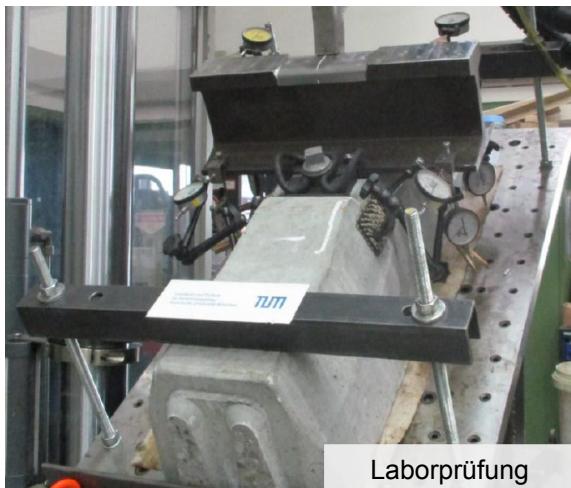


Forschungsprojekt Eisenbahnlärm 2017, Teil Infrastruktur, Bundesamt für Umwelt

TÜV Abschlussbericht TRCH-17-3011

Lärm- und LCC-optimierte Schienenzwischenlagen



Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) und des Bundesamtes für Verkehr (BAV)

Änderungsverzeichnis

Version	Datum	Änderung
0.8	16.11.2018	Berichtsentwurf
0.9	20.11.2018	Feedbacks TÜV, Vossloh, infraMT
1.0	21.11.2018	Erstausgabe
1.1	14.12.2018	Feedback BAFU Abschlussmeeting

Impressum

- Auftraggeber:** Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abteilung Lärm und NIS, CH-3003 Bern und Bundesamt für Verkehr (BAV), Abteilung Infrastruktur, CH-3003 Bern
Das BAFU und das BAV sind Ämter des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK)
- Auftragnehmer:** TÜV Rheinland Schweiz GmbH, Worblaufenstrasse 6, CH-3048 Worblaufen
- Autor:** EuRail-Ing. Philippe Schneider
- Begleitung BAFU:** Dr. Sandro Ferrari
- Hinweis:** Dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) und des Bundesamtes für Verkehr (BAV) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsprojekts Eisenbahnlärm 2017, welches vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) und vom Bundesamt für Verkehr (BAV) beauftragt wurde, konnte eine lärm- und LCC-optimierte Schienenzwischenlage (als Zw ENIT bezeichnet) entwickelt werden. Hersteller der Zw ENIT ist die Firma Vossloh Fastening Systems aus Werdohl/D. Die neue Zwischenlage soll einerseits eine hohe Elastizität aufweisen und zusätzlich eine Dämpfung haben, um den Lärmpegel im unbelasteten Zustand zu reduzieren.

Um die Eigenschaften und die Wirksamkeit der neuen Zw ENIT nachweisen zu können, wurden sowohl Labortests als auch eine Messkampagne im Gleis geplant. Die Laborprüfungen der Schienenbefestigung fanden an der Technischen Universität München/D statt. Die ausgewählte SBB Teststrecke Sursee – Nottwil besteht aus drei Abschnitten:

- Abschnitt A1: Zwischenlage SBB Zw 661-6 (steif, SBB Standard)
- Abschnitt A2: Zwischenlage Vossloh Zw 900b (elastisch, weich)
- Abschnitt A3: Zwischenlage Vossloh Zw 900a ENIT (optimiert, weich)

Die SBB Teststrecke hat sich als (fast) optimal erwiesen, da sie eine sehr gute Vergleichbarkeit der Resultate erlaubt. Einzig die geringe Anzahl Güterzüge war ein Nachteil, da im Zeitfenster für die Lärmmeßung fast keine Züge mit Re 420 gemessen werden konnten.

Laborprüfungen der Schienenbefestigung nach EN 13481-2

Das Schienenbefestigungssystem W14 K-900 mit der optimierten Zw ENIT wurde nach den Anforderungen in EN 13481-2, Kategorie C getestet. Dabei wurden die statische Systemsteifigkeit, die Spannkraft, der Durchschubwiderstand und der Verdrehwiderstand gemessen und ein Dauerschwingversuch mit 3 Mio. Lastzyklen durchgeführt.

Bei sämtlichen Prüfungen lagen die Werte resp. die Änderungen in den vorgegebenen Bereichen. Die statische Systemsteifigkeit resp. die statische Steifigkeit der Zw ENIT beträgt ca. 80 kN/mm. Das Schienenbefestigungssystem hat den Dauerschwingversuch bestanden. Dies zeigt, dass das verwendete EPDM-Material der Zw ENIT alterungsbeständig ist und dauerhaft die gewünschten elastischen Eigenschaften aufweist.

Einsenkung/Kompression der Zwischenlagen

Im Gleis sollte eine Gesamteinsenkung unter Last von 1,0 bis 1,5 mm angestrebt werden, wobei die Zwischenlage etwa einen Drittel davon ausmachen sollte. Der Abschnitt A1 mit den steifen Zw ($c_{stat} = 600$ kN/mm) weist im Mittel eine sehr kleine Kompression von weniger als 0,1 mm auf. Die elastische, weiche Zw ($c_{stat} = 60$ kN/mm) im Abschnitt A2 und die optimierte, weiche Zw ENIT ($c_{stat} = 80$ kN/mm) im Abschnitt A3 weisen im Mittel eine Kompression von je rund 0,5 mm auf. Die weichen Zwischenlagen tragen also wie gewünscht einen wesentlichen Anteil zur Gesamtelastizität im Gleis bei.

Nebst der absoluten Einsenkung/Kompression der Zwischenlage ist die Lastverteilfähigkeit ein entscheidendes Kriterium bei der Beurteilung des elastischen Layers. Die Kompressionslinien zeigen, dass die weichen Zw in den Abschnitten A2 und A3 eine signifikant bessere Lastverteilwirkung aufweisen als die steife Zw in Abschnitt A1. Somit trägt eine weiche Zwischenlage deutlich mehr zur Schonung der Oberbaukomponenten bei als eine steife Zwischenlage.

Luftschallemission nach EN ISO 3095

Die geringsten Luftschallemissionen wurden im Abschnitt A1 mit den steifen Zw gemessen. Der Abschnitt A2 war beim Regionalverkehr (RV) besser als A3. Dagegen war der Abschnitt A3 beim Fernverkehr (FV) etwas besser als A2. Die Zw ENIT hat beim FV ihre Vorteile, wo sie eine Reduktion gegenüber A2 von 0,2 dBA bewirkt. Bei den Zügen mit Re 420 wurde sogar eine Reduktion von 0,6 dBA gemessen. Da der FV auf einem höheren Lärmniveau liegt als der RV, ist dies für die Anwohner ein positives Resultat. Der Vergleich der Geräuschemission vor der Zugsdurchfahrt zeigt, dass der Abschnitt A3 mit der Zw ENIT zwar früher angeregt wird, dafür aber eine niedrigere Intensität erreicht als A2.

Gleisabklingrate nach EN 15461

Der Abschnitt A1 mit der steifen Zw zeigt das beste Abklingverhalten im Gleis. Die steife Zw verhindert fast vollständig ein freies Schwingen der Schiene und dadurch eine Schallausbreitung in der Schiene bei Anregung mit einem Prüfhammer. Die beiden Abschnitte A2 und A3 mit den weichen Zw verhalten sich bezüglich Abklingrate schlechter, da die weichen Zw ein freieres Schwingen der Schiene ermöglichen. Dies zeigt sich auch darin, dass der Abschnitt A1 oberhalb der Grenzkurve liegt, welche in der Norm EN ISO 3095 für Typenprüfungen von Fahrzeugen festgelegt wurde. Die Abschnitte A2 und A3 liegen dagegen über einen weiten Frequenzbereich darunter.

Gesamtbeurteilung der Zw ENIT

Die optimierte Zwischenlage ENIT hat eine statische Steifigkeit von ca. 80 kN/mm. Im realen Gleis weist die Zw ENIT eine Einstellung/Kompression von rund 0,5 mm auf. Somit hat die Zw ENIT erfahrungsgemäss einen optimalen Steifigkeitswert hinsichtlich Einstellung resp. Elastizität im Gleis. Aus LCC-Sicht trägt die Zw ENIT also zur Schonung der anderen Gleiskomponenten bei und senkt so die Unterhaltskosten.

Sowohl bei der Luftschallemission als auch bei der Gleisabklingrate hat sich gezeigt, dass die Zw ENIT die geplante Dämpfung noch nicht voll ausschöpfen kann. Bei den lauteren Fernverkehrszügen konnte im Abschnitt A3 eine Reduktion der Luftschallemission gegenüber A2 gemessen werden, die Tendenz geht in die richtige Richtung. Mit einer zusätzlichen Optimierung der Dämpfung liesse sich die Luftschallemission jedoch weiter senken.

Ausblick

Die optimierte Zwischenlage ENIT weist zwar die gewünschte statische Steifigkeit auf, bei der Dämpfungswirkung besteht jedoch noch Verbesserungspotential. Es scheint, als ob sie noch nicht die volle Wirkung im unbelasteten Gleis entfalten konnte. Diese liesse sich durch eine Produktoptimierung weiter steigern. Ansätze dazu könnten sein: mehr Übermass der dämpfenden Rondellen im unbelasteten Zustand, Vergrösserung der Wirkflächen der Rondellen und evtl. Optimierung des dämpfenden Materials.

Um eine fundierte Aussage zur Luftschallemission bei Güterzügen machen zu können, wäre eine kostengünstige Nachmessung an der bestehenden SBB Teststrecke Sursee – Nottwil empfehlenswert. Nach der Produktoptimierung der Zw ENIT hinsichtlich Dämpfungsverhalten wäre ein weiterer Testeinbau mit anschliessender Lärmessung sinnvoll, um das ganze Potential der neuen Zw ENIT beurteilen zu können. Zudem besteht zum „Singen der Schiene“ kurz vor der Zugsdurchfahrt weiterer Forschungsbedarf.

Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangslage	1
2	Versuchsziel	2
2.1	Elastische Layer	2
2.2	Schienenzwischenlagen	3
2.3	Ziel des Forschungsprojektes	3
3	Produktbeschreibung	4
3.1	Produkteigenschaften	4
3.2	Entwicklungsstand	5
3.3	Wirkungsweise	5
3.4	Potentialeinschätzung	5
3.5	BAV Typenzulassung	5
4	SBB Teststrecke	6
5	Versuchsbeschreibung	8
5.1	Allgemeines	8
5.2	Steifigkeit im Labor	10
5.3	Spannkraft im Labor	10
5.4	Durchschubwiderstand im Labor	11
5.5	Verdrehwiderstand im Labor	12
5.6	Dauerschwingversuch im Labor	12
5.7	Einsenkung/Kompression der Zwischenlagen im Gleis	13
5.8	Lärm/Luftschallemission im Gleis	14
5.9	Abklingrate im Gleis	15
6	Messergebnisse	18
6.1	Allgemeines	18
6.2	Steifigkeit im Labor	18
6.3	Spannkraft im Labor	19
6.4	Durchschubwiderstand im Labor	20
6.5	Verdrehwiderstand im Labor	20
6.6	Dauerschwingversuch im Labor	21
6.7	Einsenkung/Kompression der Zwischenlagen im Gleis	22
6.8	Lärm/Luftschallemission im Gleis	27
6.9	Abklingrate im Gleis	34
7	Schlussfolgerungen	36
8	Ausblick	38
	Anhangsverzeichnis	39

1 Ausgangslage

Im Jahr 2000 waren in der Schweiz 265'000 Menschen schädlichem oder lästigem Eisenbahnlärm ausgesetzt. Zu ihrem Schutz wurde nach Massgabe des Bundesgesetzes vom 24. März 2000 über die Lärmsanierung der Eisenbahnen (BGLE alt) bis 2015 ein umfassendes Konzept zur Lärmreduktion umgesetzt. Es beinhaltete Massnahmen am schweizerischen Rollmaterial, die Realisierung von Lärmschutzwänden und den Einbau von Schallschutzfenstern. Damit konnten unter weitgehender Einhaltung der Fristen und mit einer wesentlichen Unterschreitung der ursprünglich geschätzten Kosten zwischen 160'000 und 170'000 Menschen vor übermäßigem Lärm geschützt werden.

Das im Gesetz formulierte Minimalziel zur Anzahl der zu schützenden Personen (Schutzzgrad) von mindestens zwei Dritteln wurde mit 60-64% jedoch knapp nicht erreicht.

Das Parlament trat deshalb im Rahmen der Beratung der Gesamtschau FinöV (ZEB-Gesetz) nicht auf eine Kürzung des Lärmkredites ein. Es verlangte, dass mit den verbleibenden Finanzmitteln eine Verbesserung des Lärmschutzes zu erreichen sei.

Auf der Grundlage von Artikel Art. 1 Oa des revidierten BGLE1 kann der Bund Mittel für die Ressortforschung im Geltungsbereich des Gesetzes gemäss Art. 1 bereitstellen.

Mit dieser Ressortforschung sollen lärmindernde Technologien bei Infrastruktur und Rollmaterial zur Reduzierung des Fahrlärms von Eisenbahnen um mindestens 1 dB (Beurteilungspegel Lr nach Massgabe LSV) erforscht werden. Die Vorhaben können im Stadium der Entwicklung (Ideenphase), Erprobung (Konzeptphase) oder Zulassung (Anwendungsphase) sein.

Mit der Umrüstung der Schweizer Güterwagenflotte mit Verbundstoffbremssohlen und der Festlegung von Emissionsgrenzwerten für bestehende Güterwagen ab 2020 sind fahrzeugseitig bedeutende Massnahmen zur Reduzierung der Lärmemissionen vorgenommen worden. Der Einfluss der Infrastruktur auf das Rollgeräusch der Eisenbahnen nimmt mit diesen Massnahmen zu. Vorhandene Messresultate und das theoretische Verständnis lassen vermuten, dass der Einfluss der Gleiskonstruktion nicht nur durch den Betrieb sondern auch durch dessen Konstruktion (Bogenradius, Schwellentyp, Schienenbefestigung, Zwischenlage) und allenfalls den Untergrund (Aufbau, Steifigkeit) beeinflusst werden.

(Quelle: Bundesamt für Umwelt BAFU, CH-3003 Bern)

2 Versuchsziel

2.1 Elastische Layer

Der sogenannte Schotteroerbaubau ist bei den meisten Bahnen in Europa -so auch in der Schweiz- nach wie vor die Standardausführung. Beim Schotteroerbaubau liegen die Schwellen auf einem Schotterbett und werden von diesem sowohl in Quer- wie auch in Längsrichtung gehalten. Heute kommen als Schwellen meist Betonschwellen zum Einsatz.

Seit ein paar Jahren verkehren immer mehr Züge mit z.T. hohen Achslasten und Geschwindigkeiten. Dadurch nimmt die Belastung auf den Oberbau deutlich zu. Um die Beanspruchung der Oberbaukomponenten zu reduzieren, werden vermehrt elastische Layer eingebaut.

Dabei handelt es sich hauptsächlich um Schienenzwischenlagen (Zw) sowie Schwellenbesohlungen (USP = Under Sleeper Pads). Die untenstehende Abbildung 1 zeigt die Möglichkeiten für den Einsatz elastischer Elemente im Schotteroerbaubau.

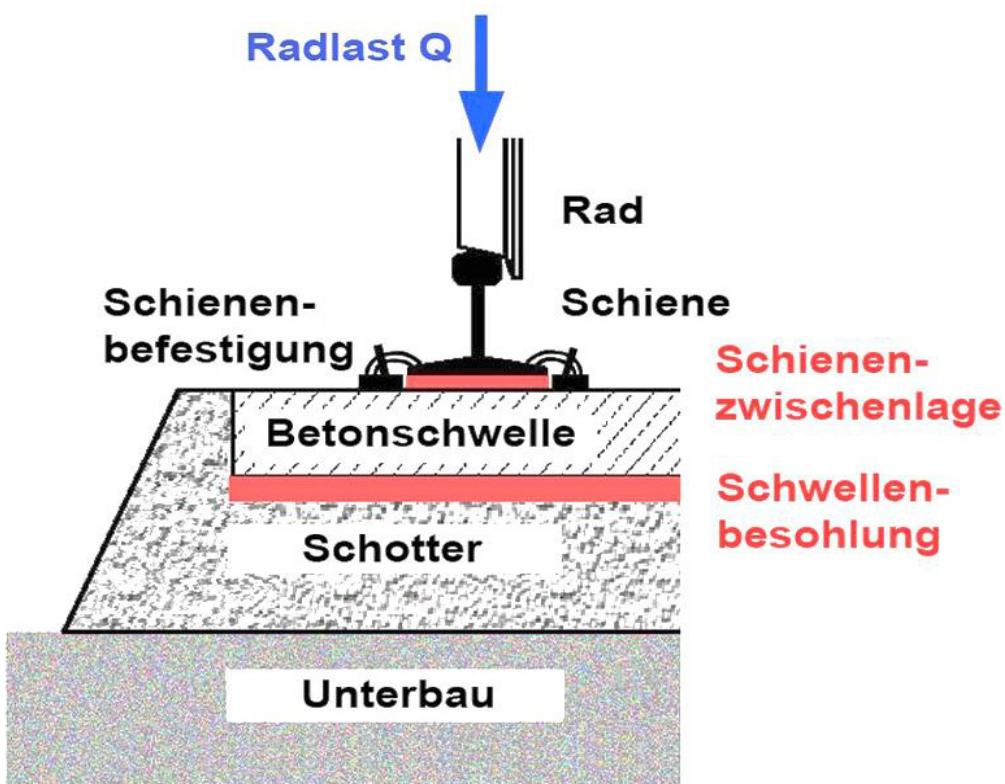


Abbildung 1: Elastische Elemente im Schotteroerbaubau

Dieses Forschungsprojekt befasste sich mit den Schienenzwischenlagen, da bei dieser Oberbaukomponente sowohl fahrbahntechnische Aspekte (Einsenkung, Biegelinie der Schiene) wie auch Lärmthemen (Luftschallemission, Dämpfung) von Bedeutung sind. Aus heutiger Sicht ist deshalb ein Optimierungspotential vorhanden.

2.2 Schienenzwischenlagen

Ältere Schienenzwischenlagen sind steif und in der Regel für die heutigen Belastungen im Schweizer Bahnnetz zu wenig elastisch. Diese Zwischenlagen aus EVA (Ethylen-Vinyl-Azetat) werden bei der SBB nach wie vor standardmässig eingesetzt. Sie sollen für die Vergleiche bei diesem Forschungsprojekt als Referenz dienen.

Neuere Schienenzwischenlagen aus EPDM (Ethylen-Propylen-Dien-Monomer) sind wesentlich elastischer und hinsichtlich LCC besser geeignet als die steifen Schienenzwischenlagen. Aber sie neigen aufgrund ihrer Elastizität zu freier schwingenden Schienen, was sich hinsichtlich des Lärms negativ auswirken kann. Es muss nach heutigem Wissensstand mit einer Zunahme des Lärmpegels gerechnet werden.

