

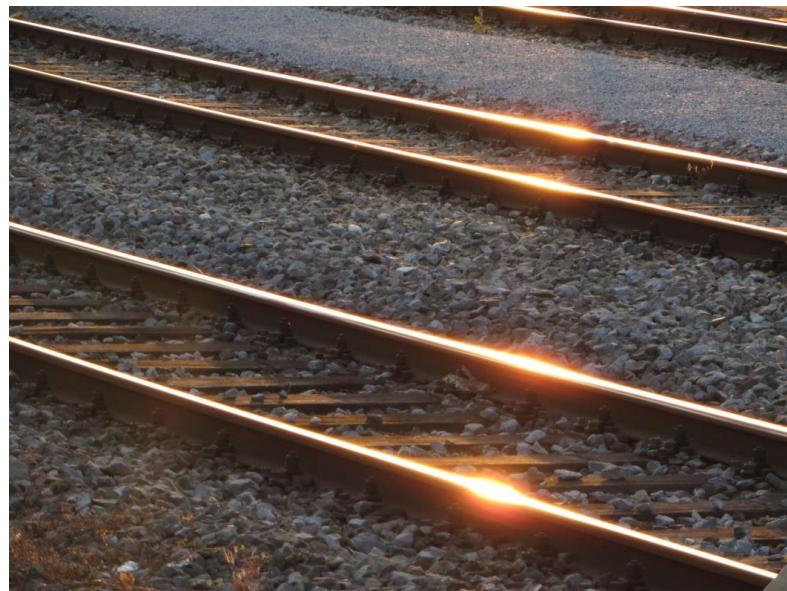
Go-Leise

Gesamtoptimierung, Lärm-, Erschütterungs-, Infrastruktur- und Sicherheitseinflüsse

Schlussbericht Phase 1, Dezember 2016

Autoren Jakob Oertli, Michael Hafner
Status Schlussversion

Urheberrecht Dieses Dokument ist urheberrechtlich geschützt. Jegliche kommerzielle Nutzung bedarf einer vorgängigen, ausdrücklichen Genehmigung.



Inhaltsverzeichnis

Begriffe und Abkürzungen	3
Liste der Grundlagenberichte	4
Management Summary	5
I. Projektrahmen	6
1. Einleitung	6
2. Optimierungselemente und Projektumfang	8
3. Vorgehen	9
II. Resultate Go-Leise Phase 1	10
4. Lärm- und Erschütterungsgrundlagen	10
5. Grundlagen zum Asset Management	14
6. Gesamtoptimierung	17
7. Dokument- und Datenmanagement	20
8. Wissenslücken und Vorschläge für weitere Versuche	22
9. Fazit	25
III. Nächste Schritte	26

Abkürzungen und Begriffe

BAFU: Bundesamt für Umwelt

BAV: Bundesamt für Verkehr

BGLE: Bundesgesetz über die Lärmsanierung der Eisenbahnen

DALY: Disability Adjusted Life Year

dB(A): Dezibel, A-bewertet

Empa: Eidg. Materialprüfanstalt

EPF: Ecole Polytechnique Fédérale

ETH: Eidgenössisch Technische Hochschule

Go-LEISE: Gleisoptimierung Lärm, Erschütterungen, Infrastruktur LCC, und Sicherheitseinflüsse.

KM: Knowledge Management

LCC: Life Cycle Costs (Lebenskosten)

M: Maintainability (Unterhaltbarkeit)

MTBF: Mean Time Between Failures

MTBSAF: Mean Time Between Service Affecting Failures (,

MTBSSF: Mean Time Between Safety System Failure

MTTR: Mean Time To Repair

RA: Reliability und Availability (Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit)

RAMS: Reliability, Availability, Maintainability, Safety

RCF: Rolling Contact Fatigue.

RIM Wheel/rail-impedance model

S: Safety (Sicherheit)

SBB: Schweizerische Bundesbahnen

SMAA: Stochastic Multicriteria Acceptability Analysis Method

TWINS: Track-Wheel Interaction Noise Software

WHO: World Health Organisation

YLD: Years Lost due to Disability

YLL: Years of Life Lost

Liste der Grundlagen

- Müller-BBM, dBVision, M+P, **DO:** Go-Leise Final Report
- Müller-BBM, dBVision, M+P, **D1:** Go-Leise, Noise and Vibrations
- Müller-BBM, dBVision, M+P, **D2a:** Go-Leise, Model and tools for RAMS, LCC of noise and vibration optimized track
- Müller-BBM, dBVision, M+P, **D2b/3b:** Go-Leise Optimisation strategy
- Müller-BBM, dBVision, M+P, **D3a:** Go-Leise Network inventory and regulations
- Müller-BBM, dBVision, M+P, **D3c:** Document and data management system
- Müller-BBM, dBVision, M+P, Minutes of the Go-Leise workshop on June 1, 2016 in Bern
- SBB: J. Oertli und M. Hafner, Go-Leise, ein Projekt der SBB zur Optimierung der Fahrbahn bezüglich Lärm, Erschütterungen und Asset Management, Publikation im Tagungsband Bahnakustik 2016: Infrastruktur, Fahrzeuge, Betrieb von Müller-BBM
- Interviews mit: Fabien Letourneau (Systra, F), Chris Jones (Consultant, formerly ISVR, GB), Genaro Sica (HS2, GB), Rüdiger Garburg (DB, D), Mathias Stangl (DB Systemtechnik, answers from DB Umwelt, D), Eduard Verhelst (Infrabel, B), Jens Nielsen (Chalmers, S), Jean-Marc Wunderli (EMPA, CH), Michael Dittrich (TNO, NL), Benjamin Betgen (Vibratech, F), Robert Attinger (BAV, CH), Barnaby Temple (Rhomberg, GB)
- Zusätzlich dienten knapp 100 Dokumente aus der Literatur als Basis für die Grundlagenberichte.

Management Summary

Hintergrund und Ziel: Nachdem in der Schweiz umfangreiche Lärmschutzwände gebaut, zahlreiche Schallschutzfenster installiert und sämtliches gusseisenklotzgebremstes Rollmaterial mit Verbundstoffsohlen umgerüstet wurden, sind Lärmschutzmassnahmen an der Fahrbahn der nächste Schritt. Da Massnahmen zur Lärmminderung, zum Schutz gegen Erschütterungen und zur Minimierung der LCCs beim Asset Management gegenläufige Absichten im Fokus haben können, ist es notwendig, das System als Ganzes zu optimieren.

Projekt in mehreren Phasen: Das Projekt Go-Leise¹ der SBB verfolgt dieses Ziel in mehreren Phasen. Die erste davon zeigte einen Überblick des Themas, deckte Wissenslücken sowie Möglichkeiten auf, diese zu schliessen. Zudem wurde eine Optimierungsmethodik vorgeschlagen, bei der die Elemente Lärm, Erschütterungen und Asset Management gleichzeitig betrachtet werden können. In weiteren Phasen sollen konkrete Versuche durchgeführt werden, um die Wissenslücken zu schliessen. Ab ca. 2020 sollten weitere Massnahmen und Methoden bereit stehen, um im Rahmen des revidierten Bundesgesetzes zur Lärmsanierung der Eisenbahnen (BGLE) umgesetzt zu werden.

Vorgehen Phase 1: Mit einer Literaturrecherche, Interviews mit Experten und einem Workshop wurden die relevanten Grundlagen und Wissenslücken zu Lärm, Erschütterungen und Asset Management erarbeitet. In einer Sharepoint Datenbank waren diese Grundlagen allen Projektmitgliedern zugänglich. Zusätzlich wurden zwei unterschiedliche Arten der Gesamtoptimierung, Kosten-Nutzen Analyse und Multi-Criteria Analysis, geprüft. Mit letzterer wurden verschiedene Änderungen an der Infrastruktur (z.B. mehr Schleifen, Wechsel von harten zu weichen Schienenzwischenlagen) auf deren Auswirkungen betreffend Lärm, Erschütterungen und Asset Management untersucht.

Wissenslücken und Vorschläge für weitere Arbeiten: Es wurden mehr als 70 Wissenslücken identifiziert. Sechzehn davon wurden als besonders wichtig taxiert. Diese sind: 1) Entstehung und Wachstum der Schienenrauheit, 2) Monitoring Schienenrauheit, 3) Gründe für die Zunahme des Lärms bei Schwellenbesohlung, 4) Bestimmung der relevanten Parameter bei Schienenzwischenlagen, Verbeserung 5) der Schienenzwischenlage, 6) der Befestigung, 7) der Schwelle, 8) Bestimmung der Effekte des Alterns, 9) Erhebung besserer Kostendaten im Asset Management, 10) Bestimmung optimaler Ersatzzeitpunkt für Gleiskomponenten, 11) Richtlinie Design of Experiments und Statistik, 12) Funktion für Beschreibung der Leistung des Gleises, 13) Bestimmung von Testabschnitten, 14) zufällige und nicht diskrete Anordnung von Gleiskomponenten 15) Einfluss von Reibungsmodifikatoren auf Wachstum Schienenrauheit und 16) Aufbau eines Wissensmanagements.

Fazit: Die Bedeutung einer Gesamtoptimierung wurde bestätigt. Als Voraussetzung müssen eine Reihe von Wissenslücken geschlossen werden. Diese beinhalten nicht nur technische, sondern auch andere Themen wie Statistik oder Wissensmanagement. Gelder aus der Ressortforschung gemäss BGLE sind eine mögliche und wichtige Finanzierungsquelle. Eine Koordination der Arbeiten der verschiedenen Beteiligten (Bund, SBB, Empa, andere Forschungsinstitute) ist notwendig.

