

Literaturstudie Feste Fahrbahn

Bericht



Projekt PROSE: CH01-03502
Forschung Lärm - Literaturforschung feste Fahrbahn

Im Auftrag der Schweizerischen Eidgenossenschaft

Ihre Referenz: 1337000644

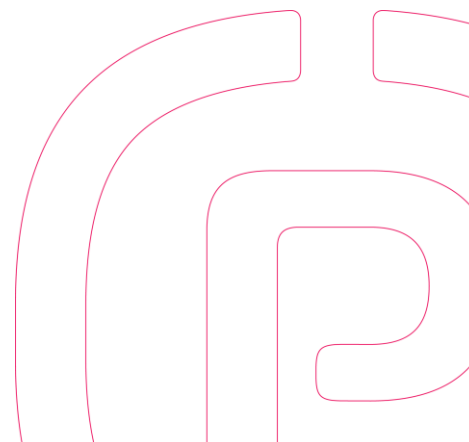
Erstellt	Geprüft	Freigegeben	
Felix Saur	Stefan Bühler	Yves Kohler	
Dokumentnummer	Version	Status	Ausgabedatum
PO000002769	2.0	Released	21.12.2022

PROSE AG

Monbijoustrasse 35
3011 Bern
Schweiz

www.prose.one

+41 52 262 75 00
info.bern@prose.one



Verteiler

Firma/Abteilung/Name	Anmerkungen
Bundesämter für Umwelt (BAFU)	

Version	Prepared	Checked	Released	Date
Ver 2.0	Yves Kohler	Stefan Bühler	Yves Kohler	21.12.2022
Ver 1.0	Felix Saur	Stefan Bühler	Yves Kohler	15.12.2022

Modifikationen

Version	Beschreibung
2.0	Ergänzungen nach Berichtspräsentation

Impressum

Auftraggeberin: Schweizerische Eidgenossenschaft;
Bundesämter für Umwelt (BAFU) und
Verkehr (BAV), CH-3003 Bern.
Das BAFU und das BAV sind Ämter des Eidg.
Departements für Umwelt, Verkehr, Energie
und Kommunikation (UVEK)

Auftragnehmerin PROSE AG

Autor/Autorin: Felix Saur, PROSE AG

**Begleitung BAFU /
BAV:** Franz Kuster, Fredy Fischer
Robert Attinger, Christoph Dürig

Hinweis: Dieser Bericht wurde im Auftrag der
Bundesämter für Umwelt (BAFU) und
Verkehr (BAV) verfasst. Für den Inhalt ist
alleine die Auftragnehmerin verantwortlich.

Dieses Dokument gibt Kenntnis von Gegenständen, an denen die PROSE AG, 8400 Winterthur (Schweiz), oder eines ihrer Tochterunternehmen Eigentumsrechte hat. Weder Erhalt noch Besitz dieses Dokuments verleihen oder übertragen das Recht, seinen Inhalt als Ganzes, einen Teil davon, eine darin enthaltene Information, oder irgendwelche Gegenstände oder Vorrichtungen zu kopieren oder bekannt zu machen oder irgendwelche Methoden oder Prozesse anzuwenden, ausser nach schriftlicher Genehmigung durch die PROSE AG, 8400 Winterthur (Schweiz) oder schriftlicher Vereinbarung mit dieser Firma.

Dieses Schreiben wurde maschinell erstellt und ist ohne Unterschrift gültig.

Inhalt

1	Einleitung	5
2	Grundlagen der Festen Fahrbahn	5
2.1	Definition und Aufbau der Festen Fahrbahn	5
2.2	Unterschiede und Abgrenzung zum Schotteroberbau	6
2.3	Hersteller der Festen Fahrbahn	7
2.4	Typen der Festen Fahrbahn	7
2.5	Feste Fahrbahn in der Schweiz	9
2.5.1	Meisterverwendeter Typ der Festen Fahrbahn in der Schweiz.....	9
2.5.2	Position und Umfang der Festen Fahrbahn in der Schweiz	10
3	Literaturrecherche	12
3.1	Methodik	12
3.2	Literatur zur Untersuchung des akustischen Verhaltens der Festen Fahrbahn	12
3.2.1	Veröffentlichungen mit Priorität 5.....	12
3.2.2	Veröffentlichungen mit Priorität 4.....	15
3.2.3	Veröffentlichungen mit niedrigerer Priorität	18
3.3	Normative Grundlagen und Richtlinien	18
3.4	Rechercheergebnisse bezüglich der Massnahmen zur Lärminderung	19
3.5	Zusammenfassung der Literaturstudie	23
4	Einordnung der Ergebnisse	25
4.1	Expertenaustausch	25
4.2	Vor- und Nachteile der Festen Fahrbahn	26
4.3	Offene Fragen und identifizierte Informationslücken	26
4.4	Empfehlung weiteres Vorgehen	27
5	Fazit	28
6	Quellenverzeichnis	29
A	Übersicht Literaturrecherche	33
B	Verschiedene Modelltypen der Festen Fahrbahn	35

Zusammenfassung

Durch die Literaturrecherche konnten zahlreiche Literaturquellen zum Thema Eisenbahnlärm auf Fester Fahrbahn identifiziert werden. Eine Vielzahl der untersuchten Literaturquellen weist eine Lärmzunahme beim Rollgeräusch auf Fester Fahrbahn von 2 dB(A) bis 5 dB(A) aus. Diese Aussagen beruhen sowohl auf praktischen Vergleichsmessungen als auch auf theoretischen Berechnungen, die quantitativ in einer ähnlichen Grössenordnung liegen. Oftmals machen die Literaturquellen keine bzw. wenig detaillierte Angaben bezüglich der vorliegenden oder verwendeten Randbedingungen, weshalb eine Einordnung der Ergebnisse hinsichtlich der Lärmzunahme oder Lärmreduktion durch Schutzmassnahmen nur bedingt möglich ist. Stellenweise ist ausserdem nicht bekannt, in welchem Frequenzbereich der Schallpegel zu- bzw. abnimmt. Dies ist insofern wichtig, da der Mensch Schallpegeländerungen bei verschiedenen Frequenzen unterschiedlich wahrnimmt (vgl. A-gewichteter Pegel).

Grundsätzlich liegt der relevante Frequenzbereich zwischen 16 Hz und 8 kHz, wobei zwischen Körperschall im unteren Frequenzbereich und Luftschall im oberen Frequenzbereich unterschieden wird. Dies führt zur generellen Anforderung an die Feste Fahrbahn im unteren Frequenzbereich eine möglichst niedrige Steifigkeit aufzuweisen, um gute Isolationseigenschaften hinsichtlich Vibrationen und Erschütterungen zu erreichen und gleichzeitig eine hohe Steifigkeit bzw. Dämpfung im oberen Frequenzbereich zu realisieren, welche die Schwingung der Schiene dämpft. Um die beschriebenen Anforderungen einer frequenzabhängigen Steifigkeit gerecht zu werden, eignen sich prinzipiell Zwei-Massen-Schwinger-Systeme, die speziell abgestimmt werden müssen.

In der Schweiz kommt zu einem grossen Prozentsatz (> 80%) die «Low Vibration Track (LVT)» von Sonnevile zum Einsatz. Diese bietet durch ihren zweischichtigen Aufbau die Möglichkeit die Gesamtsteifigkeit über den gesamten Frequenzbereich, z.B. durch die Verwendung einer hochdämpfenden Zwischenlage, optimal abzustimmen, um eine möglichst geringe Lärmentwicklung zu erreichen. Die Feste Fahrbahn wird fast ausschliesslich in Tunneln und ihren Ein- und Ausfahrten verbaut. Ausnahme sind die Durchmesserlinie in Zürich und ein kurzer Bereich vor dem Axentunnel, auf dem die SBB bereits erste Untersuchungen zur Festen Fahrbahn durchgeführt hat.

1 Einleitung

Der durch Schienenfahrzeuge während der Fahrt verursachte Lärm wird insbesondere durch Schwingungen erzeugt, die durch den Rad-Schiene-Kontakt angeregt werden. Der Kontaktpunkt zwischen Rad und Schiene koppelt das Schwingungssystem Fahrzeug mit dem Schwingungssystem Fahrbahn. Neben der Rauheit von Rad und Schiene hat die Gestaltung der Fahrbahn einen grossen Einfluss auf den emittierten Schallpegel, wobei Letzteres primär durch die Rad- und Fahrbahn-bauart geprägt wird.

Diese Studie fokussiert auf den Einfluss durch die Fahrbahnbauart, konkret durch den Einfluss von Festen Fahrbahnen gegenüber Schotteroberbau.

Neben dem bewährten Schotteroberbau hat sich in den vergangenen Jahrzehnten die Feste Fahrbahn immer stärker verbreitet. Als Grund für die Zunahme der Festen Fahrbahn werden die niedrigeren Instandhaltungskosten bei längerer Schienenliegedauer und die bessere Eignung für die Anforderung des Hochgeschwindigkeitsverkehrs angeführt [41].

In der Schweiz kommt die Feste Fahrbahn insbesondere in Tunneln zum Einsatz. Vereinzelt wird die Feste Fahrbahn, wie auf der Durchmesserlinie in Zürich oder vor dem Axentunnel zwischen Sisikon in Richtung Flüelen, auch im Freien verbaut.

Durch die weichere Lagerung der Schiene an sich, sowie die fehlende Absorptionsfähigkeit der glatten (Beton-)Oberfläche ist zu erwarten, dass die Schallabstrahlung durch die Feste Fahrbahn deutlich höher als gegenüber dem Schotteroberbau ist. Der folgende Bericht soll das bestehende Wissen in Form einer Literaturrecherche zusammentragen und dabei insbesondere auf folgende Punkte eingehen:

- Darstellen der verschiedenen Typen von Festen Fahrbahnen (Abschnitt 2.4)
- Eingesetzte Systeme von Festen Fahrbahnen in der Schweiz (Abschnitt 2.5)
- Quantifizierung der Lärmzunahme bei Fester Fahrbahn (Abschnitt 3.2)
- Mögliche Massnahmen zur Lärmreduktion bei Fester Fahrbahn Abschnitt (3.4)
- Vor- und Nachteile dieser verschiedenen Typen von Festen Fahrbahnen (Abschnitt 4.2)

2 Grundlagen der Festen Fahrbahn

2.1 Definition und Aufbau der Festen Fahrbahn

Die Feste Fahrbahn ist Teil einer Oberbaukonstruktion, welche in ihrer Einfederung und Dämpfung definiert ist und eine verformungsarme Auflage erfordert [41]. Wird die Feste Fahrbahn auf Erdreich verlegt, ist ein mehrschichtiger Aufbau des Tragsystems mit von unten nach oben zunehmender Steifigkeit notwendig, um Überbeanspruchungen zu vermeiden und eine langfristige Beständigkeit zu garantieren.

Abbildung 2-1 zeigt schematisch einen beispielhaften, mehrschichten Aufbau einer Festen Fahrbahn. Die Schiene liegt in der Regel auf einer Zwischenlage auf, die zwischen Schiene und Schwelle bzw. Betonfuss eingebaut wird. Die Schwelle ist auf einer Beton- (BTS) bzw. Asphalttragschicht (ATS) aufgesetzt. Alternativ kommen auch Systeme der Festen Fahrbahn zur Anwendung bei denen der Gleisrost einbetoniert ist (monolithische Bauweise). Auf die verschiedenen Typen der Festen Fahrbahn wird in Abschnitt 2.4 detailliert eingegangen.

Zwischen der gebundenen Tragschicht des Oberbaus und der ungebundenen Tragschicht des Unterbaus ist eine Hydraulisch Gebundene Tragschicht (HGT) eingebaut. Der Unterbau besteht aus einer Forstschuttschicht (FSS) und dem Untergrund des Erdreichs.

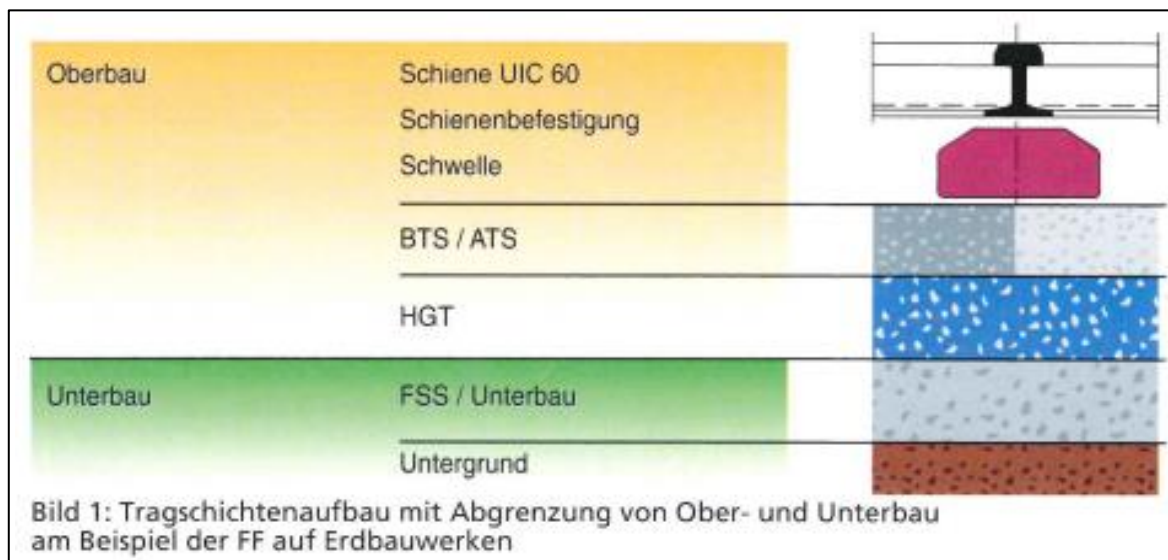


Abbildung 2-1: Mehrschichtiger Aufbau der Festen Fahrbahn - Grafik entnommen aus [41]

2.2 Unterschiede und Abgrenzung zum Schotteroberbau

Beim Schotteroberbau ist der Gleisrost schwimmend im Schotter gelagert. Ab 200 km/h wird der Schotter durch die Pressung und Schwinggeschwindigkeit dermassen beansprucht, sodass der Schotteroberbau an seine wirtschaftlichen Grenzen stösst [41]. Durch diese Belastungen nehmen Kornumlagerungen (Setzungen) und Kornveränderungen des Schotters infolge von Abrieb oder Bruch zu und müssen durch regelmässige Instandhaltungsmassnahmen beseitigt werden. Die schwimmende Lagerung des Gleisrosts führt bei hoher Fahrgeschwindigkeit zu einem Anwachsen der Vertikal- und Horizontalkräfte, die wiederum zu einer Verschlechterung der Gleislage führen.

Nach Abbildung 2-2 liegen zudem zahlreiche Schwellen des unbelasteten Gleises nicht direkt auf dem Schotterbett auf, sondern hängen an der Schiene, wodurch unterschiedliche Elastizitäten, insbesondere in Vertikalrichtung, entlang des Gleises entstehen.

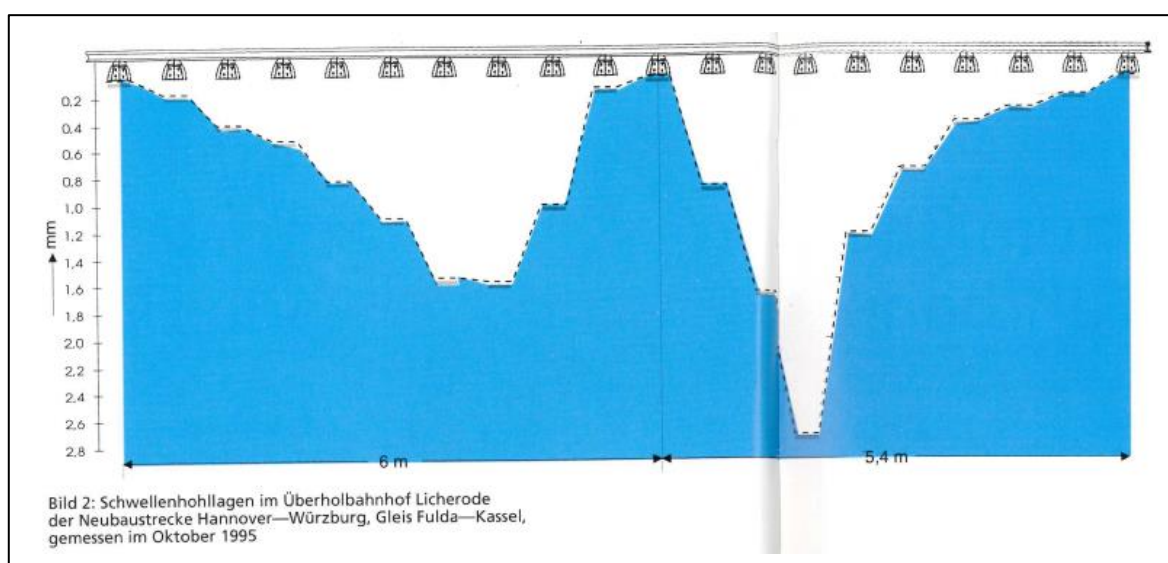


Abbildung 2-2: Schwellenlagerung bei Schotteroberbau. Grafik entnommen aus [41]

2.3 Hersteller der Festen Fahrbahn

In diesem Abschnitt werden die aktuellen Hersteller von Systemen von Festen Fahrbahnen, als auch die Unternehmen, die den Einbau der Festen Fahrbahn durchführen, vorgestellt. Der Fokus liegt dabei auf dem Markt Deutschland/Schweiz.