Die Thematik zeigt, dass beide Typen von Schienenzwischenlagen ein Optimierungspotential aufweisen. Die steifen (harten) Zwischenlagen führen oft zu einem erhöhten Verschleiss an den Oberbaukomponenten, da zu wenig Elastizität vorhanden ist. Die elastischen (weichen) Zwischenlagen können zu einer Lärmzunahme führen.

2.3 Ziel des Forschungsprojektes

Das Ziel dieses Forschungsprojektes war es, eine neuartige lärm- und LCC-optimierte Schienenzwischenlage mit einem renommierten Hersteller zu entwickeln und diese anschliessend in eine geeignete Teststrecke im SBB-Netz einzubauen und mittels Messungen deren Wirkung aufzuzeigen.

Einerseits soll die neue Zwischenlage elastische Eigenschaften wie die heutigen weichen Zwischenlagen aufweisen, um die Lastverteilung entlang der Schienen zu gewährleisten und somit den Verschleiss des Oberbaus zu minimieren und den Fahrkomfort zu erhöhen.

Andererseits soll sie zusätzlich auch dämpfende Eigenschaften aufweisen, um die Schwingungen der Schienen zu reduzieren und somit den Lärm zu mindern. Dies soll mittels zweier verschiedener Materialien mit unterschiedlichen Steifigkeiten und Dämpfungseigenschaften in derselben Zwischenlage realisiert werden.

Um die bestehenden Typen von Schienenzwischenlagen mit der neuartigen vergleichen zu können, wurde eine Teststrecke mit drei Abschnitten (steife, elastische und optimierte Zwischenlagen) geplant. Die Teststrecke konnte schliesslich im Frühling 2018 auf der SBB Strecke Sursee – Nottwil eingebaut werden.

Die Messungen fanden sowohl im Prüflabor wie auch im resp. am Gleis statt. Die Labormessungen dienten der Spezifikation des Schienenbefestigungssystems mit der optimierten Schienenzwischenlage Zw ENIT gemäss EN 13481-2. Bei den Messungen im Gleis wurden Einsenkungs-/Kompressionsmessungen der Zwischenlagen bei Zugsüberfahrten (fahrbahntechnischer Parameter), Lärmessungen neben dem Gleis nach EN ISO 3095 bei Zugsvorbeifahrten sowie Messungen der Gleisabklingrate (TDR = Track Decay Rate) nach EN 15461 durchgeführt.

3 Produktbeschreibung

Hersteller der neuartigen Schienenzwischenlage ist die Firma Vossloh Fastening Systems aus Werdohl/D. Die neue Schienenzwischenlage wird als Typ ENIT (Elastomer for Noise Improvement on Track) bezeichnet. Sie weist elastische Eigenschaften auf, hat aber zusätzlich eine dämpfende Wirkung, um den Lärmpegel im unbelasteten Zustand zu reduzieren. Nachfolgend wird auf die verschiedenen Aspekte zur neuen Zwischenlage ENIT eingegangen.

3.1 Produkteigenschaften

Die neue Zw ENIT (siehe *Abbildung 2*) wird aus zwei verschiedenen EPDM-Materialien hergestellt, wobei die Basis die seit Jahren bei DB, ÖBB und SBB eingesetzte Cellentic®-Zwischenlage aus EPDM bildet. EPDM (Ethylen-Propylen-Dien-Monomer) ist ein synthetischer Kautschuk, welcher sich für die Herstellung von Zwischenlagen bewährt hat.

Die Elastizität wird durch geschlossenporiges Aufschäumen erreicht, wobei die Steifigkeit grundsätzlich mittels der Anzahl und Grösse der eingeschlossenen Luftblasen frei wählbar ist. Durch diese Konstruktion arbeitet die Zwischenlage in sich selbst, d.h. sie braucht keinen Platz für die Ausdehnung und weist deshalb auch fast keinen Abrieb auf. Zudem verstieft sich dieses Material über die Lebensdauer nur sehr wenig, d.h. die Funktionalität wird über die gesamte Lebensdauer erhalten.

Neu wird diese Zwischenlage mit zusätzlich eingelegten Rondellen versehen, welche als Basismaterial ebenfalls EPDM haben. Dieses wird jedoch mit diversen Zuschlagsstoffen ergänzt, um eine hohe Eigendämpfung zu erreichen. Im nicht verbauten Zustand weisen die Rondellen der Zwischenlage eine leichte Überdicke (Übermass) auf.

Da die DB für ihre Strecken standardmässig Zwischenlagen mit einer Dicke von 9 mm (längere Lebensdauer als solche mit 7 mm Dicke) mit einer statischen Steifigkeit von 60 kN/mm einsetzt, wurde diese optimierte Zwischenlage auch auf 9 mm mit dieser Steifigkeit ausgelegt. Der Standardoberbau W14 kann weiterhin verwendet werden, es sind jedoch angepasste Winkelführungsplatten vom Typ Wfp 14 K-900 einzusetzen.

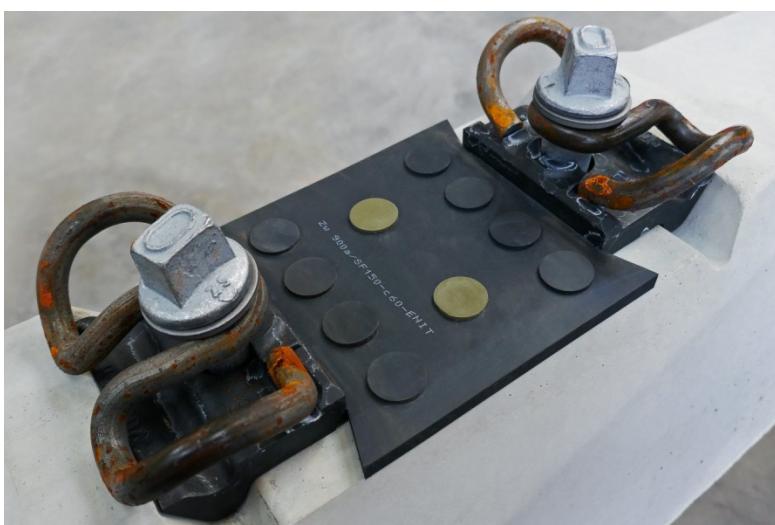


Abbildung 2: Zwischenlage ENIT

3.2 Entwicklungsstand

Das Produkt befindet sich in Erprobung, eine Teststrecke wurde anfangs 2017 bei der Deutschen Bahn am Standort Bickenbach zwischen Frankfurt und Heidelberg auf einer Länge von 200 m in einen bestehenden Gleisabschnitt eingebaut. Die erste Ausführung der neuen Zw wurde mit Streifen aus EPDM versehen, die an der Oberfläche als kleine Quadrate sichtbar waren. In der Zwischenzeit hat Vossloh die Zw ENIT für die Tests bei der SBB weiter optimiert, so dass sie fertigungstechnisch besser hergestellt werden kann.

3.3 Wirkungsweise

Aufgrund der Kombination von elastischem und dämpfendem Material soll die Zw ENIT sowohl hinsichtlich Elastizität der Fahrbahn (Einfluss auf LCC) wie auch hinsichtlich des Lärms (Dämpfung) optimiert werden. Einerseits verfügt die Zwischenlage über die nötige Elastizität, um die erforderliche Einsenkung im belasteten Zustand zu erreichen. Damit werden die Komponenten des Oberbaus geschont, was zu weniger Verschleiss führt und damit die Lebensdauer verlängert und auch den Fahrkomfort erhöht. Andererseits hat die Zwischenlage eine hohe Eigendämpfung. Dies soll das freie Schwingen der Schienen im unbelasteten Zustand bzw. kurz vor und nach der Überfahrt reduzieren. Schienenbefestigungen mit rein elastischen Zwischenlagen ohne Dämpfung neigen oft dazu, dass die Schiene vor der Zugsdurchfahrt „singt“, was zu einem höheren Lärmpegel führen kann und von den Anwohnern als lästig empfunden wird. Die Dämpfung der Zw ENIT soll das Schwingen der Schienen und dadurch auch den Lärmpegel reduzieren.

3.4 Potentialeinschätzung

Der Einsatz solcher optimierten Schienenzwischenlagen ENIT ist netzweit sinnvoll, da neben der zu erwartenden Lärmreduktion auch der gesamte Oberbau geschont sowie der Fahrkomfort erhöht wird. Durch eine solche elastische Zw wird die Schieneneinsenkung im Gesamtsystem um 0,2 bis 0,5 mm erhöht, was dazu führt, dass die angestrebte Gleiseinsenkung unter Last von ungefähr 1,2 mm besser erreicht wird als mit herkömmlichen steifen Zw. Da die Zw ENIT in einem Standardoberbau W14 verwendet werden kann, ist kein Systemwechsel nötig. Aufgrund der Dicke von 9 mm sind lediglich angepasste Winkelführungsplatten vom Typ Wfp 14 K-900 einzusetzen. Daher ist nur mit minimalen Mehrkosten gegenüber dem Referenzoberbau zu rechnen.

3.5 BAV Typenzulassung

Das Schienensystem Typ W14 ist in der Schweiz zugelassen. Die neue Zwischenlage ENIT ist Teil dieses Systems. Das BAV, Abteilung Infrastruktur, hat im März 2018 das schriftliche Einverständnis dazu gegeben, dass für die Zw ENIT keine separate BAV Betriebserprobung nach Art. 18x EBG / Art. 7 EBV nötig ist, da es sich um eine marginale Änderung innerhalb des zugelassenen Systems Typ W14 handelt.

4 SBB Teststrecke

Die SBB Teststrecke befindet sich auf der DfA-Linie 500 (RADN Linie 422) zwischen Olten und Luzern auf dem Abschnitt Sursee – Nottwil. Sie wird von Intercity-, Regional- und Güterzügen befahren. Pro Tag und Gleis verkehren rund 120 Züge (Stand 2016).

Die Streckenbelastung pro Gleis beträgt knapp 40'000 GBRT pro Tag (Stand 2016). Die Geschwindigkeit der Reihe R beträgt 160 km/h. Die drei Versuchsabschnitte liegen im seeseitigen, östlichen Gleis 100 (Regelgleis Sursee – Nottwil) in einer Geraden ohne Überhöhung.

Der untenstehende Kartenausschnitt in Abbildung 3 zeigt, wo sich die Teststrecke zwischen Sursee und Nottwil genau befindet und wie die nähere Umgebung aussieht. Am rechten Bildrand ist der Sempachersee ersichtlich. Sursee liegt in Richtung oben/links und Nottwil in Richtung unten/rechts auf der Karte. Die drei Testabschnitte liegen zwischen km 72.128 und km 72.776.

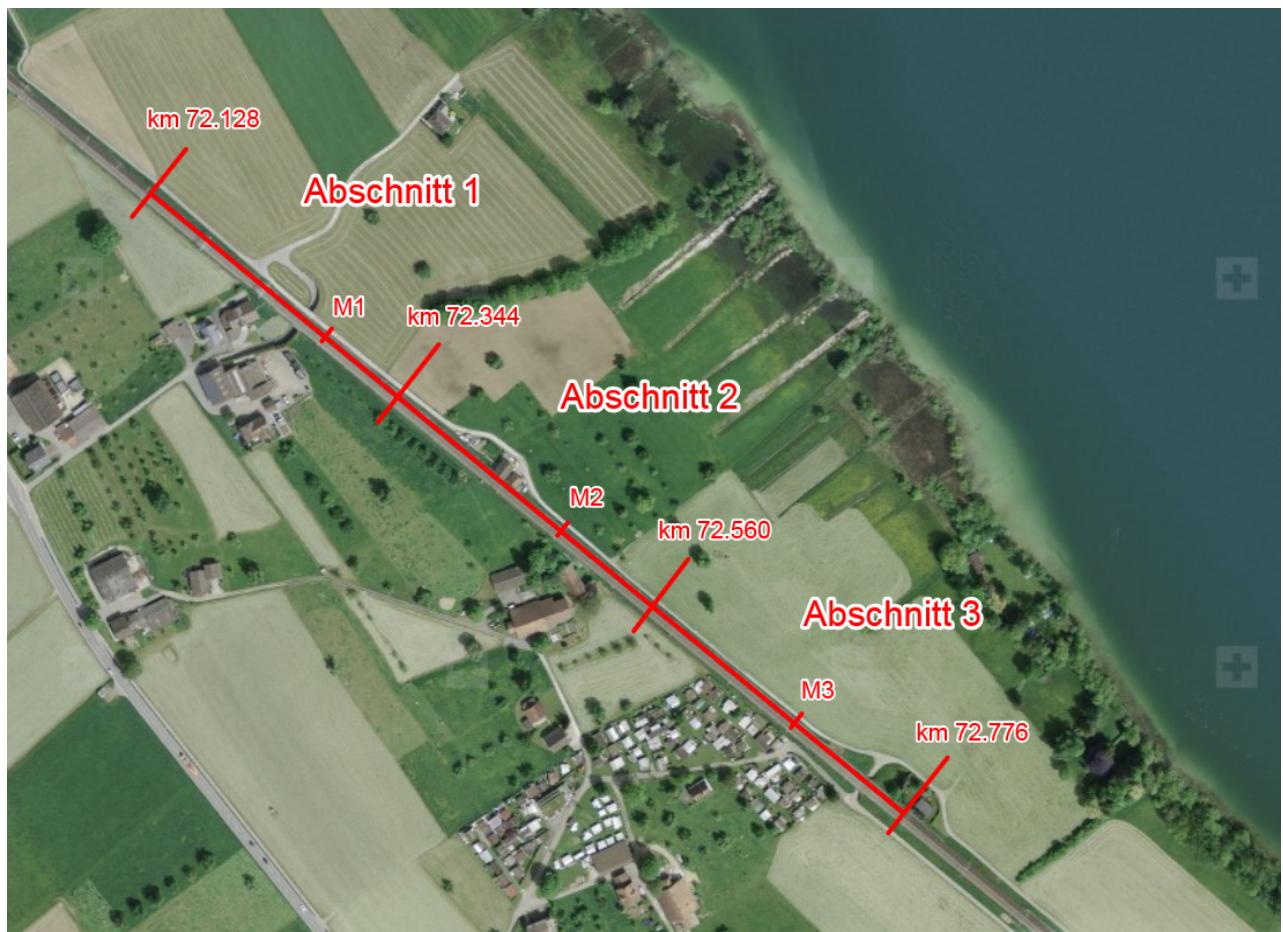


Abbildung 3: Kartenausschnitt SBB Teststrecke Sursee – Nottwil (Karte: map.geo.admin.ch)

Die SBB baut seit Kurzem auf stark belasteten Gleisen steife Schwellenbesohlungen (USP = Under Sleeper Pads) ein. Dieser Oberbaustandard wurde auch auf der Strecke Sursee – Nottwil verwendet. Auf der gesamten Teststrecke ist das Schienenprofil 60 E2 mit der Schienenstahlgüte R260 eingebaut.

Die Teststrecke weist drei nacheinander folgende Testabschnitte mit unterschiedlichen Schienenzwischenlagen (Zw) auf. Um möglichst homogene Bedingungen zu gewährleisten, ist die Teststrecke im Rahmen der ordentlichen Fahrbahnerneuerung eingebaut worden. Durch den Neubau des Gleisrosts (Schienen, Schwellen, Schotter) kann sichergestellt werden, dass die drei Abschnitte eine identische Historie (Schienenschleiss, Riffelbildung, Alterung des Gleisrosts) aufweisen, was insbesondere für die Lärmessungen wichtig ist.

Jeder Testabschnitt hat eine Länge von 216 m, dies entspricht zweimal der Länge einer Langschiene von 108 m. Damit ist gewährleistet, dass jeder Abschnitt lang genug ist für die geplanten Messungen. Im ersten Abschnitt A1 ist der SBB Referenzoberbau mit der Schienenbefestigung Typ W14 K-900 und steifen Schienenzwischenlagen eingebaut. Der zweite Abschnitt A2 hat denselben Oberbau, jedoch mit elastischen (weichen) Schienenzwischenlagen. Im dritten Abschnitt A3 ist derselbe Oberbau eingebaut, jedoch mit optimierten (weichen) Schienenzwischenlagen.

Bei den Zwischenlagen im Abschnitt A1 handelt es sich um die steifen SBB Zw aus EVA (Ethylen-Vinyl-Azetat) mit einer Dicke von 6 mm. Bei den Zwischenlagen im Abschnitt A2 handelt es sich um die elastischen (weichen) Zw von Vossloh aus EPDM (Ethylen-Propylen-Dien-Monomer) mit einer Dicke von 9 mm. Bei den Zwischenlagen im Abschnitt A3 handelt es sich um die optimierten (weichen) Zw ENIT von Vossloh aus EPDM mit einer Dicke von 9 mm. Die Schwellen in den drei Abschnitten wurden auf der Schwellenoberseite ab Werk farblich markiert, um Fehler beim Einbau zu vermeiden und die Testabschnitte im Gleis eindeutig zuordnen zu können. Die Farbmarkierung des Abschnitts A1 ist schwarz, diejenige des Abschnitts A2 gelb und diejenige des Abschnitts A3 grün.

Die Details zur SBB Teststrecke Sursee – Nottwil mit den drei Abschnitten und den Angaben zu den Zwischenlagen sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: SBB Teststrecke Sursee – Nottwil inkl. Angaben zu den Zwischenlagen

Abschnitt [Nr.]	Länge [m]	km von	km bis	Zwischenlage (Zw)		
				Typ / Bezeichnung	Dicke	C _{stat} (Soll)
A1	216	72.128	72.344	SBB Zw 661-6	6 mm	600 kN/mm
A2	216	72.344	72.560	Vossloh Zw 900b	9 mm	60 kN/mm
A3	216	72.560	72.776	Vossloh Zw 900a ENIT	9 mm	60 kN/mm

5 Versuchsbeschreibung

5.1 Allgemeines

Es wurden sowohl Labormessungen als auch Messungen im resp. am Gleis durchgeführt. Die Tabellen 2 und 3 zeigen die Übersicht der Messungen im Labor und im Gleis. Detaillierte Angaben zu den Labormessungen sind in den Kapiteln 5.2 bis 5.6 und diejenigen zu den Messungen im Gleis in den Kapiteln 5.7 bis 5.9 zu finden.