¹ Gesamtoptimierung, Lärm-, Erschütterungs-, Infrastruktur- und Sicherheitseinflüsse, Finanziert aus Mitteln der Ressortforschung gemäss BGLE, verwaltet durch das BAFU.

I. Projektrahmen

1. Einleitung

Hintergrund Lärm: Zwischen 2000 und 2015 wurden in der Schweiz mehr als 300 km Lärmschutzwände entlang der Eisenbahn erstellt, zahlreiche Schallschutzfenster eingebaut und sämtliches graugusssohlengebremstes Rollmaterial mit Verbundstoffsohlen umgerüstet. Die ersten beiden Massnahmen haben rund zwei Drittel der Anwohner mit Grenzwertüberschreitungen geschützt. Mit einem revidierten Bundesgesetz zur Lärmsanierung der Eisenbahnen (BGLE²) beschlossen Bundesrat und Parlament, weitergehende Lärmsanierungsmassnahmen entlang der Bahn zu finanzieren. Neben einem Verbot von lauten Güterwagen ab 2020 sollen auch Massnahmen an der Infrastruktur finanziert werden. Hierzu gehören akustisches Schienenschleifen, die Dämpfung des Gleises, die Schließung von Lärmschutzwandlücken, die Lärmsanierung von Stahlbrücken sowie Massnahmen zur Förderung von besonders leisem Güterwagenrollmaterial. Ebenso wurden finanzielle Mittel zur Ressortforschung bereitgestellt. Das Projekt Go-Leise wird mit diesen Forschungsmitteln finanziert.

Neuer Fokus im Lärmschutz auf Fahrbahn: Im Gegensatz zur bisherigen Lärmsanierungsstrategie, wird in Zukunft der Fokus vermehrt auf das Gleis gelegt. Dies ist nicht nur in der Schweiz der Fall, auch die EU Kommission³, sowie einzelne Infrastrukturbetreiber, wie Infrabel, Prorail oder DB Netze, achten vermehrt auf den Lärm, welcher durch das Gleis emittiert wird.

Interaktion vieler Elemente: Lärmschutzmassnahmen am Gleis greifen i.d.R. tief in das dynamisch und komplexe System der Fahrbahn ein und können im Unterschied zu Lärmschutzwänden nicht isoliert betrachtet werden. Jede Komponente beeinflusst das Schwingungsverhalten der anderen. Zudem widersprechen sich die Zielsetzungen betreffend Lärmschutz, Erschütterungsschutz und der Minimierung der LCCs oft. Es ist deshalb notwendig, das System als Ganzes zu optimieren. Gleichzeitig müssen die gesetzlichen Vorgaben sowie Rahmenbedingungen betreffend Sicherheit eingehalten werden.

Ziel von Go-Leise: Das Projekt Go-Leise der SBB verfolgt dieses Ziel der Gesamtoptimierung in mehreren Phasen. Die erste davon zeigt einen Überblick des Themas, deckt Wissenslücken auf und schlägt eine Optimierungsmethodik vor, sowie Möglichkeiten, diese Wissenslücken zu schliessen. Dieser Bericht fasst die Resultate der ersten Phase zusammen. In der Phase 2 sollen dann die notwendigen Versuche durchgeführt werden, um die Wissenslücken zu schliessen sowie um neue, innovative Vorschläge zu testen. In Phase 3 werden die LCC, der Lärm und die Erschütterungen unabhängig von lokalen Bedingungen berechnet und schliesslich werden in Phase 4 die Massnahmen – unter Umständen in Abhängigkeit von lokalen Bedingungen – umgesetzt. Das Projekt beschränkt sich vorerst auf die gerade Strecke und berücksichtigt spezielle Elemente wie Weichen oder Isolierstösse

² Bundesgesetz über die Lärmsanierung der Eisenbahnen, (BGLE), vom 24. März 2000 (Stand am 1. März 2014)

³ SWD (2015) 300 final, Commission Staff Working Document, Rail Freight Noise Reduction, 15552/15, 22 December 2015

nicht. Dies soll ermöglichen, das Vorgehen in einem „einfacheren“ Fall zu prüfen. Stellt sich das Vorgehen als erfolgreich heraus, dann werden Kurven, Weichen oder Isolierstöße in einem weiteren analog aufgebautem Projekt behandelt.

Die folgende Graphik (*Abbildung 1*) zeigt das ineinandergreifen der verschiedenen Phasen von Go-Leise.

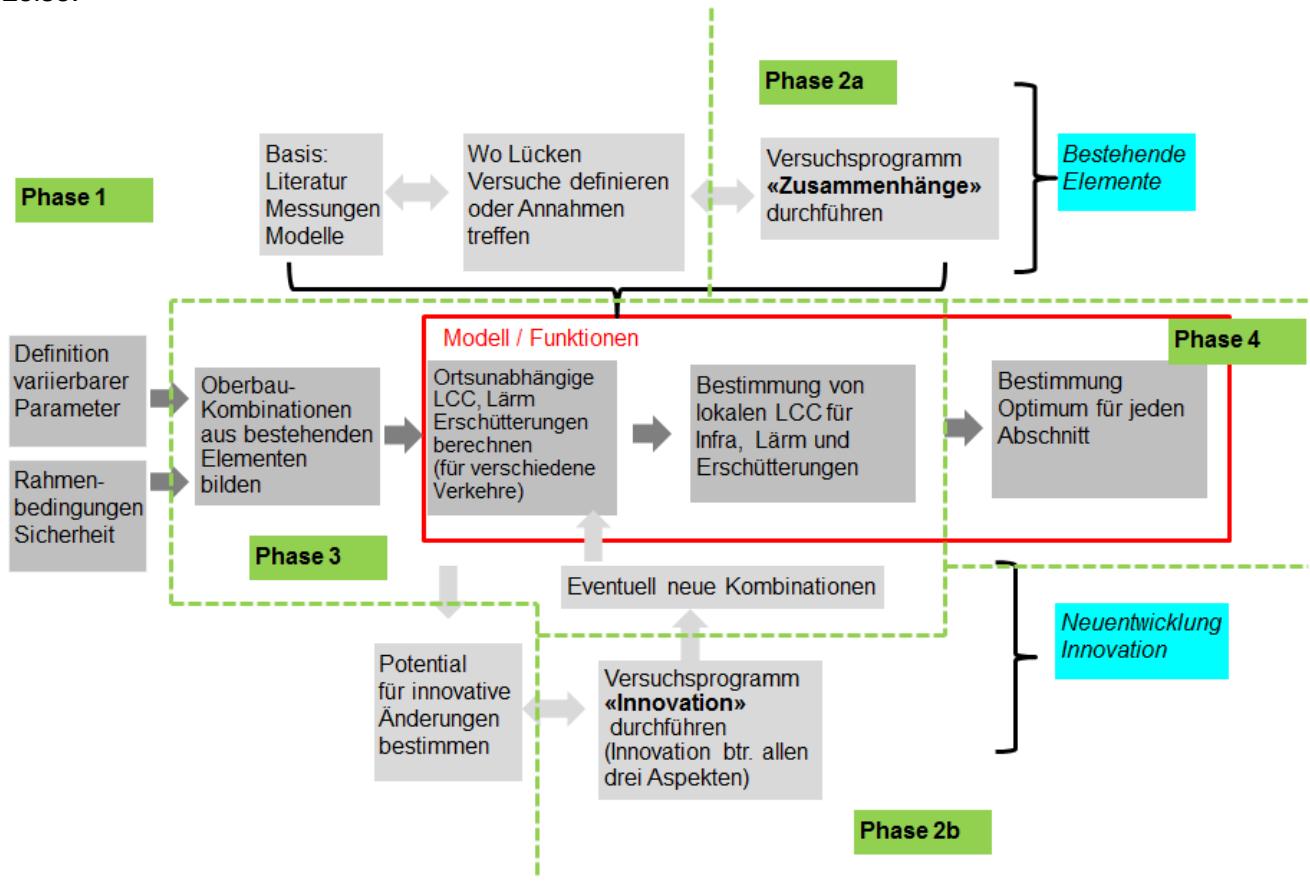


Abbildung 1: Phasen von Go-Leise

SBB Infrastruktur, Lärmsanierung 4

Projektorganisation und Finanzierung: Das Projekt Go-Leise wird von der SBB Infrastruktur geleitet. Die Finanzierung erfolgt durch die oben erwähnte Ressortforschung im Rahmen des revidierten BGLE (Bundesgesetz zur Lärmsanierung der Eisenbahnen), welche vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) verwaltet wird. Auftragnehmer im Projekt für die Phase 1 war ein Konsortium unter der Leitung von Müller-BBM (Deutschland) in Zusammenarbeit mit dBVision und M+P (beide Niederlande).

Vorstellung und Veröffentlichung: Die erste Phase von Go-Leise wurde auch an der Bahnakustik Tagung von Müller BBM vom 7. und 8. November 2016⁴ vorgestellt und ein Paper ist im Tagungsband erschienen.⁵

2. Optimierungselemente und Projektumfang

Optimierungselemente: Die Anforderungen an die drei zu optimierenden Elemente (Lärm, Erschütterungen, Asset Management) sind stark unterschiedlich und zudem frequenzabhängig. Die Elemente sind nachfolgend zusammengefasst. Die Grundlagen sind in den Kapiteln 4 und 5 detaillierter aufgeführt.

