

Erschütterungsschutzmassnahmen am Rollmaterial bei SBB-Güterzügen

Dipl. Bauing. ETH / exec. MBA Philipp Huber, PROSE AG Winterthur
Dipl.-Phys. ETH Roger Müller, SBB Bern

Zusammenfassung

Das EU-Projekt RIVAS hat das Ziel, den Erschütterungsschutz bei offenen Strecken einen entscheidenden Schritt weiter zu bringen. Dabei werden auch Massnahmen am Rollmaterial untersucht. Mittels umfangreichen Erschütterungsmessungen von Regelzügen auf dem SBB-Netz wurde der Einfluss des Rollmaterials analysiert. Die Erschütterungsauswertungen wurden mit fahrzeugspezifischen Daten und Unrundheitsmessungen korreliert. Die Analysen zeigen, dass von den Parametern von Schienenfahrzeugen der Radzustand und die unabgefederte Radsatzmasse den grössten Einfluss auf die Erschütterungsemissionen haben. Daraus folgen die Erschütterungsschutzmassnahmen am Rollmaterial mit dem Ziel die Radqualität nachhaltig zu verbessern und die unabgefederte Radsatzmasse zu reduzieren. Diese Massnahmen haben das Potential, Erschütterungen erheblich zu reduzieren und werden weiterverfolgt.

1 RIVAS – Railway Induced Vibration Abatement Solutions

2011 hat die EU im 7. Forschungsrahmenprogramm ein Forschungs- und Entwicklungsprojekt unter dem Namen RIVAS (Railway Induced Vibration Abatement Solutions) gestartet. Das dreijährige Forschungsprojekt hat das Ziel, mit finanzieller Förderung durch die EU (5 Mio. Euro Fördermittel) innovative Massnahmen zu entwickeln, um die negativen Auswirkungen von Erschütterungen aus dem Eisenbahnverkehr auf die Umgebung deutlich zu reduzieren und gleichzeitig die Wettbewerbsfähigkeit der Eisenbahnen in Europa zu wahren. Der Schwerpunkt des Projekts liegt auf Güterverkehr für freie, bestehende Strecken. Neben Massnahmen an der Infrastruktur und im Ausbreitungsweg (Workpackages 3 und 4) werden in den Workpackages 2 und 5 auch Massnahmen am Rollmaterial untersucht. Bei RIVAS wird nicht nur die Symptombekämpfung beim Rollmaterial getestet (Räder abdrehen, auswechseln), sondern es sollen auch Massnahmen für bestehende und neue Fahrzeuge gesucht werden, um bei den Ursachen für hohe Erschütterungen anzusetzen und so prophylaktisch zu wirken. Innerhalb des RIVAS-Projekts ist die SBB, unterstützt von PROSE, der Eisenbahn-Hauptpartner für die Untersuchung der Massnahmen am Rollmaterial. Workpackage 5 (WP5: Massnahmen am Rollmaterial) wird geleitet von Bombardier Transportation. Nach einem State of the Art Report zu Massnahmen am Rollmaterial wurden die wesentlichen Rollmaterialparameter und ihr Einfluss auf die Erschütterungen im Detail untersucht, einerseits mittels numerischen Simulationen, andererseits mit umfangreichen Erschütterungsmessungen in der Schweiz, um statistisch verlässliche Aussagen über eine grosse Bandbreite von Fahrzeugen machen zu können. Vorliegender Beitrag konzentriert sich auf die Resultate der Erschütterungsmessungen in der Schweiz. Weitere Informationen zu RIVAS finden sich im Internet unter www.rivas-project.eu.

2 Überblick Messungen und Analysen

Bei drei Radlast-Checkpoints der SBB wurden über mehrere Tage Erschütterungsmessungen im Freifeld (Distanz 2m und 8m zur Gleisachse) durchgeführt und dabei mehrere tausend Regelzüge registriert. In Kombination mit den detaillierten RLC-Informationen zu den einzelnen Fahrzeugen (Typ, Fahrzeugnummer, Geschwindigkeit, Radlast) ergab sich eine sehr gute und umfangreiche Datengrundlage, um das auf dem SBB-Netz verkehrende Rollmaterial hinsichtlich Erschütterungsemissionen statistisch zu analysieren. Insgesamt wurden ca. 1'000

Drehgestelle von Lokomotiven und Triebzügen, ca. 5'000 Personenwagendrehgestelle und ca. 10'000 Güterwagendrehgestelle bzgl. Erschütterungen statistisch analysiert. Das Ziel dieser Analyse war die Unterschiede bei den Erschütterungen innerhalb und zwischen Fahrzeugkategorien zu quantifizieren und mit Rollmaterialparametern zu korrelieren. Diese Erkenntnisse erlauben dann, die Eigenschaften von erschütterungsarmem Rollmaterial zu identifizieren.