Tabelle 2: Übersicht der Labormessungen

Prüfung des Befestigungssystems Typ W14 K-900 mit Zwischenlage Zw 900a ENIT		
Messung	Wer	Kapitel im Bericht
Steifigkeit	Technische Uni München/D und Vossloh Werdohl/D	<u>Kapitel 5.2</u>
Spannkraft	Technische Uni München/D	<u>Kapitel 5.3</u>
Durchschubwiderstand	Technische Uni München/D	<u>Kapitel 5.4</u>
Verdrehwiderstand	Technische Uni München/D	<u>Kapitel 5.5</u>
Dauerschwingversuch	Technische Uni München/D	<u>Kapitel 5.6</u>

Tabelle 3: Übersicht der Messungen im Gleis

Messungen auf der SBB Teststrecke Sursee – Nottwil in den Abschnitte A1 bis A3		
Messung	Wer	Kapitel im Bericht
Einsenkung/Kompression der Zwischenlagen	infraMT Finsterhennen/CH	<u>Kapitel 5.7</u>
Lärmessung im Gleis (Luftschallemissionen)	infraMT Finsterhennen/CH	<u>Kapitel 5.8</u>
Abklingrate im Gleis (TDR = Track Decay Rate)	Müller-BBM Muttenz/CH	<u>Kapitel 5.9</u>

Bemerkungen zu den Labormessungen

Die Labormessungen wurden im Prüflabor des Prüfamts für Verkehrswegebau an der Technischen Universität in München/D und teilweise im Werkslabor von Vossloh Fastening Systems in Werdohl/D durchgeführt.

Die Prüfung des Schienenbefestigungssystems Typ W14 K-900 mit der neuen Zwischenlage Zw 900a ENIT erfolgte gemäss der Norm EN 13481-2:2012+A1:2017 „Bahnanwendungen - Oberbau - Leistungsanforderungen für Schienenbefestigungssysteme - Teil 2: Befestigungssysteme für Betonschwellen“ vom Mai 2017.

Die Befestigungskategorie ist in der Norm EN 13481-1:2012 „Bahnanwendungen - Oberbau - Leistungsanforderungen für Schienenbefestigungssysteme - Teil 1: Definitionen“ vom Mai 2012 beschrieben. Die Prüfungen erfolgten nach Befestigungskategorie C (maximale Auslegungssachslast = 260 kN, minimaler Gleisradius = 150 m).

Bemerkungen zu den Messungen im Gleis

Der Einbau der Teststrecke fand im März 2018 statt. Nach Abschluss der Umbauarbeiten wurde die ganze Strecke im Juni 2018 geschliffen, so dass für die Messkampagne im August 2018 von identischen und guten Bedingungen hinsichtlich Schienenrauheit ausgegangen werden kann.

Die Position der Messquerschnitte innerhalb der Versuchsabschnitte A1 bis A3 wurde anhand deren Eignung für die Messung definiert. Bei der Lärmessung (Luftschall) ist auf möglichst gleiche Umgebungsbedingungen in Ausbreitungsrichtung zwischen Gleis und Mikrophon über die drei Messstellen zu achten. Dies betrifft u.a. die Bodenbedeckung, Bepflanzungen oder reflektierende Flächen sowie Störelemente wie Fahrleitungsmasten. Zu letzteren wurde bspw. ein Abstand von 10 m eingehalten.

Um bei der Einsenkungs-/Kompressionsmessung die notwendige Qualität erreichen zu können, ist durch eine visuelle Kontrolle sicherzustellen, dass sich keine offensichtlichen Inhomogenitäten in der vertikalen Gleissteifigkeit in der Nähe des Messbereichs befinden. Zudem ist ein Mindestabstand zu den Abschnittsgrenzen einzuhalten. Idealerweise würden die Messquerschnitte anhand von kontinuierlichen Einsenkungsmessungen festgelegt, was im vorliegenden Projekt jedoch nicht möglich war.

Der Sensorquerschnitt der Gleisabklingratenmessung befand sich jeweils auf Höhe der Lärm-Messquerschnitte. Die Sensorquerschnitte sowie sämtliche Positionen für die Anregung (Hammerschlag) lagen genügend weit von Schweißnähten entfernt. In Abbildung 4 ist die Position der Messquerschnitte für Lärm und Gleisabklingrate (L) sowie Kompression/Einsenkung der Zw (K) ersichtlich.

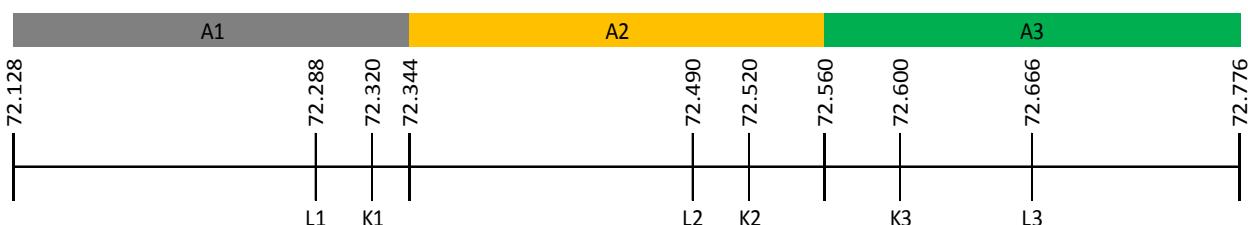


Abbildung 4: Lage der Messquerschnitte innerhalb der drei Versuchsabschnitte

5.2 Steifigkeit im Labor

Die Bestimmung der Steifigkeiten erfolgte nach Norm EN 13146-9:2009+A1:2011 „Bahnanwendungen - Oberbau – Prüfverfahren für Schienenbefestigungssysteme - Teil 9: Bestimmung der Steifigkeiten“ vom Dezember 2011.

An der Technischen Uni München/D wurde die statische, vertikale Steifigkeit des Befestigungssystems vor und nach dem Dauerschwingversuch gemessen.

Abbildung 5 zeigt den Versuchsaufbau zur Bestimmung der vertikalen Stützpunktsteifigkeit im Prüflabor.

Im Werkslabor von Vossloh Fastening Systems in Werdohl/D erfolgte sowohl die Bestimmung der statischen, vertikalen Steifigkeit wie auch der dynamischen, vertikalen Steifigkeit an fünf Prüfmustern der Zwischenlage ENIT.



Abbildung 5: Bestimmung der vertikalen Stützpunktsteifigkeit

5.3 Spannkraft im Labor

Die Bestimmung der Spannkraft erfolgte nach Norm EN 13146-7:2012 „Bahnanwendungen - Oberbau - Prüfverfahren für Schienenbefestigungssysteme - Teil 7: Bestimmung der Spannkraft“ vom Juli 2012.

An der Technischen Uni München/D wurde die Spannkraft des Befestigungssystems in vertikaler Richtung vor und nach dem Dauerschwingversuch gemessen. Die Versuchsdurchführung erfolgte an einer halben Betonschwelle entsprechend dem Referenzverfahren nach Punkt 7 der EN 13146-7:2012. Mittels vier Induktiv-Wegaufnehmern an den Eckpunkten des Schienenauflegers wurde die Höhenlage des Schienenfusses im verspannten Zustand erfasst und als Ausgangssituation festgehalten.

Zunächst erfolgte die Anhebung der Schiene bis die Zwischenlage entnommen werden konnte. Hierzu war es erforderlich, die Zwischenlage so zu bearbeiten, dass sie von einer Seite herausgezogen werden konnte. Anschliessend wurde die Schiene wieder abgesenkt, wobei die Last P_0 festgehalten wurde. Da die Bestimmung der durchschnittlichen Spannkraft auf Basis dreier Werte erfolgt, wurde dieses Verfahren noch zweimal wiederholt. *Abbildung 6* zeigt den Versuchsaufbau zur Ermittlung der vertikalen Spannkraft im Prüflabor.

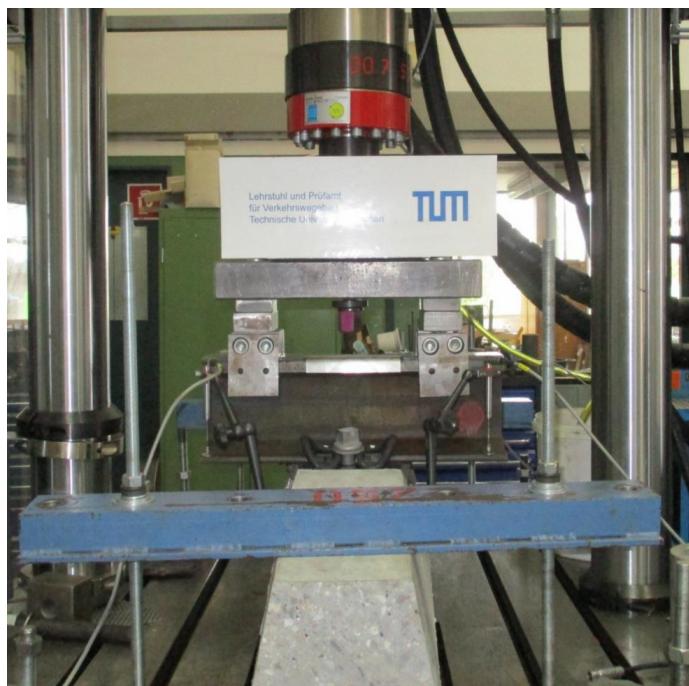


Abbildung 6: Ermittlung der Spannkraft

5.4 Durchschubwiderstand im Labor

Der Durchschubwiderstand in Längsrichtung wurde nach Norm EN 13146-1:2012+A1:2014 „Bahnanwendungen - Oberbau - Prüfverfahren für Schienenbefestigungssysteme - Teil 1: Ermittlung des Durchschubwiderstandes in Längsrichtung“ vom Januar 2015 ermittelt.

An der Technischen Uni München/D wurde der Durchschubwiderstand in Längsrichtung vor und nach dem Dauerschwingversuch gemessen. Der Versuch wurde am montierten Stützpunkt durchgeführt. In die Schiene wurde eine Zugkraft mit einer Belastungsgeschwindigkeit von ca. 0,2 kN/s eingeleitet, bis die Schiene gegenüber der halben Schwelle zu rutschen begann. Dabei wurden die auftretenden Verformungen und die wirkende Kraft registriert.

Insgesamt wurde dieser Versuch viermal wiederholt, wobei die drei letzten Last-Verformungskurven ausgewertet wurden. Abbildung 7 zeigt den Versuchsaufbau zur Bestimmung des Durchschubwiderstands in Längsrichtung im Prüflabor.



Abbildung 7: Bestimmung des Durchschubwiderstands

5.5 Verdrehwiderstand im Labor

Der Verdrehwiderstand wurde nach Norm EN 13146-2:2012 „Bahnanwendungen - Oberbau - Prüfverfahren für Schienenbefestigungssysteme - Teil 2: Ermittlung des Verdrehwiderstandes“ vom Juni 2012 ermittelt.

An der Technischen Uni München/D wurde der Verdrehwiderstand an einer ganzen Betonschwelle ermittelt. Dabei wurde die Schwelle eingespannt und eine Querlast auf den Schienenfuss aufgebracht, so dass die Schiene in eine Position gedrückt wurde, in der der Schienenfuss die Winkelführungsplatten diagonal berührt. Nach Herstellung dieser Ausgangssituation wurde die Lasteinleitung auf die entgegengesetzte Seite der Schiene versetzt und die Kraft auf diese bis zu einer Schienenverdrehung von $1,5^\circ$ erhöht, wobei die Verdrehung der Schiene in Bezug auf die Schwelle aufgezeichnet wurde. Nach mindestens drei Minuten erfolgte die Wiederholung des Lastzyklus in Gegenrichtung. Abbildung 8 zeigt den Versuchsaufbau zur Bestimmung des Verdrehwiderstands im Prüflabor.



Abbildung 8: Bestimmung des Verdrehwiderstands

5.6 Dauerschwingversuch im Labor

Die Durchführung des Dauerschwingversuchs erfolgte als Schrägbelastungsversuch nach Norm EN 13146-4:2012+A1:2014 „Bahnanwendungen - Oberbau - Prüfverfahren für Schienenbefestigungssysteme - Teil 4: Dauerschwingversuch“ vom Januar 2015.

Aus der ermittelten dynamischen Steifigkeit sind nach Tabelle 3 der EN 13481-2 die Prüflasten und -positionen festzulegen. Die dynamische Steifigkeit wurde für die Kategorie C mit 92,0 kN/mm kleiner als 200 kN/mm gemäss Tabelle bestimmt. Daraus ergibt sich für den Versuch eine Oberlast $P_v/\cos \alpha = 75$ kN je Stützpunkt bei einem Lasteinleitungswinkel von $\alpha = 33^\circ$. Das verwendete Schienenstück Profil 60 E1 ist um das erforderliche Mass $X = 15$ mm abgefräst. Die Unterlast beträgt 5 kN bei einer Frequenz von 5 Hz. Dies entspricht den Auswirkungen von Dauerbelastungen bei Vollbahnen mit einer max. Radsatzlast von 225 kN (Richtwert) bzw. 260 kN (max. Auslegungswert) und einem Mindestbogenradius von $R = 150$ m. Abbildung 9 zeigt den Aufbau des Dauerschwingversuchs als Schrägbelastungsversuch im Prüflabor.



Abbildung 9: Dauerschwingversuch

5.7 Einsenkung/Kompression der Zwischenlagen im Gleis

Die Gleiseinsenkung ist ein wichtiger fahrbahntechnischer Parameter. Wie in Kapitel 2.1 beschrieben, kann die Einsenkung mittels elastischer Layer gezielt optimiert werden. In diesem Forschungsprojekt werden verschiedene Schienenzwischenlagen untereinander verglichen.

Damit die drei unterschiedlichen Zwischenlagen direkt verglichen werden können, dürfen bei den Einsenkungsmessungen keine anderen elastischen Anteile des Gleisrostes mitgemessen werden. Deshalb wird die Einsenkung zwischen Schienenfuss und Schwellenoberkante als relative Vertikalbewegung der Schiene bezogen auf die Betonschwelle gemessen, was der Kompression der Zwischenlage entspricht, dies unter der Annahme, dass die Schiene im unbelasteten Zustand flächig auf der Zwischenlage aufliegt.

Die Einsenkungsmessungen wurden von der Firma infraMT durchgeführt, welche als Spin-Off der SBB Messtechnik entstanden ist und jahrelange Erfahrung in Messungen im Gleis hat.

Pro Testabschnitt wurde die Eisenkung resp. Kompression der Zwischenlage an je fünf Schwellen (Messquerschnitten) auf der Aussenseite der seeseitigen Schiene gemessen. Zusätzlich wurde bei zwei Messquerschnitten dieselbe Grösse auf der Innenseite des Schienenfusses erfasst, um auch das Abkippen der Schiene (exzentrische Last durch Berührgeometrie Rad/Schiene) quantifizieren und vergleichen zu können. Abbildung 10 zeigt die Messpunktanordnung der Zw-Kompressionsmessungen, wobei das "x" als Platzhalter für die jeweilige Versuchsabschnittsnummer dient. Der Abstand zwischen den Messpunkten betrug je zwei Schwellen resp. 1,2 m. Daraus resultiert eine Gesamtlänge der Messzone pro Testabschnitt von 4,8 m. Die Standorte der Kompressionsmessungen befanden sich bei den Messstellen K1, K2 und K3, siehe Abbildung 4.

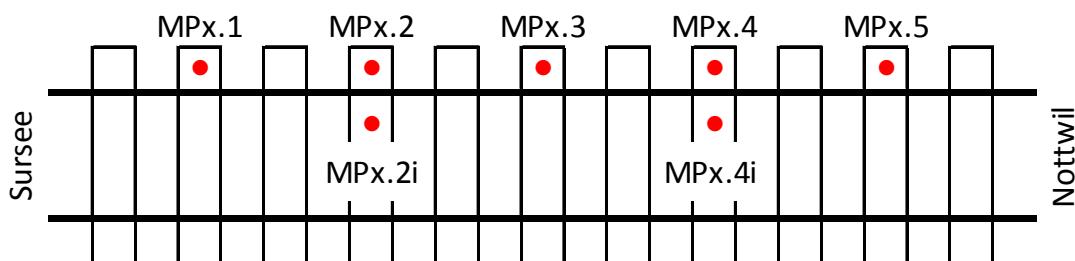


Abbildung 10: Messpunktanordnung der Zw-Kompressionsmessungen

Die Einsenkung/Kompression der Zwischenlagen wurde mit induktiven Wegaufnehmern mit losem Tauchanker gemessen. Die Wegsensoren wurden mittels auf die Schwelle geklebte Konsolen und Gelenkarme über dem Schienenfuss positioniert. Um eine Beeinflussung der Messkette durch Störströme zu verhindern, wurden die Tauchanker mit einem isolierenden Zwischenstück an den Schienenfuss geklebt. Die Messungen wurden getriggert gestartet und zeitgesteuert gestoppt. Die Abtastfrequenz betrug 1200 Hz, ungefiltert. In Abbildung 11 ist die Sensorapplikation an einem Messquerschnitt mit beidseitiger Sensorik zu sehen.



Abbildung 11: Sensorapplikation an einem Messquerschnitt mit beidseitiger Sensorik

Die Rohsignale wurden im Postprocessing gefiltert und genullt. Die Filtercharakteristik ergab bei allen Abschnitten plausible Kurvenverläufe, aus welchen die Schwingungen der Schiene und des Messaufbaus vollständig eliminiert sind, ohne den eigentlichen Kompressionsvorgang abzuschwächen.

Zur Auswertung wurde jeweils die erste Achse der Komposition beigezogen, bei Pendelzügen mit nachlaufender Lok die letzte Achse. Diese Vorgehensweise ermöglicht die höchste Vergleichbarkeit durch Reduzierung von Einflüssen benachbarter Achsen und dynamischer Anregungen der Schiene durch das Fahrzeug.

Die dargelegten Ergebnisse sind das Resultat einer Verrechnung der Signale auf der Schieneninnen- und Schienenaussenseite sowie der Mittelung über die jeweils fünf gemessenen Schwellen pro Abschnitt. Die Empfindlichkeitswerte der Weggeber wurden unmittelbar vor Beginn der Messkampagne ermittelt.

5.8 Lärm/Luftschallemission im Gleis

Mit den Lärmessungen (Messung der Luftschallemission) wurde untersucht, wie sich die drei verschiedenen Typen von Zwischenlagen bei realen Zugvorbeifahrten bezüglich der Emissionen des Direktschalls verhalten. Die Messungen wurden gemäss der Norm EN ISO 3095:2013 durchgeführt.

Die Lärmessungen wurden von der Firma infraMT durchgeführt, welche als Spin-Off der SBB Messtechnik entstanden ist und jahrelange Erfahrung in Messungen im Gleis hat.

Pro Testabschnitt wurde mit je einem Mikrofon gemessen. Die Standorte der Mikrofone befanden sich jeweils bei den Messstellen L1, L2 und L3, siehe [Abbildung 4](#). Zu den Fahrleitungsmasten wurde ein Abstand von 10 m eingehalten. In der Ausbreitungsrichtung befand sich bei allen Abschnitten ein gleich breiter, nicht asphaltierter Fuss- und Fahrradweg sowie bei Abschnitt A1 und A2 ein Maschendrahtzaun ohne Bewuchs.