- **Lärm:** Um den Lärm zu reduzieren müssen Frequenzen im Bereich von 63 Hz bis 8 kHz gedämpft werden. In der Schweiz sind zudem die Anforderungen der Lärmschutzverordnung (LSV)⁶ sowie das Bundesgesetz zur Lärmsanierung der Eisenbahnen (BGLE) zu erfüllen. Es sind bereits Massnahmen am Rollmaterial (Umrüstung der Güterwagenflotte von Graugusssohlen zu Verbundstoffsohlen, Verbot von lauten Güterwagen ab 2020) umgesetzt, sowie zahlreiche Lärmschutzwände gebaut wie auch Schallschutzfenster installiert worden. Als Konsequenz dieser Massnahmen haben von ursprünglich 260'000 noch rund 100'000 Personen entlang der Bahn Grenzwertüberschreitungen⁷. Ziel der Bundesbehörden ist es, möglichst viele von diesen verbleibenden Personen unter die Grenzwerte zu bringen. Dabei sollen Kriterien der Wirtschaftlichkeit berücksichtigt werden.
- **Erschütterungen:** Um Erschütterungen zu vermindern, müssen Frequenzen zwischen 4 Hz und 250 Hz gedämpft werden. In der Schweiz besteht noch keine rechtskräftige Erschütterungsschutzgesetzgebung, die SBB sind jedoch von den Bundesbehörden angehalten, die Erschütterungen zu minimieren. Zur Zeit sind etwa 30'000 Personen von übermässigen Erschütterungen betroffen.
- **Asset Management:** Der Erhalt der Infrastruktur sowie die Minimierung der Unterhaltskosten gehören zu den Hauptanliegen der SBB. In der Regel müssen hier, ähnlich zu den Erschütterungen, tiefe Frequenzen gedämpft werden. Asset Management wird mit den Kriterien RAMS (Reliability, Availability, Maintainability, Safety) und LCC (Life Cycle Costs) beurteilt.

⁴ Go-Leise, ein Projekt der SBB zur Gesamtoptimierung der Fahrbahn bezüglich Lärm, Erschütterungen und Asset Management, Jakob Oertli und Michael Hafner, SBB AG

⁵ Müller-BBM, Lehrstuhl für Baumechanik, VDB Verband der Bahnindustrie, DB Systemtechnik: Bahnakustik: Infrastruktur, Fahrzeuge, Betrieb, Fachtagung 2016.

⁶ Lärmschutz-Verordnung (LSV), vom 15. Dezember 1986 (Stand am 1. Januar 2016)

⁷ Schweizerische Eidgenossenschaft, Bundesamt für Verkehr, Lärmsanierung der Eisenbahnen, Standbericht 2015

Umfang der Untersuchungen: Es wurde das Rollgeräusch beziehungsweise Erschütterungen auf geraden Strecken untersucht, das heisst spezielle Aspekte von Weichen oder Kurvengeräusche wurden nicht behandelt. Die Elemente der Fahrbahn welche Lärm und Erschütterungen beeinflussen sind: Die Schiene (Rauheit, Steifigkeit, Masse, Dämpfung), Befestigung, Schienenzwischenlage (Steifigkeit, Dämpfung), Schwelle, Schwellenbesohlung, Schotter, Unterschottermatten. Die feste Fahrbahn wurde nicht untersucht, da sie in der Schweiz fast ausschliesslich in Tunnels vorkommt, wo keine Lärmprobleme auftauchen und deshalb eine Gesamtoptimierung von allen drei Aspekten nicht notwendig ist.

3. Vorgehen

Grundlagenbericht:

SBB: J. Oertli und M. Hafner, Go-Leise, ein Projekt der SBB zur Optimierung der Fahrbahn bezüglich Lärm, Erschütterungen und Asset Management, Publikation im Tagungsband Bahnakustik 2016: Infrastruktur, Fahrzeuge, Betrieb von Müller-BBM

Das Thema wurde wie folgt angegangen:

- 1) *Bestimmung Stand des Wissens, Eruieren von Wissenslücken und Entwicklung von innovativen neuen Ideen:* Dieses Ziel wurde mit einer umfassenden Literaturrecherche, telefonischen Interviews mit Experten sowie einem Workshop mit internationalen Fachleuten angegangen.
- 2) *Priorisierung der Wissenslücken und Vorschläge für weitere Untersuchungen:* Als Unterstützung hierfür wurde ein Fragebogen ausgewertet sowie die einzelnen Themen in einem Gremium von Fachexperten diskutiert.
- 3) *Vorschläge für Optimierungsmethodik:* Zwei übliche Verfahren der Optimierung (Kosten-Nutzen Analysen und Multi-Criteria Analysis) wurden auf die Problemstellung adaptiert.
- 4) *Vorschlag für weiteres Vorgehen:* Darauf aufbauend wurden Vorschläge für das weitere Vorgehen (z.B. Versuche, Datenerhebungen) formuliert. Diese bilden die Basis für Finanzierungsanträge der Phase 2.

II. Resultate Go-Leise Phase 1

4. Lärm- und Erschütterungsgrundlagen

Grundlagenberichte:

Müller-BBM, dBVision, M+P: D1: Noise and Vibrations

Grundlagenerarbeitung als wichtige Voraussetzung: Für die Gesamtoptimierung ist es notwendig die technischen Aspekte betreffend Lärm- und Erschütterungen zusammenzustellen. Diese sind im Grundlagenbericht D1 (eingangs Kapitel referenziert) detailliert aufgeführt. Es ist wichtig zu verstehen, dass die durch das Zusammenwirken von Rad- und Schienenoberfläche induzierten Schwingungen durch die jeweiligen Systemkomponenten des Gleises unterschiedlich aufgenommen und weitergeleitet werden. Die Schwingungseigenschaften (u.a. dynamischen Steifigkeiten und die Eigenmoden) der Komponenten sind für die Frequenzbereiche verantwortlich, bei denen Energien aufgenommen oder durchgeleitet werden. Dies bedeutet, dass einerseits durch die Veränderung der Frequenzen andere Systembestandteile die Gesamtschwingung unterschiedlich beeinflussen und andererseits werden durch die Veränderung der Komponenten andere Frequenzen für die Schall- oder Erschütterungsemision dominant. Ein einfaches Beispiel für diese Zusammenhänge zeigen elastische Schienenlagerungen. Auf Stahlbrücken dienen diese dazu, möglichst wenig Energie in die Brückenkonstruktion zu leiten, welche diese als laute Lärmemission abgeben würde. Auf einer Schotterfahrbahn hingegen, ist es gerade erwünscht, dass die Energie von der Schiene in den schlecht abstrahlenden Schotter weitergeleitet wird, weshalb weiche Schienenzwischenlagen i.d.R. zu einer Lärmzunahme führen.

Relevante Frequenzbereiche: Die kritischen Frequenzbereiche unterscheiden sich für Erschütterungen (4 – 63 Hz), Körperschall (16 – 250 Hz) und Luftschall (63 Hz – 8000 Hz) (vgl. Abbildung 4.1)

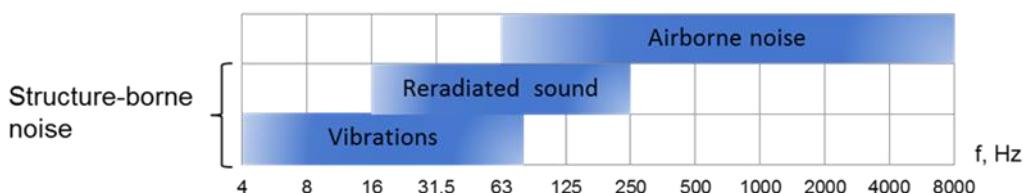


Abbildung 4.1: Relevante Frequenzbereiche für Erschütterungen (Vibrations), Körperschall (Reradiated sound) und Luftschall (Airborne noise).

Grundsätzliches Modell für die Behandlung von Lärm und Erschütterungen: Ein Modell um die Schwingungsmechanismen von Eisenbahnlärm und Erschütterungen ist in *Abbildung 4.2* und etwas ausführlicher in *Abbildung 4.3* aufgeführt.

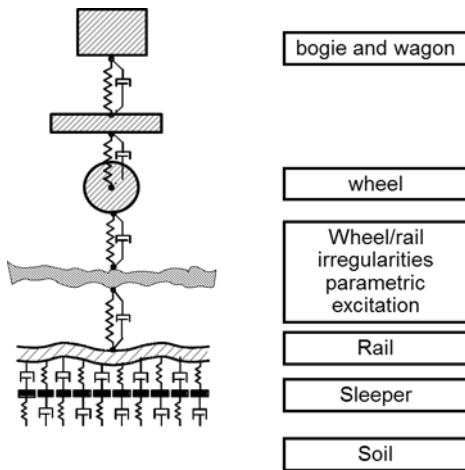


Abbildung 4.2: Diagramm von Rad-Schiene Impedanzmodellen. Bogie (Drehgestell), Wagon (Wagen), Wheel (Rad), Wheel/rail irregularities parametric excitation (Rad/Schiene Unregelmässigkeiten, parametrische Anregung).