Die Auswertungen der Erschütterungsmessungen zeigen, dass die Unterschiede beträchtlich sind, nicht nur zwischen den mittleren Werten pro Fahrzeugkategorie gibt's Unterschiede, sondern auch die Streuungen sind sehr unterschiedlich, wie Bild 1 für den Messort Thun zeigt.

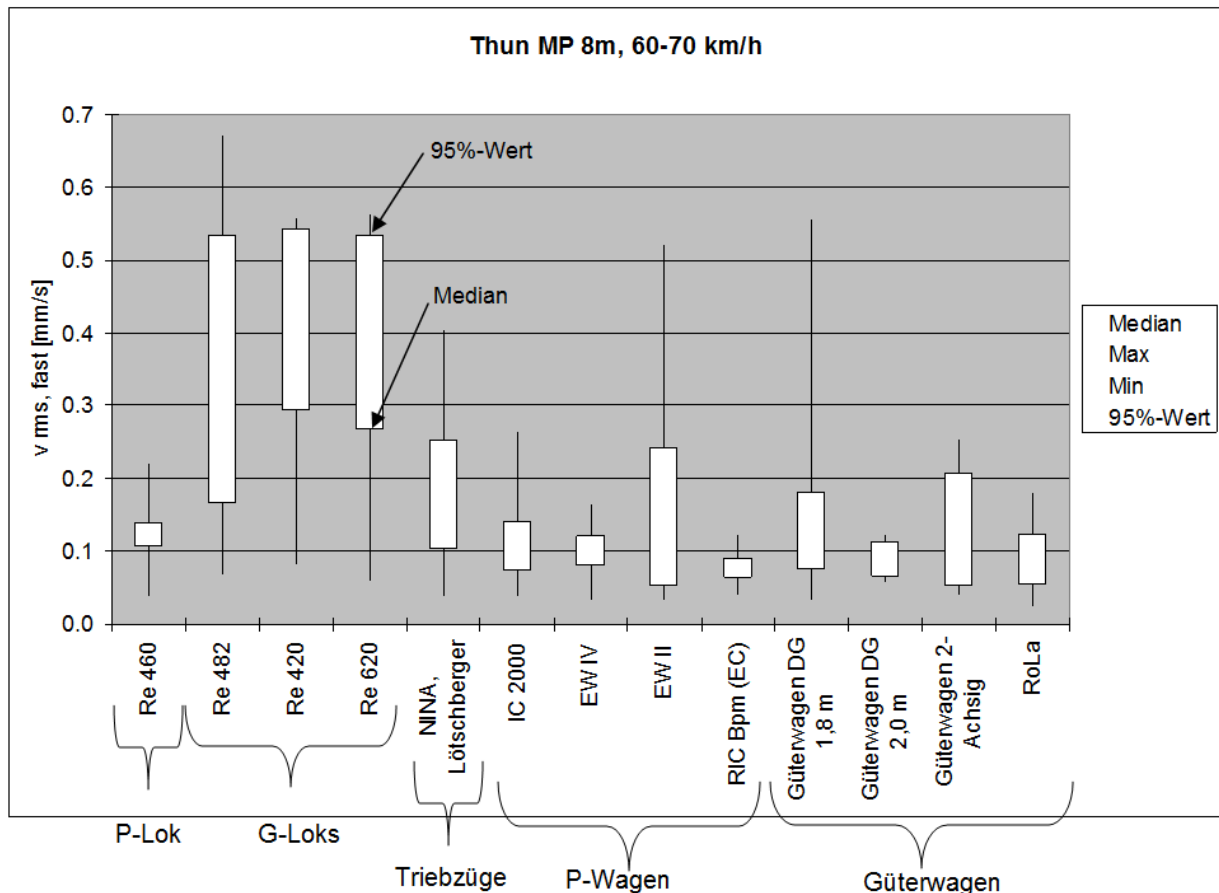


Bild 1, Statistik Erschütterungen v_{rms} in Thun in 8m Distanz zum Gleis

In Thun wurden sowohl Inter-City Züge, Regionalzüge wie auch Güterverkehr (Achse Lötschberg) mit verschiedenen Güter-Lokomotiven/-wagen erfasst. Die Statistik mit Angabe von Minimal-, Maximal-, Median und 95%-Wert in Bild 1 zeigt deutlich, wie unterschiedlich stark die Erschütterungsemissionen verschiedener Fahrzeugkategorien sind, aber auch wie unterschiedlich die Streuung der Werte bei den einzelnen Fahrzeugkategorien sind. Während ein hoher Median-Wert darauf hindeutet, dass ein Fahrzeug generell hohe Erschütterungen verursacht, weist eine hohe Streuung auf unterschiedliche Radzustände hin. Im folgenden Kapitel werden die im Bild 1 auffallenden Güterloks detaillierter diskutiert. Normalerweise fahren Personenfahrzeuge schneller als Güterzüge. In solchen Situation ist der Unterschied in den Erschütterungswerten zwischen Personen- und Güterzügen weniger offensichtlich.

