

Deutsche Bahn AG  
Vorstandsressort Technik,  
Systemverbund und Dienstleistungen - Technik  
DB Systemtechnik  
T.TVI32(1)  
Völckerstr. 5  
80939 München

Dr. Wolfgang Behr  
Telefon 089 / 1308-7344  
Wolfgang.Behr@deutschebahn.com  
Zeichen T.TVI32(1)-Br

## Innovationsprojekt „Leiser Zug auf realem Gleis“ (LZarG) Abschluss-Bericht Förderkennzeichen 19 U 7020 A



Foto: Contact TIEM

Dokument: 07-P-4115-T.TVI32(1)-LZarG-Abschluss

Datum: 04.05.2012

Fachabteilung: Akustik und Erschütterungen  
Völckerstr. 5  
80939 München



<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>Seite</b>
1. Angaben zum Projekt	6
1.1. Die Lärminderungsstrategie der Deutschen Bahn AG	6
1.2. Das Innovationsprojekt LZarG	7
1.3. Dokumentation der Projektergebnisse	9
2. Akustische Optimierung des Oberbaus (Teilpaket B3)	10
2.1. Zusammenwirken von fahrbahn- und fahrzeugseitigen Maßnahmen	10
2.2. Entwicklung von Schienendämpfern der Fa. Vossloh	15
2.2.1. Entwicklungsziel	15
2.2.2. Berücksichtigung betrieblicher Anforderungen	16
2.2.3. Erste Entwicklungsschritte: Ankoppelung des Dämpfers an die Schiene	17
2.2.4. Erste Entwicklungsschritte: die Länge eines Dämpferelementes	19
2.2.5. Erster Feldtest: Bewertung unterschiedlicher Prototypen	21
2.2.6. Befestigungswerkzeug zur Montage und Demontage der Dämpfer	25
2.2.7. Bestimmung der Gleisabklingrate im Prüfstand zwecks dessen Tauglichkeitsprüfung	26
2.2.8. Einbau der Vossloh-Schienendämpfer und Messung der Wirksamkeit	38
2.2.8.1. Messung der Schienenverriffelung von Referenz- und Test-Abschnitt	39
2.2.8.2. Messung der Gleisabklingraten	40
2.2.8.3. Messung der schallreduzierenden Wirkung der Schienenabsorber	51
2.3. Entwicklung einer hochelastischen Schienenbefestigung der Fa. Vossloh	54
2.3.1. Entwicklungsziel	54
2.3.2. Randbedingungen für die Entwicklung einer hochelastischen Schienenbefestigung für direkt befahrene Brücken	57
2.3.3. Einbau von hochelastischen Schienenbefestigungen als Retrofit-Maßnahme	60
2.3.3.1. Schienenfußspannungen bei Einsatz höher elastischer Schienenstützpunkte	63
2.3.3.2. Entwicklungsbegleitung der hochelastischen Schienenbefestigung	66
2.3.3.3. Planungen zur Betriebserprobung	69
2.3.3.4. Weitere Projektarbeiten hinsichtlich der hochelastischen Schienenbefestigung	73
2.4. Entwicklung spezieller Schwellenbesohlungen	75
2.4.1. Suche einer geeigneten Teststrecke	76
2.4.2. Messung des Querverschiebewiderstands	81

3.	Maßnahmenvalidierung und Bewertung (Teilprojekt C)	86
3.1.	Luftschallmessung der Einzelmaßnahmen	88
3.1.1.	Beschreibung des Testzuges und der Teststrecke	88
3.1.2.	Messung der Schienenrauheiten der Teststrecke	92
3.1.3.	Messung der Radrauheiten des Testzuges	94
3.1.4.	Messung der Gleisabklingrate der Teststrecke	95
3.1.5.	Umgebungsbedingungen der Messung (Wetter)	96
3.1.6.	Aufbau der Messpunkte und Durchführung der Messung der Vorbeifahrt	96
3.1.7.	Theoretische Grundlagen der Schallabstrahlung einer Zugvorbeifahrt mit Bezug zu den gemessenen Resultaten	98
3.1.8.	Resultate der Messung (spektrale Lärminderungswirkung inkl. Pegelwerte)	103
3.1.8.1.	Wirkung der entwickelten Maßnahmen am Fahrzeug	103
3.1.8.2.	Wirkung der Radsatzbauart	106
3.1.8.3.	Wirkung der Radabsorber	109
3.1.8.4.	Wirkung der Schienendämpfer der Fa. Vossloh	112
3.1.8.5.	Gesamtwirkung der fahrzeug- und fahrbahnseitigen Maßnahmen	115
3.2.	Luftschallmessung des akustischen Gesamteffektes	118
3.2.1.	Beschreibung des Testzuges	119
3.2.2.	Messung der Schienenrauheiten der Teststrecke	121
3.2.3.	Messung der Radrauheiten des Testzuges	121
3.2.4.	Messung der Gleisabklingrate der Teststrecke	122
3.2.5.	Umgebungsbedingungen der Messung (Wetter)	123
3.2.6.	Aufbau der Messpunkte für die Messung der Vorbeifahrt	124
3.2.7.	Durchführung der Messung	124
3.2.8.	Resultate der Messung (spektrale Lärminderungswirkung inkl. Pegelwerte)	125
3.2.8.1.	Wirkung der entwickelten Maßnahmen am Fahrzeug	125
3.2.8.2.	Wirkung der Schienendämpfer der Fa. Vossloh	127
3.2.8.3.	Gesamtwirkung der fahrzeug- und fahrbahnseitigen Maßnahmen	130
3.3.	Einfügedämmung der besohnten Schwellen im unkonsolidierten Schotterbett	132
3.3.1.	Beschreibung der Einbaustelle der besohnten Schwellen	133
3.3.2.	Beschreibung der Prüfung	134

---

3.3.3.	Auswertung der Messungen	135
3.3.4.	Resultate	136
3.3.4.1.	Einfügedämmung (Schotter nicht konsolidiert, ohne Bodenkorrektur)	136
3.3.4.2.	Luftschall	139
3.4.	Einfügedämmung der besohnten Schwellen im konsolidierten Schotterbett	140
3.4.1.	Untersuchung der Bodeneigenschaften im Bereich der verlegten besohnten Schwellen	140
3.4.2.	Resultate	141
3.4.2.1.	Einfügedämmung (Schotter konsolidiert, ohne Bodenkorrektur)	141
3.4.2.2.	Bodenbeschaffenheit, korrigierte Einfügedämmung	144
3.4.2.3.	Luftschall	146
3.5.	Rollwiderstand des optimierten Drehgestells DRRS25L	147
4.	Zusammenfassung	149
4.1.	Teilprojekt B3	149
4.2.	Teilprojekt C	150
4.2.1.	Luftschallmessungen mit dem Testzug	150
4.2.2.	Körperschallmessungen mit Regelzügen (mit Bodenkorrektur für ICE-T-Züge)	154
5.	Unterschriften	154

**Quellenverzeichnis/Literaturverzeichnis**

- [1] Schallmessungen von nachrüstbaren Maßnahmen an Güterwagen der BA Tanoos<sup>896</sup> in den KW 34/35 2010 (DB-Prüfbericht 10-P-4115-TTZ112.1-PR-Teil 2 vom 30.12.2010)
  
- [2] Schallmessungen von nachrüstbaren Maßnahmen an Güterwagen der BA Tanoos<sup>896</sup> in der KW 16/2011 (DB-Prüfbericht 11-4115-T.TVI32(3)-PR-T01 vom 20.05.2011)
  
- [3] Erschütterungs- und Luftschallmessungen zu besohlenen Schwellen im eingebauten Zustand in der KW 37/2010 (DB-Prüfbericht 10-P-4115-VTZ112.1-TP-B3-PR vom 27.12.2010)
  
- [3-1] DIN EN ISO/IEC 17025: Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien (ISO/IEC 17025:2005)
  
- [3-2] DIN EN ISO 3095:2005 Akustik (Messung der Geräuschemission von spurgebundenen Fahrzeugen)
  
- [3-3] DIN 45672-1:2009-12: Schwingungsmessung in der Umgebung von Schienenverkehrswegen - Teil 1: Messverfahren
  
- [3-4] DIN 45672-2:1995-07: Schwingungsmessungen in der Umgebung von Schienenverkehrswegen - Teil 2: Auswerteverfahren
  
- [4] Erschütterungs- und Luftschallmessungen zu besohlenen Schwellen im eingebauten Zustand in der KW 15/2011 (DB-Prüfbericht 11-4115-T.TVI32(3)-PR-T02 vom 20.05.2011)
  
- [5] Tanoos 896 – Rollwiderstand (DB-Prüfbericht 11-04115-T.TVI33(2) vom 23.05.2011)
  
- [6] Stellungnahme zu den Auswertungen der Radraugigkeiten und Schienenraugigkeiten aus den Messungen in Langweid im April 2011, E-Mail vom 28.06.2011 von Dipl. Phys. H. Venghaus

## 1. Angaben zum Projekt

Der stetig wachsende Schienenverkehr verursacht steigende Schallemissionen und entsprechende Belästigungen der Anwohner durch Schienenverkehrslärm. Daher unternimmt die Deutsche Bahn AG erhebliche Anstrengungen zur Reduktion des Schienenverkehrslärms.

### 1.1. Die Lärminderungsstrategie der Deutschen Bahn AG

Da Güterwagen immer noch häufig mit Grauguss-Bremsklötzen gebremst werden, verursachen die entsprechend stark verriffelten Güterwagen-Räder ein besonders hohes Rollgeräusch im Vergleich zum scheibengebremsten Regional- und Fernverkehr. Eine erste deutliche Reduktion der Schallabstrahlung im Güterverkehr kann somit durch die Umstellung bzw. Nachrüstung auf eine Bremstechnik mit Verbundstoff-Bremssohlen erfolgen, deren Bremsklötze die Radlaufflächen deutlich weniger aufrauen („V-Sohle“). Die fortlaufende Umstellung auf diese „Flüsterbremsen“ war und ist Bestandteil der Lärminderungsstrategie der Deutsche Bahn, die insgesamt eine Halbierung des Schienenverkehrslärms bis zum Jahr 2020 vorsieht.

Um die Halbierung des Schienenverkehrslärms erreichen zu können, bedarf es jedoch neben der Umrüstung der Güterwagen und der Umsetzung des freiwilligen Lärminderungsprogramms der Bundesregierung weitere Maßnahmen.

Daher stellt das Innovationsprojekt „Leiser Zug auf realem Gleis“ (LZarG) einen weiteren Block im Rahmen der Lärminderungsstrategie der Deutsche Bahn dar, in dem – zusammen mit namhaften Partnern der deutschen Bahnindustrie und innovativen Hochschulen – Maßnahmen zur weitergehenden Reduktion des Schienenverkehrslärms entwickelt werden sollen. Ein besonderer Fokus des Projekts LZarG lag auf einer weiteren Reduktion des Rollgeräuschs von Güterzügen, deren Bremstechnik bereits auf die leise V-Sohle umgerüstet ist. Abbildung 1.1 zeigt die Integration des vom BMWi geförderten Innovationsprojektes LZarG in die Lärminderungsstrategie der Deutschen Bahn.

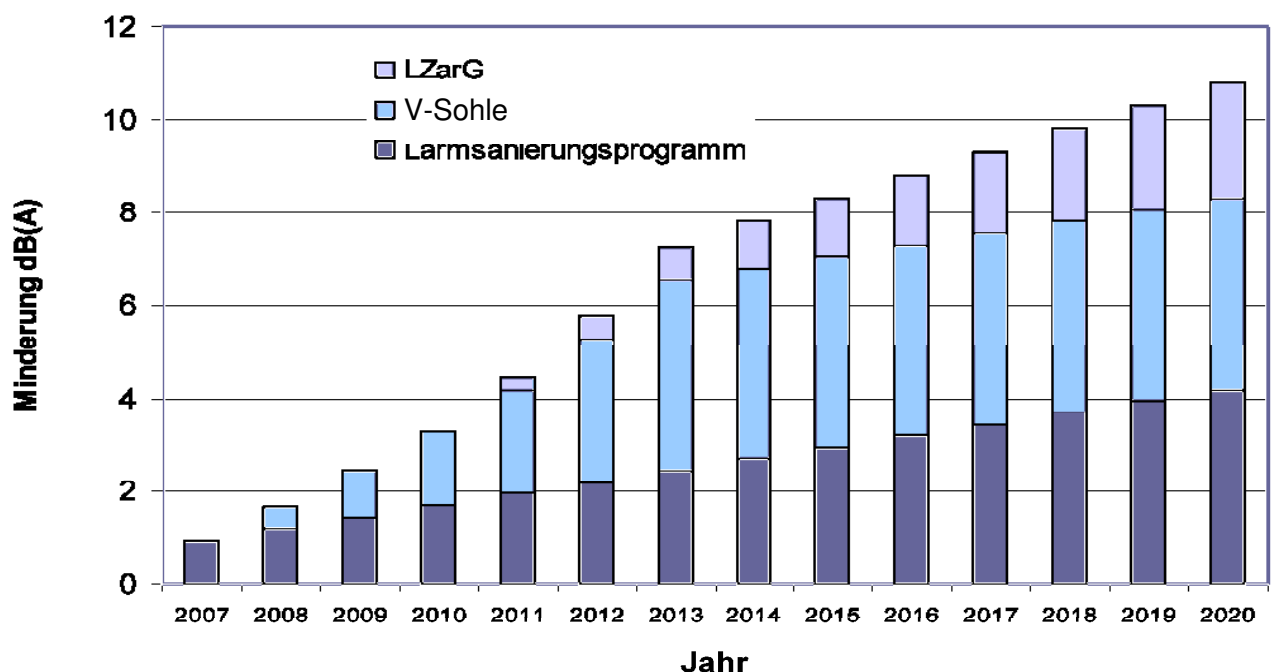


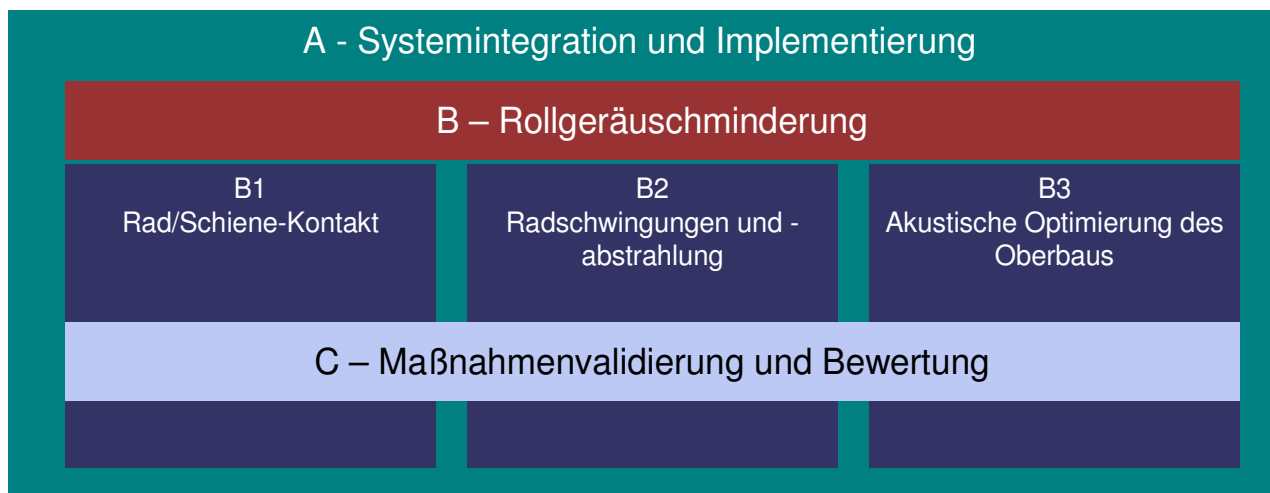
Abb. 1.1: Das Projekt LZarG ist wichtiger Bestandteil der Lärminderungsstrategie der Deutschen Bahn AG.

## 1.2. Das Innovationsprojekt LZarG

Das Innovationsprojekts LZarG hatte – nach einer Verlängerung im Herbst 2010 – eine Laufzeit von knapp vier Jahren. Es begann im November 2007 und endete im August 2011. Die anfangs festgelegten und vereinbarten Ziele lauteten:

- Lärminderung im lärmsensitiven Netz der DB AG um 5-7 dB(A) gegenüber TSI CR bis 2020 (Referenzzustand: Radsätze der Bauart 004 mit Grauguss-Klotzbremse, durchschnittliche Schienenfahrfläche)
- Entwicklung serienreifer Lösungen bis 2010 (inkl. Zulassung)
- Integration von Maßnahmen an Fahrzeug UND Oberbau
- Wirtschaftliche Beurteilung soll nicht investitionsorientiert, sondern LCC-orientiert sein
- Retrofit-Lösungen wegen langer Lebenszyklen von Fahrzeugen und Infrastruktur bevorzugt
- Umsetzung der Erkenntnisse aus der Lärmwirkungsforschung
- Umsetzung des im Konzernausschuss Umwelt (KAU) von den Unternehmensbereichen unterschiedenen DB-Umweltprogramms
- Anrechenbarkeit der Resultate zur Lärminderung gemäß fortgeschriebener Schall-03

Diese Ziele sollten mit der in Abbildung 1.2 dargestellten Projektstruktur erreicht werden. In unterschiedliche Teilpakete B1, B2 und B3 war es Aufgabe der beteiligten Industrie-Partner, technische Lösungen zur Rollgeräuschminderung zu entwickeln. Zwar ist es nicht die Aufgabe der Deutschen Bahn AG, eigene technische Lösungen zu entwickeln. Als größter Betreiber entscheidet sie jedoch über die Systemkompatibilität und Marktchancen von Lösungen mit. Deshalb musste sie in allen Teilpaketen ihre Betreiberexpertise einbringen.



**Abb. 1.2:** Die Projektstruktur des Innovationsprojektes LZarG

Das **Teilpaket B1** wurde nach einer anfänglichen Umstrukturierung durch Ausstieg eines Partners von der Fa. Contraffice GmbH geleitet. Projektpartner waren der Bochumer Verein Verkehrstechnik GmbH, die Radsatzfabrik Ilsenburg GmbH, Knorr-Bremse, ContiTech Luftfedersysteme GmbH, DB Waggonbau Niesky GmbH sowie die TU Berlin. Ferner waren beratend DB Systemtechnik und DB Schenker eingebunden. Die Ziele waren

- Verbesserung des Verständnisses zwischen Lauftechnik und Geräuschenstehung
- Verhinderung der Aufrauung von Rad und Schiene durch verbesserte Antriebsdynamik, Laufflächenkonditionierung und optimierte Werkstoffe für Rad und Schiene
- Optimierung der Güterwagenbremstechnik und einzelner lärmrelevanter Komponenten zur Verminderung der Radaufrauung und zur Verringerung der thermischen Belastung der Räder

Im Rahmen dieses Teilpaketes B1 wurden sowohl ein optimiertes Drehgestell „DRRS25L“ der Fa. Waggonbau Niesky als auch ein optimierter Radsatz „BA 309“ mit auf diesen Radsatz abgestimmten Raddämpfern der Fa. BVV entwickelt. Die Notwendigkeit der Entwicklung eines neuen Radsatzes ergab sich aus den Projektergebnissen des Teilpaketes B2 und war in dieser Form anfangs nicht absehbar.

Das **Teilpaket B2** wurde von der Fa. Bombardier Transportation geleitet. Projektpartner waren die Gutehoffnungshütte Radsatz GmbH, Schrey & Veit GmbH, Faiveley Transport Witten GmbH sowie die TU Dresden. Ferner waren beratend DB Systemtechnik und DB Regio eingebunden. Die Ziele waren

- Schalltechnische Strukturoptimierung von scheibengebremsten Radsätzen in Form der Entwicklung einer optimierten Radbauform für scheibengebremste Räder (ET422 oder ET 426)
- Entwicklung von Radabsorbern für den Einbau in scheiben- und/oder klotzgebremsten Radsätzen mit dem Ziel einer weitgehenden Vereinheitlichung der Absorber für beide Verwendungszwecke. Insbesondere sollte für klotzgebremste Güterwagenräder BA004 ein optimierter Raddämpfer entwickelt werden.

Im Rahmen dieses Teilpaketes B2 wurden ein optimierter und gedämpfter scheibengebremster Radsatz für die ET-42x-Triebzugfamilie mit besonderem Augenmerk auf den ET422 sowie ein optimierter Radsatz „BA 308“ der Fa. GHH mit auf diesen Radsatz abgestimmten Raddämpfern der Fa. Schrey & Veit entwickelt. Die Entwicklung eines neuen Radsatzes ergab sich aus den Projektergebnissen, da das anfangs vorgesehene Güterwagenrad BA004 keine Einfräsung einer Rille in den Radkranz zur Anbringung von Raddämpfern aus strukturdynamischen Gründen erlaubte.

Das **Teilpaket B3** wurde von der DB Systemtechnik geleitet. Projektpartner waren Vossloh Fastening Systems GmbH, Werkstoffe Getzner GmbH sowie die TU München. Ferner war beratend DB Netze eingebunden. Die Ziele waren

- Zusammenstellung der aus akustischer Sicht problematischen Sonderbereiche (Tunnel, Brücke, Weiche, ...)
- Zusammenstellung bekannter Lärminderungsmaßnahmen
- Simulation der Wirksamkeit von Lärminderungsmaßnahmen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Oberbaukomponenten
- Weiterentwicklung und Begutachtung von Schienenbefestigungssystemen
- Weiterentwicklung und Begutachtung von weichen Schwellenbesohlungen (ggf. kombiniert mit Schienenstegbedämpfung)



Im Rahmen dieses Teilpaketes B3 wurden Schienenstegdämpfer und eine hochelastische Schienenbefestigung der Fa. Vossloh sowie unterschiedliche optimierte Schwellenbesohlungen der Fa. Werkstoffe Getzner entwickelt.

Alle entwickelten Maßnahmen sollten – im Falle der fahrzeugseitigen Maßnahmen – in Testzügen und – im Falle von fahrbahnseitigen Maßnahmen – in Schienennetz der Deutschen Bahn AG eingebaut und unter realen Betriebsbedingungen hinsichtlich der akustischen Wirksamkeit geprüft und validiert werden. Die Projektleitung dieses **Teilprojektes C** lag ebenfalls bei der DB Systemtechnik.

Umklammert wurden die beiden Teilprojekte B und C von dem Teilprojekt A unter Leitung der Fa. Contraffic GmbH. Die Ziele dieses Teilprojektes A waren unter Beteiligung aller Projektpartner:

- Analyse der wirtschaftlichen und betrieblichen Rahmenbedingungen
- Analyse der potenziellen Zielerreichungsbeiträge der Fahrzeug- und Verkehrsarten
- Zieldefinition eines Zielsystems für technisch und wirtschaftlich und betrieblich effiziente Lärminderung
- Modellbildung von Modellen und Werkzeugen für die technische und wirtschaftliche Beurteilung von Lärminderungsmaßnahmen
- Evaluation: projektbegleitendes Review und Benchmarking der laufenden Forschungsaktivitäten auf Grundlage der oben genannten Modelle und Werkzeuge
- Dokumentation des laufenden Projektfortschrittes durch regelmäßige Berichte über den Verbundprojektstand und Arbeitsfortschritt
- Vorbereitung und Durchführung von allen erforderlichen Verbundprojektbesprechungen
- Integration von Maßnahmen zu technisch und wirtschaftlich effizienten Gesamtlösungen
- Strategieentwicklung für die technische, wirtschaftliche und betriebliche Maßnahmenumsetzung.

### **1.3. Dokumentation der Projektergebnisse**

Dieser Projektbericht umfasst die unter der Verantwortlichkeit der Fachabteilung „Akustik und Erschütterungen“ der DB Systemtechnik stehenden Teilpakete B3 „Akustische Optimierung des Oberbaus“ und C „Maßnahmenvalidierung und Bewertung“ des Projektes LZarG. Die Darstellung dieser Teilpakete und der in diesen Teilprojekten erfolgten Arbeiten erfolgt gemäß bestehender Vorgaben ergebnisorientiert.

