

Novel Rail Pads for Improved Noise Reduction and Reduced Track Maintenance

Zusammenfassung der Forschungsergebnisse zur Projektphase I (Monate 1-24)

Dr. Chris Plummer

Prof. Holger Frauenrath

1. Hintergrund und Ziele des Projekts

Zum Schutz gegen mechanische Beschädigung des schweizerischen Eisenbahnnetzes ist eine elastische Zwischenlage (*Rail Pad*) zwischen dem Schienenfuss und der Standard-Betonschwelle eingebaut, um die Schwingungen der Schiene bei Belastung sowie ihre Dehnung bei Temperaturschwankung aufzufangen. Die resultierende Schwingungsfreiheit der Schiene führt jedoch zu einer Erhöhung des Rollgeräusches, die bei normalen Zuggeschwindigkeiten hauptsächlich auf die Rauigkeit des Rad-Schiene Kontaktes zurückzuführen ist. Obwohl der Schutz des Bahnoberbaus durch mit Zwischenlagen, die weicher sind als die von der SBB aktuell gebrauchten „harten“ Zwischenlagen, wesentlich verbessert werden könnte, wäre die zusätzliche Lärmbelastung aus ökologischer Sicht unakzeptabel.

Das Gesamtziel des vorliegenden Projekts ist es, neuartige Zwischenlagen zu entwickeln, die den mit kommerziell verfügbaren „weichen“ Zwischenlagen erreichbaren Schutz des Bahnoberbaus ermöglichen, aber gleichzeitig das Lärmniveau der „harten“ Zwischenlagen aufrechterhalten oder sogar verbessern. Konkret soll eine Lärmverminderung von 3–4 dB (A) im Vergleich zur „weichen“ Zwischenlagen erzielt werden, was einer Lärmverminderung von bis zu 1 dB (A) im Vergleich zur „harten“ Zwischenlagen entspricht. Ferner sollen die neuartigen Zwischenlagen mit der bestehenden Infrastruktur kompatibel bleiben und im Vergleich zu anderen möglichen Lösungen kostengünstig sein

Unser Ansatz basiert auf der Prämisse, dass diese ansonsten widersprüchlichen Anforderungen an Lärmverminderung und Schutz des Bahnoberbaus nur durch die kombinierte Optimierung von Geometrie, Steifigkeit und Dämpfungsverhalten der Zwischenlage erreicht werden kann. Dazu ist ein stark frequenzabhängiges mechanisches Verhalten notwendig.

Die jetzt abgeschlossene Projektphase I sollte klare, wissenschaftliche Designkonzepte und Kriterien für die Auswahl geeigneter Materialien für die folgende Entwicklung neuartiger Zwischenlagen in den Projektphasen II und III liefern. Dazu ist ein grundlegendes Verständnis der Rolle der Zwischenlagen bei Geräuschentwicklung und Bahnoberbaubeschädigung erforderlich. Die Zwischenlageeigenschaften und das dynamische Verhalten der Bahn stehen jedoch in einem komplexen hierarchischen Zusammenhang, der sich über zahlreiche Komponenten und mehrere Längenskalen erstreckt. Die Hauptaufgabe der Projektphase I bestand daher darin, neue analytische und numerische Modelle zu entwickeln, um diese Zusammenhänge zu erfassen.

2. Zusammenfassung der Ergebnisse der Projektphase I gemäss Kapitel 3.1 des Vertrags

2.1 Mechanische und chemische Charakterisierung der bestehenden Zwischenlagen

Der Ausgangspunkt unserer Arbeiten war, uns eine umfassende Übersicht über die vorhandene wissenschaftliche und Patentreliteratur zu kommerziellen Zwischenlagematerialien und Geometrien, Prüfmethoden und Standards, aktuellen theoretischen und Modellierungsansätzen, sowie Polymeren und polymerbasierten Verbundwerkstoffen mit Potenzial für Zwischenlagen zu verschaffen. Des Weiteren wurden existierende Zwischenlagen umfassend hinsichtlich ihrer chemischen, thermomechanischen und mechanischen Eigenschaften charakterisiert.