- Sonneville, www.sonneville.com, Modell "LVT" ("Low Vibration Track")
- Railone, www.railone.de, Modell "RHEDA 2000"
- Bögl – <https://transportsystemboegl.com/>, Transportunternehmen mit Komplettlösung
- Vigier Rail AG - www.vigier-rail.ch; Bauunternehmen für Bahn (verbaut Sonneville «LVT»)
- Heitkamp - www.heitkamp-swiss.ch; Bau- und Konstruktionsunternehmen

2.4 Typen der Festen Fahrbahn

Weltweit existieren verschiedene Bauformen bzw. Typen der Festen Fahrbahn, wobei sich diese nach verschiedenen Merkmalen unterscheiden. Eine Übersicht über die Klassifizierung der Festen Fahrbahn und Beispielsysteme bietet Abbildung 2-3, welche aus [28] entnommen ist. Abbildung 2-3 ist in Anhang B nochmals grösser dargestellt.

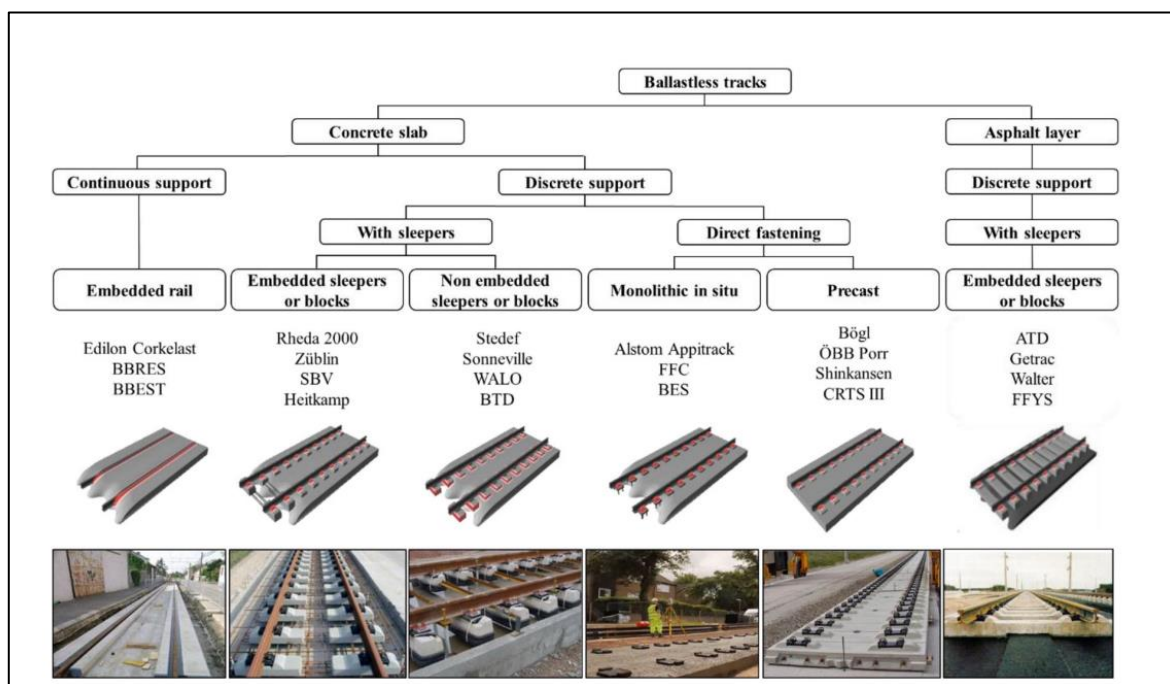


Abbildung 2-3: Klassifizierung der Festen Fahrbahn. Grafik entnommen aus [28]

Gemäss [28] werden fast ausschliesslich Systeme mit Betondecke verbaut, lediglich in Deutschland finden sich vereinzelt Abschnitte mit Asphaltdecke. Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal der Systeme besteht weiter in der Schienenlagerung. Einige der Systeme wie bspw. das System Infundo (vgl. [22]) verfügen über kontinuierlich gelagerte Schienen (continuous support); andere Systeme wie bspw. „Low Vibration Track“ von Sonneville oder „Rheda 2000“ lagern die Schiene diskret (discrete support). Bei Systemen der Art „direct fastening“ wird die Schiene direkt an der Betondecke befestigt (bspw. System Bögl). Alternativ dazu können die Schienen auch an

links/rechts geteilten Schwellen (sleepers) befestigt werden, die wiederum formschlüssig in die Betondecke eingelassen werden (embedded) oder mit weiteren Elastomer-Elementen (non embedded) verbunden sind. Die Betondecke selbst kann entweder durchgängig durch Betonguss (monolithic) oder abschnittsweise vorgefertigt (precast) ausgeführt sein.

Eine weitere, nicht in Abbildung 2-3 oder Abbildung 2-5 abgebildete Klasse der Festen Fahrbahn ist die «schwebende Feste Fahrbahn» (engl.: «floating slab track»). Bei dieser Klasse wird die Betondecke nicht direkt auf dem Untergrund gebettet, sondern die Betondecke liegt auf elastischen Elementen auf, die eine zusätzliche Elastizität in das System einführen (vgl. Abbildung 2-4). Die Klasse der schwebenden Festen Fahrbahn beinhaltet ebenfalls verschiedene Bauweisen, so existieren bspw. kontinuierliche Betondecken (gegossen) oder abschnittsweise verlegte Betonplatten mit und ohne Schwellen. Die in Abbildung 2-4 schematisch dargestellte Bauform verfügt bspw. nicht über Schwellen. Der entscheidende Vorteil der zusätzlichen Elastizität unterhalb der Betondecke ist eine bessere Vibrationsdämpfung bei niedrigen Frequenzen, wodurch der Eintrag von Vibrationen in die Umgebung und niederfrequente Luftschallemissionen reduziert werden ([25], [35]). Schwebende Feste Fahrbahnen sind jedoch kostenintensiver und werden daher nur bei gegebener Notwendigkeit vorgesehen, was meist bei Tunneln im urbanen Raum der Fall ist [36].

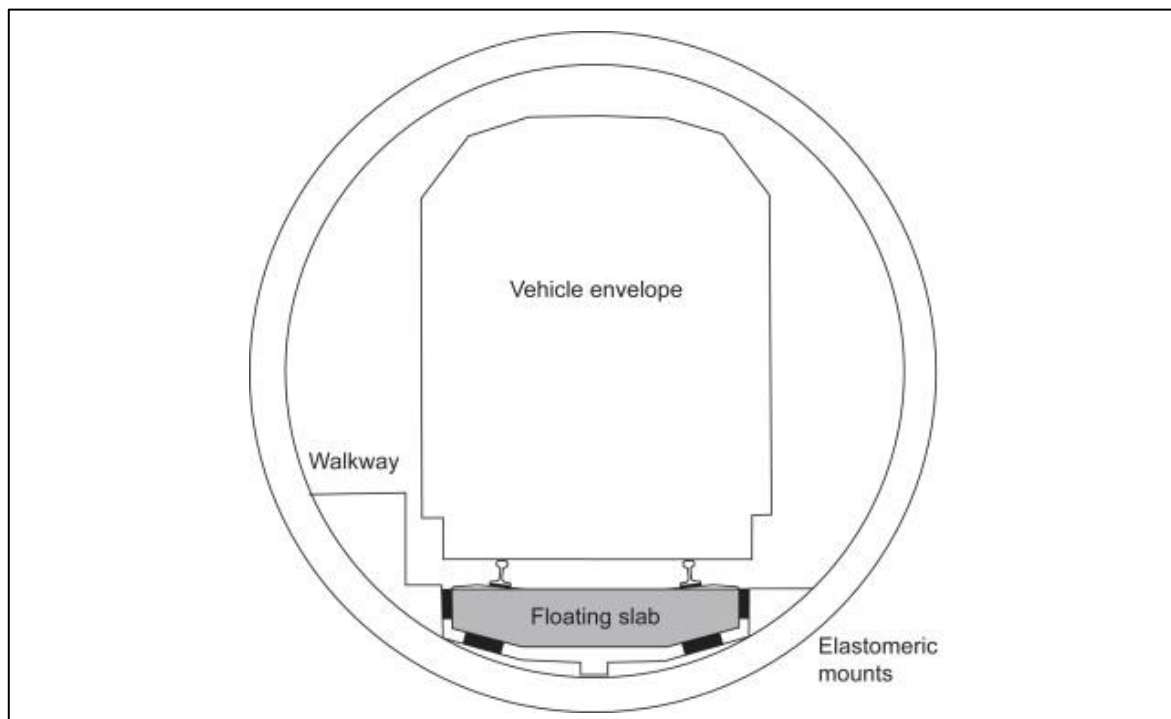


Abbildung 2-4: Prinzipielles Schaubild zum Aufbau einer schwebenden festen Fahrbahn. Grafik entnommen aus [36]

Im Folgenden werden die nach Abschnitt 2.3 meist verwendeten Typen der Festen Fahrbahn in der Schweiz und in Deutschland zusätzlich als rheologische Ersatzmodelle in Abbildung 2-5 dargestellt.

- Sonnevile – «Low Vibration Track» mit in Längsrichtung diskreter Schienenabstützung durch gummigelagerte Betonfüsse und weiterer elastischer Verbindung durch die Zwischenlage zwischen Betonfuss und Schiene.
- Railone – «Rheda 2000» mit in der Betondecke vergossenen Betonfüssen und optionaler Verbindung zwischen den Betonfüssen, analog zu einer Schwelle. Die Lagerung der Schiene durch eine Zwischenlage ermöglicht eine definierte Elastizität.

- System Bögl bei der die Schiene über eine elastische Zwischenlage mit der Betondecke verbunden ist.

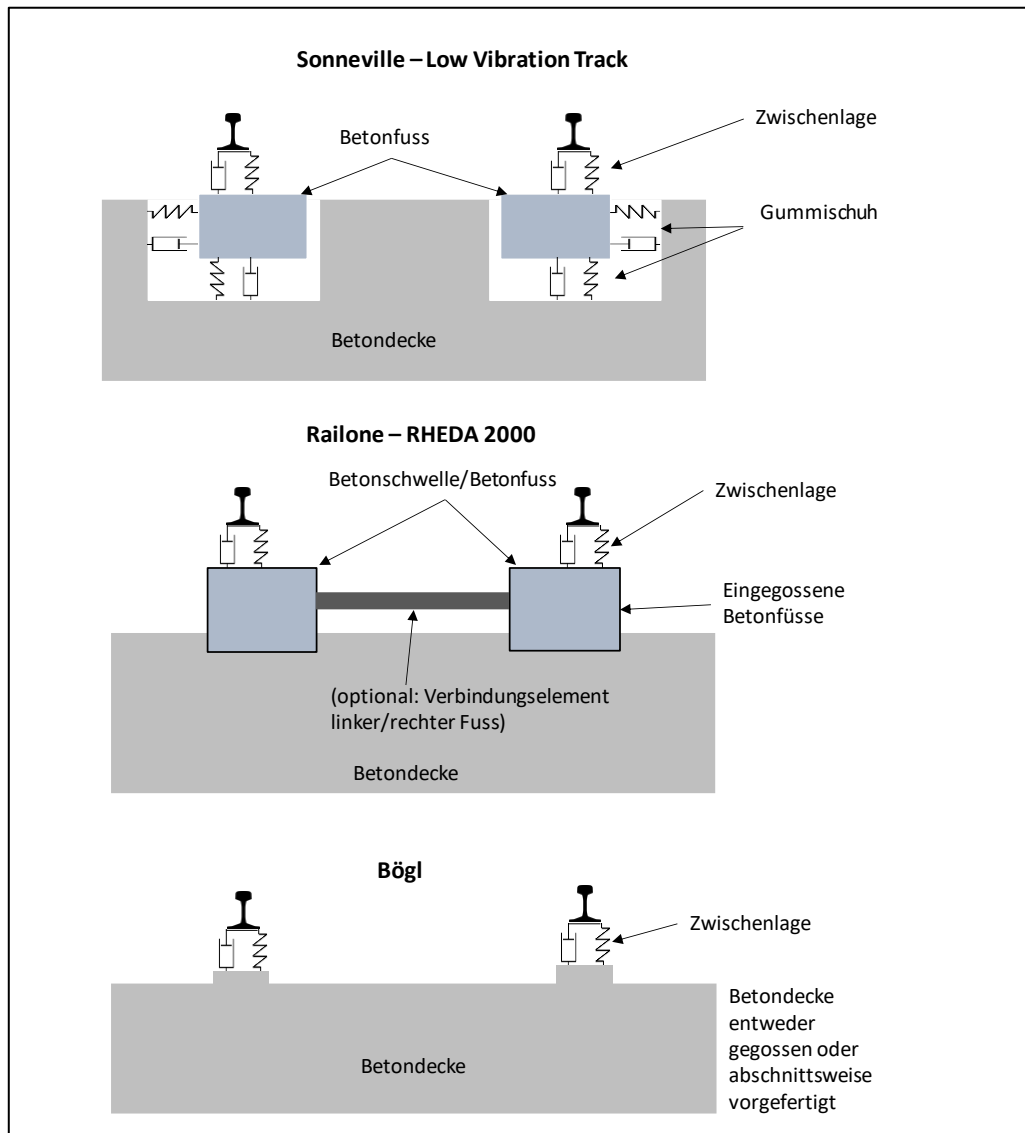


Abbildung 2-5: Schematische Darstellung verschiedener Fahrbahnsysteme

2.5 Feste Fahrbahn in der Schweiz

2.5.1 Meisterverwendeter Typ der Festen Fahrbahn in der Schweiz

Mit über 80 % Marktanteil an Fester Fahrbahn ist Sonneville der Hersteller der meisten Festen Fahrbahnen in der Schweiz. Der Produktname der Festen Fahrbahn von Sonneville lautet «Low Vibration Track» (LVT) [3]. Es gibt mittlerweile verschiedene Modelle der LVT, die in Abhängigkeit der gestellten Anforderungen verwendet werden:

- Standard: für unterschiedliche Streckenklassen, Schwerlast- und Hochgeschwindigkeitsverkehr, individualisierbar
- High Attenuation (HA): Weiterentwicklung des Standard-Typs mit geringerer Steifigkeit zur Reduktion von Lärm- und Erschütterungen (insbesondere Körperschall)
- Switches & Crossings (S&C): Für Weichen und Kreuzungen

- **Traffic:** Gefüllte Feste Fahrbahn zur notfallmässigen Befahrung mit gummibereiften Strassen-Fahrzeugen
- **Panel:** Feste Fahrbahn mit kurzen Segmenten der Betontragschicht
- **Serve Environment (SE):** Für Anwendung bei besonderen Umwelteinflüssen (Waschstrassen in Depots oder in Umgebung mit hoher Sand- und Staubbelastung)

Die LVT kann durch Variation der Steifigkeiten die Übertragungsfunktion des Systems «Feste Fahrbahn» individuell anpassen. Dadurch kann beispielsweise die Eigenfrequenz des Systems hin zu niedrigeren Frequenzen verschoben werden.

2.5.2 Position und Umfang der Festen Fahrbahn in der Schweiz

Für den in der Schweiz am meisten verbauten Typ der Festen Fahrbahn LVT können beim Hersteller Sonnevile [1] detaillierte Informationen bezüglich Lageort, Baujahr, LVT-Typ und Länge verlegter Fester Fahrbahn auf der Homepage abgerufen werden.

Tabelle 2-1 fasst die bereits in der Schweiz realisierten Projekte der Festen Fahrbahn zusammen.

