Allianz Fahrweg Normalspur / Genfergasse 11, CH-3001 Bern / info@allianz-fahrweg.ch / allianz-fahrweg.ch

Erschütterungen - Quantifizierung der Beiträge der Fahrzeuge und der Infrastruktur - Erste Untersuchungen

Laurence Conreaux



Februar 2024

Zusammenfassung

Schienenfahrzeuge verursachen Schwingungen, welche Gebäude in der Nähe von Bahnstrecken anregen und so deren Bewohner stören können. Sie werden als Erschütterungen und abgestrahlter Körperschall (kurz EKS) bezeichnet. Sie entstehen am Rad-Schiene-Kontaktpunkt und breiten sich von dort durch das Gleisbett und den Untergrund in die Gebäude aus. Für eine Reduktion von EKS am Immissionsort könnte sowohl am Fahrzeug als auch infrastrukturseitig eingegriffen werden, und dies entweder in der Konzeptions-/Projektierungsphase oder während der Instandhaltung.

Die Allianz Fahrweg Normalspur hat ein Projekt beauftragt, welches die Unterschiede in den Erschütterungsemissionen einerseits beim Rollmaterial und anderseits bei der Infrastruktur untersuchen soll. Die Erkenntnisse sollen insbesondere beim Fahrbahnlabor mit vorhandenen Messsensoren gewonnen werden. Das bildet eine erste Grundlage für weitere Untersuchungen, u.a. mit dem generellen Ziel zukünftig entscheiden zu können, wo der Hebel aus Sicht des Gesamtsystems sinnvoll angesetzt werden soll. Lieferobjekt dieses Projekts bildet der vorliegende Bericht.

Für diese Arbeit wurden Daten aus verschiedenen Datenquellen ausgewertet. Die Hauptquelle ist das Fahrbahnlabor in Sempach, die die Erschütterungen aller durchfahrenden Zügen an zwei Messpunkten mit zwei unterschiedlichen Oberbauvarianten (Betonschwellen mit und ohne steife Schwellenbesohlung) seit Anfang 2023 erfasst. Diesen Messungen wurden Daten der Radlast-Checkpoints und aus dem Radunterhalt gegenübergestellt.

Der Vergleich der Rollmaterialtypen des Personenverkehrs bei gleicher Fahrgeschwindigkeit zeigt, dass die Medianwerte der gemessenen mittleren Erschütterungspegel sich bis ca. 5 dB unterscheiden. Im Frequenzspektrum sind die Unterschiede zwischen den Rollmaterialtypen unterhalb 12 Hz und oberhalb 63 Hz markanter. Bei kleineren Geschwindigkeiten sind die Unterschiede zwischen den Rollmaterialtypen auch kleiner. Der Vergleich der Güterzüge mit den Personenzügen erfolgt bei Fahrgeschwindigkeiten von ca. 80 km/h, um Güterzugkompositionen (und nicht hauptsächlich schnell fahrende Lokzüge) zu berücksichtigen: die Güterzüge verursachen im Durchschnitt etwa 3 bis 4 dB mehr Erschütterungen als Personenzüge.

Der Vergleich beider Messpunkte beim Fahrbahnlabor ergibt für den Abschnitt mit steifen Schwellenbesohlung bedeutend tiefere Werte, vor allem für den Sensor in vertikaler Richtung, der ein auffälliges Verhalten aufweist. Im Spektrum zeigt sich dies vor allem ausserhalb des Frequenzbereichs 25 – 63 Hz. Die Analyse der Zeitentwicklung der Messwerte beider Messpunkte über 10 Monate zeigt systematische Zu- und Abnahmen. Es wird vermutet, dass diese auf Änderungen in den Witterungsbedingungen zurückzuführen sind, aus der Stopfung eines benachbarten Gleisabschnitts resultieren oder messtechnischer Natur sind, jedoch ohne dies abschliessend erklären zu können.

Um den Einfluss dieser Variabilität zu minimieren wurden für die Untersuchung der Streuung der Messungen von Zugsindividuen (d.h. Zügen mit identischen Fahrzeugnummern Zeitspannen von 1 bis 3 Wochen betrachtet. Typischerweise beträgt die Streuung eines Zugsindividuums nur 1-2 dB innerhalb zwei Wochen innerhalb einer Geschwindigkeitsklasse, was gleichzeitig für eine gute Reproduzierbarkeit der Messungen bei kurzen Zeitintervallen spricht.

Anhand von Messungen zur Charakterisierung der Radunrundheiten für fehlerhafte Räder, die anlässlich von Radreprofilierungen stattfinden, wurden deutliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Rollmaterialtypen aufgezeigt, sowohl beim Maximalwert (Radialschlag) als auch für die Radordnungen (Wellenlänge) und gleichzeitig auch grosse Unterschiede in der zum Zeitpunkt der Reprofilierung erreichten Laufleistung. Dies ist z.T. auf unterschiedliche Strategien bei der Radinstandhaltung der Flotten zurückzuführen.

