installiert, der 2. Messbogen diente zu Vergleichszwecke. In den ersten beiden Messmonaten war die Konditionieranlage deaktiviert, um die Grundauftrittshäufigkeiten auffälliger Geräusche direkt einander gegenüberstellen zu können (Referenzphase).

In jedem Bogen wurde das automatisiert arbeitende Messsystem *acramos*<sup>®</sup> von *psiacoustic* zur Erfassung der Schallemissionen in einem Abstand von 7,5 m zur Gleisachse und in einer Höhe von 1,2 m über der Schienenoberkante installiert. Neben den Schalldrucksignalen wurden verschiedene Witterungsparameter (Luft- und Schientemperatur, Luftdruck, relative Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und -richtung, sowie Regen) bei jeder Vorbeifahrt gemessen. Als Basis für die Auswertungen standen 20625 Vorbeifahrten je Messbogen zur Verfügung, von denen für die Auswertungen die 20225 Vorbeifahrten von Schnellbahnen zweier verschiedener Baureihen gemeinsam betrachtet werden.

Im Hinblick auf die Vergleichbarkeit ist hervorzuheben, dass durch die parallelen Messungen auf der gleichen Strecke das gleiche Zugsmaterial in den Bögen vermessen wurde und daher fahrzeugspezifische Einflüsse weitestgehend

ausgeschlossen werden können. Zudem befanden sich die beiden Messquerschnitte in einem Abstand von rund 2,6 km (Luftlinie), sodass bei den Messungen zumeist ähnliche klimatische Bedingungen vorherrschten. Unterschiede bestanden hingegen hinsichtlich der Fahrgeschwindigkeiten und Beschleunigungen. Denn der 1. Bogen befand sich vor einer Schnellbahnstation, sodass die Züge beim Passieren des Messquerschnitts (MQ1) bereits verzögerten. Demgegenüber lag der 2. Messquerschnitt (MQ2) unmittelbar nach einer Trennstelle, weshalb bei Überfahrt der Messstelle die Zugsaggregate zwar bereits wieder versorgt wurden, jedoch die Traktionsleistung noch fehlte und daher die Züge den Bogen meist mit einer Geschwindigkeit nahe der Streckengeschwindigkeit von 60 km/h durchrollten. Entsprechend der unterschiedlichen Geschwindigkeiten (Gegenüberstellung der Geschwindigkeitsverteilungen siehe Abbildung 1) und der unterschiedlichen Verzögerungen ist von verschiedenen Längsdynamiken im Zugverband und in weiterer Folge aufgrund der Bogenfahrt auch von Unterschieden in den lateralen Kräften auszugehen.



**Abbildung 1:** Histogramme der Vorbeifahrtsgeschwindigkeiten von Schnellbahnen in den beiden Messquerschnitten MQ1 und MQ2.

## Schienenkopfkonditionierung

Zur Schienenkopfkonditionierung im 1. Messbogen wurde eine Anlage des Typs Friktionmaster KK25 der Firma HY-POWER beim Bogenbeginn rund 50 m vor dem Messquerschnitt installiert, welche ein reibwertsenkendes Konditioniermittel nutzt. Wie in Abbildung 2 zu erkennen ist, werden zur Aufbringung des Konditioniermittels zwei Konditionierleisten je Schiene mit jeweils 4 Förderöffnungen angebracht, durch welche eine konstante Menge an Konditioniermittel ( $0,2 \text{ cm}^3$  je Öffnung) in kleine Vorratsmulden gepumpt und unmittelbar vor einer Zugsvorbeifahrt mittels Druckluft auf den Schienenkopf geblasen wird. Durch die Räder der überfahrenden Züge wird das punktuell aufgebraute Mittel im nachfolgenden Streckenbereich verteilt. Dieser Konditioniervorgang erfolgt jeweils nach einer wählbaren Anzahl von Überfahrten (Konditionierzyklus), wodurch die im Durchschnitt applizierte Menge gesteuert werden kann. In der rund 9-monatigen Phase mit aktivierter Konditionieranlage wurde in den ersten 2,5 Monaten ein Konditionierzyklus von 5 Überfahrten gewählt und im Anschluss auf 6 Überfahrten ausgedehnt. Da bei nasser Schiene das Konditioniermittel schlechter am Schienenkopf haftet und bei Überfahrt von Zügen zum Teil weggeschleudert würde, setzt die Anlage in Phasen von erkanntem Regen die Konditionierung aus.