Projektname - Ort	Jahr	Umgebung	LVT-Typ	Länge [m]
Grauholz Tunnel	1995	Tunnel	Standard	400
Zimmerberg Tunnel	2004	Tunnel	Standard	9'000
Lötschberg Tunnel	2007	Tunnel	Standard	25'650
Durchmesserlinie Zürich	2014	Tunnel	Standard, HA, S&C	6'650
WSB Aarau - Binzenhof	2014	Tunnel	«Low Profile»	200
Durchmesserlinie Zürich	2015	Viadukt	Standard	780
Heitersberg Tunnel	2015	Tunnel	S&C	150
Gotthard Basis Tunnel	2016	Tunnel	Standard	57'000
CEVA	2019	Tunnel	Standard, HA	8'750
Axen	2019	Tunnel	Standard, HA, Panel Traffic	2'930
Ceneri Basis Tunnel	2020	Tunnel	Standard, S&C	15'400
Eppenberg Tunnel	2020	Tunnel	Standard, HA, Traffic	2'960
Bözberg Tunnel	2020	Tunnel	Standard	2'050

Tabelle 2-1: Feste Fahrbahn – realisierte Projekte in der Schweiz [1]

Tabelle 2-2 zeigt die nach aktuellem Stand geplanten bzw. sich in Bau befindenden Orte der Festen Fahrbahn.

Projektname - Ort	Jahr	Umgebung	LVT-Typ	Länge [m]
Lötschberg Scheiteltunnel	2023	Tunnel	Standard, HA, S&C	14'400
Zumikon Forchbahn	2023	Tunnel	Standard, HA, S&C	1'850
Albula Tunnel	2023	Tunnel	Standard SE	5'700

Tabelle 2-2: Feste Fahrbahn – in Umsetzung/geplante Projekte in der Schweiz [1]

Es bestehen in der Schweiz noch weitere Streckenabschnitte auf denen Feste Fahrbahn verlegt wurde, aber deren Typ nicht ermittelt werden konnte. An dieser Stelle seien beispielsweise der Flughafenbahnhof Zürich (siehe Titelbild), der Bahnhof in Stettbach und der Zürichbergtunnel erwähnt.

Abbildung 2-6 zeigt die geografische Position der verlegten Festeren Fahrbahn in der Schweiz. Die schwarze Schrift deutet auf bereits realisierte Projekte hin, eine graue Beschriftung skizziert Projekte mit Festerer Fahrbahn die voraussichtlich 2023 fertig gestellt werden.

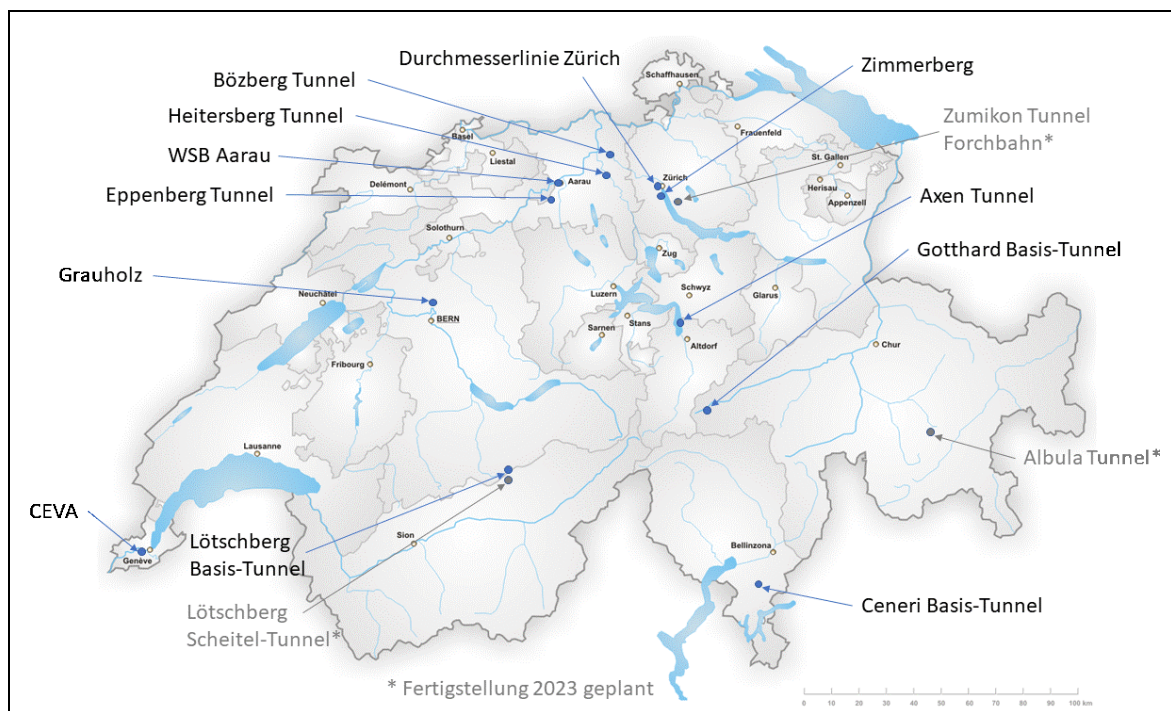


Abbildung 2-6: Geografische Positionen der verlegten Festeren Fahrbahn – basierend auf [1]

Abbildung 2-7 zeigt die insgesamt in der Schweiz verlegte Strecke der Festeren Fahrbahn (FF) seit 1995. Bildet man die Trendlinie seit dem Jahr 2005 ergibt sich eine Steigung von ca. 8,1 km pro Jahr, sprich seit 2005 wurden durchschnittlich 8 km FF in der Schweiz verlegt. Dieses Ergebnis wird primär durch das „Jahrhundertprojekt“ NEAT (Neue Eisenbahn-Alpentransversale) mit dem Bau des Lötschberg-Basis-Tunnels mit 26 km FF (2007), dem Bau des Gotthard-Basis-Tunnels mit 57 km FF (2015) und des Ceneri-Basis-Tunnels mit 15,4 km FF (2020) dominiert.

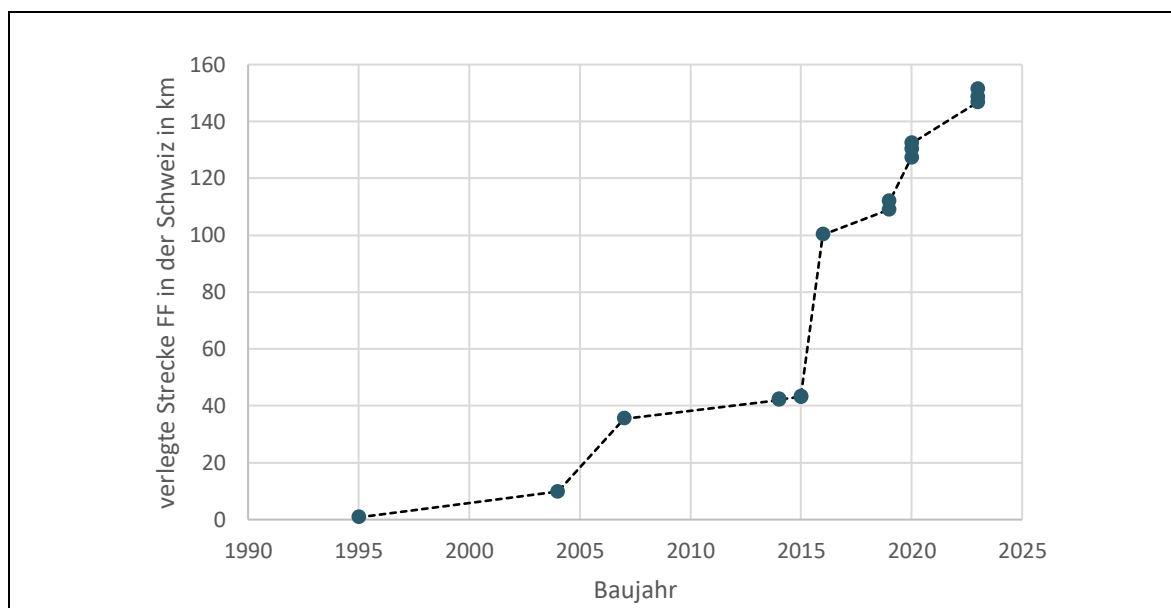


Abbildung 2-7: Verlegte Strecke der Festeren Fahrbahn (FF) in der Schweiz seit 1995 – basierend auf [1]

3 Literaturrecherche

In diesem Kapitel werden alle relevanten Ergebnisse der Literaturrecherche vorgestellt. In Abschnitt 3.1 wird auf die Methodik der Recherche eingegangen. In Abschnitt 3.2 werden die relevanten Veröffentlichungen, die sich mit den akustischen Eigenschaften der Festen Fahrbahn beschäftigen, vorgestellt. Abschnitt 3.3 gibt die Vorgaben in Normen und Richtlinien wieder. In Abschnitt 3.4 werden Ansätze zur Reduktion der Schallemissionen vorgestellt. Abschnitt 3.5 fasst die Ergebnisse der Literaturrecherche zusammen.

3.1 Methodik

Die relevanten Such-Plattformen bzw. Datenbanken im Ingenieurs-wissenschaftlichen Bereich sind im Wesentlichen *ScienceDirect*, *ResearchGate* und *Google Scholar*. Die Suche auf diesen drei Plattformen wird in Anhang A mit den Suchbegriffen und jeweiligen Ergebnissen aufgelistet. Einige Literaturquellen wurden zudem über Prüfung der Referenzen der gefundenen Veröffentlichungen identifiziert.

Die identifizierten Literaturquellen beinhalten vereinzelt Untersuchungen aus dem asiatischen Raum, die auf Englisch publiziert wurden. Aufgrund der Vielzahl an identifizierten Literaturquellen wurde auf eine gezielte Suche im asiatischen Raum verzichtet.

3.2 Literatur zur Untersuchung des akustischen Verhaltens der Festen Fahrbahn

Im folgenden Abschnitt werden die relevanten Veröffentlichungen vorgestellt, die sich mit den akustischen Eigenschaften der Festen Fahrbahn beschäftigen. Die Veröffentlichungen wurden anhand ihres Inhalts in fünf verschiedene Prioritätsstufen kategorisiert (Priorität 1 bis 5, wobei 5 die höchste Priorität hat). Die Veröffentlichungen mit Priorität 5 und 4 werden detaillierter zusammengefasst, wohingegen für die Veröffentlichungen mit niedrigerer Priorität lediglich die Ergebnisse präsentiert werden.

3.2.1 Veröffentlichungen mit Priorität 5

Beiträge von THEYSSEN et. al [11], [12], [13]

THEYSSEN befasst sich in seiner Dissertation mit der Modellbildung und Simulation von Lärm bei verschiedenen Oberbausystemen wie der Festen Fahrbahn und dem Schotteroberbau [13]. Ein wesentlicher Fokus seiner Arbeit liegt dabei auf der Modellbildung, der Validierung und der Entwicklung einer effizienten Simulation des akustischen Verhaltens eines gegebenen Systems. Neben seiner umfangreichen Dissertation liegen Präsentationen von verschiedenen Tagungen [11] & [12] vor, welche die zentralen Forschungsergebnisse kompakt zusammenfassen.

Gemäss THEYSSEN [13] Seite 65 erzeugt eine Feste Fahrbahn höhere Schallemissionen da die Steifigkeit der Zwischenlage zwischen Schiene und Beton niedriger ist als bei Schotteroberbau. Dadurch kann ein längerer Abschnitt der Schiene in den relevanten Frequenzbereichen schwingen. Ausserdem wird durch die fehlende Schallabsorption der Betonoberfläche ein grösserer Anteil an Schall reflektiert. In Kapitel 5.4 führt THEYSSEN daher auf Basis seines zuvor entwickelten Ansatzes eine Parameterstudie an einem Modell der Festen Fahrbahn mit einer Steifigkeit zwischen Schiene und Betonfuss und einer Steifigkeit zwischen Betonfuss und Betonplatte durch. Dieser Aufbau gleicht in der Schweiz verbauten Typs «Low Vibration Track». Ziel der Parameterstudie von THEYSSEN ist die Identifikation optimaler Parameter hinsichtlich der Körperschall- und Luftschallemission und der Kräfte, die im System auftreten. Als Randbedingung wird eine Radaufstandskraft von 55 kN und eine Fahrzeuggeschwindigkeit von 100 km/h angesetzt. Die zur Anwendung kommenden Gleislagefehler und Rauigkeiten sind [13] zu entnehmen. In der Parameterstudie wird die Masse der Betonfüsse und die Steifigkeiten zwischen Betonfuss und Betonplatte und zwischen Betonfuss und Schiene variiert. Das untersuchte System wird beispielhaft in Abbildung 3-1 dargestellt.

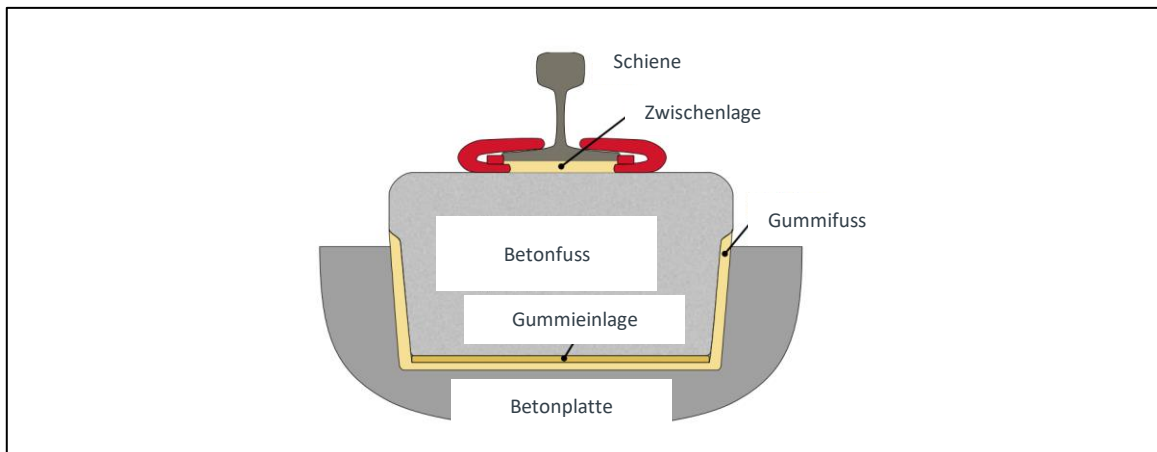


Abbildung 3-1: Veränderte Schnittdarstellung der Festen Fahrbahn, die u. a. von Theyssen untersucht wird. Grafik entnommen aus [11]

Gemäss THEYSSEN kann ein verbessertes Verhalten eingestellt werden, in dem die Zwischenlage, auch Schienenunterlage genannt, bei hohen Frequenzen möglichst steif und die Gummieinlage zwischen Betonfuss und Betonplatte bei niedrigen Frequenzen möglichst weich ist. In [13] Seite 68 wird durch Simulationsrechnungen eine Reduktion der Schallabstrahlungsleistung im Berechnungsmodell von 5 dB(A) bis 10 dB(A) genannt. Jedoch führt gemäss THEYSSEN eine erhöhte Steifigkeit zu erhöhten Kräften zwischen Schiene und Betonfuss und im Rad-Schiene Kontakt. In [12] werden modifizierte Steifigkeiten von 800 kN/mm (vorher: 100 kN/mm) der Schienenunterlage und 30 kN/mm (vorher: 40 kN/mm) der Einlage zwischen Betonfuss und Betonplatte genannt. Insbesondere die optimale Steifigkeit der Schienenunterlage hängt dabei gemäss [13] von den vorliegenden Rauigkeiten zwischen Rad und Schiene ab. Bei Entwurf des Festen Fahrbahn-Systems sollte demnach das Rauigkeitsprofil von Rad (in Abhängigkeit des zu erwartenden Verkehrs) und Schiene untersucht werden, sodass eine entsprechend optimale Steifigkeit der Schienenunterlage gewählt werden kann.

HAFNER: “Lärmauswirkungen und Versuch einer Lärmoptimierung eines FF LVT Oberbaus” [29]

Ein Applikationsbeispiel des Festen Fahrbahn Typs «Low Vibration Track» wird von HAFNER der Schweizerischen Bundesbahn (SBB) in [29] gegeben. Auf einem Gleisabschnitt wurde ein Schotteroberbau mit Holzschwellen durch die genannte Feste Fahrbahn ersetzt und in Folge eine Lärmzunahme von +4 dB festgestellt. Anschliessend wurde eine Messkampagne durchgeführt, in der das Lärmreduktionspotential durch eine steifere Schienen-unterlagen untersucht wurde. Die Steifigkeit der Schienenunterlagen wurden in diesem Fall von 100 kN/mm, analog zu den Untersuchungen von THEYSSEN ([11], [12], [13]), auf 700 kN/mm erhöht. Ergebnis der Messkampagne ist, dass die Lärmabnahme kleiner als 1 dB ausfällt und im gewichteten dB(A) Spektrum nicht relevant ist.