Die einzelnen Schritte in den Teilpaketen B1 und B2 werden seitens der zuständigen Teilprojektleiter (Fa. Contraffic bzw. Fa. Bombardier) in gesonderten Berichten dargestellt.

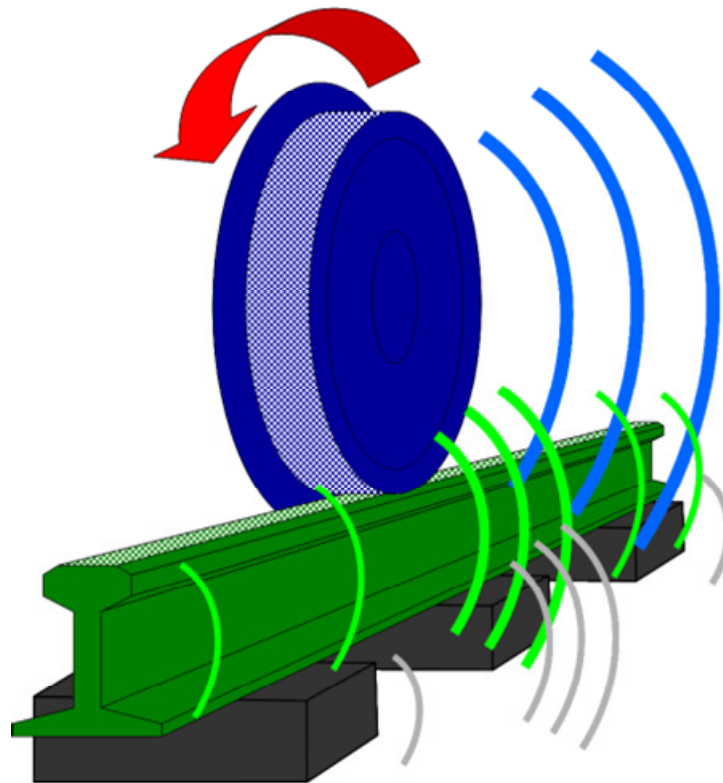
Die Bewertung aller Resultate der Teilpakete B1 – B3 sowie der Validierungsmessungen im Teilprojekt C hinsichtlich deren Wirtschaftlichkeit erfolgt im Rahmen des Teilprojektes A seitens der Fa. Contraffic in einem gesonderten Bericht insbesondere unter dem Aspekt der zukünftigen Umsetzung der erzielten Projektergebnisse.

## 2. Akustische Optimierung des Oberbaus (Teilpaket B3)

### 2.1. Zusammenwirken von fahrbahn- und fahrzeugseitigen Maßnahmen

Im Teilprojekt B wurden Maßnahmen zur Reduktion des Rollgeräusches entwickelt. Das Rollgeräusch, bzw. physikalisch exakter das „Vorbeifahrtgeräusch“ setzt sich aus mehreren Komponenten zusammen (siehe Abbildung 2.1):

- die vom Rad abgestrahlte Schallkomponente
- die von der Schiene abgestrahlte Schallkomponente
- die von der Schwelle abgestrahlte Schallkomponente



**Abb. 2.1:** Das Vorbeifahrtgeräusch setzt sich im Wesentlichen aus den drei Komponenten von Rad, Schiene und Schwelle zusammen.

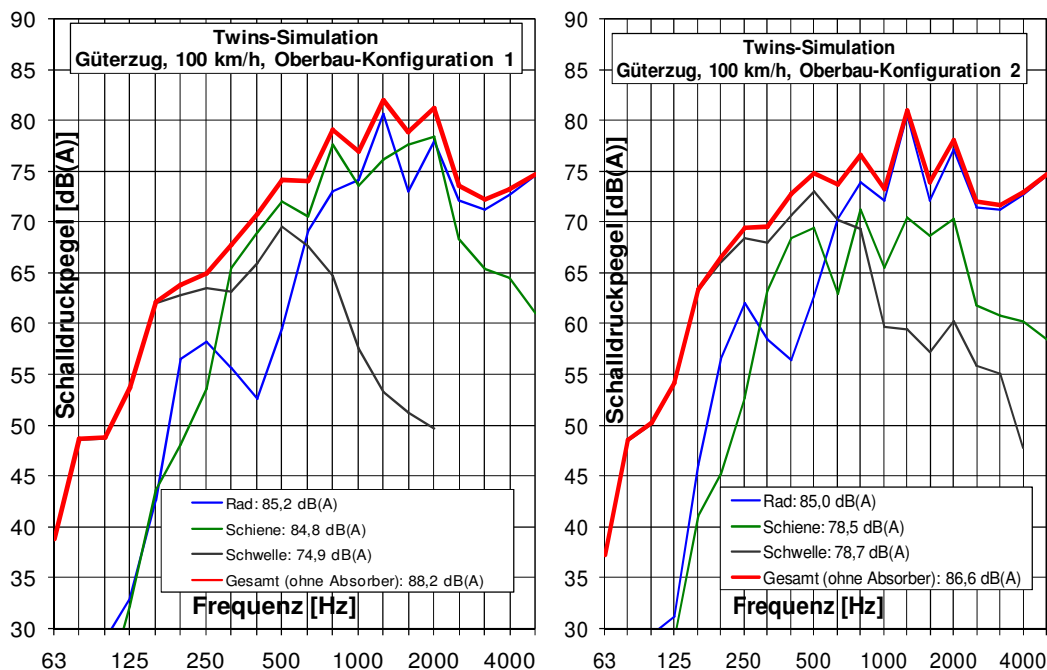
Die Anteile, mit denen die einzelnen Komponenten (Rad, Schiene, Schwelle) zum gesamten Vorbeifahrtgeräusch beitragen, werden von vielen Faktoren beeinflusst:

- beim Rad: Radbauart (insbesondere Unterschied Güterwagen-/Reisezugwagenrad)  
Existenz von Raddämpfern  
Profiltiefe des Rades (Maximal-/Minimalprofil: Einfluss auf die Radmoden)
- bei der Schiene: Zusammensetzung des Oberbaus (insbesondere Wahl der Zwischenlage)  
Instandhaltungszustand des Oberbaus (Zustand der Schottersteine, Stopfzustand des Schotterbettes, ggf. Schwellenhohllagen, ...)
- bei der Schwelle: Schwellengröße („Normalschwelle B70“, „Breitschwelle B90“, ...)  
Schwellenart (Beton-/Holzschwelle)

In Abbildung 2.2 sind die Vorbeifahrtpegel eines Güterzuges unter realen Bedingungen (K-Sohle-Bremssystem, Radbauart BA004 Maximalprofil, Zuggeschwindigkeit 100 km/h, Betonschwelle B70, mittlere Verriffelung von Rad und Schiene) für zwei unterschiedliche Oberbaukonfigurationen berechnet (Konfiguration 1 = weich gelagerte Schiene, Konfiguration 2 = hart gelagerte Schiene). Mittels Berechnung lassen sich die Anteile von Rad, Schiene und Schwelle zum gesamten Vorbeifahrtpegel darstellen. So kann man mit Hilfe dieser Berechnung zeigen, dass der Anteil der Schiene an der gesamten Schallabstrahlung einer Zugvorbeifahrt sehr unterschiedlich sein kann.

Die Oberbaukonfiguration 1 mit einer weichen Schienenlagerung spiegelt einen realen Oberbau im Netz der Deutschen Bahn dar. Diese weiche Schienenlagerung ist nicht zwingend mit einer weichen Zwischenlage gleichzusetzen. Auch im Falle einer harten Zwischenlage kann bei einem ungünstigen Instandhaltungszustand die Schiene Schwingungseigenschaften einer weich gelagerten Schiene aufweisen. Bei einer derartigen Oberbaukonfiguration würden sowohl Rad- als auch Schienendämpfer den Vorbeifahrtpegel deutlich reduzieren, deren Kombination würde den Vorbeifahrtpegel sogar signifikant reduzieren.

Die Oberbaukonfiguration 2 stellt einen aus akustischer Sicht sehr guten Oberbau dar. Eine harte Zwischenlage allein führt jedoch nicht zwingend zu einem sehr geringen Anteil der Schiene am gesamten Vorbeifahrtpegel, auch der Instandhaltungszustand muss sehr gut sein. Diese Konfiguration 2 soll daher lediglich die Tatsache darstellen, dass es Oberbaukonfigurationen geben kann, bei denen Schienendämpfer einen nur sehr geringen Effekt auf den Vorbeifahrtpegel haben können, auch wenn der Schienendämpfer selbst gute Dämpfungseigenschaften aufweist. Dafür ist in diesem Falle die gesamte berechnete Schallabstrahlung bereits 1,6 dB geringer als im Falle der Oberbaukonfiguration 1. Bei einer derartigen Oberbaukonfiguration würde der Einsatz von Schienendämpfern den Vorbeifahrtpegel nur unwesentlich reduzieren, der Einsatz von Raddämpfern hätte einen sehr großen Effekt.



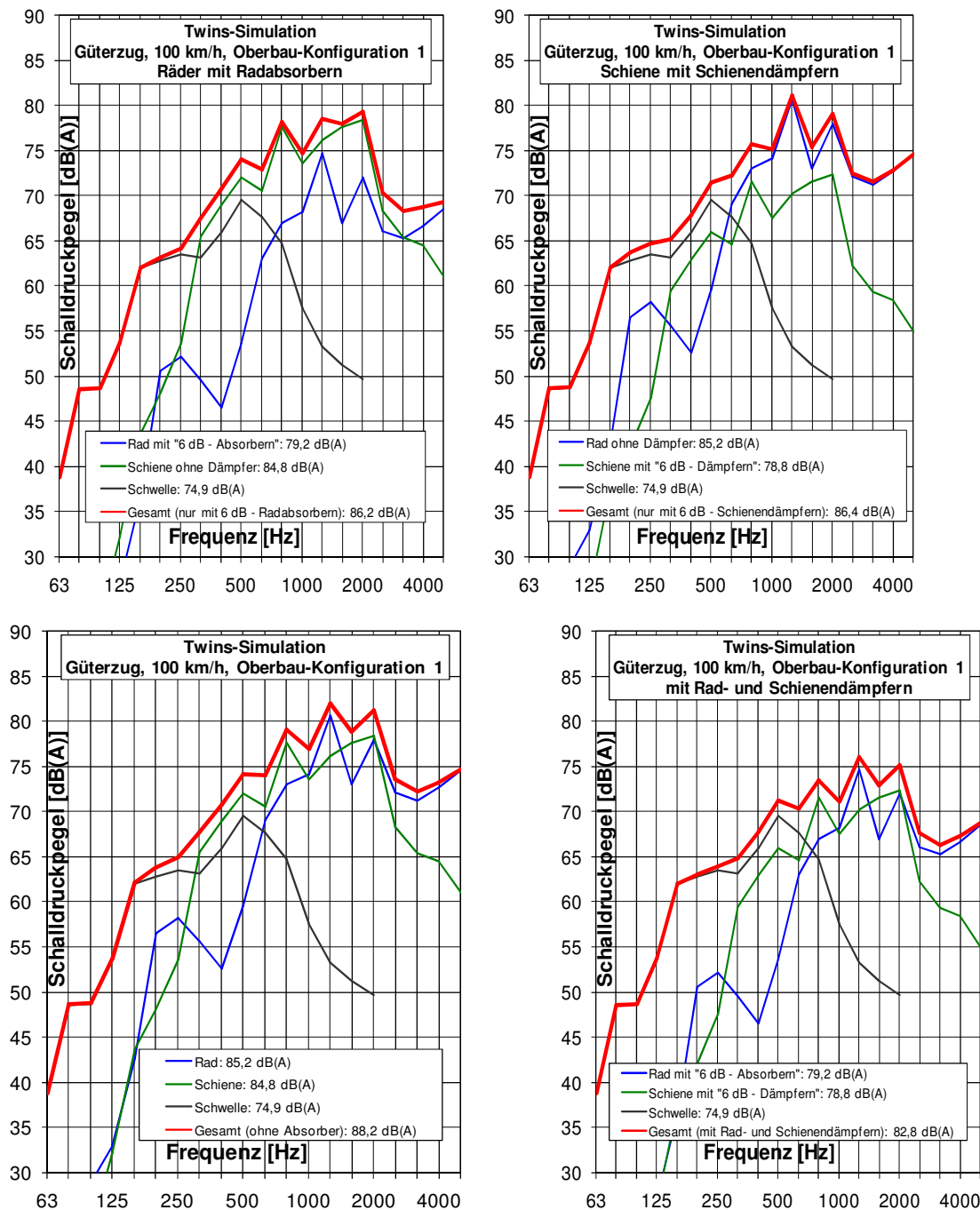
**Abb. 2.2:** Simulation des Vorbeifahrtgeräusches eines Güterzuges für zwei unterschiedliche Oberbau-Konfigurationen.

So lässt sich mit diesen Simulation zeigen, dass eine merkliche Reduktion des Vorbeifahrtpegels nur bei gleichzeitiger Reduktion der Schallabstrahlungsanteile von Rad und Schiene erreicht werden kann (Bsp: Oberbaukonfiguration 1): zwar lässt sich der vom Rad verursachte Anteil der

Schallabstrahlung mit Radabsorbieren reduzieren, so wie sich der von der Schiene verursachte Anteil der Schallabstrahlung mit Schienendämpfern reduzieren lässt, doch nur beide Maßnahmen zusammen bewirken eine deutliche Schallreduktion. Abbildung 2.3 zeigt diese Effekte und deren gegenübergestellte Wirkung:

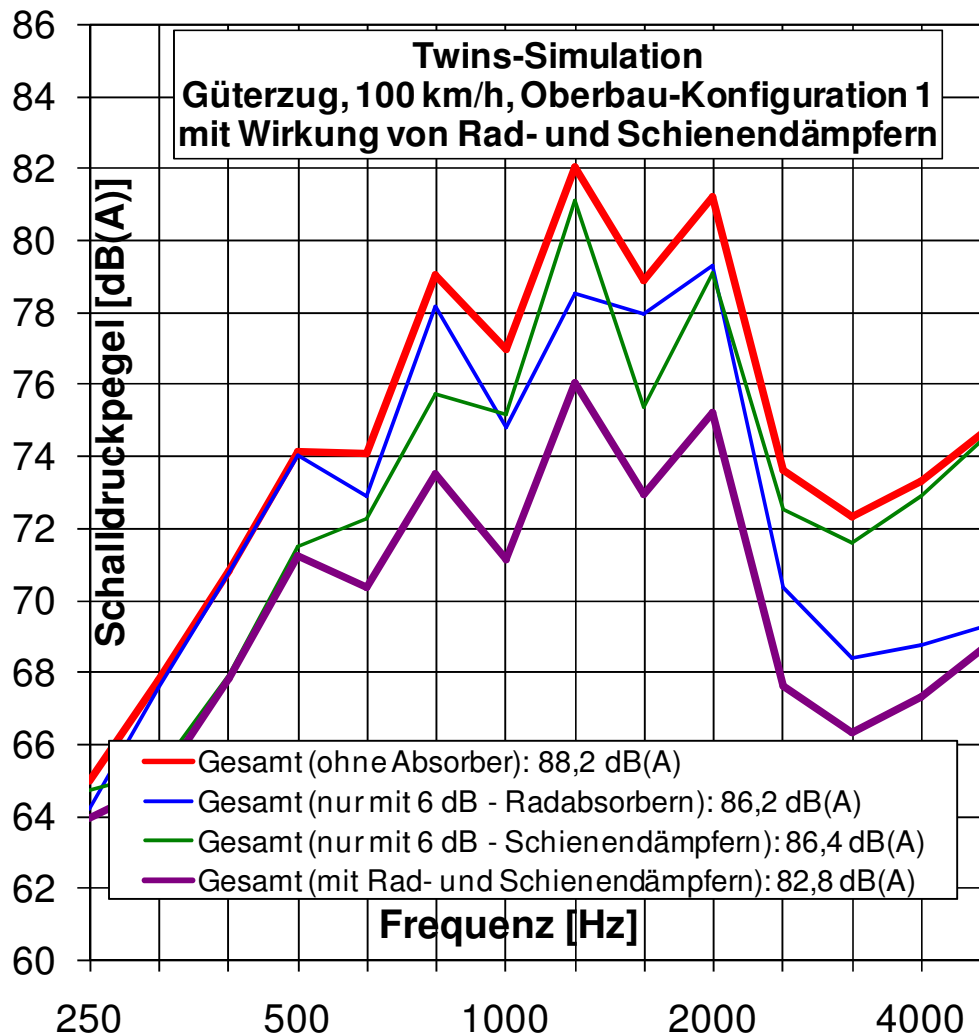
- Reduktion des Vorbeifahrtpegels durch Radabsorbieren mit 6 dB – Wirkung (oben links)
- Reduktion des Vorbeifahrtpegels durch Schienendämpfer mit 6 dB – Wirkung (oben rechts)
- Reduktion des Vorbeifahrtpegels durch Rad- u. Schienendämpfer, je 6 dB Wirkung (unten rechts)

Zum Vergleich mit dem Ausgangszustand ohne Dämpfungsmaßnahmen ist dieser Vorbeifahrtpegel – wie bereits in Abb. 2.2 links gezeigt - nochmals in dieser Abb. 2.3 unten links dargestellt.



**Abb. 2.3:** Simulation der Wirkung von Rad- und/oder Schienendämpfern auf das Vorbeifahrtgeräusch eines Güterzuges für eine typische Oberbau-Konfiguration

Ein Vergleich der in Abbildung 2.3 dargestellten optimierten Zustände am Fahrzeug („Radabsorber“) und am Fahrweg („Schienendämpfer“) zeigt somit, dass mit Radabsorbern oder Schienendämpfern mit einer angenommenen absoluten schallreduzierenden Wirkung von jeweils 6 dB das Vorbeifahrtgeräusch eines Güterzuges nur um jeweils ca. 2 dB reduziert werden kann: bei der angenommenen Oberbaukonfiguration 1 würde ein 6 dB – Radabsorber das gesamte Vorbeifahrt-Rollgeräusch von 88,2 dB(A) auf 86,2 dB(A) senken, ein 6 dB – Schienendämpfer würde das gesamte Vorbeifahrt-Rollgeräusch von 88,2 dB(A) auf 86,4 dB(A) senken. Das Zusammenwirken dieser beiden Dämpfer würde jedoch eine gesamte Schallreduktion des Vorbeifahrtgeräusches von 88,2 dB(A) auf 82,8 dB(A) senken, also um 5,4 dB. Diese hohe effektive Wirksamkeit verdeutlicht Abbildung 2.4.



**Abb. 2.4:** Berechnung der effektiven Einzel-Wirkung von Rad- bzw. Schienendämpfern (mit einer angenommenen absoluten Wirkung von jeweils 6 dB) sowie deren kollektive Gesamtwirkung

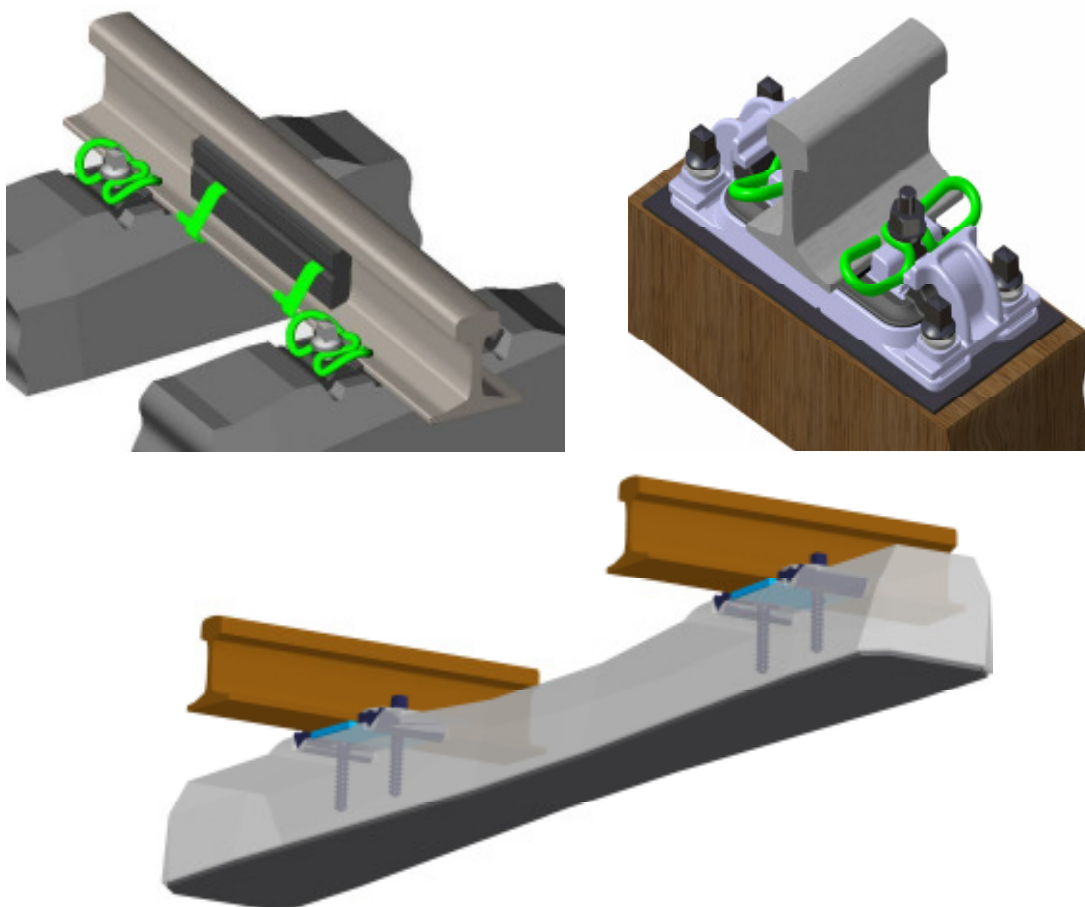
Die mit dem Programm TWINS dargestellten berechneten Vorbeifahrtpegel dürfen nun nicht zu dem „Trugschluss“ verleiten, im Vorfeld anhand einer Simulationsrechnung entscheiden zu wollen, ob an einer bestimmten Strecke der Einsatz von Schienendämpfern einen deutlichen akustischen Effekt hätte. Zwar kann das Programm TWINS anhand der eingegebenen Parameter von Oberbau, Radsätzen der Züge, Achsabstände der Züge, Verriffelung von Rädern und Schiene den Vorbeifahrtpegel eines Zuges und die entsprechenden Anteile von Rad, Schiene und Schwelle recht zuverlässig berechnen, doch sind diese Parameter (insbesondere die Parameter des Oberbaus) nicht immer ausreichend bekannt. So kann man zwar die Zwischenlagensteifigkeit als Parameter angeben, der Zustand des Schotters (Stopfungszustand, Alterungszustand der Schottersteine, ...) und auch die Tatsache von ggf. hohlliegenden Schwellen sind jedoch nicht als explizite

Eingabeparameter vorgesehen. Doch auch wenn es derartige Parameter geben würde, wäre es für die Planung der Verwendung von Schienendämpfern wenig hilfreich, da sich diese Oberbauparameter auch im Laufe der Zeit ändern können. Der in den Abbildungen 2.3 und 2.4 dargestellte direkte Vergleich von zwei Oberbaukonfigurationen (die durchaus an der selben Bahnstrecke und somit am physikalisch selben Gleis zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten vorliegen können) zeigt vielmehr, dass eine deutliche und dauerhafte Reduktion des Vorbeifahrtpegels nur mit fahrzeug- und fahrbahnseitigen Maßnahmen zusammen erzielt werden kann. Dieses anhand der Simulationen theoretisch hergeleitete Resultat konnte mit den Validierungsmessungen am Ende des Projektes auch im Feldversuch belegt und bestätigt werden.

