

Stand der Technik Fahrbahnsteifigkeit

Systemführerschaft Interaktion Fahrzeug – Fahrweg Meterspur
Projekt: 4 Fahrbahnsteifigkeit
Modul: Modul 1

Technischer Bericht



Datum / Status: 16.10.2022 / Vorabzug

Seitenanzahl 51

Verfasser: Stefan Werner KPZ, Martin Siegen MGBahn

Geprüft: Peter Güldenapfel / KPZ

Freigegeben: Martin Siegen / MGBahn

Zitierweise:

Stefan Werner, Martin Siegen, Railplus: *Stand der Technik Fahrbahnsteifigkeit*, 16-10-2022

Freigabe durch die Systemführerschaft

Version	Verantwortlich	Datum
1.0	Technical Board	27.10.2022
1.0	Management Board	31.10.2022

Management Summary

Bei der Umfrage der Meterspurbahnen hat sich gezeigt, dass die Belastungen auf die Fahrbahn durch erhöhte Achslasten und/oder durch eine Verdichtung des Fahrplantaktes in den letzten 20 Jahren bei den meisten Bahnen stark zugenommen haben. Die Belastungen wirken sich auf der einen Seite entsprechend im erhöhten Verschleiss der Schienen und Räder aus. Auf der anderen Seite haben diese auch Auswirkungen auf die Veränderungen bei der Gleislagequalität.

Um dieser Problematik entgegenzuwirken werden härtere Schienenstähle und steifere, tragfähigere Fahrbahnkörper gebaut. Dies hat zur Folge, dass die Lärmemissionen zunehmen. Bei 80% der Meterspurbahnen ist der Lärm ein Problem. Neben dem Kurvenkreischen sind die Lärmemissionen, welche durch den steiferen Fahrbahnaufbau mit Betonschwellen verursacht werden, bei den Anwohnern störend. Ebenso sind die Erschütterungen zunehmend ein Störfaktor. Aufgrund dieser Thematik stellen sich einige Fragen in Bezug auf die optimale Fahrbahn beziehungsweise das ideale Zusammenspiel zwischen Fahrbahn und Fahrzeug:

- Hat die Schienenhärte einen Einfluss auf den Verschleiss der Räder?
- Welches ist die optimale Berührgeometrie zwischen Rad und Schiene unter Berücksichtigung des Verschleissprofils und welchen Einfluss hat dabei die Schienenneigung?
- Wie weit verändern die Betonschwellen oder der steifere Fahrbahnaufbau die Eigenfrequenz der Fahrbahn und welchen Einfluss hat dies auf den Verschleiss oder den Lärm?

Zurzeit können keine abschliessenden Antworten auf diese Fragen gegeben werden. Mit der Durchsicht der aktuellen Forschung zeigt sich, dass gerade im Bereich der Meterspurbahnen mit ihren besonderen Charakteristiken wie engen Kurven das Grundlagenwissen fehlt und noch erarbeitet werden muss.

Aufgrund der Erkenntnisse der Normalspurbahnen und Erfahrungen der Meterspurbahnen können doch einige Tendenzen festgestellt werden.

Gerade bei höheren Verkehrsbelastungen kann das Schlupfwellenwachstum und der Verschleiss durch den Einsatz höherfester Stähle der Schienen in engen Bögen deutlich verlangsamt werden. Es wird davon ausgegangen, dass durch die verminderten Schienenschäden auch der Radverschleiss verringert wird. Ebenso wird das Schlupfwellenwachstum durch den Einsatz von weichen Zwischenlagen mit einer statischen Federziffer < 100 kN/mm reduziert. Es ist zu beachten, dass bei weichen Zwischenlagen der Lärm (Schienensingen) zunimmt.

Der Einsatz von Schwellensohlen verbessert generell die Gleislagequalität. Übergänge von besohlenen auf unbesohlenen Schwellen sind kontraproduktiv. Daher wird, um eine gleichbleibende Gleislagequalität zu erreichen und LCC-Kosten zu senken, ohne dabei auf Erschütterungsschutz zu achten, der Einbau von steifen, wenn möglich plastischen, Schwellensohlen über die gesamte Länge eines Gleisabschnitts empfohlen. Weiter können Schwellenbesohlungen zur Kompensation der geringen Lastverteilungsfähigkeit des Schotters bei geringer Schotterdicke < 20 cm beitragen. Ein weiteres Einsatzgebiet ist die Optimierung von Steifigkeitssprüngen bei Übergangsbereichen zu Bauwerken, Festen Fahrbahnen oder felsigem Untergrund mit hohen Steifigkeiten.

Der Einsatz von besohlenen Betonschwellen kann die Gesamtsteifigkeit verbessern. Wieweit auch die Lärmemissionen mittels elastischer Elemente vermindert werden kann, muss weiter erforscht werden. Bei den Schweizer Meterspurbahnen kommen Unterschottermatten gegen Erschütterungen vereinzelt zum Einsatz. Die Erfahrungen werden als grundsätzlich positiv beschrieben.

In Anbetracht der steigenden Achslasten und höheren Belastungen auf die Fahrbahn ist langfristig ein tragfähiger Unterbau mit Sperr- und Foundationsschicht empfehlenswert. Wenn die Zugänglichkeit gegeben ist, ist bei höheren Belastungen der Einbau von AC-Rail die wirtschaftlichste Lösung.

Wohl der wichtigste Faktor für ein langlebiges Gleis ist eine funktionierende Entwässerung. Mit dem neuen Messwagen der Meterspurbahnen kann einerseits die Sicherheit erhöht und andererseits eine zustandsorientierte kurz- und langfristige Instandhaltungsstrategie erzielt werden.

Inhalt

1	Ausgangslage	5
2	Grundlagen	5
2.1	Begriffsdefinitionen.....	5
2.2	Vorhandene Literatur.....	6
3	Stand der Technik	7
3.1	Grundlagen Allgemein.....	7
3.2	Schienen	18
3.3	Zwischenlagen Befestigungen.....	23
3.4	Schwellen.....	25
3.5	Schwellenbesohlung	26
3.6	Schotter.....	32
3.7	Unterschottermatten.....	33
3.8	Unterbau, Foundationsschicht.....	34
3.9	Entwässerung	38
3.10	Fahrbahn Schäden Verschleiss.....	39
3.11	Fahrbahn Lärm Erschütterung.....	41
3.11.1	<i>Lärm</i>	41
3.11.2	<i>Erschütterungen</i>	42
3.12	Messdiagnostik	47
4	Fazit	49
4.1	Zusammenfassung wichtigste Erkenntnisse.....	49
5	Verzeichnisse	50
5.1	Revisionen	50
5.2	Referenzen	50
5.3	Abbildungen	50
5.4	Tabellen	51

1 Ausgangslage

Aufgrund erhöhten Verschleisses an Rad und Schienen bei Meterspurbahnen wurde durch RailPlus ein Forschungsprojekt Interaktion Fahrzeug-Fahrweg lanciert. Ziel der Forschungsarbeit ist es, ein grundlegendes Verständnis für Kurz und Langzeiteffekte wie Kurvenkreischen, Rad- Schienenverschleiss, Schlupfwellenbildung zu erhalten, um in der Folge das Gesamtsystem Fahrzeug-Fahrweg wirtschaftlich und sozioökonomisch zu optimieren.

Die Fahrbahn ist ein Teil dieses Systems und muss im Zusammenspiel mit dem Fahrzeug betrachtet werden.

Dieses Dokument soll einerseits den aktuellen Stand der Technik der Fahrbahn aufzeigen und andererseits das fehlende Wissen insbesondere in der Interaktion Fahrzeug-Fahrweg erkennbar machen.

2 Grundlagen

2.1 Begriffsdefinitionen

<u>Fahrbahn</u>	Bahnkörper, auf welchen eine Bahndurchfahrt einen Einfluss hat. Die Fahrbahn umfasst den Oberbau und den Unterbau mit der Fahrbahnentwässerung bis zur Ableitung.
<u>Fahrweg</u>	Der Fahrweg umfasst alle für den Betrieb der Bahn notwendigen Anlagenteile.
<u>Oberbau</u>	Der Oberbau ist der Teil des Gleiskörpers oberhalb der Planie, dies beinhaltet Schiene, Schwelle, Schienenbefestigung und Schotter.
<u>Unterbau</u>	Unterbau ist der Teil unterhalb der Planie und beinhaltet die Sperrschicht, Fundationsschicht, Übergangsschicht
<u>Untergrund</u>	Untergrund ist der unter dem Oberbau oder Unterbau anstehende Boden oder Fels. Unterbau und Untergrund bilden die Gründung des Fahrweges.

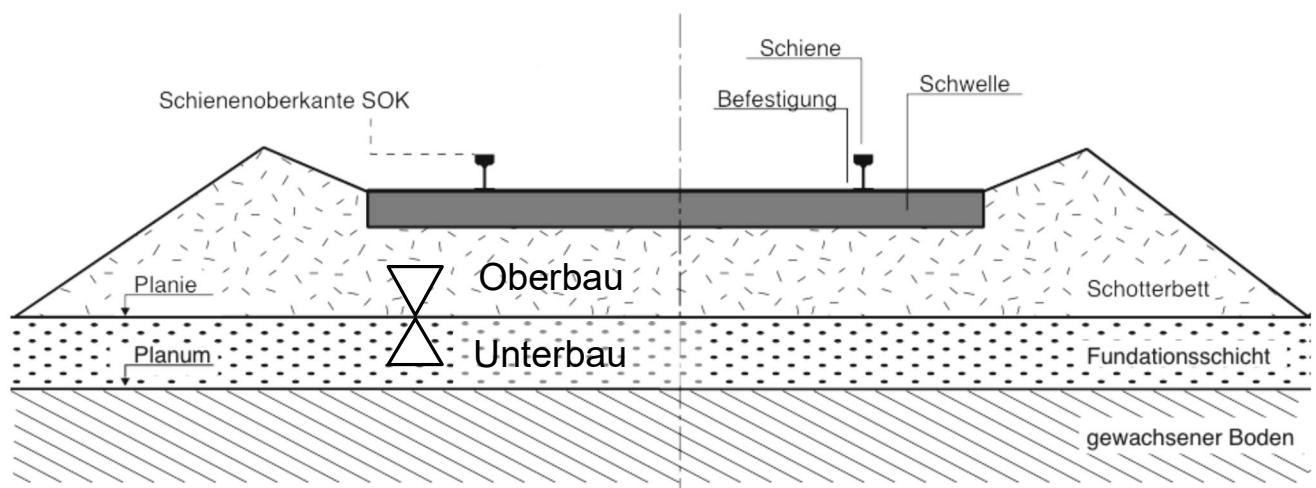


Abbildung 1: Begriffe der Fahrbahn¹

¹ Dr. M. Kohler, CAS Fahrbahn

2.2 Vorhandene Literatur

Bundesamt für Verkehr (BAV): AB-EBV, Bern, 2020

VÖV: D RTE 22540 Fahrbahnpraxis Meterspur und Spezialspur, 15.01.2011

VÖV: R RTE 21110: Unterbau und Schotter, 01.09.2015

VÖV: R RTE 20512: Lichtraumprofil Meterspur

VÖV: R RTE 22541: Lückenlos Verschweisstes Gleis (LVG) für Meterspurbahnen, 30.11.2005

VÖV: R RTE 22546 Geometrische Gestaltung der Fahrbahn Meterspur, 15.01.2012

VÖV: R RTE 22570 Einbau, Kontrollen und Unterhalt von Gleisen (Meterspur), 31.07.2012

Schweizer Norm: EN 13848: Bahnanwendungen-Oberbau-Gleislagegüte, 10.2019

Schweizer Norm: EN 14363: Bahnanwendungen-Versuche und Simulationen für die Zulassung der fahrtechnischen Eigenschaften von Eisenbahnfahrzeugen – Fahrverhalten und stationäre Versuche, 09.2022

Bernhard Lichtenberger: *Handbuch Gleis*, Eurailpress 2010

Johannes Martin Mack, *Untersuchungen zum Schichtübergang Unterbau-Schotter unter Berücksichtigung verschiedener Oberbaukonfigurationen*, TU München, 2022

Hermann Patrick Braess: *Sicherstellung einer langfristig guten Gleislage in atmenden Bögen*, Diss. ETH Nr. 25112, ETH Zürich, Oktober 2018

Güldenapfel Peter, Railplus / KPZ Fahrbahn: *Grundlagenscanning Umfrage Bahnen*. Technischer Bericht, 8.10.2022

Nishant Kumar, Claudia Kossman, Stephan Scheriau and Klaus Six: An efficient physical-based method for predicting the long-term evolution of vertical railway track geometries

Dr. H.R. Schneider, Allianz Fahrweg, BAV: *Internationale Literaturrecherche zum Thema Unterbau bei Bahnstrecken*, 18.01.2022

Railway Rolling Stock (Railtex), PEP (Professional Engineering Publishers), Wiley, 01.02.2005

K. Mädler, R. Heyder, DB Systemtechnik, Weiches Rad und harte Schiene oder umgekehrt? Zum Einfluss des Werkstoffes von Rad und Schiene auf den Verschleiss der Kontakt-Partner, Dresden 2015

3 Stand der Technik

Bei der Umfrage der Meterspurbahnen hat sich gezeigt, dass die Belastungen auf die Fahrbahn durch erhöhte Achslasten und/oder durch die Verdichtung des Fahrplans in den letzten 20 Jahren bei den meisten Bahnen stark zugenommen haben. Die Belastungen wirken sich auf der einen Seite entsprechend im erhöhten Verschleiss der Schienen und Räder aus. Auf der anderen Seite haben diese auch Auswirkungen auf die Veränderungen bei der Gleislagequalität.

Um diesen veränderten Anforderungen gerecht zu werden, wird in diesem Bericht auf das bestehende Wissen der einzelnen Gleiskomponenten und des Gesamtsystems Fahrbahn eingegangen. Die Fahrbahn ist ein Teil des Gesamtsystems Fahrzeug-Fahrweg und darf daher nicht isoliert betrachtet werden, sondern muss auch die Wechselwirkungen von Fahrzeug und Fahrweg berücksichtigen. Die Beanspruchungen von Rad und Schiene sind zudem abhängig von den Trassierungsgegebenheiten der Einsatzstrecken, den Eigenschaften der eingesetzten Fahrzeuge und von den fahrdynamischen Zielgrößen.

3.1 Grundlagen Allgemein

Das Gleis hat folgende Aufgaben:

- Sicheres Führen, Tragen und Gewährleistung gutes Fahrverhalten der Fahrzeuge
- Aufnahme der Fahrzeugkräfte in horizontaler, vertikaler und longitudinaler Richtung
- Abtragen der Kräfte in den Untergrund
- Hohe Verfügbarkeit mit einer wirtschaftlich vertretbaren Instandhaltung sicherstellen
- Guten Fahrkomfort sicherstellen

Das Prinzip des Führungs- und Lenkmechanismus beruht auf dem Abrollen eines Doppelkegels auf zwei Zylindern bzw. auf einer Messerschneide. In der Mittelstellung haben beide Räder eines Radsatzes den gleichen Durchmesser. Wenn sich der Radsatz seitlich zum Beispiel bezogen auf die Gleismitte nach rechts bewegt, laufen die Räder mit unterschiedlichen Raddurchmessern (Rollradien). Das rechte Rad rollt auf einem grösseren Raddurchmesser als das linke Rad. Durch die starre Achsverbindung der Räder ergeben sich unterschiedlich zurück gelegte Laufwege des linken und des rechten Rades. Wenn der Radsatz in diesem Zustand rollt, stellt sich ein Moment um die Hochachse ein und ergibt in der Folge eine Lenkwirkung sowie in der Folge eine sinusförmige Bewegung und damit eine Zentrierung des Radsatzes in Gleismitte entlang der Strecke. Läuft der Radsatz in einem Bogen (zum Beispiel im Bild unten rechts in einem Linksbogen) so wird der Radsatz durch das Moment resultierend aus den an beiden Rädern angreifenden Kräften durch den Bogen gelenkt.

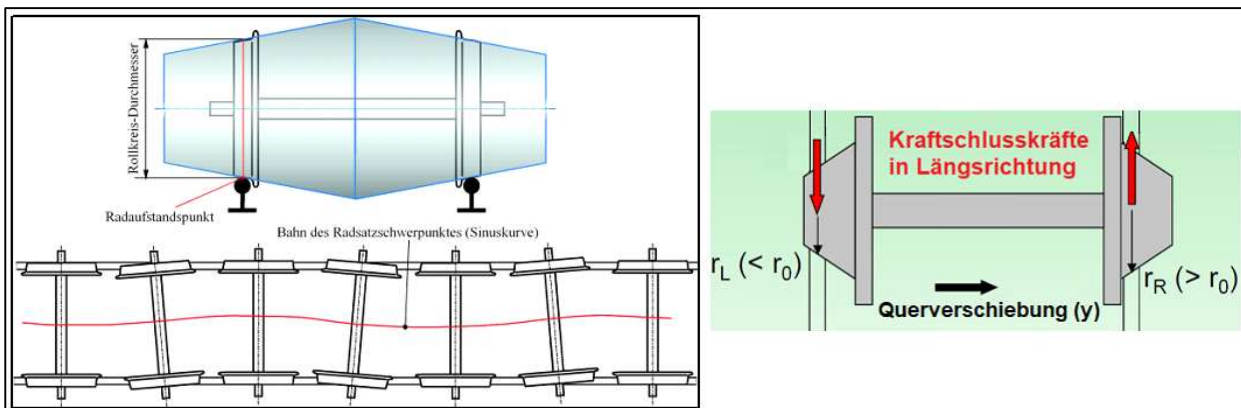


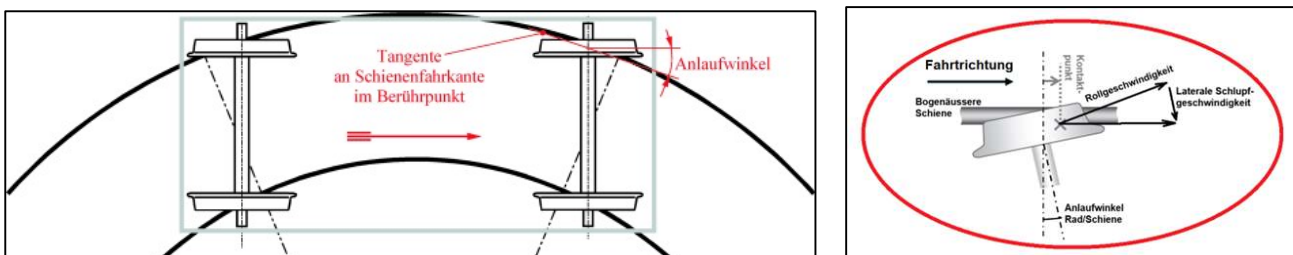
Abbildung 2: Links Sinuslauf des Fahrzeuges im Spurkanal infolge Rollradiendifferenz²

² Joachim Ihme, Schienenfahrzeugtechnik, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2. Auflage, 2019

Im Betriebseinsatz können sich durch den Verschleiss die Profile der Räder und Schienen verändern. Dies insbesondere dann, wenn die Profile nicht verschleissangepasst sind. In diesem Fall verändert sich der Kontakt zwischen Rad und Schiene, was Auswirkungen auf das Fahrverhalten auf geraden Strecken einerseits und in den Bögen andererseits haben kann. Optimal wäre es deshalb, wenn sich durch den unvermeidbaren Verschleiss an Rad und Schienen keine Veränderungen im Fahrverhalten einstellen. Dies ist dann der Fall, wenn die Profile berührgeometrisch aufeinander abgestimmt sind. In diesem Fall wird von verschleissangepassten Profilen gesprochen.

Der Schienenverschleiss hat im ungünstigen Falle einen grossen Einfluss auf das quasistatische und dynamische Fahrzeugverhalten. Dies sowohl auf die Kräfte zwischen Rad und Schiene bei der Fahrt im Bogen als auch auf das Laufverhalten und den Fahrkomfort des Fahrzeugs auf den geraden Strecken. Die Kontaktgeometrie hat gegensätzliche Auswirkungen auf das dynamische Verhalten bei Fahrt auf geraden Strecken einerseits und die Fahrt in den Bögen andererseits. Die optimale Rad-Schiene-Kontaktgeometrie ist immer ein Kompromiss zwischen gutem Bogenlaufverhalten und gleichzeitigem Beherrschen von hohen Fahrgeschwindigkeiten auf geraden Strecken. Die Fahrstabilität des Fahrzeugs bei hohen Geschwindigkeiten ist abhängig von den massgebenden Fahrzeugparametern, der Profilvereinigung Rad/Schiene, der Spurweite (Spurspiel) und der Gleislagequalität.

In engen Bögen kann sich bei den vorlaufenden Radsätzen der Fahrzeuge ein grosser Anlaufwinkel zwischen Rad und Schiene einstellen. Dies führt zu einem starken Verschleiss an den Schienenflanken der bogenäusseren Schienen und zu einem erhöhten Verschleiss an den Fahrflächen der bogenäusseren und bogeninneren Schienen. Durch die hohen seitlichen Kräfte an der Schienenflanke der bogenäusseren Schienen besteht die Gefahr, dass das entsprechende Rad an der Schienenflanke hochklettert, was im schlimmsten Fall zur Entgleisung des Fahrzeugs führt.

Abbildung 3: Radsatzführung³

Um die in der Kurve wirkende Zentrifugalkraft auszugleichen bzw. abzumindern, wird in der Kurve das Gleis nach bogeninnen geneigt, bzw. das Aussengleis bogenaussen überhöht. Die Differenz zwischen der Überhöhung, die nötig wäre, um die Querbewegung bei der zulässigen Höchstgeschwindigkeit vollständig auszugleichen und der tatsächlichen Überhöhung wird als Überhöhungsfehlbetrag bezeichnet. Gemäss AB-EBV beträgt der Grenzwert für Überhöhungsfehlbetrag im Normalfall 86mm (unausgeglichene Querbewegung auf Gleisebene $a_q = 0,8\text{m/s}^2$) und im Maximum 107mm ($a_q = 1,0\text{m/s}^2$).

Die wichtigsten Betriebsbedingungen und Trassierungsverhältnisse, die das Laufverhalten im Bogen beeinflussen sind die Trassierungsgeometrie (Bogenhalbmesser, Überhöhung), Gleislagequalität, Überhöhungsfehlbetrag bzw., nicht kompensierte Querbewegung auf Gleisebene und die Kontaktverhältnisse zwischen Rad und Schiene (Rad- und Schienenprofile, Spurweiten und Spurmasse, Einbauneigungen der Schienen, Reibwert Rad/Schiene).

