

Schallemissionen in Gleisbögen – Abschätzung von Korrekturfaktoren für die Lärmprognose

Thomas Maly¹, Heinz Hoislbauer², Florian Biebl³

¹ Technische Universität Wien, Institut für Verkehrswissenschaften, Karlsplatz 13/230-2, A-1040 Wien

² TAS Sachverständigenbüro für Technische Akustik SV GmbH, Emil-Rathenau Straße 1, A-4030 Linz

³ psiacoustic Umweltforschung und Engineering GmbH, Donaufelder Straße 55/3/1, A-1210 Wien

Einleitung

In engen Gleisbögen können Schienenfahrzeuge tonale oder/und breitbandig hochfrequente Kurvengeräusche hervorrufen, welche zu kurzzeitigen Erhöhungen in den Schallemissionen führen und für die betroffenen Anrainer eine besondere Lärmbelastung darstellen. Der Entstehungsmechanismus dieser Kurvengeräusche ist zwar weitgehend bekannt und die Faktoren, welche das Auftreten dieser Auffälligkeiten beeinflussen, sind zahlreich. Bis dato gibt es jedoch kein Modell, welches die Entstehung von Kurvengeräuschen mit all seinen Einflussparametern abbilden kann. In weiterer Konsequenz sind Prognosen für die mittleren Schallemissionen in Bögen mit großen Unsicherheiten behaftet. Diesen Umstand tragen gängige Prognosemodelle wie die ON-Regel 305011 [1] oder die Berechnungsvorschrift der Europäischen Kommission für die Erstellung von Umgebungslärmkarten CNOSSO-EU [2] Rechnung, indem die erhöhten Emissionen in Bögen durch radienabhängige, jedoch sonst pauschale Korrekturwerte berücksichtigt werden.

Im Jahr 2014 wurde vom österreichischen Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie und von ÖBB-Infrastruktur AG ein im Rahmen der Verkehrsinfrastrukturforschung gefördertes Projekt ins Leben gerufen. Dieses hatte zum Ziel, anhand von umfangreichen Schallmessungen in verschiedenen Bögen Einflüsse wie Bogenradius, Zugkategorie und Witterung näher zu untersuchen und deren akustische Auswirkungen in Form von Korrekturfaktoren für die Lärmprognose abzuschätzen. Im Folgenden werden die Erkenntnisse hinsichtlich dieser Korrekturfaktoren als Auszug der gesamten Untersuchungsergebnisse dargestellt.

Entstehung erhöhter Schallemissionen

Hochfrequente Geräuschanteile in Bögen werden grundsätzlich durch den sogenannte Stick-Slip Effekt oder Haftgleiteffekt – eine periodische Abfolge von Verspannung und ruckartiger Entspannung – in der Kontaktregion zwischen Rad und Schiene hervorgerufen, welcher Rad bzw. Schiene zum Schwingen anregt. Im Detail wird zwischen folgenden Anregungsmechanismen unterschieden [3]:

- laterales Kriechen zwischen Radlauffläche und Schienenkopf, bei welchem meist tonale Geräuschkomponenten emittiert werden (Beispiel siehe Abbildung 1, oben)
- Spurkranzanlauf an der Schieneninnenflanke, welcher vor allem durch hochfrequente, breitbandige

Geräuschkomponenten in Erscheinung tritt (Beispiel siehe Abbildung 1, unten)

Laterales Kriechen entsteht häufig am bogeninneren Rad der vorlaufenden Achse eines Drehgestells oder eines zweiachsigen Fahrzeugs. Die Frequenz des schmalbandigen Geräusches wird dabei durch die Eigenfrequenzen des Rades bestimmt, wobei in der Literatur verschiedene Frequenzbereiche zu finden sind. Während Thompson [3] den Frequenzbereich mit 250 Hz bis 5 kHz vergleichsweise weit fasst, wird in anderen Arbeiten meist der Bereich um 3 bis 4 kHz beobachtet oder simuliert (vgl. beispielsweise [4] und [5]). Im Gegensatz dazu tritt Spurkranzanlauf vorwiegend in engen Bögen am bogenäußeren Rad, aber möglicherweise auch am nachlaufenden bogeninneren Rad eines Drehgestells bzw. zweiachsigen Fahrzeugs auf. Die dabei entstehenden Geräuschanteile weisen wesentlich höhere Fundamentalfrequenzen (Bereich beginnend bei mehreren Kilohertz), einen breitbandigeren und intermittierenderen Charakter, sowie niedrigere Pegel als tonale Anteile auf.