Die in den Teilpakten B1 und B2 entwickelten fahrzeugseitigen Maßnahmen können jedoch nur dann ihre volle Wirkung entwickeln, wenn der gesamte Zug mit den verbesserten Maßnahmen ausgestattet ist: im Falle des oben dargestellten Beispiels würde dies bedeuten, dass alle bzw. ein sehr hoher Anteil der Wagen eines Güterzugs mit schalloptimierten Rädern mit Radabsorbern ausgerüstet sein müssten.

Diese Einschränkung gilt in der Regel nicht für fahrbahnseitige Maßnahmen: im Falle des oben dargestellten Beispiels würde dies bedeuten, dass durch am Gleis befestigte Schienendämpfer der Anteil des Gleises an der Schallabstrahlung bei der Überfahrt aller Wagen eines Zuges reduziert werden würde. Daher haben die im Teilpaket B3 entwickelten Maßnahmen zur akustischen Optimierung des Oberbaus einen besonders hohen Stellenwert.

Die folgenden Kapitel zeigen nun die Entwicklung von drei Optimierungsmaßnahmen am Oberbau auf (Abb. 2.5): Schienendämpfern, hochelastische Schienenbefestigung, Schwellenbeschlung.



**Abb. 2.5:** Im Teilpaket B3 wurden drei Oberbaumaßnahmen entwickelt bzw. optimiert: Schienendämpfer (oben links), hochelastische Schienenbefestigung (oben rechts) und Schwellenbeschlungen (unten).

## 2.2. Entwicklung von Schienendämpfern der Fa. Vossloh

### 2.2.1. Entwicklungsziel

Zu Beginn des Projektes LZarG gab es bereits einige Systeme von Schienendämpfern anderer Hersteller. Zwar waren diese Systeme teils noch in der Erprobungsphase, doch zeigten sie bereits gute Wirksamkeiten. Zu diesen bereits existierenden Schienendämpfern zählten im Jahre 2008 unter anderem

- System „VICON-AMSA“ der Fa. Schrey & Veit
- System „Tata Steel“ der Fa. Corrus

sowie Schallabstrahlungsreduktionssysteme der Fa. Sekisui.

Beide oben genannte Dämpfungssysteme hatten eine ausreichend große Masse zur Reduktion von Schwingungen auch im tieferen Frequenzbereich unter 1000 Hz, waren jedoch hinsichtlich Aufbau und Befestigung unterschiedlich konzipiert:

- Dämpfer des Systems „Tata Steel“ wurden seitlich der Schiene angebracht, eine spezielle Ankoppelschicht sollte einen guten Kontakt zwischen Dämpfern und Schiene ermöglichen (zur optimalen Übertragung der Schwingungsenergie von der Schiene in den Dämpfer). Die Befestigung selbst erfolgte mittels Klammern. Die Ankoppelschicht machte einen zweistufigen Befestigungsvorgang an der Schiene erforderlich. Das Entfernen der Dämpfer war möglich, an der Schiene noch haftende Reste der Ankoppelschicht konnten nachträglich entfernt werden. Diese Dämpfer sind in Abbildung 2.6 links dargestellt.
- Dämpfer des Systems „VICON-AMSA“ wurden sowohl seitlich als auch unter der Schiene angebracht. Die Befestigung an die Schiene erfolgte mittels fester Schraubverbindungen. Eine Ankoppelschicht haben diese Dämpfer nicht, so dass eine Entfernung der Dämpfer vollständig ohne Rückstände an der Schiene erfolgen kann. Diese Dämpfer sind in Abbildung 2.6 mittig und rechts dargestellt.



**Abb. 2.6:** Schienendämpfer der Firmen Corus (links) und Schrey & Veit (mitte, rechts) waren bereits zu Beginn des Projektes LZarG sehr weit entwickelt und zeigten in der Erprobung gute Resultate.

Im Jahre 2008 war das Entwicklungsziel vorrangig eine möglichst gute akustische Wirksamkeit. Aspekte wie Einbau- und ggf. Ausbauezeiten sowie weitere wirtschaftliche Randbedingungen standen damals (noch) nicht im Vordergrund.

Ziel der Entwicklung von Schienendämpfern im Rahmen des Projektes LZarG war es daher, neuartige Schienendämpfer vor allem auch unter wirtschaftlichen Aspekten zu entwickeln. Im Vordergrund standen somit eine möglichst einfache Handhabung (schneller und einfacher An- und Abbau) unter Beachtung aller Anforderungen und Randbedingungen seitens DB Netze und eine kostengünstige Alternative zu existierenden „großen komplexen“ Dämpfersystemen. Eine mögliche geringere akustische Wirksamkeit dieser Dämpfer war somit bereits zu Beginn des Projektes als akzeptabel erachtet in Relation zu möglichen deutlich günstigeren LCC-Kosten.

Die technische Entwicklung der Schienendämpfer erfolgte seitens der Fa. Vossloh in enger Kooperation mit der TU München (Lehrstuhl und Prüfamts für Verkehrswegebau, PA VWB). Überlegungen zur Konstruktion, Durchführung von Labortestmethoden und Bewertung derartiger Labortests mit eventuellen Rückschlüssen auf Konstruktionsänderungen waren Aufgabe des Dämpferherstellers Vossloh Fastening Systems. Aufgabe der Deutsche Bahn war eine Entwicklungsbegleitung und eine Bewertung von Prototypen im Hinblick auf betriebstechnische Tauglichkeit unter Berücksichtigung von betriebswirtschaftlichen Aspekten. Die Einhaltung dieser im folgenden Kapitel 2.2.2 explizit genannten Betriebsanforderungen wurden seitens der zuständigen Oberbau-Experten der DB Systemtechnik bereits in den einzelnen Entwicklungsschritten (siehe Kapitel 2.2.3 ff.) überprüft. Bei technischen Details (z. B. Material des Dämpfers, Form und Material der Befestigung an die Schiene, ...) war die Deutsche Bahn in Ihrer Funktion als Betreiber nicht bzw. nur am Rande involviert.

### **2.2.2. Berücksichtigung betrieblicher Anforderungen**

Seitens DB Netz bestehen folgende technische Anforderungen an Schienendämpfer im Hinblick auf Schienenfußverkabelung, Durcharbeitung, Schienenbearbeitung, Befestigung am Schienenfuß, Temperaturbeständigkeit und weiterer Aspekte:

- Sollten Schienendämpfer im Bereich von Schienenfußkabeln (LST-Kabel, LZB) eingebaut werden, so sind folgende Anforderungen zu erfüllen:
  - Befestigung des Schienenfußkabels muss möglich sein
  - Ein- und Ausbau des Schienenfußkabels muss möglich sein
  - Signalübertragung LZB darf nicht beeinflusst werden
  - Kabel müssen gegen Beschädigung aus Instandhaltungsmaßnahmen geschützt sein
- Gleise mit Schienendämpfern müssen uneingeschränkt stopfbar sein
  - Eingriff der Stopfpickel darf die Dämpfer nicht beschädigen
  - Für den Angriff von Rollen- und Hebezeugen am Schienenkopf ist hinreichender Freiraum einzuhalten
  - Die Durchbiegung der Schiene beim Heben darf die Dämpfer nicht beschädigen
  - Die Planierung des Schotters darf nicht zur Zerstörung von Dämpfern und ihrer Befestigung führen
- Die Schienenbearbeitung mit Schleifmaschinen und Fräsen muss ohne Einschränkungen möglich sein
  - Die Schiene muss vollständig reprofiliert werden können, die Arbeitsräume für die Aggregate sind von Einbauten frei zu halten
  - Funkenflug darf nicht zu einer Beschädigung der Dämpfer führen
- Der Schienenfuß dient der temporären Befestigung von Hilfsmitteln im Gleisbau, in der LST und ET und im Notfallmanagement. Die Zugänglichkeit des Schienenfußes ist sicher zu stellen. Beispiele sind:
  - Feste Absperrungen bei Baumaßnahmen im Nachbargleis
  - Erdungsvorrichtungen
  - Langsamfahrsignale



- Die Schienendämpfer müssen innerhalb des Temperaturbereiches der Schiene dauerhaft und wirksam sein.
  - o Temperaturbereich witterungsbeding: -20 °C bis +60 °C
  - o Bei Einsatz der linearen Wirbelstrombremse: bis +80 °C
- Die Herstellung des lückenlosen Gleises / Arbeiten am lückenlosen Gleis müssen uneingeschränkt möglich sein
  - o Das Längen der Schiene mit künstlicher Wärme (Wärmeröhren) soll ohne Ausbau der Dämpfer möglich sein (relevant vor allem beim Setzen von Ersatzschienen).
  - o Für das Schweißen der Schienen ist eine Anweisung erforderlich, wie viele Dämpfer zur Durchführung der Arbeiten zu demontieren sind.
- Die Dämpfer müssen einfach handhabbar sein. Sind besondere Werkzeuge erforderlich, sind diese in den Instandhaltungs-Bezirken bereit zu stellen und die Personale zu schulen.
  - o Alle Walzzeichen müssen dauerhaft stabil und sichtbar auf die Dämpfer übertragen werden
  - o Bohrungen im Schienensteg müssen dauerhaft sichtbar bleiben
  - o Die bauliche Sicherung von Schienenfehlern muss möglich sein
  - o Die Dämpfer dürfen keinen Einfluss auf die Ultraschallprüfung der Schiene haben
- Anforderungen an die Befestigung der Dämpfer am Gleis
  - o Einfache Handhabung
  - o Stabile Befestigung
  - o Robustheit gegenüber Instandhaltungs-Maßnahmen
  - o Befestigung / Wirkung im Bereich erhabener Walzzeichen

### **2.2.3. Erste Entwicklungsschritte: Ankoppelung des Dämpfers an die Schiene**

Eine erste Entwicklungsstufe galt der Ankoppelung des Dämpfers an die Schiene. So wurden anfangs Vor- und Nachteile einer speziellen akustischen Ankoppelschicht diskutiert. Für eine Ankoppelschicht sprach eine möglichst optimale energetische Verbindung zwischen Schiene und Dämpfer. Unter wirtschaftlichen Aspekten bedeutet eine Ankoppelschicht jedoch Mehrkosten des Dämpfersystems selbst sowie ein höherer Aufwand bei Montage und insbesondere der Demontage der Dämpfer. Bei der Montage muss vorher ggf. der Zustand der Schiene inspiziert werden und die Schiene ggf. gereinigt werden (oder aber die Entwicklung der Ankoppelschicht erfolgt derart, dass die Eigenschaften der Oberfläche von Schienensteg und Schienenfuß vernachlässigt werden können). Bei der Demontage müssen ggf. Reste der Ankoppelschicht in einem weiteren Arbeitsschritt von der Schiene entfernt werden.

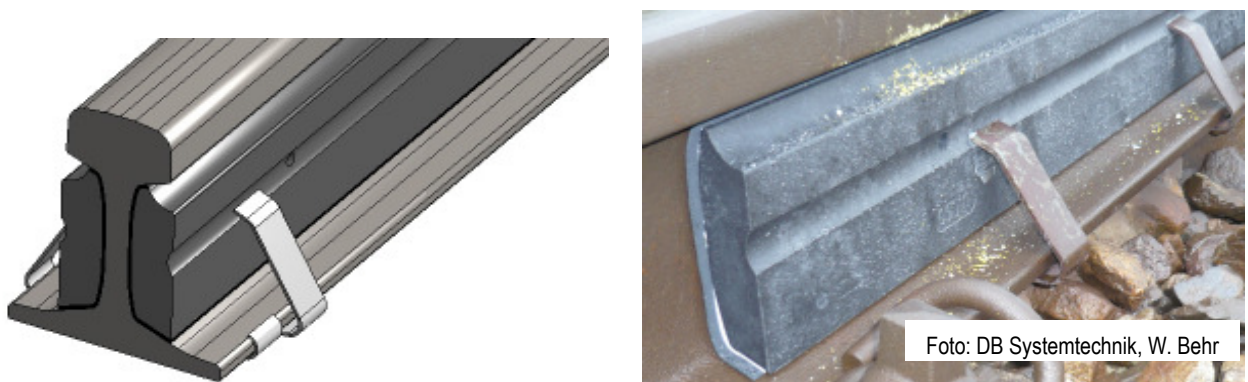
So wurde im ersten Entwicklungsjahr eine Ankoppelschicht konzipiert und unter Laborbedingungen getestet. Diese Schicht erfüllte die Randbedingung, dass der Dämpfer problemlos wieder von der Schiene entfernt werden kann (Abb. 2.7).



**Abb. 2.7:** Eine anfangs entwickelte Ankoppelschicht ermöglichte eine gute akustische Ankoppelung an die Schiene und erlaubte zugleich ein rückstandslose Entfernung des Dämpfers von der Schiene.

Diese Versuche zeigten, dass die Dämpfer nach einer Entfernung nicht mehr für eine erneute Montage verwendbar waren. Eine Weiterentwicklung der Ankoppelschicht hätte dies möglicherweise unterbinden können. Da jedoch eine auch kurzfristige Demontage von Schienendämpfern aus betrieblichen Gründen nicht unwahrscheinlich ist (spezielle Instandhaltungsverfahren, Reparatur- und Schweißarbeiten nach einem Schienenbruch, ...), wurde die Weiterentwicklung einer derartigen Ankoppelschicht zwischen Dämpfer und Schiene mit einer „klebeähnlichen“ Verbindung aus wirtschaftlichen und praktischen Aspekten verworfen.

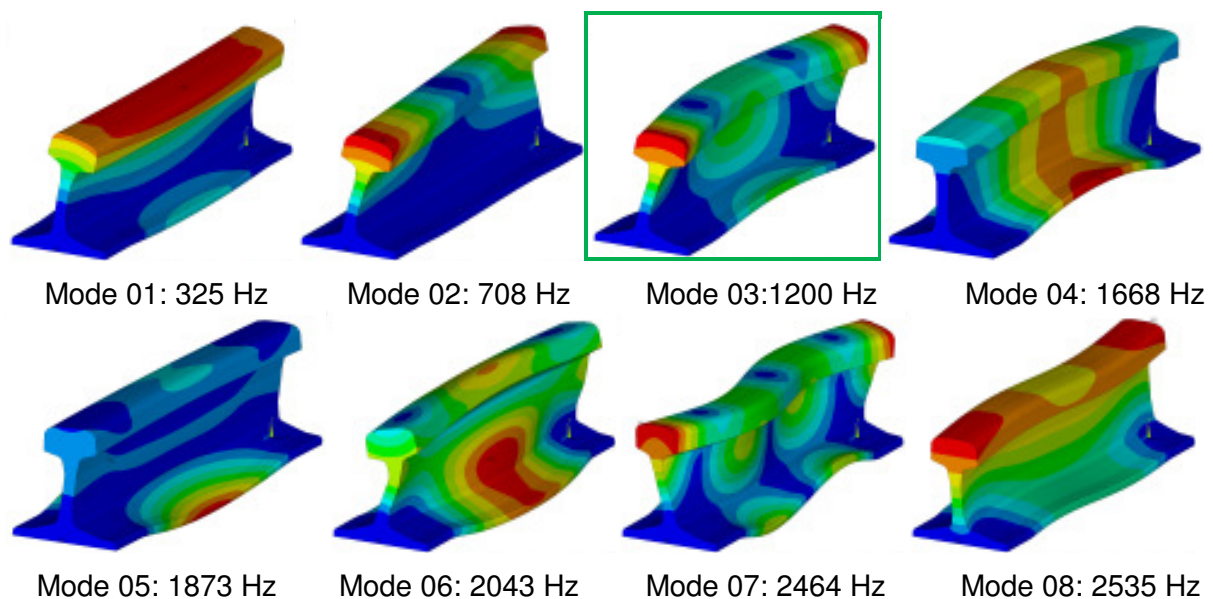
Als Alternative wurde eine andersartige Ankoppelschicht entwickelt, die mit dem Dämpfer eine Einheit bildet und aufgrund einer hohen Anpresskraft des Dämpfers an die Schiene ihre Wirkung entfalten kann. Diese Ankoppelschicht war bereits fest mit dem Dämpfer verbunden, hatte eine Dicke von ca. 2 mm und außerdem elastische Eigenschaften bei einem zugleich geschlossenenporigem Aufbau. Dieser spezielle Aufbau verhinderte eine schwammartige Wasseraufnahme und ermöglichte zugleich eine gute Ankoppelung des Dämpfers an die Schiene auch bei kleineren „Unebenheiten“ auf der Schiene wie z. B. Rost oder kleineren Schmutzpartikeln. Diese Ankoppelschicht ist in Abbildung 2.8 dargestellt.



**Abb. 2.8:** Eine spezielle akustische Ankoppelschicht wurde entwickelt und getestet.

## 2.2.4. Erste Entwicklungsschritte: die Länge eines Dämpferelementes

Ein Schienendämpfer soll insbesondere die Schwingungsmoden der Schiene dämpfen, die zur Schallabstrahlung der Schiene maßgeblich beitragen. Zu diesem Zwecke wurde seitens der DB eine Modalanalyse durchgeführt, um die Moden der Schiene hinsichtlich der Modalfrequenzen quantifizieren zu können. Diese Moden sind unter der Annahme einer sehr harten Lagerung der Schiene (d. h. Festhaltung der Randbedingungen am Schienenfuß im Bereich der Zwischenlage) in Abbildung 2.9 dargestellt. Im Gegensatz zu Schwingungsmoden eines Rades sind jedoch die Schwingungsmoden einer Schiene – wie in Abb. 2.9 dargestellt – anders zu bewerten, da die Anregung eines Eisenbahnrades und einer Schiene unterschiedlich ist: während das Rad immer an der selben bzw. einer äquivalenten Stelle angeregt wird (nämlich dem Kontaktpunkt zwischen Rad und Schiene auf der Radlaufläche), erfolgt die Anregung der Schiene bei einer Zugfahrt an stets wechselnder Lokalität von dem Stützpunkt der Schiene (Ort der Schienenbefestigung, in Abbildung 2.9 sind dies jeweils Anfang bzw. Ende des Schienenstückes) bis hin zur Mitte des Schwellenfaches (in Abbildung 2.9 ist dies die Mitte des Schienenstückes) und wieder zum Stützpunkt. Die in Abbildung 2.9 grün umrandete „Pinned-Pinned-Mode“ zeigt somit im Fall der Anregung in Schwellenfachmitte Resonanz, im Fall der Anregung im Schienenstützpunkt tritt bei dieser Modalfrequenz jedoch Antiresonanz auf. Die Anregung der Schiene lässt sich somit auch als erzwungene Schwingung eines elastisch gelagerten Balkens beschreiben, wie es auch als Grundlage für Messung und Bestimmung der Gleisabklingrate dient.

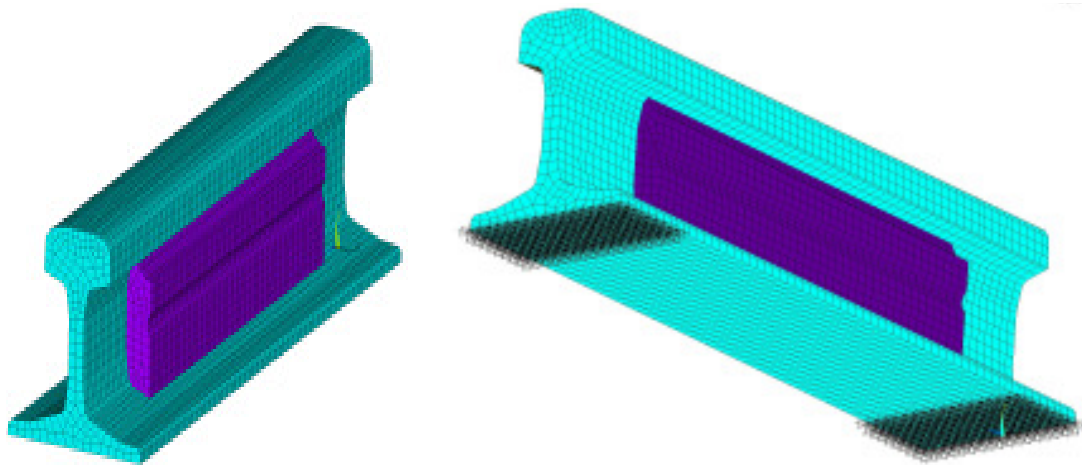


**Abb. 2.9:** Schwingungsmoden der Schiene UIC 60 im Falle einer starren Lagerung (= „sehr harte“ Zwischenlage) im Frequenzbereich  $200 \text{ Hz} < f < 2500 \text{ Hz}$ .

Je nach Schwingungsform schwingen Schienensteg und/oder Schienenfuß und strahlen entsprechend Schall ab. Für den Fall einer weichen Schienenlagerung unterscheiden sich manche Schwingungsformen und Modalfrequenzen, da die Schiene im Bereich der Befestigung an die Schwelle nicht starr ist wie bei der durchgeführten Rechnung. Die „pinned-pinned-Mode“ bei  $f = 1200 \text{ Hz}$  ist jedoch eine typische Abstrahlfrequenz der Schiene.

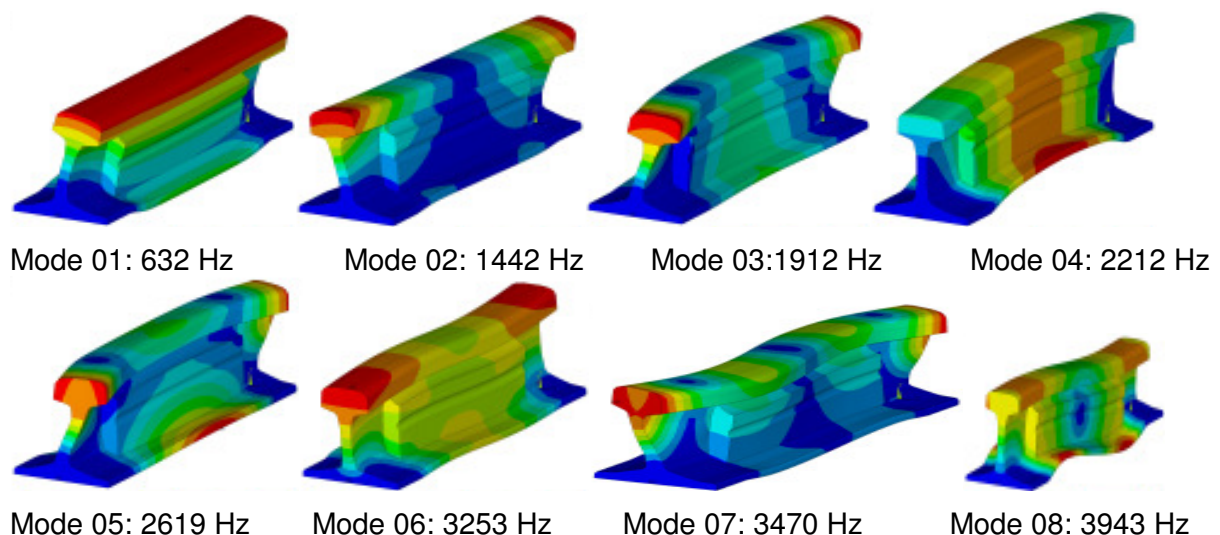
Die in Abb. 2.9 dargestellten Moden zeigen zugleich deutlich, dass neben den Schwingungen des Schienensteges auch der Schienenfuß markante Schwingungen aufweist, die ebenfalls durch einen Dämpfer gedämpft werden müssen. Die Befestigungsklammern müssen also derart konzipiert sein, dass die Dämpfer nicht nur gegen den Schienensteg, sondern auch „nach unten“ gegen den Schienenfuß gedrückt werden. Durch ein derartiges Anpressen eines Dämpfers an die Schiene

werden jedoch auch die Modalfrequenzen verschoben. Ein derartiges Vorgehen wird auch bei der Entwicklung von Radabsorbern berücksichtigt: hier wirken Radabsorber nicht nur schwingungsdämpfend, sondern sie nutzen auch den Versteifungseffekt des Rades zu einer Frequenzverschiebung von bestimmten Moden in einen hinsichtlich der Schallabstrahlung günstigeren Frequenzbereich aus. Um diesen möglichen Versteifungseffekt von Schienendämpfern auf die Schwingungsmoden der Schiene abschätzen zu können, wurden die Moden der Schiene mit Dämpfer bestimmt. Dazu wurden die Schienendämpfer – unter Berücksichtigung der Materialparameter von Schiene und Dämpfer – starr mit der Schiene verbunden (siehe Abb. 2.10).



