Vibroakustische Erfassung des Weichenzustandes von Straßenbahnen

Andreas Fuchs[1], Emanuel Manhart[1], Karoline Alten[1]

[1] *AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Center for Low-Emission Transport, Transport Infrastructure Technologies, 1210 Wien, Email: andreas.fuchs@ait.ac.at*

Einleitung

Der oberirdische, schienengebundene Verkehr stellt im innerstädtischen Bereich eine wesentliche Lärmquelle dar, die in Form von Direktschall oder über Gebäudeteile transmittierten Sekundärschall eine Belästigung für Anrainer:innen sein kann. Im Hinblick darauf wurde auf dem in Wien verkehrenden Gleismesswagen (Hochflurfahrzeug Typ E1) über die letzten vier Jahre ein akustisches Monitoring-System aufgebaut [1], [2], mittels dessen der Schienenzustand des 430 km langen Straßenbahnnetzes überwacht wird. Dabei liegt der Schwerpunkt auf der Bewertung der Schallemissionen von Gleisen geringer Krümmung, dem Auftreten von hochfrequenten Kurvenquietschen sowie der Bildung von Riffeln entlang der Schiene. Dabei werden für die Detektion von Riffeln auch die Beschleunigungssensoren auf den Radlagern des Gleismesswagens verwendet [3].

Die mehr als 1100 Straßenbahnweichen in Wien [4] werden üblicherweise durch geschultes Personal halbjährlich inspiziert. Die Beurteilung erfolgt entsprechend den Vorgaben des jeweiligen Netzbetreibers und ist weder national noch international einheitlich. Im Rahmen des Projekts STRAWE wurde die vibroakustische Beurteilung des Gleiszustandes auf Weichen erweitert, wobei hier als Fahrzeuge neben dem Gleismesswagen auch mit kostengünstiger Sensorik instrumentierte Regelfahrzeuge in moderner Niederflurbauweise betrachtet wurden. Dies soll die Möglichkeiten einer Weichenverschleißbeurteilung im Rahmen einer regelmäßigen, automatisierten und netzweiten Erfassung zur Unterstützung des Beschwerde- und Erhaltungsmanagements aufzeigen, wobei auch das Potential von nachträglich mit Sensorik instrumentierten Regelfahrzeugen untersucht wird.

Instrumentierung

Der Gleismesswagen ist unter anderem mit folgender analoger Sensorik am nicht-angetriebenen mittleren Drehgestell ausgestattet:

- 4 triaxiale MEMS Beschleunigungssensoren an den vier Achslagern,
- $^1/_2''$ Messmikrofon in der Wagenmitte ca. 50 cm vor dem Drehgestell.

Die Verortung des Gleismesswagens findet über die Zuordnung der Daten einer inertiale Messeinheit im Wagenkasten und eines Odometers auf den Netzgraphen statt [5].

Für die Untersuchungen im Rahmen des Projekts STRAWE wurden zwei unterschiedliche Regelfahrzeuge in Niederflurbauweise instrumentiert. Dabei wurden jeweils zwei vibroakustische Sensoren mit digitaler Ansteuerung an der rechten und linken Seite am ersten und letzten Radpaar/Radsatz angebracht:

- triaxialer MEMS-Beschleunigungssensor mit einem Messbereich von 0 bis 40 g sowie 0 bis 1 kHz Frequenzbereich,
- MEMS-Mikrofon mit einem Messbereich bis 130 dB SPL und 28 Hz bis 15 kHz Frequenzbereich.

Zur präzisen Verortung der Regelfahrzeuge wurde ein RTK basierter GNSS-Empfänger verwendet. Zusätzlich wurde die Fahrgeschwindigkeit sowie der zurückgelegte Weg mit einem optischen Geschwindigkeitssensor erfasst.