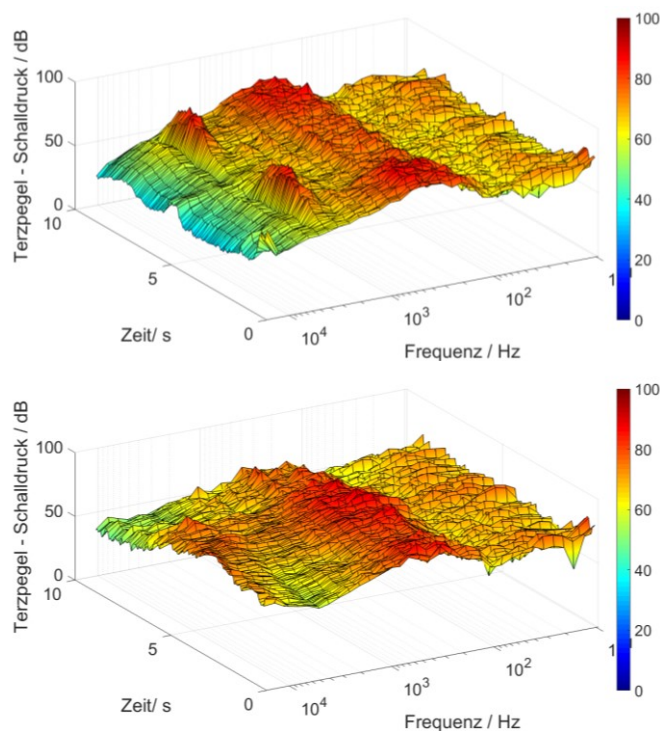


Abbildung 1: exemplarische Zeitverläufe der unbewerteten Terzpegel von Schallemissionen von Schnellbahnen der Baureihe 4020 mit 24 Achsen (60 km/h) in 7,5 m: tonale Auffälligkeit bei 3,15 kHz Terz am Zugangfang und Zugende (oben) und breitbandige, ausgeprägte Schergeräusche in der Mitte der Zugvorbeifahrt (untern).

Messungen

Im Zuge des Projektes wurden Schallemissionsmessungen an drei engen Gleisbögen mit unterschiedlichen Radien (256 m, 310 m und 440 m), sonst jedoch vergleichbaren Oberbaueigenschaften durchgeführt (siehe Tabelle 1). Die Emissionen wurden an allen drei Messquerschnitten mit dem automatisierten Messsystem acramos[®] (acoustic railway monitoring system) im Standardemissionsmesspunkt in 7,5 m Entfernung zur Gleisachse und 1,2 m über der Schienenoberkante (SOK) erfasst. Mittels Radsensoren wurden Geschwindigkeit und Achsabstände der Achsen bestimmt und anhand des Achsmusters auf die Kategorie des Zuges rückgeschlossen. Für jede Vorbeifahrt wurden zudem meteorologische Daten sowie die Schientemperatur automatisiert aufgezeichnet.

Im engsten Bogen wurden zusätzlich zum Standardemissionsmesspunkt drei weitere Messpunkte gemäß ÖNORM S5026 [6] in 7,5 m, 10,6 m und 13 m Entfernung von der Gleisachse bzw. 13 m, 10,6 m und 7,5 m Höhe über SOK realisiert. Mit Hilfe dieser Daten konnte ein geschwindigkeits- und frequenzabhängiger Korrekturwert zur direkten Berechnung des längenbezogenen Schalleistungspegels aus den Messwerten des Standardemissionsmesspunktes abgeleitet und bei den weiteren Bögen auf die aufwendige Messkonfiguration gemäß ÖNORM S5026 verzichtet werden.