**Abb. 2.10:** Zur Abschätzung der Frequenzverschiebung der Schwingungsmoden der Schiene wurden die Dämpfer fix mit der Schiene verbunden. Im Bereich der Zwischenlage war die Schiene starr gelagert.

Die so bestimmten Schwingungsmoden der Schiene mit Dämpfer zeigt die Abbildung 2.11.



**Abb. 2.11:** Schwingungsmoden der Schiene UIC 60 mit Schienendämpfern im Falle einer starren Lagerung (= „sehr harte“ Zwischenlage) im Frequenzbereich  $200 \text{ Hz} < f < 4000 \text{ Hz}$ .

Diese Simulation der Schienenschwingungen einer Schiene mit Vossloh-Schienendämpfern zeigten einerseits, dass – im Falle einer starren Schienenlagerung – eine kontinuierliche Dämpferlänge allenfalls auf die erste Schwingungsmoden einen möglichen positiven Effekt haben könnte. Andererseits wurde auch die signifikante Verschiebung der Modalfrequenzen durch eine „feste Verbindung“ zwischen Dämpfer und Schiene deutlich. Dies führte zu Überlegungen, dass möglicherweise auf eine spezielle akustische Ankoppelschicht zwischen Dämpfer und Schiene unterbleiben könnte, sofern der Dämpfer mit einer möglichst großen Anpresskraft an die Schiene (und den Schienenfuß) gedrückt werden könnte.

### **2.2.5. Erster Feldtest: Bewertung unterschiedlicher Prototypen**

Alle bisherigen Vorüberlegungen zu Notwendigkeit einer akustischen Ankoppelschicht sowie zur optimalen Länge der einzelnen Dämpferelemente führten zu vier unterschiedlichen Prototypen:

- lange Dämpferelemente mit bzw. ohne direkt am Dämpfer angebrachter akustischer Koppelschicht
- kurze Dämpferelemente mit bzw. ohne direkt am Dämpfer angebrachter akustischer Koppelschicht

Eine eindeutige Entscheidung für die Weiterentwicklung eines bestimmten Prototypen war – auch unter Berücksichtigung weiteren Überlegungen und Laboruntersuchungen seitens der Fa. Vossloh und der TU München – schwierig. Für jede Variante gab es – theoretisch – Vor- und Nachteile. Also wurden drei der oben genannten Prototypen am realen Gleis eingebaut und deren Wirksamkeit mit der Messung abgeschätzt.

Im damaligen Entwicklungsstand war der Einbau der verschiedenen Dämpfervarianten an einer von allen Zugkategorien befahrenen Strecke im Regelbetrieb nicht kurzfristig umsetzbar, da aus Sicherheitsgründen eine Herabsetzung der Zuggeschwindigkeiten ratsam erschien. Eine entsprechende „unternehmensinterne Sondergenehmigung (UIG)“ zur Montage der Dämpfervarianten an der Strecke, die am Ende des Projektes für die Validierungsmessungen vorgesehen war und die von allen Zugkategorien auch mit Geschwindigkeiten bis 200 km/h befahren wird, hätte den Projektverlauf des Teilpaketes B3 unverhältnismäßig verzögert. Somit blieb als zielführende Alternative der Einbau der verschiedenen Prototypen im Rangierbahnhof München-Nord auf einem Gleis mit einer zugelassenen Streckengeschwindigkeit bis 60 km/h. Hier konnte ein Gleis als Testgleis gefunden werden, das hinsichtlich des Oberbaus dem Gleis an der geplanten Validierungsteststrecke bei Augsburg entsprach (Schotteroberbau, Betonschwellen B70, harte Schienenlagerung mit Zw 687a).

Es wurden folgende drei Dämpfer-Varianten getestet (Abbildungen 2.12a-c):

- Schienendämpfer lang mit Koppelschicht, kontinuierliche Montage (Abb. 2.12a)
- Schienendämpfer kurz mit Koppelschicht, Montage jeweils im Schwellenfach (Abb. 2.12b)
- Schienendämpfer kurz ohne Koppelschicht, Montage jeweils im Schwellenfach (Abb. 2.12c)



Foto: DB Systemtechnik, W. Behr

**Abb. 2.12a:** Prototyp „Schienendämpfer lang mit Koppelschicht, kontinuierliche Montage“



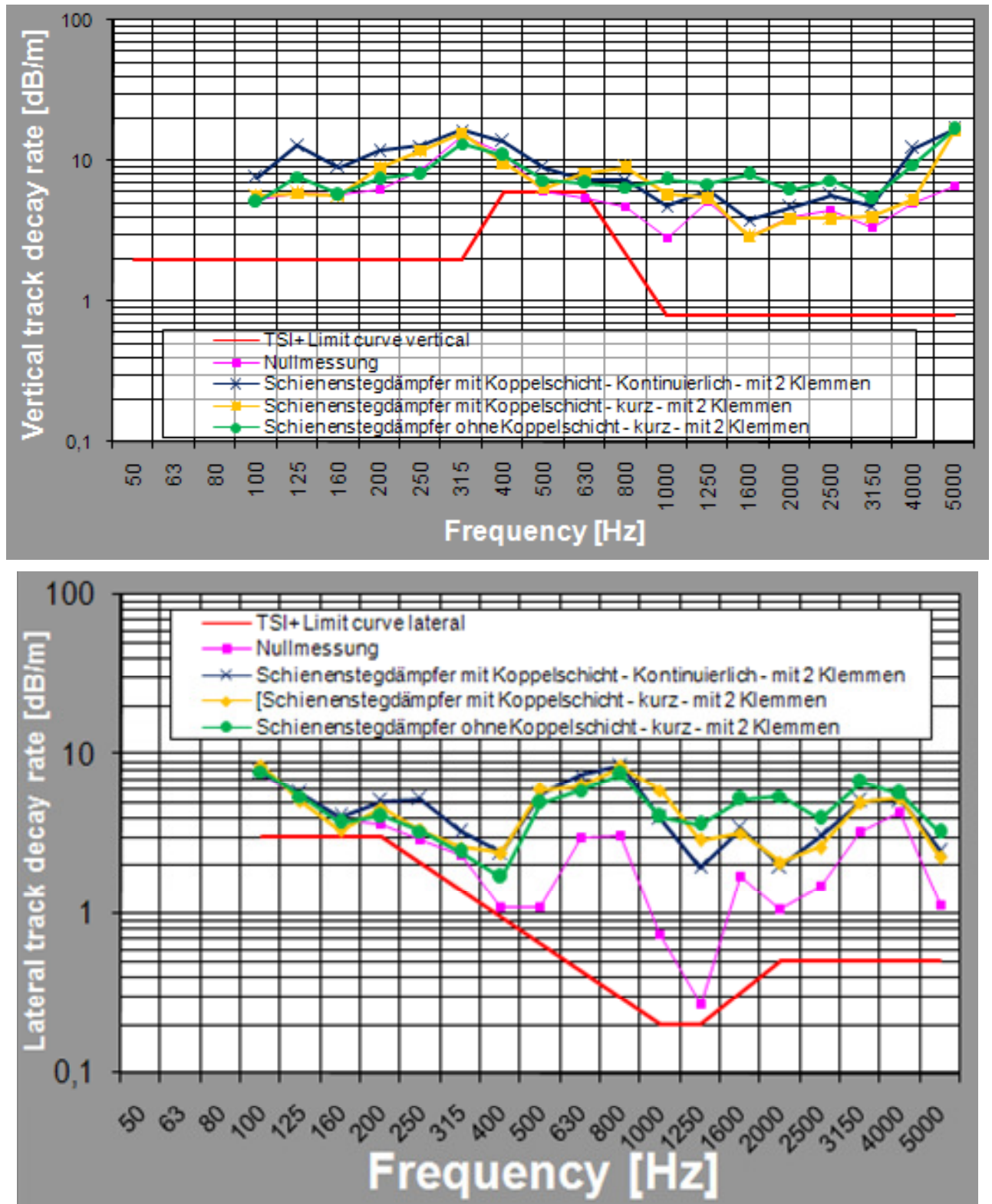
Foto: DB Systemtechnik, W. Behr

**Abb. 2.12b:** Prototyp „Schienendämpfer kurz mit Koppelschicht, Montage“



**Abb. 2.12c:** Prototyp „Schienendämpfer kurz ohne Koppelschicht, Montage jeweils im Schwellenfach“

Zum Vergleich der Dämpfungseigenschaften der unterschiedlichen Prototypen wurden die Gleisabklingraten gemessen. Auf akustische Luftschallmessungen des Vorbeifahrtgeräusches von Zügen zur Messung der schallreduzierenden Wirkung der einzelnen Dämpfer-Varianten auf das Vorbeifahrtgeräusch wurde verzichtet, da Zuggeschwindigkeiten bis 60 km/h nicht aussagekräftig genug erschienen. Ferner war die Anzahl der Zugfahrten auf dem ausgewählten Testgleis im Rangierbahnhof gering. Die gemessenen Gleisabklingraten zeigt Abbildung 2.13:



**Abb. 2.13:** Vertikale (oben) und laterale (unten) Gleisabklingraten des mit der jeweiligen Dämpfervariante gedämpften Gleises im Vergleich zum ungedämpften Gleis (→ Nullmessung).

Im Vergleich der drei Dämpfer-Varianten zeigte der kurze Dämpfer ohne akustische Ankoppelschicht (grüne Kurve in Abb. 2.13) die eindeutig besten Dämpfungseigenschaften. Die zugleich hohen Werte von durchwegs über 5 dB/m machten Hoffnung auf eine vergleichbar gute (oder nur geringfügig schlechtere) Wirkung der Vossloh-Dämpfer im Vergleich zu den komplexeren Dämpfungssystemen anderer Firmen (siehe Kap. 2.1.1.). Hierbei muss jedoch berücksichtigt werden,



dass das Testgleis auch ohne Dämpfer bereits eine hohe Gleisabklingrate aufweist, wie es sonst nur auf TSI-Gleisen zutrifft (rosa Kurve in Abb. 2.13). Dies ist einerseits in der harten Zwischenlage begründet, zeigt jedoch andererseits auch einen sehr guten Instandhaltungszustand dieses Gleises.

### 2.2.6. Befestigungswerkzeug zur Montage und Demontage der Dämpfer

Zur Montage der verschiedenen Dämpfer-Prototypen bei den Versuchen im Rangierbahnhof München Nord stand bereits ein Einbauwerkzeug zur Verfügung. Der Umgang mit diesem Einbauwerkzeug offenbarte noch einige Schwachstellen. Eine wichtige Anforderung von DB Netz war jedoch eine einfache Handhabung bei der Befestigung der Dämpfer im Gleis. So konnte die Fa. Vossloh – aufbauend auf die Erfahrungen der ersten Dämpfermontage im Rangierbahnhof München Nord – das Befestigungswerkzeug optimieren. Die Abbildungen 2.14a und 2.14b zeigen den Prototypen und die Weiterentwicklung dieses Befestigungswerkzeuges.



**Abb. 2.14a:** Der Prototyp des Einbauwerkzeuges wurde beim Einbau der ersten Dämpfervarianten im Rangierbahnhof München-Nord erprobt und konnte anhand dieser Erfahrungen weiter verbessert werden.



**Abb. 2.14b:** Das weiterentwickelte Einbauwerkzeug zur Montage der Dämpfer zeigte deutliche Vorteile bzgl. des ersten Prototypen des Einbauwerkzeugs.

Mit dem optimierten Montagewerkzeug ist eine einfache Montage in nur einem Arbeitsschritt möglich bei gleichzeitiger Schonung der Schienenoberfläche. Eine entsprechende Montageanleitung wurde seitens der Fa. Vossloh erstellt.

### 2.2.7. Bestimmung der Gleisabklingrate im Prüfstand zwecks dessen Tauglichkeitsprüfung

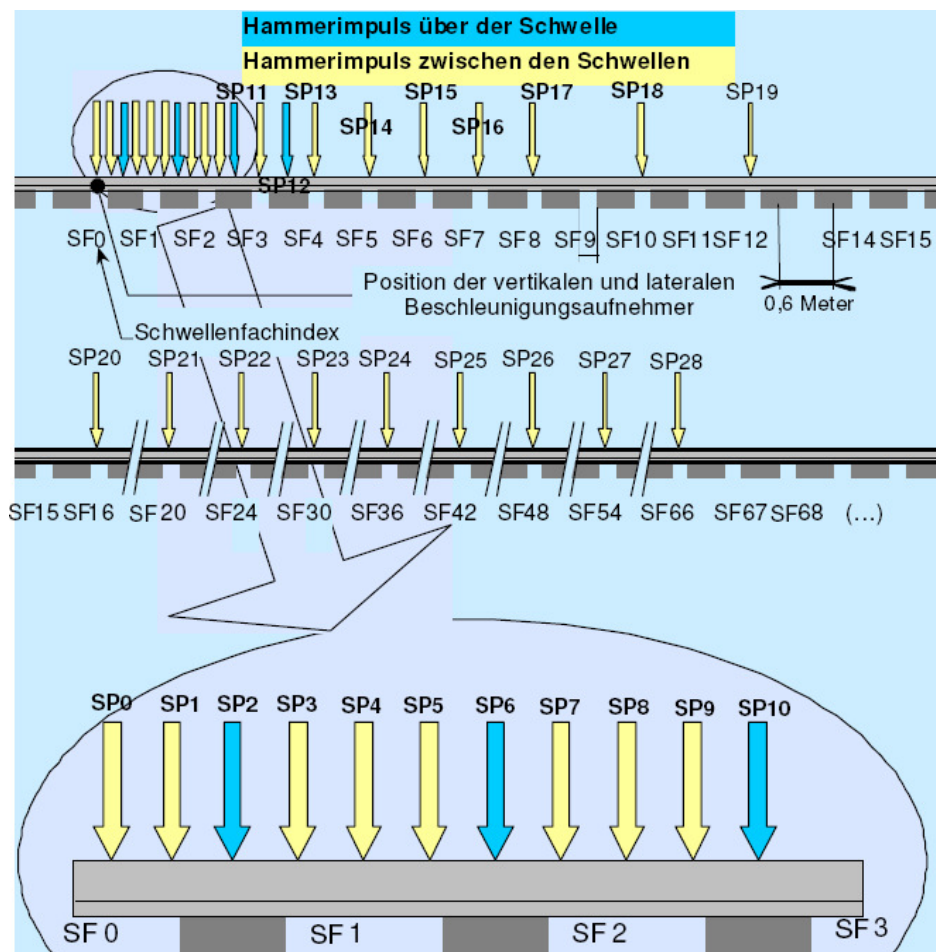
Da nicht jede weitere Optimierung eines Schienendämpfers im realen Gleis eingebaut und getestet werden kann, wurde untersucht, ob zumindest die Gleisabklingrate an einem Prüfstand der TU München gemessen werden kann. So könnte die akustische Wirkung von kleineren Veränderungen (in Falle der Vossloh-Dämpfer geringe Formänderungen, Änderungen der Anpresskraft der Befestigungsklammern, ...) abgeschätzt werden. Der Prüfstand der TU München besteht aus einem 12 m langen Schotter-Oberbau (Abb. 2.15).



Foto: DB Systemtechnik, W. Behr

**Abb. 2.15:** Der Prüfstand der TU München: ein kompletter Schotteroberbau (Länge: 12 m)

Die Messung der Gleisabklingrate unter vorgegebenen Bedingungen erfordert eine Gleislänge von ca. 40 m bzw. 66 Schwellenfächern (Abb. 2.16). Bei einer Gleisabklingrate von 3 dB/m ist jedoch das Signal in einer Entfernung von 10 m zum Hammerimpuls bereits um 30 dB gesunken, so dass die Messung der Gleisabklingrate eines gedämpften Gleises an einem Prüfstand mit einer Gleislänge von 12 m realistisch erschien. Ungewiss war jedoch die Messung der Gleisabklingrate eines ungedämpften Gleises sowie der Einfluss von reflektierenden Wellen im Falle des Prüfstandes.

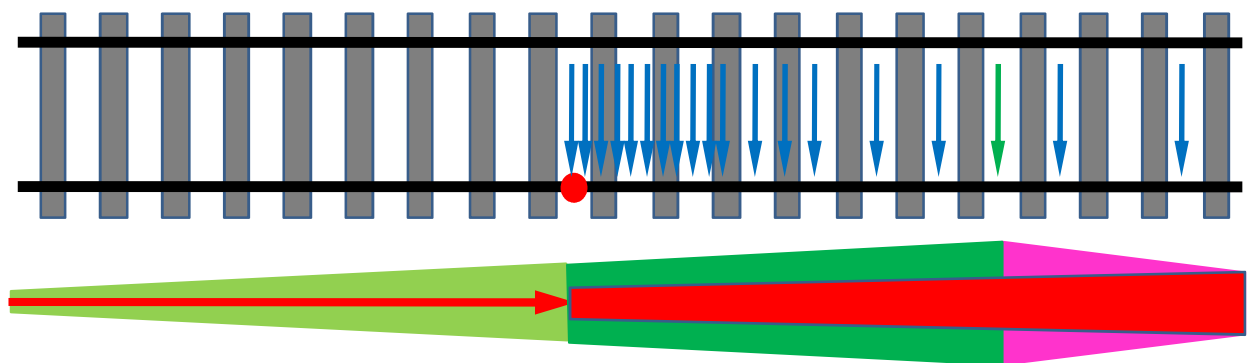


**Abb. 2.16:** Die Messung der Gleisabklingrate erfolgt nach Prüfnormen, die eine Messung über 66 Schwellenfächer vorsehen.

Da der Prüfstand nur eine Gleislänge von 12 m aufweist, kann mit die Gleisabklingrate nicht wie in Abbildung 2.16 dargestellt bestimmen. Hinsichtlich der Position der Messaufnehmer an der Schiene gab es zwei unterschiedliche Möglichkeiten (Abbildungen 2.17a und 2.17b):

- Die Körperschallaufnehmer vertikal und lateral am Gleis befinden sich in der Mitte des Prüfstandsgleises. Die Hammerschlaganregungen würden dann in der Mitte des Gleises beginnen und am Ende des Gleises maximal bei Schwellenfach Nr. 10 enden (siehe Abb. 2.16). Die maximale Länge des Gleises, über die die Dämpfung gemessen werden könnte, wäre somit 6 Meter. Abbildung 2.17a zeigt diese Messung unter Berücksichtigung möglicher Reflexionen Gleisende: Durch einen Hammerschlag im Schwellenfach 7 (grüner Pfeil) würde sich eine Körperschallwelle nach beiden Seiten ausbreiten. Das „gewünschte“ Signal (dunkelgrün) würde entsprechend gedämpft die Körperschallaufnehmer erreichen (roter Punkte). Dieses Signal würde sich jedoch weiter nach links ausbreiten (hellgrün), am linken Gleisende reflektiert werden und dann wieder von links nach rechts zum Körperschallaufnehmer laufen und dort ggf. ein Störsignal erzeugen. Ebenfalls würde sich durch den Hammerschlag eine Körperschallwelle nach rechts laufen, am rechten Gleisende reflektiert werden und denn ebenfalls als Störsignal von rechts nach links zum Körperschallaufnehmer laufen.

Bei diesem Verfahren dürften im Falle von Reflexionen der Körperschallwelle am Gleisende die ersten Anschlagpositionen realistische und unverfälschte gedämpfte Werte erzielen. Insbesondere bei einem stark gedämpften Gleis mit Schienendämpfern erscheint diese Messvariante erfolgversprechend, da die Anschlagpositionen auf der Schiene im Bereich des Schienenendes weniger Relevanz hinsichtlich der Auswertung haben.

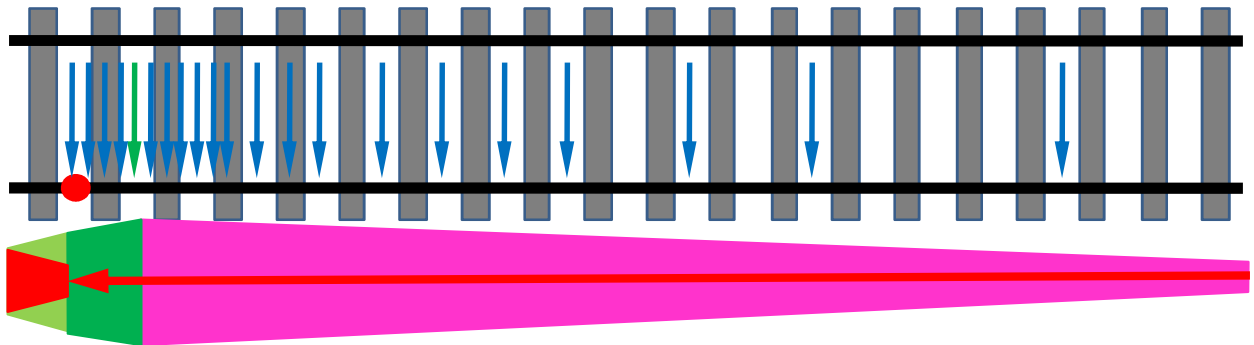


**Abb. 2.17a:** Eine Möglichkeit zur Messung der Gleisabklingrate am Prüfstandsgleis: die mittig im Gleis angebrachten Körperschallaufnehmer würden die dargestellten Hammerschlagpositionen erzwingen. Unter dem Gleis sind die direkten und aufgrund von Reflexion rückläufigen Ausbreitungswege der Körperschallwelle im Gleis gezeigt.

- Die Körperschallaufnehmer vertikal und lateral am Gleis befinden sich am Ende des Prüfstandsgleises. Die Hammerschlaganregungen würden dann nahezu an einem Gleisende beginnen und am anderen Gleisende maximal bei Schwellenfach Nr. 16 enden (siehe Abb. 2.16). Die maximale Länge des Gleises, über die die Dämpfung gemessen werden könnte, wäre somit ca. 10 Meter. Abbildung 2.17b zeigt diese Messung unter Berücksichtigung möglicher Reflexionen Gleisende: Durch einen Hammerschlag im Schwellenfach 1 (grüner Pfeil) würde sich eine Körperschallwelle nach beiden Seiten ausbreiten. Das „gewünschte“ Signal (dunkelgrün) würde entsprechend gedämpft die Körperschallaufnehmer erreichen (roter Punkte). Dieses Signal würde sich jedoch weiter nach links ausbreiten (hellgrün), am linken Gleisende reflektiert werden und dann wieder von links nach rechts zum Körperschallaufnehmer laufen und dort ggf. ein Störsignal erzeugen. Ebenfalls würde sich durch den Hammerschlag eine Körperschallwelle nach

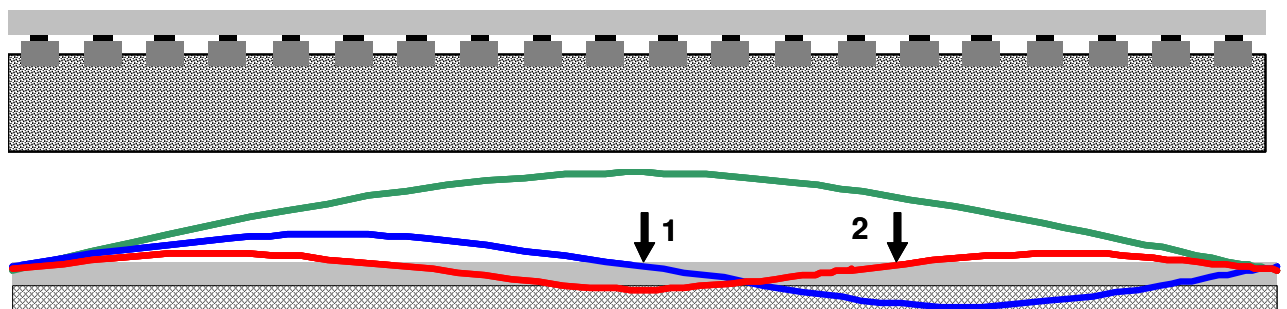
rechts laufen, am rechten Gleisende reflektiert werden und denn ebenfalls als Störsignal von rechts nach links zum Körperschallaufnehmer laufen.