3 Erschütterungen von Güterloks

Die gemessenen Güterzüge in der Schweiz zeigen, dass für die maximalen Erschütterungen vielfach die Güterloks, seltener die Güterwagen, verantwortlich sind. Um die Erschütterungsbelastung wirksam und effizient zu reduzieren, sollten daher primär mögliche

Massnahmen bei Güterloks der älteren (Re420, Re620) wie auch der neueren Generation (Bombardier TRAXX F140, Siemens ES64F4) in Betracht gezogen werden. Die für Erschütterungen wesentlichen Eigenschaften von Güterloks neuerer Bauart (im Vergleich zur SBB Re460, Intercity Lok, ursprünglich auch für Güterverkehr eingesetzt) werden folgend am Beispiel des Typs Bombardier TRAXX F140 besprochen, welcher auf dem schweizerischen Regelspurnetz häufig anzutreffen ist. Als wesentlichen Unterschied zur Re460 hat die TRAXX F140 AC einen Tatzlagerantrieb und grössere Räder mit \varnothing 1250 mm (Re460 hat \varnothing 1100mm) sowie Radscheibenbremsen (Re460 hat schwache, einseitig wirkende Sinter-Klotzbremsen kombiniert mit Permanentmagnet-Schienenbremsen). Zudem hat die Re460 eine passiv gesteuerte radiale Einstellung der Radsätze. Damals wurden Untersuchungen auch für die TRAXX F140 angestellt, eine radiale Einstellung einzuführen. Dies wurde aber aus Gründen der Kosten, des erhöhten Aufwands in der Instandhaltung und der zunehmenden Problematik der europaweiten Zulassung wieder fallengelassen. Zudem kam bei einer maximalen Geschwindigkeit von 140 km/h der vollabgefederte Antrieb (wie bei der BR 146 der DB eingesetzt) aus Kostengründen nicht in Betracht. Die Auswertungen der Erschütterungsmessungen zeigen, dass ältere Güterloks mit Grauguss-Bremsklötzen und bandagierten Speichenrädern wie Re420 und Re620 die stärksten Erschütterungen verursachen. Die Ursache dafür sind Ausbröckelungen in der Lauffläche und Radunrundheiten, die akzentuiert werden durch Kapazitätsengpässe bei der Radinstandhaltung kombiniert mit einer höheren unabgefederten Masse. Bei der RLC-Messstelle Thun konnte ein direkter Vergleich zwischen der Re460 und TRAXX F140 hinsichtlich Erschütterungen gezogen werden. Im Geschwindigkeitsbereich von 60 bis 70 km/h wurden 156 Re460-Drehgestelle und 72 Güterlok-Drehgestelle der neueren Generation im Frequenzbereich statistisch ausgewertet (Bild 2).