Nach dem Stand der Technik sollten Zwischenlagen eine geringe Steifigkeit und sofortige elastische Reaktion auf starke statische oder quasi-statische Druckbelastungen aufweisen, um einen wirksamen Schutz des Bahnoberbaus zu gewährleisten. Um hochfrequente Verformungen, die Lärm verursachen, zu unterdrücken, sollte die dynamische Steifigkeit der Zwischenlagen idealerweise mit der Verformung stark zunehmen.

Auf Basis unserer experimentellen Untersuchungen wurde bestätigt, dass keines der derzeit in kommerziellen Zwischenlagen verwendeten Materialien eine erhebliche Dämpfung bei Schallfrequenzen (20–20'000 Hz) aufweist, da der Schwerpunkt in der Industrie auf der Kontrolle der Steifigkeit mittels der Geometrie liegt.

Darüber hinaus haben wir theoretische und experimentelle Beweise dafür geliefert, dass eine signifikante Erhöhung der dynamischen Eigensteifigkeit des Zwischenlagematerials mit zunehmender Frequenz im akustischen Bereich und der damit einhergehenden Erhöhung der Dämpfung für die Lärmverminderung von großem Vorteil sein sollte. Die Position und Schärfe dieses Übergangs kann dann angepasst werden, abhängig davon, ob die Steifigkeit oder Dämpfung in einem bestimmten Frequenz- und Temperaturbereich optimiert werden soll. Das kann durch die Verwendung von zwei oder mehr unterschiedlichen Materialkomponenten in Form von Verbundwerkstoffen erreicht werden.

2.2 Modellierung der Eigenschaften der Zwischenlage und experimentelle Validierung der Modelle

Unser schrittweiser Ansatz für die Modellierung begann mit einer analytischen Darstellung der experimentell bestimmten frequenzabhängigen Elastizität und Dämpfung gängiger und potenzieller Zwischenlagematerialien. Dies ermöglicht die numerische Simulation einer Zwischenlage unter realistischen Betriebsbedingungen mit Berücksichtigung ihrer Mikrostruktur und makroskopischen Geometrie. Unser Ansatz geht somit weit über die konventionelle Praxis die Zwischenlage als „Punktelement“ mit frequenzunabhängigen mechanischen Eigenschaften zu behandeln. Die Ergebnisse wurden mit Messdaten für Zwischenlagen aus verschiedenen Materialien validiert und auf eine kompakte dreidimensionale Form reduziert, die für die folgenden Simulationen auf Systemebene besser geeignet ist.

Zunächst erstellten und validierten wir dreidimensionale Simulationen einer experimentellen Drei-Schwellen-Einheitszelle im Labormaßstab, auf Basis detaillierter Analysen nicht nur der Zwischenlagen, sondern auch der anderen Systemkomponenten (Schienen, Schwellen, Befestigungssysteme, Schotter). Die anfängliche Modellbelastungsbedingungen wurden später an Messdaten angepasst, die bei Zugdurchfahrten erhalten wurden. Die Messdaten haben gezeigt, dass die seitliche Schienenbelastung etwa 10% der vertikalen Belastung beträgt, was für die Beurteilung der für die Lärmentwicklungen wichtigsten Schwingungsmodi relevant ist. Des Weiteren untersuchen wir Verbesserungen der Simulation des Schotters.

Das in den Simulationen vorhergesagte Schwingungsverhalten und das resultierende akustische Verhalten der Einheitszelle eine durchweg hervorragende Übereinstimmung mit experimentellen Daten für Zwischenlagen aus verschiedenen Materialien. Das Modell reicht daher weitgehend aus, um die wichtigsten Lärmquellen zu identifizieren und sie mit den Eigenschaften der Zwischenlagen zu korrelieren. Wir konnten so unter anderem bestätigen, dass weiche, poröse Zwischenlagen zu einem Lärmniveau führen, das um 3 dB höher ist als bei den harten SBB Zwischenlagen.