Die Position der Mikrophone befand sich gemäss EN ISO 3095:2013 in einem Abstand von 7,5 m rechtwinklig zur Gleisachse auf einer Höhe von 1,2 m über der Schienenoberkante. Die Messungen der drei Abschnitte erfolgten simultan. Zudem wurde die Zugsgeschwindigkeit ermittelt. Alle Messquerschnitte wurden von der Seite des Versuchsgleises her gemessen. Abbildung 12 zeigt die Mikrophonposition nach Norm und Abbildung 13 die Situation beim Messquerschnitt L2 im Versuchsabschnitt A2.

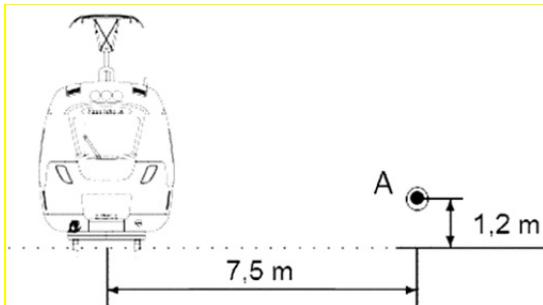


Abbildung 12: Mikrophonposition



Abbildung 13: Situation beim Querschnitt L2

Die Messung wurde mit einer Abtastfrequenz von 48 kHz durchgeführt. Die A-Bewertung erfolgte im Postprocessing, es wurden die linearen Signale aufgezeichnet.

5.9 Abklingrate im Gleis

Die Gleisabklingrate (TDR = Track Decay Rate) gibt Auskunft über das Dämpfungsverhalten der Schienenbefestigungssysteme. Dabei haben erfahrungsgemäss die Schienenzwischenlagen den grössten Einfluss. Die Messungen wurde gemäss der Norm EN 15461:2008+A1 durchgeführt.

Die Messungen der Gleisabklingrate wurden von der Firma infraMT koordiniert und von der Firma Müller-BBM durchgeführt. Die Durchführung erfolgte in einer Nachschicht am unbelasteten, gesperrten Gleis.

Jeder Testabschnitt wurde gemäss Norm mit Beschleunigungsaufnehmern an beiden Schienen ausgerüstet, um in horizontaler und vertikaler Richtung messen zu können. Die Standorte befanden sich jeweils bei den Messstellen L1, L2 und L3, siehe Abbildung 4.

Zuerst wurden die Gleisabschnitte hinsichtlich ihrer Eignung zur Durchführung der Messungen visuell inspiziert und der zu untersuchende Messabschnitt festgelegt. Danach wurden die 29 Messpunkte der Messreihen für die vertikale und horizontale Messrichtung entsprechend der Norm an beiden Schienen des Versuchsgleises eingerichtet und an der Schiene gekennzeichnet. Abbildung 14 zeigt die Mess- und Anregungspositionen für die TDR-Messungen gemäss EN 15461.

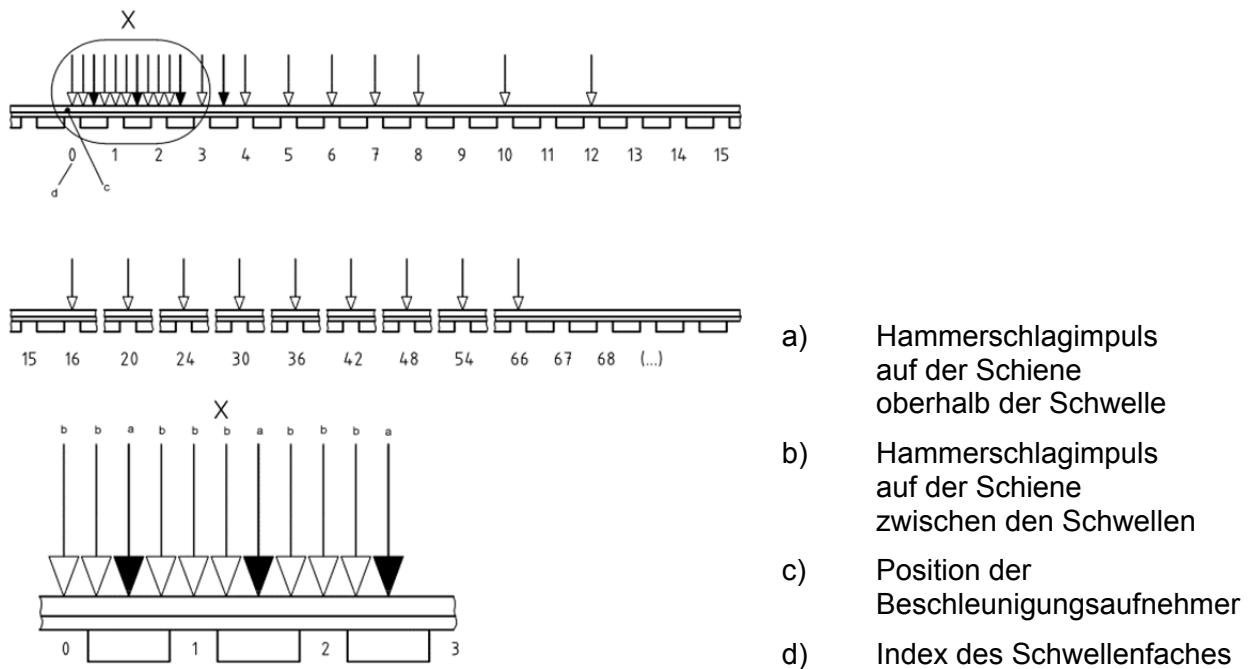


Abbildung 14: Mess- und Anregungspositionen nach EN 15461

Der Beschleunigungssensor wurde mittels eines Magneten an der Schiene befestigt. Der Sensor wurde vertikal am Schienenkopf angebracht, horizontal auf der Aussenseite des Schienenkopfs, siehe Abbildung 15. Als Signalgeber fungiert ein Prüfhammer in welchem ein Kraftsensor integriert ist. Das Beschleunigungssignal wurde zusammen mit dem Kraftsignal des Prüfhammers in das Messsystem eingeleitet. An jedem Messpunkt wurden mindestens vier gültige Einzelmessungen (Hammerschläge) durchgeführt. Während der Messungen wurde die Kohärenz der Signale überwacht. Bei nicht ausreichender Kohärenz wurden die Einzelmessungen wiederholt.

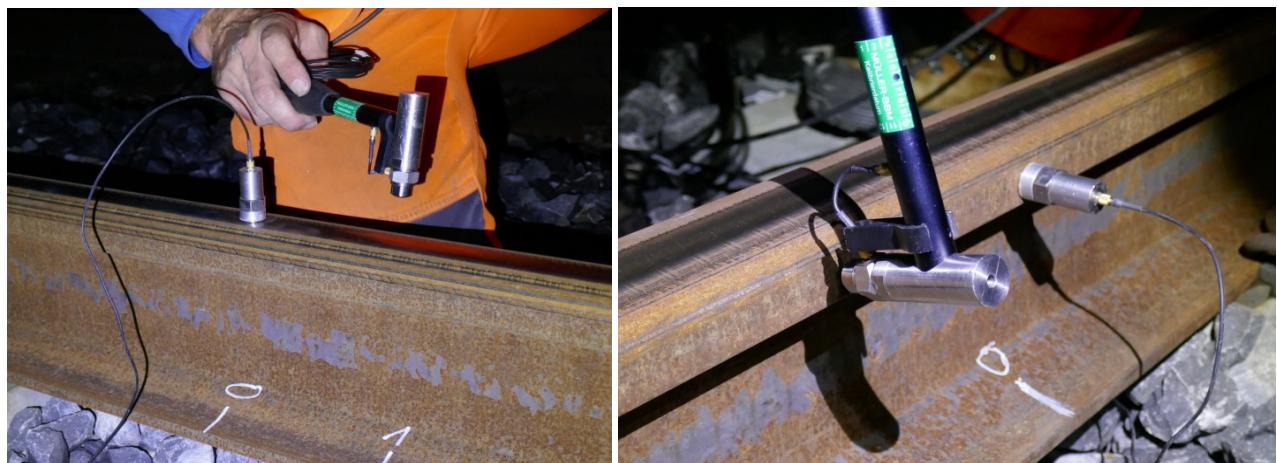


Abbildung 15: Messung der Gleisabklingrate vertikal (links) und horizontal (rechts)

Vor der Messung der Abklingrate wurde jeweils eine Konsistenzprüfung in vertikaler Messrichtung durch den Vergleich der Übertragungsfunktionen im nullten Schwellenfach (Startpunkt, Position 0) mit zwei Punktübertragungsfunktionen im Abstand von je einem Viertel des Schwellenabstands in beide Richtungen (-1 und +1) durchgeführt. Ein Vergleich der Punktübertragungsfunktionen (Punktakzeleranzen) für die Punkte 0, -1, und +1 ergab, dass sich diese nur gering voneinander unterscheiden. Der vorgesehene Messstandort war damit prinzipiell zur Durchführung der Abklingratenmessung geeignet. Als Referenzpunkt für die Abklingratenmessung wurde jeweils der Punkt 0 gewählt.

Die verwendeten Messgeräte wurden vor und nach den Messungen auf ihre einwandfreie Funktion überprüft. Die Messwerterfassung erfolgte mit einem Mehrkanalmesssystem der Firma Mecalc, Typ MK-II. Die Auswertung der aufgenommenen Messdaten erfolgte mit der Software PAK 5.9 SR 2a (Müller-BBM VibroAkustik Systeme GmbH).

Die aufgezeichneten Beschleunigungs- und Kraftsignale wurden in Schmalbandspektren im Frequenzbereich von 0 bis 6400 Hz bei 4 Hz Auflösung fouriertransformiert. Aus den Schmalbandspektren wurde die Übertragungsfunktion (Akzeleranz) bestimmt. Die Zeitsignale, deren Schmalbandspektren sowie die Übertragungsfunktionen und die Kohärenz der Signale wurden gemittelt und abgespeichert.

Aus den gemittelten, schmalbandigen Übertragungsfunktionen wurden Terzspektren bestimmt. Damit wurde die Abklingrate in dB/m errechnet und den Grenzkurven aus der Norm EN ISO 3095 für Typenprüfungen von Fahrzeugen gegenübergestellt.

6 Messergebnisse

6.1 Allgemeines

Die Ergebnisse der Labormessungen sind in den Kapiteln 6.2 bis 6.6 zu finden, diejenigen der Messungen im Gleis in den Kapiteln 6.7 bis 6.9.

Die kompletten Prüfberichte sind im Anhang wie folgt zu finden: Prüfbericht Nr. 3714 der Technischen Universität München/D im Anhang A1, Untersuchungsbericht Nr. 1064 von Vossloh Werdohl/D im Anhang A2, Bericht Nr. C90372/01 von Müller-BBM Muttenz/CH im Anhang A3 und Messbericht Nr. 17-107-2021 von infraMT Finsterhennen/CH im Anhang A4.

6.2 Steifigkeit im Labor

In Tabelle 4 sind die statische, vertikale Steifigkeit des Befestigungssystems vor und nach dem Dauerschwingversuch (Prüflabor der Technischen Uni München/D) sowie die gemessene und zulässige Steifigkeitsänderung zusammengefasst.

Tabelle 4: Statische Steifigkeit des Befestigungssystems

Messgrösse	Vor Dauer-schwing-versuch	Nach Dauer-schwing-versuch	Gemessene Änderung	Zulässige Änderung *
Statische, vertikale Steifigkeit k_{SA} des Befestigungssystems	83,3 kN/mm	82,0 kN/mm	-1,6%	$\leq \pm 25\%$

* Maximal zulässige Änderung der Steifigkeit nach dem Dauerschwingversuch nach EN 13481-2:2012

In Tabelle 5 sind die statische und die dynamische, vertikale Steifigkeit der Zwischenlage ENIT (Werkslabor von Vossloh Werdohl/D) zusammengefasst. Die Messungen erfolgten nach EN 13146-9, Punkt 6.1, für die statische Steifigkeit der Zw und nach Punkt 6.2 für die niederfrequente, dynamische Steifigkeit der Zw bei 5 Hz.

Tabelle 5: Statische und dynamische Steifigkeit der Zw ENIT

Messgrösse	Statische Steifigkeit	Dynamische Steifigkeit
Vertikale Steifigkeit k_{SA} der Zwischenlage ENIT	77,1 kN/mm	83,8 kN/mm

Beurteilung der Steifigkeit

Die Messungen der statischen, vertikalen Steifigkeit an der Zwischenlage ENIT und am gesamten Stützpunkt (Systemsteifigkeit) haben sehr ähnliche Werte ergeben. Es kann also gesagt werden, dass die optimierte Zw ENIT eine statische, vertikale Steifigkeit von ca. 80 kN/mm aufweist. Dies ist aus langjährigen Erfahrungen ein optimaler Steifigkeitswert hinsichtlich Elastizität im Gleis und LCC-Betrachtung. Damit weist die Schienenbefestigung die nötige Elastizität auf, um die Gleiskomponenten zu schonen.

Die gemessene Steifigkeitsänderung vor und nach dem Dauerschwingversuch beträgt nur -1,6%. Die maximal zulässige Änderung der Steifigkeit nach EN 13481-7:2012 beträgt $\leq \pm 25\%$. Somit liegt die Änderung der Steifigkeit klar im zulässigen Bereich. Dies zeigt, dass das verwendete EPDM-Material der Zw ENIT alterungsbeständig ist und dauerhaft die gewünschten elastischen Eigenschaften aufweist.

6.3 Spannkraft im Labor

In *Tabelle 6* sind die Spannkraft des Befestigungssystems vor und nach dem Dauerschwingversuch (Prüflabor der Technischen Uni München/D) sowie die gemessene und zulässige Änderung der Spannkraft zusammengefasst.

Tabelle 6: Spannkraft des Befestigungssystems

Messgrösse	Vor Dauerschwing-versuch	Nach Dauerschwing-versuch	Gemessene Änderung	Zulässige Änderung *
Spannkraft P_0	16,8 kN	14,9 kN	-11,3%	$\leq \pm 20\%$

* Maximal zulässige Änderung der Spannkraft nach dem Dauerschwingversuch nach EN 13481-2:2012

Beurteilung der Spannkraft

Die gemessene Änderung der Spannkraft vor und nach dem Dauerschwingversuch beträgt -11,3%. Die maximal zulässige Änderung der Spannkraft nach EN 13481-7:2012 beträgt $\leq \pm 20\%$. Somit liegt die Änderung der Spannkraft im zulässigen Bereich. Die Spannkraft resp. deren Änderung ist wichtig, damit das Befestigungssystem die Schiene mit genügend grosser Kraft niederhalten kann. Die Norm schreibt jedoch keinen Minimalwert für die Spannkraft (Niederhaltekraft) vor. Moderne Schienenbefestigungen wie das System W14 von Vossloh weisen aber typischerweise eine Niederhaltekraft pro Stützpunkt von 15 bis 18 kN auf, was die Labormessungen bestätigt haben.

6.4 Durchschubwiderstand im Labor

In Tabelle 7 ist der Durchschubwiderstand, d.h. der Mittelwert der max. Längskraft, des Befestigungssystems vor und nach dem Dauerschwingversuch (Prüflabor der Technischen Uni München/D) sowie die gemessene und zulässige Änderung des Durchschubwiderstandes zusammengefasst.

Tabelle 7: Durchschubwiderstand des Befestigungssystems

Messgrösse	Vor Dauer-schwing-versuch	Nach Dauer-schwing-versuch	Gemessene Änderung	Zulässige Änderung *
Durchschubwiderstand (Mittelwert der max. Längskraft F)	11,3 kN	10,9 kN	-3,5%	$\leq \pm 20\%$

* Maximal zulässige Änderung der Längskraft nach dem Dauerschwingversuch nach EN 13481-2:2012

Beurteilung des Durchschubwiderstands

Die gemessene Änderung der Längskraft vor und nach dem Dauerschwingversuch beträgt -3,5%. Die maximal zulässige Änderung der Längskraft nach EN 13481-7:2012 beträgt $\leq \pm 20\%$. Somit liegt die Änderung der Längskraft im zulässigen Bereich. Gemäss EN 13481-2:2012, Punkt 5.1, darf der Durchschubwiderstand in Längsrichtung nicht weniger als 7 kN betragen. Dieser Minimalwert nach Norm wurde sowohl vor als auch nach dem Dauerschwingversuch eingehalten.

6.5 Verdrehwiderstand im Labor

In Tabelle 8 ist der Verdrehwiderstand, d.h. das Verdrehmoment, des Befestigungssystems (Prüflabor der Technischen Uni München/D) zusammengefasst.

Tabelle 8: Verdrehwiderstand des Befestigungssystems

Lastzyklus	Verdrehwinkel	Verdrehmoment
1. Prüfung	1,0°	0,52 kNm
Gegenseitige Prüfung	-1,0°	1,08 kNm

Beurteilung des Verdrehwiderstands

Für den Verdrehwiderstand, d.h. für das Verdrehmoment, der Schienenbefestigung ist in der EN 13481 kein Mindestwert angegeben. Auch die SBB macht dazu keine Angaben.

6.6 Dauerschwingversuch im Labor

In *Tabelle 9* sind die Ergebnisse des Dauerschwingversuchs (Prüflabor der Technischen Uni München/D) zusammengefasst. Die horizontale Auslenkung wurde sowohl am Schienenfuss als auch am Schienenkopf gemessen. Die vertikale Einfederung der Schiene wurde sowohl an der Aussenseite wie auch an der Innenseite gemessen. Die Messungen erfolgten zu Beginn des Dauerschwingversuchs nach 10 Lastspielen und am Ende des Dauerschwingversuchs nach 3 Mio. Lastspielen. Dabei wurden jeweils die elastischen und die plastischen/bleibenden Anteile ermittelt.

Tabelle 9: Verformungen unter statischer Last vor und nach dem Dauerschwingversuch

Statische Belastung										
Anzahl der Last- spiele	Horizontale Auslenkung am				Vertikale Einfederung der Schiene					
	Schienenfuss [mm]		Schienenkopf [mm]		Aussenseite [mm]		Innenseite [mm]			
	elast.	plast.	elast.	plast.	elast.	plast.	elast.	plast.		
10	0,75	-0,05	3,20	0,08	1,55	0,00	-1,15	0,00		
3'000'000	0,75	0,25	3,05	0,85	1,40	0,30	-1,05	-0,20		

Beurteilung des Dauerschwingversuchs

Die Verformungsverläufe zeigen einen Anpassungsprozess innerhalb der ersten rund 1 Mio. Lastwechsel. Danach bleiben die Verformungen nahezu konstant, so dass die Werte bei 3 Mio. Lastwechseln den konsolidierten Systemzustand wiedergeben.

Die elastischen Verformungen nehmen über die Versuchsdauer ab, während die plastischen, bleibenden Verformungen bei abnehmender Zuwachsrate anwachsen. In den entsprechenden Normen EN 13481-2 und EN 13146-4 sind jedoch keine Vorgaben definiert. Da die Versuchsbedingungen viel härter definiert sind als die realen Bedingungen im Gleis, lassen sich die Ergebnisse nicht mit den im Gleis gemessenen Werten vergleichen.