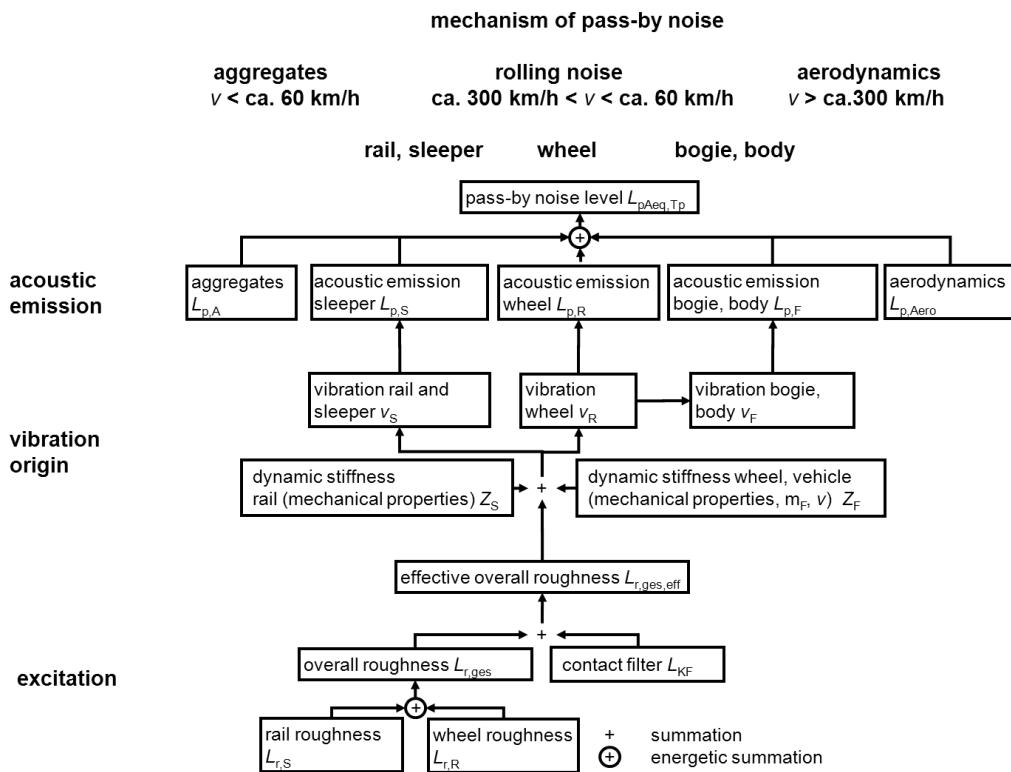


Abbildung 4.3: Mechanismen der Lärm- und Erschütterungserzeugung eines fahrenden Zuges.

Relevante Parameter für die Erzeugung von Lärm und Erschütterungen: Diese Parameter sind in Tabelle 4.1 aufgeführt. Im Go-Leise Projekt Phase 1 wurde eine umfangreiche Literaturrecherche durchgeführt, um den Effekt auf Lärm und Erschütterungen aller Parameter zu untersuchen.

Element	Parameter 1	Parameter 2	Parameter 3
Schiene	Rauheit	Type (Querschnitt) -> Masse, Steifigkeit	
Schienenzwischenlage	Steifigkeit	Dämpfung	
Schwelle	Material (Dämpfung)	Typ (Querschnitt) -> Masse, Steifigkeit	Distanz
Boden	Steifigkeit	Dämpfung	
Schotter	Steifigkeit	Dämpfung	Absorption
Befestigung	Rotationssteifigkeit	Rotationsdämpfung	Preload
Schwellenbesohlung	Steifigkeit	Dämpfung	
Unterschottermatte	Steifigkeit	Dämpfung	
Schienenschleifen	Rauheit		
Schäden	Korrgation	Lose Schwellen	

Tabelle 4.1: Relevante Parameter bei der Erzeugung von Lärm und Erschütterungen und die physikalischen Parameter, welche sie beschreiben.

Wissenslücken bei den akustischen Grundlagen: Alle obigen Parameter wurden systematisch nach Wissenslücken untersucht. Einige Beispiele solcher Wissenslücken sind nachfolgend aufgeführt:

- **Schienenrauheit:** Auswirkungen von Schleifspuren; Grund für Wachstum der Schienenrauheit; Variabilität der Schienenrauheit längs und quer auf dem Schienenkopf; optimale Schleifstrategie.
- **Schienenprofil:** Effekte auf Lärm.
- **Schienenzwischenlage:** Einfluss auf Wachstum Schienenrauheit; Effekt des Alterns auf Steifigkeit
- **Schwelle:** Koppelung der Moden der Schwingung der Schwelle mit den Schwingungen der Schiene; Einfluss des Materials der Schwelle; Weitere Schwelleneigenschaften, welche wichtig für Lärm und Erschütterungen sind.
- **Schotter:** Einfluss der Schotterqualität auf Lärm und Erschütterungen.
- **Schienenbefestigung:** Einfluss der Dimensionierung auf den Lärm.
- **Schwellenbesohlung:** Mechanismen der Lärmzunahme bei der Verwendung gewisser Typen von Schwellenbesohlung.
- **Boden:** Einfluss von Bodeneigenschaften auf Erschütterungen; Methode für die Bestimmung der relevanten Bodenparameter; Möglichkeiten den Boden zu verbessern.

Massnahmen zur Reduktion von Lärm und Erschütterungen: Ebenfalls wurde eine ganze Reihe von Lärmreduzierungsmaßnahmen nach Wissenslücken untersucht. Beispiele solcher Wissenslücken sind.

- *Akustisches Schienenschleifen:* Die Effektivität von akustischem Schienenschleifen unter Schweizer Verhältnissen.
- *Neue Schienenzwischenlagen:* Entwicklung einer Schienenzwischenlage, welche frequenzabhängig dämpft. Ideal wäre eine tiefe Dämpfung bei tiefen Frequenzen und eine hohe Dämpfung bei hohen Frequenzen.
- *Schienendämpfer:* Schienendämpfer sind zur Zeit kein Thema für die Eisenbahnnetze der Schweiz wegen mangelnder Wirkung und infrastrukturseitigen Problemen. Eine Wissenslücke sei trotzdem erwähnt: Unklar ist der Effekt von Schienendämpfern auf die Entwicklung der Schienenrauheit.

Widersprüchliche Untersuchungen: Die Wissenslücken sind nicht nur eine Folge mangelnder spezifischer Untersuchungen, sondern stammen auch von Themen, zu denen zwar Untersuchungen durchgeführt wurden, diese sich aber widersprechen. Ein wichtiger Grund für die Widersprüche liegt in der hohen Variabilität, welche bei Versuchen im Oberbau zu beobachten ist. Weil Versuche im Gleis teuer sind, wurden oft nicht genügend Wiederholungen für valide Aussagen durchgeführt. Es ist deshalb notwendig, das Versuchsdesign zu verbessern.

Eisenbahnlärmmodelle: Es bestehen eine Reihe von Software-Tools um Eisenbahnlärm zu modellieren. Hierzu gehören TWINS (Track-Wheel Interaction Noise Software), RIM (Wheel / rail - impedance model), sonRAIL, Schall03 und einige Time-domain Modelle (mit Spezialfall „Greensche Funktionen“). Diese sind in *Tabelle 4.2* zusammengefasst.

Modell	Gleisdynamik	Schätzung Lärm	Schätzung Erschütterungen	Optionen für Massnahmen	Optionen für neue Designs	Berechnungszeit
TWINS	linear	ja	ja	alle	ja	moderat
RIM	linear	ja	ja	alle	ja	moderat
sonRAIL	nein	ja	nein	Basiert auf empirischen Messungen	nein	tief
Schall03	nein	ja	nein	Limitierte Optionen basierend auf empirischen Messungen	nein	tief
Zeitdomäne	alle	ja	ja	alle	ja	hoch
„Greensche Funktionen“ (Zeitdomäne)	Auswahl	ja	ja	Auswahl	ja	moderat

Tabelle 4.2: Auswahl von Modellen zur Berechnung von Eisenbahnlärm und Gleisdynamik.

Fazit: Obwohl umfangreiche wissenschaftliche Grundlagen zu Lärm und Erschütterungen existieren, bestehen dennoch eine Reihe von Wissenslücken, sowohl bei den Grundlagen wie auch bei den Massnahmen. Dies liegt nicht nur am Mangel von spezifischen Untersuchungen, sondern auch daran, dass zwar Untersuchungen vorgenommen wurden, diese sich jedoch widersprechen. Die Wissenslücken mit der höchsten Priorität sind im Kapitel 8 zusammengefasst.

5. Grundlagen zum Asset Management

Grundlagenbericht:

Müller-BBM, dBVision, M+P, **D2a:** Go-Leise, Model and tools for RAMS, LCC of noise and vibration optimized track

Gesamtoptimierung benötigt Grundlagen Asset Management (RAMS): Um eine Optimierung von Lärm, Erschütterungen und Asset Management durchzuführen, ist es notwendig letzteres anhand von einigen Parametern zu beschreiben. Diese sind nachfolgend kurz zusammengefasst. Häufig wird dies als RAMS (Reliability/Availability, Maintainability and Safety) bezeichnet.

Reliability (Zuverlässigkeit): beschreibt die Wahrscheinlichkeit dass etwas seine Funktion unter gegebenen Umständen in einer definierten Zeitspanne erfüllen kann. Reliability wird oft mit den Indi-

katoren Mean Time Between Failures (MTBF, Durchschnittliche Zeit zwischen Ausfällen) oder Mean Time Between Service Affecting Failures (MTBSAF, Durchschnittliche Zeit zwischen Ausfällen, welche den Betrieb beeinflussen) beschrieben.