S. VAN LIER: “THE VIBRO-ACOUSTIC MODELLING OF SLAB TRACK WITH EMBEDDED RAILS” [20]

In Untersuchungen des *Nederlandse Spoorwegen N.V.- Technical Research* aus dem Jahre 1999 in den Niederlanden von VAN LIER wird ein modellbasierter Ansatz zur Lärm-Analyse der Festen Fahrbahn verfolgt [20].

Basierend auf verschiedenen Messungen (Systemantwort bei Impulsanregung) wird ein Modell des bestehenden Systems der Festen Fahrbahn gebildet und validiert. Nachfolgend wird auf Basis der Erkenntnisse des existierenden Systems ein optimiertes System entworfen und mit einem entsprechend angepassten Modell untersucht.

Allen Berechnungen liegt eine Fahrzeuggeschwindigkeit von 100 km/h und ein nicht weiter erläuteter Referenz-Güterwagen zugrunde. Bei den Vergleichen werden ausserdem zwei

verschiedene Rad-Rauigkeiten herangezogen, welche einem laufflächengebremsten und einem nicht-laufflächengebremsten Rad zugeordnet werden können.

Van Lier stellt fest, dass das bestehende System der Festen Fahrbahn rund 1,5 dB(A) bis 3 dB(A) höhere Schallemissionen produziert als das Schottergleis. Durch Optimierung der Bauform kann eine Reduktion der Schallemission auf Basis der Simulationsergebnisse um -4 dB(A) bis -6 dB(A) gegenüber den Ergebnissen des Schottergleis-Modells erzielt werden. Die Optimierung der Festen Fahrbahn besteht im Wesentlichen in der gezielten Änderung der Systemsteifigkeiten und damit der Eigenfrequenzen. Die Eigenfrequenz der Elastomerbettung wird bspw. von 500 Hz auf 4 kHz verschoben, was vermutlich vorrangig durch eine Erhöhung der Elastomersteifigkeit und einer geänderten Masse der Elastomerkomponenten erzielt wurde.

MATIAS, FERREIRA: "Railway slab track systems: review and research potential" [28]

MATIAS UND FERREIRA geben in ihrer Veröffentlichung verschiedene Forschungsergebnisse in Bezug zur Festen Fahrbahn wieder. Basierend auf Erfahrungswerten wird für die Feste Fahrbahn ein erhöhter Geräuschpegel von 2 dB bis 4 dB aufgeführt [28].

Als mögliche Abhilfemassnahmen werden akustische Barrieren mit einem Potential von 6 dB und Absorptionsplatten auf den Betondecken mit einem Potential von 2 dB bis 3 dB angegeben. Fahrzeugseitig können zudem geeignete Dämpfer am Rad zu einer Reduktion von 4 dB und Radschürzen zu einer weiteren Reduktion von 1 dB führen.

Gemäss den Autoren liegen die Eigenfrequenzen der verschiedenen Bauformen der Festen Fahrbahn oft in einem ähnlichen, charakteristischen Bereich. Für das Gesamtsystem der Fahrbahn wird ein Frequenzbereich von 60 Hz bis 90 Hz, für die Betondecke von 100 Hz bis 200 Hz, für die Schiene bezüglich der Anbindung an den Untergrund von 400 Hz bis 1000 Hz und für die Schiene zwischen zwei Anbindungspunkten von 1000 Hz bis 2000 Hz genannt.

Ein weiterer neuer Aspekt ist die Tatsache, dass die Eigenschaften des Gleises die kritische Geschwindigkeit des Fahrzeugs beeinflussen können. Je nach Parameterausprägung des Systems kann eine Resonanz angeregt werden. Gemäss MATIAS UND FERREIRA ist dies der Fall, wenn die Fahrzeuggeschwindigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Rayleigh-Wellen ähnelt. Dieses Problem kann durch den Verbau von hochsteifen Betondecken gelöst werden, welche die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Rayleigh-Welle über die betriebliche Fahrzeuggeschwindigkeit erhöhen. Eine gezielte Anpassung dieser Steifigkeit kann jedoch mit der Luftschallabstrahlung des Systems interferieren, sodass beide Einflüsse frühzeitig berücksichtigt werden sollten.

Zur Reduktion der Körperschallabstrahlung in den Untergrund werden gemäss [28] weiterhin oft Elastomer-Matten unter die Betondecke eingebracht, sodass eine «floating slab track» entsteht (vgl. Abschnitt 2.4). Vibrationen mit Frequenzen über 10 Hz können damit gut isoliert werden. Jedoch hat dies den Nachteil von erhöhtem Verschleiss, da die Vibrationen in der Betondecke selbst erhöht werden.

LUTZENBERGER et. al: "Luftschall aus dem Schienenverkehr" [43]

LUTZENBERGER geht in Abschnitt 9.1 seiner Publikation auf das Luftschallverhalten der Festen Fahrbahn ein [43]. Er vergleicht den Luftschall des Schotteroberbau mit der Festen Fahrbahn in und unter einem Reisezugwagen anhand von Messergebnissen. Selbst nach der absorbierenden Gestaltung der Oberfläche der Festen Fahrbahn ist in einzelnen Frequenzbändern noch eine Erhöhung des Luftschallpegels bei der Vorbeifahrt von Zügen im Vergleich zum Schotteroberbau messbar. Diese Pegelüberhöhung ist, wie durch Messungen des Körperschalls an der Schiene während Zugüberfahrten nachgewiesen in Abbildung 3-2 werden konnte, eng korreliert mit einer entsprechenden Überhöhung des Schallschnellepegels an der Schiene der Festen Fahrbahn gegenüber demjenigen an der Schiene des Schotteroberbaus.

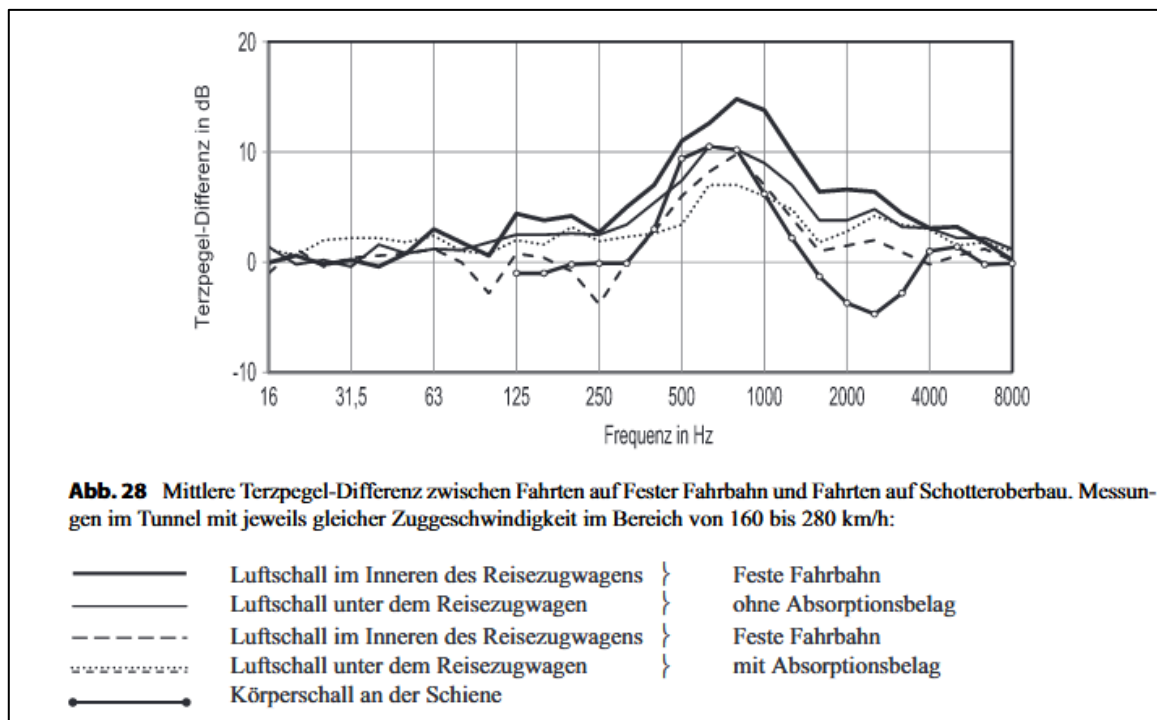


Abbildung 3-2: Terzpegel-Differenz zwischen Fester Fahrbahn und Schotteroberbau [43]

MÜNCHSCHWANDER et. al: "Feste Fahrbahn" [41]

Das Buch «Feste Fahrbahn» ist eine Sonderausgabe der Fachzeitschrift «ETR», welches im Jahr 1997 publiziert wurde [41]. Es beinhaltet mehrere Artikel zum Thema Feste Fahrbahn und geht u.a. auf die «Untersuchungen zur Verminderung der Schall- und Erschütterungsemission» ein. Demzufolge zeigten erste Geräuschmessung Anfang der 70er Jahre bereits, dass die Schallabstrahlung von Zügen beim Befahren der Festen Fahrbahn gegenüber Schotteroberbau deutlich höher ist. Dieser Effekt wurde erwartet, da die weichere Lagerung der Schiene zur Entkopplung von Schiene und Schwelle führt und stärkere Schwingungen der Schiene zur Folge hat. Im Frequenzbereich zwischen 300 Hz und 1000 Hz wird dadurch eine höher Luftschallabstrahlung erzeugt. Ausserdem wird der vom Zug emittierte Schall nicht mehr durch das Schotterbett absorbiert, sondern durch die glatten Oberflächen reflektiert. Bei Versuchsfahrten auf der Festen Fahrbahn bei Rheda und Oelde wurde zwischen 120 km/h und 250 km/h eine Schallpegelanhebung um etwa 4 dB(A) ermittelt. Messungen der TU München ergaben im niederfrequenten Bereich niedrigere Emissionen der Festen Fahrbahn gegenüber des Schotteroberbaus. Durch schallabsorbierende Beläge konnte die Pegelerhöhung um 2 dB(A) verringert werden. Messungen, die das maximale Potential von Lärminderungsmaßnahmen bei der Festen Fahrbahn untersuchen sollen, zeigten eine Pegelminderung von bis zu 6 dB(A).

3.2.2 Veröffentlichungen mit Priorität 4

Poisson: "Railway Noise Generated by High-Speed Trains" [21]

POISSON führt Studien zur Untersuchung der Schallemissionen von Hochgeschwindigkeitszügen durch [21]. Der Fokus dieser Veröffentlichung liegt auf aerodynamisch bedingten Schallemissionen, dennoch werden relevante Informationen zum Thema Feste Fahrbahn geliefert. Aus [21] Seite 462 geht hervor, dass weltweite Untersuchungen (Messungen und Berechnungen) der Festen Fahrbahn «in den meisten Fällen» zu einer Erhöhung der Schallemissionen bei Zugdurchfahrt von rund 3 dB(A) führen. Am Beispiel der französischen Hochgeschwindigkeitsstrecke im Osten des Landes nennt

POISSON drei Gründe für eine Schallpegelzunahme der Festen Fahrbahn gegenüber dem Schotteroberbau:

- Erhöhte Rauigkeit der Schiene (kein direkter Zusammenhang zur Oberbauform ersichtlich)
- Unterschiedliche Abklingkonstanten der Schiene im relevanten Frequenzbereich, bedingt durch die geänderte Bettung
- Schallreflektion durch die Oberfläche des Betons

Gemäss POISSON trägt jeder der drei Anteile mit jeweils 1 dB(A) zur Emissionserhöhung bei. Mögliche Massnahmen zur Schallemissionsreduktion beinhalten u. a. den Verbau von Schienendämpfern, die auch bei Fester Fahrbahn wirksam sind. Diese Massnahme zielt im Wesentlichen auf eine geeignete Modifizierung der Abklingrate der Schiene ab.

FERNÁNDEZ et. al: "Monitoring and analysis of vibration transmission for various track typologies. A case study" [16]

FERNÁNDEZ et. al. untersuchen auftretende Vibrationen im Unterbau in verschiedenen Netzwerken (Metro und Vollbahn) im Grossraum der spanischen Stadt Valencia [16]. Gemessen wurde an sechs Gleisabschnitten in unterschiedlichen Netzwerken mit verschiedenen Oberbauformen:

- Sektion A: Feste Fahrbahn mit eingelassener Rillenschiene (Bauform-Spezifikation unbekannt, Phoenix RI 60, Tram-Netzwerk, Durchschnittsgeschwindigkeit 30-40 km/h)
- Sektion B: Feste Fahrbahn in Bauform «STEDEF» und UIC 54 Schiene (Metro-Netzwerk, Durchschnittsgeschwindigkeit 30 km/h)
- Sektionen C1, C2 und C3: Schotteroberbau mit UIC 54 Schiene (Metro-Netzwerk, Durchschnittsgeschwindigkeiten für C1 & C2: 60-70 km/h, 30 km/h für C3)
- Sektion D: Schotteroberbau mit UIC 60 Schiene (Hochgeschwindigkeitsnetz, Durchschnittsgeschwindigkeiten von 250 km/h bis 300 km/h)

Die in [16] in Sektion B zur Anwendung kommende Bauform der Festen Fahrbahn «STEDEF» wird in [17] beschrieben und ähnelt der Bauweise «Low Vibration Track», verfügt jedoch zusätzlich über eine Flachblech-Verbindung zwischen den linken und rechten Betonfüssen. In [17] werden die relevanten Steifigkeiten angegeben. Es werden keine Informationen zum Instandhaltungszustand der jeweiligen Oberbauten genannt. Die Autoren messen die Vibrationsübertragung der jeweiligen Fahrbahn-Systeme in den Untergrund mittels piezoelektrischen Beschleunigungssensoren. Die Luftschallemissionen werden nicht gesondert erfasst. Pro Sektion wird eine Messkampagne von je einem Tag angesetzt, an dem jeweils 8 bis 20 Zug-Durchfahrten gemessen werden. Die Vibrationen werden mittels dreier Sensoren in verschiedenen lateralen Abständen zur Schiene gemessen. Für den vorliegenden Fall ist besonders ein Vergleich zwischen Sektion B und Sektion C3 interessant, da sich diese lediglich im Oberbau unterscheiden (Befahrung mit gleichen Fahrzeugen mit 11 t Achslast und gleichen Geschwindigkeiten). In Sektion B wird ein Sensor am Betonfuss platziert und zwei Sensoren an der Betonplatte bei verschiedenen Querabständen. In Sektion C3 wird direkt an der Schiene, auf der Betonschwelle und im Schotter gemessen.

Die Autoren kommen in ihrer Studie zu dem Ergebnis, dass der Schotteroberbau insbesondere bei geringen Vibrationsfrequenzen bessere Dämpfungseigenschaften aufweist als die Feste Fahrbahn in Bauform «STEDEF». Bei hohen Frequenzen können die Autoren keine wesentlichen Unterschiede im Übertragungsverhalten der Vibrationen ausmachen. Zu beachten ist hier, dass der relevante Vergleich nur für niedrige Geschwindigkeiten von 30 km/h gilt. Zudem ist unklar, inwieweit die verwendeten Beschleunigungssensoren höhere Frequenzen im Bereich von Luftschall messen können.

JANSEN, DITTRICH: "Separation of Rolling Noise and Aerodynamic Noise by In-Service Measurement of Combined Roughness and Transfer Functions on a High Speed Slab Track" [24]

JANSEN und DITTRICH messen Geräusch- und Vibrationsamplituden an Hochgeschwindigkeitstrassen, sowie die Rauigkeiten des Rades und der Schiene und berechnen die Übertragungsfunktionen, welche bei gegebener Anregungsfrequenz und Amplitude die abgestrahlte Schalleistung ausgeben [24]. Ziel der Autoren ist es, die Übertragungsfunktion aufzuteilen, sodass die aerodynamisch-bedingten Anteile und die abrollbedingten Anteile separiert werden können.

Die Kenntnis dieser Übertragungsfunktionen ermöglicht den Vergleich einzelner Fahrbahnsysteme. Die in der Veröffentlichung untersuchte Feste Fahrbahn ist vom Typ Rheda 2000. Gemessen wurden «Thalys» Züge bei 90 km/h, 160 km/h und 300 km/h und «Fyra» Züge bei 160 km/h. Im vorliegenden Fall ist weiterhin zu beachten, dass das verbaute Rheda 2000 System in Abschnitte von 6,4 m geteilt ist und nicht - wie gewöhnlich - kontinuierlich aufgebaut ist. Die Steifigkeit der Schienenunterlage wird mit 22,5 MN/m angegeben.