Messkampagne

Für die Messkampagne wurden die zwei Regelfahrzeuge für spezifische Messfahrten ohne Fahrgäste instrumentiert. In der Auswahl der Sensorik wurde darauf geachtet, dass in weiterer Folge auch der reguläre Betrieb mit Sensorik durchführbar wäre. Mit den beiden Regelfahrzeugen wurden entlang 120 km bis 170 km Messdaten erhoben, wobei in der Auswahl der Strecken auf eine Vielfalt in Hinblick des Weichentyps, des Weichenzustandes sowie des Oberbaus geachtet wurde. Jeder Streckenabschnitt wurde mit den Regelfahrzeugen mindestens zweimal befahren. Zusätzlich wurden die Befahrungen des Gleismesswagens an den entsprechenden Streckenabschnitten in zeitlicher Nähe zu den Messungen der instrumentierten Regelfahrzeugen betrachtet.

Datenaufbereitung

Eine Straßenbahnweiche besteht im Allgemeinen aus einer die Fahrtrichtung bestimmenden Weichenzunge sowie einem Herzstück, bei dem sich zwei Schienen kreuzen. Dieses ist bei den Wiener Linien zumeist als Flachrille ausgeführt und wird als Blockherz bezeichnet. Durch die Flachrille wird das Blockherz am Spurkranz ohne seitlicher Führung überfahren. Somit ist vor allem die Überfahrt des Blockherzens ein vibroakustisch hervortretendes Ereignis, wobei dieses als dynamischer Vorgang naturgemäß eine zeitliche Ausdehnung im Signal aufweist. Die Beurteilung des Weichenzustandes soll jedoch anhand diskreter vibroakustischer Merkmale durchgeführt werden. Daher wurden Kreuzungsgruppen gebildet, welche die zeitliche Länge der Weichenüberfahrt im Signal definieren. Die Definition einer Kreuzungsgruppe (siehe auch Abbildung 1) ist dabei

- max. Abstand zwischen 2 Blockherzen <10 m,
- jeweils 7,5 m am Rand ergänzt,
- abhängig von der Befahrungsrichtung.

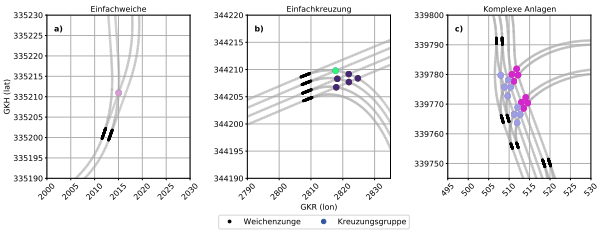

Abbildung 1: Blockherzen (farbige Punkte) und Weichenzungen von Weichenanlagen. In einer Kreuzungsgruppe zusammengefasste Blockherzen sind in einer Farbe markiert.

Innerhalb jeder Kreuzungsgruppe wurden unter anderem folgende Merkmale zur Bewertung berechnet:

- Mittelwert, Median, P95, Maximum, Kurtosis und Standardabweichung der drei Kanäle des Beschleunigungssensors,
- Mittelwert, Median, P95 und Maximum des L_{AF},
- Mittelwert und Maximum des L_{AS},
- Auftreten von Kurvenquietschen,
- Anzahl an sowie Summe der Signalspitzen,
- mittlere Fahrgeschwindigkeit,
- Anzahl an Blockherzen,
- Länge der Kreuzungsgruppe in Meter,
- mittlere Krümmung.

Für die pegelbasierten Merkmale konnte eine Korrelation mit der Fahrgeschwindigkeit beobachtet werden. Zur besseren Unterscheidbarkeit wurden diese zusätzlich als geschwindigkeitskorrigierte Merkmale betrachtet, wobei die Differenz des aktuellen erhobenen Wertes zu dem anhand eines linearen Modells des Merkmals zur logarithmischen Fahrgeschwindigkeit vorhergesagten Wertes angegeben wird.

Als zu erfassende Zielgröße wurde an jeder befahrenen Kreuzungsgruppe, sofern verfügbar, eine Zustandsnote vergeben. Diese Zustandsnote wurde aus vom Infrastrukturbetreiber zur Verfügung gestellten Inspektionsprotokollen anhand eines erstellten Schadenkatalogs abgeleitet. Zustandsnoten wurden dabei von A bis D vergeben, wobei A einen tadellosen Zustand bezeichnet. Kreuzungsgruppen wurde eine Zustandsnote zugewiesen, wenn die optische Bewertung des Infrastrukturbetreibers maximal 18 Monate zurücklag. Die hier beispielhaft gezeigten Analysen beziehen sich auf einen Datensatz aus 293 Einzelüberfahrten über Einfachweichen (ein Blockherz in der Überfahrt), da bei der überwiegenden Anzahl an Weichenüberfahrten nur ein Blockherz in der Kreuzungsgruppe vorhanden war.