Bei diesem Verfahren dürften im Falle von Reflexionen der Körperschallwelle am Gleisende sowohl die ersten als auch die letzten Anschlagpositionen unrealistische und verfälschte gedämpfte Werte erzielen.



**Abb. 2.17b:** Zweite Möglichkeit zur Messung der Gleisabklingrate am Prüfstandgleis: die beim Gleisende angebrachten Körperschallaufnehmer würden die dargestellten Hammerschlagpositionen erzwingen. Unter dem Gleis sind die direkten und aufgrund von Reflexion rückläufigen Ausbreitungswege der Körperschallwelle im Gleis gezeigt.

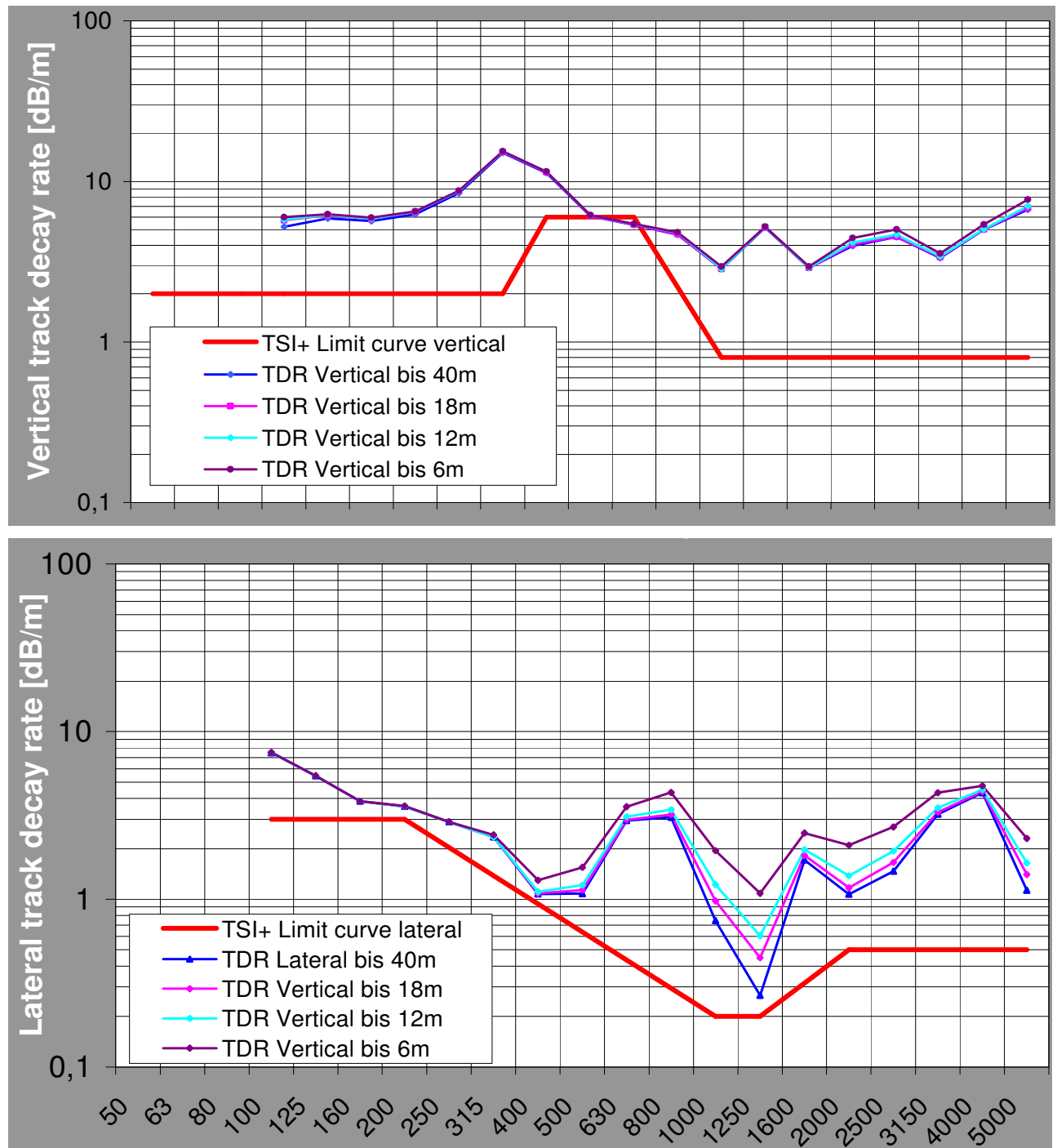
Der Prüfstand hat aufgrund seiner begrenzten Gleislänge Eigenmoden, die im Falle eines „unendlich langen Gleises“ nicht auftreten. Betrachtet man die Schiene des Prüfstandes kontinuierlich gelagert, so ergeben sich Schwingungsmoden, die die Messung der Gleisabklingrate beeinflussen bzw. beeinträchtigen. So werden je nach Anschlagposition des Impulshammers unterschiedliche Moden dieses Prüfstands unterschiedlich stark angeregt (siehe Abbildung 2.17c). Anschaulich kann man diese Schwingungsmoden auch als Schwingformen verstehen, die durch die Reflexionen der Körperschallwelle an den beiden Enden des Gleises entstehen.



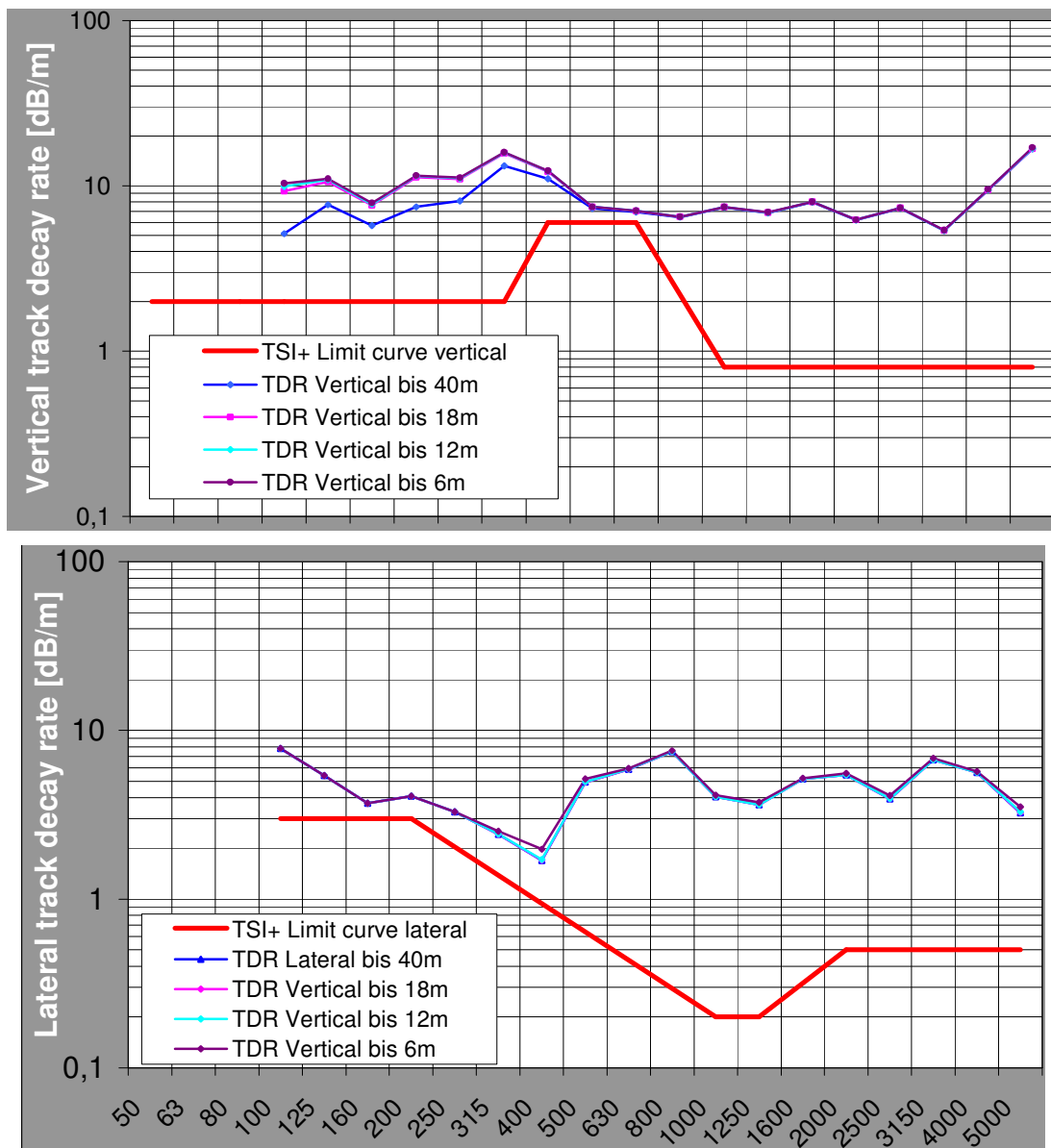
**Abb. 2.17c:** Der Prüfstand hat Eigenmoden, die beim realen unendlich langen Gleis nicht auftreten. Versteht man das auf 20 Schwellen gelagerte Gleis (oben) als kontinuierlich gelagert, so ergeben sich spezifische Eigenschwingungen. Die ersten drei Moden sind in der unteren Skizze dargestellt. Eine Anregung mit dem Impulshammer bei Position 1 würde zum Beispiel u. a. die „grüne“ und „rote“, nicht jedoch die „blaue“ Mode anregen. Eine Anregung bei Position 2 würde dagegen die „grüne“ und „blaue“ Mode, nicht jedoch die „rote“ Mode anregen.

Um nun für die Messung der Gleisabklingrate des Prüfgleises mit und ohne Schienendämpfer die bessere dieser beiden Methoden zu bestimmen, wurden die in Kapitel 2.1.4 beschriebenen Messungen, die am realen Gleis mit und ohne Schienendämpfer im Rangierbahnhof München-Nord durchgeführt wurden, erneut mit verkürzten Auswertepositionen ausgewertet. Werden bei der „regulären Auswertung“ alle Schwellenfächer bis zum Schwellenfach 66 und somit eine Ausbrei-

tungsstrecke des Signals über 40 Meter berücksichtigt (siehe Abb. 2.16), so sollten nun die Resultate der Gleisabklingrate bewertet werden, wenn nur eine kürzere Ausbreitungsstrecke des Signals durch den Hammerimpuls beachtet wird. Die vertikalen und lateralen Gleisabklingraten des ungedämpften und des gedämpften Gleises für eine verkürzte Ausbreitungsstrecke zeigen die Abbildungen 2.18 und 2.19.



**Abb. 2.18:** Gemessene vertikale (oben) und laterale (unten) Gleisabklingraten des ungedämpften Gleises im Rangierbahnhof München-Nord bei Berücksichtigung einer unterschiedlichen Anzahl von Messpositionen bzw. einer unterschiedlichen Gleislänge (6 m, 12 m und 18 m). Die dunkelblaue Auswertekurve zeigt die Gleisabklingrate unter Berücksichtigung aller Messpunkte, wie in Abb. 2.13 dargestellt.



**Abb. 2.19:** Gemessene vertikale (oben) und laterale (unten) Gleisabklingraten des gedämpften Gleises (mit Vossloh-Schienendämpfern, kurze Variante ohne Koppelschicht) im Rangierbahnhof München-Nord bei Berücksichtigung einer unterschiedlichen Anzahl von Messpositionen bzw. einer unterschiedlichen Gleislänge (6 m, 12 m und 18 m). Die dunkelblaue Auswertekurve zeigt die Gleisabklingrate unter Berücksichtigung aller Messpunkte, wie in Abb. 2.13 dargestellt.

Im Falle des gedämpften Gleises waren die Gleisabklingraten unter Berücksichtigung der Messpunkte bis zu 6 m Abstand von der Hammeranregung nahezu identisch zu den „korrekt“ ermittelten Gleisabklingraten unter Berücksichtigung aller Messpunkte bis zu 39,6 m Abstand von der Hammeranregung. Die Abweichung im Falle der vertikalen Gleisabklingrate kann hier vernachlässigt werden, da dieser Frequenzbereich unter 500 Hz nicht der typische Abstrahlbereich einer Schiene ist. Dieses Resultat verwundert nicht angesichts der hohen Gleisabklingraten von 4 dB/m oder mehr.

Im Falle des ungedämpften Gleises waren die Gleisabklingraten unter Berücksichtigung von weniger Messpunkten unterschiedlich, jedoch zeigte nur die laterale TDR bei der Berücksichtigung der Messpunkte bis lediglich 6 m von der Hammeranregung deutliche Abweichungen zur „korrekten Gleisabklingrate“.

Daher wurde bei der Bestimmung der Gleisabklingrate des Prüfgleises der TU München mit und ohne Schienendämpfer das in Abbildung 2.17a gezeigte Verfahren angewendet, damit die Reflexionen am Gleisende das Resultat nicht oder nur gering beeinträchtigen. Die Lage der Schlagpunkte und deren Nummerierung sind in Abbildung 2.16 graphisch dargestellt. Auf Grund der geometrischen Gegebenheiten des Oberbauprüfstands wurden nur die Schlagpunkte SP1 bis SP18 untersucht (fett gedruckt in Abbildung 2.16). Abbildung 2.20 zeigt den Messaufbau mit dem Ausschnitt der Schwellen-Nr. 5 bis Schwellen-Nr. 11 (S5...S11).



**Abb. 2.20:** Messung der Gleisabklingrate des Testgleises der TU München mit bzw. ohne Schienendämpfern der Fa. Vossloh.

Wie bei der Feldmessung im Rangierbahnhof München-Nord wurden alle drei Prototypen des Vossloh-Schienendämpfers gemessen (siehe Abb. 2.21, vergleiche mit Abb. 2.12a-c):

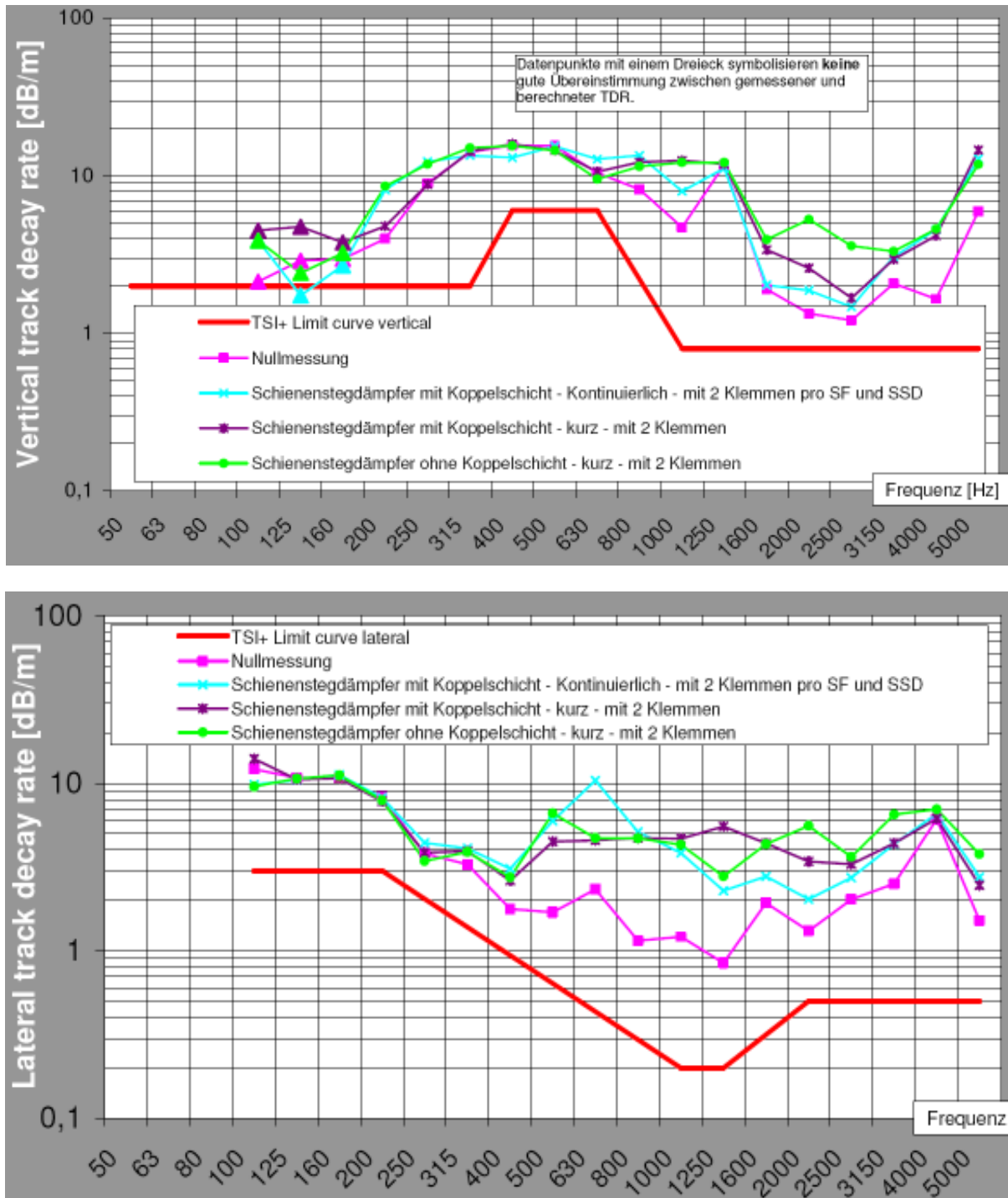
- Nullmessung: Referenz, Ausgangszustand des Prüfstandsgleises vor Einbau der Dämpfer
- Schienendämpfer lang mit Koppelschicht, kontinuierliche Montage (Abb. 2.21 links)
- Schienendämpfer kurz mit Koppelschicht, Montage jeweils im Schwellenfach (Abb. 2.21 mitte)
- Schienendämpfer kurz ohne Koppelschicht, Montage jeweils im Schwellenfach (Abb. 2.21 rechts)



**Abb. 2.21:** Am Gleisprüfstand der TU München wurde die Gleisabklingrate des gedämpften Gleises mit allen drei Prototypen gemessen.

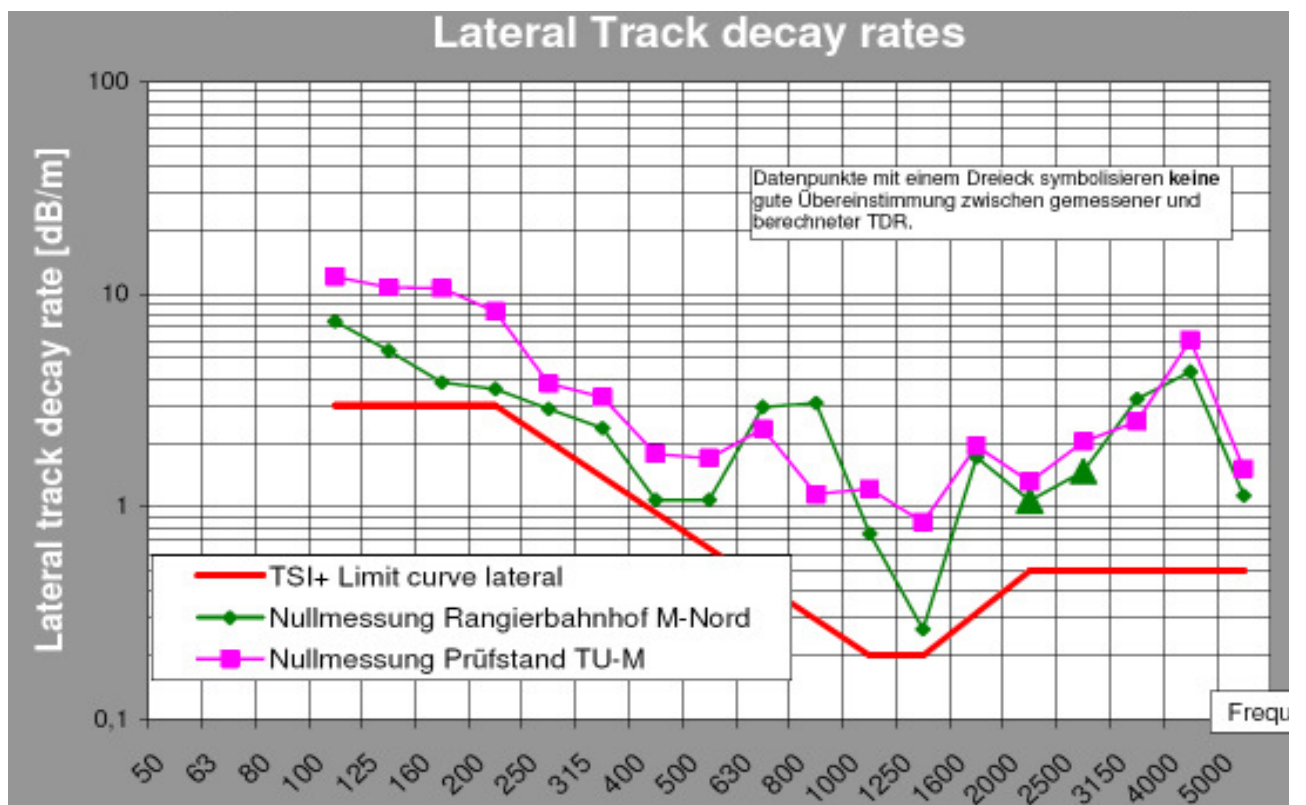
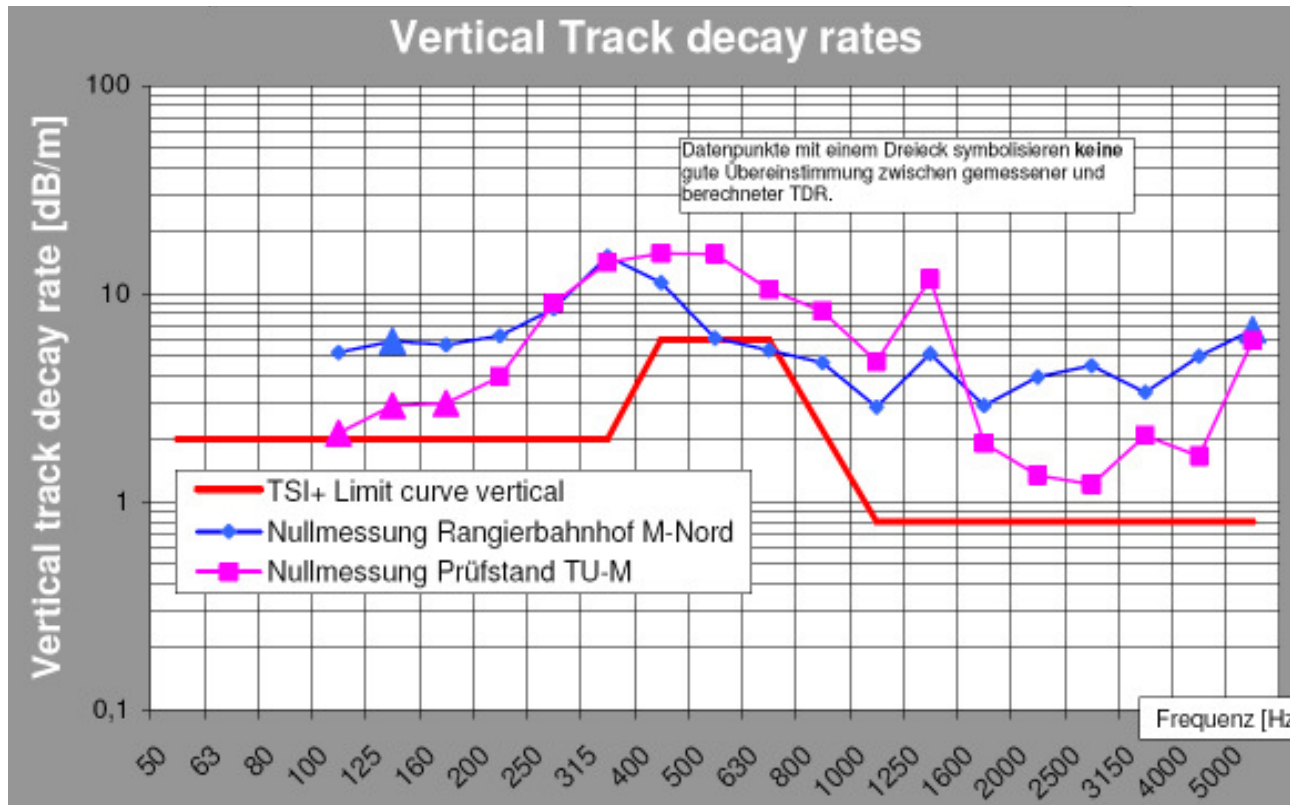
Die Resultate dieser im Januar 2009 durchgeführten Messung zeigt Abbildung 2.21. Insbesondere die Nullmessung der lateralen Gleisabklingrate lässt einige Moden des Prüfstandes erkennen, deren Existenz und Entstehung in Abbildung 2.17c erläutert sind.