Schließlich wurde ein Modell des Bahngleises in voller Größe entwickelt, indem die Drei-Schwellen-Zelle auf bis zu 18 Schwellen erweitert und mit einem vollwertigen akustischen Simulationsmodell gekoppelt wurde, dem zuvor von der Empa entwickeltes und validiertes „Oberbau-Simulations-Tool“ (OST). Die entsprechenden Vorhersagen wurden anhand Feldmessungen auf einem Gleisabschnitt in der Nähe von Winterthur, der mit harten Zwischenlagen ausgestattet war, erfolgreich validiert.

Es wurde festgestellt, dass das 18-Schwellen-Modell die Frequenz und Größe des ersten Schienenresonanzpeaks erfasst und eine genaue Darstellung der Größe des Frequenzgangs zwischen 600 und 2 kHz liefert, der für das Rollgeräusch am relevantesten ist. Bei niedrigeren Frequenzen blieben einige Diskrepanzen bestehen, die auf das Vorhandensein von Schwellensohlen (*under sleeper pads*, USPs) im für die Feldtests verwendeten Gleisabschnitt zurückzuführen waren, wohingegen das Modell einen direkten Kontakt zwischen Schwellen und Schotter annahm. Eine realistischere Simulation des Schotters unter Einbeziehung von USPs in das Modell, die für Projektphase II geplant ist, sollte uns ermöglichen die Fähigkeit des Modells zu verbessern, insbesondere in Bezug auf die Oberbaubeschädigung. **Das Modell reicht jedoch aus, um die Auswirkung verschiedener Zwischenlagen auf die Schwellenbelastung, Schienenbelastung und die Lärmentwicklung zu bewerten und wird daher als validiert betrachtet.**

2.3 Neuer Ansatz zur Bestimmung der Schienenabklingrate (TDR) unter realen Betriebsbedingungen

Zu den Feldmessungen in der Nähe von Winterthur gehörten Messungen der Schienenabklingrate (*track decay rate*, TDR) nach der europäischen Norm EN 15641. Die TDR dient als Maßstab für die Abnahme von Schwingungen entlang der Schienen, die durch einen Shaker hervorgerufen wurden. **Die Standard-TDR-Messung wurde in diesem Projekt durch ein neues Messprotokoll ergänzt, das die Dämpfung verschiedener Schwingungsmoden besser unterscheidet, indem sowohl die realen als auch die imaginären Teile der Wellenzahl berücksichtigt werden.** Dieser Ansatz ermöglicht es, die Abklingrate in Abhängigkeit von der Frequenz mit bestimmten Schwingungsmodi in Verbindung zu setzen, und bietet deswegen ein tieferes physikalisches Verständnis der zugrundeliegenden Mechanismen als die übliche TDR-Messung. Auf Basis der Feldmessungen haben wir bestätigt, dass die beim neuen Ansatz erhaltenen imaginären Teile der Wellenzahl völlig in Einklang mit der Standard-TDR stehen. **Daher betrachten wir die neu entwickelte Methode als unter realen Betriebsbedingungen validiert.**

2.4 Übersicht möglicher Materialien für Zwischenlagen und Selektion von maximal drei Materialklassen

Unsere Ergebnisse aus analytischen Modellen und Simulationen zeigten deutlich, dass Zwischenlagen mit hoher Dämpfung zu einer signifikanten Reduzierung der Geräuschentwicklung bei mittleren und hohen Frequenzen führen können. Es wurde ferner bestätigt, dass keine der aktuell gebräuchlichen Zwischenlagen eine wesentliche Dämpfung bei akustischen Frequenzen zeigt, unabhängig von ihrer Steifigkeit, Geometrie oder Morphologie.