Availability (Verfügbarkeit): Availability ist definiert als die Fähigkeit eines Produktes seine Funktion unter gegebenen Umständen zu einem bestimmten Zeitpunkt zu erfüllen, sofern die externen Ressourcen zur Verfügung stehen. Availability wird häufig folgendermassen beschrieben:

$$A_I = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

MTBF: Mean Time Between Failures (Durchschnittliche Zeit zwischen Ausfällen)

MTTR: Mean Time To Repair (Durchschnittliche Zeit für Reparaturen)

Weitere Indikatoren sind Verspätungsminuten oder der Passenger Performance Measure (PPM).

Maintainability (Instandhaltbarkeit): Maintainability wird definiert als die Wahrscheinlichkeit dass eine gegebene aktive Instandhaltungsarbeit für ein Produkt unter gegebenen Umständen zu einem bestimmten Zeitpunkt mit den gegebenen Methoden und Ressourcen durchgeführt werden kann.

Safety (Sicherheit): Safety ist definiert als Zustand eines technischen Systems, bei welchem keine inakzeptablen Schadensrisiken auftreten. Ein möglicher Indikator für die Sicherheit ist die Mean Time Between Safety System Failure (MTBSSF).

LCC Analysen (Life Cycle Costs): Die LCC Analysen sind eine Methode, um die vollständigen Kosten eines Systems oder eines Produktes über dessen ganze Lebensdauer zu bestimmen. Für die Eisenbahninfrastruktur umfassen die LCC Themen wie Beschaffung, Betrieb, Unterhalt, Mangel an Verfügbarkeit, soziale Kosten oder Entsorgung.

Veränderungen in der Infrastruktur können mit diesen Indikatoren beschrieben werden: Mit diesen Indikatoren können Veränderungen in der Infrastruktur beschrieben werden. Der Grad der Auswirkung kann mit einer Gewichtung oder Note beurteilt werden. Dies entspricht der Multi-Criteria Analysis, welche im Kapitel 6 dargestellt wird und bildet eine Grundlage für die dort beschriebene Optimierung. In *Tabelle 5.1* ist ein Beispiel betreffend Änderungen an der Schiene aufgeführt. Weitere Beispiele sind im Grundlagenbericht D2a aufgeführt (eingangs Kapitel referenziert).

	Erwägung zu Design	RA	M	S	LCC
Schwereres Schienenprofil	Hängt vom Verkehrsaufkommen ab: Schwereres Schienenprofil für grössere Achslasten oder höhere Verkehrsintensität	MTBCF wird grösser [3+]	Auf einer Linie mit verschiedenen Profilen müssen Maschinen gewechselt werden [1-]	Weniger Ermüdungsscheinungen [3+]	<ul style="list-style-type: none"> • Höhere Investitionskosten [3-] • Höhere Lebensdauer und Verfügbarkeit falls Verkehr gleich bleibt [9+]
Besserer Stahl / Schienenkopf härter	Weniger Gleisschäden, Wachstum Schienenrauheit geringer.	Höhere Resistenz gegen Stress: MTBF Wird grosser [9+]	Schienenschweissen etwas schwieriger MTTM [1-]	Weniger Head Checks [9+]	<ul style="list-style-type: none"> • Höhere Investitionskosten [9/3-] • Geringere Unterhaltskosten [3/9+]
Häufigeres Schienenschleifen	Zweck von Schienenschleifen: <ul style="list-style-type: none"> • Weniger Rauheit aus akustischen Gründen • Korrugation vermeiden oder entfernen • Verhinderung von RCF • Lebensdauer erhöht durch optimaler Rad-Schiene Kontakt 	<ul style="list-style-type: none"> • MTBM nimmt ab [3-] • MTB(C)F nimmt ab [9+] • Schleifreste können Signalstörungen verursachen. [3-] 	Kein Einfluss [0]	<ul style="list-style-type: none"> • Headchecks vermeiden [9+] • Weniger Befestigungsbrüche wegen geringerer Korrugation. [3/9+] 	Mehr Schleifen: <ul style="list-style-type: none"> • Höhere präventive Unterhaltskosten [3-] • Geringere kurative Unterhaltskosten [9+]

Tabelle 5.1: Beispiel für Beurteilung von Veränderungen an der Infrastruktur mit Asset Management Parametern. RA: Reliability und Availability, M: Maintainability, S: Sicherheit, LCC: Life Cycle Costs. RCF: Rolling Contact Fatigue. Benotung auf einer Skala 1, 3, 9, 27, +/- zeigen an, ob der Effekt positive oder negative ist.

Wissenslücken bei den notwendigen Grundlagen für das Asset Management: Obwohl allgemein anerkannte Kennzahlen zur Beschreibung des Asset Management bestehen, sind die dazu notwendigen Kostengrundlagen oft ungenügend. Ferner ist unklar, ob für die einzelnen Bestandteile des Oberbaus optimale Materialien verwendet werden, wie die Komponenten miteinander interagieren und welches der optimale Zeitpunkt für den Ersatz von Bestandteilen ist.

Fazit: Es existieren allgemein anerkannte Kennzahlen zur Beschreibung des Asset Management. Es bestehen jedoch Wissenslücken beispielsweise betreffend optimaler Materialwahl oder der Interaktion der Bestandteile der Fahrbahn. Auch ist die Kostenbasis teilweise ungenügend erhoben, um Kosten-Nutzen Analysen durchzuführen.

6. Gesamtoptimierung

Grundlagenberichte:

- Müller-BBM, dBVision, M+P, D2b/3B: Go-Leise Optimisation strategy

Zwei Methoden untersucht: Auf der Basis der Grundlagen in Lärm, Erschütterungen und Asset Management kann eine Gesamtoptimierung vorgenommen werden. Im Projekt Go-Leise wurden hierzu zwei unterschiedliche Methoden geprüft, die Kosten-Nutzen Analyse und die Multi-Criteria Analysis. Diese werden nachfolgend beschrieben, miteinander verglichen und danach Beispiele für die Multi-Criteria Analysis aufgeführt.

6.1 Kosten-Nutzen Analyse

Monetarisierung notwendig: Mit der Kosten-Nutzen Analyse werden Alternativen ökonomisch verglichen. Hierzu müssen gleiche Einheiten gegenübergestellt werden, d.h. der Nutzen muss monetarisiert werden. Dies ist für Lärm- und Erschütterungsschutzmaßnahmen kompliziert, jedoch bestehen verschiedene Ansätze, welche im Projekt Go-Leise untersucht wurden. Zwei Möglichkeiten werden hier als Beispiele aufgeführt: Der Ansatz der VLE (Verordnung zur Lärmsanierung der Eisenbahnen⁸) und eine Monetarisierung mit DALY (Disability Adjusted Life Year).

Ansatz gemäss VLE: Nach der VLE sind Investitionskosten dann wirtschaftlich tragbar, wenn folgendes für den Preisstand Oktober 1998 gilt:

Investitionskosten je $\sum(\Delta \text{dB}(A) \times \text{Personen}) < \text{CHF } 3000$

Der Preisstand von 1998 wurde gewählt, damit die Massnahmen mit früheren Projekten vergleichbar sind.

DALY Ansatz: Ein weiterer Ansatz ist der DALY (Disability Adjusted Life Year). Dieser wird aus der Summe von YLL (Years of Life Lost) und YLD (Years Lost due to Disability) berechnet. Diese beiden Parameter basieren wiederum auf Untersuchungen der WHO (World Health Organisation), welche aufgrund einer Vielzahl von Forschungsresultaten ein Zusammenhang zwischen Lärmexpositionen und Gesundheit hergestellt hat⁹. Jedem DALY kann nun ein monetärer Wert zugeordnet werden, welcher oft zwischen € 30'000 und € 150'000 liegt¹⁰.

⁸ Verordnung über die Lärmsanierung der Eisenbahnen, (VLE), vom 4. Dezember 2015 (Stand am 1. Januar 2016)

⁹ Burden of disease from environmental noise – quantification of healthy years lost in Europe. World Health Organisation 2011, ISBN: 978 92 890 0229 5.

¹⁰ Environmental Noise: Valuing impacts on: sleep disturbance, annoyance, hypertension, productivity and quiet. UK Department for Environment, Food and Rural Affairs, November 2014

6. 2 Multi-Criteria Analysis

Benotung von Kriterien: Mit der Multi-Criteria Analysis wird aus einer Reihe von vorgeschlagenen Optionen die beste bestimmt. Verglichen werden alle Kriterien, welche für die Entscheidung relevant sind. Die Kosten sind dabei nur ein möglicher Aspekt – es werden auch andere Kriterien oder Qualitäten mitberücksichtigt. Die einzelnen Kriterien werden benotet und können anschliessend auch gewichtet werden. Die Benotung wird von einem Expertengremium vorgenommen. Die Multi-Criteria Analysis kann zu einer SMAA (Stochastic Multicriteria Acceptability Analysis Method) erweitert werden. Damit wird es möglich, Unsicherheiten in der Bewertung zu berücksichtigen. Dies ist insbesondere dann empfehlenswert wenn grössere Variabilitäten vorhanden sind. (z.B. im Rahmen von netzweiten statistischen Betrachtungen).