Die Auflagefläche zwischen Rad und Schiene zur Übertragung der Radlast bis 8 Tonnen beträgt rund 1cm^2 . Bei Strassenfahrzeugen ist diese Fläche rund 100mal grösser. Der Kontakt zwischen Stahlrad

³ Joachim Ihme, Schienenfahrzeugtechnik, Springer Vieweg, Wiesbaden, 16.08.2016

und Stahlschiene ist sehr steif, was aufgrund der dadurch bedingten kleinen Kontaktfläche sehr hohe Kontaktspannungen zur Folge hat (kann bei dieser Radlast mit Raddurchmesser 790 mm und auf gerader Strecke bis zu 1100 MPa betragen). Die Abmessungen der näherungsweise elliptischen Kontaktfläche werden vereinfacht nach der Theorie von Hertz berechnet und hängen von der Belastung, dem Elastizitätsmodul und von der Krümmung des Rades und der Schiene im Kontaktpunkt ab. In der Berührfläche bilden sich je nach Kraftschlussausnutzung unterschiedliche Haft- und Gleitzonen aus. Die Relativbewegung in der Gleitzone wird als Mikroschlupf bezeichnet. Aus dem Mikroschlupf und der Kontaktspannungsverteilung ergibt sich die sogenannte Kraftschlusskraft, welche tangential auf die Kontaktfläche einwirkt. Diese kann in einzeln oder kombiniert in mehrere Richtungen wirken und ergibt sich aus hauptsächlich aus dem Beschleunigen / Bremsen des Fahrzeugs und/oder durch Spurführungs- und Lenkungsverhalten beim Lauf in den Bögen. Durch den Schlupf in der Kontaktfläche und die darin erzeugte Kraftschlusskraft wird Reibleistung erzeugt. Diese bewirkt eine Erhöhung der Temperatur in der Kontaktfläche (200-300°), welche neben den Normal- und Tangentialspannungen zusätzliche Spannungen erzeugt. Die durch den Schlupf erzeugten Kraftschlusskräfte sind durch den Reibwert zwischen Rad und Schiene begrenzt.

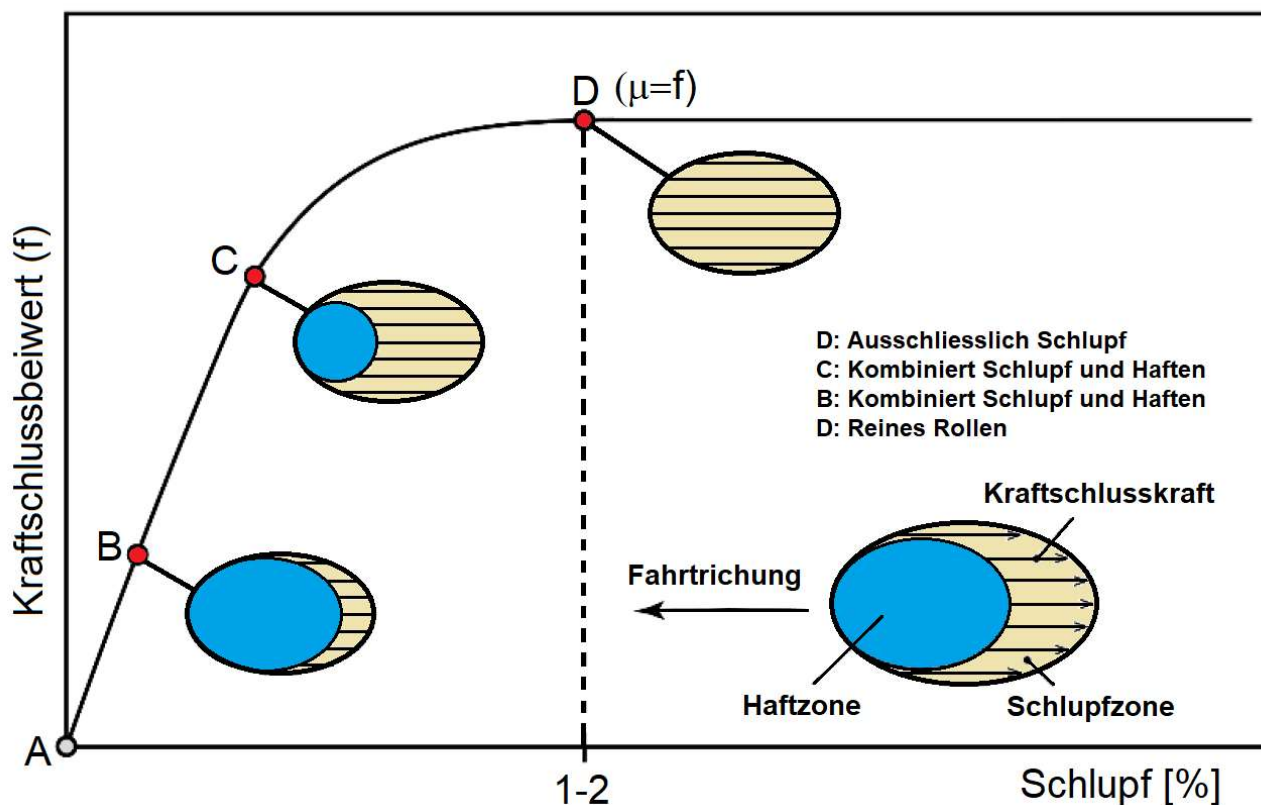


Abbildung 4: Diagramm Kraftschlussbeiwert – Schlupf (Sammlung R. Müller)

Abbildung 5 zeigt die schematische Darstellung von Fahrzeug-Fahrwegmodellen. Auf der rechten Seite sind die Modelle für das Fahrzeug und den Fahrweg dargestellt, wie sie für die Durchführung von Nachweisführungen verwendet werden. Beim Fahrweg sind die Steifigkeiten und Dämpfungen festgelegt. Beim Fahrzeug werden diese aufgrund der Auslegungsrechnungen individuell ermittelt.

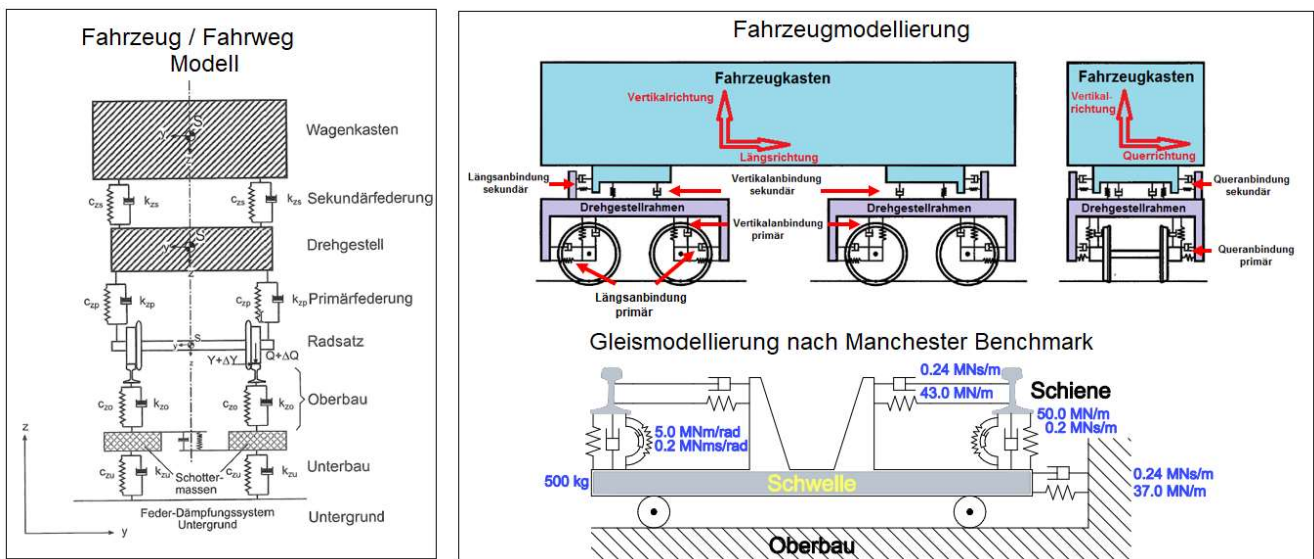


Abbildung 5: Fahrzeug – Fahrweg – Modelle (links Fahrweg detailliert, rechts Fahrweg für Nachweisrechnungen)

Sowohl beim Fahrzeug als auch beim Fahrweg handelt es sich um schwingungsfähige Teilsysteme des Systems Fahrzeug/Fahrweg. Die dargestellten Fahrzeug – Fahrwegmodelle bestehen jeweils aus Massen, Federn und Dämpfungen. Die Feder- und Dämpfungselemente zwischen Wagenkasten und Drehgestell sowie zwischen Drehgestell und Radsatz sind sehr gut bekannt und ihr Verhalten ist mathematisch gut beschreibbar.

Der Fahrweg selbst lässt sich in seine elasto-plastischen Eigenschaften wegen des inhomogenen Verhaltens des Schotterbettes, der Planums Schutzschicht und des Untergrundes nicht analytisch exakt beschreiben. Es werden empirische, durch Versuche ermittelte Kenngrößen und Zusammenhänge angewendet [1].

Die als Starrkörper dargestellten Massen können sich dabei je nach Erregung entsprechend ihren möglichen Freiheitsgraden bewegen bzw. schwingen. Diese Bewegungen lassen sich nach der Schwingungsursache unterscheiden. Freie Schwingungen (auch Eigenschwingungen genannt) entstehen in Systemen üblicherweise durch eine einmalige Anregung, bspw. in Form eines Stosses oder einer Sprunganregung (Schienenstoss, Herzstücke von Weichen, Schienenfehler) ohne weitere kontinuierliche äussere Energiezufuhr. Das System, zum Beispiel der Fahrzeugkasten, schwingt daraufhin mit der ihm eigenen Eigenfrequenz und Amplitude, die sich aufgrund seiner Systemparameter ergeben. Bei fremderregten bzw. selbsterregten Schwingungen erfolgt die Schwingungsanregung durch äussere periodische Anregungen bzw. selbst gesteuerte Energiezufuhr (Gleislagefehler, Sinuslauf der Radsätze). Wie bei freien Schwingungen ergibt sich auch bei selbsterregten Schwingungen die Frequenz durch das schwingende System an sich, während bei fremderregten (bzw. erzwungenen) Schwingungen die Frequenz durch die periodische äussere Anregung vorgegeben wird. Ungedämpfte Schwingungen können durch eine zusätzliche äussere Anregung zu einem starken Aufschwingen des Systems führen, was im schlimmsten Fall in einer sog. Resonanzkatastrophe enden kann. Eine höhere Dämpfung dieser Systemfrequenz beruhigt das System und sorgt dafür, dass mögliche Resonanzfrequenzen keine negativen Auswirkungen mehr auf die Komponenten des Systems haben.

Gleislagefehler bilden sich durch die Nutzung des Gleises unter Betriebseinwirkungen infolge von Verformungen des aus Oberbau, Unterbau und Untergrund bestehenden Tragsystems sowie durch klimatische Einwirkungen. Ihre Entstehung wird durch inhomogene Gleisverläufe gefördert. Dies können beispielsweise in Übergangsbereichen unterschiedliche Elastizitäten im Ober- und Unterbau wie zum Beispiel Wechsel der Schwellenart (Holz – Betonschwellen), Brücken ohne durchgehendes Schotterbett, Übergänge auf Feste Fahrbahn oder auf steifen Untergrund, schienengleiche Eisenbahnübergänge, Unterführungen bzw. Unterquerungen, unterschiedliche Schotterbettstärken etc. sein. Infolge dynamischer Krafteinwirkung beim Überfahren der daraus sich entwickelnden Fehlerstellen verstärken sich Gleislagefehler weiter.

Die Norm EN 13848-1 unterscheidet zum Beispiel Längshöhenfehler in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen:

- D1 (kurze Wellen), Wellenlänge $3 \leq 25$ m;
- D2 (mittlere Wellen), Wellenlänge $> 25 \leq 70$ m;
- D3 (lange Wellen), Wellenlänge $> 70 \leq 150$ m.

Kurze und mittlere Wellen (Abbildung 6) der Längshöhe bilden sich in der Normalspur zumeist aus der Interaktion zwischen Fahrweg und Fahrzeug (in Abhängigkeit zur Geschwindigkeit und der Beschaffenheit des Fahrzeugs). Dabei sind die Ursachen meist im Bereich der Bettung und des Unterbaus zu finden, wie beispielsweise Spritzstellen, Schotterzerstörung, Setzungen im Unterbau, fallweise hervorgerufen durch Schaden an der Entwässerung etc.

Der Auslöser von langen Wellen ist bei der Normalspur hingegen im Unterbau bzw. Untergrund zu finden. Während lange Wellen im Regelfall keinen Einfluss auf die unmittelbare Betriebssicherheit haben, können kurze und mittlere Wellen aufgrund der Zunahme der Radbeschleunigung und damit auch der Wagenkastenbeschleunigung ungewollte Konsequenzen bis hin zu Entgleisungen nach sich ziehen. Ausser im Hochgeschwindigkeitsbereich sind nur die kurzen Wellenlängen bei der Beurteilung der Fahrsicherheit, des Fahrverhaltens und des Fahrkomforts zu berücksichtigen.

Wellen kürzer als 3 m werden im Regelfall von Schienenfehlern verursacht (z. B. Schienenstössen, Isolierstössen etc.) und sind durch Stopfungen meist nicht zu beheben.

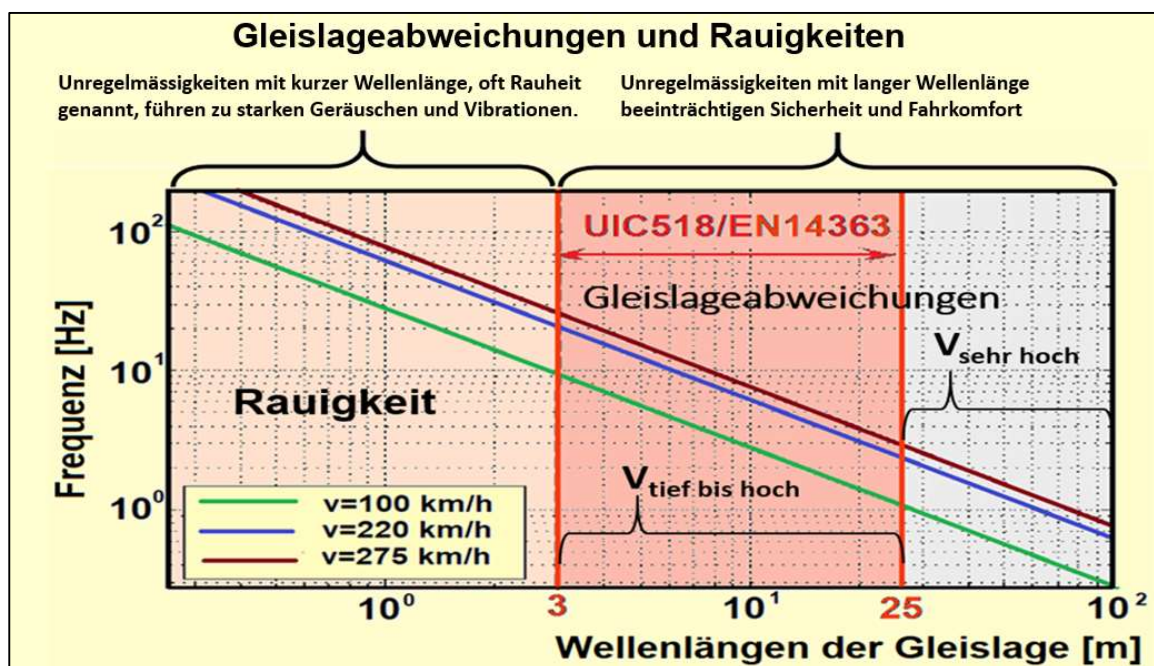


Abbildung 6: Wellenlängen der Gleislageabweichungen gemäss Norm EN 13848-1

Abbildung 6 zeigt in roter Farbe den Verlauf aus fahrwegtechnischer Sicht. Für die Instandhaltung sind die Maximalwerte und die Standardabweichungen aus den Amplituden-Wegschrieben massgebend. Für die Interaktion Fahrzeug/Fahrweg sind zudem auch die Inhalte dieser Signale erforderlich.

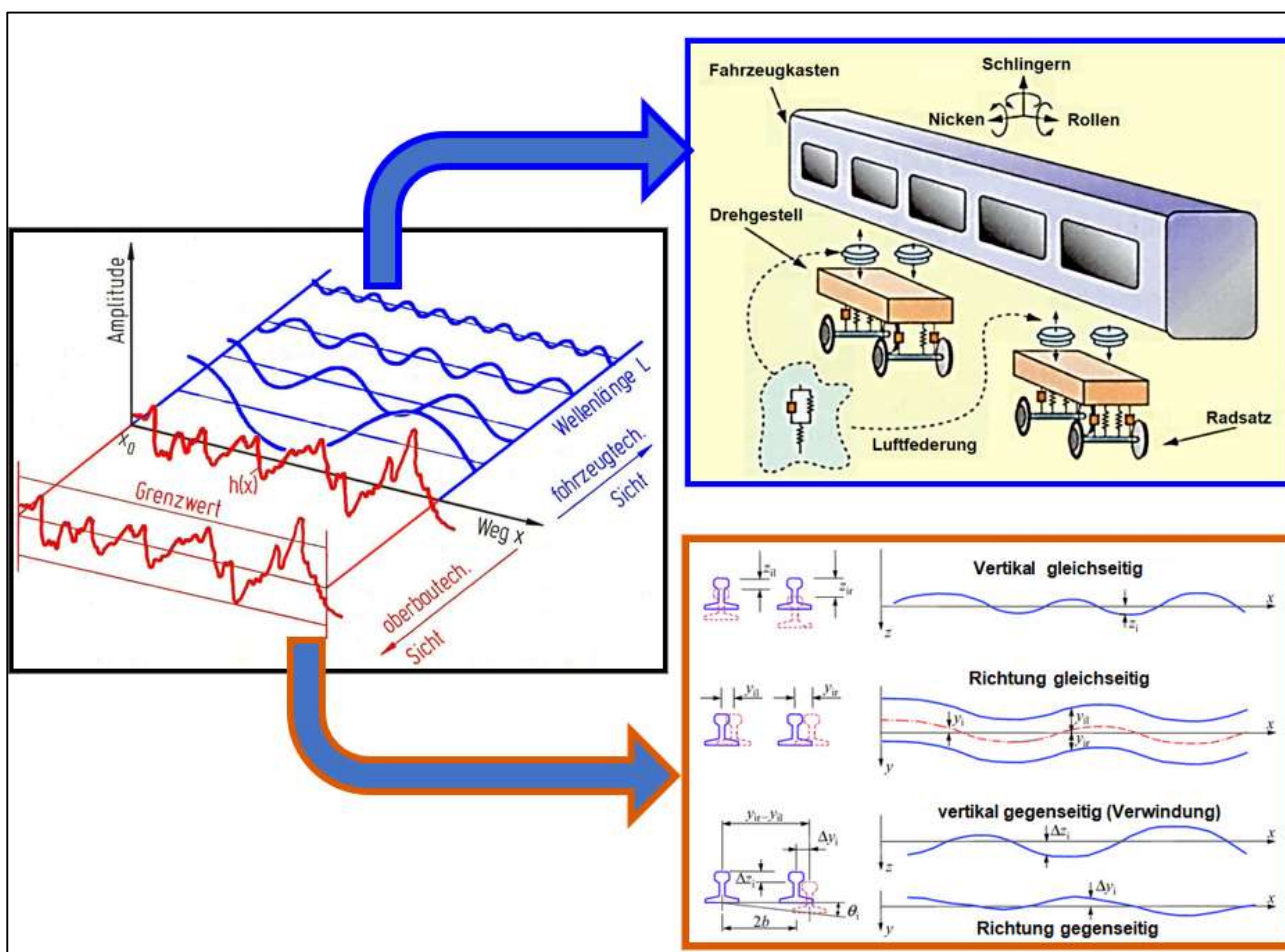


Abbildung 7: Unterschiedliche Sichtweisen bei der Beurteilung der Gleislage bei Fahrzeug und Fahrweg (Sammlung R. Müller)

Bei den fahrtechnischen Zulassungsversuchen wird die Standardabweichung herangezogen, um die grundsätzlichen Anforderungen an die Gleislage der Versuchsstrecke zu überprüfen. In der Norm für die Instandhaltung (EN 13848-5) ist angemerkt, dass mit den Maximalwerten (hinsichtlich der Sicherheitsgrenzwerte) sowohl die Fahrzeug - Gleiswechselwirkung als auch das Risiko unerwarteter Ereignisse berücksichtigt werden. Die Grenzwerte für die Standardabweichung sind hingegen nur informativ und auch nur für die Aufmerksamkeitsgrenze im Anhang dieser Norm definiert.

Eine weitere Möglichkeit zur Analyse von stationären stochastischen Signalanteilen von Gleislageabweichungen bietet das Leistungsdichtespektrum (engl. PSD { Power Spectral Density}). Das Haupteinsatzgebiet des Leistungsdichtespektrums liegt in der Synthese von Gleislageabweichungen für die Fahrzeugauslegung. Hierfür wurden zahlreiche Messfahrten in europäischen Netzen durchgeführt und für die jeweiligen Gleislage Beschreibungsparameter Leistungsdichtespektren berechnet.

Je nach Aufgabenstellung wird es erforderlich sein bei der Modellierung des Systems Fahrzeug/Fahrweg unterschiedliche Modelle zu verwenden (siehe Tabelle 1).

Die Fahrzeugdynamik bewegt sich im tieffrequenten Frequenzbereich (Starrkörpermechanik bis maximal 20Hz), was bei deren Analysen verfeinerte Fahrzeugmodelle und vereinfachte Gleismodelle erfordert. Die Gleisdynamik bewegt sich im mittelfrequenten bis mittel-hochfrequenten Frequenzbereich zur Anwendung (Erschütterungen, Kurzzeitverhalten) was bei deren Analysen verfeinerte Gleismodelle und vereinfachte Fahrzeugmodelle erfordert. Die Lärmproblematiken (zum Beispiel Kurvenkreischen) sind im hochfrequenten Bereich angesiedelt. Je nach Aufgabenstellung wird es erforderlich sein bei der Modellierung des Systems Fahrzeug/Fahrweg unterschiedliche Modelle zu verwenden (siehe Tabelle 1).

In folgender Tabelle ist eine Übersicht der verschiedenen Schwingungsfrequenzen und ihre Abhängigkeiten dargestellt:

Tieffrequent: $3m \leq \lambda \leq 25m$	Mittelfrequent: $20Hz \leq f \leq 100Hz$	Mittel-Hochfrequent: $> 100 Hz$	Hochfrequent: $500Hz \leq f \leq 8000Hz$
Gleislage ist abhängig von:	Erschütterungen treten auf aufgrund von:	Schäden & Verschleiss an Rad / Schiene Fahrflächen	Lärm tritt auf aufgrund von:
<ul style="list-style-type: none"> • Achslast & Streckenbelastung • Alterung von Schotter • Traktion • Schädigung an Fahrflächen von Rad / Schiene → Setzungserscheinungen • Steifigkeitsänderung im Längsverlauf • Einbauqualität • Fehlende elastische Layer (USP, USM) – Aufbau des Unter-/Oberbaus • Diskontinuitäten im Fahrflächenverlauf • Inhomogener Unterbau / Untergrund • Dynamisches Fahrzeugverhalten (#Feder-Dämpfer) • Trassierung 	<ul style="list-style-type: none"> • Gleislageabweichungen • Parametrische Erregungen (Achsstand, DG-Abstand, ...) • Fremderregungen (Rundheitsabweichungen der Räder, Schienenfahrflächenfehler usw.) • Fahrgeschwindigkeit • Kurzwellige ($0.2m \leq \lambda \leq 3m$) Unstetigkeiten der Fahrbahn • Ungünstige Übertragungsfunktion Fahrbahn - Boden 	<ul style="list-style-type: none"> • Fahrflächenfehler (Schlupfwellen) • Radfahrflächenfehler (Polygone) • Stahlgüten Schienen & Räder • Reibwert Rad-Schiene • Schienenbefestigung / Schienenzwischenlage • Raddurchmesser • Berührgeometrie • Anlaufwinkel Rad-Schiene (Schlupf) • Torsionsverhalten Radsatz • Fehlende Schwellenbesohlung ? 	<ul style="list-style-type: none"> • Schienenzwischenlage • Schwellentyp • Reibwert Rad-Schiene • Berührgeometrie • Anlaufwinkel Rad-Schiene • Raddurchmesser • Schienenbefestigung / Zwischenlage • Feste Fahrbahn ?