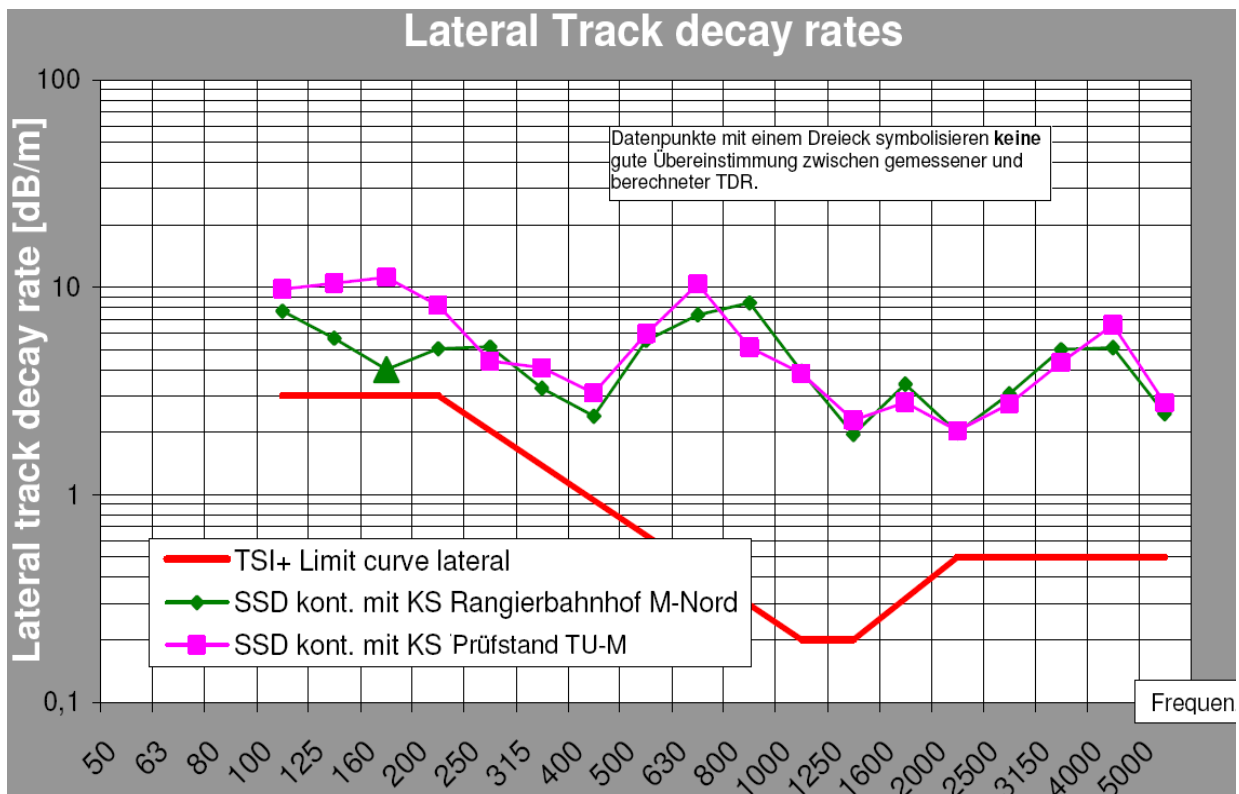
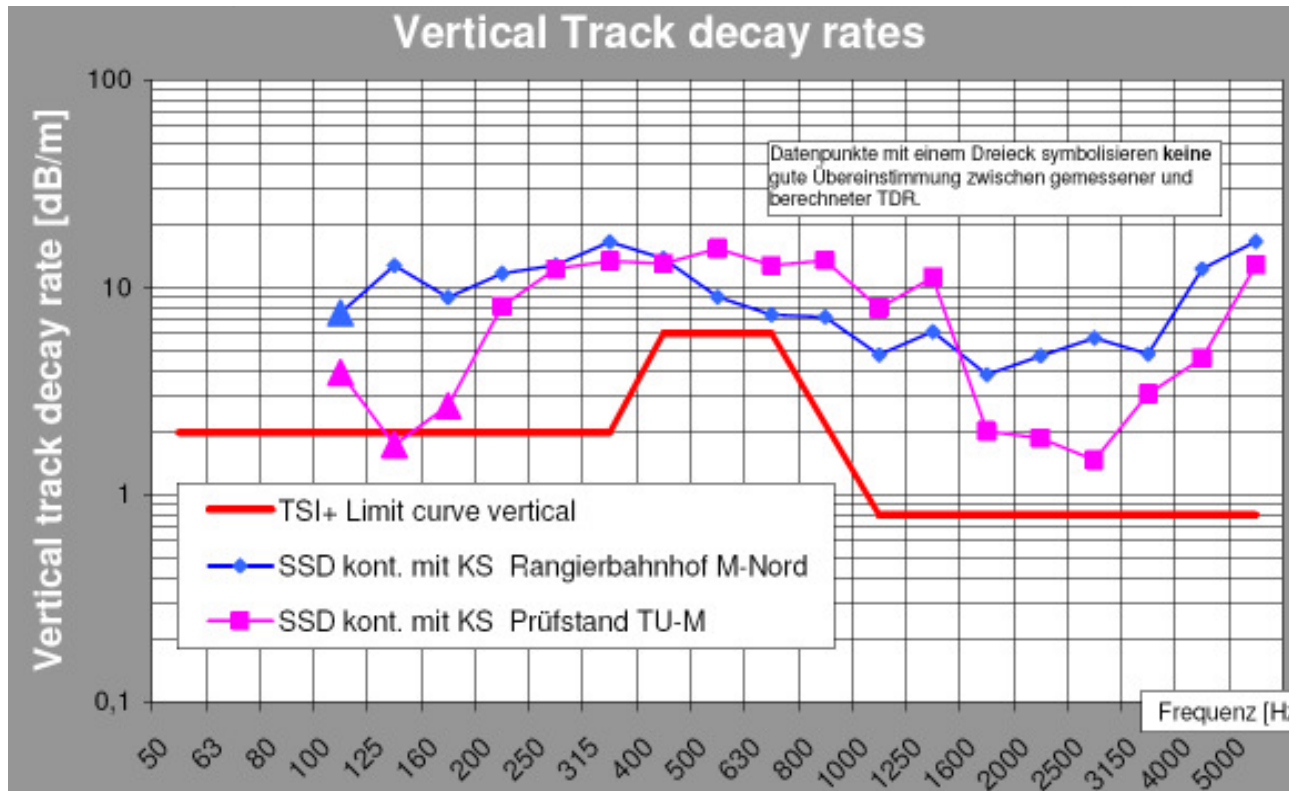


**Abb. 2.21:** Vertikale (oben) und laterale (unten) Gleisabklingraten des mit der jeweiligen Dämpfervariante gedämpften Gleises im Vergleich zum ungedämpften Gleis (→ Nullmessung) am Prüfstand der TU München.

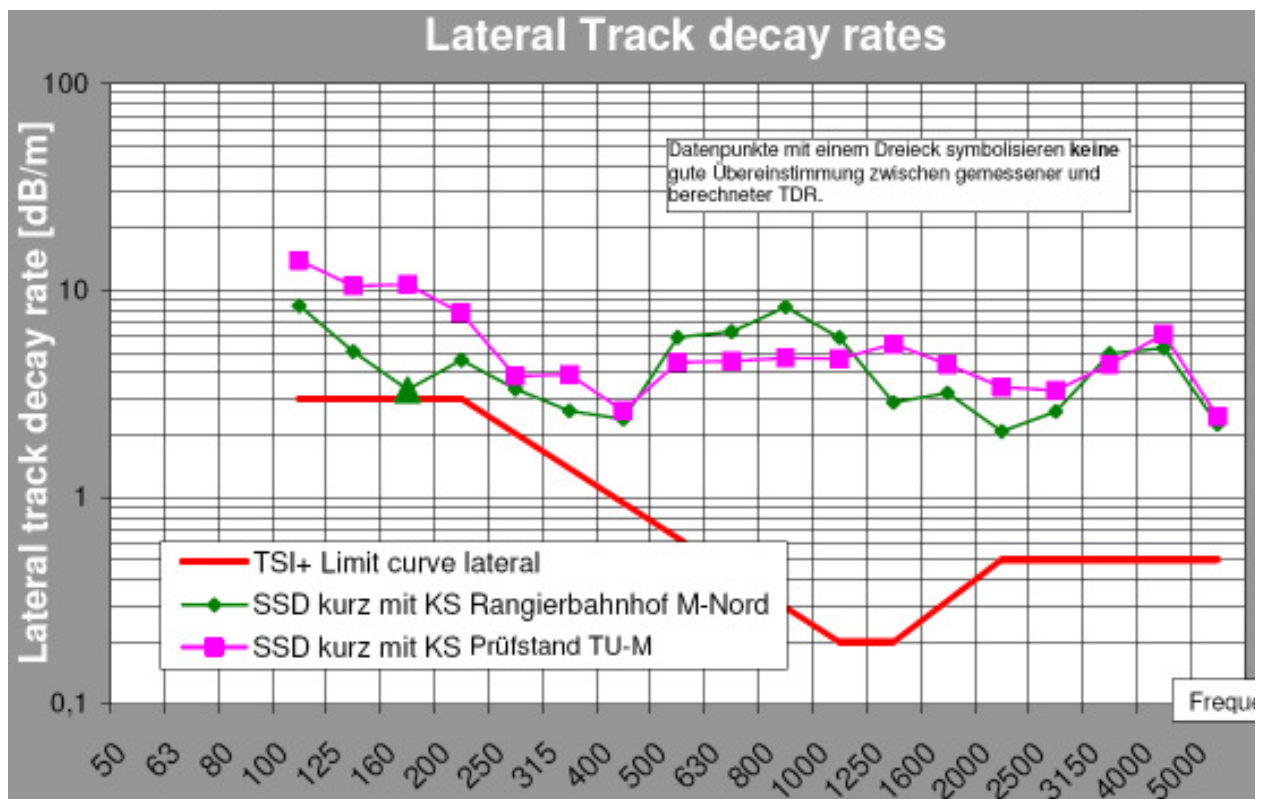
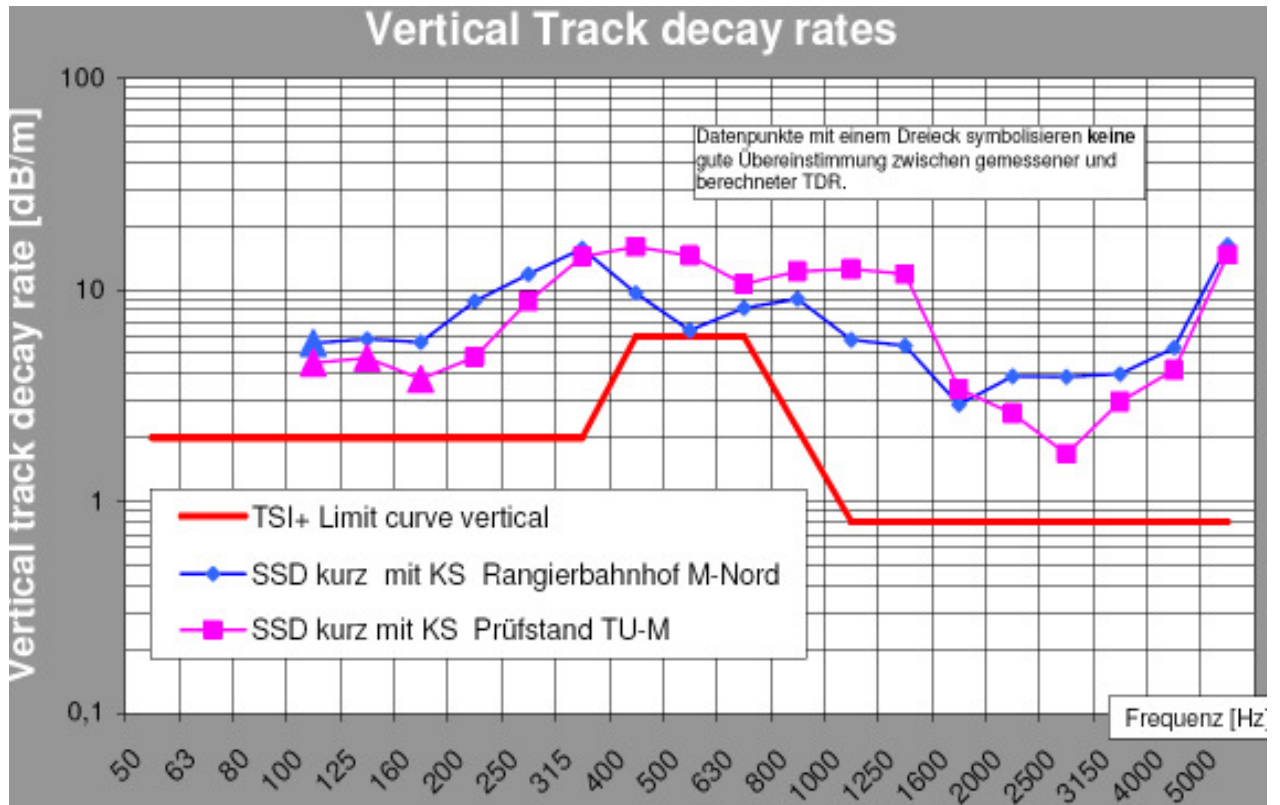
Anhand dieser Prüfstandmessungen zeigt die Variante des kurzen Schienendämpfers ohne Koppelschicht in beiden Gleisabklingraten den besten Verlauf, so dass auch anhand von diesen Prüfstandsmessungen diese Dämpfervariante als optimal gewertet werden kann. Vergleicht man jedoch die Gleisabklingraten jeder einzelnen Variante, wie sie an den unterschiedlichen Gleisen („reales Gleis im Rangierbahnhof München-Nord“ vs. „Oberbauprüfstand der TU München“), so zeigen sich deutliche Unterschiede. Diese sind in den Abbildungen 2.22a-d dargestellt.



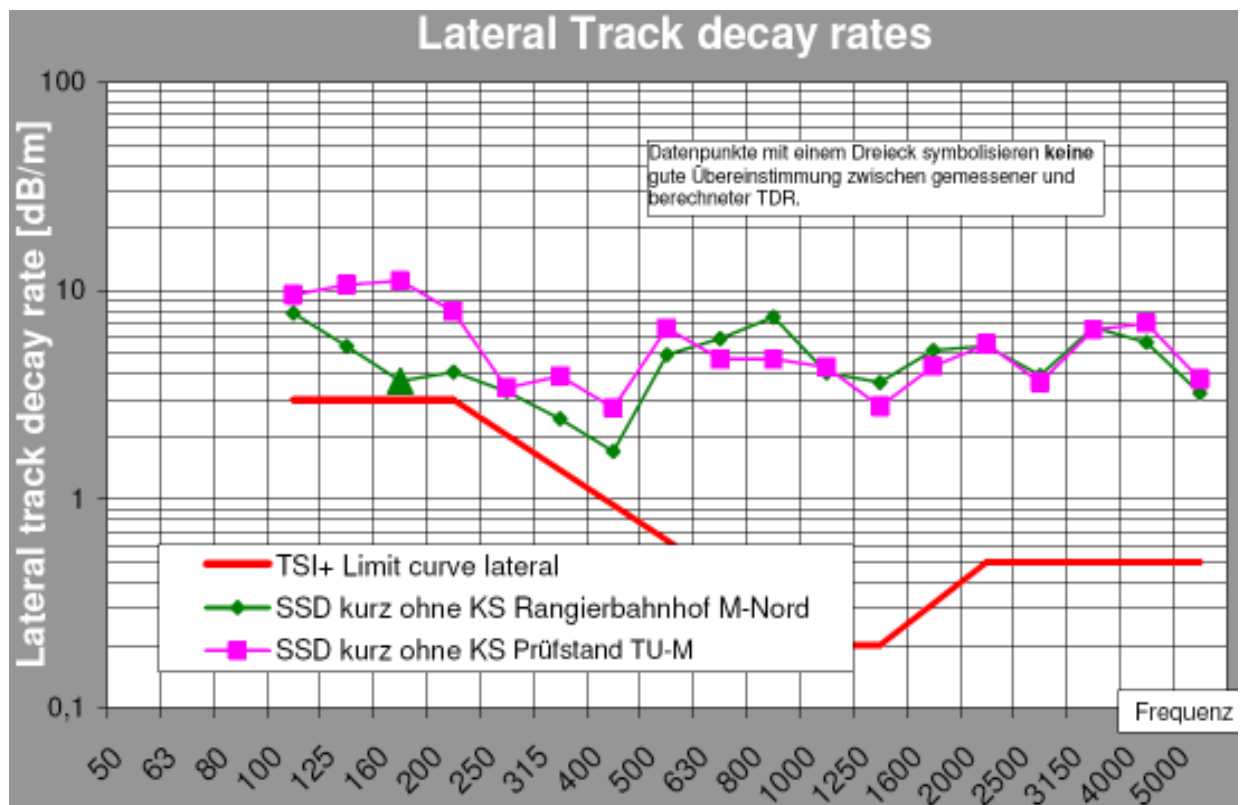
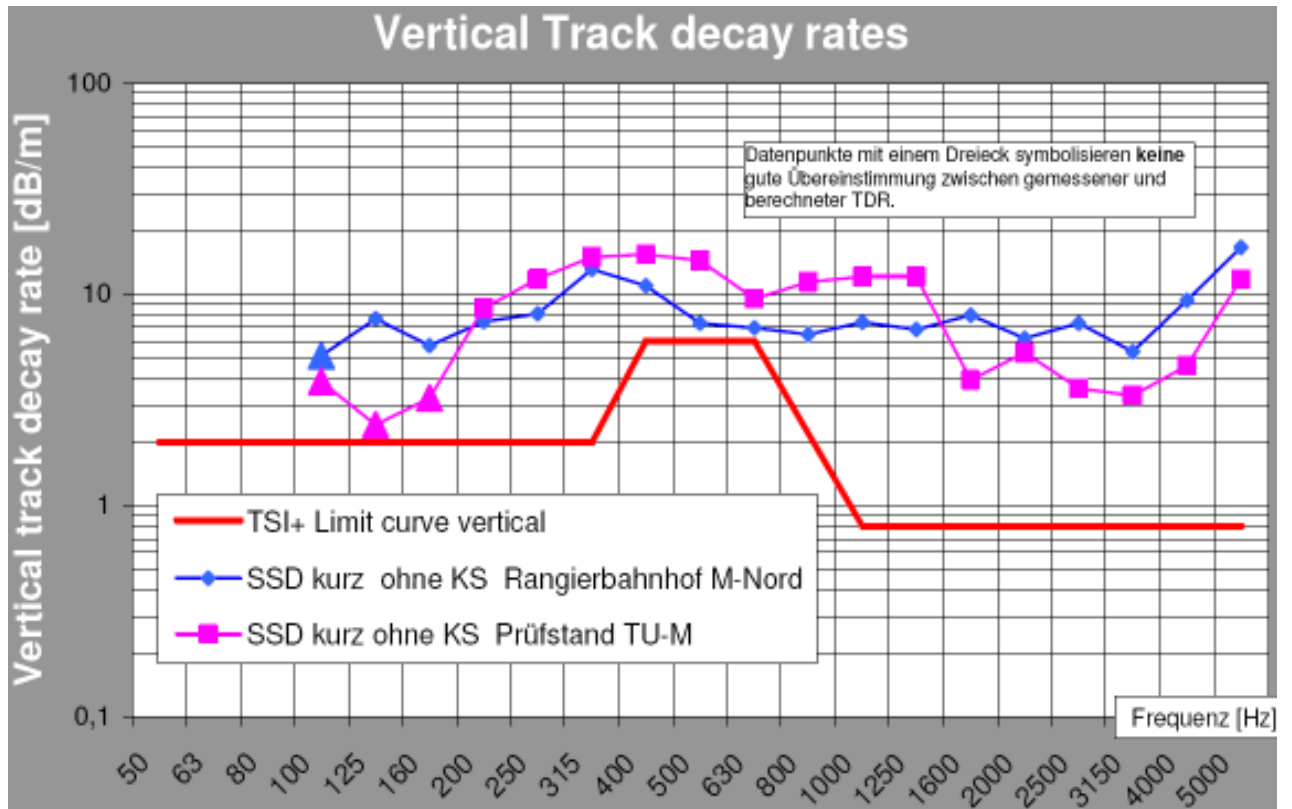
**Abb. 2.22a:** Vertikale und laterale Gleisabklingrate des ungedämpften Gleises: Vergleich der Messung im Rangierbahnhof München-Nord mit der Messung am Prüfstand der TU München.



**Abb. 2.22b:** Vertikale und laterale Gleisabklingrate des gedämpften Gleises mit der langen kontinuierlich am Gleis befestigten Dämpfervariante und Koppelschicht: Vergleich der Messung im Rangierbahnhof München-Nord mit der Messung am Prüfstand der TU München.



**Abb. 2.22c:** Vertikale und laterale Gleisabklingrate des gedämpften Gleises mit der kurzen jeweils im Schwellenfach am Gleis befestigten Dämpfervariante und Koppelschicht: Vergleich der Messung im Rangierbahnhof München-Nord mit der Messung am Prüfstand der TU München.



**Abb. 2.22d:** Vertikale und laterale Gleisabklingrate des gedämpften Gleises mit der kurzen jeweils im Schwellenfach am Gleis befestigten Dämpfervariante ohne Koppelschicht: Vergleich der Messung im Rangierbahnhof München-Nord mit der Messung am Prüfstand der TU München.

Die Ergebnisse zeigen, dass auf Grund der Gültigkeit der TDR-Ergebnisse im für Luftschall-Untersuchungen relevanten Frequenzbereich ab 500 Hz der Oberbauprüfstand prinzipiell zumindest für grobe Abschätzungen oder Vergleiche der Gleisabklingraten geeignet ist.

Dennoch unterschieden sich die quantitativen Resultate der Nullmessungen an den beiden Mess-Orten - TU München bzw. Rangierbahnhof München-Nord - signifikant. Ein Hauptgrund dafür ist die Kürze des Oberbauprüfstands mit lediglich 12 Meter und den damit verbundenen Reflexionen an beiden Gleisenden. Weitere Unterschiede gegenüber dem Mess-Abschnitt im Rangierbahnhof München-Nord sind die einseitige Begrenzung des Oberbaus durch eine Stützmauer im Prüfstand der TU München (rechts in Abb. 2.20; diese Begrenzungsmauer ist in Abb. 2.15 verdeckt und somit nur schwer erkennbar!) und der Sachverhalt, dass das Gleis des Oberbauprüfstands nicht durch den Zugverkehr verdichtet ist. Ferner können weitere Details des Oberbaus wie z. B. das Drehmoment, mit dem die Schienenbefestigung verspannt wurde, ebenfalls eine Rolle spielen.