6.3 Vergleich von Kosten Nutzen Analyse mit Multi-Criteria Analysis

Tabelle 6.3 vergleicht die Vor- und Nachteile der Kosten Nutzen Analyse und der Multi-Criteria Analysis.

	Kosten-Nutzen Analyse	Multi-Criteria Analysis
Stärken	<ul style="list-style-type: none"> • Direkter Vergleich zwischen Kosten und Nutzen mit gleicher Einheit • Konsistent und transparent 	<ul style="list-style-type: none"> • Jedes Kriterium kann einbezogen und quantifiziert werden • Einfache Sensitivitätsanalyse • Einbezug vieler Meinungen • Bestimmte Aspekte können leicht stärker gewichtet werden
Schwächen	<ul style="list-style-type: none"> • Monetarisierung notwendig • Monetarisierung für gewisse Aspekte schwierig mangels Kriterien • Ethische Bedenken gegen Monetarisierung gewisser Aspekte (z.B. Gesundheit) 	<ul style="list-style-type: none"> • Jede Situation braucht in der Regel eine neue Beurteilung inklusive einer neuen Gewichtung der Faktoren • Weniger bekannte Methode: Höherer Erklärungsbedarf

Tabelle 6.3: Vergleich der Kosten-Nutzen Analyse mit der Multi-Criteria Analysis.

Wegen mangelnden Daten, konnte im Rahmen der Phase 1 von Go-Leise keine Kosten-Nutzen Analyse durchgeführt werden. Die untersuchten Lärmschutz- und Erschütterungsschutzmassnahmen sowie Änderungen an der Infrastruktur wurden mit deshalb mit der Multi-Criteria Analysis durchgeführt. Die Kriterien wurden mit Noten quantifiziert. Kapitel 6.4 beschreibt die konkrete Umsetzung.

6.4 Konkrete Umsetzung

Beispiele der Gesamtoptimierung mit der Multi-Criteria Analysis: Im Go-Leise Projekt wurden zahlreiche Änderungen an den Gleiskomponenten (z.B. Schienenprofil, Schwellentyp, Schottertiefe)

sowie Lärmsanierungsmassnahmen (z.B. akustisches Schienenschleifen, Schienendämpfer) und Erschütterungsschutzmassnahmen (z.B. Schwellenbesohlung, Unterschottermatten) nach den drei Kriterien Lärm, Erschütterungen und Asset Management untersucht. Schienenschleifen und die Steifigkeit von Schienenzwischenlagen sollen nachfolgend als Beispiele für die Gesamtoptimierung mit der Multi-Criteria Analysis dienen. Hierzu wurden die Kriterien RAMS (Reliability, Availability, Maintainability und Safety), LCC, Lärm und Erschütterung benotet. Für die Benotung wurde eine 3x Skalierung verwendet, wobei der Wert 0 für keinen und 27 für einen bedeutenden Effekt steht. Positive beziehungsweise negative Effekte wurden mit einem entsprechenden Vorzeichen versehen. Die Benotung resultierte aus einer Summe von Expertenmeinungen.

Beispiel Schienenschleifen: In Tabelle 6.4.1 ist die Benotung für Schienenschleifen zusammen mit einer Begründung aufgelistet. Dabei wurden unter anderem folgende Punkte in Erwägung gezogen: Tiefe akustische Rauheit führt zu weniger Lärm; Schleifen reduziert oder verhindert Verriffelung und den RCF (rolling contact fatigue); der optimale Rad-Schiene Kontakt erhöht die Lebensdauer von Rad und Schiene.

	RA	M	S	LCC	Noise	Ground vibrations
	MTBM nimmt ab [3-] MTB(C)F Nimmt zu [9+] Schleifabfälle können Signalstörungen bewirken [3-]	Kein Einfluss [0]	Head Checks verhindern [9+] Weniger Verriffelung verhindert Befestigungsprobleme verringert Unterhalt [9+]	Schleifen führt zu höheren Kosten [3-] Weniger Head Checks, weniger Befestigungsprobleme verringert Unterhalt [9+]	Falls die Gesamtrauheit vermindert wird (d.h. mit Fahrzeugen mit glatten Rädern) wird der abgestrahlte Lärm vermindert. Schleifspuren können Lärm vorübergehend erhöhen [3-] Auf dem SBB Netz wird ein zusätzlicher Nutzen von 1 – 3 dB erwartet [9+] In Fällen von starker Korrguation [27+]	Weniger Headchecks und geringere Rauheit können Erschütterungen verringern [+]

Tabelle 6.4.1: Multi-Criteria Analysis für Schienenschleifen. Werte in Klammern geben Benotung an. MTBM: Mean Time Between Maintenance, MTB(C)F: Mean Time Between (Critical) Failure, RA: Reliability and Availability, M: Maintainability, S: Safety, LCC: Life Cycle Costs

Werden die einzelnen Kriterien nicht unterschiedlich gewichtet, ist vermehrtes Schienenschleifen lohnend sowohl für das Asset Management, für den Lärm- wie auch für den Erschütterungsschutz. Auch wenn die Benotung im Sinne einer Sensitivitätsanalyse leicht geändert wird, würde kein anderes Re-

sultat entstehen. Dies bedeutet nicht, dass eine andere Massnahme, welche dazu führt, dass die Schienenrauheit gar nicht zunimmt, nicht optimaler sein könnte.

Beispiel Steifigkeit Schienenzwischenlagen: Etwas anders sieht die Situation mit der Steifigkeit der Schienenzwischenlage aus (*Tabelle 6.4.2*). Bei den SBB werden in der Regel steife Schienenzwischenlagen eingebaut. Die nachfolgende Bewertung beschreibt deshalb den Wechsel von steifen zu weichen Schienenzwischenlagen. Bei diesem Wechsel wurden folgende Kriterien berücksichtigt. Weiche Schienenzwischenlagen führen zu mehr Lärm aber (vermutlich) zu weniger Erschütterungen; Weiche Schienenzwischenlagen schonen den Oberbau; Weiche Schienenzwischenlagen führen zu erhöhter lateraler Beweglichkeit der Schienen.

RA	M	S	LCC	Lärm	Erschütterungen
MTBF nimmt zu [3+]	Kein Einfluss [0]	Erhöhte laterale Beweglichkeit der Schienen [3-]	Reduktion von Schäden an Gleiskomponenten [3+] Weiche Schienenzwischenlagen haben eine kürzere Lebensdauer [3-]	Zunahme des Lärms um 1 – 3 dB [9-]	Abnahme Erschütterungen von 5-15 dB in limitiertem Frequenzbereich (60-200 Hz) [3+] Unterhalb der Fahrbahn-Fahrzeug Resonanzfrequenz mehr Erschütterungen[1-]

Tabelle 6.4.2: Multi-Criteria Analysis für die Änderung von harten zu weichen Schienenzwischenlagen. Werte in Klammern geben Benotung an. MTBF: Mean Time Between Failure, RA: Reliability and Availability, M: Maintainability, S: Safety, LCC: Life Cycle Costs

In diesem Fall ist die Abwägung zwischen Lärm, Erschütterungen und Asset Management weniger klar und abhängig von der Gewichtung, welche für die einzelnen Kriterien gewählt wird. Diese Gewichtung wird von örtlichen Gegebenheiten abhängen, zum Beispiel durch die Bedeutung des Lärmschutzes an diesem konkreten Ort.

7. Dokumenten- und Datenmanagement

Grundlagenberichte:

Müller-BBM, dBVision, M+P: D3c: Document and data management system.

Notwendigkeit für ein Dokumenten- und Datenmanagement: Das Projekt Go-Leise soll während vielen Jahren die Aktivitäten in den Bereichen Lärm, Erschütterungen und Asset Management zusammenbringen. Die Gesamtoptimierung hängt von unzähligen Versuchen und Berichten ab. Hierzu müssen diese einfach und leicht zugänglich sein.

Anforderungen: Ein System für das Dokumenten- und Datenmanagement muss fähig sein, die Dokumente und Daten zu erfassen und weitere Inhalte beizusteuern. Diese müssen organisiert, genehmigt, administriert, über eine Suchfunktion gefunden und abgerufen werden können. Die Datensicherheit muss dabei gewährleistet werden.

Grundsätzliche Möglichkeiten: Grundsätzlich besteht ein Spektrum von einfachen, leicht verständlichen aber eingeschränkten Möglichkeiten (z.B. Excel Tabellen) bis zu komplizierten und umfassenden Knowledge Management (KM) Systemen. Es muss eine Abwägung getroffen werden.

Mögliche Kriterien für Spezifikationen: Das Dokument- und Datenmanagementsystem muss robust, zuverlässig und sicher sein, tiefe Kosten für die Beschaffung und Installation sowie für den Unterhalt des Systems aufweisen, einfach zu bedienen sein, zukünftige Entwicklungen flexibel integrieren können und integrierbar in umfassendere Wissensmanagementsysteme sein.

Datenerhebung und Speicherung: Die Konzepte, welche für die Datenerhebung- und Speicherung gewählt werden, müssten in ein umfassenderes Datenmanagementsystem integriert werden können. Dies müsste bei allen Versuchen berücksichtigt werden.

Gegenwärtiger Stand im Go-Leise: Für die Phase 1 des Projekts Go-Leise wurde eine Sharepoint Datenbank erstellt, diese beinhaltete alle Grundlagenliteratur, erstellte Berichte, Protokolle, Sitzungspräsentationen und dergleichen. Parallel zu Go-Leise hat SBB Infrastruktur, Lärm eine Beurteilung für das Dokument- und Datenmanagement unternommen und hat TrindyRail¹¹ (auf Basis der Opensource Software dokuwiki) als Favorit bestimmt, eine kollaborative Knowledge Management (KM) Cloud für Gleisinnovationen für dynamische Fragestellungen.