Tabelle 1: Unterschiedliche Fahrzeug – Fahrweg-Modelle je nach Aufgabenstellung

Die Abbildung 4 zeigt die Ziele, welche man mit elastischen Schichten (Zwischenlagen, Besohlung, ...) im Oberbau beeinflussen möchte. Primäres Ziel des Einsatzes ist die Schonung von Schwelle und Schotter sowie die Bewirkung einer nachhaltig guten Gleislage. Wie im «Magischen Dreieck des Oberbaus» zu erkennen ist, können im Normalfall, aufgrund der unterschiedlichen Schwingungsfrequenzen, nicht alle drei Ziele (Lärm, Erschütterung, Verschleiss LCC) gleichzeitig erreicht werden, es muss jeweils definiert werden, welches Ziel erstrangig optimiert werden soll. Der Aufbau des Oberbaus ist meist ein Kompromiss zwischen diesen drei Zielsetzungen.

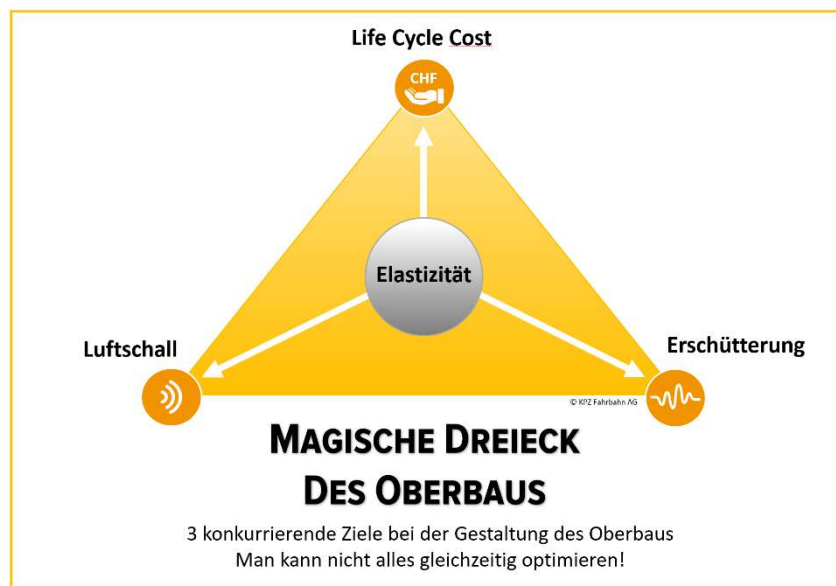


Abbildung 8: Zusammenhang des dynamischen Oberbaus

Bei der Wechselwirkung Fahrzeug – Fahrweg spielen vor allem die in Abbildung 9 dargestellten Interaktionsarten von Rad und Schiene eine entscheidende Rolle. Diese Arten der Interaktion sind massgebend beteiligt

- am Führungsverhalten der Fahrzeuge in den verschiedenen Trassierungsbereichen sowie in den Zwangspunkten des Fahrwegs (alle Arten von Weichen, Kreuzungen, Dilatationsvorrichtungen, ...);
- am Verschleiss von Rad und Schienen;
- an Fahrsicherheit, Fahrverhalten und Fahrkomfort;
- an der Entwicklung von Gleislageabweichungen;
- an der Umweltbeeinträchtigung durch Lärm und Erschütterungen.

An dieser Wechselwirkung müssen sowohl das Fahrzeug als auch das Gleis die an sie gestellten Anforderungen während der gesamten Lebensdauer erfüllen. Dies muss im gesamten Lebenszyklus des Systems Fahrzeug Fahrweg gewährleistet werden.

Für die Interoperabilität muss einwandfreie geometrische Interaktion von Rad/Schiene bzw. Rad/satz/Gleis in den verschiedenen Trassierungsbereichen gewährleistet sein. Daraus ergeben sich Vorgaben für die Beschaffung und Instandhaltung der daran beteiligten Komponenten des Fahrzeugs und des Fahrwegs. Die meisten Einschränkungen ergeben sich aus der sicheren und wirtschaftlichen Befahrbarkeit der Weichen.

Die berührungsgeometrische Interaktion befasst sich mit den verschiedenen Aspekten des Fahrzeugverhaltens in den verschiedenen Trassierungsbereichen der freien Strecken. Die Mechanismen, die sich aus der Berührung und dem Kontakt von Rad und Schiene in Verbindung mit den lauffechnischen Charakteristiken der Fahrzeuge mit ihren Fahrwerken einstellen sind mitentscheidend für die Verschleissentwicklung Rad/Schiene und das Stabilitätsverhalten der Fahrzeuge im gesamten Geschwindigkeitsbereich. Die Kontaktmechanik liefert dazu in Verbindung mit den verwendeten Stahlqualitäten und den Reibwerten vor allem die Indikatoren für die Kräfte, den Verschleiss und Schädigungen an Rad und Schiene.

Die Mechanismen, die an der Interaktion Fahrzeug – Fahrweg bzw. Rad – Schiene beteiligt sind können sowohl statischer als auch dynamischer Natur sein, Bei den dynamischen Mechanismen muss zwischen der Interaktion von Fahrzeug und Fahrweg einerseits und zum anderen der Interaktion Rad/Schiene unterschieden werden. Je nach den Massen und deren strukturellen Eigenschaften werden sich die Auswirkungen der Interaktion in unterschiedlichen Frequenz- bzw. Wellenlängenbereichen

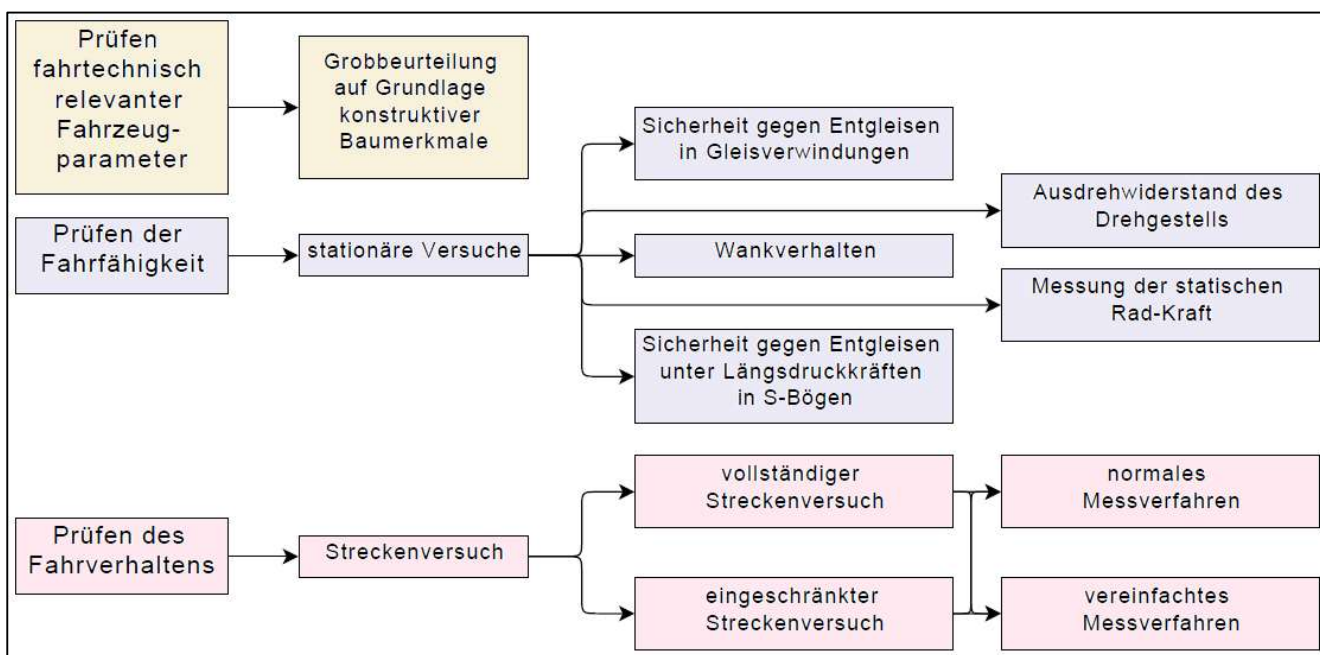


Abbildung 10: Unterscheidung der verschiedenen Prüfungsarten für die fahrtechnische Fahrzeugzulassung nach EN 14363

Die EN 14363 Abbildung 11 teilt die Prüfbereiche für das quasistatische und dynamische Verhalten bei der Fahrzeugzulassung entsprechend dieser Verhaltensweise in 4 Prüfbereiche ein. Die RTE 29001 berücksichtigt zudem einen 5-ten Prüfbereich mit den sehr kleinen Bogenhalbmessern der Normalspur Schweiz (gemäss SBB R I-50127, $R < 250\text{m}$). Danach stellen sich vor allem im Bereich der kleinen Bogenhalbmesser und entsprechen niedrigen Fahrgeschwindigkeiten schwergewichtig hohe quasistatische Kräfte und abnehmende dynamische Anteile ein. Je grösser der Bogenradius und entsprechend höher die Fahrgeschwindigkeiten sind, umso geringer werden die quasistatischen Anteile und umso bedeutender die dynamischen Anteile.

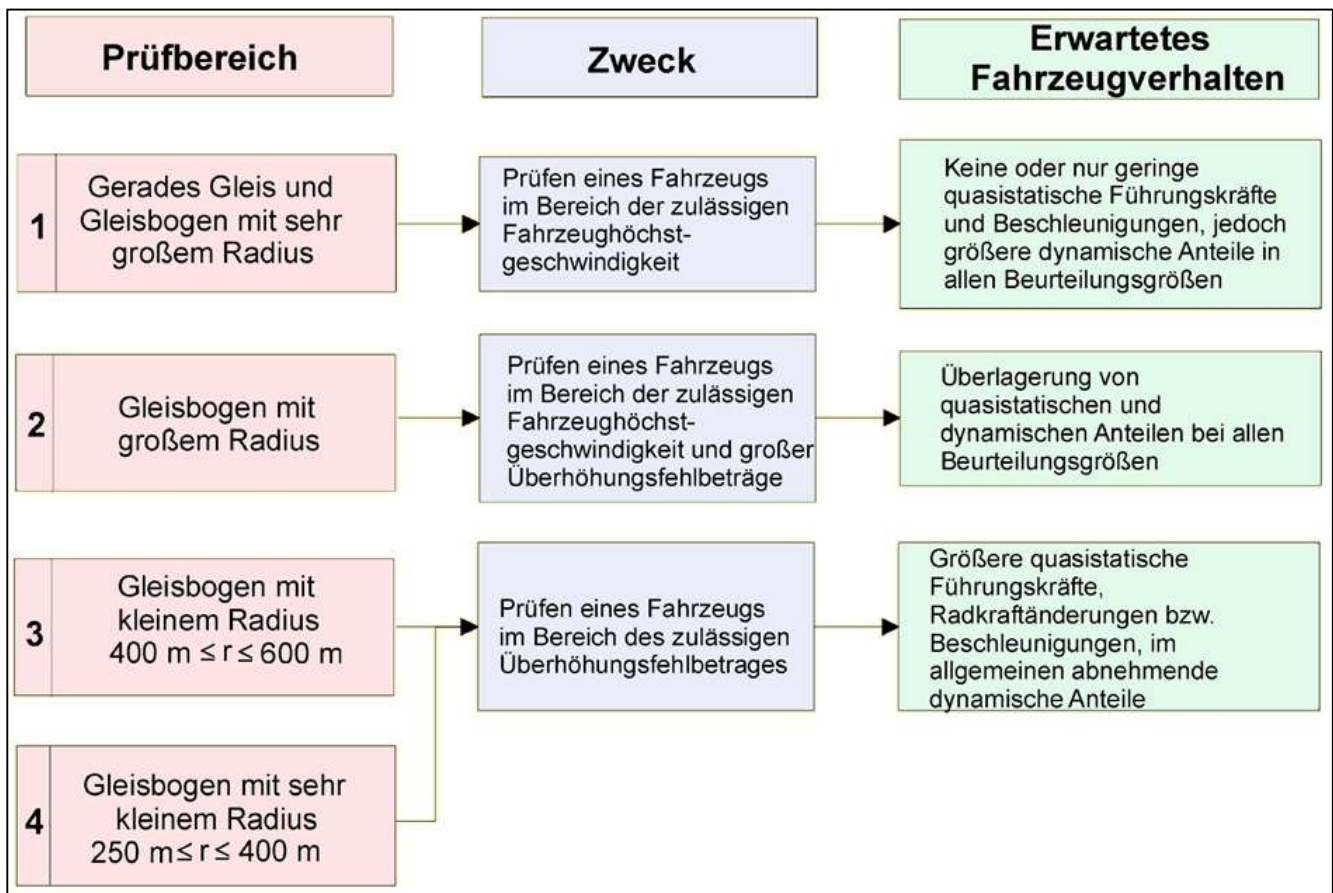


Abbildung 11: Trassierungsbereich und darin erwartete Verhaltensweisen der Fahrzeuge nach EN 14363

In der Abbildung 12 sind die Nachweisführungen und Beurteilungsgrößen für Fahrsicherheit und die Fahrbahnbeanspruchung bei der Interaktion Fahrzeug – Fahrweg aufgeführt. Für die hier aufgeführten rechnerischen Nachweise sind mehrere Voraussetzungen erforderlich:

- Modelle für die Fahrzeuge und den Fahrweg;
- Einsatzgebiete mit ihren Streckencharakteristiken;
- die nominellen Rad- und Schienenprofile;
- die Verschleisszustände der Radprofile;
- die Verschleisszustände der Schienenprofile, wenn unterschiedlich für die verschiedenen Trassierungsbereiche;
- die Gleislageabweichungen (vertikal, lateral, gegenseitige Höhenlage), wenn unterschiedlich für die verschiedenen Trassierungsbereiche;
- die Reibwerte in den verschiedenen Kontaktbereichen Rad/Schiene (falls abweichend von zum Beispiel der EN 14363).

Nachweisrechnung		Beurteilungskriterien	1	2	3	4	5	6	7	8	9
			Eigendämpfungen, Restdämpfung Kritische Geschwindigkeit	Eigenfrequenzen, Eigenvektoren	Kraftniveau		Laufgüte bzw. Fahrkomfort		Wegamplituden	Verschleisskennwerte	Sicherheit gegen Entgleisen
					Waagrecht/quer	senkrecht	Waagrecht/quer	senkrecht			
1	Laufverhalten in der Geraden	Eigenverhalten (Grenzzyklen)	x	x	(x)		(x)		(x)		
2		Dynamische Antwort auf regellose Gleislagefehler	(x)	(x)	x	x	x	x	x		
3	Quasistatisches Verhalten	Im Gleisbogen			x	x			x	x	
4		Im Gleisgegen- bogen			x	x			x		
5	Befahrbarkeit von Gleisverwindungen										x

Abbildung 12: Nachweisführungen für die Interaktion Fahrzeug – Fahrweg (Rechnung und Versuch, Sammlung R. Müller aus Arbeiten des ORE SVA B176)

3.2 Schienen

Situation:

Aufgrund der mangelnden Verfügbarkeit der Schienen bei den Herstellern wird bei den Meterspurbahnen anstelle des Schienenprofils VST36 vorwiegend standardmässig das Schienenprofil 46E1 verwendet. Einzelne Bahnen setzen bei weichen Untergründen und bei Weichen das Schienenprofil 54E2 ein. Im Bereich des Agglomerationsverkehrs (Tramverkehr) wird grösstenteils das Rillenschienenprofil Ri60 eingesetzt.

Betreffend die Schienenhärte werden bei den Bahnen vor allem zwei Stahlgüten eingesetzt, ein Teil setzt die Schienen mit der Härte 260 ein, ein anderer Teil die Schienen mit der Härte 350HT. Einzelne Bahnen mit hohen Achslasten und kleinen Bogenhalbmessern setzen standardmässig 400HT Schienen ein. Um häufige Wechsel der Stahlgüte zu vermeiden, verfolgen viele Bahnen die Strategie nur eine Stahlgüte einzusetzen.

Schädigungen:

Die Hauptschädigungen an der Schiene bei Meterspurbahnen sind die Schlupfwellen bzw. Schienenriffel und der Verschleiss. Da oft der Unterschied zwischen Riffel und den Schlupfwellen bei den Bahnen nicht bekannt ist, werden folgend die wichtigsten Schädigungen gemäss EN 17397-1 beschrieben:

Riffel 2201 Kodierung gemäss EN 17397-1 Handhabung Schienenfehler

«Riffel wird durch Verschleissmechanismen aufgrund der dynamischen Wechselwirkung zwischen Zug und Gleis in Abhängigkeit von den Steifigkeitseigenschaften des Gleises/Fahrzeugsystems verursacht. Sie sind durch eine pseudoperiodische Abfolge heller Überhöhungen und dunkler Vertiefungen auf der

Fahrfläche gekennzeichnet und variieren im Allgemeinen von 10 mm bis 100 mm zwischen den Überhöhungen. Sie können an jeder Stelle auftreten.[2]»

Bei Meterspurbahnen haben die Riffel eine Wellenlänge von 2 bis 8 cm und Tiefen von 0.01 bis 0.4mm. Sie treten auf der Geraden oder in Gleisbögen mit grossen Radien auf beiden Schienen auf. Die Riffel entstehen durch Adhäsionsschlupf und sind meist im Beschleunigung-/Verzögerungsbereich zu finden.

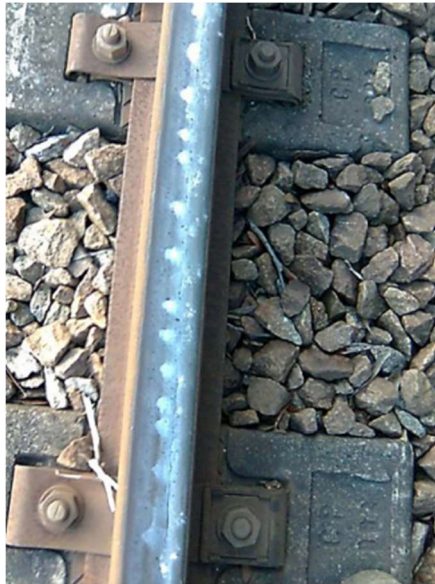


Abbildung 13: Riffel – 2201

Schlupfwellen 2202 Kodierung gemäss EN 17397-1 Handhabung Schienenfehler

«Langriffel werden durch Verkehrsbelastung verursacht und ihre Ausbreitung ist abhängig von Kurvenradius, Überhöhungsfehlbetrag/Überhöhung, Stahlsorte, Reibeigenschaften und Fahrzeugeigenschaften. Sie sind durch Absenkungen in der Fahrfläche gekennzeichnet, die mehr oder weniger ausgeprägt und ungleichmässig im Verhältnis zu einem idealen geradlinigen Profil sind, und weisen allgemein zwischen 30 mm und 1 000 mm Abstand zwischen den Riffeln auf. Sie treten allgemein an der inneren Schiene in Kurven und im geraden Gleis auf. [2]»

Bei Meterspurbahnen haben die Schlupfwellen eine Wellenlänge von 5 bis 30cm und Tiefen von etwa 0.1 bis 1mm. Sie treten überwiegend auf der Innenschiene in engen Bögen kleiner 250m auf. Die Schlupfwellen entstehen durch die Relativbewegung zwischen innerem und äusserem Rad in der Kurve.





Abbildung 14: Schlupfwellen Bogeninnenschiene

Übermässiger seitlicher Verschleiss (Seitenverschleiss) 2203 Kodierung gemäss EN 17397-1 Handhabung Schienenfehler

Übermässiger Materialverschleiss wird durch Reibung zwischen Rad und Schiene aufgrund von Gestaltungskompromissen (gemischter Verkehr) verursacht. Die Ausbreitung ist abhängig von Kurvenradius, Überhöhungsfehlbetrag/Überhöhung, Stahlsorte, mangelhafter Schmierung und Radabstand der Fahrzeuge. Er ist durch die Reduzierung des Schienenprofils an der Fahrkante gekennzeichnet. Es gilt als Fehler, wenn sein Ausmass schädlich für die Gleisstandhaltung ist (übermässige Spurerweiterung), wahrscheinlich zu einem Bruch durch Schwächung des Profils führt (beeinträchtigt die untere Kehle des Kopfs) oder die Kontaktgeometrie so verschlechtert, dass die Entstehung von Rollkontaktermüdung erheblich erhöht wird. Er tritt an der Aussenseite von Kurven mit kleinem Radius aufgrund hoher Reibung zwischen Rad und Schiene auf. Ungleichmässiger seitlicher Verschleiss kann alternativ an beiden Schienen gerader Strecken durch das Schlingern von Fahrzeugen verursacht werden.[2]



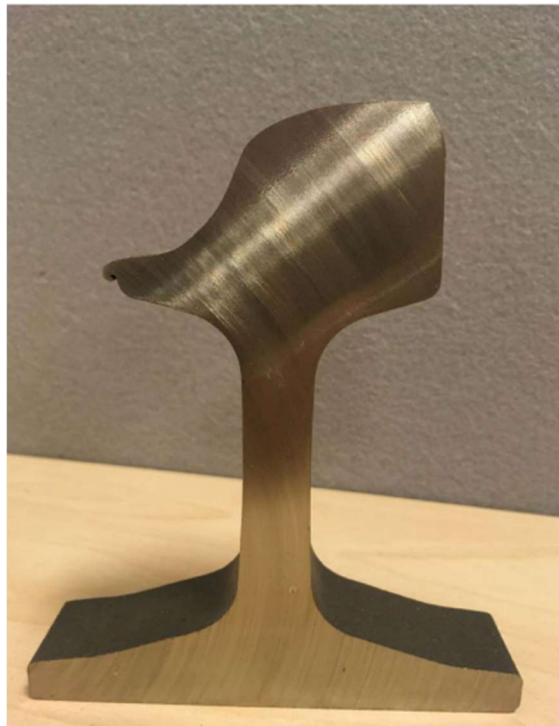


Abbildung 15: Übermässiger seitlicher Verschleiss – 2203

Verschleiss Schienenkopf 2204 Kodierung gemäss EN 17397-1 Handhabung Schienenfehler

Übermässiger vertikaler Verschleiss wird durch Verkehrslasten und unzureichende Stahlqualität im Verhältnis zum Verkehr verursacht. Er schreitet mit der Verkehrslast und dem Reprofilieren der Schienen voran. Er tritt üblicherweise an der unteren Schiene in Bögen mit kleinem Radius aufgrund von Gestaltungskompromissen auf. Dies ist nicht mit Stauchen zu verwechseln (223).[2]



Abbildung 16: Verschleiss Schienenkopf – 2204

Wissen:

Bei der Wahl der Schienenhärte stellt sich die Frage, wie weit die harten Schienen den Verschleiss an den Rädern fördern. Bei den europäischen Bahnen sind üblicherweise die Räder weicher als die Schiene. Zu diesem Thema hat es bereits 2015 Untersuchungen und Präsentationen bei den Normalspurbahnen gegeben, so z.B. an der internationalen Schienenfahrzeugtagung in Dresden [3].