Deshalb ist unsere Design-Strategie steife und weniger steife elastische Strukturmaterialien mit solchen Materialien zu kombinieren, die hohe Dämpfung zeigen. Drei Materialien wurden auf dieser Grundlage identifiziert: Poly(ethylen vinylacetat) (EVA), geschäumtes Polyurethan (PU), und Polyisobutylen (PIB).

EVA und PU werden bereits in Zwischenlagen eingesetzt und erfüllen grundlegende Betriebskriterien wie Temperaturbeständigkeit und Verschleißfestigkeit. PIB wird häufig als Dämpfungsmaterial in der Automobil- und Luftfahrtindustrie benützt. Diese Polymere bieten uns nicht nur eine sehr breite Palette von Steifigkeiten und Dämpfungseigenschaften, sondern auch die Möglichkeit ihre frequenzabhängigen Eigenschaften durch chemische oder physikalische Modifizierung zu modifizieren. Zum Beispiel kann die Breite des Dämpfungsübergangs durch Kombinationen mehrerer modifizierter PIB-Materialien mit verschiedenen Dämpfungsmaxima kontrolliert werden. Ein Verbundwerkstoffansatz erlaubt uns darüber hinaus nicht nur, die globale Steifigkeit und Dämpfung zu manipulieren, sondern auch die lokalen Eigenschaften der Zwischenlagen sowie ihre Anisotropie zu optimieren.

Mit der rationalen Selektion von EVA, PU und PIB ist somit das Ziel der ersten Projektphase erreicht worden, die Grundlage für die folgende Entwicklung von Verbundwerkstoffen für neue Schienenzwischenlagen zu schaffen. Unser Ansatz verleiht uns eine große Designflexibilität, einschließlich der Möglichkeit, Strategien zu inkorporieren, die auf der Optimierung der Geometrie beruhen.

2.5 Prognose zur akustischen Wirkung der neu zu entwickelnden Zwischenlagen

Wir haben bereits im Rahmen der Projektphase I, unter Vorwegnahme von Arbeitspaketen und Zielen der Projektphase II, eine erste Serie an Modellzwischenlagen hergestellt und in der Drei-Schwellen-Zelle getestet. Diese Zwischenlagen bestehen entweder aus mit Ruß gefüllten PIB-Partikeln, die in einer EVA-Matrix dispergiert sind, oder aus makroskopischen Kern-Schale-Strukturen mit einer steifen EVA Außenschale für maximale mechanische Unterstützung und Stabilität in Bezug auf vertikale Belastung und Torsion und einem frequenzabhängigen PIB Kern, der für Dämpfung sorgt.

Unsere Tests haben zum einen klar gezeigt, dass derartige Verbundwerkstoffe für Zwischenlagen praktisch verwendet werden können und dass sie die vorherrschenden akustischen Schwingungen der Schiene dämpfen, was eine der Schlüsselhypothesen des Projekts bestätigt.

Zum anderen haben wir hochdämpfende Zwischenlagen hergestellt, die das normalisierte Lärmniveau der Drei-Schwellen-Zelle (Anregung mit einem Shaker) um ungefähr 1 dB gegenüber den harten SBB-Zwischenlagen reduzierten, trotz ihrer reduzierten statischen Steifigkeit. Dieses Ergebnis unterstreicht die Gültigkeit und das Potenzial des gewählten Ansatzes.

Diese Messungen demonstrieren ferner nicht nur die Wirksamkeit verschiedener Zwischenlagen, sondern ermöglichen es auch, Spitzen des Lärmniveaus mit bestimmten Schwingungsarten zu identifizieren, die bei Beschleunigungsmessungen auftreten. Dies ist für den weiteren Projektverlauf von entscheidender Bedeutung, da es Hinweise darauf gibt, wie die Zwischenlagen in Bezug auf Lärmverminderung und Oberbauschutz durch Kontrolle der vertikalen Steifigkeit, Schersteifigkeit, Torsionssteifigkeit und des Dämpfungsverhaltens optimiert werden können.