Ergänzen zu einer Forschungsumgebung: Ideal wäre, wenn ein Dokument- und Datamanagementsystem nicht nur von SBB-seitigen Projekten verwendet würde, sondern von allen Projekten und Daten, welche im Bereich Lärm-, Erschütterungen und Asset Management gesammelt werden, idealerweise auf internationaler Ebene. Da dies sehr aufwendig ist, könnte in einem ersten Schritt nur Lärm und Erschütterungen angegangen werden sowie eine Beschränkung auf nationale Projekte. Diese Forschungsumgebung müsste von einer Institution gepflegt und eine langfristige Finanzierung sichergestellt werden.

Nächste Schritte: Zumindest schweizweit müsste ein gemeinsames System gefunden werden, in welchem Dokumente und Daten allen verfügbar sind. Beteiligte Stellen sind neben der SBB auch die Bundesämter für Verkehr und Umwelt, die ETH Zürich sowie die EPF Lausanne, die Empa und weitere Forschungsanstalten. Dies ist zwar keine Wissenslücke als solche, unterstützt aber massgeblich den Erfolg der weiteren Phasen von Go-Leise. Es müsste deshalb ein separates Projekt mit diesem Inhalt gestartet werden.

¹¹ trindyrail.cf (Testinstallation zur Zeit für SBB-interne Zwecke)

8. Wissenslücken und Vorschläge für weitere Arbeiten

Grundlagenberichte:

- Müller-BBM, dBVision, M+P: D0: Go-Leise final report
- Müller-BBM, dBVision, M+P, Minutes of the Go-Leise workshop on June 1, 2016 in Bern
- SBB: J. Oertli und M. Hafner, Go-Leise, ein Projekt der SBB zur Optimierung der Fahrbahn bezüglich Lärm, Erschütterungen und Asset Management. Publikation im Tagungsband Bahnakustik 2016: Infrastruktur, Fahrzeuge, Betrieb von Müller-BBM

Zahlreiche Wissenslücken: Es wurden rund 70 Wissenslücken und innovative Ideen identifiziert. Diese wurden priorisiert und für die 16 erstklassierten ein Vorgehen definiert. Die wichtigsten Themen und Vorgehensweisen sind:

• Schienenrauheit:

- Bestimmung der Wachstumsraten von Schienenrauheit, sowie die Ursachen hierfür.
Projektvorschlag: Messprogramm der Schienenrauheit auf verschiedenen Teststrecken über mehrere Jahre. Neben der Rauheit werden lokal auch weitere Parameter (Verkehr: Geschwindigkeit/ Gewicht/ Fahrzeugtypen/ Radzustand; Gleis: dynamische Eigenschaften (TDR)/ Steifigkeit der Schienenzwischenlagen/ Schotterdicke/ Bodenbeschaffenheit/ Schienenbefestigung) erfasst, um mögliche Korrelationen und daraus Rückschlüsse für vergleichbare Strecken und eine optimale Schleifstrategie zu finden.
- Das Monitoring der Schienenrauheit und die Einhaltung eines Grenzwertes sind gemäss BGLE obligatorisch. Unklar ist, wie eine optimale Schleifstrategie (Geschwindigkeit/ Häufigkeit/ Zyklus) bestimmt werden kann. Hierzu muss die Variabilität der Schienenrauheit sowohl quer über den Schienenkopf wie auch längs entlang einer Schiene, sowie die Zunahme der Schienenrauheit über die Zeit (siehe vorheriger Punkt) bekannt sein.
Projektvorschlag: Monitoring-Projekt, in welchem die Möglichkeiten und Grenzen verschiedener Messmethoden evaluiert werden. Für konkrete Situation werden die Messresultate kalibriert. Ziel ist die ideale Messmethodik für netzweite und lokale Analysen zu definieren.

• Schwellenbesohlung:

- Bestimmung der Gründe für die Zunahme des Lärms wenn Schwellenbesohlung (USP, under sleeper pads) eingebaut wird sowie die Suche nach Möglichkeiten, diese Lärmzunahme zu verhindern.
Projektvorschlag: Überprüfung der Lärmzunahme durch erneute Messungen und Simulation in Modellen. Verstehen der Ursachen entweder im Modell oder bei Bedarf durch zusätzliche Messungen (Schwingungsmessungen der Schwellen und Schienen/ TDR/ Erschütterungen) auf einer neuen Teststrecke mit USP. Idealerweise werden verschiedene USP Typen, welche sich in ihrer Steifigkeits- und Dämpfungseigenschaften unterscheiden,

geprüft. Das Zusammenspiel zwischen USP und unterschiedlichen Schienenzwischenlagen ist ebenfalls zu berücksichtigen.

- **Schienenzwischenlagen:**

- Eine optimale Schienenzwischenlage dämpft die Schwingungen frequenz- und lastabhängig derart, dass die Anforderungen von Lärm, Erschütterungen und Asset Management gleichzeitig erfüllt werden. Von Vorteil wäre eine tiefe Steifigkeit bei tiefen Frequenzen und eine hohe Steifigkeit bei hohen Frequenzen. Dies kann erreicht werden, indem zum Beispiel das Material oder das Design der Schienenzwischenlage verändert wird.

Projektvorschlag: Neue Materialien und Geometrien für Schienenzwischenlagen entwickeln und prüfen.

- Zur Bestimmung einer optimalen Schienenzwischenlage ist es notwendig, die relevanten Parameter und deren messtechnische Erfassung zu bestimmen.

Projektvorschlag: Schritt 1: Erprobungen im Labor um statische und dynamische Steifigkeit sowie Dämpfung sowie allenfalls weitere Parameter zuverlässiger zu messen und mit den Angaben der Hersteller vergleichen. Schritt 2: Verschiedene Schienenzwischenlagen auf einer Versuchsstrecke testen, wobei die Laborresultate mit der TDR (Track Decay Rate) und den Übertragungsverlusten zur Schwelle verglichen werden.

- **Befestigung:**

- Die Dimensionierung des Befestigungssystems beeinflusst die Schwingung der Schiene (z.B. die pinned-pinned mode), die Ausbreitung der Welle entlang der Schiene und die Dämpfung der Schiene.

Projektvorschlag: Projekt zur Optimierung der Befestigung. Dies kann neue Materialien und/oder ein neues Design beinhalten.

- **Schwellen:**

- Die Bestimmung der relevanten Eigenschaften von Schwellen (z.B. Prestress) und wie diese mit der Gleisdynamik interagieren. Eine Schwelle mit einer hohen inneren Dämpfung oder eine tiefe Steifigkeit bei tiefen Frequenzen und eine hohe Steifigkeit bei hohen Frequenzen könnte den Lärm vermindern, welcher von Schwellen abgestrahlt wird. Eine solche Schwelle könnte unter Umständen auch den zusätzlichen Lärm vermindern, welcher bei der Verwendung von Schwellenbesohlungen beobachtet wird. Die neue Schwellenkonstruktion könnte völlig neue Materialien oder Geometrien beinhalten.

Projektvorschlag: Schritt 1: Mit einem Erprobungsprogramm, in dem die Schwingungen und Verschiebungen auf bestehenden Schwellen in vergleichbarer Umgebung gemessen werden, wird das Wissen über das Schwingungsverhalten von Schwellen vergrössert. Die Schwingungen der Schwelle im Gleis werden mit der Dynamik isolierter Schwellen verglichen. Schritt 2: Projekt, in dem neue Schwellendesigns entwickelt und getestet werden.

- **Alterung:**

- Bestimmung des Einflusses der Alterung auf die einzelnen Komponenten. Damit Produkte betreffend Alterung schneller getestet werden können, ist eine Methode notwendig, mit der Gleiskomponenten künstlich rasch gealtert werden können.

Projektvorschlag: Schritt 1: Suche oder Entwicklung eines Alterungsprozesses, welcher unter Laborbedingungen den tatsächlichen Alterungsprozess beschleunigt simuliert.

Schritt 2: Projekt zum Vergleich der Alterung im Labor mit der Alterung im Gleis. Schritt 3: Erprobung von unterschiedlich künstlich gealterten Elementen und Vergleich btr. Lärm-, Erschütterungs- und Asset Managementkriterien entweder im Labor oder unter realen Bedingungen.