An der Zwischenlage wurden nach dem Dauerschwingversuch kleinere plastische Verformungen beobachtet. Die Schienenbefestigungskomponenten und die halbe Betonschwelle zeigten keine Schäden. Insgesamt hat das Schienenbefestigungssystem mit der Zw ENIT den Dauerschwingversuch mit 3 Mio. Lastzyklen also bestanden.

6.7 Einsenkung/Kompression der Zwischenlagen im Gleis

Übersicht der Einsenkung/Kompression der Zwischenlagen

Im Mittel über die erste resp. letzte Achse sämtlicher erfassten Fahrzeuge beträgt die Einsenkung/Kompression der Zwischenlage im Abschnitt A1 (steife Zw) 0,07 mm, im Abschnitt A2 mit elastischen Zw 0,50 mm und im Abschnitt mit optimierten Zw ENIT 0,51 mm, siehe Abbildung 16. Eine Betrachtung von Streuwerten über alle Fahrzeugtypen ist nicht aussagekräftig, da die Variation in den Amplituden grösstenteils in den unterschiedlichen Achslasten ihre Ursache hat.

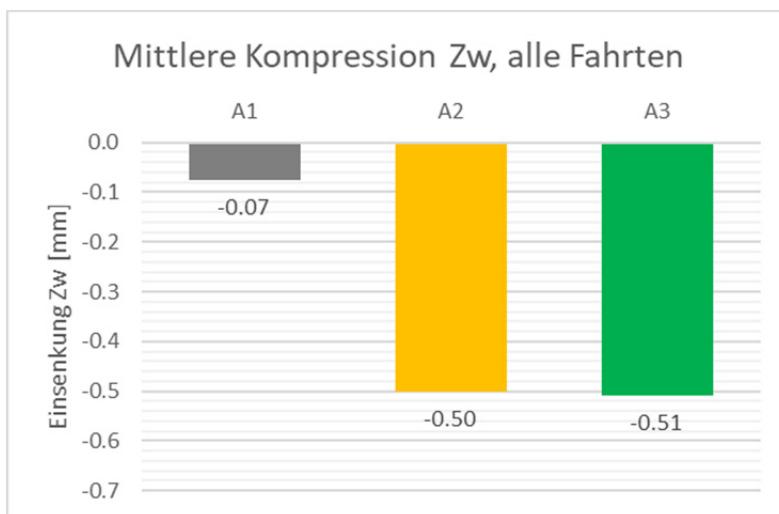


Abbildung 16: Mittlere Einsenkung der Zw über alle Fahrten

Fahrzeugabhängige Kompression der Zwischenlagen

Der am häufigsten erfasste Zugtyp ist der Stadler Flirt (RABe 521) mit 18 Fahrten. Ebenfalls in ausreichender Häufigkeit für eine statistische Betrachtung erfasst wurden die Fernverkehrszüge mit fast ausschliesslich vorlaufenden Re 460. Seltener, je zweimal, wurden Intercity Neigezüge (ICN, RABDe 500) und Lokomotiven vom Typ Re 420 gemessen, gar nur einmal eine Lokomotive vom Typ Re 620. Aufgrund der Anzahl Messungen wird lediglich bei den RABe 521 und Re 460 eine Angabe der Standardabweichung gemacht. Vom ICN und der Re 420 sind nur die Mittelwerte dargestellt. Die Resultate je Fahrzeugtyp sind in den Abbildungen 17 bis 20 zu finden.

Die geringfügige Differenz von 0,01 mm zusätzlicher Kompression bei der Zw ENIT gegenüber der elastischen Zw gründet auf den schweren Achslasten der Lokomotiven Re 460 und Re 420 mit je 0,02 mm zusätzlicher Kompression. Bei den leichten Fahrzeugen RABe 521 und ICN ist keine Differenz festgestellt worden. Auch die Standardabweichung weist eine maximale Differenz von +0,01 mm bei den Re 460 im Abschnitt A3 (Zw ENIT) auf, ansonsten sind die Werte identisch.

Aufgrund der markant kleineren Amplituden im Abschnitt A1 (steife Zw) werden lediglich Vergleiche zwischen den Abschnitten A2 und A3 gezogen.

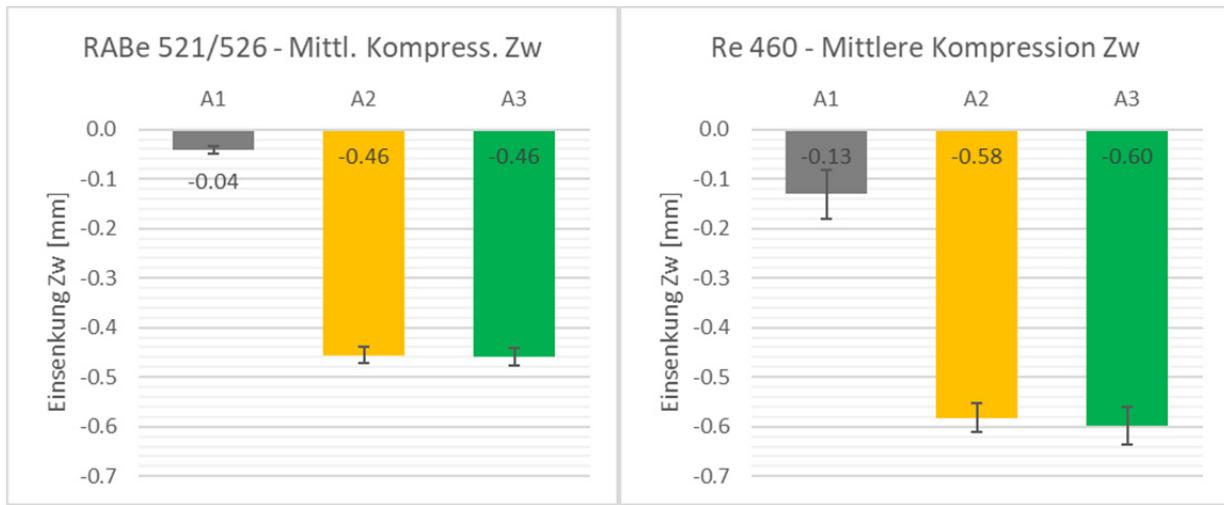


Abb. 17: Zw-Kompression RABe 521/526

Abb. 18: Zw-Kompression Re 460

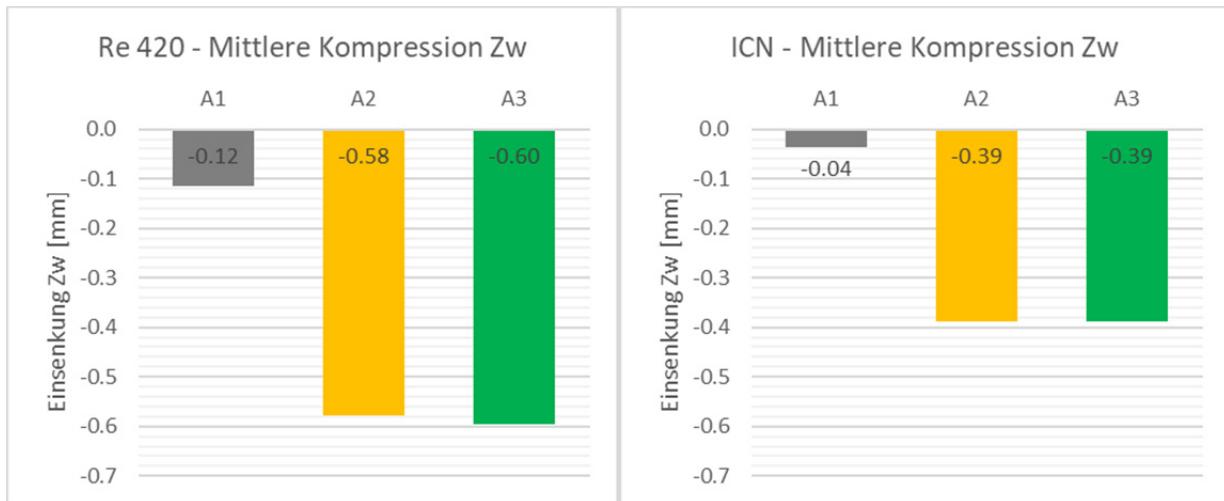


Abb. 19: Zw-Kompression Re 420

Abb. 20: Zw-Kompression RABDe 500

Kompressionslinie der Zwischenlagen

Nebst der absoluten Einsenkung resp. Kompression der Zwischenlage ist die Lastverteilfähigkeit ein entscheidendes Kriterium bei der Beurteilung des elastischen Layers. Ziel ist es, die Radlast in Längsrichtung auf möglichst viele Schwellen zu verteilen, um die Belastung für das einzelne Element sowie den darunterliegenden Schotter und Unterbau zu reduzieren. Zudem wird auch die Schiene bei gleicher Gesamteinsenkung bei einer längeren Einsenkungsmulde weniger stark auf Biegespannung beansprucht.

Durch die vorliegende Messung kann jedoch nicht die gesamte Biegelinie der Schiene abgebildet werden, es handelt sich lediglich um die Kompressionslinie der Zwischenlage.

Um den Lastverteileneffekt der Zwischenlagen veranschaulichen zu können, wurden zwei Messfahrten (MF) ausgewählt, bei welchen die jeweils ersten Achsen in den Abschnitten A2 und A3 dieselben mittleren Amplituden hervorgerufen haben (MF10 mit Re 460 und MF16 mit RABe 521/526). Die Kurven der Messpunkte 1 bis 5 (nur Schienenaussenseite) wurden zeitlich so verschoben, dass sie übereinander zu liegen kamen. Durch das Verrechnen der Zeit mit der Geschwindigkeit konnte der Wegkanal generiert werden. Der Nullpunkt dieses Wegkanals entspricht der Position, an welcher sich die erste Achse befindet (maximale Einsenkung). In den Abbildungen 21 und 22 ist jeweils nur der Ausschnitt vor der ersten Achse zu sehen (negativer Wegbereich), da die Kompressionslinie auf der anderen Seite von der zweiten Achse im Drehgestell beeinflusst wird.

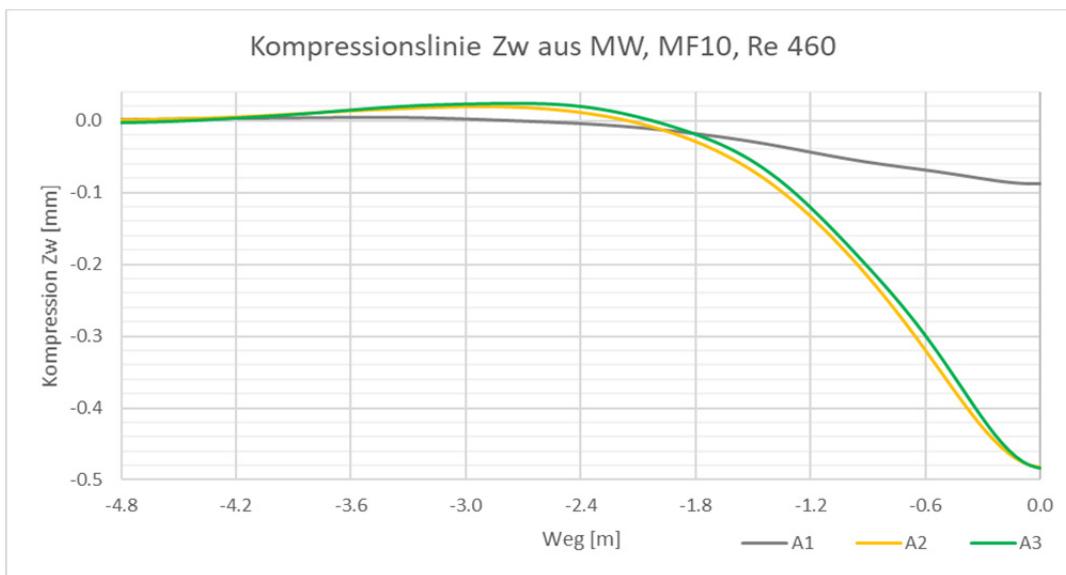


Abbildung 21: Kompressionslinie Zw Detail, MF10, Re 460

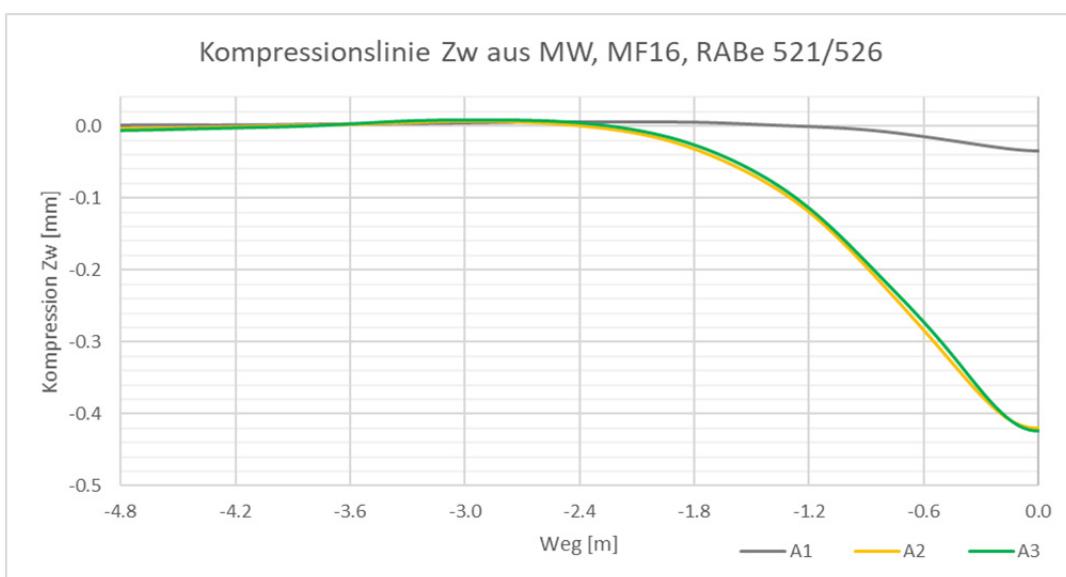


Abbildung 22: Kompressionslinie Zw Detail, MF16, RABe 521/526

Die Kompression der Zwischenlagen über das gesamte erste Drehgestell aus MF10 mit der Re 460 und aus MF16 mit RABe 521/526 ist in den Abbildungen 23 und 24 zu sehen.

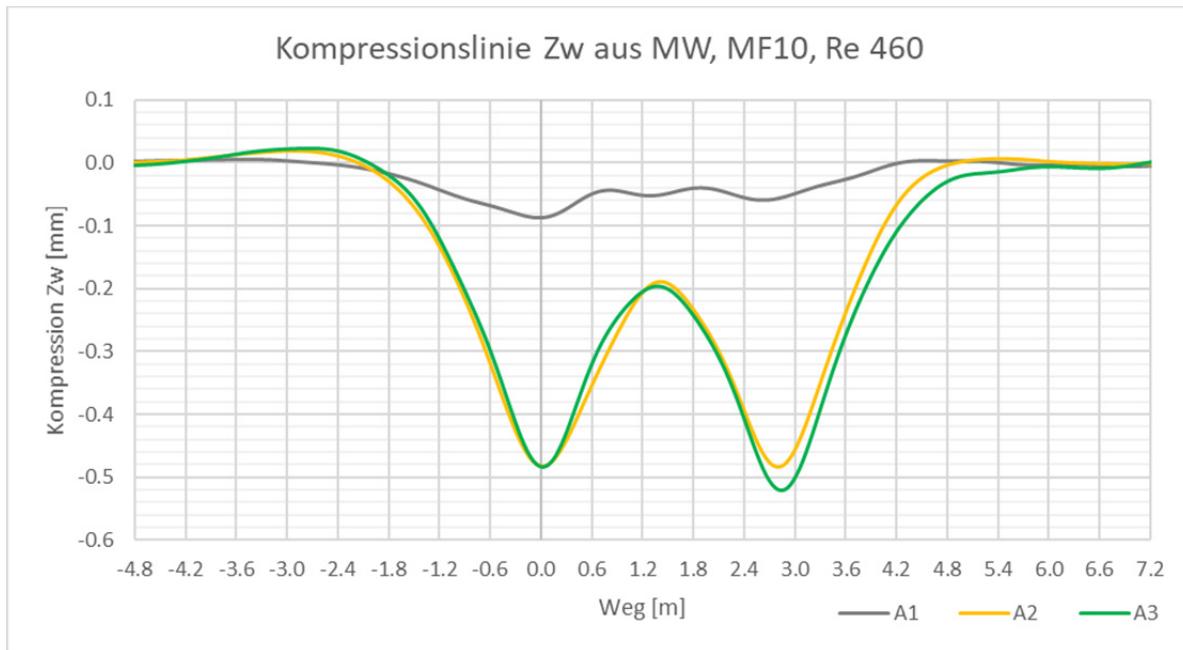


Abbildung 23: Kompressionslinie Zw , MF10, Re 460

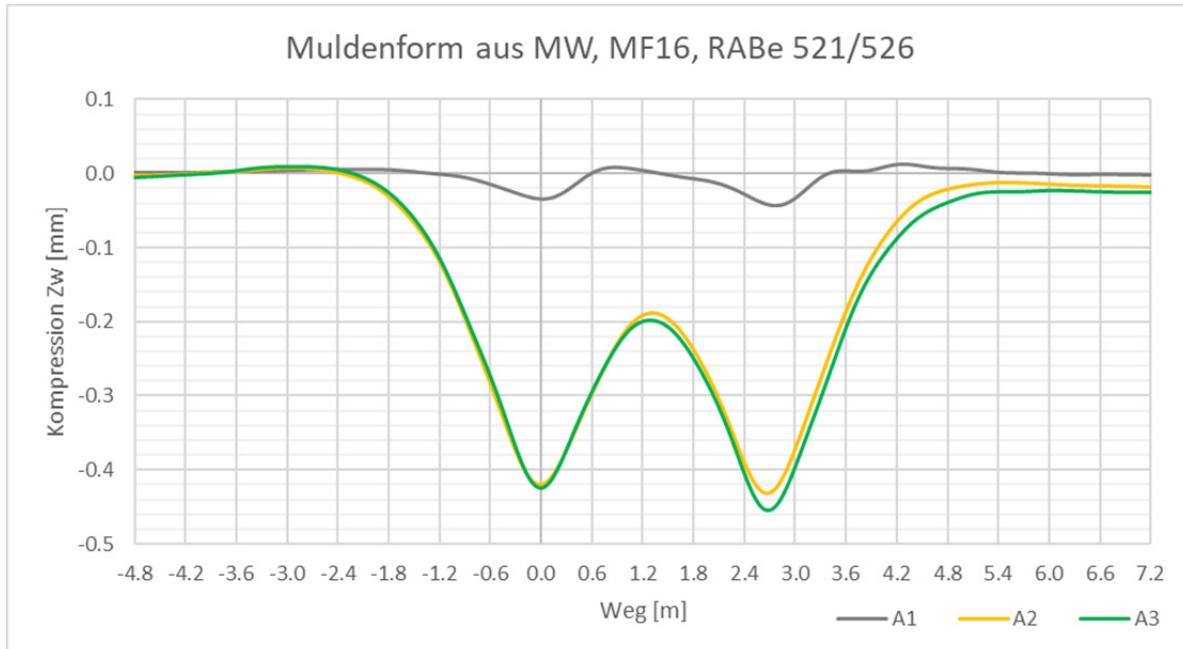


Abbildung 24: Kompressionslinie Zw , MF16, RABe 521/526

Die Kompressionslinie im Abschnitt A3 mit der optimierten Zw ENIT verläuft geringfügig steiler als im Abschnitt A2 mit der elastischen Zw. Ebenfalls ist die Abhebewelle (positive Einstellung, bzw. Dekompression) im Abschnitt A3 leicht höher. Die gesamte Einflusszone der Radlast weist bei der Re 460 eine halbe Wellenlänge von über 4 m auf, bei der leichteren Achse des Regionalverkehrszuges sind es nur etwa 2,5 m. Der Abschnitt A1 ist aufgrund seiner sehr geringen Kompression schwer beurteilbar, da sich sämtliche Größen im Hundertstelmillimeterbereich bewegen. Der Einfluss der Zwischenlage auf die Lastverteilung ist mit einer solch hohen Steifigkeit und dem damit einhergehenden tiefen Anteil an der Gesamteinstellung kaum relevant.