Tabelle 1: Übersicht über die durchgeführten Messungen, den jeweiligen Oberbauparametern, sowie den betrieblichen Gegebenheiten

Ort	Klein-schwechat	Mürz-zuschlag	Eich-graben
Strecke	S7	Südbahn	Westbahn
Streckenkilometer	11,4	112,85	27,2
Bogenradius / m	256	310	440
Oberbau	Schotter	Schotter	Schotter
Schwellentyp	Beton	Beton	Beton
Schiententyp	UIC60	UIC60	54E2
Überhöhung / mm	70	150	131
zul. Geschw. / km/h	60	80	90
Anzahl Züge	12126	946	1141

Erkennungsalgorithmus

Zur Bewältigung der großen Anzahl an Vorbeifahrten war die Entwicklung einer automatisierten Erkennung von auffälligen Geräuschkomponenten in den aufgezeichneten Schallemissionen erforderlich. Entgegen der gängigen Vorgehensweise, lediglich die spektrale Verteilung des gesamten Vorbeifahrtsgeräusches zu beurteilen, bewertet der entwickelte Algorithmus Terzpegelzeitverläufe. Dies bietet entscheidende Vorteile: einerseits wird erst dadurch eine Unterscheidung mehrerer auffälliger Komponenten während einer Zugvorbeifahrt ermöglicht. Andererseits ist die Erkennung deutlich sensitiver und damit auch zuverlässiger, da die Merkmale der auffälligen Geräuschkomponenten durch die fehlende Mittelung über die gesamte Vorbeifahrtszeit stärker ausgeprägt sind. Darüber hinaus erlaubt die Betrachtung von Terzpegelzeitverläufen, Entstehungsorte innerhalb eines Zugverbandes besser abschätzen zu können.

Die Algorithmenentwicklung, welche in [7] detailliert beschrieben ist, beruht auf einer empirischen Erhebung von Merkmalen in den Terzpegelzeitverläufen einer zufälligen, gleichverteilten Stichprobe von 400 Vorbeifahrten. Bei akustisch unauffälligen Emissionen ist vor allem der Terzpegelabfall hin zu höheren Frequenzen ab wenigen Kilohertz markant. Im Gegensatz dazu zeichnen sich die für den Spurkranzlauf typischen hochfrequenten, breitbandigen Komponenten durch einen deutlich geringeren oder verschwindenden mittleren Abfall oder durch geringfügige mittlere Anstiege der Terzpegel aus. Zur Bewertung dieses fehlenden Pegelabfalls werden die Terzpegel bei höheren Frequenzen herangezogen, da hier die Unterschiede zu den Terzpegeln unauffälliger Emissionen am größten ausfallen und die Erkennung damit robust gegenüber Störeinflüssen wird. Im Detail werden die im Frequenzbereich von 8 bis 12,5 kHz gemittelten Terzpegel zum Vergleich mit einem empirisch ermittelten Grenzwert verwendet.

Die für laterales Kriechen typischen tonalen Emissionskomponenten äußern sich stets durch Erhöhung einer einzelnen, oder im Fall einer Mittenfrequenz nahe einer Bandgrenze durch Erhöhung zweier benachbarter Terzpegel. Demzufolge wird als Bewertungsgröße für diese Auffälligkeiten die mittlere Pegeldifferenz einer oder zweier benachbarter Terzpegel zu den umgebenden beiden Terzpegeln im relevanten Frequenzbereich herangezogen und mit empirisch festgelegter Grenzwerten verglichen.

Hervorzuheben ist in beiden Fällen die Verwendung absoluter Grenzwerte. Erst dies erlaubt es, Auftrittshäufigkeiten sowie abgeleitete Korrekturfaktoren verschiedener Zugkategorien mit unterschiedlichen Grundvorbeifahrtsgeräuschen einander gegenüberzustellen.