Ergebnis der Untersuchungen von JANSEN und DITTRICH ist, dass der gewählte Streckenabschnitt mit Rheda 2000 System im Frequenzbereich von 500 Hz bis 2 kHz ein deutlich schlechteres Lärm-Verhalten aufweist als der Schotteroberbau. Bedingt ist dies gemäss JANSEN und DITTRICH einerseits durch eine niedrige Steifigkeit der Schienenunterlage und andererseits durch die hohe Masse der Betonsegmente. Das Verhalten ist sogar so schlecht, dass das modifizierte Rheda 2000 System streng genommen nicht konform mit der TSI Lärm [27] ist.

BUCHMANN: "Feste Fahrbahn und Lärm – Gibt es hier Lösungen?" [22]

BUCHMANN diskutiert in seinem Vortrag, gehalten an der Universität Karlsruhe, verschiedene Lösungsansätze zur Minimierung der Schallemissionen der Feste Fahrbahn [22]. Gemäss BUCHMANN strahlt eine schallharte Betontragplatte, wie sie bspw. im System Rheda zum Einsatz kommt, 5 dB(A) mehr Schall ab als ein Schotteroberbau. Dieser Wert ist vermutlich als Erfahrungswert zu verstehen, da weder Methode zur Bestimmung noch die Quelle genannt wird.

Als mögliche Abhilfe wird das bereits in [20] (vgl. Abschnitt S. VAN LIER: "THE VIBRO-ACOUSTIC MODELLING OF SLAB TRACK WITH EMBEDDED RAILS") vorgestellte «Embedded Rail System (ERS)» genannt, welches gemäss BUCHMANN Körperschallemissionen um bis zu 20 dB reduziert. Luftschallemissionen werden ebenfalls reduziert, jedoch wird keine Quantifizierung genannt. BUCHMANN erwähnt, dass das System ERS das Maximum der Luftschallemissionen zusätzlich zur Amplitudenreduktion in seiner Frequenz verschiebt, sodass Vorbeifahrten als weniger störend empfunden werden. Weitere Massnahmen zur Reduktion der Luftschallemissionen sind laut BUCHMANN der Verbau von schallabsorbierenden Gleiseindeckungen und der Verbau eines vertikalen Lärm-Schutz-Boards. Diese Massnahmen sind jedoch nicht spezifisch zur Feste Fahrbahn, sondern bringen stets Verbesserungen in der Schallbelastung, unabhängig von der Oberbauform.

ZHANG, THOMPSON et. al: "The noise radiated by ballasted and slab tracks" [37]

Die Autoren ZHANG et. al untersuchen das Schallabstrahlungsverhalten der Feste Fahrbahn und des Schotteroberbaus [37]. Die Untersuchung wird modellbasiert durchgeführt und schliesslich mit Messungen verglichen. Das verwendete Modellierungsprogramm «TWINS» wurde in früheren Arbeiten von THOMPSON selbst entwickelt. Die Autoren entwickeln Modelle dreier verschiedener Gleisanlagen. Zwei Schotteroberbauten mit unterschiedlichen Steifigkeiten der Schienenunterlage und ein Modell einer Feste Fahrbahn, deren genaue Bauform nicht erwähnt wird.

Die geringsten Schallemissionen zeigt das Schottergleis mit hoher Steifigkeit der Schienenunterlage, gefolgt vom Schottergleis mit niedriger Steifigkeit der Schotterunterlage. Die grössten Schallemissionen zeigt die Feste Fahrbahn mit einer Erhöhung von 1-2 dB(A) bzw. 3-5 dB(A) gegenüber den Varianten des Schotteroberbaus. Laut ZHANG et. al sind diese Angaben jedoch nicht

als generelle Aussagen zu verstehen, sondern haben nur Gültigkeit für die im Rahmen der Arbeit untersuchten Systeme, da die Ergebnisse stark von den physikalischen Eigenschaften (Rauigkeiten, Bauform der Fahrbahn, Massen, etc.) der jeweiligen Systeme abhängen.

Gemäss ZHANG et. al ist die Schallabstrahlung der Betonoberfläche der untersuchten Feste Fahrbahn bis zu Frequenzen von 100 Hz die dominante Schallquelle und trägt bei Frequenzen über 100 Hz nicht mehr wesentlich zum gesamten Schalldruckpegel bei. Diese Information ist für die Entwicklung geeigneter Schallschutzmassnahmen (bspw. Bedeckung der Betonoberfläche). Interessant.

3.2.3 Veröffentlichungen mit niedrigerer Priorität

Nachfolgend wird auf weitere Veröffentlichungen eingegangen, deren eine niedrigere Priorität zugewiesen wird, aber vereinzelt relevante Informationen beinhalten.

In [18] und [19] wird eine Zunahme der Lärmbelastung von +3 dB(A) bei Einbau von Fester Fahrbahn statt Schotteroberbau genannt, wobei dieser Wert als Erfahrungswert ohne Referenz zu verstehen ist.

Im Dokument «Wheel/Rail Noise Control Manual», welches in den USA im Rahmen des «Transit Cooperative Research Program» entwickelt wurde, wird eine Verringerung der Luftschallemission bei Schotteroberbau in Vergleich zu Fester Fahrbahn von 4 dB bis 5 dB genannt (vgl. [23], Seite 70, ebenfalls ein Erfahrungswert).

In [25] wird ebenfalls eine Erhöhung der Luftschallemissionen von 3 dB(A) bis 5 dB(A) bei Verbau der Feste Fahrbahn gegenüber dem Schotteroberbau als Erfahrungswert genannt. Im niederfrequenten Bereich wurde von den Autoren anhand von Prüfstandsversuchen festgestellt, dass Vibrationen im Schotteroberbau um «bis zu 30-fach» niedriger sind als bei der Feste Fahrbahn.

HEUTSCHI et. al haben anhand eines vereinfachten Berechnungsmodells einen Vergleich zwischen den Schallemissionen der Feste Fahrbahn und des Schotteroberbaus durchgeführt [26]. Ergebnis ihrer Berechnung ist, dass die Feste Fahrbahn um bis zu 2,3 dB(A) höhere Schallemissionen produziert als der Schotteroberbau.

3.3 Normative Grundlagen und Richtlinien

EN 16432 – Bahnanwendungen – Feste Fahrbahn-Systeme:

Teil 1: Allgemeine Anforderungen [8]:

Aus Teil 1 ist in Kapitel 5.7 bezüglich Lärm- und Vibration folgende Anforderung zu entnehmen:

«Schallabstrahlungs- oder Vibrationsanforderungen können gefordert werden. Für solche Anforderungen können bestimmte Eigenschaften oder Ausführungen von Teilsystemen erforderlich sein.»

Teil 2: Teilsysteme und Komponenten [9]:

Aus Teil 2 ist in Kapitel 6.7 Schall und Erschütterung folgende Aussage notiert:

«Schall- oder Erschütterungsanforderungen können anwendbar sein. Um die Anforderungen an den Lärmschutz zu erfüllen, dürfen spezielle Eigenschaften zur Schallminderung in das FF-System integriert werden. ...»

EN 13481 – Bahnanwendungen – Oberbau – Leistungsanforderungen für Schienenbefestigungssysteme

Teil 5 der Norm [10] geht auf «Befestigungssysteme für feste Fahrbahn mit aufgesetzten oder in Kanälen eingebetteten Schienen» ein. In Anhang A sind informative Angaben «Vibration und Geräusch» aufgeführt.

Richtlinie zur Berechnung der Schallimmissionen von Schienenwegen «Schall 03» [42]

Die Richtlinie ist Teil der Verkehrslärmverordnung des deutschen Bundes-Immissionsschutzgesetzes und beschreibt die Berechnung des Beurteilungspegels für Schienenwege. In Kapitel 4 wird auf die Schallemissionen von Eisenbahnen eingegangen. Abschnitt 4.4 geht auf verschiedene Fahrbahnarten ein und führt explizit die zu berücksichtigenden Pegelkorrekturen in dB in Abhängigkeit der Oktavband-Mittenfrequenz der Festen Fahrbahn gegenüber einer berechneten Referenz-Schalleistung auf. Dieser Referenzwert bezieht sich auf eine Geschwindigkeit von 100 km/h bei einem Schwellengleis mit durchschnittlichem Fahrflächenzustand und kann an die effektiv vorliegenden Werte der Anzahl an Schallquellen (Achsen), der Fahrgeschwindigkeit, der Schienen- und Radflächenrauheit, sowie weiteren Korrekturgrößen angepasst werden.

Abbildung 3-3 zeigt die Pegelkorrekturen für Fahrbahnarten von Tabelle 7 aus [42]. Die Richtlinie gibt eine Pegelerhöhung von 7 dB bei 500 Hz Mittenfrequenz und 3 dB bei 1000 Hz Mittenfrequenz durch die erhöhte Schienenabstrahlung der Festen Fahrbahn an. Die Reflexion an der Fahrbahn bei einer Festen Fahrbahn ohne Schallminderungstechnik wird mit einer weiteren Erhöhung um 1 dB angegeben, wohingegen bei einer Festen Fahrbahn mit Absorber der Schallpegel bei einigen Frequenzen reduziert wird. Aus der Richtlinie geht nicht hervor, wie die Pegelkorrekturen ermittelt wurden. Es muss davon ausgegangen werden, dass es sich um empirische Werte handelt, die auf Messungen der DB-Systemtechnik basieren.

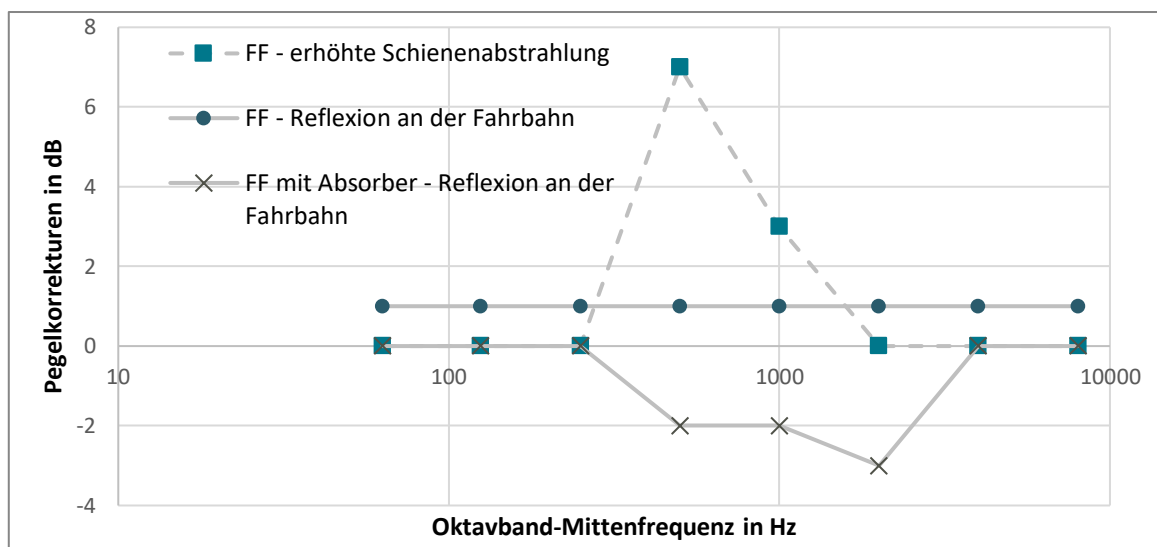


Abbildung 3-3: Pegelkorrekturen nach Richtlinie Schall 03 – entnommen aus [42]

3.4 Rechercheergebnisse bezüglich der Massnahmen zur Lärminderung

Nachfolgend werden einige mögliche Massnahmen zur Reduktion der Schallemissionen genannt. Die aufgeführten Informationen stammen aus bereits bekannten Veröffentlichungen aus Abschnitt

3.2 und werden durch weitere Veröffentlichungen ergänzt, die unabhängig von der Festen Fahrbahn allgemein mögliche Verbesserungspotentiale aufzeigen.

Aus den verschiedenen Quellen lässt sich ableiten, dass ein wesentlicher Einfluss auf die Luftschallabstrahlung der Festen Fahrbahn die Steifigkeit der Schienenunterlage ist. Gemäss THEYSSEN (vgl. [11],[12],[13]) kann durch eine höhere Steifigkeit (700 kN/mm statt 100 kN/mm) eine bessere Abklingrate der Schiene hervorgerufen werden. Durch geeignete Anpassung der verbleibenden Systemparameter kann die Körperschallabstrahlung auf einem ähnlichen Niveau gehalten werden. OUAJKA et. al [15] stützen diese Aussage, wonach zusätzlich die Steifigkeiten der Gleisanlage optimal auf den erwarteten Verkehr angepasst werden sollten. STEENBERGEN et. al untersuchen in [14] die Schwingungseigenschaften der Festen Fahrbahn mittels eines stark abstrahierten mechanischen Modells, welches nicht direkt einer bestimmten Bauform zuzuordnen ist. STEENBERGEN et. al kommen ebenfalls zu dem Schluss, dass eine erhöhte Steifigkeit bei hohen Frequenzen zu einer reduzierten Luftschallabstrahlung führt.

In [25] wird weiterhin erwähnt, dass die Vermeidung von Metall-Metall Kontakt (bspw. zwischen Schiene und Spannelement) im Fahrbahnsystem zu einer Geräuschreduktion von bis zu 10 dB(A) führt. Diese Aussage basiert auf einem Bericht der EU-Kommission aus dem Jahr 2001 [30].

Eine weitere Studie zum Reduktionspotential von Luftschallemissionen der Festen Fahrbahn liefert [31]. Hier wird ein 1:5 Skalenmodell einer Festen Fahrbahn in einem Labor aufgebaut und untersucht. Eingangs wird erwähnt, dass Schienendämpfer ein geeignetes Mittel zur Lärmreduktion der Festen Fahrbahn darstellen dürften, da diese bei Oberbauten mit niedriger Abklingrate der Schiene in vergleichsweise hohem Masse effektiv sind. Ergebnis der Studie ist, dass der Verbau von seitlichen Schallbarrieren mit einer Höhe von 0.55 m bis über die Schienenoberkante zu einer Reduktion von 2 dB bis etwa 5 dB führt. Durch zusätzlichen Verbau von schallabsorbierenden Matten auf die Betondecken kann eine Reduktion von 8.2 dB erzielt werden. Diese Ergebnisse wurden anhand der Versuche mit dem Skalenmodell im Akustiklabor abgeleitet. Ein weiterer relevanter Hinweis aus [31] ist, dass die Anwesenheit des Fahrzeugs einen nicht unerheblichen Einfluss auf die Wirksamkeit der Schallschutzmassnahmen hat. Laut den Ausführungen in [31] wird die Schallreflektion des Fahrzeugs in der Literatur bei modell-basierten Untersuchungen nicht berücksichtigt.

In [32] wird u. a. der Einbau von Schienendämpfern in das Feste Fahrbahn System Rheda mit Fahrzeuggeschwindigkeiten von 60 km/h im Metro Netz der Stadt Athen in Griechenland untersucht. Ergebnis dieser Studie ist, dass der Einbau von Schienendämpfern eine Reduktion von 1,5 dB, der Einbau von absorbierenden Panelen auf der Betondecke eine Reduktion von 2 dB und der Einbau von Schallbarrieren eine Reduktion von 6,6 dB im Abstand 7.5 m vom Gleis bringt. Diese drei Verbesserungsmöglichkeiten wurden vorab per Simulation in ihrem Potential untersucht und schliesslich im realen Gleis verbaut und gemessen. In [25] wird weiterhin auf eine nicht zugängliche Studie der Deutschen Bahn (DB) und der französischen Bahn (SNCF) verwiesen, laut der durch Einsatz von Schienendämpfern eine Luftschallminderung von bis zu 6 dB(A) und eine Vibrationsminderung von bis zu 9 dB an einem Schotteroberbau erzielt werden konnte. Eine Luftschallreduktion von bis zu 4 dB(A) durch Einbau von Schienendämpfern bei Fester Fahrbahn wird in [39] genannt, wobei die Messungen hier innerhalb des Fahrzeugs bei Durchfahrt und nicht ausserhalb am Gleis erhoben wurden. Die Testfahrten wurden zudem in einem Tunnelabschnitt mit Fester Fahrbahn mit und ohne Schienendämpfern verglichen. Ein interessanter Nebeneffekt durch Verbau der Schienendämpfer ist laut [39] eine deutlich reduzierte Riffelbildung auf der Schiene, wodurch die Schallemissionen reduziert werden. Den Gesamtbeitrag durch den Verbau von Schienendämpfern schätzen die Autoren auf 6 dB(A).