Ergebnisse

Abbildung 2 zeigt beispielhaft den geschwindigkeitskorrigierten, maximalen Schalldruckpegel während der Überfahrt einer Kreuzungsgruppe im Vergleich zur Zustandsbewertung gemäß den Inspektionsprotokollen für den Gleismesswagen sowie die zwei Regelfahrzeuge. Dabei sind einerseits Boxplots eingetragen mit dem Interquartilsabstand der Kennwerte, dem Vertrauensintervall des Medians sowie durch Punkte markierte Ausreißer, andererseits sind in blasser Farbe die zugrundeliegenden Kennwerte eingetragen. Es konnte ein statistisch signifikanter Unterschied des Medianwertes zwischen den vier Zustandsbewertungsklassen gefunden werden, wobei vor allem die Randklassen A und D sich deutlich von der benachbarten Klasse unterscheiden. Der Unterschied zwischen den Klassen B und C ist geringer, wobei eine schwächere Trennschärfe in der visuellen Beurteilung der Zustandsnoten nicht ausgeschlossen werden kann. Weichen der Klasse A sind vom Median um bis zu 8 dB leiser als eine durchschnittliche Weichenüberfahrt, während einzelne Pegelspitzen der Klasse D bis zu 30 dB lauter als eine durchschnittliche Weichenüberfahrt sein können. Im Vergleich mit den Regelfahrzeugen ist in den Mikrofondaten des Gleismesswagens eine geringere Unterscheidung zwischen den Zustandsklassen zu beobachten. Hier sei auf die deutlich andere Mikrofonierung des Gleismesswagens verwiesen, da beim Gleismesswagen als Hochflurfahrzeug ein Mikrofon zentral vor dem zweiten Drehgestell in einem entsprechenden Abstand zu den Rädern montiert ist. Bei den Regelfahrzeugen wurden die kompakteren MEMS-Mikrofone beidseitig in möglichst nächster Nähe zum Rad-Schiene Kontakt positioniert. Somit ist in den Mikrofonsignalen der Regelfahrzeuge der jeweilige Rad-Schiene-Kontakt dominant, während das eine Mikrofon des Gleismesswagens den beidseitigen Rad-Schiene-Kontakt sowie andere Störgeräusche aufzeichnet.

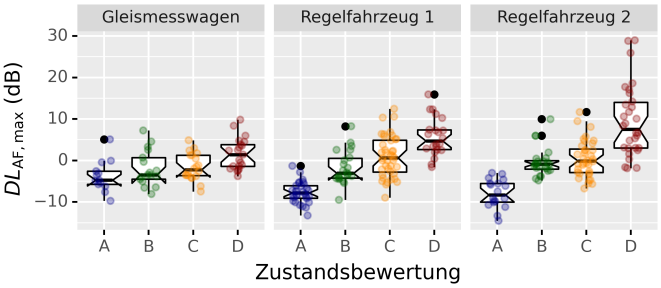

Abbildung 2: Vergleich des geschwindigkeitskorrigierten maximalem Schalldruckpegels und Weichenzustands gemäß Inspektionsprotokoll.

Abbildung 3 zeigt beispielhaft den geschwindigkeitskorrigierten, maximalen Beschleunigungspegel in z-Richtung während der Überfahrt einer Kreuzungsgruppe im Vergleich zur Zustandsbewertung gemäß den Inspektionsprotokollen für die zwei Regelfahrzeuge sowie den Gleismesswagen. Für Weichen der Kategorie A konnte bei den beiden Regelfahrzeugen die meiste Zeit ein um ca. 5 dB niedrigerer Pegel beobachtet werden. Die Bewertungsklassen B und C sind hingegen ebenfalls nicht signifikant unterscheidbar. Für das Regelfahrzeug 1 weist die Klasse D tendenziell höhere Werte auf, während für das Regelfahrzeug 2 die Werte der Klasse C und D ähnlicher sind. Abgesehen von einer Reihe an Ausreißern kann der Gleismesswagen nur die Kategorie A von den restlichen

Klassen rein anhand des Beschleunigungssignals unterscheiden.