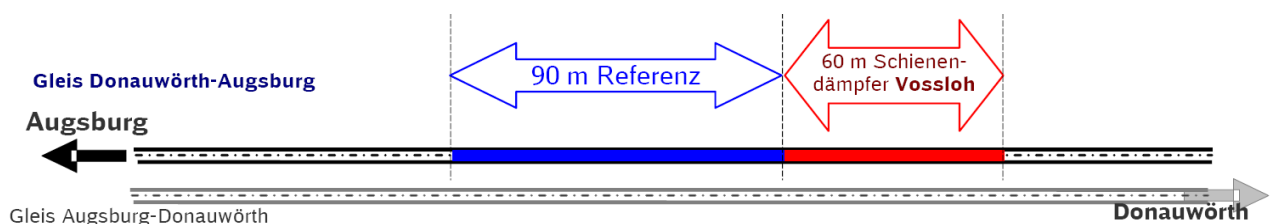
Es gibt zwar keine globale Kenngröße für die Wirksamkeit von Schienendämpfern, aber eine grafische Betrachtung am Beispiel der Schienendämpfer ohne Koppelschicht kurzer Bauart zeigt, dass eine qualitativ ähnliche Wirkung an beiden Mess-Orten gemessen wurde, auch wenn sich die Absolutwerte der Wirkung an den beiden Mess-Orten sich erheblich unterscheiden.

Ein Vergleich der Gleisabklingraten anhand der Messungen im Rangierbahnhof München-Nord und am Oberbauprüfstand der TU München zeigt:

- Bei allen untersuchten Konfigurationen sind die Abweichungen zwischen den TDR-Resultaten im Rangierbahnhof München-Nord und am Oberbauprüfstand der TU München in lateraler Richtung geringer als in vertikaler Richtung, wobei die zwei vertikalen Nullmessungen die größten Abweichungen aufweisen.
- Bei der Dämpfer-Variante ohne Koppelschicht mit der höchsten Dämpfungswirkung treten geringere Abweichungen der TDR-Ergebnisse im Oberbauprüfstand auf verglichen mit den im Rangierbahnhof München-Nord gemessenen Resultaten als bei den Dämpfer-Varianten mit Koppelschicht mit einer niedrigeren Dämpfungswirkung. Somit kann nicht von einer generellen Eignung des Oberbauprüfstands zu Wirksamkeitsmessungen für Schienendämpfer ausgegangen werden. Eine abschließende Beurteilung dieses Sachverhalts musste noch durch weitere Messungen statistisch gesichert werden.

### 2.2.8. Einbau der Vossloh-Schienendämpfer und Messung der Wirksamkeit

Mit den in den Kapiteln 2.2.2 bis 2.2.7 dargestellten Entwicklungsschritten war die primäre Entwicklung des Schienendämpfers seitens der Fa. Vossloh abgeschlossen und die Entscheidung für die kurze Dämpfervariante ohne Koppelschicht getroffen. Es folgten noch geringfügige Verbesserungen hinsichtlich der Form des Dämpfers im Bereich des Schienenfußes und der Gestaltung der Befestigungsklammern. Bereits im Herbst 2009 konnten diese Dämpfer an einem 60 m langen Streckenabschnitt der Strecke Donauwörth-Augsburg eingebaut werden (Abb. 2.23). Diese Strecke wird von allen Zugkategorien (ICE, IC, Regio, Güterzüge) mit einer Streckengeschwindigkeit bis maximal 200 km/h befahren.



**Abb. 2.23a:** Testabschnitt auf der Strecke Donauwörth-Augsburg zur Ermittlung der Wirkung der Schienendämpfer der Fa. Vossloh



**Abb. 2.23b:** Ansicht der im Testabschnitt eingebauten Schienendämpfer der Fa. Vossloh

### 2.2.8.1. Messung der Schienenverriffelung von Referenz- und Test-Abschnitt

Die Zugfahrten bzw. deren Vorbeifahrtgeräusch auf dem gedämpften Test-Abschnitt und dem ungedämpften Referenzabschnitt sind jedoch nur bei nahezu identischer Schienenrauheit vergleichbar. Die Messung der Schienenrauheit an beiden Gleisabschnitten gemäß DIN EN ISO 3095:2005 diente der Untersuchung der Vergleichbarkeit bzw. der Homogenität der Teststrecke hinsichtlich der akustischen Beschaffenheit der Schienenfahrfläche und erfolgte am 28./29.07.2009.

Die Abbildungen 2.24 zeigen repräsentative Stichproben der Schienenfahrfläche im gedämpften Testabschnitt (a) sowie im ungedämpften Referenzabschnitt (b).

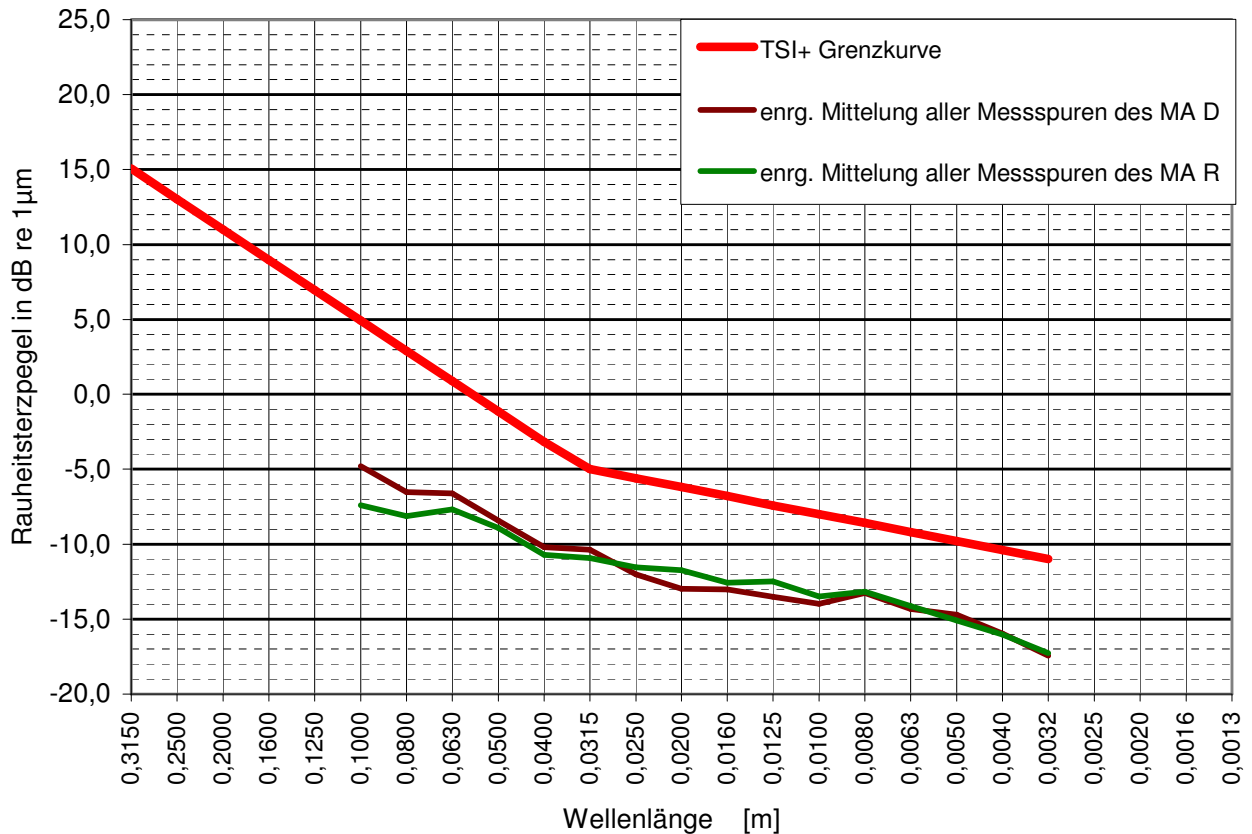
Die Schienenrauheitsmessung wurde auf der linken bzw. rechten Schiene jeweils auf drei Spuren durchgeführt. Die Lage der einzelnen Messspuren wurde für beide Messebenen jeweils identisch festgelegt. Je Messposition wurde jeweils eine Mittelspur (0 mm) in Fahrspiegelmitte und zwei Außenspuren (+/- 10 mm von der Mittelspur) messtechnisch erfasst. Es wurden bei den Rauheitsmessungen sowohl die linke als auch die rechte Schiene gemessen. Es zeigte sich eine nahezu identische Schienenfahrfläche an beiden Gleisabschnitten (Abb. 2.25).



**Abb. 2.24a:** repräsentative Stichproben der Schienenfahrfläche im gedämpften Testabschnitt



**Abb. 2.24b:** repräsentative Stichproben der Schienenfahrfläche im ungedämpften Referenzabschnitt



**Abb. 2.25:** Vergleich der mittleren Rauheitsspektren am gedämpften Testabschnitt („D“) und ungedämpften Referenzabschnitt („R“)

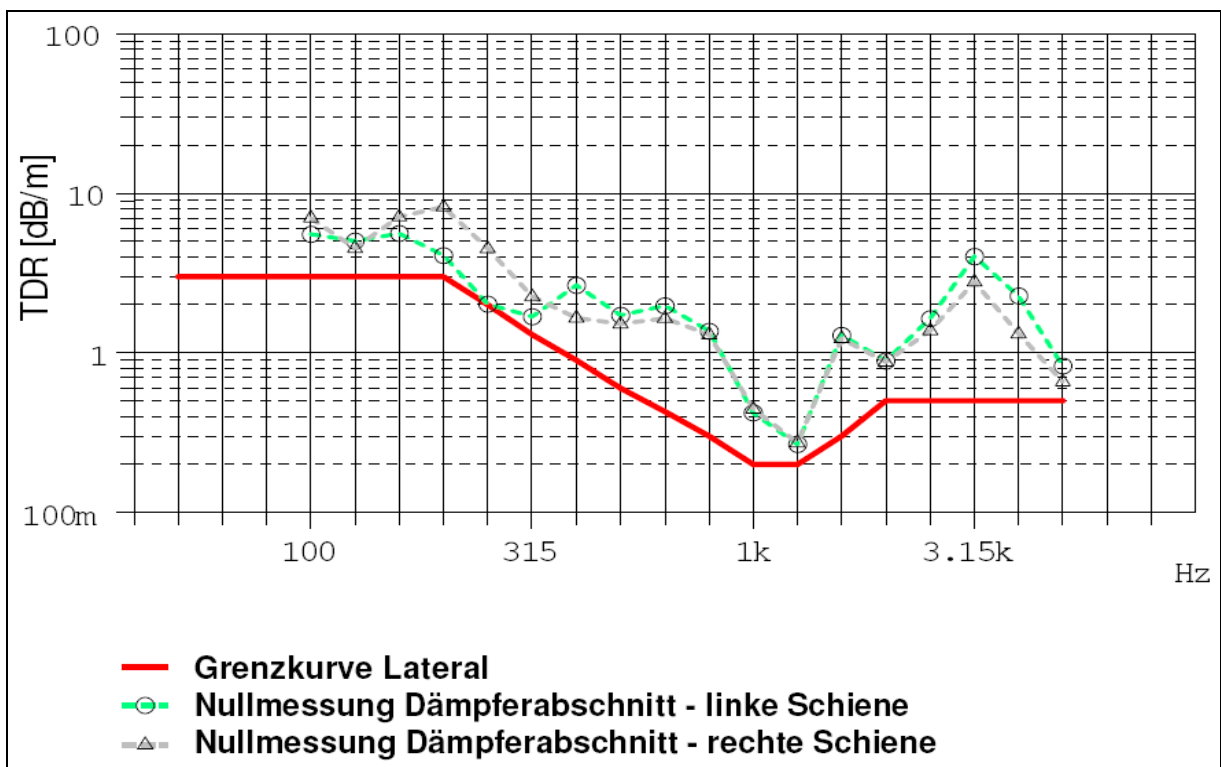
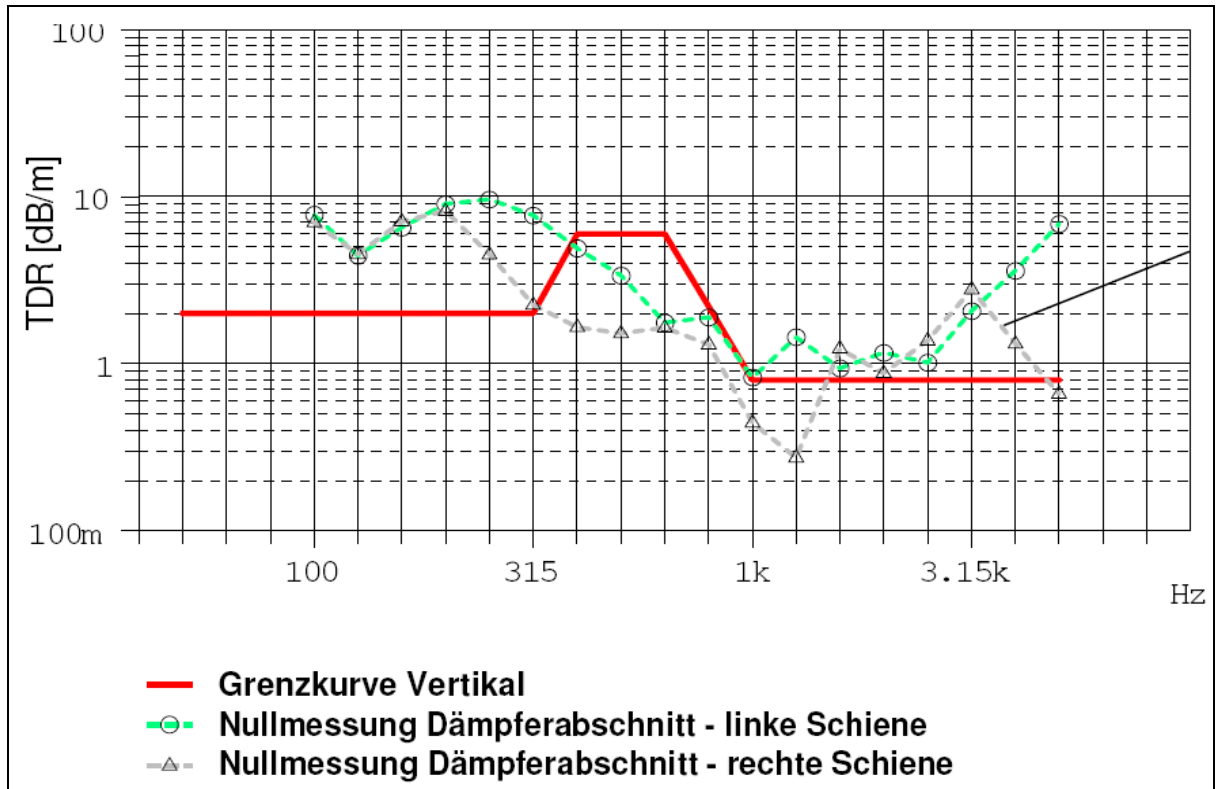
Die gemessenen und in Abbildung 2.25 dargestellten Schienenrauheitspegel beider Messabschnitte unterschreiten die Grenzkurve nach DIN EN ISO 3095 über den gesamten Wellenlängenbereich um mehr als 5 dB. Das bedeutet, dass zum Zeitpunkt der Messung (28./29.07.2009) die Schienenfahrfläche der gesamten Teststrecke aus akustischer Sicht sehr glatt war und die Verriffelung der Schienenfahrfläche der beiden Messabschnitte auf niedrigem Niveau vergleichbar war.

Die für die Anregung des Rollgeräusches relevante Gesamtrauheit ist die energetische Summe der Schienen- und der Radrauheit. Aus Erfahrung sind die Radrauheitspegel der üblichen klotz- und scheibengebremsten Fahrzeuge deutlich höher als die an der Teststrecke gemessenen Schienenrauheitspegel. Die schalltechnische Untersuchung der Schienendämpfer sollte daher nicht von der Verriffelung der Schienenfahrfläche beeinflusst werden.

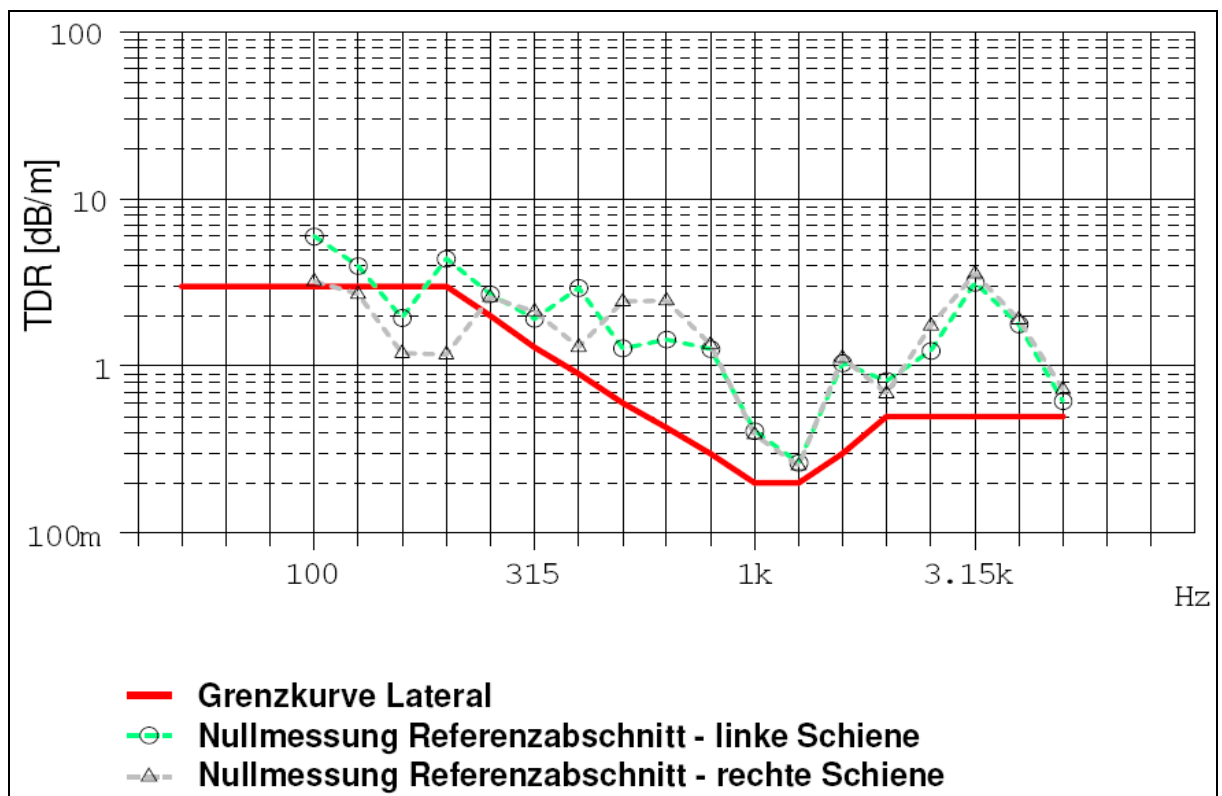
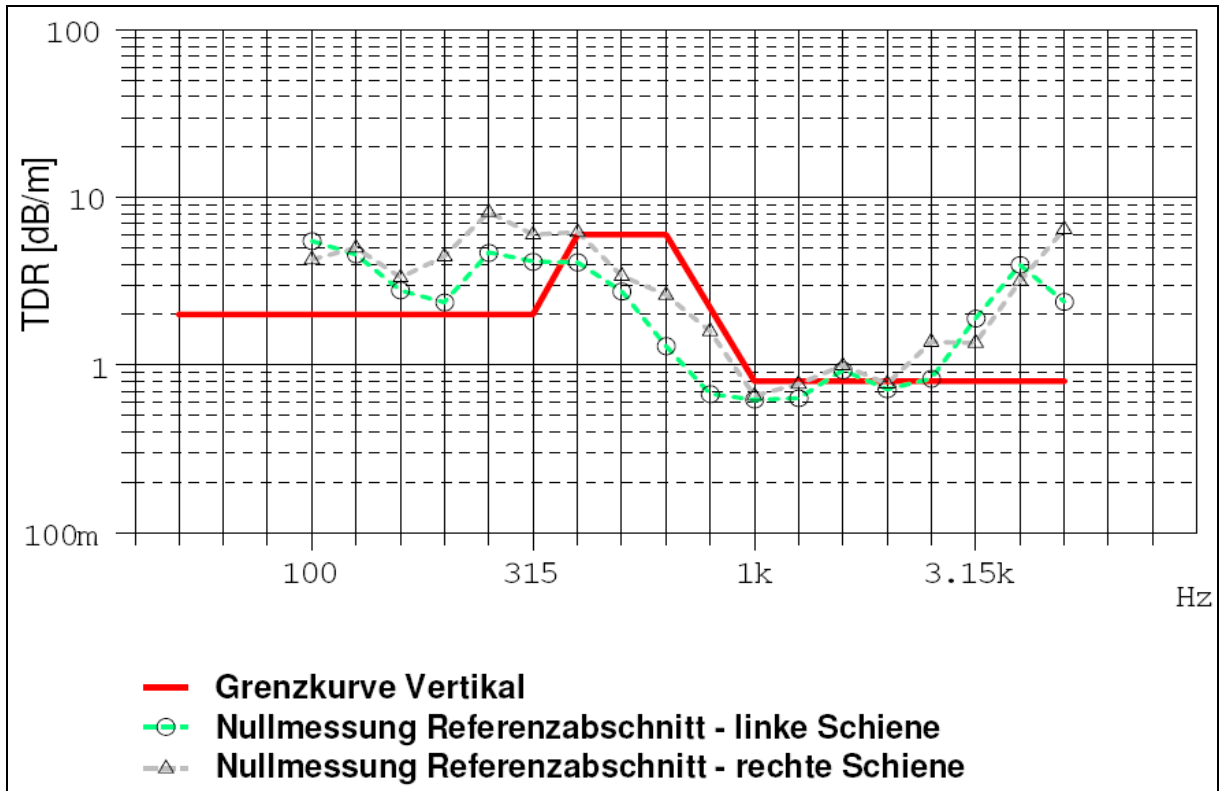
### 2.2.8.2. Messung der Gleisabklingraten

Eine wichtige Information zur Bewertung der Wirksamkeit von Schienendämpfern ist die Gleisabklingrate. Es ist bekannt, dass Schienendämpfer an einem Gleis, das bereits aufgrund seiner Oberbau-Eigenschaften eine hohe Dämpfung aufweist, nur wenig Wirksamkeit bzgl. der Reduktion des Vorfahrtpegels eines Zuges haben. Daher wurden eine Woche vor Montage der Schienendämpfer (am 19.10.2009) die Gleisabklingraten von beiden Messabschnitten (Referenz-Abschnitt und geplanten Test-Abschnitt) ermittelt. Sie sind in den Abbildungen 2.26a und 2.26b für jeweils beide Schienen des jeweiligen Gleisabschnitts getrennt dargestellt.





**Abb. 2.26a:** Vertikale (oben) und laterale (unten) Gleisabklingraten der beiden Schienen des geplanten Test-Gleises, bei dem die Schienendämpfer montiert werden sollen (linke Schiene: grün / rechte Schiene: grau / TSI-Grenzkurve: rot).