Korrekturfaktoren

Mit Hilfe der Unterscheidungsmöglichkeit von akustisch unauffälligen Zugvorbeifahrten und von Zugvorbeifahrten mit auffälligen Emissionskomponenten, zu welchen sowohl die tonalen als auch hochfrequente, breitbandige Emissionskomponenten zu zählen sind, können Abschätzungen über etwaige Erhöhungen der Schallemissionen in Bögen gegenüber den für die Lärmprognose verwendeten Emissionswerten bei gerader Strecke gezogen werden. Da die Berechnung der Schallemission in Österreich derzeit auf der ON-Regel 305011 [1] basiert, werden die der Ausbreitungsrechnung zugrunde liegenden und für unterschiedliche Zugkategorien und Geschwindigkeiten definierten Schallemissionswerte in Form von längenbezogenen Schalleistungspegel für einen Vergleich herangezogen.

Die Auswertungen beziehen sich auf ein trockenes Gleis, weshalb aus der Menge an erfassten Emissionen jene ausgeblendet wurden, welche sich in der zeitlichen Umgebung von ± 1 h einer Regendetektion befinden. Des Weiteren wurden die Vorbeifahrten nach ihrer Geschwindigkeit in Klassen mit einer Breite von 10 km/h gruppiert. Zum direkten Vergleich wurden die Terzpegelspektren der erfassten längenbezogenen

Schalleistungspegeln entsprechend der Angaben in der ONR 30511 in Oktavbändern zusammenfasst, sowie die Emissionsangaben der ONR durch Inter- bzw. Extrapolation auf die erfassten Geschwindigkeitsklassen umgerechnet.

Die Auswertungen erfolgten getrennt nach Bogenradius, Zugskategorie und Geschwindigkeitsklasse, sofern die Emissionen von mindestens 10 Vorbeifahrten zur Verfügung standen. Zum einen wurden die Differenzen zwischen den mittleren Spektren von Bogenfahrten ohne akustische Auffälligkeiten und den Spektren der ONR für die gerade Strecke gebildet (Korrekturfaktoren A_{oA}). Zum anderen wurden die durch akustische Auffälligkeiten hervorgerufenen Pegelerhöhungen bestimmt, indem die Emissionen von Bogenfahrten mit akustischen Auffälligkeiten jenen ohne diese Auffälligkeiten gegenübergestellt wurden (Korrekturfaktoren A_{Δ}). Dabei wurden zwei Berechnungsansätze verfolgt:

- Gegenüberstellung der mittleren längenbezogenen Schalleistungspegel von akustisch auffälligen und akustisch unauffälligen Bogenfahrten: der Vorteil dieser Methode besteht darin, dass es sich stets um gemessene Ereignisse handelt, die tatsächlich vor Ort aufgetreten sind. Nachteilig ist jedoch, dass die Ereignisse unterschiedlich sind, d. h. dass lediglich der Bogenradius, die Zugkategorie und die Geschwindigkeitsklasse übereinstimmen. Alle weiteren Einflussfaktoren, welche die Schallemission beeinflussen können, werden außer Acht gelassen und führen zu Unsicherheiten in den Abschätzungen.
- Ausblendung von akustischen Auffälligkeiten anhand der durch die automatische Erkennung identifizierten betroffenen Zeit- und Frequenzbereiche und Vergleich der ermittelten längenbezogenen Schalleistungspegel mit jenen derselben Ereignisse ohne Ausblendung: bei diesem Ansatz werden dieselben Ereignisse betrachtet, wodurch die Auswirkungen von variierenden Einflüssen weitgehend ausgeschlossen werden können. Sofern die Voraussetzungen für eine Ausblendung gegeben sind (Auffälligkeiten dürfen beispielsweise nicht während der gesamten Vorbeifahrt auftreten), kann für jede einzelne Vorbeifahrt ein Differenzspektrum ermittelt werden, welches die akustischen Auffälligkeiten charakterisiert. Wesentlich dabei ist, dass nur jene Oktavpegel ungleich Null sind, in welchen eine akustische Auffälligkeit erkannt wurde. Allerdings werden die erfassten Emissionen „künstlich“ beeinflusst, das bedeutet die resultierenden Differenzspektren sind in geringem Maße auch von den Eigenschaften der automatisierten Erkennung abhängig. Häufig sind akustische Auffälligkeiten aufgrund der ortsfesten Emissionsmessung durch merkbare zeitliche Anstiege und Abfälle gekennzeichnet (vgl. Abbildung 1), weshalb bei der Ausblendung üblicherweise noch Reste dieser Übergangsbereiche bestehen bleiben. Insofern unterschätzen die Differenzspektren tendenziell die akustischen Eigenschaften der Auffälligkeiten (insbesondere bei den meist langsamer ansteigenden bzw. abfallenden breitbandig hochfrequenten Auffälligkeiten) und stellen daher untere Schranken dar.