Grundsätzlich konnte bei den Normalspurbahnen aufgezeigt werden, dass durch die härteren Schienen weniger Schäden auf den Schienenfahrflächen entstehen und somit ebenfalls die Räder weniger Verschleiss und Rollkontaktermüdungsschäden aufweisen. D.h. dass es weniger (ungeplanten) Instandhaltungsaufwand und sich längere Standzeiten für beide Kontaktpartner einstellen.

Wie weit dies auf die Meterspurbahnen mit den im Vergleich zu den Normalspurbahnen sehr kleinen Bogenradien übertragen werden kann, wird im Forschungsprojekt Interaktion Fahrzeug-Fahrweg der Systemführerschaft RAILplus genauer erforscht.

Betreffend den Verschleiss haben verschiedene Untersuchungen bei Normalspurbahnen gezeigt, dass die härteren Schienen bei gleichen Beanspruchungsverhältnissen einen massiv kleineren Verschleiss aufweisen. Dies wird ebenfalls durch Erfahrungen bei verschiedenen Meterspurbahnen bestätigt. Der Verschleiss kann durch den Einsatz von Schienen mit der Brinellhärte 350HT anstelle von solchen mit der Brinellhärte 260 massiv reduziert werden. Die Verminderung des Verschleisses bei Schienen mit der Brinellhärte 400HT gegenüber jenen mit der Brinellhärte 350HT wird aufgrund von Erfahrungen bei Meterspurbahnen auf ca. 25% geschätzt. Zudem wird ebenfalls die Schlupfwellenbildung in engen Bögen durch den Einsatz von kopfgehärteten Schienen (350HT und 400HT) stark vermindert (z.B. Testbogen RhB).

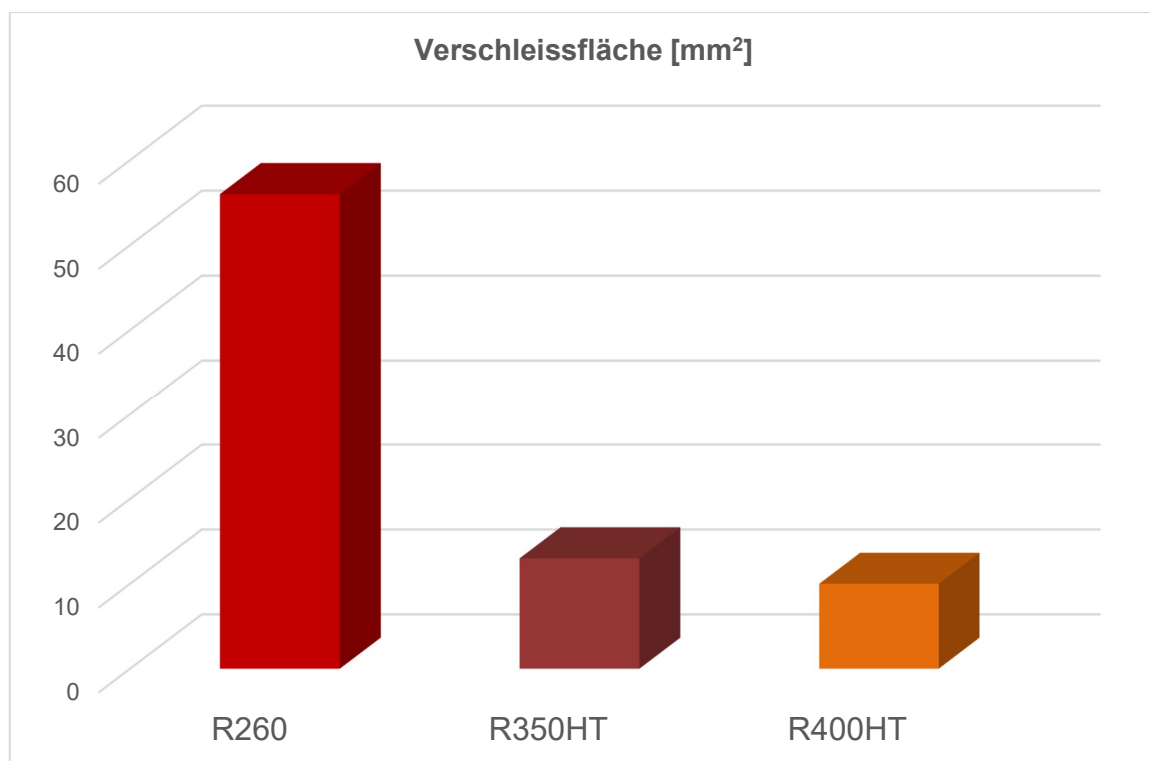


Abbildung 17: Einfluss der Stahlhärte auf den Schienenverschleiss

Es ist einzig zu beachten, dass höherfeste Stähle kerbempfindlicher sind und empfindlicher auf thermische Beanspruchungen (hoher Schlupf durch Traktion und Bremsen) reagieren. Dies ergibt eine höhere Gefahr für Rissbildung an den Fahrflächen der Schienen. Durch fehlenden oder reduzierten Verschleiss führt dies zum Rissfortschritt und in der Folge zum Bruch der Schienen.

Empfehlung:

Gerade bei höheren Verkehrsbelastungen kann das Schlupfwellenwachstum und der Verschleiss durch den Einsatz höherfester Stähle der Schienen in engen Bögen deutlich verlangsamt werden.

Schweissen:

Die Umfrage der Meterspurbahnen zeigt, dass nahezu alle Bahnen die Schienen lückenlos verschweissen. Dabei werden Radien von bis zu 40m angegeben.

Bei den Bahnen kann zudem festgestellt werden, dass durch die Systemumstellung bei den Sicherungsanlagen die Isolierstösse zunehmend Achszählern weichen.

3.3 Zwischenlagen Befestigungen

Zwischenlagen (Zw) werden unmittelbar unterhalb des Schienenfusses angeordnet und haben die Aufgabe eine Schädigung der Schwellen durch zu hohe Kontaktspitzendrücke zu vermeiden. Bei Betonschwellen soll dadurch ein Abplatzen der Betonfläche im Kontaktbereich verhindert werden. Zwischenlagen wurden zur Erfüllung dieser Aufgabe in der Vergangenheit sehr steif mit einer statischen Federziffern von 500 – 1000 kN/mm hergestellt. Durch den Einbau von weicheren, hochelastischen Zwischenlagen kann in dieser Ebene zusätzliche Elastizität in den Oberbau eingebracht werden, um hochfrequente Schwingungen abzufedern und zu dämpfen, sowie einer Riffel- bzw. Schlupfwellenbildung auf der Schienenoberfläche vorzubeugen. Je mehr Federweg zugelassen wird, desto grösser ist die mit der Elastizität verbundenen Einsenkung der Schiene und damit auch die Lastverteilung über mehrere Schwellen. Für eine nennenswerte Erhöhung der gesamten vertikalen Oberbauelastizität ist eine statische Federziffer der Zwischenlage von 25 bis 100 kN/mm notwendig. Im Bogen resultieren aus den lateralen Kräften infolge der Kurvenfahrt jedoch sehr grosse seitliche Schienenkopfauslenkungen. Vor allem bei sehr kleinen Kurvenhalbmessern ist das problematisch. Deshalb müssen in diesem Fall auch stärkere Spannklemmen verwendet werden, RTE 22540 [4]. Um einer starken Verkipfung der Schienen vorzubeugen und auch die Zwischenlagen vor einer Überbeanspruchung infolge hoher Randspannungen zu schützen, weisen Schienenbefestigungssysteme mittlerweile einen integrierten Kippschutz auf, um bei Extremlastsituationen eine Überlastung der Spannklemme zu vermeiden. Dies gilt insbesondere für das Schienenprofil 54E2, dessen Verhältnis Schienenhöhe zur Schienenfussbreite eher ungünstig für seitliche Belastungen ist. Sind die Horizontalkräfte aufgrund der Spurführungskräfte wesentlich grösser als im Normalfall, so liegt der Lastangriffspunkt ausserhalb der Zwischenlage, was zu extremen Verformungen und letztlich auch zu Spannklemmenbrüchen führen kann. Dabei ist dann die seitliche Schienenfussverschiebung für den Bruch verantwortlich. Bei der Normalspur kann dieses Phänomen bei Radien unter 200 m festgestellt werden. Da bei Meterspurbahnen die Führungskräfte im Bogen aufgrund der geringeren Achslasten deutlich kleiner sein dürften, sollte dieses Phänomen eher nicht auftreten, zumindest sind dem Autor bis dato keine Fälle von Spannklemmenbrüche in engen Bögen bekannt.

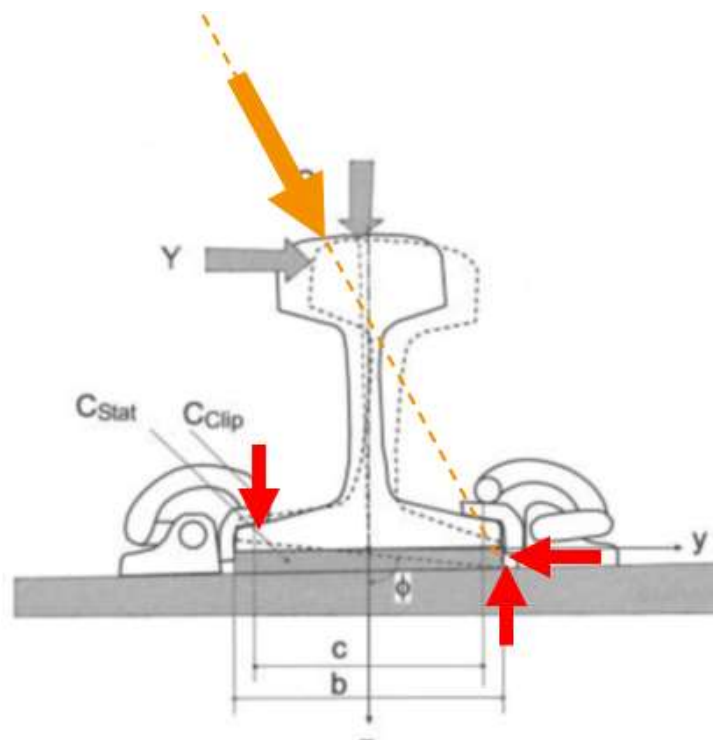


Abbildung 18: Kräftegleichgewicht Schienenbefestigung Quelle: Stefan Werner, KPZ

Die meisten Bahnen setzen die harten Zwischenlagen mit einer Steifigkeit von 700 kN/mm ein. Vier Bahnen verwenden bei Betonschwellen weiche Schienenzwischenlagen mit einer Steifigkeit von 85 resp. 100 kN/mm mit dem Ziel die Schlupfwellenbildung in den engen Bögen zu reduzieren.

Weil beim Einsatz der weicheren Zwischenlage eine Zunahme des Lärms festgestellt wurde, sind einzelne Bahnen auf den Einbau von mittelsteifen Zwischenlagen mit einer Steifigkeit von 200 kN/mm übergegangen. Messungen der Gleisabklingrate haben bei der Normalspur ergeben, dass die Abklingraten bei weiche Zwischenlagen ($C_{stat} \approx 100$ kN/mm) in Kombination mit unterhalb der Grenzkurve gemäss EN ISO liegen und damit die Norm nicht erfüllen. Die Folge ist zusätzlicher Lärm gegenüber einer harten Zwischenlage in Kombination mit Sk14. Im Rahmen einer noch nicht abgeschlossenen Studie bei der SOB wurde der Einfluss der Spannklemme auf die Abklingrate untersucht. Wird die Anpresskraft durch Verwendung einer Schwerlastspannklemme erhöht (hier SL1 der Firma Schwihag), so erfüllt die Kombination weiche Zwischenlage mit SL1 die Norm. Sämtliche Terzspektren der Abklingraten lagen oberhalb der Grenzkurve. Ob der Einsatz einer Sk121 in Verbindung mit weichen Zwischenlagen auch bei der Meterspur eine Verbesserung der Lärmemission darstellt, ist noch nicht untersucht worden.

Sämtliche Verlegearten mit den dazugehörigen Befestigungsmitteln sind in der RTE 22540 unter Ziffer 6.5 beschrieben und dargestellt.

Empfehlung:

Die Härte der Zwischenlage ist einerseits durch die Anforderung an die Fahrbahn Lärm- oder Verschleissarm andererseits durch die Gesamtelastizität gegeben. Neue Produkte auf dem Markt, welche versuchen verschiedenen Forderungen gerecht zu werden, zeigen bei Normalspurbahnen gute Resultate. In diesem Bereich gibt es für die Meterspurbahnen noch Wissenslücken, welche durch das Forschungsprojekt geschlossen werden sollen.

3.4 Schwellen

Situation:

Tendenziell werden bei den Meterspurbahnen anstelle der Holzschwellen Betonschwellen eingesetzt. Auf den Zahnradstrecken sind Stahlschwellen Standard.

FFU-Kunstholzschwellen wurden bereits als Ersatz von Holzschwellen auf Brücken und bei geologisch schlechtem Untergrund verwendet.

Kunststoffschwellen wurden gemäss Umfrage noch keine eingebaut.

Beim Wechsel von Holz- auf Betonschwellen wird oft eine Zunahme der Lärmemissionen insbesondere das Kurvenkreischen festgestellt.

Schädigungen:

Die meisten Schädigungen bei den Schwellen treten bei den Holzschwellen aufgrund des Alters auf, alte Holzschwellen weisen starke Risse auf, sind teilweise stark durchgebogen, so dass die Spurweite vermindert ist, und es gibt lose Befestigungen. Bei Stahlschwellen kann es gerade im Bereich von Strassen aufgrund von Salz zu starker Korrosion kommen, was oft zu Rissen führt.

Wissen:

In der EU wurde bereits ein Verbot von Kreosot zur Imprägnierung von Holzschwellen erlassen, es ist davon auszugehen, dass die Schweiz diesem Entscheid folgt. Eine Alternative zu dem krebserregenden Kreosot gibt es zurzeit nicht, unimprägnierte Holzschwellen weisen nur eine kurze Nutzungsdauer aus und sind daher nicht wirtschaftlich.

Die dreimal schwereren Betonschwellen weisen eine bessere Lagestabilität gegenüber den Holzschwellen auf, das Gewicht führt zu weniger dynamischen Kräften im Gleiskörper. Jedoch wird aufgrund der höheren Belastungen auf das Planum ein gut tragfähiger Unterbau vorausgesetzt.

Um die höhere Steifigkeit der Betonschwelle zu kompensieren und die Lastverteilung auf das Planum zu verbessern wird der Einsatz von zusätzlichen elastischen Elementen empfohlen (weiche Zwischenlagen, Schwellenbesohlung, ...).

Nach der RTE 22541 ist für Radien $< 200\text{m}$ eine gleichmässige seitliche Atmung von 20mm zulässig. In der Praxis hat sich gezeigt, dass in der Regel keine gleichmässige Atmung stattfindet. Für eine gleichmässige Atmung ist eine hohe Rahmensteifigkeit erforderlich. Y-Schwellen weisen durch die Ausfachung der Schienen eine hohe Rahmensteifigkeit aus, dies führt zu einer gleichmässigen Bogenatmung und entsprechend zu weniger Gleisverdrückungen. In der Praxis kann es jedoch bei Y-Schwellen mit dem Halten der Überhöhung zu Problemen der Gleislage führen.

Betonschwellen weisen gegenüber anderen Schwellen einen hohen Querverschiebewiderstand auf. Dieser kann durch den Einsatz von Schwellenbesohlungen noch erhöht werden. Zudem können bei engen Radien Schwellenkappen angebracht werden.

Das weisse Einfärben der Schienen kann in gewissen Situation helfen (ca. -5° Schienentemperatur), dass der vorhandene Querverschiebewiderstand genügend ist, löst aber grundsätzliche Probleme von Gleisverdrückungen nicht.

Bei den meisten Meterspurbahnen weist die Schiene eine Neigung von 1:20 auf, einzelne Bahnen erzielen gute Erfahrungen in Bezug auf Verschleiss mit der Neigung 1:40. Ein Wechsel der Schienenneigung kann zu grossem Verschleiss führen, es ist wichtig, dass die Radbandagen entsprechend auf die Schienenneigung abgestimmt sind.

Empfehlung:

Um langfristig eine stabile Gleislage mit gutem Querverschiebewiderstand zu erzielen, ist bei Einsatz von Betonschwellen ein guter Unterbau empfehlenswert.

Wie weit die Betonschwellen die Eigenfrequenz des Oberbaus in Bezug auf Lärm verändern und welches die optimale Schienenneigung in Zusammenhang mit der Radbandage ist, wird im laufenden Forschungsprojekt näher untersucht.

3.5 Schwellenbesohlung

Situation:

Die Schwellenbesohlung wird bei den Meterspurbahnen aktuell noch wenig und wenn im Rahmen von Versuchen eingesetzt. Dort wo diese eingesetzt wird, kommt die steife Besohlung zum Zug.

Wissen:

Bettungsmodul

Auf den bestehenden Hauptstrecken mit konventionellem Schotteroberbau (Oberbau, Schwelle B 70) ist ein Bettungsmodul von $C_{\text{Unterbau}} = 0,10 \text{ N/mm}^3$ gegeben, womit unter einer Radsatzkraft von 200 kN eine Schienendurchbiegung (Einsenkung) von 1,0 – 1,2 mm erreicht wird [5]. Eine noch bessere lastverteilende Wirkung der Schiene wird bei einem Bettungsmodul von $C_{\text{Gesamt}} = 0,05 \text{ N/mm}^3$ aktiviert [6]. Der Einsatz einer Besohlung ist beim Unterbau mit geringer Tragfähigkeit ($U_{\text{Unterbau}} < 0,05 \text{ N/mm}^3$) nicht sinnvoll; d.h. der Unterbau (Schotter und Untergrund) soll einen Bettungsmodul von $C_{\text{Unterbau}} > 0,05 \text{ N/mm}^3$ aufweisen. Bei einem Unterbau aus Beton und Schotter oder auf Neubaustrecken wächst der Bettungsmodul auf über $0,35 \text{ N/mm}^3$ an [7]. In diesem Fall können weichere Schwellenbesohlungen eingebaut werden. Unter Verwendung der Formel für seriell hintereinander geschaltete Federn

$$1/C_{\text{Gesamt}} = 1/C_{\text{Unterbau}} + 1/C_{\text{Sohle}} + (1/C_{\text{Zw}} \sim 0) \quad (\text{Gleichung 1})$$

lässt sich die minimale Steifigkeit der Schwellenbesohlungen so bestimmen, dass der zulässige Bettungsmodul $C_{\text{Gesamt}} = 0,05 \text{ N/mm}^3$ (ohne elastische Schienenbefestigung, d.h. $1/C_{\text{Zw}} \sim 0$) unter dem Einsatz von Schwellenbesohlungen nicht unterschritten wird.

Das Verformungsverhalten der Schichten unter der Schwelle kann auch durch den Bettungsmodul $C=P/s$ aus der Belastung P und der elastischen Einfederung s beschrieben werden. Die unten aufgeführte Tabelle 1 enthält Richtgrößen für Bettungsmodul C im Unterbau/Untergrund in Abhängigkeit der Bettungsqualität. Dies muss berücksichtigt werden, wenn durch den Einsatz von elastischen Elementen der Bettungsmodul im ungünstigen Sinne beeinträchtigt wird.

Qualität der Bettung	Unterbau/Untergrund	Bettungsmodul C [N/mm ³]
sehr schlecht	Weicher Ton, organische Böden, leichtkörniger Sand	< 0.05
schlecht	Bindiger halbfester Ton, Schluff, lockerer Sand	≥ 0.05
gut	Lehmiger und sandiger Kies	≥ 0.10
sehr gut	Kiessand, Schutzschicht	≥ 0.15
Betonsohle	Brücken, Tunnel, Teste Fahrbahn	≥ 0.30

Tabelle 2: Richtgrößen für den Bettungsmodul in Abhängigkeit der Bettungsqualität

Einsatz der Schwellenbesohlung

Um die Verfügbarkeit der Strecken durch geringe Instandhaltungsaufwände zu gewährleisten, sind hochwertige Oberbaukomponenten notwendig. Nach der Verwendung hochwertiger Schienenstähle und Schwellen aus vorgespanntem Beton bildet der Schotter das schwächste Glied im Eisenbahnfahrweg. Durch den Einsatz von Schwellenbesohlungen, die aus Elastomeren hergestellt und an der Unterseite der Schwelle vollflächig befestigt werden, wird der Schotter geschont. Die Schotterschonung kann im Wesentlichen durch zwei Effekte erklärt werden. Zum einen durch eine Vergrößerung der Kontaktfläche zwischen Schwellenunterseite und oberster Schotterlage und zum anderen durch eine Vergrößerung der Biegelinie. Um die Kontaktfläche massgeblich zu vergrößern, sind plastische Schwellensohlen notwendig, die eine möglichst schonende Einbettung der Schotterkörner ermöglichen. Für eine ideale Lastverteilung im Gleis durch eine Vergrößerung der Biegelinie sind dagegen hochelastische Schwellensohlen optimal. Unabhängig von den oben genannten Materialeigenschaften tragen Schwellenbesohlungen generell zu einem homogeneren Gleis mit weniger Hohlwegen bei. Eine Zusammenfassung der Hauptanwendungsbereiche ist in Tabelle 3 aufgeführt.

Verwendungsbereiche der Schwellensolehnen	Schwellensolehlentyp		
	Weich	Mittel	Starr
Verbesserung der Gleisqualität			
Weichen und Kreuzungen			
Übergangsbereiche			
Bereiche mit reduzierter Schotterdicke			
Reduzierung von Schlupfwellenbildung			
Reduzierung von Körperschall			

Tabelle 3: Hauptverwendungsbereiche der Schwellensolehnen

In der Schweiz kommen im Meterspurgleis ausschliesslich steife Besohlungen heute zum Einsatz, da diese bereits ihre Gebrauchstauglichkeit im Gleis bei der Normalspur mehrfach unter Beweis gestellt haben und zugelassen sind. Hersteller dieser steifen Besohlungen sind Tiflex, Paul-Müller und Getzner Werkstoffe. Bei der RhB ist erstmals der Einsatz von elastischen Besohlungen im Meterspurbereich geplant und wird voraussichtlich 2023 im Rahmen einer Betriebserprobung vom KPZ überwacht und begleitet.