2.6 Prognose zum Unterhaltsaufwand beim Bahnoberbau

Unsere Simulationen haben bedeutende neue Erkenntnisse darüber geliefert, wie sich Zwischenlagen auf statische und niederfrequente Schwellen-Schotter-Interaktionen auswirken, die für Bahnoberbaubeschädigung und insbesondere für Schotterverschleiß und das Setzverhalten des Schotters entscheidend sind.

Aufgrund einer detaillierten Untersuchung von Literaturdaten und Modellen für die Schottersetzungsgeschwindigkeit kommen wir zu dem Schluss, dass die Bahnwartungsintervalle in erster Näherung umgekehrt proportional zur Anzahl und Intensität der mit den Zugvorbeifahrten verbundenen Belastungszyklen sind. Daher konnten wir den Einfluss der Zwischenlagen auf die Wartungsintervalle in Bezug auf die Spitzenbelastungen im Schotter und die Belastungsverteilung unter den Schwellen anhand der harten SBB-Zwischenlagen quantifizieren. Wir schätzen, dass die Wartungsintervalle um 12% verlängert werden können, wenn die harten Zwischenlagen durch die weichere, aber hochdämpfende Zwischenlagen ersetzt werden, die in der Drei-Schwellen-Zelle zu einer Lärmverminderung von 1 dB führte.

Wir haben diesen Ansatz in der Folge erweitert, um das Verhalten der Schwelle und des Schotters bei einer Zugvorbeifahrt zu simulieren, und werden ihn weiter anpassen, um auch USPs zu berücksichtigen. USPs waren kein ursprünglicher Schwerpunkt des vorliegenden Projekts, aber die Analyse der Feldmessungen ergab, dass es möglich sein sollte, die Leistung von Zwischenlagen und USPs unabhängig voneinander zu optimieren. Zum Beispiel können die USPs die lokalen statischen Schotterbelastungen um bis zu 30% reduzieren, während sie nur sehr wenig das Verhalten im akustischen Frequenzbereich beeinflussen.

2.7 Nachweis der Untauglichkeit aktuell gebräuchlicher Materialien für die Projektanforderungen

Unsere chemische und thermomechanische Charakterisierung hat klar ergeben, dass einige Aspekte des Standes der Technik bei der Entwicklung von Zwischenlagen überarbeitet werden müssen. Wie schon in Abschnitt 2.1 erwähnt, liegt der Schwerpunkt in der aktuellen Praxis auf der Steifigkeitskontrolle, weshalb keine der derzeit in kommerziellen Zwischenlagen benutzten Materialien eine genügend gute Dämpfung bei akustischen Frequenzen aufweisen. **Wir haben nun ausdrücklich gezeigt, dass eine signifikante Erhöhung der Steifigkeit mit zunehmender Frequenz im akustischen Bereich und die damit einhergehende Dämpfung für Lärmverminderung von großem Vorteil sein sollten.**

Viele Materialien zeigen ein solches Verhalten, sind jedoch nicht für die alleinige Verwendung in Zwischenlagen geeignet, da sie unter statischen Bedingungen keine ausreichende Elastizität besitzen. Daher müssen sie mit anderen Materialien wie EVA oder PU in Verbundwerkstoffen kombiniert werden. **Soweit es uns (auch nach Diskussionen mit zahlreichen Industriepartnern) bekannt ist, gibt es bisher in der Industrie keine Versuche, hochdämpfende Zwischenlagen auf der Basis von Verbundwerkstoffen herzustellen.**

2.8 Bestätigung oder Korrektur zur Ausgangshypothese, dass mit neuen Zwischenlagen der Lärm und Unterhaltsaufwand gegenüber aktuellen Zwischenlagen reduziert werden können

Im Laufe der Projektphase I konnten wir alle Ausgangshypothesen bestätigen. Wir haben sowohl theoretisch als auch experimentell gezeigt, dass eine Lärmverminderung von bis zu 3 dB mit hochdämpfenden weichen Verbundwerkstoffzwischenlagen möglich ist, die auch einen wesentlich besseren Oberbauschutz im Vergleich zu gängigen harten Zwischenlagen gewährleisten sollten.