Aufgrund der zum Teil sehr unterschiedlichen Abschätzungseigenschaften wurde die Wahl des plausibleren und damit des anzuwendenden Ansatzes durch Vergleich und Interpretation der sich ergebenden Korrekturspektren bzw. -faktoren, sowie der durch Analysen gewonnenen Eigenschaften der Ansätze für jede Zugskategorie einzeln vorgenommen (Expertenurteil). Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 als Einzahlwerte der Korrekturspektren von akustisch unauffälligen Vorbeifahrten A_{oA} und für akustisch auffällige Vorbeifahrten $A_{mA} = A_{oA} + A_{\Delta}$ für die betrachteten Bogenradien, Zugskategorien und Geschwindigkeitsklassen zusammengefasst und den Korrekturfaktoren aus der Literatur (ONR 305011 [1], CNOSSOS [2], Schall 03 [8], VBUSch [9]) gegenübergestellt.

Tabelle 2: Gegenüberstellung Einzahlwerte der Korrekturfaktoren mit Ergebnissen aus der Literatur

Radius r	Zugskategorie	Geschwindigkeitsklasse	Anzahl an Zügen	A_{oA}	A_{mA}	p_{mA}	$A_{mA,p}$	ONR	CNOSSOS-EU	Schall 03, VBU-Sch
m	-	km/h	-	dB	dB	%	dB	dB	dB	dB
Bogen 1 ($v_{VZG} = 60$ km/h)										
256	Regionalzüge 80-33	40	94	3,4	7,0	44,7	5,4	5	8	8
256	Regionalzüge 80-33	50	153	6,0	9,5	49,7	8,1	5	8	8
256	Regionalzüge 80-33	60	3845	7,8	10	43,0	8,9	5	8	8
256	Güterzüge	40	302	2,4	3,8	67,2	3,4	5	8	8
256	Lokomotive 2016	40	39	9,6	14,5	28,2	11,6	5	8	8
256	Schnellbahn 4020	40	222	1,6	4,2	73,4	3,6	5	8	8
256	Schnellbahn 4020	50	1004	3,0	4,9	72,8	4,5	5	8	8
256	Schnellbahn 4020	60	3051	3,0	4,4	71,7	4,0	5	8	8
256	Schnellbahn 4024	50	61	5,7	7,8	18,0	6,2	5	8	8
256	Schnellbahn 4024	60	211	5,9	8,5	21,8	6,6	5	8	8
Bogen 2 ($v_{VZG} = 80$ km/h)										
310	Güterzüge	60	77	2,4	2,7	80,5	2,6	0	5	3
310	Güterzüge	70	162	1,3	1,9	64,8	1,7	0	5	3
310	Güterzüge	80	68	-0,5	-0,2	55,9	-0,3	0	5	3
310	Railjet Reisezüge	70	58	-0,7	4,1	37,9	1,8	0	5	3
310	Railjet Reisezüge	80	107	-1,5	2,4	44,9	0,7	0	5	3
310	Weitere Reisezüge	80	40	0,0	2,7	40,0	1,3	0	5	3
Bogen 3 ($v_{VZG} = 90$ km/h)										
440	Regionalzüge 80-33	90	141	2,0	2,6	30,5	2,2	0	5	3
440	Güterzüge	60	33	2,4	2,8	54,5	2,6	0	5	3
440	Güterzüge	70	47	4,8	4,9	72,3	4,9	0	5	3
440	Güterzüge	80	77	0,7	0,8	70,1	0,8	0	5	3
440	Güterzüge	90	95	-0,5	-0,4	62,1	-0,4	0	5	3
440	Weitere Reisezüge	90	72	3,1	4,1	56,9	3,7	0	5	3
A_{oA} Korrekturfaktoren (A-bewertet) für akustisch unauffällige Ereignisse gegenüber ONR A_{mA} Korrekturfaktoren (A-bewertet) für akustisch auffällige Ereignisse gegenüber ONR p_{mA} Prozentsatz der Züge mit akustischen Auffälligkeiten $A_{mA,p}$ Korrekturfaktoren (A-bewertet) für den Prozentsatz p_{mA} an auffälligen Ereignissen gegenüber ONR										

