



PROGNOSE DER SCHALLEMISSION VON ZÜGEN IN DER BOGENFAHRT

Um die zunehmende Lärmsensitivität der Bevölkerung zu berücksichtigen, werden Grenzwerte in Gesetzen und Verordnungen immer strenger. Zur Verhinderung, dass Lärm ein limitierender Faktor im Eisenbahnbetrieb wird, wird in hohem Ausmaß in Lärmschutzmaßnahmen investiert, die Bau- und Erhaltungskosten erhöhen. Zur adäquaten Planung dieser besteht ein Bedarf an umfassenden Prognosemodellen. Trotz der Entwicklung Solcher in der Vergangenheit, wird in diesen die Emission in der Bogenfahrt nicht ausreichend behandelt. Die Berücksichtigung erfolgt – wenn überhaupt – durch einen einzelnen additiven Zuschlag zur Gesamtemission.

Die gegenständliche Arbeit beschäftigt sich mit einer umfassenden Untersuchung von Einflussfaktoren auf die Auftrittswahrscheinlichkeit, den Spitzenwert und die relative Auftrittszeit von drei unterschiedenen hochfrequenten Kurvengeräuschen – Kurvenkreischen, Kurvenquietschen und hochfrequentes Kurvenquietschen. Während der Anregungsmechanismus des Ersteren Spurkranzkontakt an der Fahrkante der Schienen ist (Geräusch mit hohen Fundamentalfrequenzen und breitbandigem Charakter mit einem Erkennungsbereich in der Auswertung zwischen 8000 Hz und 12500 Hz), wird das Zweitere durch laterale Haft-Gleit-Bewegungen des Rades an der Fahrfläche der Schiene induziert (tonales Geräusch mit niedrigeren Fundamentalfrequenzen mit einem Erkennungsbereich in der Auswertung zwischen 800 Hz und 6300 Hz). Die Ursache des dritten Geräusches – hochfrequentes Kurvenquietschen – ist nicht restlos erforscht. Es handelt sich um ein tonales, hochfrequentes Geräusch (zwischen 8000 Hz und 12500 Hz), welches sich im Zeitverhalten wesentlich von Kurvenkreischen unterscheidet. Zusätzlich werden Einflüsse auf die allgemeine Schallemission in der Bogenfahrt erforscht.

Die Untersuchung umfasst empirische und statistische Auswertungen, welche auf stationären Schallmessungen (standardisierte Distanz der ISO 3095:2013) von fünf verschiedenen Messquerschnitten im österreichischen Vollbahnnetz mit Bogenradien zwischen 226 m und 440 m und zulässigen Geschwindigkeiten zwischen 60 kmh^{-1} und 90 kmh^{-1} basieren. Nach der Datenfilterung verbleiben insgesamt 29097 Zugsvorbeifahrten in der Auswertung. Ergänzend wurden Umgebungsbedingungen (mobile Wetterstation neben dem Messquerschnitt), Schienentemperatur, Zuggeschwindigkeit und Achsmuster zur

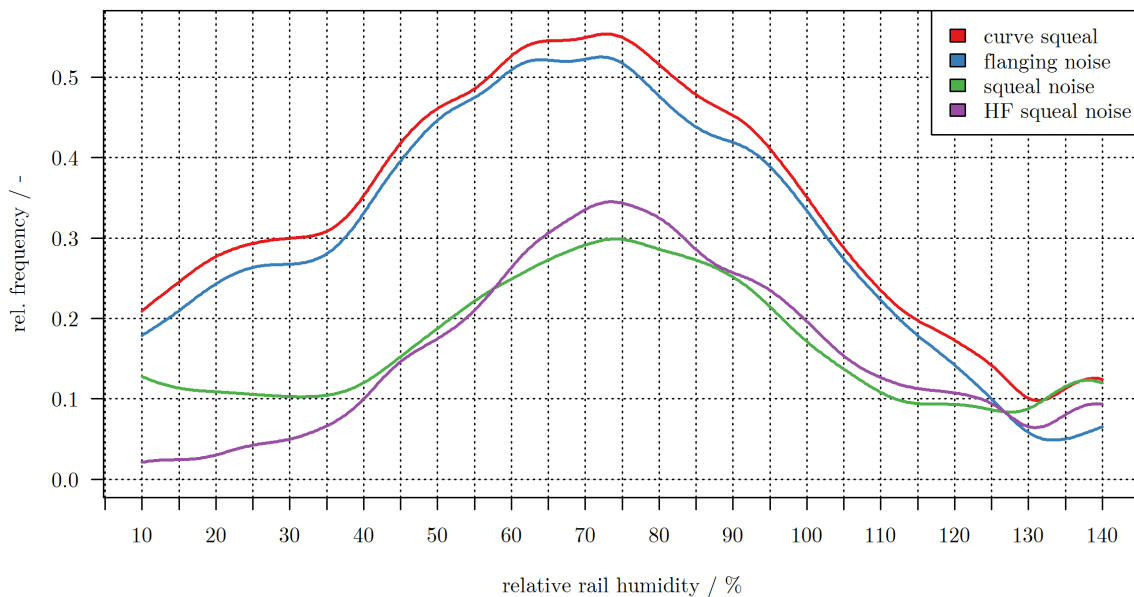


Abbildung 1: Zusammenhang zwischen relativer Luftfeuchte der Schiene und der generellen Auftrittshäufigkeit von hochfrequenten Kurvengeräuschen („curve squeal“, rot), sowie Kurvenkreischen („flanging noise“, blau), Kurvenquietschen („squeal noise“, grün) und hochfrequentem Kurvenquietschen („HF squeal noise“, lila)