**Abbildung 2:** an der Schienenaußenseite montierte Leisten zur Aufbringung des Konditioniermittels am Schienenkopf.

## Erkennung akustischer Auffälligkeiten

Eine automatisierte Erkennung von auffälligen Geräuschkomponenten in den Schallemissionen vorbeifahrender Züge wurde bereits in einem vorangegangenen Forschungsprojekt entwickelt [6][7]. Diese Erkennung beruht im Wesentlichen auf der Interpretation von Kurzzeitspektren und kann zwischen tonalen und breitbandigen Komponenten unterscheiden. Erstere werden durch Bewertung von einzelnen oder benachbarten, erhöhten Terzpegeln im mittleren und oberen Frequenzspektrum identifiziert. Die für den Spurkranzanlauf typischen, breitbandigen Erhöhungen äußern sich vor allem dadurch, dass der mit der Frequenz typische Abfall der Terzbandpegel bei unauffälligen Vorbeifahrtsgeräuschen nicht gegeben ist, weshalb die Terzbandpegel von 8 kHz bis 12,5 kHz zur Erkennung herangezogen werden. Allerdings treten tonale und breitbandige Komponenten nicht stets isoliert voneinander auf, sondern Vorbeifahrtsgeräusche enthalten häufig Mischformen, weshalb im Folgenden unter akustisch auffälligen Zügen – soweit nicht anders ausgeführt – Züge mit zumindest einer dieser auffälligen Komponenten verstanden werden.

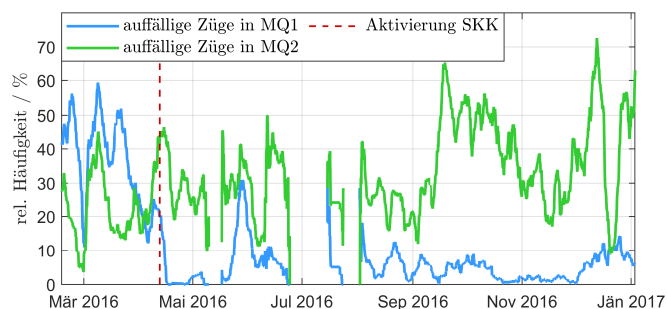
## Ergebnisse

Nässe auf dem Schienenkopf kann den Reibwert signifikant senken, wodurch auch das Auftreten tonaler Auffälligkeiten maßgeblich verringert werden kann [1][2][3][4]. Um diesen Einfluss bei den Auswertungen weitgehend ausschließen zu können, werden ausschließlich Vorbeifahrten mit einem zeitlichen Abstand von mindestens 15 min zu detektierten Regenereignissen herangezogen.

## Auftrittshäufigkeiten

Ein anschaulicher Vergleich der Auftrittshäufigkeiten von akustisch auffälligen Zügen kann anhand der in Abbildung 3 dargestellten Zeitverläufe der relativen Häufigkeiten (gleitende Mittelwerte über 7 Tage) gezogen werden. Dargestellt ist dabei die gesamte Messperiode, wobei der Zeitpunkt der Anlagenaktivierung in MQ1 als rot strichlierte Linie angedeutet ist.

Zunächst sind die trotz 7-Tages-Mittelung doch deutlichen, zeitlichen Variationen der Auftrittshäufigkeiten in beiden Querschnitten hervorzuheben, welche auf veränderliche Einflussgrößen hindeuten. Um deren Einfluss zu senken, orientieren sich weitere Auswertungen an möglichst großen Zeitbereichen.



**Abbildung 3:** Gegenüberstellung der Zeitverläufe von relativen Häufigkeiten akustisch auffälliger Züge in den beiden Messquerschnitten MQ1 und MQ2 (gleitender Mittelwert über 7 Tage) für die 11-monatigen Messphase.