Die angeführten Korrekturfaktoren A_{oA} und A_{mA} beziehen sich auf die theoretische Situation, in welcher die Emissionen jeder Vorbeifahrt einer bestimmten Zugskategorie und Geschwindigkeitsklasse tonale und/oder breitbandig hochfrequente Auffälligkeiten enthalten. Für den allgemeinen Fall, in dem nur ein bestimmter Anteil an akustisch unauffälligen und akustisch auffälligen Ereignissen auftritt, ist eine entsprechende, energetische Mittelung über die jeweiligen Anteile durchzuführen. Dementsprechend sind bei Lärmprognosen die Prozentsätze anhand von Vorerfahrungen oder vergleichbaren Bögen, ggf. unter Berücksichtigung klimatischer Einflüsse abzuschätzen. In Tabelle 2 sind als Orientierung auch die ermittelten

Anteile p_{mA} auffälliger Emissionskomponenten, sowie die daraus resultierenden Korrekturfaktoren $A_{mA,p}$ angegeben.

Wie aus Tabelle 2 hervorgeht, wurden die betrachteten Bögen je nach Zugskategorie im Allgemeinen nur innerhalb gewisser Geschwindigkeitsbereiche durchfahren, sodass nur für diese entsprechende Korrekturfaktoren bestimmt werden konnten. Da in den Bögen zum Teil unterschiedliche Verkehrszusammensetzungen auftraten, sich die Geschwindigkeitsbereiche bei den verschiedenen Bögen kaum überdecken und für einige Zugskategorien nur Werte für wenige Geschwindigkeitsklassen existieren, sind ohne weitere, umfassende Messungen keine allgemeinen Abhängigkeiten von Korrekturfaktoren für unterschiedliche Geschwindigkeiten und Bogenradien ableitbar. Dennoch geben diese Korrekturfaktoren einen Einblick über die Größenordnungen und Tendenzen.

Die Korrekturfaktoren für akustisch auffällige Ereignisse werden tendenziell mit zunehmendem Bogenradius geringer. Die Abnahme der Korrekturfaktoren mit dem Bogenradius entspricht den Erwartungen, da mit zunehmendem Bogenradius generell die Auftrittshäufigkeit auffälliger Emissionskomponenten sinkt. Weiters zeigt sich, dass die Güterzüge gegenüber Personenzügen tendenziell geringere Korrekturfaktoren, insbesondere bei den Geschwindigkeiten gemäß dem Verzeichnis zulässiger Geschwindigkeiten (VzG), aufweisen. Dieser Einfluss des Fahrgeräusches ist nachvollziehbar, sofern sich auffällige Emissionskomponenten in ihrer Intensität unabhängig von der jeweiligen Zugskategorie zeigen, jedoch bei lauterer Fahrzeugen aufgrund des höheren Rollgeräusches keine oder nur geringe Pegelerhöhungen verursachen.

Der Vergleich mit den Korrekturfaktoren der Literatur zeigt generell, dass die auf der Basis der Messungen ermittelten physikalischen Korrekturfaktoren (keine Lästigkeitszuschläge) meist in ähnlichen Bereichen liegen, wie diejenigen aus der Literatur, allerdings deutliche Streuungen aufweisen. Hervorzuheben sind jedoch vor allem Bögen mit Radien > 300 m, bei welchen die ermittelten Korrekturfaktoren für sämtliche Zugskategorien sowie Geschwindigkeiten unterhalb jenen von CNOSSOS liegen. Insbesondere bei Güterzügen mit Geschwindigkeiten entsprechend dem VzG, nehmen die Korrekturfaktoren negative Werte an, führen somit zu einer gegenüber der ONR 305011 sogar leicht verminderten Schallemission. Zu beachten ist in diesem Zusammenhang, dass für Ausbreitungsrechnungen in der Regel die maximal zulässigen Geschwindigkeiten (VzG) herangezogen werden.