Die Klassifizierung einer Besohlung gemäss deren statischen Bettungsmoduls kann Tabelle 4 entnommen werden. Die dargestellten Werte beziehen sich allerdings auf Messergebnissen mit Prüfparametern der Normalspurbahn. Für die Meterspur weisen nur die Datenblätter von Getzner entsprechende Werte auf.

Schwellensolehlentyp	Statische Bettungsmoduln C_{stat}
Steif	$0,25 \text{ N/mm}^3 \leq C_{stat} < 0,45 \text{ N/mm}^3$
Mittel	$0,15 \text{ N/mm}^3 \leq C_{stat} < 0,25 \text{ N/mm}^3$
Weich	$0,08 \text{ N/mm}^3 \leq C_{stat} < 0,15 \text{ N/mm}^3$
Sehr weich (nicht Bestandteil der IRS)	$C_{stat} < 0,08 \text{ N/mm}^3$

Tabelle 4: Klassifizierung des statischen Bettungsmoduls der Schwellensolehnen [8]

Einfluss Schwellenbesohlung auf den Bettungsmodul

Unter Verwendung der Formel für hintereinander geschaltete Federn gemäss Gleichung 1 wird der zulässige Bettungsmodul $C_{Gesamt} = 0,05 \text{ N/mm}^3$ (ohne elastische Schienenbefestigung, d.h. $1/C_{zw} \sim 0$) unter dem Einsatz von Schwellenbesohlungen folgender minimaler Steifigkeit nicht unterschritten:

Unterbau	Bettungsmodul des Unterbaus C_{unterbau} [N/mm ³]	minimaler Bettungsmodul der Schwellenbesohlung C_{sohle} [N/mm ³]	min. Bettungsmodul des Gesamtsystems C_{gesamt} [N/mm ³]
Schotter und Untergrund (schlecht tragfähig)	$\leq 0,05$	kein Einbau	0,05
	0,06	$\geq 0,30$	
Schotter und Untergrund (gut tragfähig)	0,10	$\geq 0,10$	
Schotter und Untergrund (sehr gut tragfähig)	0,15	$\geq 0,08$	
NBS oder Schotter auf Betonplatte (z.B. auf Brücken, im Tunnel)	0,35	$\geq 0,058$	

Tabelle 5: Minimaler Bettungsmodul der Schwellensohle in Abhängigkeit des Unterbaus (Leykauf G. ⁵)

Schwellenbesohlungen sind eine Weiterentwicklung des klassischen Eisenbahnoberbaus und wurden erstmals versuchsweise im Jahr 1996 zur Schonung des Schotters im Streckennetz der ÖBB eingesetzt⁴. Die elastischen Werkstoffe werden direkt unterhalb der Gleisschwelle angebracht. Diese können entweder bei der Schwellenfertigung direkt in den Frischbeton eingelegt, oder nachträglich an der Unterseite aufgeklebt werden. Durch die Verwendung von Schwellenbesohlungen wird eine zusätzliche und dauerhafte Elastizität in den Oberbau eingebracht, welche die Lebensdauer des Schottergleises und die Intervalle zwischen den Stopfarbeiten verlängert. Die elastische Schwellenbesohlung ermöglicht unter der Radlast des Zuges eine grössere Schieneneinsenkung und führt auf Grund dessen zu einer Verlängerung der Biegelinie der Schienen, was wiederum eine gleichmässige Lastverteilung auf mehrere Schwellen bedeutet. Durch die verlängerte Biegelinie wird die Stützpunktkraft und somit die Schotterpressung unter der Schwelle reduziert.

Die Wirkungsweise steifer, plastischer Besohlungen

Damit sich die oberste Schotterlage in die Besohlung einbetten kann, muss die Schwellensohle eine gewisse Plastizität aufweisen. Die SLB-Typen (SLB 3007 und SLB 2210) gehören zur Kategorie der plastischen Schwellenbesohlungen. Diese Einbettung wirkt sich auch sehr positiv auf den Querverschiebewiderstand im Gleis aus. Wie Untersuchungen vom KPZ gezeigt haben, ist der Querverschiebewiderstand mit Besohlung höher als ohne diese Einbettungsmöglichkeit. Der höhere QVW reduziert die Gefahr einer Gleisverwerfungen im Sommer und führt zu einer gleichmässigeren Bogenatmung mit weniger Streuung. Bei plastischen Besohlungen wurde die wirksame Kontaktfläche zum Schotter mit einem Anteil im Bereich von mehr als 25 % in diversen Untersuchungen bestimmt. Ohne die plastischen Eigenschaften des Sohlenmaterials sind die Kontaktflächen in der Regel weitaus geringer. Abbildung 19 zeigt vergleichend die Kontaktflächen ohne Sohlen, mit EVA-Sohlen und PUR-Sohlen (gleicher Steifigkeit) sowie die resultierende Schotterkontaktspannung.

⁴ Auer F., Zur Verschleissreduktion von Gleisen in engen Bögen, Dissertation 2010

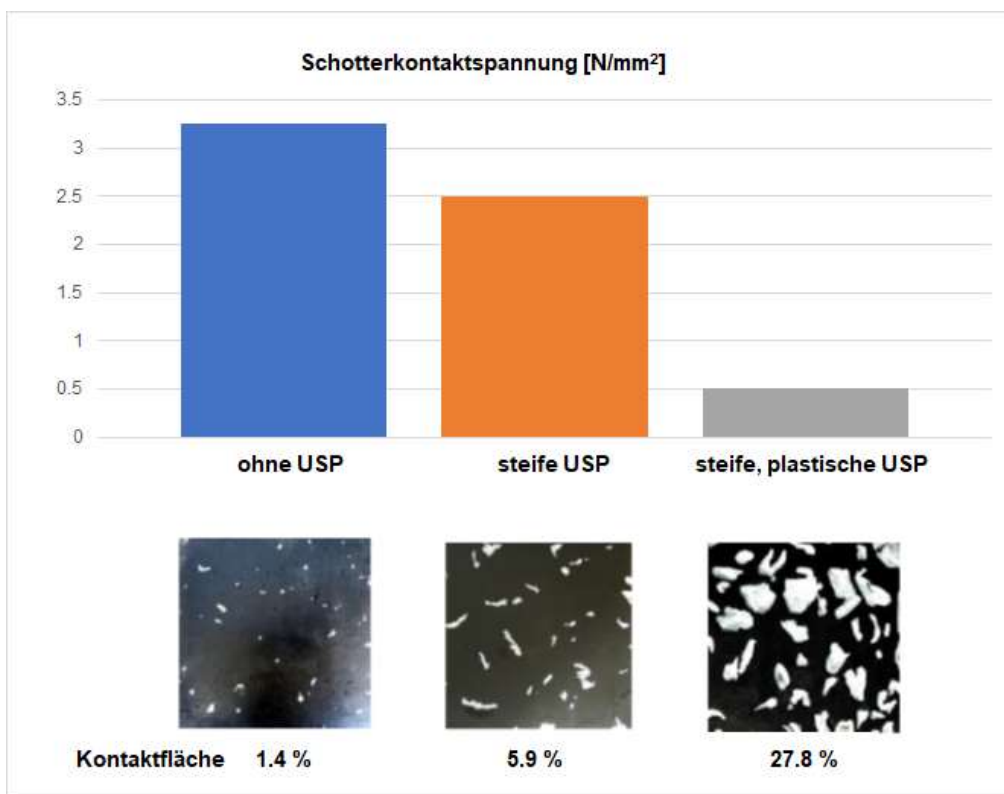


Abbildung 19: Schotterkontaktspannung in Abhängigkeit der Kontaktfläche

Gerade in engen Bögen und generell auf Strecken mit hohem Verkehrsaufkommen wird zur Schotter-schonung, und damit zur Verbesserung der LCC, unbedingt der Einsatz von plastischen Schwellen-be-sohlungen empfohlen. Körperschall und Erschütterungen werden mit steifen Schwellentypen, unab-hängig von ihren plastischen Eigenschaften, jedoch nicht reduziert. Für diesen Anwendungsbereich müssen hochelastische Produkte verwendet werden.

Die Wirkungsweise elastischer Besohlungen

Schwellenbesohlungen stellen eine kostengünstige Möglichkeit dar, wenn es darum geht, die Nachgie-bigkeit des Oberbaus zu erhöhen. Sie werden als zusätzliche elastische Elemente zwischen Schwelle und Schotter angeordnet. Durch den zusätzlichen elastischen Layer wird die Biegelinie vergrößert, wodurch mehr Schwellen zur Lastabtragung aktiviert werden (siehe Abbildung 20). Wie zu erkennen ist, wird die Radlast ohne Besohlung über fünf Schwellen in den Schotter abgeleitet, wohingegen mit elastischer Besohlung sieben bis acht Schwellen aktiviert werden. Damit reduziert sich die maximale Stützpunktkraft direkt unter der Radlast deutlich und trägt somit zu einer Schonung des Schotters bei. Langfristig sind dadurch auch weniger Schwellenhohllagen zu erwarten, was zu einem homogeneren Gleis führt. Die Verschlechterungsrate ist gegenüber einem unbesohlenen Gleis deutlich geringer. Die Stopfzyklen können dadurch verlängert werden, was sich in niedrigeren LCC-Kosten widerspiegelt bei gleichzeitiger längerer Verfügbarkeit des Gleises.

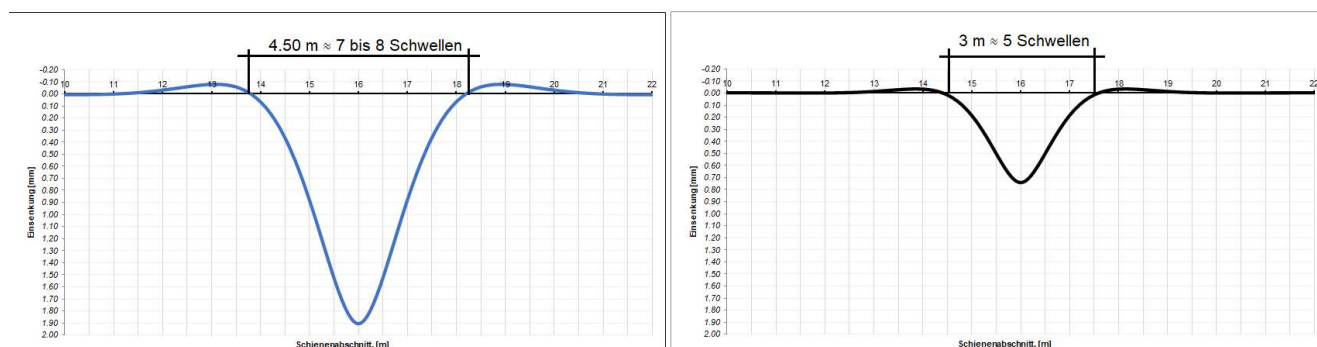


Abbildung 20: Biegelinie unter Einzellast mit (blau) und ohne (schwarz) elastischer Schwellenbesohlung

Mit hochelastischen Sohlen werden die Schwellen vom Schotterbett ausserdem dynamisch entkoppelt. Zur Reduzierung von Körperschallemissionen und Schwingungen in Gebäuden sind Schwellensohlen somit eine kostengünstige Alternative zu Unterschottermatten (im Frequenzbereich über 50 Hz). Inwieweit die Lärmemission von hochelastischen Schwellenbesohlungen beeinflusst wird, ist noch nicht hinreichend getestet worden. Hier besteht sicherlich noch Forschungsbedarf. Leiser dürften sie kaum sein.



Abbildung 21: Schotterzustand nach 100 Mio. Lasttonnen mit und ohne Besohlung

Weitere Anwendungsfelder für Schwellenbesohlungen

Schwellenbesohlungen mit zu- oder abnehmender Steifigkeit sind ein effizientes Mittel, um den Übergang zu optimieren und eine reibungslose Verteilung der dynamischen Belastung zu gewährleisten. Allerdings sind momentan nur steife Besohlungen ohne Weiteres einsetzbar. Der Einsatz von mittelsteifen oder weichen Besohlungen muss zurzeit immer noch im Rahmen einer Betriebserprobung bzw. in Abstimmung mit dem BAV überwacht werden. Plastische Besohlungen eignen sich aber sehr gut den Schotter im Anschlussbereich zu Bauwerken oder Fester Fahrbahn zu schonen, indem dynamische Spannungsspitzen aufgrund der Steifigkeitsänderung in der Fahrbahn über die bereits angesprochene Kontaktflächenvergrößerung abgemindert werden.

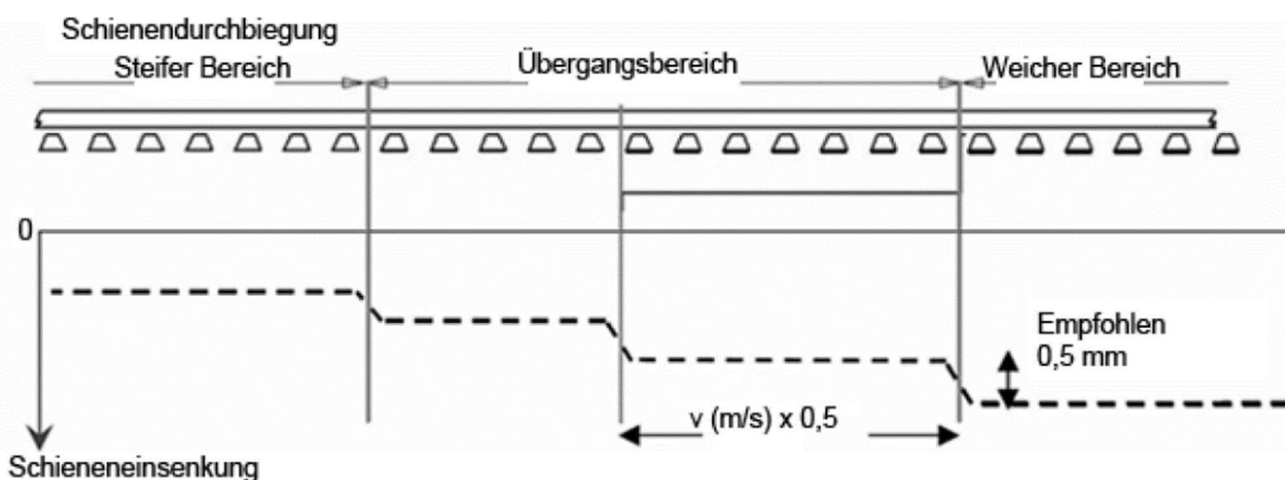


Abbildung 22: Typische Gestaltung eines Übergangs

Ein weiterer Einsatzbereich sind engen Bögen. Insbesondere bei Betonschwellen sind auf der Innenschiene Schlupfwellen zu beobachten. Sie erhöhen den Gleisverschleiss, den Instandhaltungsaufwand und den Geräuschpegel. Messungen bei der BLS (Normalspur) haben gezeigt, dass steife Besohlungen in Kombination mit weichen Zwischenlagen die dynamischen Parameter (z.B. Entkopplungseffekt)

des Rad-Schiene-Systems signifikant verändern, was in der Regel zur Veränderung der Eigenfrequenzen von Gleiskomponentenschwingungen führt und der Schlupfwellenbildung offenbar entgegenwirkt. Bei der Meterspur konnten bisher nur weiche Zwischenlagen über einen längeren Zeitraum beobachtet werden (Täsch-Zermatt, MGB), was ebenfalls zu einer Verbesserung der Schlupfwellenproblematik geführt hat. Eine überdurchschnittlich harte Schienenstahlgüte sowie Schienenkopfkonditionierung führen ebenfalls dazu, dass sich Schlupfwellen tendenziell langsamer aufbauen. Die Kombination von steif besohlenen Betonschwellen und weichen Zwischenlagen wurde bei der Meterspur bis heute noch nicht getestet.

Empfehlung

Um eine gleichbleibende Gleisqualität zu erreichen und LCC-Kosten zu senken, ohne dabei auf Erschütterungsschutz zu achten, wird empfohlen, steife, wenn möglich plastische Schwellensoleen über die gesamte Länge eines Gleisabschnitts zu installieren, um mehrfache Übergänge zu vermeiden. Übergänge von besohlenen auf unbesohlenen Schwellen sind kontraproduktiv. Der Einsatz von Schwellensoleen verbessert generell die Gleislagequalität. Bei reduzierter Schotterdicke (jedoch > 20 cm) können Schwellenbesohlungen zur Kompensation der geringeren Lastverteilungsfähigkeit des Schotters beitragen. Bei der Verwendung elastischer Schwellensoleen ist allerdings auf die zusätzliche vertikale Schienendurchbiegung zu achten, die höhere Biegemomente in den Schienen verursachen. Im Zimmermann Berechnungstool V1.3 kann ein entsprechender Nachweis geführt werden, Ausserdem kann es zu einem höheren Abrieb des Schotters und der Seitenflächen der Betonschwellen kommen. Eine Kombination aus elastischen Besohlungen und Unterschottermatten ist nicht notwendig. Unterschottermatten in Kombination mit plastischen Besohlungen sind aber durchaus sinnvoll, gerade in Übergangsbereichen zu Bauwerken und Festen Fahrbahnen mit steifem Untergrund im Anschlussbereich. Nachfolgende Abbildung 23 dient als Entscheidungshilfe, den richtigen Besolungstyp gemäss den eigenen Zielvorgaben resp. Anforderungen zu wählen.

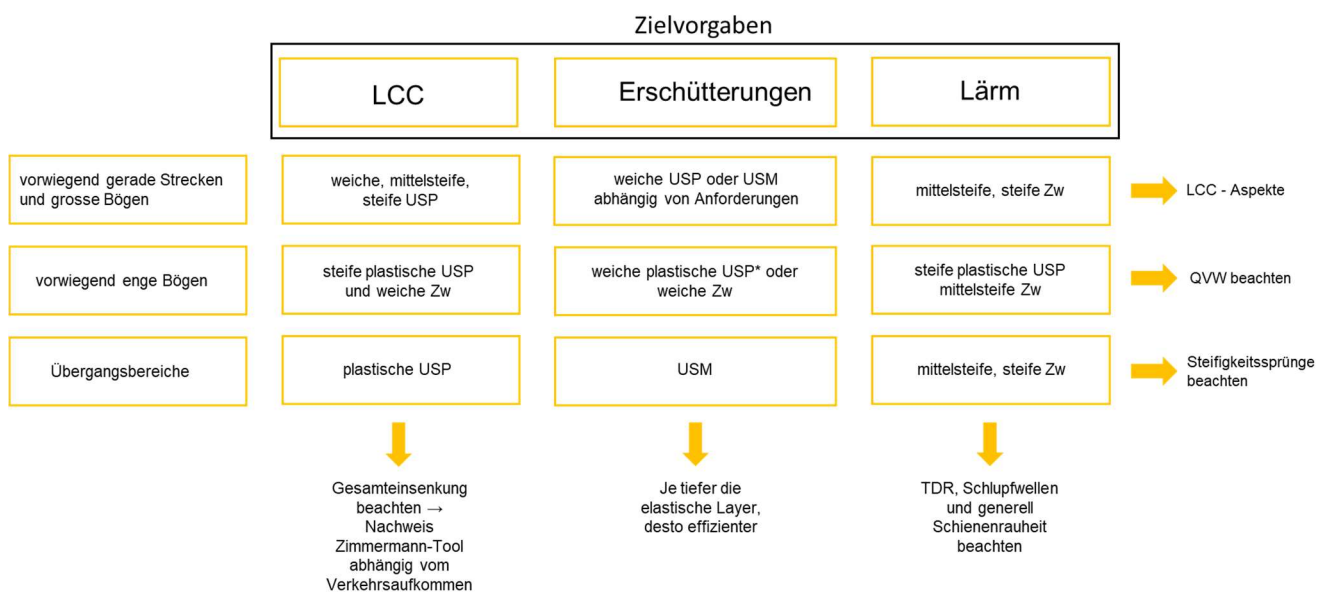


Abbildung 23: Planungshilfe in Abhängigkeit der Zielvorgaben

3.6 Schotter

Situation:

Die Fahrbahn mit Schotterbett hat sich sehr bewährt und wird weiterhin favorisierend eingesetzt. Einzig in der Agglomeration und in längeren Tunnels werden aufgrund Unterhaltsaufwand, Einbauhöhe und Befahrbarkeit zunehmend Feste Fahrbahnen gebaut.

Schädigungen:

Verschlossener Schotter ist meist als weisse Stelle im Schotterbett erkennbar, die Ursache kann unterschiedlich sein. Ein Grund kann eine ungenügende Schotterstärke auf Festem Grund wie Brücken (typisch: 0-15 cm UK Schwelle) sein, ebenfalls führen ausgeprägte Schlupfwellen zu Schotterzertrümmerung. Weitere Ursachen sind ausgefahrene Schienenstösse, welche starke Schläge auf den Schotter verursachen.

Wissen:

Der in der vorgeschriebenen geometrischen Form eingebrachte Schotter bildet das Schotterbett. Er gewährleistet die elastische Lagerung des Gleisrostes und erlaubt Gleiskorrekturen bei Instandsetzungsarbeiten. Die vorgeschriebene geometrische Form des Schotterbetts verhindert Instabilitäten des Gleisrostes infolge Verkehrslast und Temperatureinflüssen.

Der Schotter ist ein hochwertiges Oberbaumaterial. Er hat der dynamischen Beanspruchung durch den Bahnverkehr sowie der Witterung über mehrere Jahrzehnte standzuhalten.

Je nach Belastungsgruppe ist die Schotterklasse 1 oder 2 einzusetzen. In Nebengleisen ist Schotter der Klasse 2 zu verwenden. Oft wird aufgrund der Verfügbarkeit und der Kosten Schotter der Klasse 1 eingebaut.

Ein sauberes Schotterbett ist die wichtigste Komponente der Inneren Gleisentwässerung. Doch selbst bei sauberem Schotter können Probleme auftreten, wenn die Foundationsschicht und die äusseren Entwässerungsbedingungen nicht korrekt bemessen sind oder sich mit der Zeit verschlechtern (Li et al., 2016) [9].

Empfehlung:

Das Schotterbett hat sich bewährt und ist nach wie vor die wirtschaftlichste Lösung in Bezug auf die Lebenszykluskosten.

3.7 Unterschottermatten

Situation

Bei den Bahnen wurden bereits verschiedentlich Unterschottermatten eingesetzt. Die Gründe sind teils unterschiedlich, hauptsächlich werden die Unterschottermatten zur Reduzierung der Erschütterungen und Erhöhung der Steifigkeit auf festem Untergrund eingesetzt. Es gibt auch Anwendungen der Unterschottermatten gegen Erschütterungen auf der Tragschicht bei Boden als Untergrund.