Die Zeitverläufe in Abbildung 3 lassen den Minderungseffekt der Schienenkopfkonditionierung bereits deutlich erkennen: während in der 2-monatigen Referenzphase ohne Konditionierung auffällige Bogengeräusche im ersten Messbogen meist häufiger als im Zweiten auftraten, drehten sich in der Phase der Konditionierung die Verhältnisse durchwegs um. Tabelle 1 gibt hierzu quantitativen Aufschluss: in der Referenzphase waren obgleich der weitgehend vergleichbaren Rahmenbedingungen in MQ1 42 % und damit rund 67 % mehr Züge akustisch auffällig, als in MQ2. Verantwortlich hierfür könnten die erwähnten, unterschiedlichen Geschwindigkeiten bzw. Fahrdynamiken in den Messbögen sein. In der Konditionierphase war in MQ2 ein Anstieg von 25 % auf 36 % zu verzeichnen, während in MQ1 nur mehr 5 % auffällige Züge detektiert wurden. Das Minderungspotential durch die Konditionierung beläuft sich für den 9-monatigen Zeitbereich somit auf rund 87 %. Jedoch deutet die höhere Neigung des 1. Messbogens zu akustischen Auffälligkeiten in der Referenzphase darauf hin, dass das eigentliche Minderungspotential über diesem Wert liegt.

**Tabelle 1:** Anteile akustisch auffälliger Züge in beiden Messquerschnitten, aufgeschlüsselt in die Zeitbereiche mit deaktivierter und aktivierter Konditionierung in MQ1.

SKK	deaktiviert (62 Tage)	aktiviert (273 Tage)		
		gesamt	tonal	breitband
MQ2	25 %	36 %	8 %	35 %
MQ1 (SKK)	42 %	5 %	2 %	3 %
Vergleich	+ 67 %	-87 %	-71 %	-90 %

Wird in der Konditionierphase zwischen tonalen und breitbandigen Auffälligkeiten differenziert, so treten im unkonditionierten Bogen MQ2 letztere mit 35 % rund 4-mal häufiger auf (siehe Tabelle 1). Ein ähnliches Verhältnis ist auch in beiden Messquerschnitten in der Referenzphase zu beobachten, weshalb der Spurkranzanlauf in beiden Bögen als dominanter Anregungsmechanismus wahrscheinlich ist. Bei Konditionierung sind in MQ1 tonale Komponenten nur bei 2 % und breitbandige Komponenten nur bei 3 % der Züge vorhanden. Dass bei beiden Anregungsmechanismen Senkungen von >70 % erzielt werden ist insofern bemerkenswert, als dass die Applizierung des Konditioniermittels an der Lauffläche am Schienenkopf und nicht an der Schienenkopfflanke erfolgt, an welcher der Spurkranz bei Anlauf reibend in Kontakt tritt. Aus Sicht der Autoren erscheinen eine Verteilung des Konditioniermittels in den Flankenbereich durch die überfahrenden Züge oder/und eine Verringerung der lateralen Kräfte im

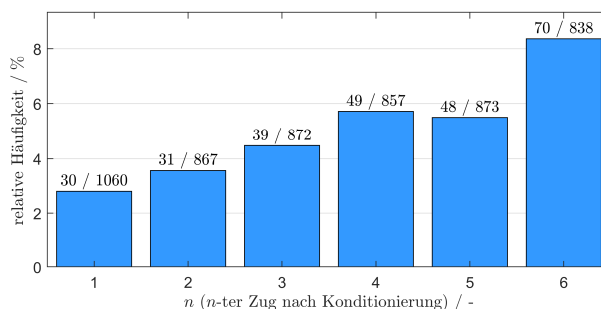
Anlaufpunkt durch gesenkte Reibwerte in den Radaufstandspunkten als Ursache für dieses Verhalten in Frage zu kommen.

### Mittlere Auftrittsdauer akustischer Auffälligkeiten

Für die Untersuchung, ob die Konditionierung auch die Dauer der verbleibenden, auffälligen Bogengeräusche positiv beeinflusst, wurde zur Kompensation der unterschiedlichen Geschwindigkeiten die Zeitdauer jeder Auffälligkeit in Relation zur jeweiligen Zugsvorbeifahrtzeit gesetzt. In der Referenzphase lag der arithmetische Mittelwert dieser bezogenen Auftrittsdauer in MQ1 bei 46 % und in MQ2 bei 33 %. In der Konditionierphase stieg die mittlere Auftrittsdauer im unkonditionierten MQ2 auf 48 %, während sie im konditionierten Querschnitt MQ1 mit 22 % auf etwas weniger als die Hälfte fiel. Diese Zahlen zeigen, dass durch die Konditionierung nicht nur ein Großteil von Auffälligkeiten gänzlich verhindert wird, sondern dass in Übereinstimmung mit dem UIC Maßnahmenkatalog [5] auch die verbleibenden, akustischen Auffälligkeiten grundsätzlich verkürzt werden.