In [33] wird weiterhin der Verbau neuartiger poröser Betondecken im chinesischen Hochgeschwindigkeitsnetz untersucht. Die genaue Materialzusammensetzung wurde vorab unter Beachtung der mechanischen Anforderungen bestimmt und es wurden schliesslich Teststrecken

mit den neuartigen Betondecken gebaut und vermessen. Ergebnis der Studie ist, dass bei 80 km/h eine Geräuschreduktion von 2.5 dB und bei 200 km/h eine Reduktion von 4 dB erzielt werden kann.

Railone versucht den Körperschall und die Erschütterungen durch eine zusätzliche Elastizität zwischen Beton-Fahrbahnplatte und Untergrund zu isolieren [5][6]. Dieses Masse-Feder-System kann durch Variation der Masse oder Steifigkeit an unterschiedliche Anforderungen angepasst werden und kommt beispielsweise als schweres Masse-Feder-System bei der Flughafenverbindung Köln-Bonn und als leichtes Feder-Masse-System bei der S-Bahn Unterföhrung zum Einsatz. Abbildung 3-4 zeigt schematisch das Feder-Masse-System der „RHEDA 2000“ von Railone zur Reduktion von Schwingungen.

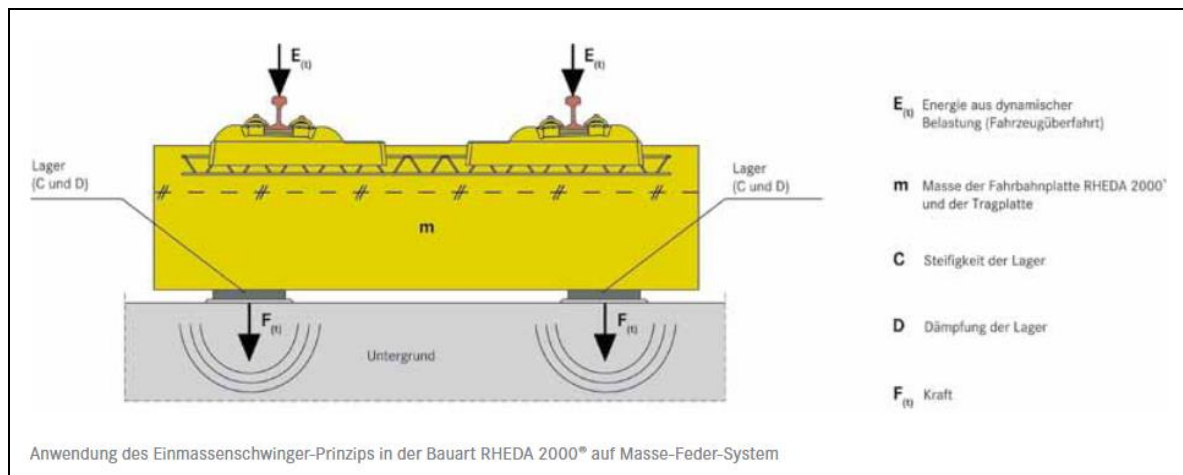


Abbildung 3-4: Feder-Masse-System von Railone [6], S.12

LUTZENBERGER et. al führt zwei wichtigen Charakteristika an, welche Schienenbefestigung der Festen Fahrbahn von der des Schotteroberbaus unterscheiden [43]:

- Die Dämpfung der elastischen Zwischenlagen, die bei der Festen Fahrbahn an die Stelle des Schotters mit einem Verlustfaktor von η ca. 1 bis 2 treten, ist mit η ca. 0,1 bis 0,2 sehr gering.
- Die Masse der Grundplatten, die an die Stelle der Schwellen mit einer Masse von ca. 200 kg bis 300 kg treten, ist mit ca. 6 kg bis 10 kg vergleichsweise nur sehr gering. Weiterhin wirkt die durch den Schotter bedämpfte Schwelle im Bereich ihrer Resonanzfrequenzen als Körperschallabsorber für die Schiene

LUTZENBERGER et. al sieht es als gesichert an, dass die Rad-Schiene-Resonanz, die in Abhängigkeit der vorliegenden Steifigkeit und Masse des Feste Fahrbahn-Systems zwischen 300 und 800 Hz liegt, bezüglich Höhe und Frequenzlage wesentlich durch Dämpfung und Steife der Zwischenlagen der Schienenbefestigung auf Fester Fahrbahn beeinflusst wird.

Messungen auf der Schnellfahrstrecke Hannover-Berlin zeigen eine mittlere Wirkung der eingesetzten absorbierenden Bauelemente von 3 dB(A). Abbildung 3-5 zeigt die Wirkung von Schallabsorbern auf einer Festen Fahrbahn der Bauart Züblin (siehe Abbildung 2-3) bei der Vorbeifahrt eines ICE 1-Zuges mit einer Geschwindigkeit von 250 km/h [43].

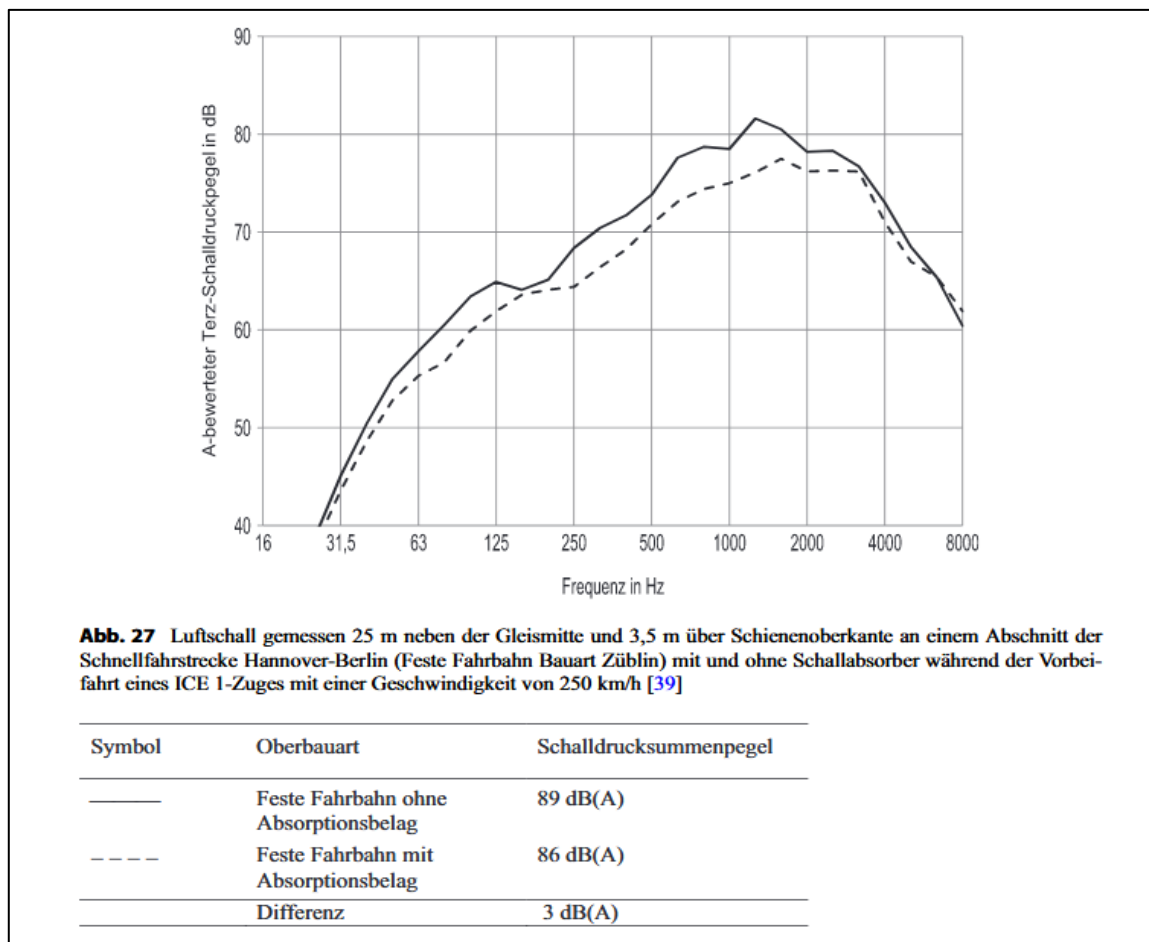


Abbildung 3-5: Einfluss eines Absorptionsbelags bei Fester Fahrbahn auf den Schalldruckpegel in Abhängigkeit der Frequenz [43]

Im Buch Feste Fahrbahn werden akustische Optimierungsversuche aus dem Jahr 1994 durch Kombination folgender drei Wirkungsmechanismen beschrieben [41]:

- Absorption des nach unten abstrahlenden Rollgeräusches
- Behinderung und Abschirmung der Schallabstrahlung der Schienen
- Seitlich angeordnete Wände

Die Vergleichsmessungen zeigen, dass die Feste Fahrbahn vom Typ Züblin mit minimalen Schallmassnahmen einen vergleichbaren Schallemissionswert wie Betonschwellengleis im Schotterbett erreichen. Die elastische Lagerung der Schienen bei der Feste Fahrbahn stellt eine wirksame Massnahme zur Minderung des Körperschalls und der Erschütterung dar. Sie bedingt jedoch gleichzeitig eine höhere Luftschallabstrahlung des Rad-Schiene-Systems gegenüber dem konventionellen Schotteroberbau, die durch entsprechende schallabsorbierende Massnahmen kompensiert werden muss. Als bisher wirksamste Lösungen haben sich schallabsorbierende Beläge aus Blähtongranulat oder Holzbeton erwiesen. Das schallabsorbierende Material muss resistent gegen materielle, thermische, mechanische und klimatische Einflüsse sein.

3.5 Zusammenfassung der Literaturstudie

Im folgenden Abschnitt sollen die zentralen Aussagen der gesichteten Literaturquellen im Zusammenhang von Lärm und Fester Fahrbahn zusammengefasst werden.

Lärmzunahme durch Feste Fahrbahn gegenüber Schotteroberbau

In den gesichteten Literaturquellen reicht die Spannweite der ausgewiesenen Lärmzunahme der Festen Fahrbahn (FF) gegenüber dem Schotteroberbau von 1,5 dB bis über 10 dB. Die Mehrheit der Publikationen nennt eine Lärmzunahme von 2 dB(A) bis 5 dB(A). Diese grosse Spannweite hat verschiedene Gründe. Einerseits haben die untersuchten Randbedingungen wie Rad- und Schienenrauheiten, Fahrgeschwindigkeiten, sowie Typ des Fahrzeugs und der Festen Fahrbahn einen erheblichen Einfluss, andererseits kann die Auswertemethodik (Messung oder Rechnung) zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Für Durchführung von Vergleichsmessungen stellen konstante Randbedingungen (z.B. Rad- und Schienenrauheiten) und minimale Messunsicherheit und Messfehler eine grosse Herausforderung dar.

Tabelle 3-1 fasst die in den Literaturquellen genannten Zahlenwerte zusammen.

Autor	Referenz	Lärmzunahme durch FF	Kommentar
Hafner	29	2 dB(A)	Vergleich Messung mit Modellierung
van Lier	20	1,5 dB(A) bis 3 dB(A)	Berechnung mit validiertem Modell
Matias, Ferreira	28	2 dB(A) bis 4 dB(A)	Empirischer Wert
Lutzenberger	43	bis 12 dB	bei hoher Geschwindigkeit
Münchschwander	41	4 dB(A)	Messung
Poisson	19, 21	3 dB	Messung und Rechnung
Zhang, Thompson	37	1,5 dB(A) bis 5 dB(A)	Berechnung
Gautier	18	3 dB	Empirischer Wert
Nelson	23	4 dB(A) bis 5 dB(A)	Empirischer Wert
Ahac, Lakusic	25	3 dB(A) bis 5 dB(A)	Empirischer Wert
Heutschi	26	2,3 dB	Berechnung
Schall 03	42	bis zu 7 dB	Datenherkunft unklar
Siegmann	40	Bis 5 dB(A)	Empirischer Wert

Tabelle 3-1: Lärmzunahme durch Feste Fahrbahn (FF) gegenüber Schotteroberbau – Angaben aus Literaturquellen

Lärmabnahme der Festen Fahrbahn durch Minderungsmassnahmen

Tabelle 3-2 fasst die in den Literaturquellen genannten Zahlenwerte einer möglichen Lärmabnahme durch Minderungsmassnahmen bei Fester Fahrbahn zusammen.

Autor	Referenz	Lärmabnahme	Massnahme
Theysen	13	5 dB(A) bis 10 dB(A)	härtere Zwischenlage
van Lier	20	4 dB(A) bis 6 dB(A)	Optimierung der Bauform
Matias	28	bis zu 6 dB	Absorber und Radschürze
Münchschwander	41	2 dB(A) bis 6 dB(A)	Kombination mehrere Massnahmen
Schall 03	42	bis zu 3 dB	Absorber
Ahac, Lakusic	25	bis 10 dB(A)	kein Metall-Metall-Kontakt
Zhang, Thompson	31	2 dB bis 5 dB	Schallbarriere mit $h = 0,55$ m
Vogiatzis, Vanhonacker	32	2 dB bis 6,6 dB	Absorbierende Panelen
Ho, Wong	39	bis 6 dB	Schienendämpfer
Siegmann	40	2,06 dB(A)	Optimiere Zwischenlage
Siegmann	40	5 dB(A)	Absorptionsbelag
Hafner	29	2 dB(A)	härtere Zwischenlage

Tabelle 3-2: Lärmabnahme bei Feste Fahrbahn (FF) durch Minderungsmassnahmen – Angaben aus Literaturquellen

Die Einheit der ausgewiesenen Differenzen in Tabelle 3-1 und Tabelle 3-2 wird in den Quellenangaben sowohl in «dB» als auch in «dB(A)» angegeben. Es ist anzunehmen, dass die Differenzen selbst nicht A-gewichtet sind, jedoch die Pegelsignale, aus denen die Differenzen gebildet werden, A-gewichtet sind.

Durch Minderungsmaßnahmen bei Fester Fahrbahn können gemäss den Literaturquellen Schallpegel erreicht werden, die unterhalb des Systems Schotteroberbau ohne bzw. mit geringen Lärmschutzmassnahmen liegen. Die Angaben von Pegelreduktionen grösser als 6 dB(A) sind aus physikalischer Perspektive zu hinterfragen und werden als sehr hoch beurteilt.