Wissen

Unterschottermatten (USM) werden unterhalb des Schotters eingebaut und kommen vornehmlich dort zum Einsatz, wo eine Hartauflage des Schotterbettes vermieden werden soll, z.B. auf Betonsohlen, Brücken oder in Tunneln. Aufgrund der grossflächigen Auslegung der Materialien ist ein Einbau von Unterschottermatten kostenintensiver. Ein Nachrüsten auf bestehenden Strecken erfordert zudem einen kompletten Ausbau des Schotterbettes. Die Verwendung von Unterschottermatten ist deshalb nur dort wirtschaftlich vertretbar, wo neben der Erzielung einer erhöhten Oberbauelastizität zudem eine Körperschallisolierung gefordert ist. Durch die durchgehende Trennebene unterhalb des Schotters kann der Fahrweg nämlich nahezu vollständig von der Umgebung entkoppelt werden. Die hohe Masse des aufliegenden Schotters erlaubt dabei eine tieffrequente Abstimmung des sich ausbildenden schwingungsfähigen Systems, was zu einer effektiven Reduzierung der Körperschallemissionen an die Umgebung führt. Es können Eigenfrequenzen bis ca. 25 Hz erzielt werden. Mittel- und hochfrequenten Gleisschwingungen werden um 13-17 dB verringert, niederfrequente Gleisschwingungen um 5-15 dB erhöht. Stehen Körperschall- und Erschütterungsschutz als Ziel im Vordergrund, wie z.B. in Gegenden mit unmittelbar angrenzender Wohnbebauung, dann kommen Unterschottermatten auch auf Erdbauwerken zum Einsatz. Da sich in der Schweiz weiche Besohlungen bis dato noch nicht richtig durchsetzen konnten (aufgrund der fehlenden Zulassungen), bieten USM eine Alternative Steifigkeitsunterschiede bei Übergängen von Betonplatten auf Erdbauwerke auszugleichen.

Bei den Schweizer Meterspurbahnen kommen USM gegen Erschütterungen vereinzelt zum Einsatz. Die Erfahrungen werden als grundsätzlich positiv beschrieben.

Regeln zur Qualitätssicherung, Bauartzulassung und deren Prüfung sowie zur Verwendung von Unterschottermatten sind in der Norm SN EN 17282:2021 Bahnanwendungen – Infrastruktur – Unterschottermatten zusammengefasst.



Abbildung 24: Einbau von Unterschottermatten

Empfehlung:

Die Unterschottermatten stellen zur Verminderung von Erschütterungen bei nah gebauten Wohngebäuden eine gute Lösung dar, ebenfalls können sie zur Erhöhung der Elastizität bei hartem Untergrund wie Beton eingesetzt werden.

3.8 Unterbau, Fundationsschicht

Situation:

Bei den Meterspurbahnen gibt es bei ca. 80% der gesamten Fahrbahn keinen Unterbau. Oft stammt der Unterbau aus der Gründungszeit und ist mehr als 100-jährig. Die meisten Bahnen bauen mittlerweile bei Fahrbahnerneuerungen eine Sperrschicht ein. Tendenziell wird bei Neubauten der Unterbau mit PSS realisiert, teilweise auch mit AC-Rail.

Schädigungen:

Ein oft auftretendes Phänomen beim Unterbau sind die Schlammaufstöße. Die Ursache kann unterschiedlich sein:

- Kein Unterbau und schlechte Entwässerung
- Oft feinkörniger, schlecht sickerfähiger und schlecht tragfähiger Untergrund, teilweise hoher Grundwasserstand
- Steifigkeitssprünge vor oder nach festen Punkten
- 2-3 Jahre nach Oberbauerneuerung, wo erstmalig Betonschwellen eingebaut sind.

Die Schlammaufstöße entstehen durch die zyklischen Einsenkungen des Gleisrostes bei Zugsdurchfahrten, das feinkörnige Material wird durch den Schotter hochgepumpt, bis es an einer Stelle an die Oberfläche dringt. Im Schotterbett ist die Schotterverschmutzung meist nur auf einer kurzen Länge sichtbar, was meist die Spitze des Eisbergs ist. Die Unstetigkeit im Schotterbett kann sich dabei bereits über eine weite Distanz ziehen.

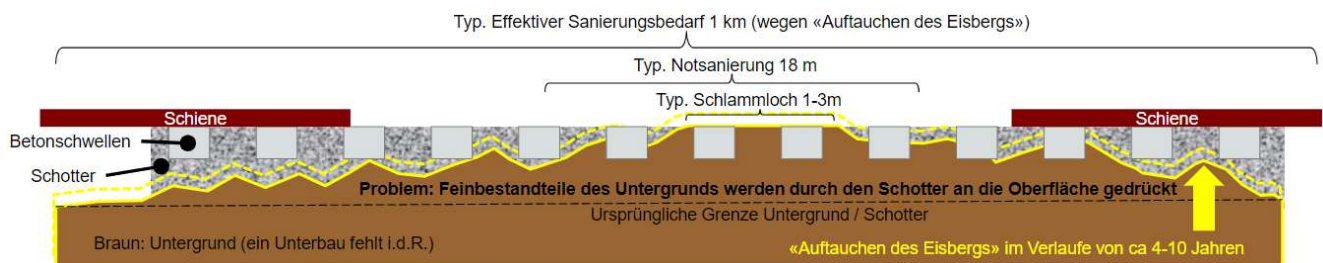


Abbildung 25: Beispiel eines Schlammaufstosses (zb)⁵

Die Schlammstelle hat eine Verringerung der Tragkraft des Schotterbetts zur Folge, dies führt zu Instabilitäten und Gleislagefehlern. Stopfen wirkt in diesem Bereich nur kurzfristig oder kann gar zur Auflockerung des Feinmaterials und damit zur weiteren Minderung der Tragfähigkeit führen.

Als Lösung ist einzig eine komplette Erneuerung der Fahrbahn inkl. Unterbau mit Filterschicht über die ganze Länge des Schlammaufstosses und die Erstellung einer funktionierenden Entwässerung wirksam.

Wissen:

Die heutigen Bemessungsmethoden basieren auf statischen Modellen. Unter Berücksichtigung von zyklischen und dynamischen Bahnbelastungen werden die Schotterpressungen und Spannungen im Unterbau/Untergrund quasistatisch ermittelt. Tatsächlich wirkt auf die Fahrbahn mit Oberbau-Unterbau-Untergrund aber eine zeitabhängige Belastung, abhängig u.a. von der Fahrgeschwindigkeit. Das

⁵ Internes Dokument der zb

Verhalten des Unterbaus unter zyklischer Beanspruchung ist sehr komplex. Durch die Linienbelastung (Gleis) entstehen via Schwellen Belastungszyklen, die sich im Unterbau radial ausdehnen und demzufolge vertikale wie auch horizontale Spannungskomponenten (Scherspannungen) erzeugen.

Spannungen im Unterbau während Zugsdurchfahrt
am rotierten Element: Hauptspannungen

Jede Radachse erzeugt Rotationen der Hauptspannungen während einer Zugsdurchfahrt: entlang und quer zum Gleis

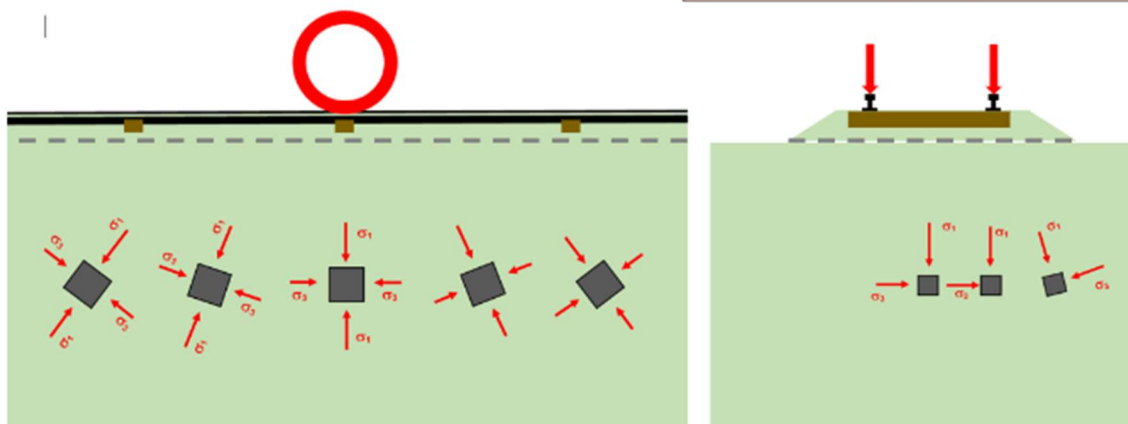


Abbildung 26: Hauptspannungen im Unterbau während Zugsdurchfahrt⁶

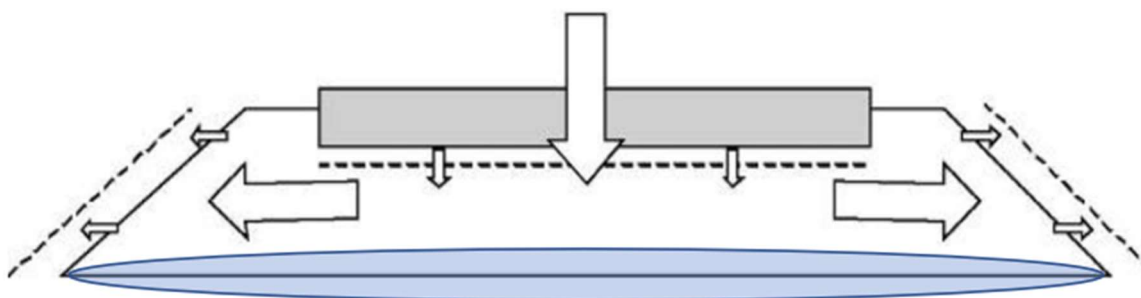


Abbildung 27: Einsenkung und seitliche Aufweitung infolge vertikaler Stöße⁷

Übermäßig grosse plastische Deformationen oder Setzungen des Untergrundes können zur Bildung von Schottersäcken führen. Füllen sich die Schottersäcke mit Wasser und wird die seitliche Drainagemöglichkeit eingeschränkt, vergrössern sich die Schottersäcke und es tritt eine sich beschleunigende Verschlechterung des Unterbaus ein.

⁶ Dr. H.R. Schneider, Allianz Fahrweg, BAV: Internationale Literaturrecherche zum Thema Unterbau bei Bahnstrecken, 18.01.2022 [9]

⁷ Dr. H.R. Schneider, Allianz Fahrweg, BAV: Internationale Literaturrecherche zum Thema Unterbau bei Bahnstrecken, 18.01.2022 [9]

Der Aufbau des Unterbaus kann in drei Kategorien eingestuft werden.

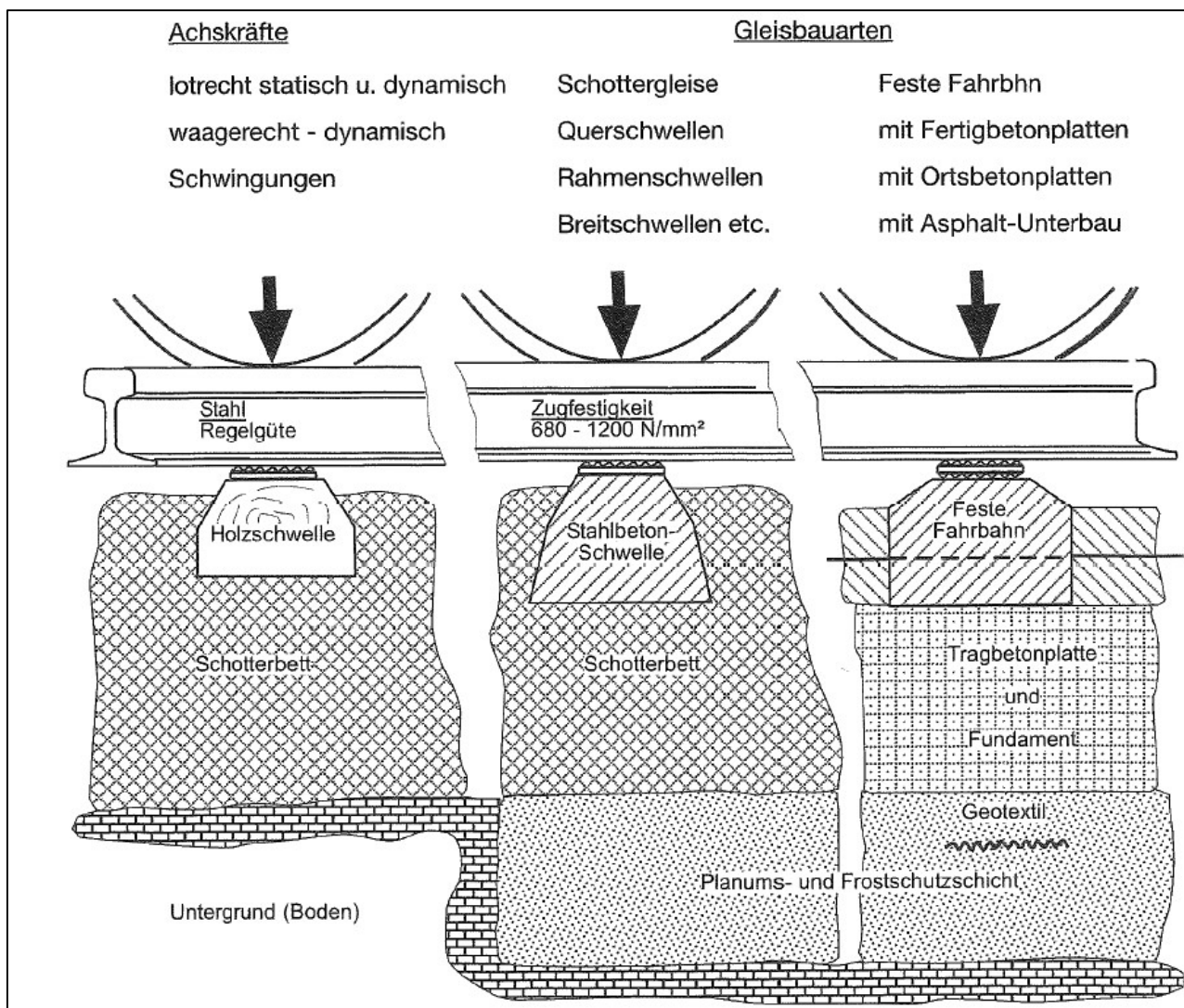


Abbildung 28: Gleisbauarten⁸

Die erste Kategorie ist ein Schotterbett direkt auf dem Untergrund (Boden). Dies ist der meist vorkommende Aufbau bei Meterspurbahnen und hat sich in der Vergangenheit meist bewährt. Beispiel dazu ist die RhB, wo zu 90% kein normierter Unterbau vorhanden ist und trotzdem keine übermässigen Auffälligkeiten wie Schlammaufstösse auftreten. Dies ist zum grössten Teil auf den steinig-, felsigen Boden zurückzuführen. Untersuchungen der TU München lassen erahnen, dass der über die Jahre verdichtete Unterbau oft beim Wechsel der Holzschwellen auf Betonschwellen aufgrund der ungenügenden Schotterhöhe zerstört wird. Gleislagefehler durch ungenügende Tragfähigkeit und Schlammaufstösse können die Folge sein [10].

Durch die steigenden Anforderungen an die Fahrbahn insbesondere infolge höherer Belastungen wird bei Neubauten meist die zweite Kategorie, Schotterbett mit Planums- und Fundationsschicht, eingesetzt. Die Fundationsschicht besteht aus einer PSS-Schicht oder einer bituminösen Asphaltsschicht.

⁸ Bernhard Lichtenberger: Handbuch Gleis, Eurailpress 2010

Das AC-Rail ist gegenüber der PSS-Schicht dicht und bei gutem Untergrund sehr langlebig (Erfahrungen DB). Erste LCC-Berechnungen weisen darauf hin, dass sich auch bei den Meterspurbahnen der Einbau von AC-Rail bei höheren Belastungen langfristig wirtschaftlich lohnt.

Messungen bei der Zentralbahn zeigten, dass bei der zweiten Kategorie der Fahrbahnaufbau steifer wird und sich dadurch die Eigenfrequenz verändert. Dies kann eine höhere Lärmemission zur Folge haben. Der Einsatz von beschlittenen Betonschwellen kann die Gesamtsteifigkeit verbessern. Wieweit auch die Lärmemissionen mittels elastischer Elemente vermindert werden, muss weiter erforscht werden.

Die dritte Kategorie ist die Feste Fahrbahn, welche im Agglomerationsbereich und in längeren Tunnels zur Anwendung kommt. In diesen Anwendungsfällen ist meist die Befahrbarkeit, die geringe Einbauhöhe und der Unterhaltsaufwand bzw. Sperrzeiten ausschlaggebend für die Wahl.

Ein besonderes Augenmerk ist auf die Steifigkeitsübergänge zu legen, gerade in diesem Bereich häufen sich Schädigungen und führen zu aufwendigen Sanierungen der Fahrbahn. Eine typische Gestaltung eines Übergangs ist in Abbildung 22 ersichtlich. Durch den Einsatz von beschlittenen Betonschwellen oder unterschiedlich steifen Untergründen können die grossen Kraftänderungen und damit entstehenden Schwingungen abgemindert werden.

Gerade im Bereich Eisenbahngeotechnik gibt es noch grosse Wissenslücken. Diese Lücken sind vor allem:

- wie komplex die Spannungen im Untergrund im Vergleich zu häufig verwendeten Modellen (z.B. Zimmermann) sind und
- die Einflüsse, die davon stammen, da diese Spannungen laufend unter dynamische Belastungen sich verändern.

Ein wichtiger Teil des Unterbaus ist eine funktionierende Filterschicht, ein falsch dimensionierter Filter verursacht viele Probleme und grossen Sanierungsaufwand. Erfahrungen von Bahnen zeigen, dass bei falsch eingesetztem Vlies das Feinmaterial die Filterschicht verstopft und das Wasser im Unterbau nicht mehr abfließt.

Empfehlung:

Vor Beginn jeder Fahrbahnerneuerung sollten zur Dimensionierung des Unterbaus die Kenntnisse des vorherrschenden Untergrunds und der vergangenen Schädigungen bekannt sein.

Aufgrund der tendenziell steigenden Achslasten und höheren Belastungen auf die Fahrbahn ist langfristig ein tragfähiger Unterbau mit Sperr- und Foundationsschicht empfehlenswert.

Wenn die Zugänglichkeit gegeben ist, ist bei höheren Belastungen das AC-Rail die wirtschaftlichste Lösung.

Bei einem Wechsel von Holz auf Betonschwellen und höheren Belastungen ist eine Sanierung des Unterbaus empfehlenswert.

Bei Oberbauerneuerungen ist sicherzustellen, dass die bestehende Planie nicht tangiert beziehungsweise beschädigt wird.

3.9 Entwässerung

Situation:

Aufgrund der Geografie wird bei den Meterspurbahnen die Entwässerung vielfach in Form von Böschungen und Gräben realisiert. Ein Grossteil der Strecken sind zurzeit nicht entwässert, erst bei der Erneuerung der Fahrbahn meist in Zusammenhang mit einer Sperrschicht wird eine Planumsentwässerung eingebaut.

Wissen:

Die internationale Literaturrecherche der Allianz Fahrweg Normalspur zum Thema Unterbau der Bahnstrecken zeigt, dass sich betreffend der Entwässerung alle Publikationen gleicher Meinung sind: Das Wasser muss effektiv vom Planum weggeführt werden. Dies scheint der wichtigste Bemessungsratschlag quer durch alle Publikationen zu sein [9].

Die Foundationsschicht darf nicht mit Feianteilen von unten (mud pumping) oder von oben verunreinigt werden. Feianteile müssen in einem begrenzten Teil über dem Planum herausgefiltert werden und dürfen die Foundationsschicht darüber nicht verschmutzen.

Empfehlung:

Wichtig und zentral für ein langlebiges Gleis ist eine funktionierende Entwässerung.

Die Entwässerung ist so anzuordnen, dass kein Wasser von aussen ins Gleis fliesst.

3.10 Fahrbahn Schäden Verschleiss

Situation:

Bei den Meterspurbahnen treten vor allem folgende Schädigungen auf:

- Schienenverschleiss (Vertikal oder Seitenverschleiss), Schlupfwellen, Risse, Gratbildung
- Risse in Holzschwellen
- Gleislagefehler
- Schlammaufstösse

Im Rahmen der Umfrage wurden keine neuen Lösungsansätze zur Reduktion der Schädigungen aufgeführt. Es werden die üblichen Massnahmen wie Schleifen oder Wechsel der Schienen oder Ersatz der Holz- durch Betonschwellen praktiziert.

Die Schädigungen haben bei den meisten Bahnen bei Einsatz von neuem Rollmaterial zugenommen, insbesondere Schienenverschleiss und Schlupfwellen

Wissen:

Gleislagefehler: Die dynamischen Rad-Schiene-Kontaktkräfte, die sich aus der Interaktion zwischen Fahrzeug und Gleis ergeben, sind für die lokalen Gleissetzungen verantwortlich. Wenn diese lokalen Setzungen entlang des Gleises variieren, entstehen geometrische Unregelmässigkeiten, die die dynamische Belastung des Gleises durch die Interaktion zwischen Fahrzeug und Gleis weiter verstärken.

Verschleiss: *Seit mehr als einem Jahrhundert sind die Schienen des städtischen Schienenverkehrs (Strassenbahnen, U-Bahnen) von periodischem Verschleiß ihrer Kontaktfläche betroffen, der als «Wellenverschleiss ≡ Schlupfwellen» bezeichnet wird. Wenn ein Zug über ein davon betroffenes Gleis fährt, kommt es zu erheblichen Lärm- und Vibrationsbelastungen, deren Pegel häufig die gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerte überschreiten. Städtische Netze sind dann gezwungen, kostspielige und wiederholte Vorgänge des mechanischen Abriebs der Schienenoberfläche durch Schleifen durchzuführen, derzeit das einzig wirksame Mittel zur Kontrolle der Welligkeitsentwicklung. Dieser Verschleiss war jahrzehntelang Gegenstand von Studien, die sich hauptsächlich auf die Schwingungsanalysen und seiner Folgen konzentrierten und weniger auf zeitliche Analysen der lokalen Kontaktwechselwirkungen am Ursprung seiner Entstehung. Um diesen Mangel zu beheben, wird ein Ansatz vorgeschlagen, der sich auf die lokale tribologische Analyse des Rad-Schiene-Kontakts konzentriert und auf die besonderen Fälle des wellenförmigen Verschleisses von geraden Gleisen in der Beschleunigungszone und dem von gekrümmten Gleisen mit kleinem Radius angewendet wird. Zunächst ermöglichten die Ergebnisse der tribologischen Analysen der Reibflächen in beiden Fällen eine Charakterisierung des tribologischen Kreislaufs der festgestellten Wellung. Der Einfluss seiner Geometrie auf die Strömungen, die ursprünglich zu seiner Entstehung führten, muss jedoch noch bestimmt werden. Im Falle des wellenförmigen Verschleisses gerader Gleise wurde ein zweidimensionales numerisches Längsmodell des Rad-Schiene-Kontakts implementiert, um die fehlende physikalische Instrumentierung des Kontakts zu kompensieren. Unter Bedingungen, die die Beschleunigung eines Zuges reproduzieren, entwickeln sich im Kontakt auf natürliche Weise Instabilitätsregime (Adhäsionsschlupf), die zur Folge haben, dass Kontakttemperaturen und periodische plastische Verformungen der Schienenoberfläche induziert werden, die denen des experimentell untersuchten Wellenverschleisses vergleichbar sind. Im Fall von wellenförmigem Verschleiss von Gleisen in Bögen wurde eine Vor-Ort-Instrumentierung im Rad- und Schienenmassstab (Zusammenarbeit von RATP und Railtech) implementiert. Anschliessend wurden periodische seitliche Verschiebungen identifiziert, die für geriffelte Verschleisszonen spezifisch sind. Bestätigt durch Prüfstandsversuche zur Reproduktion dieser Art von Verschleiss (Zusammenarbeit Lucchini und Politecnico di Milano) ist dieser periodische seitliche Schlupf tatsächlich die Ursache für die Bildung von Riffelverschleiss in Bögen [11].*

Schienenstösse: Zu den singulären Fahrflächenfehlern gehören unter anderem Isolierstösse, schlechte oder abgenutzte Schienenschweissungen, Schleuderstellen, Schienenstösse und Squats. Aufgrund der geometrischen Form dieser Absenkungsgeometrie erfährt das Rad beispielsweise beim Befahren des verlaschten Schienenstosses gemäss Abbildung 29 mit der entsprechenden Überlaufgeometrie eine Absenk- und anschliessende Aufwärtsbewegung. Am Ort der maximalen Radabsenkung wechselt

der Ort der Rad-Schiene-Kontaktkraft von der Schiene 1 auf die Schiene 2 (Radübergabe) und anschliessend wird das Rad wieder auf die ursprüngliche Höhe angehoben. Ein ähnlicher Vorgang spielt sich beim Befahren der Herzstücke in den Weichen ab.