### Konditionierzyklen

Die Reduzierung der Konditioniermittelmenge durch die oben beschriebene Ausdehnung der Konditionierzyklen von 5 auf 6 Überfahrten nach rund 2,5 Monaten führte zu keiner nennenswerten Änderung der mittleren Minderungswirkung der Auftrittshäufigkeiten in MQ1: In beide Fällen lag die Verringerung bei ca. 85 %, wobei die fehlende Verschlechterung der Wirkung bei reduziertem Mittelauftrag statistischen Schwankungen zugeschrieben wird. Eine Aufschlüsselung der relativen Auftrittshäufigkeiten akustisch auffälliger Züge innerhalb der Konditionierzyklen mit 6 Überfahrten zeigt jedoch einen deutlichen Anstieg (vgl. Abbildung 4). So weisen jene Züge, die unmittelbar nach Aufbringung des Konditioniermittels den Messquerschnitt 1 passierten, in etwas weniger als 3 % auffällige Emissionskomponenten auf, während Zugsvorbeifahrten unmittelbar vor dem nächsten Konditioniervorgang schon über 8 % auffällig sind.

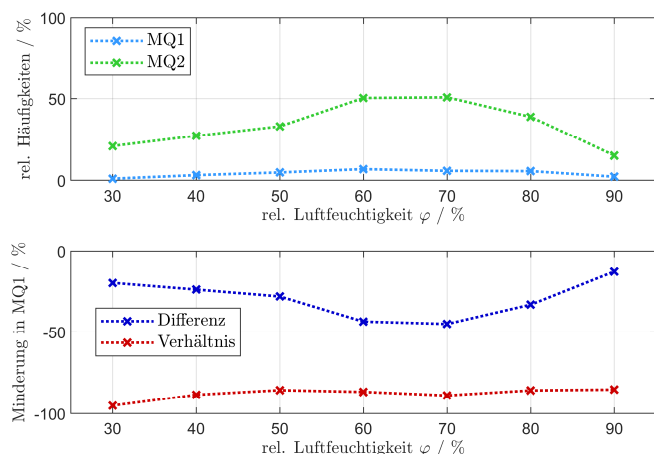


**Abbildung 4:** relative Häufigkeiten auffälliger Züge innerhalb eines Konditionierzyklus in MQ1 während der 6,5-monatigen Phase mit (reduziertem) Mittelauftrag nach jeweils 6 Überfahrten.

Anhand dieses beobachteten Verhaltens lässt sich ein geringes Steigerungspotential der Minderungswirkung durch Reduzierung der Überfahrten je Konditionierzyklus zwar vermuten. Jedoch sind einer beliebigen Erhöhung des Mittelauftrags durch die für die Traktions- und Bremsleistungen erforderlichen Reibwerte letztlich Grenzen gesetzt [3][4][5].

## Einfluss der Luftfeuchtigkeit

Der Einfluss relativer Luftfeuchtigkeit auf tonale Auffälligkeiten wird in der Literatur kontroversiell dargestellt und reicht von einem mit zunehmender Luftfeuchtigkeit linearen Anstieg der Auftrittswahrscheinlichkeiten [8] bis hin zu häufigem Auftreten tonaler Komponenten bei trockenen Bedingungen mit Luftfechtigkeiten  $< 50\%$  [9]. Im Vergleich dazu ergeben vorliegende Untersuchungen für MQ2 bei steigender Luftfeuchtigkeit bis rund  $70\%$  einen Anstieg der Häufigkeiten und anschließend einen deutlichen Abfall (vgl. Abbildung 5, oben), der vermutlich auf Kondensationseffekte an den Schienenoberflächen in der kalten Jahreszeit zurückzuführen ist. Auch im konditionierten Querschnitt MQ1 ist ein solcher Verlauf vage zu erkennen, wengleich mit deutlich geringeren Häufigkeitswerten.



**Abbildung 5:** relative Auftrittshäufigkeiten in beiden Messquerschnitten (oben) und Minderung durch die Konditionierung (unten) während aktiver Konditionierung in MQ1.

Die sich daraus ergebende Minderungswirkung der Schienenkopfkonditionierung in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchtigkeit ist in Abbildung 5 (unten) als rot punktierte Linie dargestellt. Anhand dieser kann eine von der Luftfeuchtigkeit weitgehend unabhängige Senkung der akustischen Auffälligkeiten im Bereich von über  $80\%$  abgeleitet werden.