2.9 Benennen der wichtigsten Chancen und Risiken bei der weiteren Entwicklung der Zwischenlagen

Unsere Strategie zur Entwicklung neuartiger Zwischenlagen basiert auf der Kombination eines repräsentativen steifen Materials (EVA), eines weichen Materials (poröses PU) und eines Materials (PIB), das hohe Dämpfung im Schallfrequenzbereich zeigt. Wir haben bereits in Projektphase I erste hochdämpfende Modellzwischenlagen hergestellt, die eine signifikante Lärmverminderung bei der Drei-Schwellen-Zelle aufweisen, obwohl sie weicher sind als die Referenzzwischenlagen. **Aus diesem Grund sehen wir am Ende der Projektphase II nur ein geringes Risiko die die erfolgreiche Entwicklung von Prototypen, die den Lärm bei Feldmessungen erheblich reduzieren und deren Steifigkeit mit verkürzten Bahnwartungsintervallen einhergeht.**

Die zur rationellen Weiterentwicklung unserer Zwischenlagen unabdingbaren Modelle sind in Bezug auf das Mittel- und Hochfrequenzverhalten der Schienen validiert. Weitere Modellierungsarbeiten sind jedoch in Projektphase II geplant, um eine verbesserte Beschreibung des Schotters einzubringen. Obwohl dies nicht in der ursprünglichen Projektbeschreibung geplant war, ist jetzt klar (siehe Abschnitt 2.8), dass eine realistischere Behandlung des Schotters wichtig sein wird, um nicht nur den Einfluss der Zwischenlagen, sondern auch den der USPs auf die Wartungsintervalle genau zu quantifizieren.

Parallel zu diesen technischen Entwicklungen haben wir ausführliche Diskussionen mit mehreren Zwischenlagen-Herstellern in Österreich und Deutschland geführt, die über eine umfassende Erfahrung in einer Reihe von Materialarten und entsprechenden Verarbeitungstechniken verfügen. Auf Basis einer Stakeholder-Analyse, die im Rahmen von Projektphase I des Projekts durchgeführt wurde, werden diese Kontakte nicht nur als potenzielle Entwicklungspartner von Bedeutung sein, sondern auch den Zugang zu zertifizierten Prüfmethoden ermöglichen. **Das Hauptrisiko für die Projektphasen II und III besteht darin, keinen Industriepartner zu finden, der bereit ist, unsere Prototypen in genügender Menge für die geplanten Feldmessungen herzustellen und später auch im industriellen Maßstab zu produzieren.** Der Notfallplan sieht in diesem Fall das Engagieren eines externen Auftragnehmers vor.

2.10 Weitere, im Vertrag nicht geforderte Errungenschaften des Projekts

Wir haben eine in sich geschlossene, experimentell validierte Modellkette eingeführt, die sich von der Materialebene über die Komponentenebene bis hin zur Systemebene erstreckt und eine direkt quantifizierbare Verbindung zwischen den Eigenschaften der Zwischenlage, der Schotterbelastung und der Lärmentwicklung in einer realen Eisenbahnumgebung etabliert. Die Modelle werden zur Zeit noch um eine realistischere Beschreibung des Schotters und die Berücksichtigung von Schwellensolehnen erweitert. Diese Modellkette selbst ist aus unserer Sicht eine große Errungenschaft des Projekt, da sie nicht nur für den Fortschritt unseres Projekts relevant ist, sondern in Zukunft auch die Modellierung anderer Fragestellungen erlauben wird.