Bei der Gegenüberstellung von Erschütterungsamplituden gemessen in Sempach (Mittelwert und max-RMS-Werte ganzer Züge) mit den Unrundheitsamplituden (verschiedene Indikatoren der effektiv reprofilierten Räder) wird ein ziemlich linearer Zusammenhang beobachtet, jedoch mit anderen Gradienten für die verschiedenen Flottentypen. Somit führen die gleichen Radunrundheiten bei diversen Flotten zu unterschiedlich hohen Erschütterungen und die Erschütterungen steigen unterschiedlich schnell mit wachsenden Unrundheiten. Eine weitere Analyse im Frequenzbereich für Sempach hat gezeigt, dass der Einfluss des Radzustands dort erst im höheren Frequenzbereich ab ca. 63 - 80 Hz sichtbar ist.

Frequenzanalysen mittels Schmalbandspektren an vier verschiedenen Standorten haben dargelegt, dass keine expliziten Amplitudenmaxima bei den Radordnungen oder dem Schwellenfachabstand zu erkennen sind, sondern die charakteristischen Abstände zwischen den Achsen (Wagenlänge, Drehgestell- und Achsabstände) und ihre Harmonischen (1:2, 1:3, 1:4 etc. bzgl. Wellenlänge) deutlich zu erkennen sind. Diese Feststellung gilt für Erschütterungen auch bei Messpunkten mit einer grösseren Entfernung zum Gleis bis 20m und ebenfalls für die Beschleunigungen an der Schiene, Schwelle und im Schotter, die beim Fahrbahnlabor parallel erfasst werden.

Erschütterungsmessungen am Fahrbahnlabor wurden ebenfalls Messdaten der Radlast-Checkpoints (RLC) gegenübergestellt. Es konnte gezeigt werden, dass die gemessenen Erschütterungen eine lineare Korrelation mit den dynamischen Radaufstandskräften der RLC aufweisen. Analog der Gegenüberstellung mit den Radunrundheiten sind deutliche Differenzen beim Gradienten der Regression und gleichzeitig in den erreichten Kräften zwischen den Flottentypen zu beobachten.

Neben den Fahrzeugeinflüssen wurden auch die beiden Messabschnitte des Fahrbahnlabors untereinander verglichen: diese unterscheiden sich von den Oberbaueigenschaften nur am Vorhandensein einer steifen Schwellenbesohlung. Die ermittelte Dämmwirkung zeigt eine fast durchgehende positive Wirkung der steifen Schwellenbesohlung über den ganzen Frequenzbereich und eine starke Verbesserung im tiefen Frequenzbereich von 6 - 20 Hz. Diese Feststellung ist ausgeprägter, wenn man nur die Messsignale in vertikaler Richtung betrachtet, beim Mittelwert der drei-Raumrichtungen ist diese etwas abgeschwächt.

Parallel zu Erschütterungen wurden auch Achslagerbeschleunigungssignale (ABA) zwischen den beiden Messabschnitten verglichen und anhand diesen eine Minderung der Anregung im Terzband ermittelt. Die Beträge der Dämmwirkung EKS und der Minderung der ABA lassen sich nicht direkt gleichsetzen. Für die drei-dimensionalen EKS-Werte lassen sich jedoch Ähnlichkeiten mit ABA im spektralen Verlauf erkennen, für das rein vertikale Signal hingegen nicht. Dies zeigt ein Potenzial für die Korrelation von ABA- und EKS-Signalen, die zukünftig an weiteren Standorden untersucht werden sollte.

Am Ende des Berichts werden Vorschläge für das weitere Vorgehen in diesem Projekt und basierend auf den vorliegenden Ergebnissen Anregungen für weiterführende Untersuchungen unterbreitet.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung **3**

Abkürzungsverzeichnis **5**

1. Einleitung **9**

2. Verwendete Datenquellen **11**
2.1. EKS-Messorte . . . 11
2.1.1. Fahrbahnlabor . . . 11
2.1.2. SBB-Interne Testkampagne in November/Dezember 2023 . . . 14
2.1.3. Brunnen . . . 16
2.1.4. Dagmersellen . . . 16
2.1.5. Pully . . . 17
2.2. Radlast-Checkpoints . . . 18
2.3. Direkte Messung von Radunrundheiten . . . 18
2.4. Achslagerbeschleunigungen . . . 21

3. Vorbemerkungen zu den Begriffen, Rollmaterialtypen, Analysen, Darstellungen und Interpretationen **22**
3.1. Begriffserklärungen . . . 22
3.2. Rollmaterialtypen . . . 24
3.3. Darstellung der Ergebnisse im Fliesstext . . . 25
3.4. Grafiktypen und Darstellungen . . . 25
3.4.1. Boxplots . . . 25
3.4.2. Spektren . . . 26
3.5. Weitere Vorbemerkungen . . . 29
3.5.1. Messungen im Freifeld vs. im Gebäude . . . 29
3.5.2. Berücksichtigung von Reprofilierungsterminen . . . 29