## Zusammenfassung

Für eine vertiefende Untersuchung des Potentials durch Schienenkopfkonditionierung auffällige Bogengeräusche in engen Bögen zu verringern, wurden parallele Schallemissionsmessungen in einem konditionierten und einen unkonditionierten, ansonsten aber vergleichbaren und unweit entfernten Bogen am gleichen Gleis einer Strecke über mehrere Monate durchgeführt. Im direkten Vergleich der Bögen konnte eine Minderungswirkung von  $87\%$  weitgehend unabhängig von der vorherrschenden Luftfeuchtigkeit beobachtet werden. Die höheren Auftrittshäufigkeiten im konditionierten Bogen während einer initialen Referenzphase, in welcher die Konditionieranlage deaktiviert war, lassen eine darüberhinausgehende, höhere Minderungswirkung vermuten. Bemerkenswert ist der deutliche Effekt auf tonale und auf breitbandige Auffälligkeiten, obwohl letztere typischerweise bei Berührungen des Spurkranzes an der Schienenflanke entstehen, der Konditioniermittelauftrag

indessen grundsätzlich am Schienenkopf erfolgt. Für jene akustischen Auffälligkeiten, die sich trotz Konditionierung einstellen, war zudem eine Halbierung der mittleren, auf die Zeitdauer der Zugsvorbeifahrt bezogenen Auftrittsdauer gegenüber dem unkonditionierten Bogen festzustellen, wodurch sich weitere Vorteile hinsichtlich der Belästigungswirkung von Anrainern oder bei etwaigen Zuschlägen in der Lärmprognoseberechnung ergeben können.

Zu betonen sei abschließend, dass die Ergebnisse unter den vorherrschenden Rahmenbedingungen, wie Anlagentyp, Konditioniermittel und aufgebrauchte -menge, Fahrzeugkollektiv und -dynamik, etc. ermittelt wurden, jedoch geben sie bereits eine gute Orientierung für ähnliche Konstellationen.

## Literatur

- [1] Thompson, D. Railway Noise and Vibration: Mechanisms, Modelling and Means of Control. 1. Auflage, Oxford, United Kingdom, Elsevier Ltd., 2009, ISBN 978-0-08-045147-3
- [2] Thompson, D. Squicciarini, G. Ding, B. A state-of-the-art review of curve squeal noise: phenomena, mechanisms, modelling and mitigation. Conference Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Workshop on Railway Noise (IWRN12), 2016, 27 Seiten
- [3] Zenzerovic, I. Time-domain modelling of curve squeal: a fast model for one- and two-point wheel/rail contact Engineering model for curve squeal formulated in the time domain. PhD Thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, Schweden, 2017
- [4] Othman, Y. B. Kurvenquietschen: Untersuchung des Quietschvorgangs und Wege der Minderung. Dissertation, Fakultät für Verkehrs- und Maschinensysteme, Technische Universität Berlin, 2009
- [5] Railway noise Technical Measures Catalogue. Technical Report UIC003-01-04fe, UIC International Union of Railways, July 2013
- [6] Maly, T. Ostermann, N. Biebl, F. Hoislbauer, H. Gunacker, M. Djurdjev, V. Bewertung des akustischen Einflusses von Gleisbögen für die Erstellung von Lärmkarten. Projektendbericht, Dez. 2015, URL: <https://www2.fgg.at/verkehr/file.php?id=870>
- [7] Maly, T. Hoislbauer, H. Biebl, F. Schallemissionen in Gleisbögen – Abschätzung von Korrekturfaktoren für die Lärmprognose. Tagungsband DAGA 2017 – 43. Jahrestagung der Akustik, 2017
- [8] Meehan, P. A. Bellette, P.A. Jone, C. Anderson, D. “Probabilistic Prediction of Wheel Squeal under Field Humidity Variation. Proceedings of 20<sup>th</sup> International Congress on Acoustics. ICA 2010, Aug. 2010, Seiten 2198–2203, ISBN 978-1-61782-745-7
- [9] Dittrich, M. et al. ACOUTRAIN: Virtual Certification of Acoustic Performance for Freight and Passenger Trains. Deliverable D1.10 - Braking noise and Curving noise - corresponding indicators and measurement procedures, 2014