Terzspektren Thun 60-70km/h, MP 8m/1

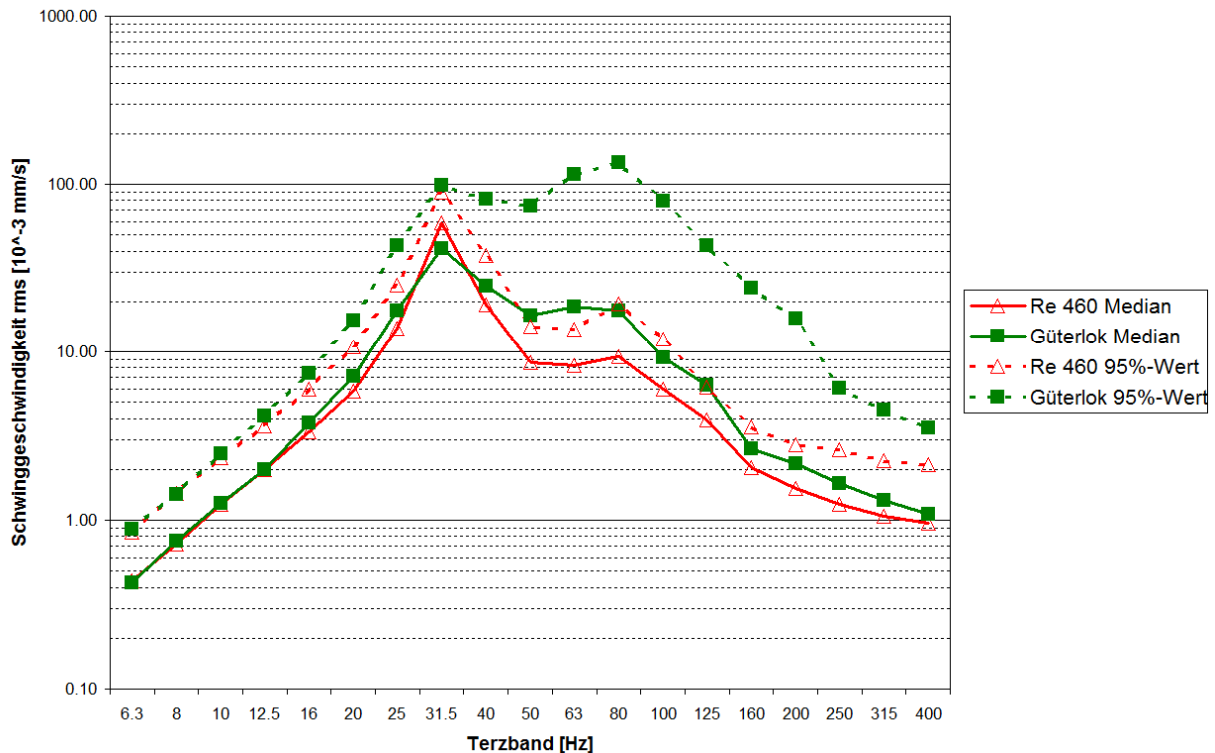


Bild 2, Terzbandspektren der SBB Re460 und Güterlok TRAXX F140 in Thun 8m Distanz zum Gleis

Vergleicht man die Mediankurven, so sind die Unterschiede zwischen Güterlok und Re460 insbesondere in den Terzbändern 50 - 80 Hz deutlich, ansonsten ist der Verlauf ähnlich, trotz sehr unterschiedlicher Bauart der Drehgestelle. Die unterschiedliche Lagerungsart des Antriebes bzw. die grossen Unterschiede in der unabgefederten Masse sind möglicherweise

die Hauptursache für diese Differenz bei den Median-Werten. Ungleich grösser ist der Unterschied bei den 95%-Werten. Im 63 Hz-Terzband liegt der Unterschied zwischen Re460 und Güterlok annähernd bei Faktor 10. Als Ursache für die hohe Streuung von Erschütterungen innerhalb eines Fahrzeugtyps kommt einzig der unterschiedliche Radzustand in Frage, da sich alle anderen erschütterungsrelevanten Eigenschaften des Fahrzeugs wie unabgefederte Masse, Primärfedersteifigkeit etc. kaum ändern. Anders ausgedrückt ist der Radzustand der dominante Parameter für die Erschütterungen. Die Einflüsse auf den Radzustand sind vielfältig. Im vorliegenden Fall beim Vergleich Re460 und Güterlok sind mindestens folgende fünf Aspekte wesentlich:

1. Instandhaltung:
Der Einsatz der Re460 bei 200 km/h bedingt eine intensive Instandhaltung.
2. Betrieb / Strecke:
Güterloks im internationalen Güterverkehr ziehen hohe Lasten über die Alpen. Eine hohe Adhäsionsausnutzung, enge Bögen, steile Rampen, Weichen und schlechter Gleiszustand als bei Schnellfahrstrecken beanspruchen die Räder sehr stark.
3. unabgefederte Masse:
die hohen unabgefederten Massen bei den neueren Güterloks mit Tatzlagerantrieb führen zu hohen dynamischen Rad-Schiene Kräften und zu tieferen Eigenfrequenzen im gekoppelten dynamischen System Radsatz-Fahrweg, was sich möglicherweise ungünstig auf den Radzustand auswirkt.
4. Radialeinstellung der Radsätze:
Die fehlende Radialeinstellung der Radsätze bei den Güterloks führt zu einer starken Beanspruchung der Räder in engen Kurven.
5. Klotzbremsen:
Die verwendeten Sinterklotzbremsen bei der Re460 führen zu einer sehr glatten (polierten) Lauffläche.

Aufgrund dieser Erkenntnisse wurden Radrundheitsmessungen bei Güterloks des Typs Siemens ES64F4 und Bombardier TRAXX F140 durchgeführt. Eine typische Messung über den Radumfang bei vier Rädern einer TRAXX F140 zeigt Bild 3.