4. Vergleich von Rollmaterialtypen und Variation innerhalb von Rollmaterialtypen **30**
4.1. Fahrbahnlabor . . . 30
4.1.1. Beschreibung des Datensatzes . . . 30
4.1.2. Rollmaterialvergleich - ohne Berücksichtigung der Fahrgeschwindigkeit . . . 32
4.1.3. Rollmaterialtypen unter Berücksichtigung der Fahrgeschwindigkeiten . . . 33
4.1.4. Einfluss der Fahrgeschwindigkeit . . . 40
4.1.5. Zeitentwicklung der einzelnen Vorbeifahrtspegel . . . 44
4.1.6. Streuung der Zugsindividuen unter Berücksichtigung des Vorbeifahrtzeitpunkts . . . 49
4.1.7. Rollmaterialvergleich - Erschütterungen in Terzbandspektren . . . 57
4.1.8. Rollmaterialvergleich - Oberbausensoren in Terzbandspektren . . . 63
4.1.9. Einfluss des Zeitpunkts / Witterung - Terzbandspektren . . . 66

5. Radunrundheiten - Rollmaterialvergleich **72**
5.1. Unrundheiten als Einzahlwert - „Radialschlag“ . . . 72
5.1.1. Rollmaterialvergleich - Unrundheiten zum Zeitpunkt der Reprofilierung . . . 72
5.1.2. Rollmaterialvergleich - Unrundheiten und Laufleistung zum Zeitpunkt der Reprofilierung . . . 74
5.2. Unrundheiten im Spektrum . . . 76

6. Anregungsmechanismen **79**
6.1. Fahrbahnlabor . . . 80
6.1.1. Einfluss der Fahrgeschwindigkeit im Terzband beim Fahrbahnlabor . . . 80
6.1.2. Schmalbandanalysen beim Fahrbahnlabor . . . 84
6.2. Weitere Standorte . . . 91
6.2.1. Dagmersellen . . . 91
6.2.2. Brunnen . . . 93
6.2.3. Pully . . . 96

7. Einfluss der Vertikalkräfte auf Erschütterungen **103**
7.1. Einfluss der Fahrzeugbeladung . . . 103
7.2. Korrelation mit RLC-Daten . . . 106

8. Einfluss von Radunrundheiten auf die Erschütterungen **115**
8.1. Erschütterungen versus Radialschlag . . . 115
8.2. Terzbandspektren versus Reprofilierungstermine . . . 121

9. Vergleich Oberbau **126**
9.1. Dämmwirkung der steifen Schwellenbesohlung . . . 126
9.2. Vergleich mit Achslagerbeschleunigungen . . . 129

10. Fazit und nächste Schritte **135**

Literatur **140**

A. Vergleich von Rollmaterialtypen und Variation innerhalb von Rollmaterialtypen **151**
A.1. Fahrbahnlabor . . . 151
A.1.1. Rollmaterialvergleich - ohne Berücksichtigung der Fahrgeschwindigkeit . . . 151
A.1.2. Rollmaterialtypen unter Berücksichtigung der Fahrgeschwindigkeiten . . . 151
A.1.3. Einfluss der Fahrgeschwindigkeit . . . 153
A.1.4. Zeitentwicklung der einzelnen Vorbeifahrtspegel . . . 155
A.1.5. Streuung der Zugsindividuen unter Berücksichtigung des Vorbeifahrtzeitpunkts . . . 155
A.1.6. Rollmaterialvergleich - Erschütterungen in Terzbandspektren . . . 159
A.1.7. Rollmaterialvergleich - Oberbausensoren in Terzbandspektren . . . 161

B. Radunrundheiten - Rollmaterialvergleich **165**
B.1. Unrundheiten als Einzahlwert . . . 165
B.1.1. Rollmaterialvergleich - Unrundheiten zum Zeitpunkt der Reprofilierung . . . 165
B.1.2. Rollmaterialvergleich - Unrundheiten und Laufleistung zum Zeitpunkt der Reprofilierung . . . 165
B.2. Unrundheiten im Spektrum . . . 165

C. Anregungsmechanismen **168**

D. Einfluss der Vertikalkräfte auf Erschütterungen **169**
D.1. Einfluss der Fahrzeugbeladung 169
D.2. Korrelation mit RLC-Daten 169

E. Einfluss von Radunrundheiten auf die Erschütterungen **174**

F. Vergleich Oberbau **175**
F.1. Einfügedämmung der steifen Schwellenbeshohlung 175
F.2. Vergleich mit Achslagerbeschleunigungen 177

G. Sensorliste Fahrbahnlabor **179**