Bei der Interpretation der Kompressionslinie ist jedoch Vorsicht geboten, insbesondere wenn die Differenzen so gering ausfallen wie im Vergleich der beiden Abschnitte A2 und A3. Die Steifigkeiten der weiteren elastischen Komponenten im Gleis, allen voran des Untergrunds, haben einen wesentlichen Einfluss auf die Lastverteilung innerhalb der lastabtragenden Schwellen und somit auf die Biegelinie der Schiene und auch auf die Kompression der Zw. Es ist also nicht klar, ob die geringen, erfassten Differenzen auf die Zw oder auf die gesamte Gleissteifigkeit zurückzuführen sind.

Beurteilung der Einstellung/Kompression der Zwischenlagen

Erfahrungsgemäß sollte im Gleis eine Gesamteinstellung unter Last von 1,0 bis 1,5 mm angestrebt werden. Die Gesamteinstellung setzt sich hauptsächlich aus den elastischen Layern im Gleis zusammen. Gezielt eingesetzt werden Schienenzwischenlagen und Schwellenbesohlungen. Zudem haben auch der Schotter, der Unterbau und der Untergrund einen Einfluss auf die Gesamteinstellung.

Die alte, steife Zwischenlage hat eine statische Steifigkeit von rund 600 kN/mm. Die Messungen im Gleis zeigen, dass der Abschnitt A1 mit den steifen Zw im Mittel erwartungsgemäß eine sehr kleine Kompression von weniger als 0,1 mm aufweist. Somit kann die steife Zw praktisch nichts zur Gesamtelastizität des Gleisrostes beitragen.

Die elastische, weiche Zwischenlage im Abschnitt A2 hat eine statische Steifigkeit von ca. 60 kN/mm. Die optimierte, weiche Zwischenlage ENIT im Abschnitt A3 hat gemäß den Laborprüfungen eine etwas höhere statische Steifigkeit von rund 80 kN/mm (dies aufgrund der steiferen, dämpfenden Rondellen, siehe Abbildung 2). Beide weichen Zw in den Abschnitten A2 und A3 weisen eine durchschnittliche Kompression von 0,5 mm auf. Sie tragen also wesentlich zur Gesamtelastizität im Gleis bei.

Nebst der absoluten Einstellung resp. Kompression der Zw ist die Lastverteilfähigkeit ein entscheidendes Kriterium bei der Beurteilung des elastischen Layers. Die Kompressionslinien zeigen, dass die weichen Zw in den Abschnitten A2 und A3 eine signifikant bessere Lastverteilwirkung aufweisen als die steife Zw in Abschnitt A1. Somit trägt eine weiche Zw deutlich mehr zur Schonung der Oberbaukomponenten bei.

Insgesamt ist die optimierte Zwischenlage ENIT hinsichtlich Einstellung/Kompression im Gleis im absolut geeigneten Bereich. Die statische Steifigkeit von ca. 80 kN/mm ergibt die gewünschte Einstellung im Gleis von rund 0,5 mm.

6.8 Lärm/Luftschallemision im Gleis

Dauerschalldruckpegel

Als Vergleichsgröße dient der A-bewertete, äquivalente Dauerschalldruckpegel $L_{pAeq,Tp}$. Dieser beträgt, gemittelt über alle Messfahrten (unkategorisiert), im Abschnitt A1 mit den steifen Zw 83,4 dBA, im Abschnitt A2 mit den elastischen Zw 86,2 dBA und im Abschnitt A3 mit den optimierten Zw ENIT 87,0 dBA. In der Folge wird vornehmlich auf den Vergleich von Abschnitt A2 und A3 eingegangen, da der Abschnitt A1 aufgrund der steifen Zw hinsichtlich der Lärmemissionen in allen Belangen überlegene Resultate liefert. In den Diagrammen sind stets alle drei Abschnitte aufgeführt.

Werden die gemessenen Züge in die groben Kategorien Regional- und Fernverkehr eingeteilt, zeigt sich, dass die Differenz zu Ungunsten der ENIT Zw aus den Regionalverkehrszügen herröhrt. Hier resultiert eine Lärmzunahme von 1,7 dBA (Abschnitt A2 83,6 dBA und Abschnitt A3 85,3 dBA). Bei den tendenziell schwereren Fernverkehrszügen hingegen schnitt die ENIT Zw sogar geringfügig besser ab, die Lärmreduktion beträgt 0,2 dBA (Abschnitt A2 89,2 dBA und Abschnitt A3 89,0 dBA). Die Fernverkehrs- und Güterkompositionen sind aufgrund des höheren mittleren Schallpegels wesentlich störender für die Umwelt als die leiseren Regionalverkehrszüge.

Die zur Mittelung verwendete Anzahl Züge beträgt 19 Züge im Regionalverkehr (6x Flirt, 12x GTW, 1x NPZ) sowie 16 Züge im Fernverkehr (2x Re 420, 12x Re 460, 2x ICN). Abbildung 25 zeigt die mittleren äquivalenten Dauerschalldruckpegel des Regional- und Fernverkehrs für alle drei Abschnitte.

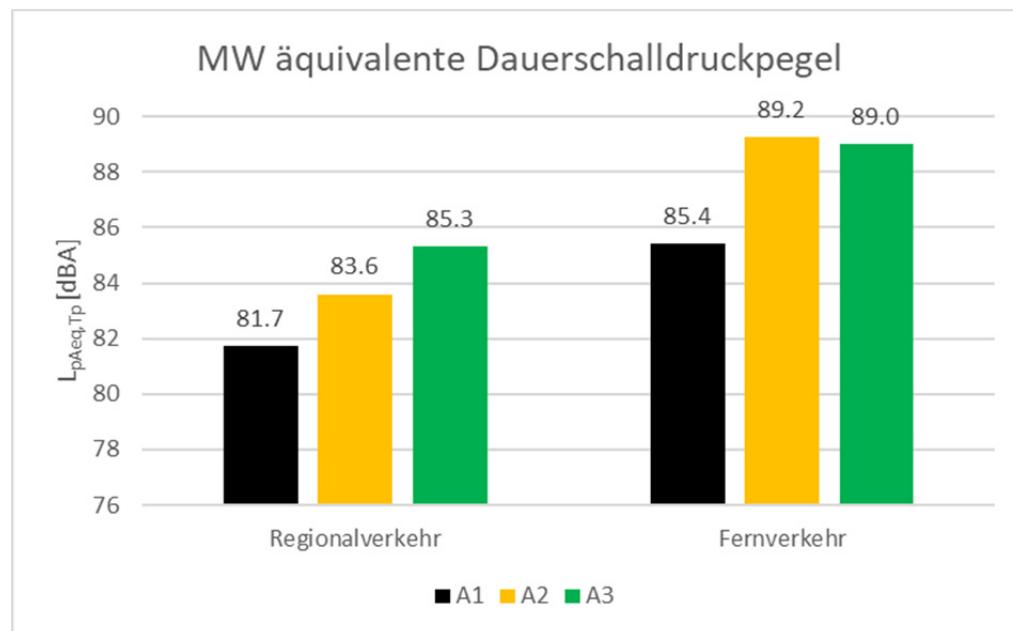


Abbildung 25: Mittlere äquivalente Dauerschalldruckpegel Regional- und Fernverkehr

Werden die Kategorien weiter unterteilt nach Zugtypen, zeigt sich die grösste Differenz bei den RABe 521 (Flirt). Hier beträgt die Lärmzunahme im A3 (ENIT) 3,0 dBA. Der mit schweren Mitteldrehgestellen ausgerüstete RABe 526 (GTW) verursacht noch eine Zunahme von 1,1 dBA.

Im Fernverkehr hingegen resultiert bei allen Zugtypen eine leichte Abnahme der Schallemission, von 0,2 bis 0,6 dBA. Die grösste Reduktion von 0,6 dBA weist die Lokomotive Re 420 mit Wagen auf. Die Datenbasis ist jedoch mit 2 Messungen eher klein, um belastbare Aussagen machen zu können.

Eine Zusammenstellung der mittleren äquivalenten Dauerschalldruckpegel pro Zugtyp und die Anzahl gemessener Kompositionen (n) ist aus Abbildung 26 ersichtlich.

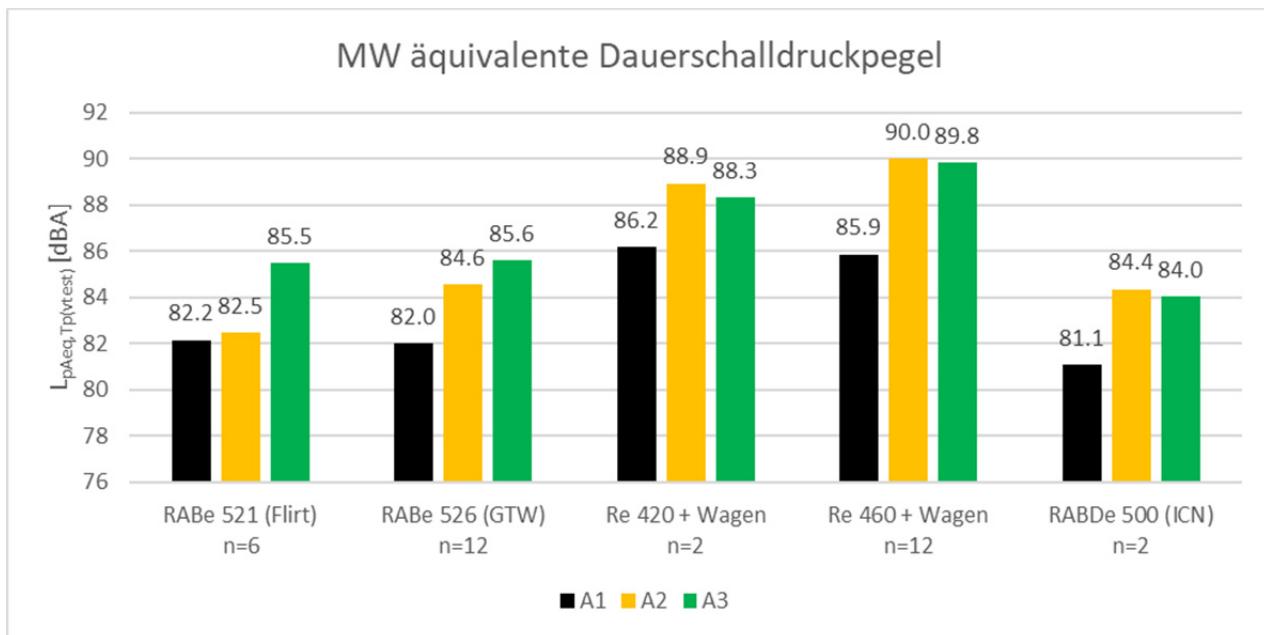


Abbildung 26: Mittlere äquivalente Dauerschalldruckpegel nach Zugtyp

Der Wert $L_{pAeq,Tp}$ ist von der Geschwindigkeit abhängig. Damit die Werte verschiedener Züge und Örtlichkeiten untereinander vergleichbar werden, ist eine Umrechnung auf eine einheitliche Geschwindigkeit notwendig. Abbildung 27 zeigt die auf eine Bezugsgeschwindigkeit von 120 km/h normierten und gemittelten Werte der äquivalenten Dauerschalldruckpegel pro Zugtyp und die Anzahl gemessener Kompositionen (n).

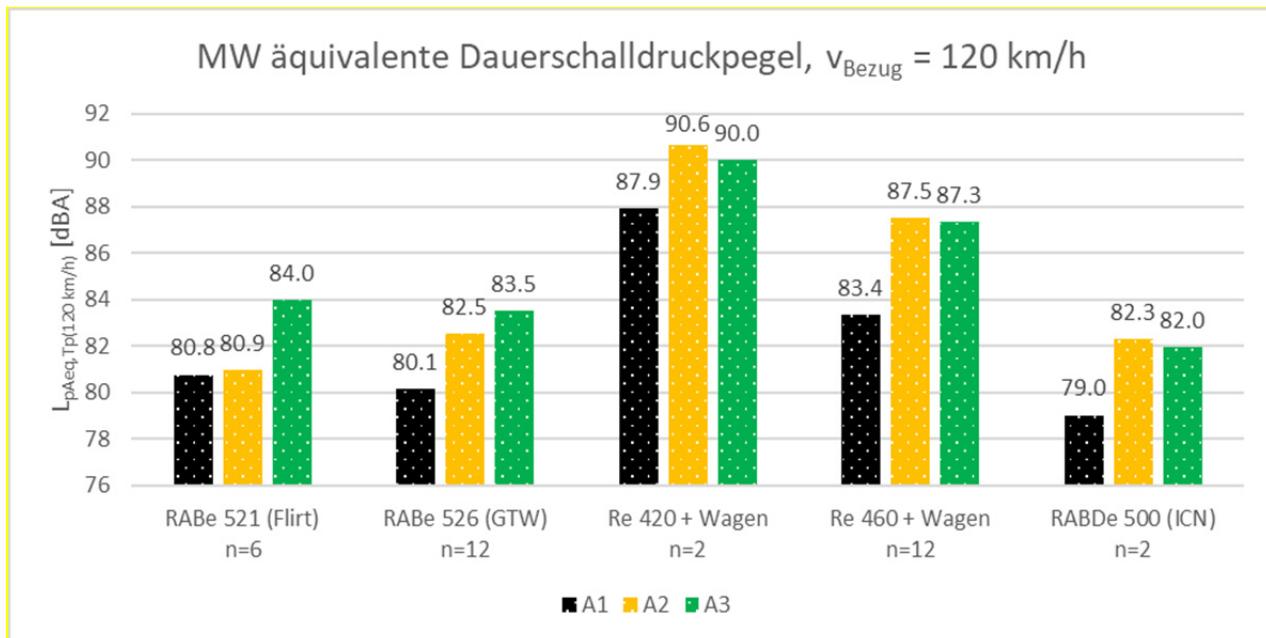


Abbildung 27: Mittlere äquivalente Dauerschalldruckpegel nach Zugtyp, $v_{Bezug} = 120 \text{ km/h}$

Der Vergleich der Abbildungen 26 und 27 zeigt, dass die Deltabetrachtung zwischen den Abschnitten A1, A2 und A3 praktisch gleich geblieben ist. Je nach effektiv gemessener Zuggeschwindigkeit sind jedoch die Absolutwerte von $L_{pAeq,Tp}$ aufgrund der Umrechnung verschieden.

Die stark unterschiedlichen Verhältnisse unter den Zugtypen scheinen nicht direkt von der Achslast abhängig zu sein. So weist bspw. der Flirt ebenso wie die Fernverkehrszüge eine im Mittel höhere Achslast auf als der GTW, die Luftschanlemission ist jedoch beim GTW gegenüber dem Flirt vermindert aber im Vergleich zu den FV-Zügen verstärkt. Auch dürfte die unabgefedernte Masse beim Flirt und beim GTW in etwa identisch sein, bei den FV-Kompositionen jedoch wesentlich höher. Vielmehr scheinen hier andere Faktoren wie das Laufverhalten auf der Geraden und bei hohen Geschwindigkeiten sowie die unterschiedliche Anregung aufgrund der Raddurchmesser Einfluss zu nehmen.

Geschwindigkeitsabhängigkeit

In den Abschnitten A1 und A2 nimmt bei den Regionalverkehrszügen Flirt und GTW der mittlere Schalldruck mit zunehmender Geschwindigkeit ebenfalls zu. Im Abschnitt A3 hingegen bleiben die Werte im Geschwindigkeitsbereich von 116 bis 158 km/h bei linearer Regression in etwa konstant, siehe Abbildung 28. Bei den Fernverkehrskompositionen mit Re 460 Traktion nimmt der Schalldruck in allen Abschnitten in derselben Größenordnung mit der Geschwindigkeit zu, siehe Abbildung 29.