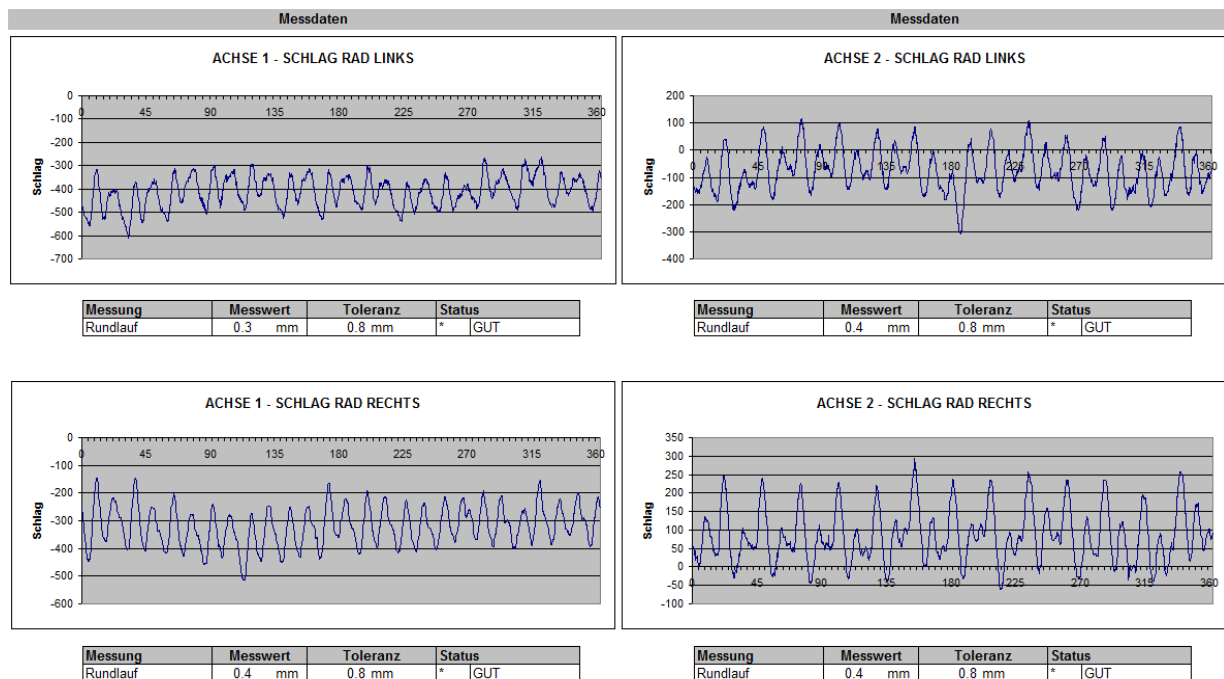


Bild 3, SBB Messprotokoll Marposs Radrundheitsmessung bei TRAXX F140

Die Kurven in den Diagrammen Bild 3 zeigen einen nahezu harmonischen Verlauf bzw. Polygone mit 14 und 28 Ecken. Die 14 Ecken passen dabei genau überein mit der grossen Verstärkung im 63 Hz Terzband in Bild 2 (Anregungsfrequenz bei 65 km/h). Dieser typische

Verlauf und ähnliche starke Erschütterungen wurden auch bei der Siemens ES64F4 Lok festgestellt. Die Ursachen dieser Polygonisierung werden im Rahmen des RIVAS-Projektes untersucht.

4 Erschütterungen von Güterwagen

Bei der RLC-Messstelle Thun wurden mit den Erschütterungsmessungen Güterwagen unterschiedlichster Bauart erfasst. Das häufigste Drehgestell für Güterwagen ist das Y25-Drehgestell mit einem Achsabstand von 1.8 m, daneben gibt es auch andere Drehgestellbauarten mit demselben Achsabstand sowie Drehgestelle mit Achsabstand 2.0 m inkl. kleineren Rädern (Y33). Die rollende Landstrasse (RoLa) hat ein vierachsiges Drehgestell (Achsabstand 0.70/0.75m) mit sehr kleinen Rädern (\varnothing 360 mm) und Radscheibenbremsen. Zudem wurden in Thun auch 2-achsige Güterwagen erfasst. Für die statistische Auswertung wurden für die beschriebenen Güterwagen vier Kategorien gebildet und im Geschwindigkeitsbereich 60-70 km/h ausgewertet. Bild 4 zeigt die Terzbandanalysen für die Kategorien Drehgestell mit Achsabstand 1.8m (z.B. Y25) und RoLa.