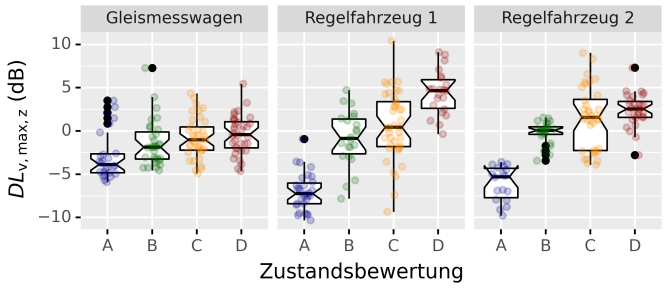

Abbildung 3: Vergleich des geschwindigkeitskorrigierten maximalem Beschleunigungspegels in z-Richtung und Weichenzustands gemäß Inspektionsprotokoll.

Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Publikation werden nur Analysen anhand sehr einfacher akustischer Merkmale gezeigt, wobei die vibroakustische Erfassung einer dynamischen Überfahrt im Gegensatz zu den Einzelbewertungen der einzelnen Blockherzen der visuellen Inspektion steht. Dennoch konnte anhand einer sehr einfach definierten Kenngröße (geschwindigkeitskorrigierter, maximaler Schalldruckpegel eines in der Nähe des Rad-Schiene-Kontaktes befindlichen Mikrofons) das Potential einer vibroakustischen Erfassung des Weichenzustandes gezeigt werden. Dabei zeigt sich auch die Möglichkeit einer nachträglichen Instrumentierung eines modernen Niederflurfahrzeugs, wobei die untersuchten Regelfahrzeuge auch aufgrund moderner und zielgerichteter platzierten Sensorik eine erhöhte Diskriminanz im Vergleich zum Gleismesswagen aufweisen.

Weiterführende Analysen mittels statistischer Modellbildung und Kombination mehrerer Merkmale verbessert die Erkennung und führt zu einer aussichtsreichen Vorhersage der Zustandsnoten rein anhand der vibroakustischen Sensoren. Für ein robustes Training ist der Datensatz jedoch begrenzt geeignet, da vor allem die Kategorie D (schlechter Weichenzustand) und allgemein komplexere Weichenanlagen im aktuellen Datensatz nicht ausreichend vorhanden sind.

Zusammenfassend führen Weichenanlagen in einem schlechten Zustand zu einem deutlich erhöhten Schalldruck- bzw. Beschleunigungspegel, wobei der Spitzenschalldruckpegel während einer Weichenüberfahrt um mehr als 15 dB steigen kann.

Danksagung

Die hier gezeigten Ergebnisse stammen aus den durch die österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG geförderten Projekten STRAWE und ASSESS des Programms Mobilität der Zukunft.

Literatur

[1] Wehr, R.; Fuchs, A.; Wehr, W.: Akustische Zustandsbewertung von Gleisen im Straßenbahnnetz. DAGA 2017, Paper-Nr. 178.

[2] Mittermayr, P., Kopetzky, P., Barkow, B., Alten, K., Fuchs, A.: Beurteilung der Rillenschienenweiche durch optische und vibro-akustische Messung. ETR Austria 70(12), 79–83, 2021.

[3] Alten, K.; Fuchs, A.: Detecting and classifying rail corrugation based on axle bearing vibration. Poster: ICASSP 2019 – 2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Sig-nal Processing (ICASSP), Paper-Nr. 10.1109/ICASSP.2019.8683317.

[4] Wiener Linien, Betriebsangaben `https://www.wienerlinien.at/media/files/2020/wl_betriebsangaben_2019_deutsch_358274.pdf`

[5] Ömer, B.: CUBAL – Krümmungsbasierte Verortung von Gleismessdaten in Urbanen Schienennetzen, Prozessorientiertes zustandsbasiertes Instandhaltungsmanagement des Rad/Schiene-Systems. ÖVG Spezial 72, pp. 40-43, 2006.