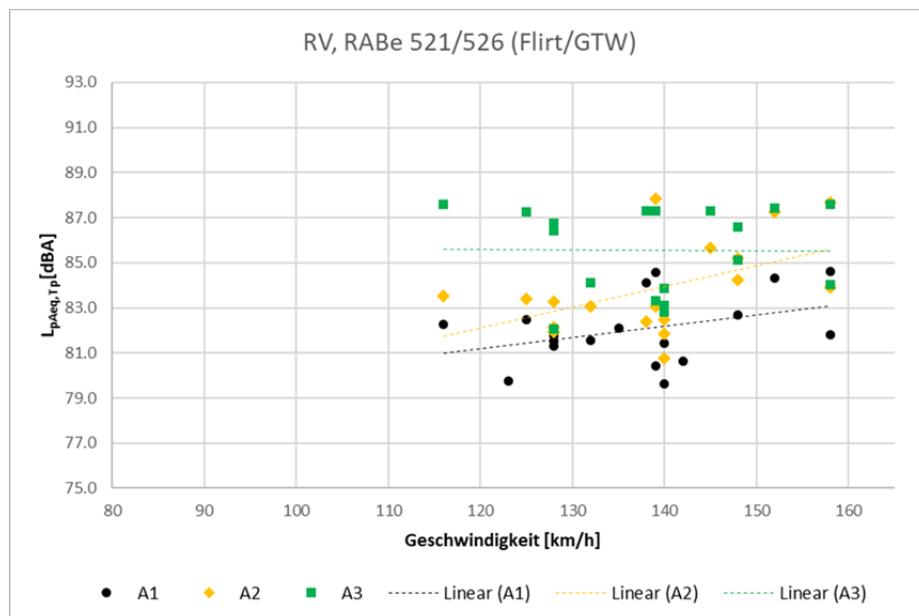


Abbildung 28: V-abhängige Dauerschalldruckpegel RABe 521/526 (Flirt/GTW)

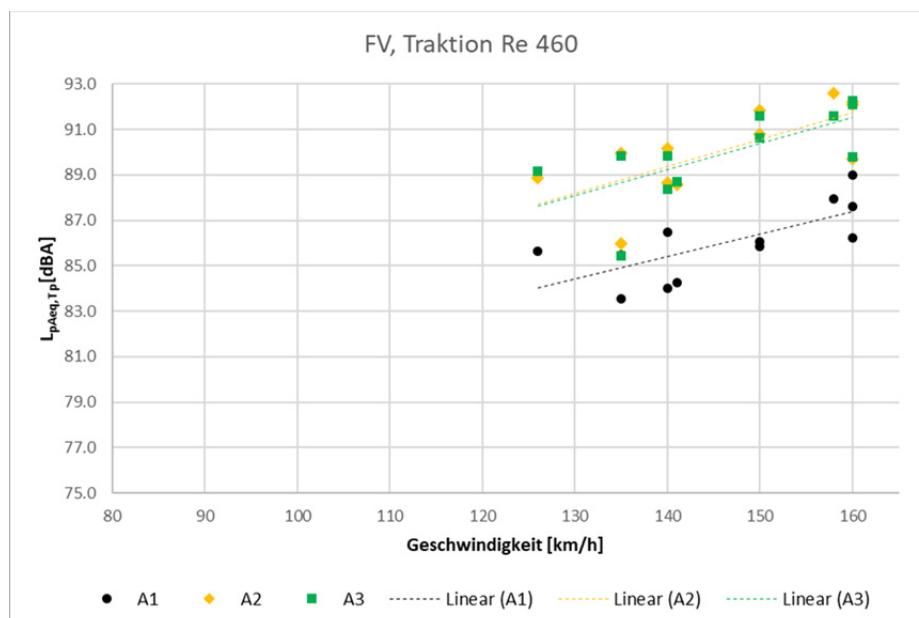


Abbildung 29: V-abhängige Dauerschalldruckpegel Re 460 FV-Kompositionen

Terzspektren

Die wellenlängenabhängige Betrachtung zeigt für alle Zugtypen ein ähnliches Verhalten. Von ca. 80 bis 400 Hz treten im Abschnitt A1 mit steifen Zw höhere Amplituden auf als in den Abschnitten A2 und A3 mit weichen Zw. Die Differenz beträgt bis zu 4 dBA. In den höheren Frequenzen über 500 Hz führen die weichen Zw fast ausnahmslos zu höheren Schallemissionen, wobei die ENIT-Zw in A3 bei den Zugtypen Flirt und GTW höhere und bei den Fernverkehrskompositionen leicht geringeren Amplituden aufweist als der Abschnitt A2.

Über alle Fahrten gemittelt beträgt die grösste Differenz zwischen den beiden weichen Zw 2,4 dBA bei 2,5 kHz zu Ungunsten der ENIT-Zw, wobei lediglich der vom Pegel her relevante Frequenzbereich von ca. 300 bis 6000 Hz berücksichtigt wird. Beim Flirt sind es sogar 6,1 dBA bei derselben Terz-Mittenfrequenz.

Die grössten Vorteile weist die ENIT-Zw bei den ICN-Kompositionen mit -1,6 dBA bei der 630 Hz-Terz auf und bei den Re 460 Pendelzügen mit -1,3 dBA bei der 800 Hz-Terz.

In den Abbildungen 30 bis 32 sind beispielhaft die gemittelten Terzbänder aller Zugfahrten sowie der häufigsten Zugtypen GTW und Re 460 dargestellt, die weiteren gemittelten Terzbänder (Flirt, ICN) sowie die Terzbänder aller einzelnen Fahrten können dem Anhang A4 entnommen werden.

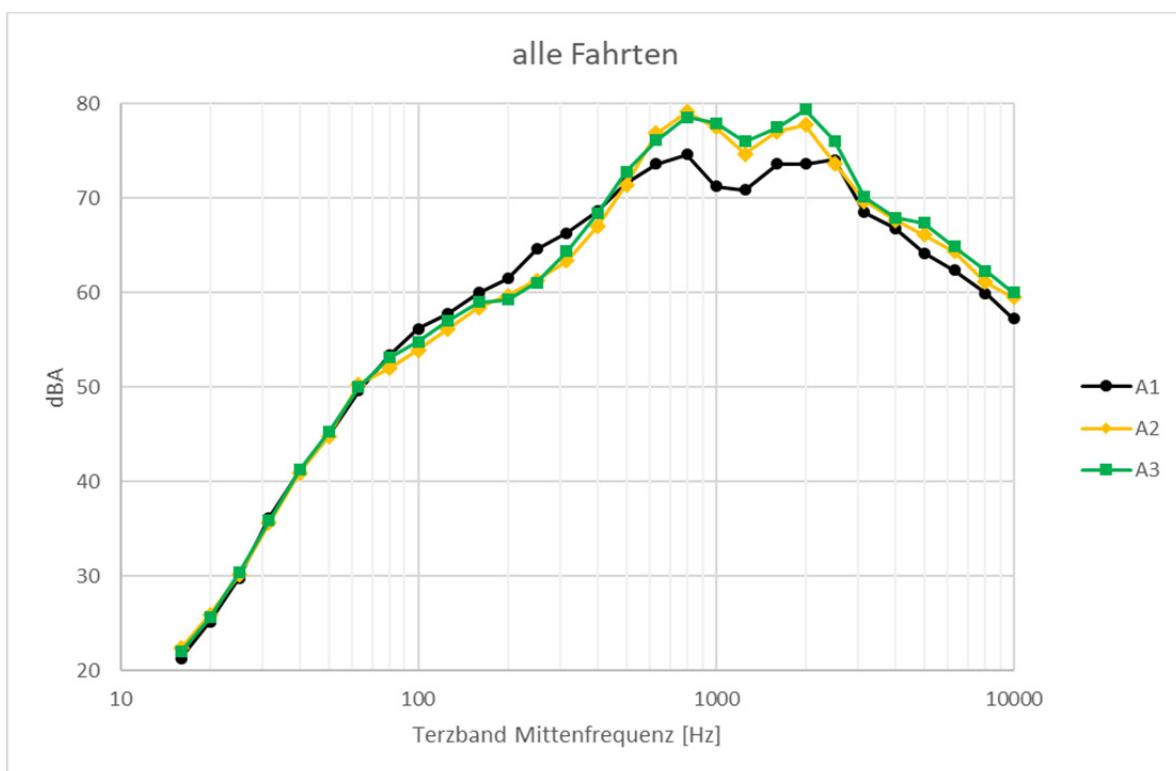


Abbildung 30: Terzbänder über alle Messfahrten gemittelt

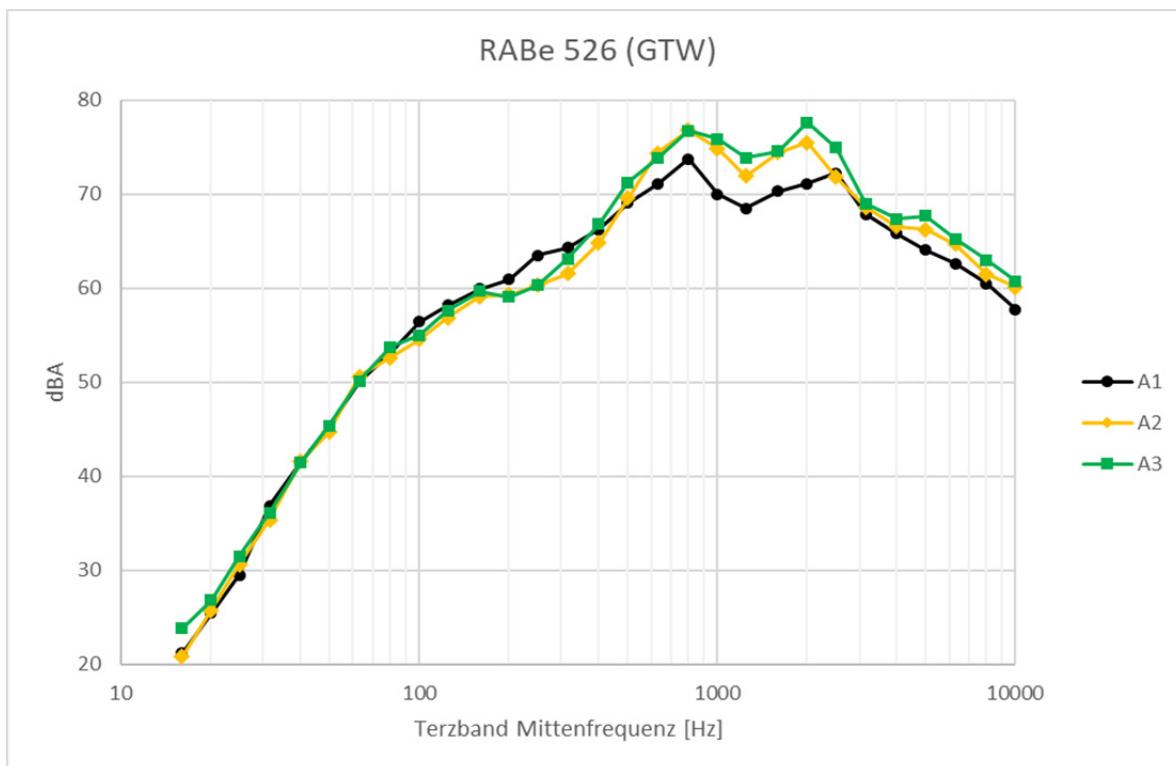


Abbildung 31: Terzbänder über alle erfassten RABe 526 (GTW) gemittelt

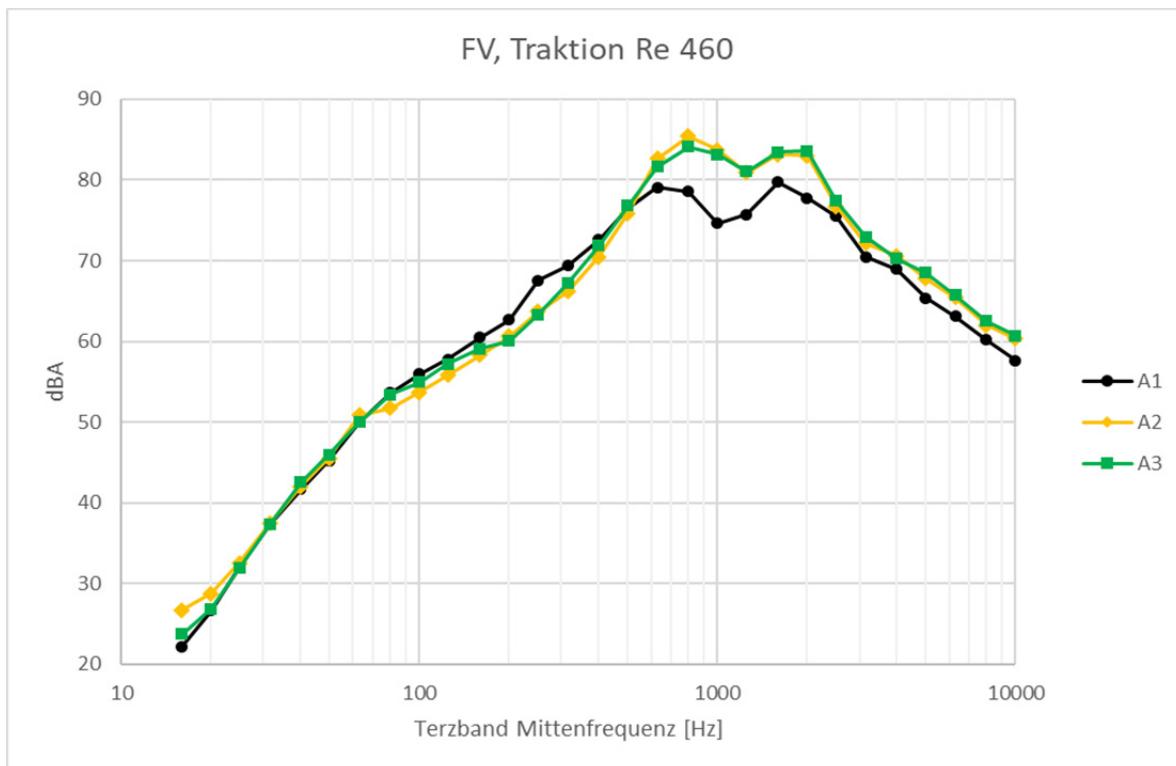


Abbildung 32: Terzbänder über alle erfassten Re 460-Kompositionen gemittelt

Geräuschemission vor der Zugsdurchfahrt

Die Norm EN ISO 3095:2013 fordert als Vergleichsgröße den äquivalenten Schalldruckpegel $L_{pAeq,Tp}$, welcher die Zugsdurchfahrt von Puffer bis Puffer berücksichtigt. In Abbildung 33 sind die Rohsignale der Messfahrt Nr. 27 aufgetragen, oben von A2 und unten von A3. Der Zughanfang und das Zugende, also der auszuwertende Bereich für $L_{pAeq,Tp}$, sind mit blauen Linien markiert.

Bevor sich der Zug an einem Beobachtungsquerschnitt, in diesem Fall dem Messquerschnitt, befindet, ist an gewissen Gleisen bereits lange Zeit im Voraus ein singendes Geräusch der Schiene bemerkbar. Dieser Effekt tritt erfahrungsgemäß bei besohlten Betonschwellen und elastischen Zwischenlagen verstärkt auf und kann für Anwohner eine zusätzliche Lärmbelästigung darstellen.

Im Abschnitt A3 tritt dieses Geräusch früher auf als in A2, dafür aber mit niedrigerer Intensität. Die höchsten Amplituden liegen im Bereich von 730 bis 940 Hz. Das anschwellende Geräusch ist mit den orangen Linien verdeutlicht.

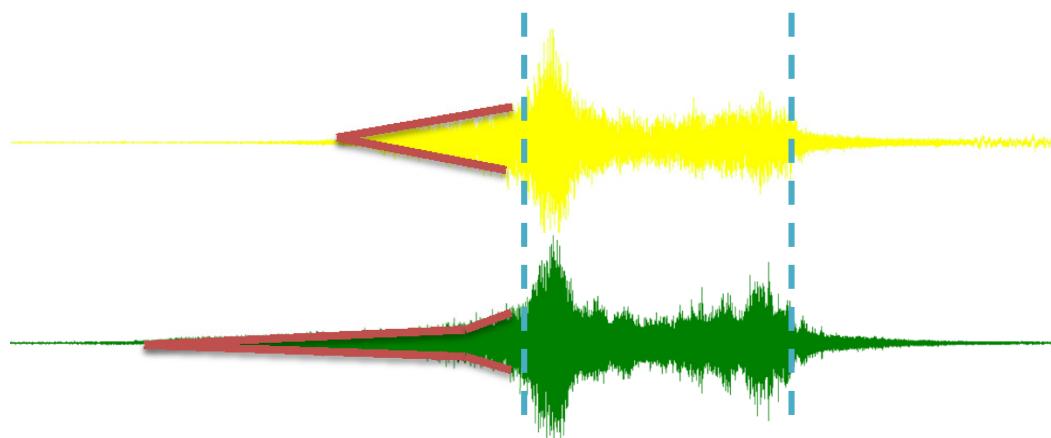


Abbildung 33: Rohsignal Schalldruck A2 und A3, MF27

Beurteilung der Lärmessung

Die geringsten Luftschallemissionen wurden erwartungsgemäß im Abschnitt A1 mit den steifen Zw gemessen. Der Abschnitt A2 war beim Regionalverkehr (RV) besser als A3. Dagegen war der Abschnitt A3 beim Fernverkehr (FV) etwas besser als A2. Die Zw ENIT hat beim FV ihre Vorteile, wo sie eine Reduktion gegenüber A2 von 0,2 dBA bewirkt. Bei den Zügen mit Re 420 wurde sogar eine Reduktion von 0,6 dBA gemessen. Da der FV absolut betrachtet auf einem höheren Lärmniveau liegt als der RV, ist dies für die Anwohner ein positives Resultat. Der Vergleich der Geräuschemission vor der Zugsdurchfahrt zeigt, dass der Abschnitt A3 mit der Zw ENIT zwar früher angeregt wird, dafür aber eine niedrigere Intensität erreicht als A2.

Insgesamt ist der Erfolg der Dämpfung der optimierten Zw ENIT etwas geringer ausgefallen, als ursprünglich angenommen. Die Tendenz geht jedoch in die richtige Richtung. Mit einer zusätzlichen Optimierung der Dämpfung liesse sich die Reduktion der Luftschallemission der Zw ENIT weiter steigern.

6.9 Abklingrate im Gleis

Die Abbildungen 34 und 35 zeigen die über beide Schienen gemittelten Terzspektren der Abklingraten in vertikaler und horizontaler Richtung. Rot gestrichelt sind die jeweiligen unteren Grenzkurven eingetragen, welche definieren ob ein Gleis für akustische Messungen im Rahmen von Typenprüfungen von Fahrzeugen verwendet werden darf oder nicht. Im Anhang A4 sind alle gemessenen Abklingraten (östliche und westliche Schienen einzeln) tabellarisch und in Diagrammform dargestellt.

Auf dem Abschnitt A1 liegen die vertikalen und horizontalen Abklingraten überwiegend deutlich oberhalb der Grenzkurven, d.h. die Schienen erfüllen die Vorgaben der Norm EN ISO 3095 über einen breiten Frequenzbereich, allerdings unterschreitet die westliche Schiene bei 2500 Hz die Grenzkurve um einen signifikanten Betrag. Die Ergebnisse von den Abschnitten A2 und A3 zeigen recht ähnliche Kurvenverläufe. Nur in den Terzbändern unterhalb von 400 Hz und oberhalb von 3150 Hz werden die Grenzkurven für die vertikale Schienenschwingung eingehalten, dabei ist tendenziell die dämpfende Wirkung auf dem Abschnitt A2 etwas besser als in A3.

Die untere Grenzkurve für die horizontale Abklingrate wird in A2 und A3 in den Terzen von 630 Hz bis 1250 Hz und von 2500 Hz (A2) resp. 3150 Hz (A3) bis 4000 Hz nicht unterschritten. Bei Frequenzen unterhalb von 630 Hz verlaufen die horizontalen Abklingratenkurven leicht unterhalb und in etwa parallel zur Grenzkurve.