Die Implementierung der Korrekturfaktoren in Schallausbreitungsberechnungsprogrammen erfolgt sinnvollerweise durch Beaufschlagung der vorgegebenen Emissionswerte für eine bestimmte Zugskategorie mit entsprechenden Korrekturfaktoren für den Bereich des Bogens. Vergleichsberechnungen zwischen einer Beaufschlagung von Einzahlwerten und spektraler Beaufschlagung in Oktavbändern haben ergeben, dass es zu Abweichungen von bis zu rund 3 dB kommen kann. Auf Grund dessen wird empfohlen, Ausbreitungsberechnungen stets mit spektralen Korrekturfaktoren durchzuführen.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Untersuchungen zeigen, dass in engen Gleisbögen auch bei Vorbeifahrten ohne Auffälligkeiten höhere Pegel auftreten als auf der geraden Strecke. Die ermittelten physikalischen Korrekturfaktoren (ohne Berücksichtigung der Belästigung) liegen in einem ähnlichen Bereichen, wie diejenigen aus der Literatur (0 bis 8 dB), weisen allerdings je Zugskategorie größere Streuungen auf. Für die Anwendung in der Lärmprognose sind noch weitere Untersuchungen erforderlich: zum einen, um weitere Zugskategorien und Bogenradien abzudecken und zum anderen, um die jeweiligen Auftrittshäufigkeiten von Vorbeifahrten mit auffälligen Emissionskomponenten besser abschätzen zu können.

Zur Vertiefung der Erkenntnisse wurde 2015 ein weiteres Forschungsprojekt gestartet, bei welchem mehr als 20000 Zugfahrten an zwei Bögen einer Strecke erfasst wurden. Unter anderem wird darin der Einfluss der klimatischen Bedingungen im Jahresverlauf, der Fahrzeugeigenschaften und einer Schienenkopfkonditionierung näher untersucht.

Literatur

- [1] Fachnormenausschuss 138 Akustik: ONR 305011 - Berechnung der Schallimmission durch Schienenverkehr - Zugverkehr, Verschub- und Umschlagbetrieb, 2004
- [2] European Commission: Common Noise Assessment Methods in Europe (CNOSSOS-EU). Joint Research Center, Institute for Health and Consumer Protection, 2012, ISBN 978-92-79-25281-5, ISSN 1831-9424
- [3] 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
- [4] Glocker, C., Spinola, C.: Kurvenkreischen: Messung und numerische Analyse. ZEVrail, Glasers Annalen, Nr. 132, S. 436-446, Oktober 2008
- [5] Tickell, C.E. Downing, P. Jacobsen C.J.: Rail Wheel Squeal - Some Causes and a Case Study of Freight-Car Wheel Squeal Reduction. in Proceedings of ACOUSTICS 2004, Gold Coast, Australia, November 2004, S. 239-244
- [6] Fachnormenausschuss 138 Akustik: ÖNORM S5026 - Messung der Schallemission von Schienenfahrzeugen - Längenbezogener Schallleistungspegel, 1996
- [7] Maly, T., Biebl, F., Dinobobl, G.: Schallemissionen in Gleisbögen - Automatisierte Erkennung auffälliger Komponenten und Analyse von Einflüssen. in: "Bahnakustik - Infrastruktur, Fahrzeuge, Betrieb - Fachtagung 2016", (2016)
- [8] Deutsche Bundesbahn: Richtlinie zur Berechnung der Schallimmissionen von Schienenwegen, Schall 03, Ausgabe 1990
- [9] Vorläufige Berechnungsmethode für den Umgebungslärm an Schienenwegen VBUSch, 2006