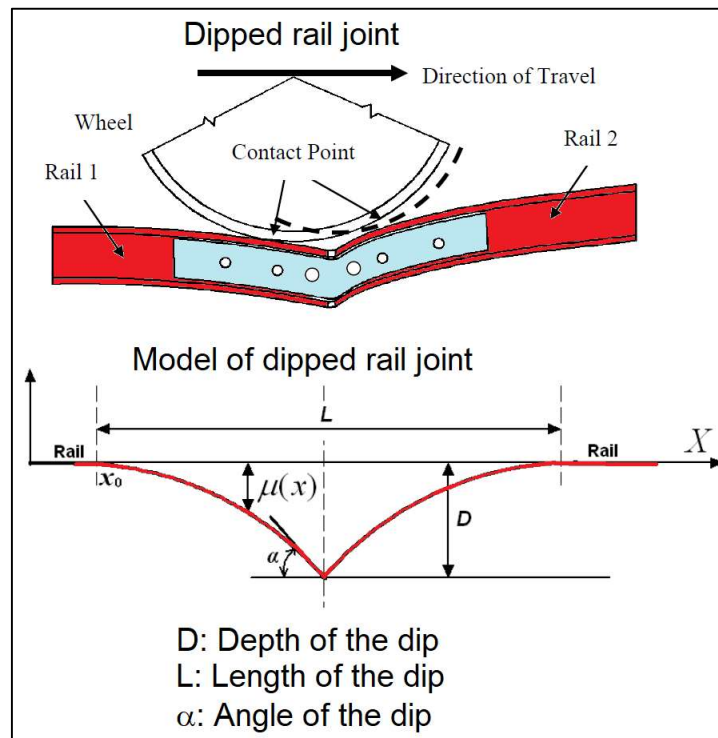


Abbildung 29: Absenkungsgeometrie des verlaschten Schienenstosses ⁹

Schienenstösse sind eine häufige Ursache für vertikale Rad-Schiene-Kräfte vom Typ P_2 , die abhängig sind von der Form der Unregelmässigkeit, der Kontaktsteifigkeit und den Eigenschaften der Unterkonstruktion. Diese Kräfte P_2 wirken normalerweise in einem Frequenzbereich von 50 bis 100 Hz. Die Kräfte entstehen durch die auf das Gleis einwirkende statische Radlast in Verbindung mit der ungedämpften Radmasse und der äquivalenten Schienenmasse. Die wichtigsten Konstruktionspartner, die diese Kräfte beeinflussen, sind: die statische Radlast, die ungefederte Masse, die Fahrzeuggeschwindigkeit, der Einsenkwinkel und die äquivalente Gleissteifigkeit, die äquivalente Masse und Dämpfung des Gleises.

$$P_2 = P_0 + 2\alpha v \left[\frac{M_u}{M_u + M_t} \right]^{0.5} \times \left[1 - \frac{C_t \pi}{4[K_t(M_u + M_t)]^{0.5}} \right] \times [K_t M_u]^{0.5}$$

where: P_2 = Force (kN)

P_0 = Vehicle Static Wheel Load (kN)

M_u = Vehicle Unsprung Mass per Wheel (kg)

2α = Total Joint Angle, normally 0.01 radians.

v = Vehicle Velocity (m/s)

K_t = Equivalent Track Stiffness (MN/m)

C_t = Equivalent Track Damping (kNs/m)

M_t = Equivalent Track Mass (kg)

⁹ Nirmal K Mandal, Manicka Dhanasekar, Yan Quan Sun: Impact forces at dipped rail joints, Proc IMechE Part F: J Rail and Rapid Transit 230(1)

Abbildung 30: Formel zur Berechnung der P2-Kraft ¹²

Rollkontaktermüdung RCF: Wichtige Fahrzeug- und Streckenparameter, die die Neigung zu Rollkontaktermüdung RCF reduzieren sind:

- Fahrzeugbezogene Faktoren: geringe oder gar keine radiale Einstellbarkeit der Radsätze in den Bögen, Radmaterial, Radprofil, Achsmasse, Traktion und Bremskräfte und Schlupf-/Schwenkkontrolle beim Bremsen und Traktion, Überhöhungsfehlbetrag, häufiges und leichtes Neuprofilieren von Rädern.
- Gleisbezogene Faktoren: Schienenschleifen, Schmierung, Gleisqualität (Ausrichtung), Schienenmaterial, Schienenprofil.

Die Rollkontaktermüdung tritt meistens auf der bogenäussern Schiene in Bögen mit mittleren und grösseren Halbmessern oder auf beiden Schienen in der Geraden auf.

Empfehlung:

Die aktuellen Forschungsarbeiten weisen alle darauf hin, dass mit einer Besohlung der Betonschwellen und dem Einsatz von weichen Zwischenlagen die Schlupfwellen in engen Bögen reduziert werden können.

3.11 Fahrbahn Lärm Erschütterung

Situation:

Gemäss der Umfrage Meterspurbahnen haben über 80 % der befragten Bahnen Probleme mit Lärm. Bei den meisten Bahnen handelt es sich um Kurvenkreischen in engen Bögen. Als mögliche Massnahmen werden SKS und SKK eingesetzt. Allerdings ist der erzielte Effekt teilweise noch unklar und bestätigt den Forschungsbedarf.

Als weitere erfolgreiche Massnahmen wurde fahrzeugseitig der Einbau von Radschallabsorbern sowie die Reduktion der Geschwindigkeit genannt.

Über die Hälfte der Bahnen hat Probleme mit Erschütterungen. Es gibt keine allgemeine wirksame Lösung gegen Erschütterung bei den Bahnen. Versuchsweise werden besohlte Betonschwellen eingesetzt. Lokal wurden Unterschottermatten mit Erfolg eingesetzt.

Zu den Besohlungen ist zu bemerken, dass die in der Schweiz zugelassenen Typen nicht für den Erschütterungsschutz konzipiert sind. Es stellt sich die Frage, ob der Einsatz solcher hochelastische/elastische USP für diesen Fall sinnvoll wäre.

Es ist weiter zu beachten, dass die Möglichkeit besteht, dass zukünftig der Lärmgrenzwert herabgesetzt wird. Zudem akzeptieren die Anwohner, durch die Möglichkeit des Einsatzes von besseren Lärmschutzmassnahmen wie Lärmschutzwände, leiseren Zügen, ... immer weniger Lärm.

3.11.1 Lärm

Im Meterspurbereich mit den maximalen Geschwindigkeiten der Züge bis 120km/h besteht die Lärmbeeinträchtigung vor allem durch das Rollgeräusch und die Stossanregungen durch die singulären Störstellen im Gleis (Schienenstösse und Herzstücke der Weichen).

Durch die Verwendung von Achszählern anstelle der Isolierstösse wird sich die Situation bei den Schienenstössen signifikant verbessern. In den Herzstücken der Weichen sind bisher keine lärmindernden Lösungen bekannt.

Das Rollgeräusch kann durch die Verwendung von Scheibenbremsen, von Verbundstoff- oder Sinterbremssohlen bei klotzgebremsten Fahrzeugen, durch die Schienenkopfpflege (Schleifen bei Riffeln bzw. Ausbesserung bei Fahrflächenfehlern an den Schienen) sowie durch die Pflege der Fahrflächen der Räder (Reprofilierung bei Fahrflächenfehlern an den Rädern) gemindert werden. Zudem besteht die Möglichkeit an exponierten Stellen Schallschutzwende einzubauen.

Beim Kurvenkreischen werden durch das Projekt P2 (SKK(SKS) mit Unterstützung durch das Projekt P3 (Rad/Schiene) Minderungsmaßnahmen an der Kontaktfläche Radschiene (Schienenkopfkonditionierung SKK), bei der Berührungsgeometrie und Kontaktmechanik von Rad und Schiene sowie bei den Fahrwerken der Fahrzeuge erarbeitet. Einige Bahnen haben mit Erfolg auch Minderungen durch Dämpfungsmassnahmen an den Rädern erzielt (Radschallabsorber).

Empfehlung beim Lärm:

Der Lärm in Form von Kurvenkreischen kann durch den Einsatz einer Schienenkopfkonditionierung gemäss heutigen Erfahrungen massiv reduziert werden.

Das Schienensingen wird durch den Einsatz von härteren oder dämpfenden Zwischenlagen vermindert. Dabei ist zu beachten, dass entsprechend die Elastizität der Fahrbahn verringert und die Erschütterungen zunehmen können. Bei den Versuchen bei der MGB hat sich gezeigt, dass das Schienensingen durch die Schienenkopfkonditionierung reduziert bzw. sogar eliminiert wird.

3.11.2 Erschütterungen

Verkehrsinduzierte Schwingungen (Erschütterungen und Körperschall) in Gebäuden können für Menschen, die in der Nähe von Schienenwegen leben, sehr störend sein. Unter Körperschall bzw. Vibrationen versteht man mechanische Schwingungen, die sich in einem festen Medium oder an dessen Oberfläche ausbreiten (Schall in Festkörpern). Von Erschütterung spricht man bei tieffrequenten Vibrationen, die der Mensch mit seinem ganzen Körper wahrnimmt. Die in Schwingungen versetzten Gebäudeteile strahlen Schall ab, der als abgestrahlter Körperschall (in der Schweiz meist einfach als Körperschall bezeichnet) bzw. sekundärer Luftschall bezeichnet wird. Ausserdem können noch Sekundäreffekte auftreten, wie z.B. Gläserklirren.

Verkehrsinduzierte Schwingungen sind vor allem ein Problem des Schienenverkehrs. Diese sind komplexer als Lärm, und zwar sowohl bei der Ermittlung als auch bei der Bekämpfung. Lärmschutzwände und Lärmschutzfenster bieten dagegen keine Abhilfe. Schwingungen neben der Strecke führen im Gebäude zu zwei zu unterscheidende Störwirkungen: Dazu gehören die Erschütterungen selbst, die sich bei jeder Zugdurchfahrt als Vibrationen des Fussbodens bemerkbar machen, und der sekundär abgestrahlte Schall, der erst im Innern des Gebäudes durch die Vibration von Decken und Wänden entsteht und als tiefes Donnernrollen wahrgenommen wird. Dieser sekundär abgestrahlte Schall, auch „Körperschall“ genannt, ist zu unterscheiden vom direkten Schall, der z.B. durch die Fenster ins Haus dringt. Zur Bewertung, inwieweit Schwingungen (Erschütterungen) in Bauwerken spürbar sind, ist besonders der Frequenzbereich von 4 Hz bis ca. 80 Hz von Interesse, Körperschall ist im Bahnbereich auf offener Strecke etwa zwischen 40 ... 150 Hz zu beachten.

Vom Menschen werden die Erschütterungen in den Gebäuden in zweifacher Form wahrgenommen (Abbildung 31). Einerseits als spürbare Erschütterungen, andererseits als von den Decken und Wänden abgestrahlter Körperschall. Erschütterungen werden vom Menschen über die Gleichgewichtsorgane und über die Haut wahrgenommen. Hierbei können Schwingungen in einem Frequenzbereich von 1 bis 80 Hz wahrgenommen werden. Schwingungen mit Frequenzen über 80 Hz werden bei kleinen Scheitelwerten zunehmend durch Schuhwerk und Kleidung absorbiert; erreichen sie den Körper, dringen sie in die an die Haut angrenzenden Körperschichten kaum noch ein. Eine Ausnahme stellt die Einleitung über den Kopf beim liegenden Menschen dar, da wegen der geringen Gewebeschicht über der Schädeldecke eine grosse Empfindlichkeit bei etwa 50 Hz bis 70 Hz besteht, die mit zunehmender Frequenz wieder abnimmt.

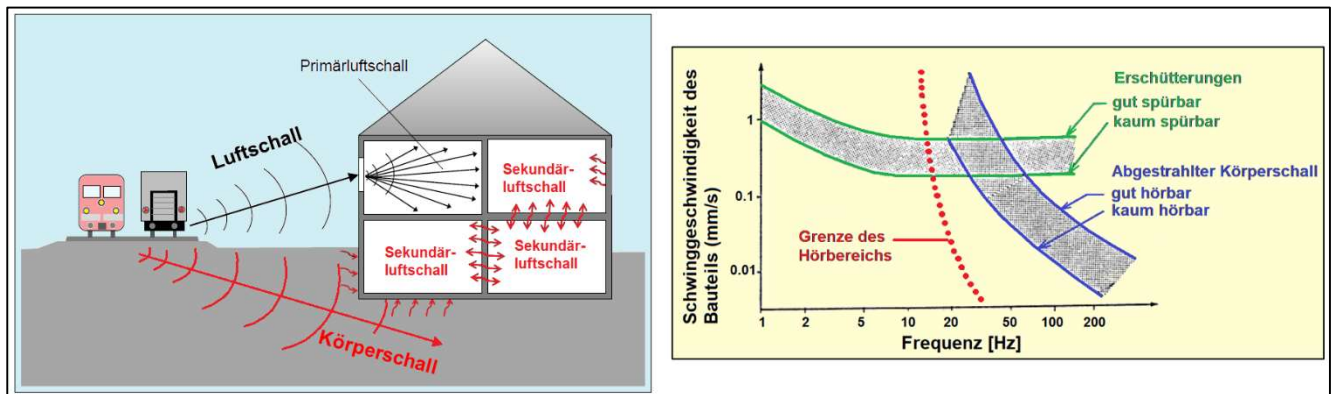


Abbildung 31: Ausbreitung Körperschall¹⁰ und Wahrnehmung von Erschütterungen und Körperschall¹¹

Ausbreitung der Erschütterungen (siehe Abbildung 32)

Grundsätzlich kann die Schwingungsausbreitung von der Anregung weg (Lasteinleitung – Rad/Schiene/Kontakt) bis an den Ort der Immissionen bei den Anrainern folgendermassen vereinfacht dargestellt werden (Faktoren, die den Grad der Erschütterungen beeinflussen befinden sich in den Bereichen der Emission und Transmission (Bodenbeschaffenheit, Untergrund) sowie im Bereich der Immission (Einwirkungsort mit den Fundamenten und Bauwerkskonstruktionen):

- **Quelle:** Erzeugung der Schwingungen im Oberbau über den Kontakt Rad/Schiene
- **Anregung Tragwerk:** Der „schwingende“ Oberbau regt das Tragwerk zu Schwingungen an, welche über die Tragwerksstützen in den Untergrund eingeleitet werden
- **Ausbreitung Untergrund:** Vom Punkt der Einleitung der Schwingungen in den Untergrund (Tragwerksstütze) breiten sich die Schwingungen durch den Untergrund zu den Anrainern aus.
- **Ankopplung Untergrund – Gebäude:** Übergang der Schwingungen vom Untergrund in die Gebäude (Fundament).
- **Ausbreitung Schwingungen im Gebäude:** Ausbreitung der Schwingungen vom Einleitungspunkt (Fläche, Fundament) in das gesamte Gebäude.

¹⁰ Erschütterung im Schienenverkehr/ DB AG

¹¹ Vortragsband der 3. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für ErdbebenIngenieurwesen und Baudynamik: „Ausbreitung von Erschütterungen im Boden und Bauwerk“ 1988

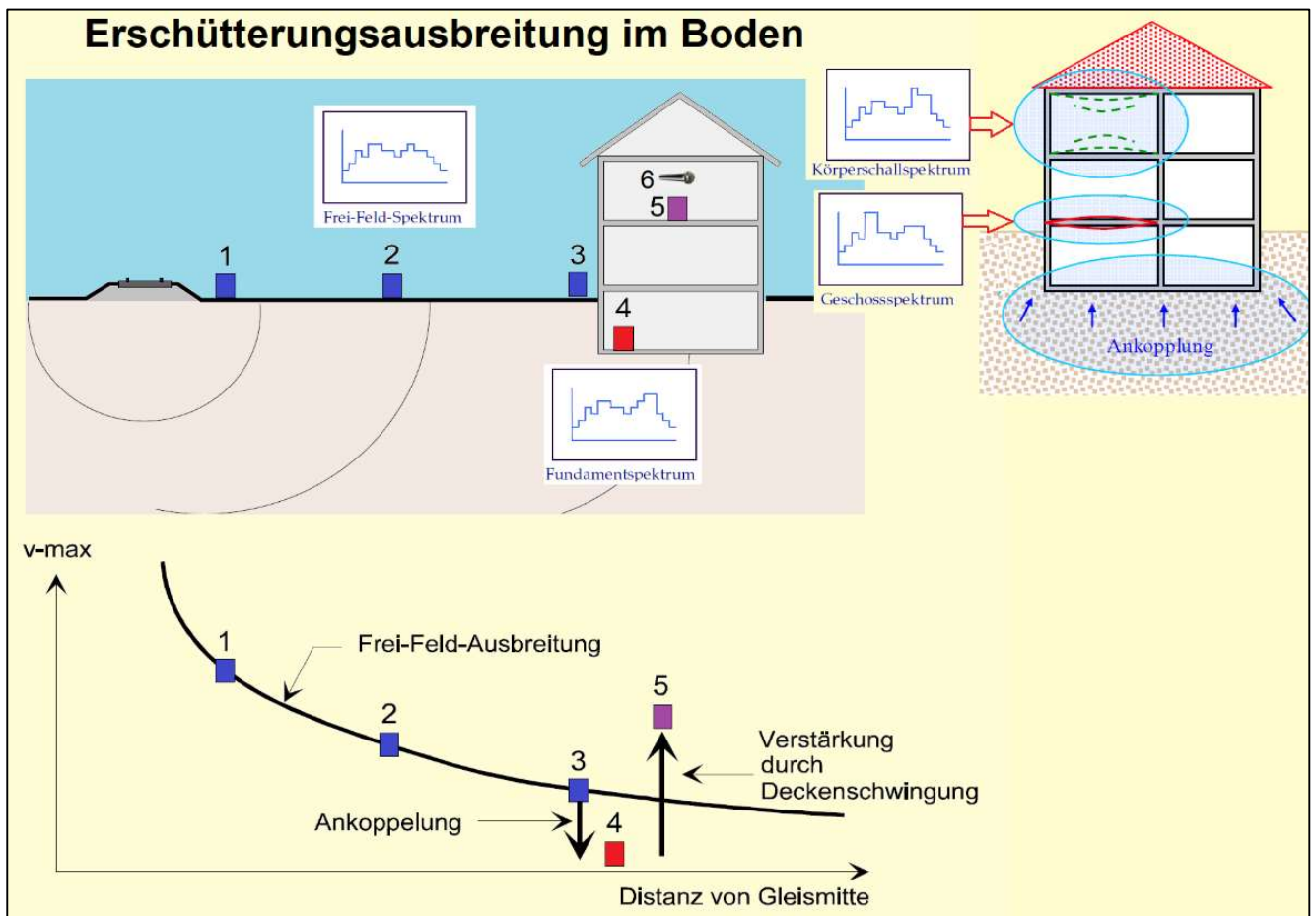


Abbildung 32: Erschütterungsausbreitung im Boden und in Gebäuden¹²

Für Erschütterungsausbreitung durch den Boden ist der relevante Bereich für die mechanischen Schwingungen resultierend aus dem Eisenbahnsektor in der ISO 14837-1 [12] definiert. Der für die Erschütterungen relevante Frequenzbereich liegt zwischen 1 und 80 Hz. Die Abbildung 33 zeigt die für Erschütterungen, Körperschall und Schallemission relevanten Bereiche. Die Graphen zeigen, dass es einen Frequenzbereich gibt, in welchem alle drei Phänomene relevant sind. Dieser liegt zwischen 15 und 80 Hz. Normalerweise ist unter 20 Hz nichts mehr hörbar.

¹² A. Ziegler, Erschütterungsausbreitung beim Schienenverkehr, Bauwerksdynamik und Erschütterungsmessungen, Springer Vieweg 2017

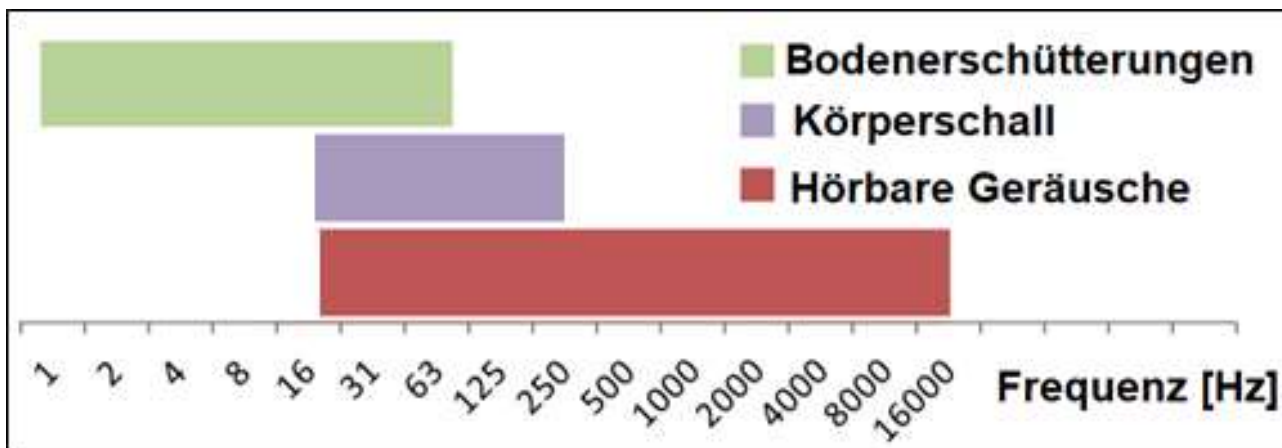


Abbildung 33: Wahrnehmung von mechanischen Schwingungen durch den Menschen¹³

Erschütterungsreduzierende Massnahmen

Um Erschütterungsimmissionen wirksam zu reduzieren, können Dämmmassnahmen an der Quelle, d.h. am Fahrzeug oder am Gleisoberbau, auf dem Ausbreitungsweg der Erschütterungen oder auf der Empfängerseite, entweder konstruktiv an Bauwerksteilen oder durch elastische Lagerungen im Bereich der Gebäudegründung, in Erwägung gezogen werden (Abbildung 34). Neben einem guten Monitoring bzw. einer guten Wartung und damit Minimierung von Rad- und Schienenrauigkeiten basieren die wirksamsten erschütterungsreduzierenden Massnahmen auf der Veränderung der Impedanz des Teilsystems Fahrweg über z. B. elastische Schwellenlager, Unterschottermatten oder Masse-Feder-Systeme (im Tunnel) oder des Teilsystems Gebäude an der Schnittstelle Baugrund-Fundamente (z. B. elastische Gebäudelagerung). Über die Impedanz des Fahrwegs kann die damit verbundene Rad-Schiene-Resonanzfrequenz beeinflusst werden. Massnahmen an der Quelle haben grundsätzlich den Vorteil, dass ihre Wirkung für die gesamte angrenzende Nachbarschaft von Nutzen ist und sie häufig kostengünstiger sind. Die Massnahmen an der Quelle können sehr wirkungsvoll sein, wenn sie an den Ursachen der erhöhten Emissionen ansetzen können.