Autoren der gesichteten Literatur

Auf Basis der Recherche konnten folgende Autoren identifiziert werden, die interessante Veröffentlichungen beigetragen haben oder grundlegende, oft zitierte Studien veröffentlicht haben (grob sortiert mit absteigender Relevanz):

- David Thompson (Universität Southampton)
- Jannik Theysen (Chalmers Universität Gothenburg)
- S. van Lier (Niederländische Staatsbahn)
- Franck Poisson (SNCF, Staatliche Eisenbahn Frankreich)
- Pierre-Etienne Gautier (SYSTRA)
- H.W. Jansen (Netherlands Organisation for Applied Scientific Research (TNO) Technical Sciences, Niederlande)
- A. Buchmann (Universität Karlsruhe)
- S. Lutzenberger (TU München, Geschäftsführer Müller-BBM)

4 Einordnung der Ergebnisse

4.1 Expertenaustausch

Im folgenden Abschnitt werden die konsultierten Experten und deren Kommentare zum Thema Lärm durch Feste Fahrbahn aufgeführt:

- Michael Hafner – SBB
 - Es überrascht nicht, dass die Lärmemissionen verschiedener FF-Typen in der Literatur sehr unterschiedlich berechnet und gemessen werden. Bei Typen, welche nur ein elastisches Element zwischen Schiene und Betonplatte aufweisen, dürfte der Effekt deutlich grösser sein, als bei Systemen (wie LVT) wo zusätzlich eine Elastizität zwischen Schwellenblock und Betonplatte vorhanden ist. Auch LVT Systeme können sich untereinander akustisch unterscheiden, da die Steifigkeit und Dämpfung der verwendeten Layer nicht fix gegeben sind. Das System lässt sich «tunen». Wie bei einer Betonschwelle im Schotteroberbau können auch auf FF verschiedene Zwischenlagen verschiedene Emissionen verursachen.
 - Die SBB wendet LVT in der Regel nur in Tunneln an, um Unterhalt zu optimieren und günstige Lebenszykluskosten zu erzielen. Sehr vereinzelt kann das Weiterführen des LVT-Oberbaus auf einem anschliessenden Kunstbauwerk mit starrem Unterbau (zB Rampenbauwerk) zu einem Verzicht eines zusätzlichen Oberbauwechsels mit einem für den Unterhalt unerwünschten Wechsel der Gleissteifigkeit führen. Als Standardoberbau auf der offenen Strecke wird der Weg über einen Schotteroberbau mit Schwellenbesohlung durch die SBB präferiert, da die Bedingung eines setzungsfreien Unterbaus für FF selten und nur mit viel Aufwand realisierbar ist.
 - Für das Oberbau-Design ist vor allem auch der darüber abgewickelte Verkehr relevant. Eine Hochgeschwindigkeitsstrecke für Reisezüge weist nicht dieselben Anforderungen aus wie ein Mischverkehr zwischen 80 und 200 km/h. Letzteres erfordert grössere Kompromisse.
 - Eine negative Entwicklung der Schienenrauheit bei LVT können wir nicht beobachten. Das erscheint uns kein prioritäres Untersuchungsthema auf dem SBB-Netz.
 - Die FF im Flughafen ZH ist eine spezielle Version mit einstufiger Elastizität (nur in der Schienenzwischenlage) und nicht repräsentativ für das Netz der SBB. Akustisch ungünstige Zustände wie im Flughafenbahnhof Zürich auf FF sind primär der Trassierung und nicht der Oberbauform geschuldet und treten in anderen Bahnhöfen in Bogenlage mit Schotteroberbau ebenfalls auf (Bern, Zürich Stadelhofen, Zug, etc.). In Bahnhöfen sollen wegen dem Ein- und Ausstieg die Wagen horizontal stehen, was die ideale Überhöhung der Schiene im Bogen verhindert.
- Dr. Christian Czolbe – TÜV SÜD Schweiz
 - Feste Fahrbahn in Asien stark verbreitet (Südkorea; China und Japan)
 - Aussagen zum Luftschall, welche über die Beschleunigungen der Schiene getätigt werden, sind physikalisch vertretbar, wenn eine Lärm-Referenzmessung nach Norm vorliegt

- Ingmar Stoehr – Vigier Rail AG
 - Marktanteil von Sonnevile/LVT in der Schweiz oberhalb 80 %
 - Bedürfnis an leiser Fester Fahrbahn ist gering, da diese bislang fast ausschliesslich in Tunneln verbaut werden
 - Lärm motivation ist erfahrungsgemäss eine politische Entscheidung
 - Aktuelle Studie der Universität Stockholm [11], [12] und [13] zur Lärminderung, Versuch von härteren Zwischenlagen (800 kN/mm statt 100 kN/mm)
 - Bislang keine hochdämpfenden Zwischenlagen in LVT-Systemen verbaut, dies stellt einen interessanten Optimierungspunkt dar.
- Stefan Bühler – PROSE AG
 - Die Hauptursachen der hohen Luftschallpegel von FF gegenüber Schotteroberbau sind plausibel und in der Literatur weitgehend übereinstimmend identifiziert (weiche Anbindung der Schiene führt zu frei schwingender Schiene und stärkerer Luftschallabstrahlung der Schiene. Die Reflexion der Betonflächen verstärken den Luftschall weiter bzw. die Absorption durch Schotter fehlt).
 - Die Pegelangaben bei Schallreduktionsmassnahmen scheinen teilweise sehr gross und wirken eher unglaubwürdig
 - Erstaunlicherweise finden sich wenig Aussagen zum Rauheitswachstum auf der Lauffläche der Schiene - möglicherweise ist dies anders als beim Schotteroberbau. Die sich einstellende Summenrauheit ist allenfalls in Messungen schon berücksichtigt worden. Nur weiss man meist bei den Untersuchungen nicht, wie lange die Schienen schon liegen und ob bzw. wie häufig allenfalls Pflegemassnahmen (Schienenschleifen) durchgeführt werden.
 - Bei horizontal liegenden Absorptionsmassnahmen ist zu befürchten, dass deren Wirkung durch Verschmutzung mit der Zeit nachlässt bzw. eliminiert wird.
 - Für weitere Untersuchungen wird v.a. das Thema Rauheitswachstum auf FF sowie optimale Dämpfung der Schiene (mit hochdämpfender Zwischenlage oder mit steifer Zwischenlage und unter weicher Bettung unter den Schienenfüssen)

4.2 Vor- und Nachteile der Festen Fahrbahn

In der untersuchten Literaturquellen werden folgende Vor- und Nachteile der Festen Fahrbahn erwähnt:

Vorteile:

- Weitgehende Wartungsfreiheit [41]
- Reduktion der Instandhaltungskosten [41]
- Kein Schotterflug bei hohen Geschwindigkeiten [41]
- Uneingeschränkter Einsatz der Wirbelstrombremse [41]
- Besserer Komfort im Fahrzeug, insbesondere bei hoher Geschwindigkeit [14]
- Keine Gefahr von Einknicken der Schiene unter Wärmeeinwirkung [14]
- Möglichkeit engere Trassierungen zu planen [40]
- Vegetationskontrolle vermutlich einfacher als beim Schottergleis

Nachteile:

- Hohe Investitionskosten [41]
- Schlechte Luftschalleigenschaften (ca. 3 bis 5 dB(A) höherer Luftschallpegel [15])
- Risiko von Lageänderungen durch schwer mögliche Korrektur
- Längere Ausfallzeiten der Strecke bei Schäden [40]
- Hohes Gewicht
- hoher Instandhaltungsaufwand durch Entgleisungsschäden [41]
- Notwendigkeit von geeignetem Wasser-Abflusssystem

4.3 Offene Fragen und identifizierte Informationslücken

Im folgenden Abschnitt werden noch offene Fragen notiert, die im Zuge der Literaturrecherche entstanden sind.

- Welchen Einfluss hat die Temperatur und die Liegedauer auf (elastischen) Eigenschaften der Festen Fahrbahn?
- Wie verändert sich die Schienenrauheit einer Festen Fahrbahn gegenüber einem Schotteroberbau?
- Wie gross ist der Einfluss von hochdämpfenden Zwischenlagen?
- Besser die Zwischenlagen oder ein Set (harte Zwischenlagen und weiche Lagerung der Betonfüsse) optimieren (wirtschaftlich - technisch)?

4.4 Empfehlung weiteres Vorgehen

Das Potential einer hochdämpfenden Zwischenlage als Lärm-Optimierungsmaßnahme für die Feste Fahrbahn sollte untersucht werden. Hierzu wären Vergleichsmessungen interessant, um die Lärmreduktion der hochdämpfenden Zwischenlage gegenüber den bislang verwendeten Zwischenlagen bei Fester Fahrbahn zu testen. Dies könnte im Rahmen einer Erweiterung der bereits durchgeführten Untersuchung vor dem Axentunnel [29] erfolgen.

Der in der Schweiz am meisten verwendete Typ «LVT» scheint durch seinen Aufbau geeignet, um die Anforderung zwischen einer niedrigen Steifigkeit und Dämpfung im untern Frequenzbereich und einer hohen Steifigkeit und Dämpfung im oberen Frequenzbereich gerecht zu werden. Durch eine weiche Gummieinlage zwischen Betonfuss und Betondecke kann die Übertragung von Körperschall reduziert werden, wohingegen durch eine harte, hochdämpfende Zwischenlage zwischen Schiene und Betonfuss der Luftschall reduziert werden kann. Hierzu wären theoretische Untersuchungen notwendig, die durch Messungen validiert werden müssten. Herr Stoehr von der Firma Vigier Rail zeigt sich hierfür offen.

Zur Optimierung der «LVT» wird eine Kontaktaufnahme mit Theysson und Pieringer ([11], [12], [13]) empfohlen, die sich bereits mit der Anpassung der Elastizitäten der Zwischenlage und des Gummifusses zur Reduktion des Lärms befasst haben.

5 Fazit

In der Literaturrecherche wurden zahlreiche Literaturquellen identifiziert, die sich mit dem Thema Lärm durch Feste Fahrbahn auseinandersetzen. Allerdings werden oftmals keine Angaben bezüglich der vorliegenden oder verwendeten Randbedingungen getätigt, weshalb eine Einordnung der Ergebnisse hinsichtlich der Lärmzunahme oder Lärmreduktion durch Schutzmassnahmen nur bedingt möglich ist. Stellenweise ist zudem nicht bekannt, in welchem Frequenzbereich der Schallpegel zu- bzw. abnimmt. Dies ist insofern wichtig, da der Mensch Schallpegeländerungen bei verschiedenen Frequenzen unterschiedlich laut wahrnimmt (vgl. A-gewichteter Pegel).

Insgesamt weist eine Vielzahl der untersuchten Literaturquellen eine Lärmzunahme der Festen Fahrbahn von 2 dB(A) bis 5 dB(A) aus. In Anbetracht der vorliegenden Messunsicherheiten (z.B. 0,44 dB in [29]) und dem Einfluss der variierenden Randbedingungen scheint die Spannweite und die Lärmzunahme plausibel. Diese ermittelten Ergebnisse beruhen in diesem Kontext sowohl auf praktischen Vergleichsmessungen und theoretischen Berechnungen, die quantitativ in einer ähnlichen Grössenordnung liegen.

Grundsätzlich liegt der relevante Frequenzbereich zwischen 16 Hz und 8 kHz, wobei zwischen Körperschall im unteren Frequenzbereich und Luftschall im oberen Frequenzbereich unterschieden werden kann. Dies führt zur generellen Anforderung an die Feste Fahrbahn im unteren Frequenzbereich eine möglichst niedrige Steifigkeit aufzuweisen, um gute Isolationseigenschaften hinsichtlich Vibrationen und Erschütterungen zu erreichen und gleichzeitig eine hohe Steifigkeit bzw. Dämpfung im oberen Frequenzbereich zu realisieren, welche die Schwingung der Schiene dämpft.

Um der beschriebenen Anforderung einer frequenzabhängigen Steifigkeit gerecht zu werden eignen sich prinzipiell Zwei-Massen-Schwinger-Systeme, die speziell abgestimmt werden müssen. Entsprechende Bauformen der Festen Fahrbahn sind die «floating slab track» (siehe Abbildung 2-4) und die in der Schweiz verbaute «Low Vibration Track» von Sonnevile. Bei der «LVT» stellen die Schiene und der Betonfuss die beiden Massen dar. Die Elastizitäten werden durch die Zwischenlage zwischen Schiene und Betonfuss und den Gummifuss zwischen Betonfuss und Betondecke abgebildet (siehe Abbildung 3-1).

6 Quellenverzeichnis

- [1] *LVT Reference List, Sonneville (November 2022), aufgerufen am 09.11.2022;*
https://www.sonneville.com/sites/default/files/2022-11/Global%20LVT%20Reference%20List_November%202022.pdf
- [2] *BLS, Medienmitteilung 01.11.2021; aufgerufen am 09.11.2022;*
<https://www.bls.ch/de/unternehmen/medien/medienmitteilungen/2021/11-01-mm-sanierung-1st>
- [3] *Low Vibration Track, Sonneville, aufgerufen am 10.11.2022;* <https://www.sonneville.com/low-vibration-track-lvt>
- [4] *TrackPedia – Die Gleisbau-Welt-Enzyklopädie, aufgerufen am 10.11.2022,*
<https://www.trackopedia.com/lexikon/infrastruktur/oberbau/feste-fahrbahn>
- [5] *Railone, aufgerufen am 11.11.2022;* <https://www.railone.de/produkte-loesungen/fern-queterverkehr/feste-fahrbahn>
- [6] *Railone, RHEDA 2000, aufgerufen am 11.11.2022;* https://www.railone.de/fileadmin/daten/05-presse-medien/downloads/broschueren/de/Rheda2000_D_2011_ebook.pdf
- [7] *Railone, GETRAC, aufgerufen am 11.11.2022;* <https://www.railone.de/fileadmin/daten/05-presse-medien/downloads/broschueren/de/GETRAC.pdf>
- [8] *EN 16432 -1:2015; Bahnanwendungen - Feste Fahrbahn-Systeme - Teil 1: Allgemeine Anforderungen, Europäisches Komitee für Normung, März 2015*
- [9] *EN 16432 -2:2015; Bahnanwendungen - Feste Fahrbahn-Systeme - Teil 2: Teilsysteme und Komponenten, Europäisches Komitee für Normung, März 2015*
- [10] *EN 13481 -5:2002; Bahnanwendungen - Oberbau - Leistungsanforderungen für Schienenbefestigungssysteme - Teil 5: Befestigungssysteme für feste Fahrbahn mit aufgesetzten oder in Kanälen eingebetteten Schienen, Europäisches Komitee für Normung, Juni 2011*
- [11] *J. THEYSSEN, A. PIERINGER, W. KROPP: Noise and vibration mitigation on low-vibration track, Applied Acoustics (Institut), Chalmers University of Technology, Gothenburg, Schweden präsentiert bei 21st Nordic Seminar on Railway Technology, 06.2022, abzurufen unter:*
<https://events.tuni.fi/uploads/2022/05/d146d213-nrs-2022-abstracts-20220527.pdf>
zuletzt: 24.11.2022
- [12] *J. THEYSSEN, A. PIERINGER, W. KROPP: The low-noise potential of low-vibration track, Applied Acoustics (Institut), Chalmers University of Technology, Gothenburg, Schweden präsentiert bei DAGA 2021 (Jahrestagung für Akustik), Wien, 08.2021, abzurufen unter:*
https://research.chalmers.se/publication/525560/file/525560_Fulltext.pdf
zuletzt: 24.11.2022
- [13] *J. THEYSSEN: Simulating rolling noise on ballasted and slab tracks: vibration, radiation, and pass-by signals, Dissertation, Applied Acoustics (Institut), Chalmers University of Technology, Gothenburg, Schweden, 2022, ISBN: 978-91-7905-756-5*
- [14] *M.J.M.M. STEENBERGEN, A.V. METRIKINE, C. ESVELD: Assessment of design parameters of a slab track railway system from a dynamic viewpoint, Journal of Sound and Vibration, Volume 306, Issues 1–2, 2007, Seite 361-371, ISSN 0022-460X, abzurufen unter:*
<https://doi.org/10.1016/j.jsv.2007.05.034>
- [15] *S. OUAKKA, O. VERLINDEN, G. KOUROUSSIS: Railway ground vibration and mitigation measures: benchmarking of best practices, Rail. Eng. Science 30, Volume 1–22 (2022), abzurufen unter:*
<https://doi.org/10.1007/s40534-021-00264-9>

- [16] P.M. FERNÁNDEZ, I.V. SANCHÍS, F.B. ROJAS, R. I. FRANCO: *Monitoring and analysis of vibration transmission for various track typologies. A case study* *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Volume 24, 2013, Seite 98-109, ISSN 1361-9209, abzurufen unter:
<https://doi.org/10.1016/j.trd.2013.05.003>
- [17] O. OYARZABAL, N. CORREA, E. G. VADILLO, J. SANTAMARÍA & J. GÓMEZ: *Modelling rail corrugation with specific-track parameters focusing on ballasted track and slab track*, *Vehicle System Dynamics*, 2011, Volume 49:11, Seite 1733-1748, abzurufen unter:
<http://dx.doi.org/10.1080/00423114.2010.536557>
- [18] P.-E. GAUTIER: *Slab track: Review of existing systems and optimization potentials including very high speed*,
erschienen in: *Construction and Building Materials*, Volume 92, 2015, Seite 9-15, ISSN 0950-0618,
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.102>
- [19] F. POISSON: *Noise reduction of high speed train running onto slab track and ballasted track*,
präsentiert auf 8th World congress on High Speed, Philadelphia, 2012
- [20] S. VAN LIER: *THE VIBRO-ACOUSTIC MODELLING OF SLAB TRACK WITH EMBEDDED RAILS*
erschienen in: *Journal of Sound and Vibration*, Volume 231, Issue 3, 2000, Seite 805-817, ISSN 0022-460X, abzurufen unter:
<https://doi.org/10.1006/jsvi.1999.2564>
- [21] F. POISSON: *Railway Noise generated by High-Speed-Trains*
erschienen in: J.C.O. Nielsen et al. (eds.), *Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design Volume 126*, abzurufen unter:
https://doi.org/10.1007/978-3-662-44832-8_55
Seite 467 ff.
- [22] A. BUCHMANN: *Feste Fahrbahn und Lärm – Gibt es hier Lösungen?*
Präsentation, Technische Hochschule Karlsruhe, Institut für Strassen- und Eisenbahnwesen (ISE),
Datum unbekannt, abzurufen unter:
https://www.dlr.de/ts/Portaldata/16/Resources/dokumente/vk/Vortrag_Buchmann_051006.pdf
- [23] J.T. NELSON, R.E. SKINNER et. al: *Transportation Research Board: Wheel/Rail Noise – Control Manual*
erschienen in: *TCRP Report 23, Transit Cooperative Research Program*, 1997, ISBN: 0-309-06060-5
abzurufen unter:
https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/tcrp/tcrp_rpt_23.pdf
- [24] H.W. JANSEN, M.G. DITTRICH: *Separation of Rolling Noise and Aerodynamic Noise by In-Service Measurement of Combined Roughness and Transfer Functions on a High Speed Slab*,
erschienen in: *Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design Volume 118*, 2010, ISBN: 978-4-431-53927-8,
abzurufen unter:
https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-4-431-53927-8_57
- [25] M. AHAC, S. LAKUSIC: *Rail traffic noise and vibration mitigation measures in urban areas*
erschienen in: *Tehnicki Vjesnik-Technical Gazette*, Volume 19, Seite 427-435, Juni 2012,
ISSN: 1330-3651, abzurufen unter:
https://www.researchgate.net/publication/260368553_Rail_traffic_noise_and_vibration_mitigation_measures_in_urban_areas
- [26] K. HEUTSCHI et. al: *Schotteroberbau und Feste Fahrbahn, Grundsatzuntersuchungen zur Schallausbreitung bei quellennahen Immissionsmessungen*, erschienen in: *ZEV Rail*, 2010, Jahrgang 134, Ausgabe 5; abzurufen unter:

<https://www.zevrail.de/artikel/schotteroberbau-und-feste-fahrbahn-grundsatzuntersuchungen-zur-schallausbreitung-bei>

- [27] CEN: Technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems «Fahrzeug – Lärm» EU-Verordnung Nr. 1304/2014, 11.2014
- [28] S.R. MATIAS & P. A. FERREIRA: Railway slab track systems: review and research potentials erschienen in: *Structure and Infrastructure Engineering*, Volume 16:12, Seite 1635-1653, 2020 abzurufen unter:
<https://doi.org/10.1080/15732479.2020.1719167>
- [29] M. HAFNER: Lärmauswirkungen und Versuch einer Lärmoptimierung eines FF LVT Oberbaus Bericht der Schweizerischen Bundesbahn, 02. Juni 2022, Version 1.0
- [30] EU Commission Directorate – General for Energy and Transport: *A study of European priorities and strategies for railway noise abatement*, Brüssel, 2001
- [31] X. ZHANG, D. THOMPSON et. al: Experimental study of noise mitigation measures on a slab track erschienen in: *Applied Acoustics*, Institute of Sound and Vibration Research, 11.09.2022 abzurufen unter:
<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107630>
- [32] K. VOGIATZIS, P. VANHONACKER: Noise reduction in urban LRT networks by combining track based solutions. *Sci Total Environ* 2016; 568:1344–54., abzurufen unter:
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.05.060>
- [33] C. ZHAO et.al: Reducing Railway Noise with Porous Sound-Absorbing Concrete Slabs erschienen in: *Advances in Materials Science and Engineering*, 11. 2014 abzurufen unter
<https://doi.org/10.1155/2014/206549>
- [34] G. HÖLZL: Fortschritte zur Reduzierung der akustischen Emissionen erschienen in: *Eisenbahn-Technische Rundschau*, 1999, Vol. 48(5), Seite 304-313
- [35] B. HEMSWORTH: Reducing groundborne vibrations: State of the art study erschienen in: *Journal of Sound and Vibrations*, Seite 231, abzurufen unter:
<https://doi.org/10.1006/jsvi.1999.2642>
- [36] D. THOMPSON: *Railway Noise and Vibration – Chapter 13: Ground-borne Noise* Seite 437-464, 2009, abzurufen unter:
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-045147-3.00013-X>
- [37] X. ZHANG, D. THOMPSON: The noise radiated by ballasted and slab tracks, erschienen in: *Applied Acoustics*, Institute of Sound and Vibration, 13.03.2019, abzurufen unter:
<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.03.012>
- [38] D. BENTON: *Engineering Aspects of Rail Damper Design and Installation* erschienen auf: *RAILNOISE 2006*, Pisa. 10.2006
- [39] W. HO, B. WONG, D. ENGLAND: Tuned Mass Damper for Rail Noise Control, erschienen in: *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*, Volume 118, Seite 89-96, abzurufen unter:
[https://www.researchgate.net/publication/225478627 Tuned Mass Damper for Rail Noise Control](https://www.researchgate.net/publication/225478627_Tuned_Mass_Damper_for_Rail_Noise_Control)
- [40] J. SIEGMANN: *Feste Fahrbahn: Weg zu einer wirtschaftlicheren Bahn* Vortrag, Fachgebiet Schienenfahrwege und Bahnbetrieb, TU Berlin, 06.10.2005, abzurufen unter:
https://www.dlr.de/ts/Portaldata/16/Resources/dokumente/vk/Vortrag_Siegmann_051006.pdf

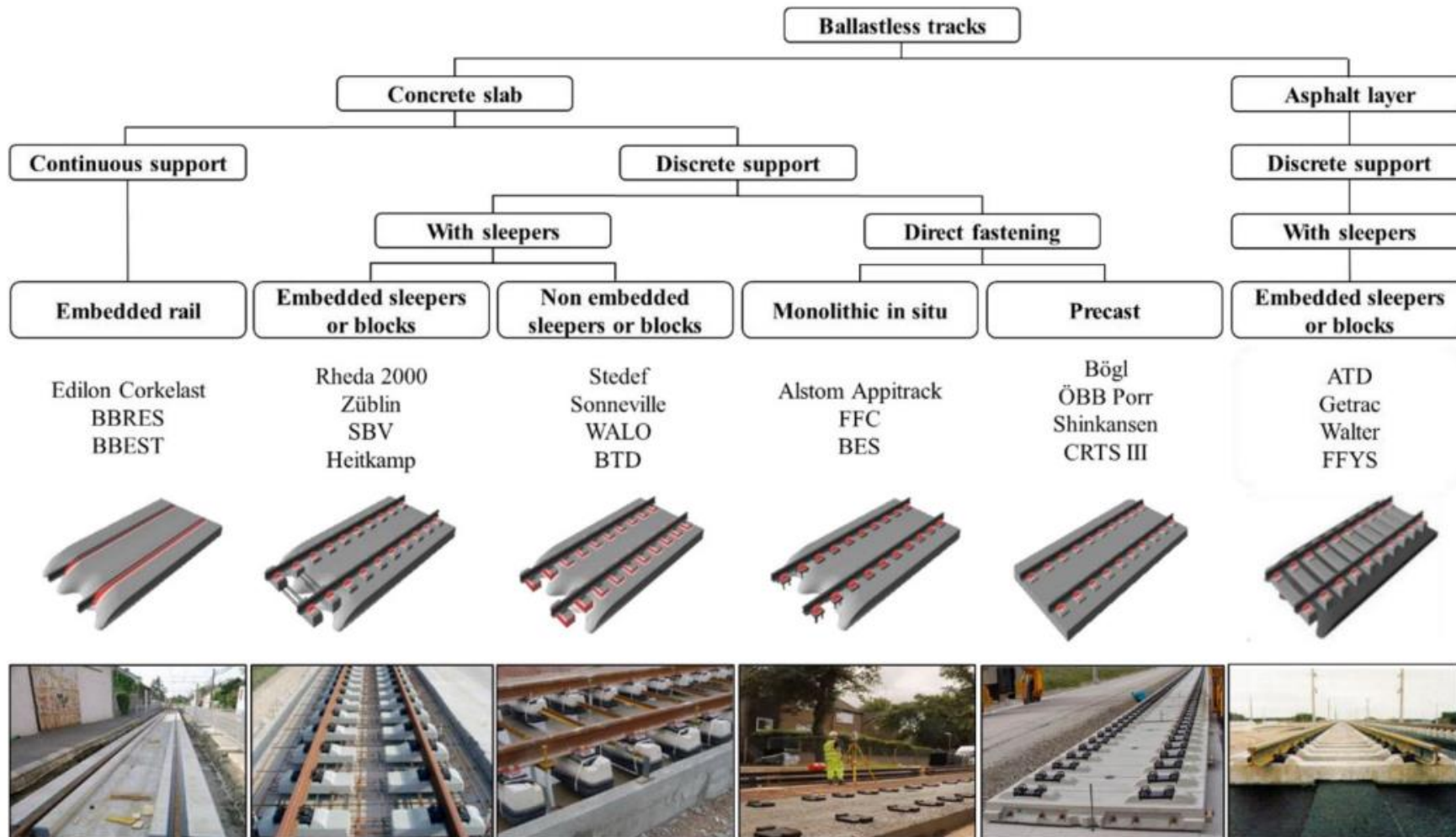
- [41] *P. Münchenschwander: Feste Fahrbahn, Edition ETR – Eisenbahntechnische Rundschau, Sonderveröffentlichung, Sammelbuch, Hestra-Verlag, ISBN 3-7771-0269-5*
- [42] *Sechzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes, Anlage 2 – Berechnung des Beurteilungspegels für Schienenwege (Schall 03), Internetseite: https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_16/anlage_2.html, aufgerufen am 06.12.2022*
- [43] *S. Lutzenberger et. al.: Luftschall aus dem Schienenverkehr, Springer Verlag, 2018, https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-662-43966-1_17-1?pdf=chapter%20toc*

A Übersicht Literaturrecherche

Nr.	Plattform/Journal/Kontext	Relevanz 1: niedrig 5: hoch	Suchbegriff/Quelle	doi/Identifikator	Titel
1	Science Direct/Journal of Sound and Vibration	2	slab track noise	https://doi.org/10.1016/j.isv.2005.08.060	The use of decay rates to analyse the performance of railway track in rolling noise generation
2	Science Direct/Journal of Sound and Vibration	4	slab track noise	https://doi.org/10.1016/j.isv.2007.05.034	Assessment of design parameters of a slab track railway system from a dynamic viewpoint
3	Science Direct/Journal of Sound and Vibration	5	slab track noise	https://doi.org/10.1006/jsvi.1999.2564	THE VIBRO-ACOUSTIC MODELLING OF SLAB TRACK WITH EMBEDDED RAILS
4	Science Direct/Applied Acoustics	4	slab track noise	https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107630	Experimental study of noise mitigation measures on a slab track
5	Science Direct/Journal of Sound and Vibration	2	slab track noise	https://doi.org/10.1016/j.isv.2005.08.065	Research on noise and vibration reduction at DB to improve the environmental friendliness of railway traffic
6	Science Direct/Journal of Sound and Vibration	1	slab track noise	https://doi.org/10.1016/S0022-460X(03)00707-7	Identification, modelling and reduction potential of railway noise sources: a critical survey
7	Science Direct/Journal of Sound and Vibration	2	slab track noise	https://doi.org/10.1016/j.isv.2010.06.016	Fully three-dimensional analysis of high-speed train-track-soil-structure dynamic interaction
8	Science Direct/Transportation Research Part D: Transport and Environment	4	slab track noise	https://doi.org/10.1016/j.trd.2013.05.003	Monitoring and analysis of vibration transmission for various track typologies. A case study
9	Science Direct/Applied Acoustics	4	slab track noise	https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.03.012	The noise radiated by ballasted and slab tracks
10	Masterthesis M. George KTH Stockholm	2	über Referenz	http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2%3A530940/FULLTEXT01.pdf	Slab Track Systems for High-Speed Railways
11	Science Direct/Journal of Sound and Vibration	1	slab track noise	https://doi.org/10.1016/S0022-460X(77)80079-5	Railway noise propagation
12	Science Direct/Construction and Building Materials	4	slab track, ballasted track, comparison	https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.102	Slab track: Review of existing systems and optimization potentials including very high speed
13	Science Direct	1	slab track, ballasted track, comparison	https://doi.org/10.1080/23248378.2022.2099992	Comparison of the dynamic response and environmental impact between traditional and innovative railway track systems
14	Science Direct/Engineering Structures	2	slab track, ballasted track, comparison	https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.111980	Calibration and validation of the dynamic response of two slab track models using data from a full-scale test rig
15	Science Direct	3	über Referenz	ISSN 1330-3651	Rail traffic noise and vibration mitigation measures in urban areas
16	SpringerLink	3	über Referenz	https://doi.org/10.1007/s40534-021-00264-9	Railway ground vibration and mitigation measures: benchmarking of best practices
17	Google Scholar/TH Karlsruhe; Vortrag Prof. Hohnecker	3	Feste Fahrbahn	https://docplayer.org/43348661-Feste-fahrbahn-und-laerm-gibt-es-hier-loesungen.html	Feste Fahrbahn und Lärm - Gibt es hier Lösungen
18	Beitrag im ZEV Rail	2	Feste Fahrbahn	https://www.zevrail.de/artikel/schotteroberbau-und-feste-fahrbahn-grundsatzuntersuchungen-zur-schallausbreitung-bei	Schotteroberbau und Feste Fahrbahn, Grundsatzuntersuchungen zur Schallausbreitung bei quellennahen Immissionsmessungen

Nr.	Plattform/Journal/Kontext	Relevanz 1: niedrig 5: hoch	Suchbegriff/Quelle	doi/Identifikator	Titel
19	Google Scholar/Vortrag FG Schienenfahrzeuge Tu Berlin	2	Feste Fahrbahn	https://www.dlr.de/ts/Portaldata/16/Resources/dokumente/vk/Vortrag_Siegmann_051006.pdf	Feste Fahrbahn: Weg zu einer wirtschaftlicheren Bahn?
20	Taylor and Francis Online/ Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance	4	slab track noise	https://doi.org/10.1080/15732479.2020.1719167	Railway slab track systems: review and research potentials
21	Springer Link/ 10th Railway Noise Conference 2010	4	slab track noise	https://doi.org/10.1007/978-4-431-53927-8_57	Separation of Rolling Noise and Aerodynamic Noise by In-Service Measurement of Combined Roughness and Transfer Functions on a High Speed Slab Track
22	Chalmers Universität Gothenburg	5	slab track noise	https://research.chalmers.se/publication/525560/file/525560_Fulltext.pdf	THE LOW-NOISE POTENTIAL OF LOW-VIBRATION TRACK
23	Chalmers Universität Gothenburg	5	slab track noise	https://research.chalmers.se/publication/533033/file/533033_Fulltext.pdf	Simulating rolling noise on ballasted and slab tracks: vibration, radiation, and pass-by signals
24	Chalmers Universität Gothenburg	5	slab track noise	https://events.tuni.fi/uploads/2022/05/d146d213-nrs-2022-abstracts-20220527.pdf	Noise and vibration mitigation on low vibration track
25	Springer Link/ 11th Railway Noise 2013	1	slab track noise	https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-662-44832-8.pdf	An Assessment of the Effectiveness of Replacing Slab Track to Control Groundborne Noise and Vibration in Buildings above an Existing Railway Tunnel Slab Track
26	Springer Link/ Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design	4	slab track noise	https://doi.org/10.1007/978-3-662-44832-8_55	Railway Noise Generated by High-Speed Trains
27	Google Scholar/ Bericht einer amerikanischen Behörde	2	slab track noise	https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/tcrp/tcrp_rpt_23.pdf	Wheel Rail Control Manual
28	Vehicle System Dynamics	1	über Referenz	http://dx.doi.org/10.1080/00423114.2010.536557	Modelling rail corrugation with specific-track parameters focusing on ballasted track and slab track
29	Bericht der Schweizerischen Bundesbahn	4	Von BAFU erhalten	-	Lärmauswirkungen und Versuch einer Lärmoptimierung eines FF LVT Oberbaus
30	Sci Total Environ	3	über Referenz	https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.05.060	Noise reduction in urban LRT networks by combining track based solutions
31	Advances in Materials Science and Engineering	3	über Referenz	https://doi.org/10.1155/2014/206549	Reducing Railway Noise with Porous Sound-Absorbing Concrete Slabs
32	Journal of Sound and Vibration	3	über Referenz	https://doi.org/10.1006/jsvi.1999.2642	Reducing groundborne vibrations: State of the art study
33	Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design	3	über Referenz	https://www.researchgate.net/publication/225478627_Tuned_Mass_Damper_for_Rail_Noise_Control	Tuned Mass Damper for Rail Noise Control
34	Springer Link	5	Luftschall Feste Fahrbahn	https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-662-43966-1_17-1?pdf=chapter%20toc	Luftschall aus dem Schienenverkehr
35	Verkehrslärmschutzverordnung	5	Schall 03	https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_16/anlage_2.html	Schallimmissionen von Schienenwegen
36	PROSE Archiv	5	Feste Fahrbahn	ISBN 3-7771-0269-5	Feste Fahrbahn

B Verschiedene Modelltypen der Festen Fahrbahn



Vergrößerte Darstellung von Abbildung 2-3: Klassifizierung der Festen Fahrbahn. Grafik entnommen aus [28]