automatischen Zugtypidentifizierung aufgezeichnet. In jedem Messquerschnitt wurde mindestens einmal während der Messkampagne die Schienenrauheit und die Gleisabklingrate gemessen. Aus den gesammelten Messdaten, berechneten Werten, Infrastruktur- und Fahrzeugkennwerten wurden insgesamt 190 Einflussparameter gebildet. Ein automatisierter Algorithmus wertet aus Terzpegel-Zeitverläufen das Auftreten, sowie die Auftrittszeit und den Spitzenpegel von Kurvenkreischen, Kurvenquietschen und hochfrequentem Kurvenquietschen pro Zugvorbeifahrt aus. Die Untersuchung der Schallemission erfolgt mit dem energieäquivalenten Dauerschallpegel – gebildet aus dem energetischen Mittelwert aller Zeitinkremente zwischen Puffer und Puffer und der Summe aus allen Terzbändern zwischen 50 Hz und 10000 Hz. Auf eine A-Bewertung wurde in der Untersuchung bewusst verzichtet.

Im ersten Schritt werden die Haupteinflussparameter mittels einerseits empirischer und univariater statistischer Methoden und andererseits mit multivariaten statistischen Modellen extrahiert. Tendenzen hinsichtlich Auftrittshäufigkeit zeigen einen ausgeprägten Einfluss der relativen Luftfeuchte der Schiene mit einem Maximum zwischen 72 % und 75 % und einem abnehmenden Verlauf der Auftrittshäufigkeit in beide Richtungen (siehe Abbildung 1).

Zusätzlich zeigt sich ein partiell starker Einfluss einzelner Zugstypen, eine positive Korrelation mit dem Radialstellungsindex (RSI) und der freien Seitenbeschleunigung, sowie eine stark verringerte Auftrittshäufigkeit in Zusammenhang mit Regen, Tau und Frost. Trotz der unterschiedlichen Anregungsmechanismen der drei unterschiedenen Kurvengeräusche,

zeigen sich dieselben Haupteinflussfaktoren auf die Auftrittshäufigkeiten. Die Untersuchung der Haupteinflussparameter auf die generelle Schallemissionen in der Bogenfahrt konzentriert sich hauptsächlich auf Zugsvorbeifahrten ohne das Auftreten von hochfrequenten Kurvengeräuschen. Neben den Bestätigungen von bereits aus der Literatur bekannten Einflussfaktoren – Gleisabklingrate, Schienenrauheit, Schwellenmaterial, Zugtyp und Geschwindigkeit – wurden erhöhte Emissionen bei Tau- und Frostbedingungen evaluiert. Zusätzlich wurde eine negative Korrelation zu Temperatur und absoluter Luftfeuchte und eine Positive zu relativer Luftfeuchte identifiziert.

Aufbauend auf den extrahierten Haupteinflussparametern werden im nächsten Schritt Klassifizierungsmodelle für die Auftrittsvorhersage von hochfrequenten Kurvengeräuschen entwickelt. Der Fokus liegt dabei auf allgemeiner Praxisanwendbarkeit (möglichst wenig Einflussparameter). Zur Einschätzung der Vorhersagequalität auf neuen Datensätzen werden alle Modellbildungen mit der Methodik durchgeführt, dass das Modelltraining auf Datenpunkten von zwei Messquerschnitten stattfindet und, dass die Performance des Modells auf Datenpunkten der verbleibenden Drei validiert wird. Somit wird das Modell auf Datensätze mit abweichenden Streckeneigenschaften, Zugmix und klimatischen Bedingungen angewandt. Auf diesem Validierungsset wird eine Erkennungsrate von hochfrequenten Kurvengeräuschen von 68 % bis 84 % in Verbindung mit einer allgemeinen Klassifizierungsgenauigkeit von 55 % bis 68 % erreicht.

Das finale Endergebnis stellt ein Regressionsmodell zur Vorhersage der Schallemission in der Bogenfahrt im standardisierten Messpunkt der ISO 3095:2013 dar. Aufgrund der wesentlich verbesserten Prognosegenauigkeit werden kategoriale Variablen, die das Auftreten von jeweils einem Typ hochfrequenter Kurvengeräusche beinhalten, in das Modell inkludiert. Somit ist die Anwendung der entwickelten Klassifizierungsmodelle vor der Schallemissionsprognose durchzuführen. Die Anwendung des Regressionsmodells mit inkludiertem prognostiziertem Auftritt von hochfrequenten Kurvengeräuschen auf das Validierungsset resultiert in Kennwerten von 4 dB RMSE und 57 % R^2 . Der Vergleich zwischen energetischen Mittelwerten gemessener und prognostizierter Emissionswerte in den einzelnen Validierungsquerschnitten über die gesamte Messdauer liefert Abweichungen zwischen -1.1 dB und -0.5 dB. Die Medianwerte erreichen Abweichungen zwischen -0.2 dB und 1.4 dB.

Aufbauend auf diesem vielversprechenden Ergebnis wird zur weiteren Validierung der generellen Anwendbarkeit des Modells und zur Weiterentwicklung die Anwendung auf weitere Datensätze empfohlen. Die Modelle sind für Forschungszwecke unter <https://github.com/M-Ostermann/curve-noise-prediction> frei verfügbar.