Terzspektren Thun 60-70 km/h, MP 8m/1

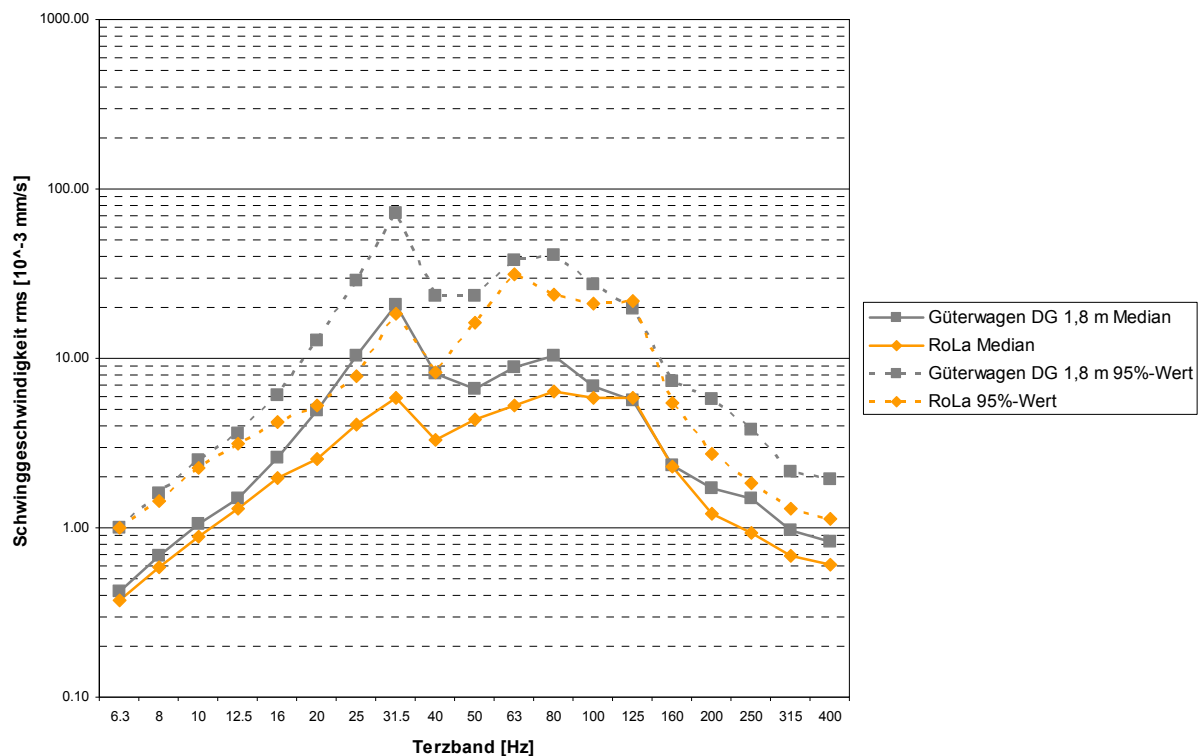


Bild 4, Terzbandspektren der RoLa und Güterwagen mit 1,8m Achsabstand in Thun 8m Distanz zum Gleis

Die RoLa generiert um die Schwellenfachfrequenz (Terzband 31.5Hz, 20Hz-40Hz) um bis zu einem Faktor 3 weniger Erschütterungen. Mögliche Ursachen könnten sein: kleine unabgefederte Masse, kleine Räder der RoLa und entsprechend höherfrequente Unrundheiten oder kleiner Achsabstand bzw. 4 Achsen pro Drehgestell. Die Streuung innerhalb der zwei Fahrzeugkategorien ist beträchtlich, auch bei der RoLa, wo der kleine Raddurchmesser zu einer hohen Beanspruchung der Räder führt (bei Lärmmonitoring Messungen des BAV wurden für die RoLa sehr hohe Streuungen festgestellt, bei anderen Güterwagen sind die Streuungen bei der Lärmemission kleiner). In Bild 4 zu erkennen ist ein kleiner positiver Effekt (~20%) der Scheibenbremse bei der RoLa gegenüber den klotzgebremsten Güterwagen-Drehgestellen (Statistik enthält sowohl Fahrzeuge mit Grauguss- wie auch K-Sohlen) im Frequenzbereich ab 160 Hz.

Die unterschiedlichen Radunrundheiten bei Güterwagen sind für die Streuung der Erschütterungen entscheidend. Da Güterwagen keinen Gleitschutz aufweisen, kommt es vermehrt zu Flachstellen und entsprechend zu hohen Erschütterungen. Massnahmen an Güterwagen, die dazu führen, Flachstellen zu reduzieren, sind daher wichtig als Erschütterungsschutzmassnahme. Daneben hilft für einen besseren Radzustand eine homogenere und bessere Radqualität.

Der Effekt der Lärmsanierung von Güterwagen in der Schweiz mit dem Ersatz von Grauguss- durch K-Klotzbremzen auf die Erschütterungen wurde bei der RLC-Messstelle Cadenazzo untersucht, siehe Bild 5.