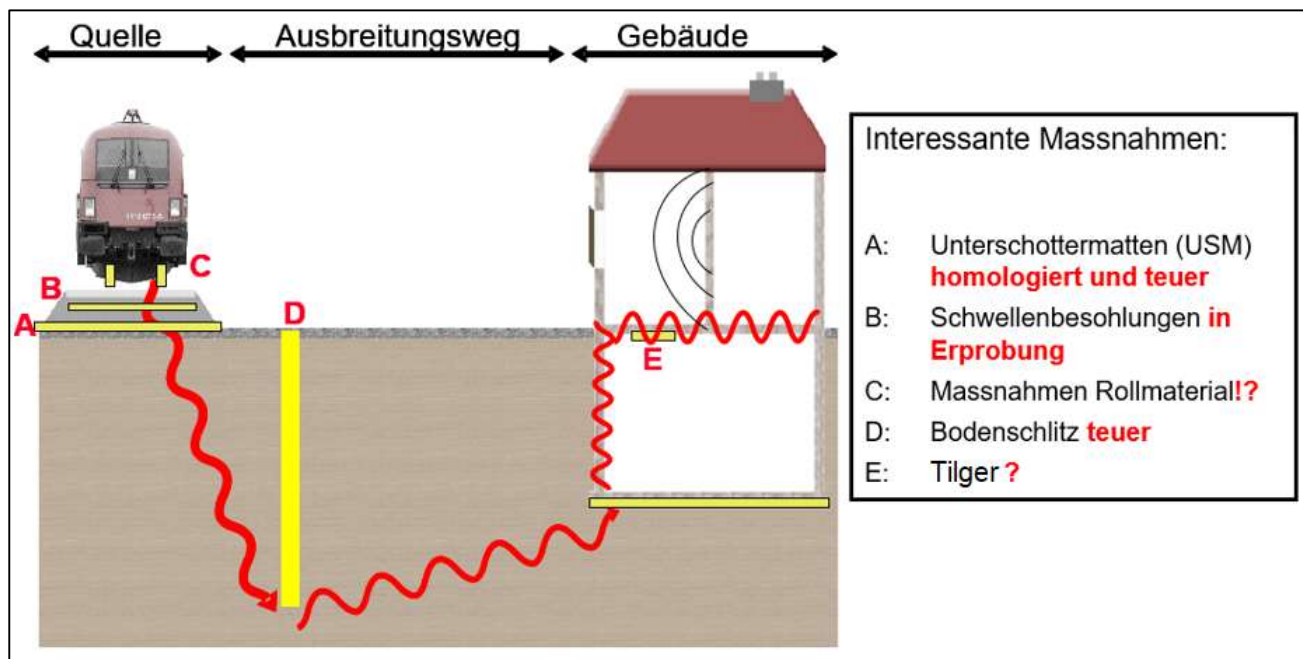


Abbildung 34: Mögliche Massnahmen zur Reduktion der Erschütterungen (Übersicht SBB Roger Müller)

¹³ UIC, Railway induced vibrations, state of the art report, November 2017

Frequenzproblematik

Aus den messtechnisch erfassten Amplitudenspektren der Baugrundschrwingungen infolge der Anregung aus dem Schienenverkehr können, abhängig vom Zugtyp, der Gleisstrecke und der Fahrge-
schwindigkeit zwei Frequenzbereiche mit massgeblichen Amplituden erkannt werden:

- Bereich F1: $5 \text{ Hz} < f < 50 \text{ Hz}$: überwiegend periodische Anregung durch Achs- und Schwellen-
abstände sowie Gleislageabweichungen mit Wellenlängen über 1.2 m;
- Bereich F2: $f > 50 \text{ Hz}$: überwiegend stochastische Anregung durch Radlauf und Rad-Schiene-
Wechselwirkung.

Während die Anregungen im tieffrequenten Bereich F1 im Wesentlichen für die spürbaren Decken- und
Bauteilschrwingungen verantwortlich sind, führen die höherfrequenten Schwingungsamplituden F2 zur
Problematik des sekundären Luftschalls.

Es sind mit den spürbaren Deckenschrwingungen und dem hörbaren sekundären Luftschallpegel gleich-
zeitig zwei Störungen für die Anwohner hinsichtlich des zu beurteilenden Schwingungseintrages zu
beurteilen. So sind einerseits Resonanzschrwingungen der Tragwerksdecken und damit unverträglich
grosse Amplituden im Frequenzbereich F1 möglich. Andererseits können, gerade wenn die Schienen-
verkehrswege in unmittelbarer Nähe zum geplanten Bauwerk liegen, Emissionen im hochfrequenten
Bereich ($f > 50 \text{ Hz}$) besonders stark auftreten und zu Überschreitungen der Grenzwerte der Regelungen
führen. Die Frequenzproblematik besteht insofern, als dass Frequenzen unter 40 Hz mit Massnahmen
auf der offenen Strecke nur schwierig zu reduzieren sind. Zum Beispiel wirkt in diesem Trassierungs-
bereich eine Unterschottermatte unter 40 Hz nicht, sie kann sogar zu Resonanzerhöhungen führen,
denn aus physikalischen Gründen ist es schwierig, wirksame (und kostengünstige) Massnahmen für
Frequenzen $< \text{ca. } 50 \text{ Hz}$ vorzusehen. Die Begründung dafür ist, dass die Einsenkungen sehr gross
werden, wenn die Eigenfrequenz und damit die Wirksamkeit bei tiefen Frequenzen liegen sollte.

Empfehlung bei Erschrütterungen:

Die Vibrationen/Schrwingungen im mittleren bis oberen Frequenzbereich haben ihren Ursprung im har-
ten und kompromisslosen Stahl-Stahl-Rad-Schiene-Kontakt, bedingt durch die „Rauheit“ an Rad und
Schiene (Wellenlängen unter 3m). Die Rauheit kann reduziert werden, indem sichergestellt wird, dass
die Räder und Schienen so glatt wie möglich sind. Wenn diese Massnahme nicht ausreichend ist oder
deren praktische Umsetzung aus immer welchen Gründen nicht möglich ist, dann sind Massnahmen
am Fahrweg notwendig.

3.12 Messdiagnostik

Situation

Für die Überwachung der Gleislage verwenden grössere Bahnen den Messwagen. Kleinere Bahnen messen punktuell händisch und beurteilen zusätzlich visuell.

Die Gleise werden visuell durch den Streckenläufer alle 2-4 Wochen kontrolliert. Der Messwagen misst halbjährlich bis alle 2 Jahre die gesamte Strecke.

Es werden die üblichen Gleislageparameter wie Richtung, Längshöhe, Überhöhung, Verwindung, Spurweite und Schienenprofil (Verschleiss) überwacht.

Bei den Begehungen durch den Streckenläufer werden die üblichen Unregelmässigkeiten gemäss Fehlerkatalog festgestellt. Aus den Ergebnissen der Umfragen wurden keine nennenswerten Vorkommnisse gemeldet.

Messwagen

Bei der Meterspurbahn gibt es erst seit ein paar Jahren die Möglichkeit die Strecke mittels eines Messwagens abzufahren und verschiedene Gleisparameter messen zu lassen. Mit dem Messwagen können folgende Werte gemessen werden:

- Überhöhung
- Spurweite
- Verwindung
- Überhöhungsdifferenz
- Ausschöpfung Gleislage
- Trend Qualitätsnote Gleislage
- Schienenprofil (Abnützung)
- Schlupfwellen
- Einsenkung der Fahrbahn

Ziel der Messung ist es einerseits Abweichungen der Grenzwerte zu erkennen und andererseits eine Langfristprognose zu erstellen. Diese wird auch immer mehr vom BAV gewünscht bzw. verlangt.

Erste Erfahrungen zeigen, dass mit dem Messwagen

- kurzfristig Gleislagefehler oder andere Abweichungen der Grenzwerte (Verwindung, ...) erkannt werden und entsprechend reagiert werden kann.
- mittelfristig die Abnützung der Schienen, Veränderung der Gleislage aufgezeigt werden und die Daten demzufolge als Unterstützung der Planung der Unterhaltsarbeiten wie Stopfen, Schleifen, Schienenwechsel, ... verwendet werden können.
- langfristig Prognosen über die Qualität des gesamten Streckenabschnitts angegeben werden und diese für die langfristige Planung der Fahrbahnerneuerungen angewendet werden können.

Mit dem Messwagen kann einerseits die Sicherheit erhöht und andererseits eine zustandsorientierte kurz- und langfristige Instandhaltungsstrategie erzielt werden.

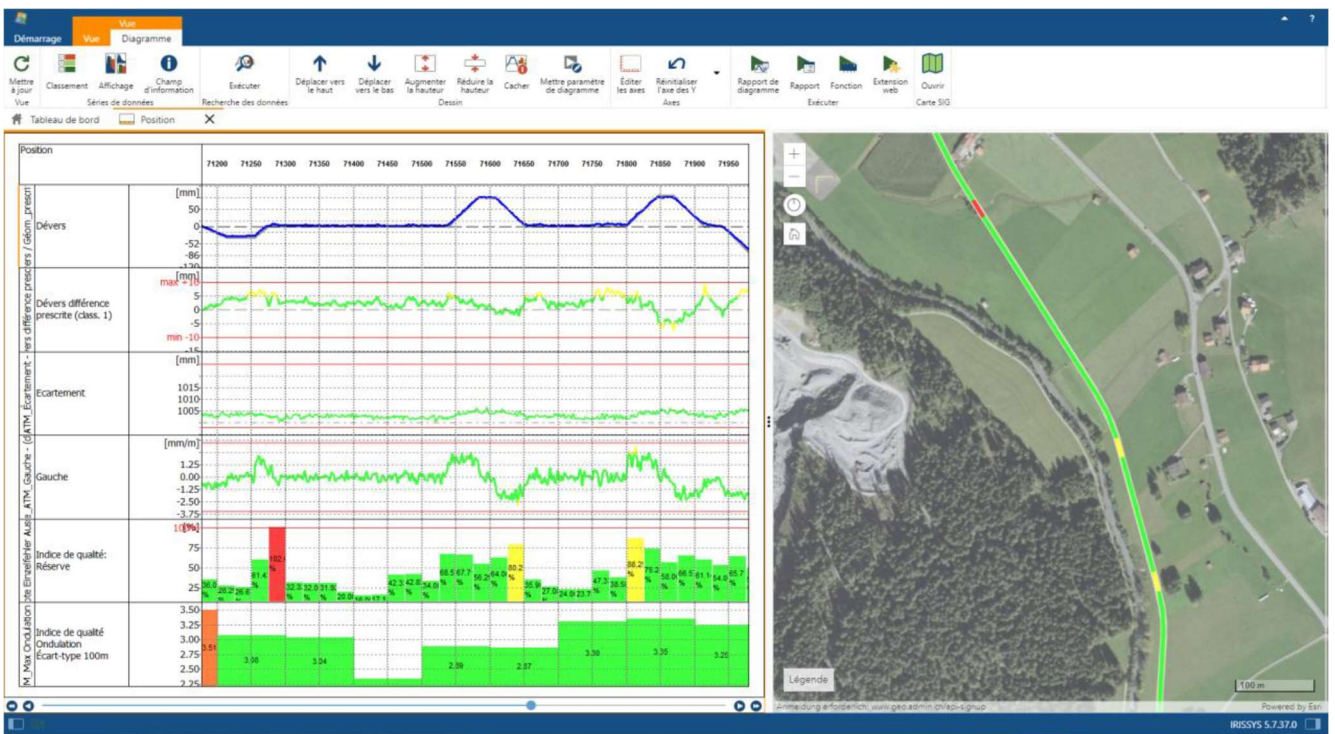


Abbildung 35: Beispiel Ansicht der Messdaten im IRISSYS

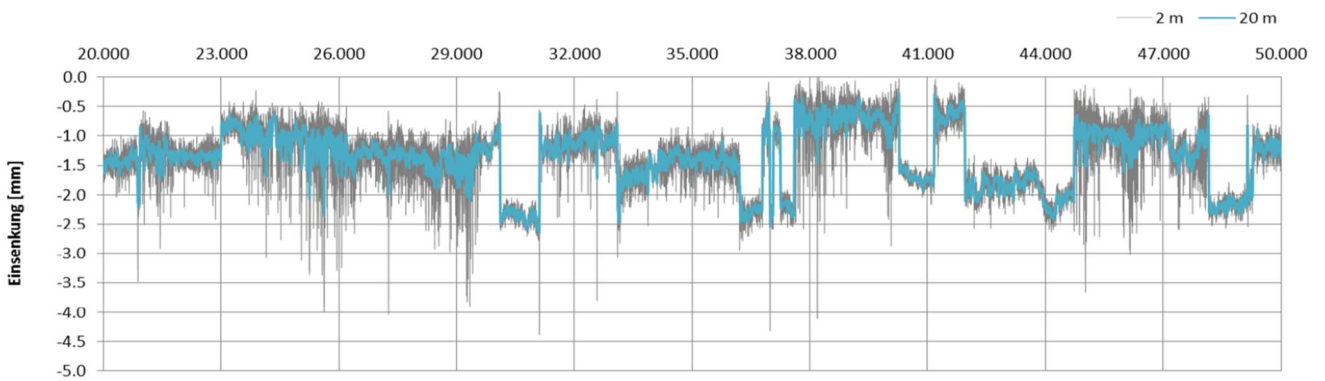


Abbildung 36: Beispiel einer Einsenkungsmessung (Spektrale Leistungsdichte (PSD))

4 Fazit

4.1 Zusammenfassung wichtigste Erkenntnisse

Die Belastungen auf die Fahrbahn nehmen einerseits durch die schwereren Fahrzeuge (Elektronik, Komfort, Schiebetritte (BehiG), ...) und den dadurch erhöhten Achslasten und andererseits durch Verdichtung des Fahrplantakts zu. Dies hat direkte Auswirkungen auf den Verschleiss der Schienen und der Räder. Um diesem erhöhten Verschleiss entgegenzuwirken, werden hochwertige Schienenstähle und tragfähigere Fahrbahnaufbauten gebaut. Daraus können erhöhte Lärmemissionen und zunehmende Erschütterungen resultieren.

Um diesen erhöhten Anforderungen an die Fahrbahn gerecht zu werden, braucht es in erster Linie ein optimales Zusammenspiel des Fahrzeugs und der Fahrbahn. Zudem muss durch zusätzliche elastische Elemente wie Schwellenbesohlungen der Fahrbahnkörper optimal auf die Bedürfnisse abgestimmt werden. Die Auslegung wird immer ein Kompromiss zwischen den verschiedenen Anforderungen wie Lärm, Verschleiss, Erschütterung, Gleislage aber auch den Trassierungsgegebenheiten wie enge Radien und Geraden sein.

Das Ziel ist daher die verschiedenen Fahrbahnelemente so einzusetzen, dass die Anforderungen an die Fahrbahn unter Berücksichtigung der Gesamtwirtschaftlichkeit bestmöglichst erfüllt werden.

Dies bedingt ein umfassendes Wissen des Zusammenspiels der verschiedenen Fahrbahnelemente und grosse Erfahrung in ihrem Einsatz.

Das nötige Wissen kann nur durch Forschung erlangt werden.

5 Verzeichnisse

5.1 Revisionen

Rev.	Datum	Bearbeiter	Beschrieb der Anpassung
1.0	16.10.2022	Stefan Werner, Martin Siegen	Erstellung

5.2 Referenzen

- [1]: Bernhard Lichtenberger: Handbuch Gleis, Eurailpress 2010
- [2]: Schweizer Norm EN 17397-1, Bahnanwendungen-Schienenfehler-Teil 1: Handhabung von Schienenfehlern, 02.2021
- [3]: K. Mädler, R. Heyder, DB Systemtechnik, Weiches Rad und harte Schiene oder umgekehrt? Zum Einfluss des Werkstoffes von Rad und Schiene auf den Verschleiss der Kontakt-Partner, Dresden 2015.
- [4]: VÖV: D RTE 22540 Fahrbahnpraxis Meterspur und Speziaispur, 15.01.2011
- [5]: Eisenmann J.: Stützpunkt-Elastizität bei einer Festen Fahrbahn, ZEV + DET Glas. Ann. 123 (1999) H. 11/12
- [6]: Leykauf G., Stahl W.: Untersuchungen und Erfahrungen mit besohlenen Schwellen, EI Heft 6/2004.
- [7]: Leykauf G., Mattner L.: Elastisches Verformungsverhalten des Eisenbahnoberbaus, EI Heft 3/1990.
- [8]: Bundesamt für Verkehr (BAV): AB-EBV (Anhang 3), Bern, 2020
- [9]: Dr. H.R. Schneider, Allianz Fahrweg, BAV: Internationale Literaturrecherche zum Thema Unterbau bei Bahnstrecken, 18.01.2022
- [10]: Johannes Martin Mack, Untersuchungen zum Schichtübergang Unterbau-Schotter unter Berücksichtigung verschiedener Oberbaukonfigurationen, TU München, 2022
- [11]: Nishant Kumar, Claudia Kossman, Stephan Scheriau and Klaus Six: An efficient physical-based method for predicting the long-term evolution of vertical railway track geometries
- [12] ISO 14837-1 - 2005-07 Mechanische Schwingungen - Erschütterungen und sekundärer Luftschall aus dem Schienenverkehr - Teil 1: Allgemeine Anleitungen.

5.3 Abbildungen

Abbildung 1: Begriffe der Fahrbahn	5
Abbildung 2: Links Sinuslauf des Fahrzeuges im Spurkanal infolge Rollradiendifferenz.....	7
Abbildung 3: Radsatzführung	8
Abbildung 4: Diagramm Kraftschlussbeiwert – Schlupf (Sammlung R. Müller)	9
Abbildung 5: Fahrzeug – Fahrweg – Modelle (links Fahrweg detailliert, rechts Fahrweg für Nachweisrechnungen)	10
Abbildung 6: Wellenlängen der Gleislageabweichungen gemäss Norm EN 13848-1	11
Abbildung 7: Unterschiedliche Sichtweisen bei der Beurteilung der Gleislage bei Fahrzeug und Fahrweg (Sammlung R. Müller).....	12
Abbildung 8: Zusammenhang des dynamischen Oberbaus	14
Abbildung 9: Die vier prinzipiellen Interaktionsarten Fahrzeug – Fahrweg (Sammlung R. Müller)	15
Abbildung 10: Unterscheidung der verschiedenen Prüfungsarten für die fahrtechnische Fahrzeugzulassung nach EN 14363	16

Abbildung 11: Trassierungsbereich und darin erwartete Verhaltensweisen der Fahrzeuge nach EN 14363.....	17
Abbildung 12: Nachweisführungen für die Interaktion Fahrzeug – Fahrweg (Rechnung und Versuch, Sammlung R. Müller aus Arbeiten des ORE SVA B176).....	18
Abbildung 13: Riffel – 2201	19
Abbildung 14: Schlupfwellen Bogeninnenschiene	20
Abbildung 15: Übermässiger seitlicher Verschleiss – 2203	21
Abbildung 16: Verschleiss Schienenkopf – 2204.....	21
Abbildung 17: Einfluss der Stahlhärte auf den Schienenverschleiss	22
Abbildung 18: Kräftegleichgewicht Schienenbefestigung Quelle: Stefan Werner, KPZ.....	24
Abbildung 19: Schotterkontaktspannung in Abhängigkeit der Kontaktfläche	29
Abbildung 20: Biegelinie unter Einzellast mit (blau) und ohne (schwarz) elastischer Schwellenbesohlung	29
Abbildung 21: Schotterzustand nach 100 Mio. Lasttonnen mit und ohne Besohlung.....	30
Abbildung 22: Typische Gestaltung eines Übergangs	30
Abbildung 23: Planungshilfe in Abhängigkeit der Zielvorgaben	31
Abbildung 24: Einbau von Unterschottermatten	33
Abbildung 25: Beispiel eines Schlammaufstosses (zb)	34
Abbildung 26: Hauptspannungen im Unterbau während Zugsdurchfahrt.....	35
Abbildung 27: Einsenkung und seitliche Aufweitung infolge vertikaler Stösse	35
Abbildung 28: Gleisbauarten	36
Abbildung 29: Absenkungsgeometrie des verlaschten Schienenstosses	40
Abbildung 30: Formel zur Berechnung der P2-Kraft ¹²	41
Abbildung 31 :Ausbreitung Körperschall und Wahrnehmung von Erschütterungen und Körperschall.....	43
Abbildung 32: Erschütterungsausbreitung im Boden und in Gebäuden.....	44
Abbildung 33: Wahrnehmung von mechanischen Schwingungen durch den Menschen	45
Abbildung 34: Mögliche Massnahmen zur Reduktion der Erschütterungen (Übersicht SBB Roger Müller).....	45
Abbildung 35: Beispiel Ansicht der Messdaten im IRISSYS	48
Abbildung 36: Beispiel einer Einsenkmessung (Spektrale Leistungsdichte (PSD)).....	48

5.4 Tabellen

Tabelle 1: Unterschiedliche Fahrzeug – Fahrweg-Modelle je nach Aufgabenstellung	13
Tabelle 2: Richtgrössen für den Bettungsmodul in Abhängigkeit der Bettungsqualität	26
Tabelle 3: Hauptverwendungsbereiche der Schwellensohlen [4].....	27
Tabelle 4: Klassifizierung des statischen Bettungsmoduls der Schwellensohlen [4].....	27
Tabelle 5: Minimaler Bettungsmodul der Schwellensole in Abhängigkeit des Unterbaus (Leykauf G. ⁵⁾	28