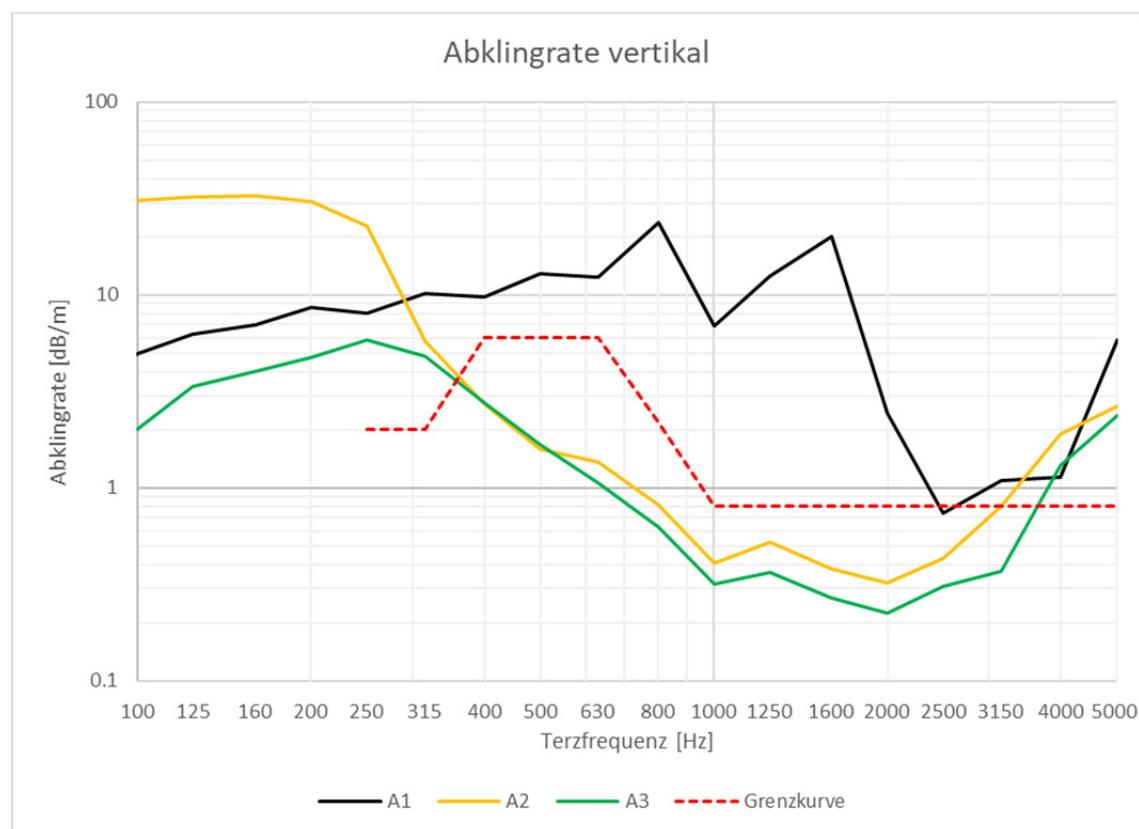


Abbildung 34: Gleisabklingrate vertikal, Schienenstränge gemittelt

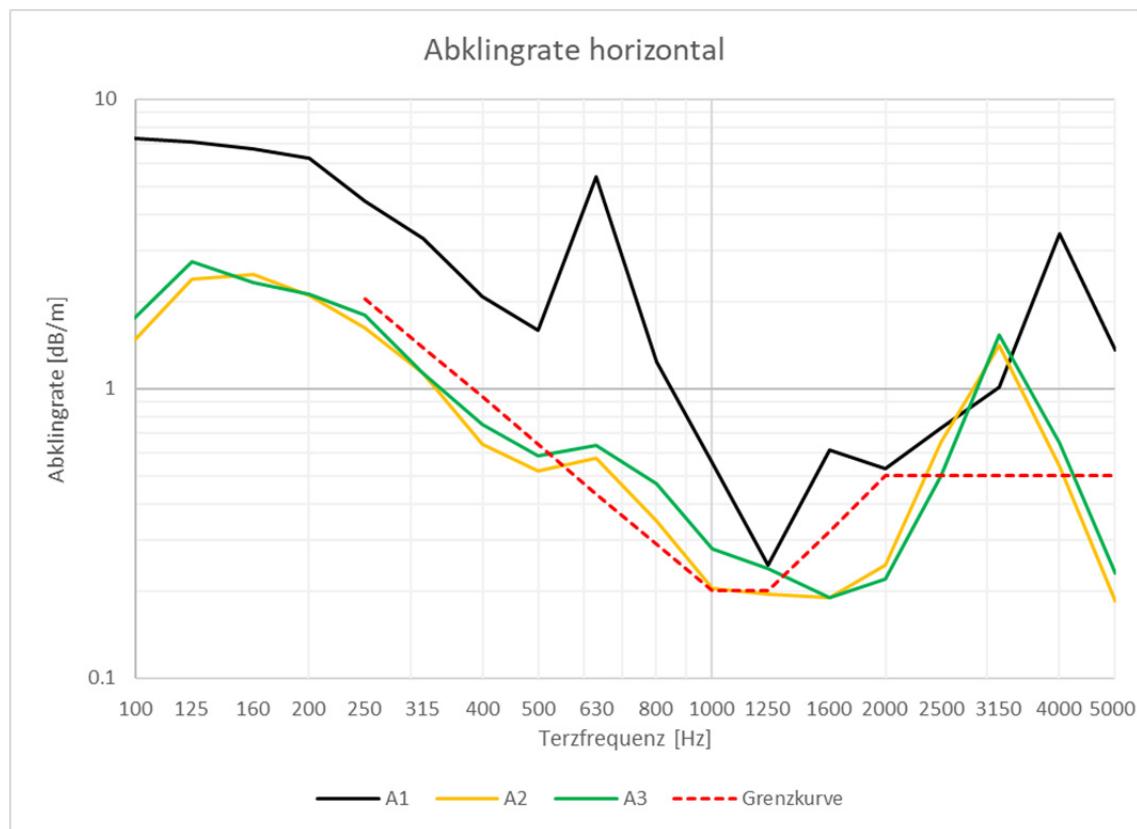


Abbildung 35: Gleisabklingrate horizontal, Schienenstränge gemittelt

Beurteilung der Abklingrate

Der Abschnitt A1 mit der steifen Zw zeigt erwartungsgemäss das beste Abklingverhalten im Gleis. Die steife Zw verhindert fast vollständig ein freies Schwingen der Schiene und dadurch eine Schallausbreitung in der Schiene bei Anregung mit einem Prüfhammer. Somit liegt der Abschnitt A1 deutlich oberhalb der Grenzkurve, welche in der Norm EN ISO 3095 für Typenprüfungen von Fahrzeugen festgelegt wurde.

Die beiden Abschnitte A2 und A3 mit den weichen Zw liegen bezüglich Abklingrate über weite Frequenzbereiche unterhalb der Grenzkurve, da die weichen Zw ein freieres Schwingen der Schiene ermöglichen. Das bedeutet, dass Strecken mit weichen Zw in der Regel nicht für Typenprüfungen von Fahrzeugen geeignet sind. Diesen Sachverhalt hat die Deutsche Bahn (DB) auf Nachfrage ebenfalls bestätigt. Daher rüstet die DB bei Bedarf ausgewählte Abschnitte ihrer Schnellfahrstrecken für Typenprüfungen von Fahrzeugen temporär mit steifen Zw aus, um die Grenzkurve nach Norm einhalten zu können.

Die Messung der Gleisabklingrate lässt keine signifikanten Unterschiede zwischen den Abschnitten A2 und A3 erkennen. Das zeigt analog zur Luftschallemissionsmessung, dass die Dämpfungswirkung der optimierten Zw ENIT noch nicht richtig zum Tragen kommt. Mit einer zusätzlichen Optimierung der Dämpfung liesse sich die Kurve der Abklingrate der Zw ENIT weiter verbessern.

7 Schlussfolgerungen

Im Rahmen des Forschungsprojekts Eisenbahnlärm 2017, welches vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) und vom Bundesamt für Verkehr (BAV) beauftragt wurde, konnte eine lärm- und LCC-optimierte Schienenzwischenlage (als Zw ENIT bezeichnet) entwickelt und auf einer geeigneten Teststrecke im SBB-Netz eingebaut werden. In den Laborprüfungen der Schienenbefestigung an der Technischen Universität München/D, konnte die Performance der Zw ENIT analysiert werden. Umfangreiche Messungen in der SBB Teststrecke Sursee – Nottwil konnten das Verhalten der Zw ENIT im Vergleich zu herkömmlichen steifen und elastischen Schienenzwischenlagen aufzeigen.

Die Wahl der SBB Teststrecke hat sich als (fast) optimal erwiesen. Alle drei Abschnitte wurden im Rahmen einer regulären Fahrbahnerneuerung eingebaut. Sie lagen alle auf einer Geraden und wurden nach dem Einbau resp. vor der Messkampagne geschliffen. Somit kann von einer sehr guten Vergleichbarkeit der Abschnitte untereinander ausgegangen werden. Einzig die geringe Anzahl Güterzüge auf diesem Streckenabschnitt war ein gewisser Nachteil. Im geplanten Zeitfenster für die Lärmessung kamen lediglich zwei Züge mit einer Re 420, wovon ein Güterzug, vorbei.

Laborprüfungen der Schienenbefestigung nach EN 13481-2

Im Prüflabor der Technischen Universität München/D wurde das Schienenbefestigungssystem W14 K-900 mit der optimierten Zw ENIT nach den Anforderungen in EN 13481-2, Kategorie C getestet. Es wurden folgende Prüfungen durchgeführt:

- Statische Steifigkeit nach EN 13146-9
- Spannkraft nach EN 13146-7
- Durchschubwiderstand nach EN 13146-1
- Verdrehwiderstand nach EN 13146-2
- Dauerschwingversuch nach EN 13146-4

Bei sämtlichen Prüfungen lagen die Werte resp. die Änderungen vor und nach dem Dauerschwingversuch in den vorgegebenen Bereichen der jeweiligen Norm. Die statische Systemsteifigkeit resp. die statischen Steifigkeit der Zw ENIT beträgt 80 kN/mm. Das Schienenbefestigungssystem hat den Dauerschwingversuch mit 3 Mio. Lastzyklen bestanden. Dies zeigt, dass das verwendete EPDM-Material der Zw ENIT alterungsbeständig ist und dauerhaft die gewünschten elastischen Eigenschaften aufweist.

Einsenkung/Kompression der Zwischenlagen

Erfahrungsgemäss sollte im Gleis eine Gesamteinsenkung unter Last von 1,0 bis 1,5 mm angestrebt werden, wobei die Zwischenlage etwa einen Drittel davon ausmachen sollte. Der Abschnitt A1 mit den steifen Zw ($c_{\text{stat}} = 600 \text{ kN/mm}$) weist im Mittel erwartungsgemäss eine sehr kleine Kompression von weniger als 0,1 mm auf. Die elastische, weiche Zwischenlage ($c_{\text{stat}} = 60 \text{ kN/mm}$) im Abschnitt A2 und die optimierte, weiche Zwischenlage ENIT ($c_{\text{stat}} = 80 \text{ kN/mm}$) im Abschnitt A3 weisen im Mittel eine Kompression von 0,5 mm auf. Die weichen Zwischenlagen tragen also wie gewünscht einen wesentlichen Anteil zur Gesamtelastizität im Gleis bei.

Nebst der absoluten Einsenkung resp. Kompression der Zwischenlage ist die Lastverteilfähigkeit ein entscheidendes Kriterium bei der Beurteilung des elastischen Layers. Die Kompressionslinien zeigen, dass die weichen Zw in den Abschnitten A2 und A3 eine signifikant bessere Lastverteilwirkung aufweisen als die steife Zw in Abschnitt A1. Somit trägt eine weiche Zw deutlich mehr zur Schonung der Oberbaukomponenten bei.

Luftschallemission nach EN ISO 3095

Die geringsten Luftschallemissionen wurden erwartungsgemäss im Abschnitt A1 mit den steifen Zw gemessen. Der Abschnitt A2 war beim Regionalverkehr (RV) besser als A3. Dagegen war der Abschnitt A3 beim Fernverkehr (FV) etwas besser als A2. Die Zw ENIT hat beim FV ihre Vorteile, wo sie eine Reduktion gegenüber A2 von 0,2 dBA bewirkt. Bei den Zügen mit Re 420 wurde sogar eine Reduktion von 0,6 dBA gemessen. Da der FV absolut betrachtet auf einem höheren Lärmniveau liegt als der RV, ist dies für die Anwohner ein positives Resultat. Der Vergleich der Geräuschemission vor der Zugsdurchfahrt zeigt, dass der Abschnitt A3 mit der Zw ENIT zwar früher angeregt wird, dafür aber eine niedrigere Intensität erreicht als A2.

Gleisabklingrate nach EN 15461

Der Abschnitt A1 mit der steifen Zw zeigt erwartungsgemäss das beste Abklingverhalten im Gleis. Die steife Zw verhindert fast vollständig ein freies Schwingen der Schiene und dadurch eine Schallausbreitung in der Schiene bei Anregung mit einem Prüfhammer. Somit liegt der Abschnitt A1 deutlich oberhalb der Grenzkurve, welche in der Norm EN ISO 3095 für Typenprüfungen von Fahrzeugen festgelegt wurde.

Die beiden Abschnitte A2 und A3 mit den weichen Zw liegen bezüglich Abklingrate über weite Frequenzbereiche unterhalb der Grenzkurve, da die weichen Zw ein freieres Schwingen der Schiene ermöglichen. Das heisst jedoch nicht, dass weiche Zw im Gleis schlecht wären, sondern nur, dass solche Gleise die Bedingungen für Typenprüfungen von Fahrzeugen nach Norm nicht erfüllen.

Gesamtbeurteilung der Zw ENIT

Die optimierte Zwischenlage ENIT hat eine statische Steifigkeit von ca. 80 kN/mm. Im realen Gleis weist die Zw ENIT eine Einsenkung/Kompression von rund 0,5 mm auf. Somit hat die Zw ENIT erfahrungsgemäss einen optimalen Steifigkeitswert hinsichtlich Einsenkung resp. Elastizität im Gleis. Aus LCC-Sicht trägt die Zw ENIT also zur Schonung der anderen Gleiskomponenten bei und senkt so die Unterhaltskosten.

Sowohl bei der Luftschallemission als auch bei der Gleisabklingrate hat sich gezeigt, dass die Zw ENIT die geplante Dämpfung noch nicht voll ausschöpfen konnte. Bei den lauteren Fernverkehrszügen konnte im Abschnitt A3 eine Reduktion der Luftschallemission gegenüber A2 gemessen werden, die Tendenz geht somit in die richtige Richtung. Mit einer zusätzlichen Optimierung der Dämpfung liesse sich die Luftschallemission der Zw ENIT weiter senken, siehe Kapitel 8.

8 Ausblick

Die optimierte Zwischenlage ENIT weist die gewünschte statische Steifigkeit von ca. 80 kN/mm auf. Hingegen besteht bei der Dämpfungswirkung der Zw ENIT noch Verbesserungspotential. Es scheint, als ob die aktuelle Ausführung noch nicht die volle Wirkung im unbelasteten Gleis entfalten konnte. Diese liesse sich durch eine Produktoptimierung weiter steigern. Aufgrund der vorliegenden Resultate werden folgende Anpassungen an der Zw ENIT vorgeschlagen:

- Die getestete Zw ENIT hatte eine Nominaldicke von 9 mm und die Rondellen mit dem dämpfenden Material eine Dicke von 10 mm. Die Rondellen standen also nur 1 mm vor. Dies war eher zu wenig, um im unbelasteten Zustand (kurz vor der Zugsdurchfahrt) eine genügend grosse Dämpfungswirkung zu erzielen. Bei der Weiterentwicklung sollten die Rondellen mehr Übermass aufweisen.
- Bei der Weiterentwicklung der Zw ENIT liesse sich die Wirkfläche der dämpfenden Rondellen -insbesondere an den Seiten des Schienenfusses- noch vergrössern, evtl. sogar mit zwei dämpfenden Längsstreifen anstelle der Rondellen.
- Zudem könnte die Dämpfungswirkung mittels Materialoptimierung weiter erhöht werden, wobei die statische Steifigkeit der Zw möglichst gleich bleiben soll.

Die SBB Teststrecke Sursee – Nottwil ist zwar messtechnisch sehr gut geeignet, da sie über alle drei Abschnitte gleiche Verhältnisse aufweist. Dadurch lassen sich die Messresultate aller drei Abschnitte gut miteinander vergleichen. Da auf dieser Strecke nicht viele Güterzüge verkehren, konnten im Zeitfenster für die Lärmmeßung leider nur zwei Züge mit einer Re 420 gemessen und ausgewertet werden, die jedoch die besten Resultate bei der Zw ENIT zeigten. Um eine fundierte Aussage zur Luftschallemission bei Güterzügen machen zu können, wäre eine gezielte Nachmessung der Luftschallemission von Güterzügen an der bestehenden SBB Teststrecke empfehlenswert.

Um das Verhalten von lärm- und LCC-optimierten Schienenzwischenlagen genauer beurteilen zu können, wären aufgrund der gewonnenen Erfahrungen aus diesem Forschungsprojekt folgende weiteren Schritte sinnvoll:

- Kostengünstige Nachmessung der Luftschallemission hinsichtlich der Güterzüge auf der bestehenden SBB Teststrecke Sursee – Nottwil.
- Produktoptimierungen zur Steigerung der Dämpfungswirkung der Zw ENIT wie oben beschrieben resp. gemäss der Beurteilung des Herstellers.
- Einbau der verbesserten Zw ENIT in einer geeigneten Teststrecke, entweder am selben Ort, da dort bereits viele Ergebnisse vorliegen, oder in einer neuen Teststrecke mit einem guten Verkehrsmix und anschl. Lärmmeßung.

Für die Anwohner ist die Geräuschemission kurz vor der Zugsdurchfahrt („Singen der Schiene“) bei elastischen Zwischenlagen störend. Dieser Effekt wird jedoch bei der Auswertung nach EN ISO 3095 nicht berücksichtigt. Bezuglich dieser vorauselgenden Emissionen besteht weiterer Untersuchungs- und Forschungsbedarf, auch hinsichtlich derer Bewertung.

Anhangsverzeichnis

Anhang A1: Prüfbericht der Technischen Universität München/D

Bericht Nr. 3714 vom 25. Mai 2018

Prüfung des Schienenbefestigungssystems W14 K-900
(60E2) mit Zwischenlagen Zw 900a ENIT gemäss
DIN EN 13481-2:2012, Kat. C

Anhang A2: Untersuchungsbericht von Vossloh Werdohl/D

Bericht Nr. 1064 vom 11. Juni 2018

Messung der statischen und dynamischen Steifigkeit
an 5 Prüfmustern der Zw 900a/SF150-c60 ENIT
nach EN 13146-9:2011

Anhang A3: Bericht von Müller-BBM Muttenz/CH

Bericht Nr. C90372/01 vom 03.10.2018

Bestimmung der Schienenabklingrate zwischen
Oberkirch und Nottwil

Anhang A4: Messbericht von infraMT Finsterhennen/CH

Bericht Nr. 17-107-2021 v1.1 vom 05.12.2018

Lärm- und LCC-optimierte Schienenzwischenlagen