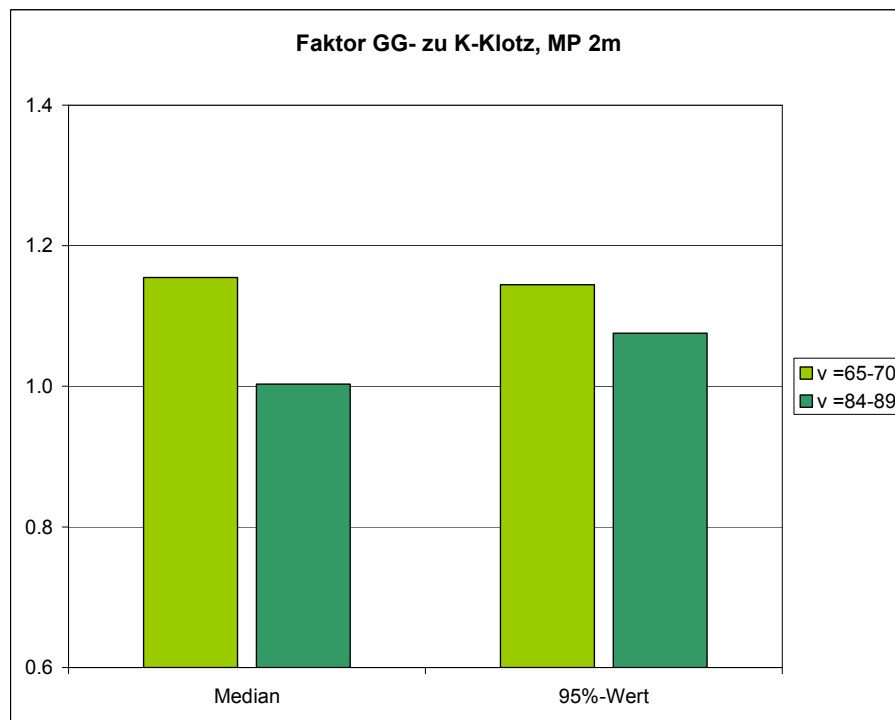


Bild 5, Verstärkungsfaktor Erschütterungen GG- zu K-Bremssohlen für Containertragwagen Sgns bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten

Die Statistik zeigt dass die Erschütterungsemissionen mit K-Klotz Bremssohlen gegenüber Grauguss-Bremssohlen um ca. 10% reduziert werden, allerdings nur im für Erschütterungen hochfrequenten Bereich ab 200 Hz, was sich immissionsseitig im Gebäude in leicht reduziertem Sekundärschall äussert.

5 Erschütterungsschutzmassnahmen am Rollmaterial

Die Auswertungen und statistischen Analysen der Erschütterungen von Fahrzeugen auf dem SBB-Netz zeigen einen dominierenden Einfluss des Radzustandes wie auch der unabgefederten Radsatzmasse, was mit numerischen Simulationen bestätigt wurde. Der Radzustand kann positiv beeinflusst werden mit einem gleis- und radschonenden Design (z.B. Radialeinstellung der Radsätze, kleine unabgefederte Radsatzmassen, Ersatz der GG-Bremsen) sowie einer zustandsabhängigen und zeitnahen Radinstandhaltung, wie die Beispiele SBB Re460 und ICN zeigen (tiefe Erschütterungen, kleine Streuung). Massnahmen am Rollmaterial zur Verringerung von Erschütterungen können in drei Kategorien eingeteilt werden: Instandhaltung / Prävention, Verbesserung bei bestehenden Fahrzeugen und Verbesserungen bei neuen Fahrzeugen. Folgende Massnahmen am Rollmaterial zur Verringerung von Erschütterungen könnten hohe Effektivität aufweisen (weitere Massnahmen finden sich in [7, 8,10,15]):

- Automatisch arbeitende, fest im Netz eingesetzte Kontrollsysteme für die Radqualität mit dem Ziel einer zeitnahen und zustandsabhängigen Instandhaltung

- verbessertes Zusammenspiel der Bremssysteme, Gleitschutz und der Radmaterialqualitäten, um Flachstellen / Ausbröckelungen zu vermeiden
- Verminderung der unabgefederten Radsatzmassen vor allem bei Lokomotiven, reduziert neben Erschütterungen auch die dynamische Beanspruchung von Rad und Schiene (z.B. anstatt Tatzlagerantrieb teurere Hohlwellenantriebe sofern auch für Lebenszykluskosten sinnvoll).
- radiale Einstellbarkeit der Radsätze in den Drehgestellen (passiv oder aktiv) zur Verminderung des Verschleisses an Rad und Schiene und dadurch auch der Erschütterungen
- Ersatz der Grauguss-Bremssohlen durch Kunststoff- oder Sinter-Sohlen

6 Fazit

Massnahmen am Rollmaterial, die wirkungsvoll Erschütterungen reduzieren, sind möglich und zu entwickeln bzw. zu testen. Es gibt Massnahmen, die keine grosse Investition bedürfen und sich innerhalb kurzer Zeit mit einer hohen Wirksamkeit umsetzen lassen und andere, die erst langfristig mit weiteren vertieften Abklärungen zum gewünschten Ergebnis führen. Zusätzliche Treiber für die Umsetzung sind neben dem Erschütterungsschutz einerseits in reduzierter Instandhaltung bei Infrastruktur und Rollmaterial dank geringeren dynamischen Rad-Schiene-Kräften, andererseits in gestiegenen Komfortansprüchen der Fahrgäste und in einer Erhöhung der Sicherheit zu sehen.