- **Asset Management:**
 - Es gibt auf dem SBB Netz nur wenige historische Daten, welche bei einer umfassenden RAMS Analyse verwendet werden könnten. Für eine umfassende und vollständige Optimierung werden solche Daten notwendig.
Projektvorschlag: Schritt 1: Die notwendigen Daten definieren und überprüfen, ob diese aus bestehenden Daten hergeleitet werden können. Schritt 2: Ein Projekt innerhalb Infrastruktur starten, bei dem die notwendigen Daten für RAMS und LCC auf eine optimale Art und Weise gesammelt werden.
 - Bestimmung der optimalen Erneuerungszeitpunkte für die einzelnen Gleiskomponenten. Hierzu müssen die bestehenden Regeln überprüft werden.
Projektvorschlag: Projekt, indem die bestehenden Regeln für den Ersatz von einzelnen Gleiskomponenten oder die gesamte Oberbauerneuerung überprüft werden. Hierzu können mittels „big data“ Analysen die Daten des Diagnosefahrzeugs mit Erneuerungszeitpunkten korreliert werden.
- **Gesamtoptimierung:**
 - Definition einer Funktion, mit der Optimierungen durchgeführt werden können.
Projektvorschlag: Fall 1: Beurteilen, ob es bestehende Funktionen von ausreichender Qualität für die Bestimmung der Performance des Gleises gibt und ob diese mit den fehlenden Elementen z.B. für Lärm oder für Erschütterungen ergänzt werden könnten. Das Ziel könnte ein Einzahlwert sein. Fall 2: Die Funktion aus den relevanten physikalischen Gesetzmäßigkeiten herleiten, sowohl mit Hilfe von Erkenntnissen aus bestehender Literatur, als auch durch spezifische Tests im Gleis. Eine Gewichtung der Elemente der Funktion kann lokale Präferenzen oder Rahmenbedingungen abbilden.
- **Statistik:**
 - Es besteht in der Regel eine grosse Variabilität bei Versuchen mit Gleiskomponenten. Es gibt zur Zeit keine Richtlinien im Eisenbahnsektor, wie vorgegangen werden kann, um diese Variabilität sinnvoll zu berücksichtigen. Eine solche Richtlinie müsste statistische Elemente umfassen, wie z.B. die Anzahl Wiederholungen und statistische Testverfahren. Zum Beispiel müssen Methoden gefunden werden, um frequenzabhängige Kurven miteinander zu vergleichen wie etwa verschiedene TDR Kurven.
Projektvorschlag: Zusammenstellung einer umfassenden Richtlinie für die Erprobung im Bereich Lärm und Erschütterungen. Diese Richtlinie soll statistische Verfahren und Design of Experiments Wissen mit Ingenieur- und Messerfahrung kombinieren.
- **Testabschnitte:**
 - Um die Versuche zu vereinfachen, müssen konkrete Testabschnitte definiert werden, bei denen möglichst viele Parameter bekannt sind.
Projektvorschlag: Kriterien für Testabschnitte definieren, die Möglichkeiten prüfen und eine oder mehrere Optionen wählen.

- **Innovation:**

- Eine nicht diskrete oder sogar zufällige Auslegung des Gleises könnte die Bildung von bestimmten Wellen verhindern (z.B. in der pinned-pinned Frequenz). Diese nicht diskrete Auslegung könnte erreicht werden mit unterschiedlichen Schwellenabständen oder – falls die Abstände gleich gelassen werden, mit unterschiedlicher Geometrie (Breite) der Schienenzwischenlagen von einer Schwelle zur nächsten. Auch könnte die Steifigkeit der Schienenzwischenlagen zufällig von einer Schwelle zur nächsten gewählt werden.

Projektvorschlag: Schritt 1: Simulierung der Auswirkungen von zufälliger Abstützung oder wechselnde Steifigkeiten einzelner Komponenten auf Lärm und Erschütterungen. Dies müsste für verschiedene Verkehre durchgeführt werden. Schritt 2: Auf Testabschnitten unterschiedliche Konfigurationen von Steifigkeit und Dämpfung einbauen und den Lärm und die Erschütterungen messen, sowie die Auswirkungen auf Asset Management bestimmen und mit den Simulationsresultaten vergleichen.

- Untersuchung des Einflusses von Reibungsmodifikatoren auf das Wachstum der Schienenrauheit.

Projektvorschlag: In Versuchsabschnitten mit und ohne Reibungsmodifikatoren den Lärm, die Erschütterungen sowie die Schienenrauheit in periodischen Abständen über eine längere Zeitdauer messen. Dies könnte mit einem Versuch kombiniert werden, in dem das Wachstum der Rauheit auf Schienen allgemeine untersucht wird.

- **Wissensmanagement:**

- Um den Erfolg von weiteren Phasen im Go-Leise zu unterstützen ist ein Wissens- und Datenmanagement sehr wichtig. Im Go-Leise sind die theoretischen Ansätze und Kriterien dazu erarbeitet worden und eine Plattform (TrindyRail) probehalber erstellt worden.

Projektvorschlag: In Zusammenarbeit mit anderen beteiligten Stellen (u.a. SBB, Bundesämter, Empa, ETH Zürich und Lausanne) soll eine gemeinsame Wissens- und Datenmanagementplattform erstellt werden. Es müssen verantwortliche Institutionen und Personen definiert werden und ein Budget bereitgestellt werden.

9. Fazit

Gesamtoptimierung wichtig: Die Bedeutung einer Gesamtoptimierung wurde bestätigt – in sehr vielen Aspekten der Fahrbahn bestehen unterschiedliche Anforderungen betreffend Lärm, Erschütterungen und Asset Management. Es stehen zum Teil gegenläufige Absichten im Fokus der einzelnen Themen. Mit der Multi-Criteria Analysis konnte aufgezeigt werden, wie diese unterschiedlichen Aspekte miteinander verglichen und optimiert werden könnten, um die offensichtlichen Nachteile einer isolierten Betrachtungsweise zu umgehen.

Wissenslücken müssen geschlossen werden: Als Voraussetzung für eine Gesamtoptimierung müssen eine Reihe von Wissenslücken geschlossen werden. Diese beinhalten nicht nur technische, sondern auch andere Themen wie Statistik oder Wissensmanagement.

III. Nächste Schritte

Wissenslücken schliessen: Aufgrund der vorliegenden Studie ist es sinnvoll als nächsten Schritt die Wissenslücken zu schliessen. Einzelne Themen sind bereits etwas konkretisiert. Der Stand Ende 2016 ist:

- **Schienenrauheit:** Die SBB Infrastruktur hat ein Projekt zur Erhebung der Schienenrauheit mittels Achslagerbeschleuniger am neuen gezogenen Diagnosefahrzeug begonnen. Funktioniert die Erhebung, wird es möglich sein, die Schienenrauheit mit anderen gemessenen Parametern des Diagnosefahrzeugs zu korrelieren und weil jede Strecke zweimal jährlich abgefahren wird, dies mit dem Wachstum der Schienenrauheit in Verbindung zu bringen.
- **Schienenzwischenlagen:** Ein Antrag für die Entwicklung von neuen Materialen für Schienenzwischenlagen, welche mit einer optimalen Dämpfung bei verschiedenen Frequenzen sowohl den Unterhalt als auch den Lärm reduzieren sollen, ist bereits gestellt und für die ersten Phasen bewilligt worden. Dieses Projekt wird von der EPFL (École polytechnique fédérale de Lausanne) geleitet. Beteiligt ist neben der SBB auch die Empa (Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt). Weitere Anträge und Projekte sollen in den nächsten Jahren folgen, mit dem Ziel, bis 2020 Massnahmen und Methoden soweit bereit zu haben, so dass sie im Rahmen des BGLE (Bundesgesetz zur Lärmsanierung der Eisenbahnen) umgesetzt werden können.
- **Reibungsmodifikatoren und Wachstum Schienenrauheit:** Weiter besteht SBB-internes Interesse das innovative Thema Reibungsmodifikatoren und Wachstum der Schienenrauheit anzugehen. Erste interne Gespräche mit Beteiligung von Rollmaterial- und Infrastrukturspezialisten sind durchgeführt worden.

Weitere Priorisierung notwendig: Die übrigen Projekte müssen in Zusammenarbeit mit den Bundesämtern für Umwelt und Verkehr priorisiert und koordiniert werden. Vorgeschlagene Kriterien für die Projektauswahl sind:

- Bedeutung für mögliche Umsetzung innerhalb BGLE Zeitrahmen
- Bedeutung als Grundlage für andere Arbeiten
- Kapazitäten von SBB (Lärm und Fahrbahn)
- Andere Arbeiten in Ressortforschung (z.B. bereits vergeben oder geplant)

SBB Beteiligung bei Projekten sinnvoll: Diese Arbeiten müssen nicht von der SBB ausgeführt werden, jedoch ist es sinnvoll die SBB bei den Arbeiten zu integrieren, damit jeweils die SBB-seitigen Rahmenbedingungen und Umsetzungsmöglichkeiten berücksichtigt werden.

Finanzierungsquellen: Gelder aus der Ressortforschung gemäss BGLE sind eine mögliche Finanzierungsquellen. Für Aspekte des Engineerings einzelner Massnahmen wäre auch zu prüfen, ob nicht

finanzielle Mittel, welche für Umsetzung der Massnahmen vorgesehen sind, verwendet werden können.

Koordination notwendig: Viele Beteiligte sind an der Eisenbahnlärmforschung involviert. Eine Koordination der Arbeiten der verschiedenen Players (Bund, SBB, Empa, andere Forschungsinstitute) ist deshalb unabdinglich.

Überprüfung ob Go-Leise für weitere Fälle sinnvoll: Der vorliegende Bericht beschränkt sich auf die gerade Strecke. Es muss überprüft werden, ob ein analoges Projekt für Kurven, Weichen und andere Besonderheiten wie Schienenstösse durchgeführt werden sollte. Ein solches Projekt würde die gleichen Phasen enthalten, jedoch zeitlich verschoben durchgeführt werden, das heisst, es müsste wieder mit einer analogen Phase 1 (Überblick, Wissenslücken) begonnen werden. Viele Elemente wie zum Beispiel die Überlegungen zur Durchführung der Gesamtoptimierung (Multi-Criteria Analysis) könnten jedoch übernommen werden.