Güterlokomotiven sind besonders erschütterungsintensiv. Sie weisen hohe unabgefederte Massen und oft hohe Radunrundheiten auf.

Neue Regelwerke, Vorgaben der Zulassungsbehörden und Anforderungen beim Trassenpreis würden Bestrebungen unterstützen, in Zukunft erschütterungsarmes Rollmaterial in Betrieb zu nehmen.

Literatur

- [1] Müller, R.; Köstli, K.: Erschütterungs- und Körperschallimmissionen von Bahnen: Abschätzung der Sanierungskosten gemäss VSE. Interner Bericht. SBB, Bern, Februar 2008.
- [2] Mazoletti, P.: Analyse von Erschütterung und Körperschall anhand von eingegangenen Beschwerden bei der SBB AG. Bericht. SBB, Bern, Dezember 2000.
- [3] Müller, R.: Mitigation Measures for Open Lines against Vibration and Ground-Borne Noise: A Swiss Overview. Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design, Book: Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems, Volume 99. Springer, Berlin, Heidelberg 2008.
- [4] Müller, R.: Erschütterungsauswertungen zur Qualität Rollmaterial SBB, Messungen in Pratteln 2006/2007. Bericht SBB, Bern, März 2010.
- [5] Müller, R.: Erschütterungsauswertungen zur Qualität Rollmaterial, Erschütterungsmessungen neben dem Gleis in Ligerz und Thun im November 2010. Bericht SBB, Bern, Dezember 2010.
- [6] Seger, A.: Erschütterungsmassnahmen beim schienengebundenen Rollmaterial. Studie von Helbling Technik AG für SBB BahnUmwelt-Center. Aarau, April 2010.
- [7] Müller, R.: Measurements of rolling stock influence on railway vibrations and an overview of rolling stock mitigation measures. Proceedings of Eurodyn 2011. Leuven, July 2011.
- [8] Nielsen, J.; Lundén, R.; Johansson, A.; Vernersson, T.: Train-Track Interaction and Mechanisms of Irregular Wear on Wheel and Rail Surfaces. Vehicle System Dynamics 40 (2003) 1-3, S. 3-54.
- [9] Seger, A.; Nerlich, I.: Q-Messstellen Osogna, Messergebnisse aus den SBB-Pilotversuchen. ZEVrail 132 (2008) Tagungsband SFT Graz, S. 40-55.
- [10] Adam Mirza et al.: Train Induced Ground Vibration – Influence of Rolling Stock, State-of-the-Art Survey, Deliverable D5.1, RIVAS UIC WP5, 2011-09-23

- [11] Drangu Sehu et al: sonRAIL Projektdokumentation, Schweizerische Eidgenossenschaft, 2010-05-26
- [12] Christian Linder: Diss. ETH Nr. 12342: Verschleiss von Eisenbahnrädern mit Unrundheiten, , ETH Zürich, 1997
- [13] Dr.-Ing. F. Krüger VDI: VDI Berichte Nr. 1941.2006: Sekundärschall – Prognose und Bewertung, STUVA e.V., Köln, 2006
- [14] Dr.-Ing. Ch. Czolbe: PROSE Bericht 7-003: Konzepte zur Lärmsanierung von Lokomotiven & Triebfahrzeugen, BAFU Hrsg., 2011
- [15] Ph. Huber: PROSE Bericht 04-03-00449: Erschütterungen Rollmaterial, 2012-05-25
- [16] Roger Müller, Michael Hafner, Peter Balmer: Dynamik Rad-Schiene: Erschütterungen der Schienenfahrzeuge, ZEVrail 135 (2011) Tagungsband SFT Graz, p.199-207.
- [17] Jens Nielsen et al.: Classification of Wheel Out-of-Roundness Conditions with Respect to Vibration Emission, Deliverable D2.2, RIVAS UIC WP2, 2012-08-16
- [18] Jens Nielsen et al.: Train Induced Ground Vibration – characterization of vehicle parameters from test data and simulations, Deliverable D5.2, RIVAS UIC WP5, 2012-08-22