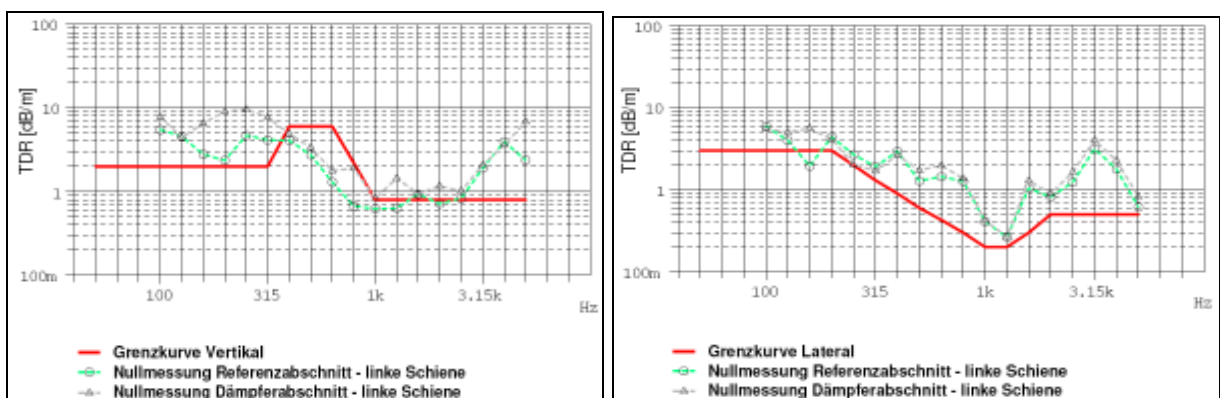
**Abb. 2.26b:** Vertikale (oben) und laterale (unten) Gleisabklingraten der beiden Schienen des geplanten Referenz-Gleises (linke Schiene: grün / rechte Schiene: grau / TSI-Grenzcurve: rot).

Aus Abbildung 2.26a erkennt man:

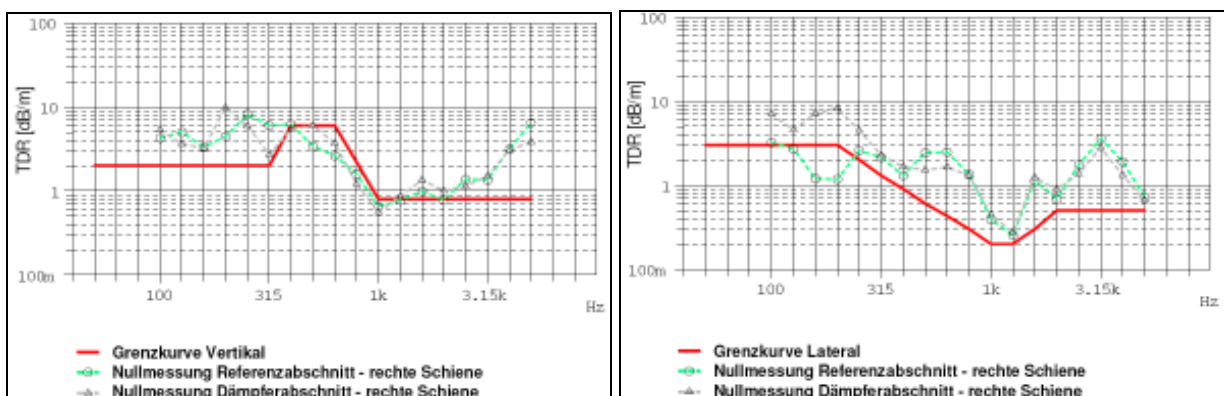
- die vertikale Gleisabklingrate des geplanten Test-Abschnittes liegt im für  $400 \text{ Hz} < f < 1000 \text{ Hz}$  deutlich unter der TSI-Grenzkurve, im Frequenzbereich  $f > 1000 \text{ Hz}$  nur geringfügig darüber.
- die laterale Gleisabklingrate des geplanten Test-Abschnittes liegt im gesamten Frequenzbereich nur geringfügig über der TSI-Grenzkurve.
- insbesondere bei der vertikalen Gleisabklingrate gibt es teils signifikante Unterschiede im Vergleich beider Schienen. Grund dafür können u. a. Unterschiede bei der Schienenbefestigung, aber auch systembedingte Messungenauigkeiten der TDR-Messung sein.

Aufgrund der geringen Gleisabklingrate und der daraus folgenden geringen Eigendämpfung des Gleises im aktuell gemessenen Zustand scheint der geplante Test-Abschnitt geeignet zur Montage von Schienendämpfern. Mit Schienendämpfern wird eine signifikante Erhöhung der Gleisabklingrate erwartet, was eine deutliche Reduktion des Schienenanteils der Schallabstrahlung bei einer Zugvorbeifahrt bewirken sollte.

Die Gleisabklingraten des geplanten Referenz-Abschnittes war vorsorglich für den Fall gemessen worden, dass der geplante Test-Abschnitt nicht die erforderlichen Gleisabklingraten aufweisen sollte. Ein Vergleich der Gleisabklingraten des geplanten Test-Abschnitts (Abb. 2.26a) und des geplanten Referenz-Abschnitts (Abb. 2.26b) zeigt, dass beide Abschnitte hinsichtlich der Gleisdämpfung ähnlich sind. Dies verwundert nicht, denn schließlich folgen diese beiden Gleisabschnitte direkt aufeinander (siehe Abb. 2.23a) und unterscheiden sich nicht hinsichtlich Oberbau, befahrender Züge etc. Vielmehr verwundert es, dass die Gleisabklingraten dieser beiden Abschnitte nicht identisch sind. Diesen Vergleich zeigen die Abbildungen 2.27a und 2.27b.



**Abb. 2.27a:** Vertikale (links) und laterale (rechts) Gleisabklingraten der linken Schiene: Vergleich des geplanten Referenz-Gleises (grün) mit dem geplanten Test-Gleis (grau).



**Abb. 2.27b:** Vertikale (links) und laterale (rechts) Gleisabklingraten der rechten Schiene: Vergleich des geplanten Referenz-Gleises (grün) mit dem geplanten Test-Gleis (grau).

Die in Abbildung 2.27 gezeigten Unterschiede bei der Gleisabklingrate lassen zwei Schlussfolgerungen zu: entweder sind TDR-Messung sehr sensibel selbst auf kleine Unterschiede im Oberbau (Anzugs-Drehmoment der Schwellenschraube, Spannkraft der Spannklemme, Alterungszustand der Zwischenlage, ...; siehe dazu Abb. 2.28a) oder aber die Messung der Gleisabklingrate ist systembedingten Messungenauigkeiten unterworfen (exakte Position und Richtung der Hammer-schlag-Erregung, Stärke des Hammerschlags, Befestigungsort und –art der Beschleunigungsaufnehmer an der Schiene, ...; siehe dazu Abb. 2.28b).

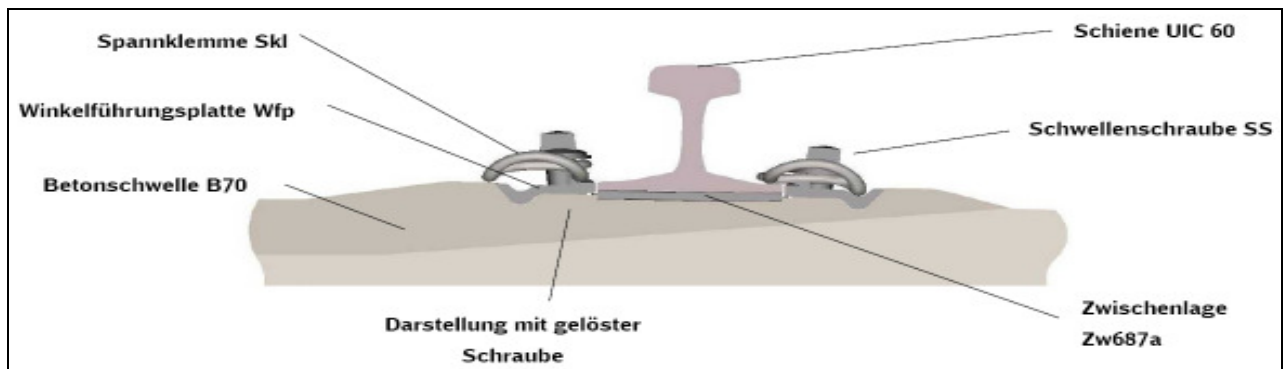


Abb. 2.28a: Aufbau des Gleises von Referenz- und Testabschnitt (links)

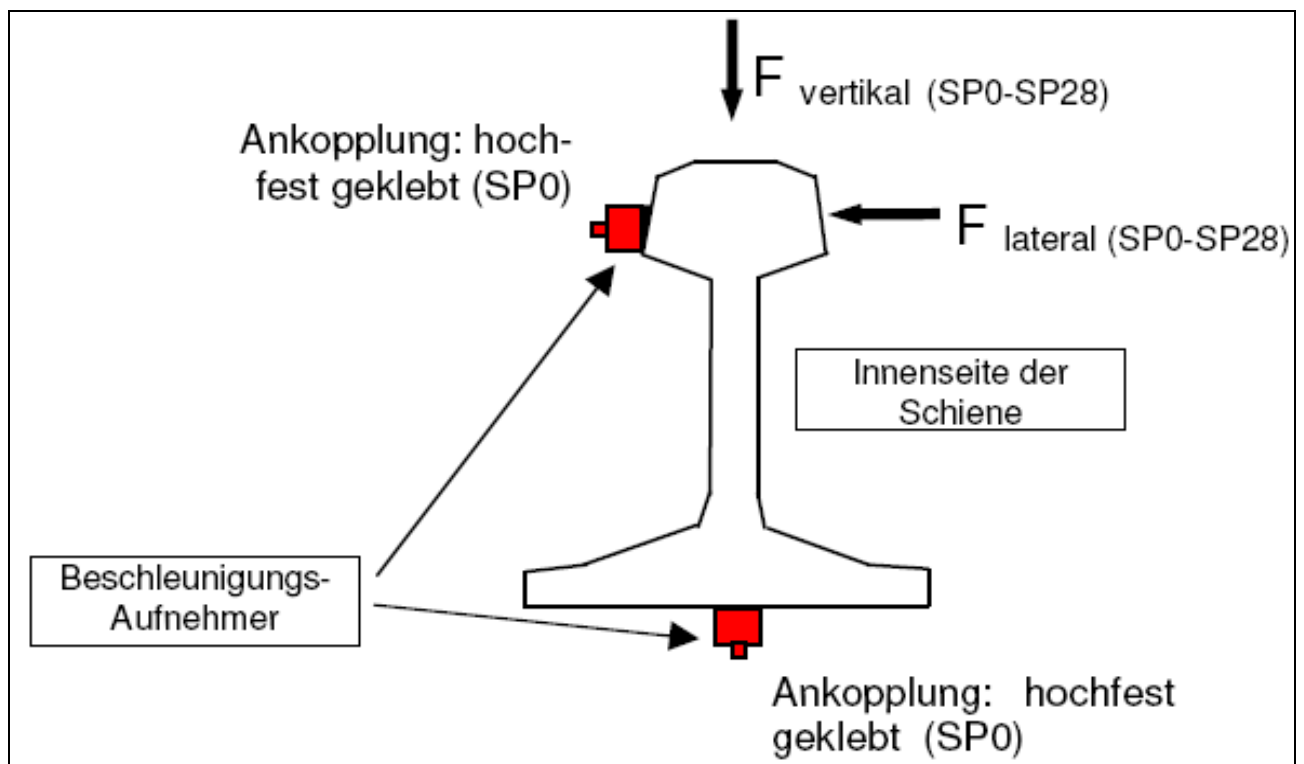
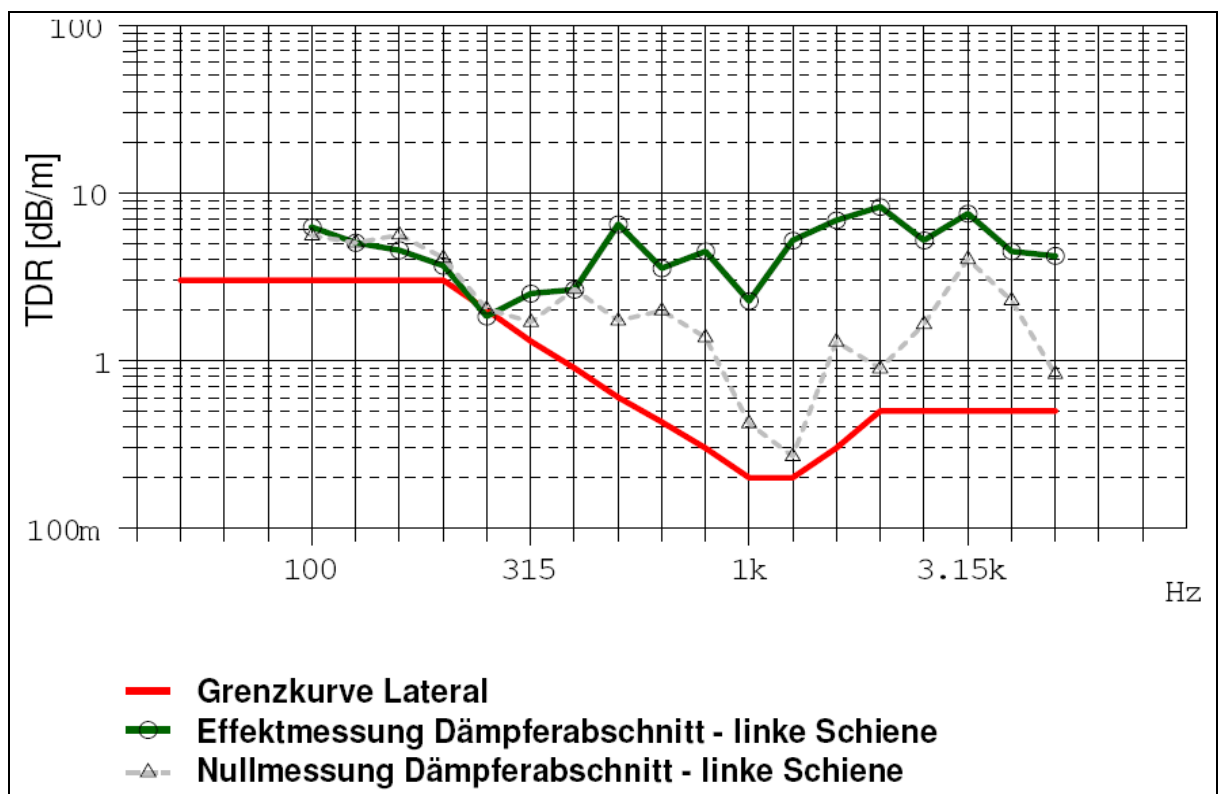
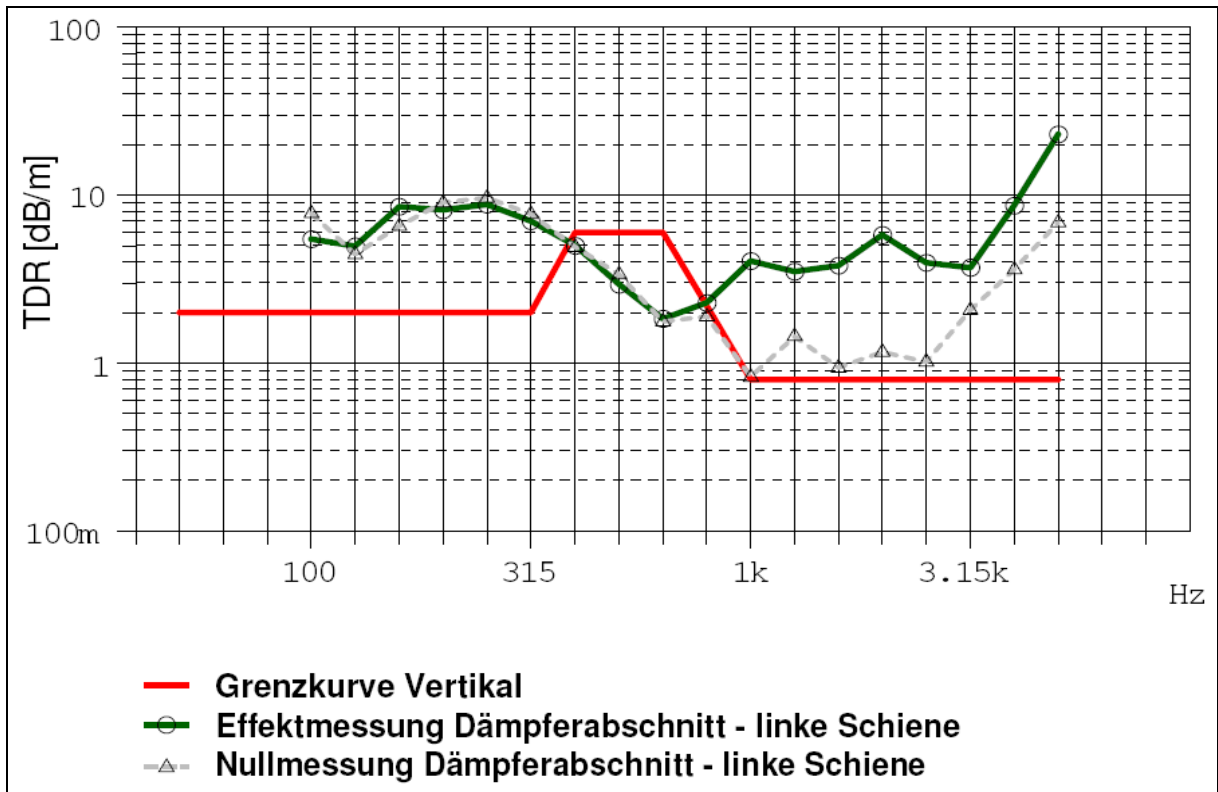
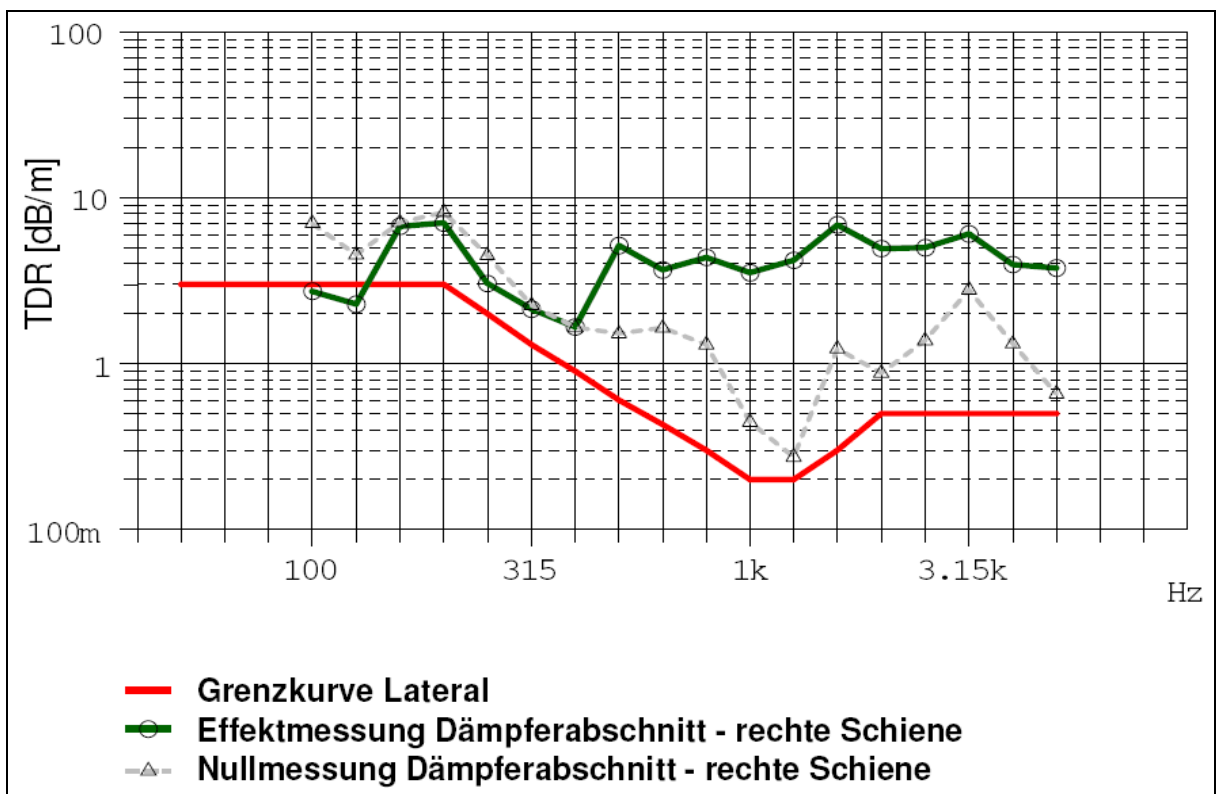
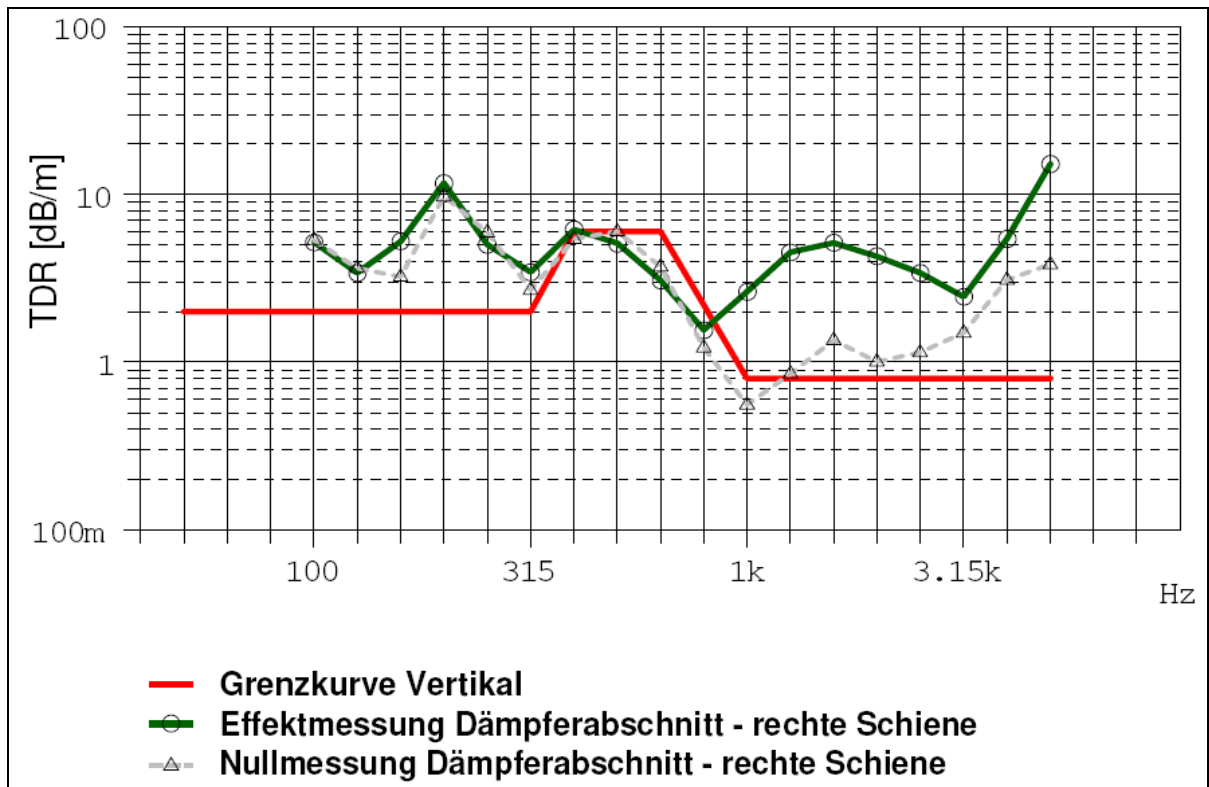


Abb. 2.28b: Befestigung der Beschleunigungsaufnehmer am Gleis bei der Messung der Gleisabklingraten

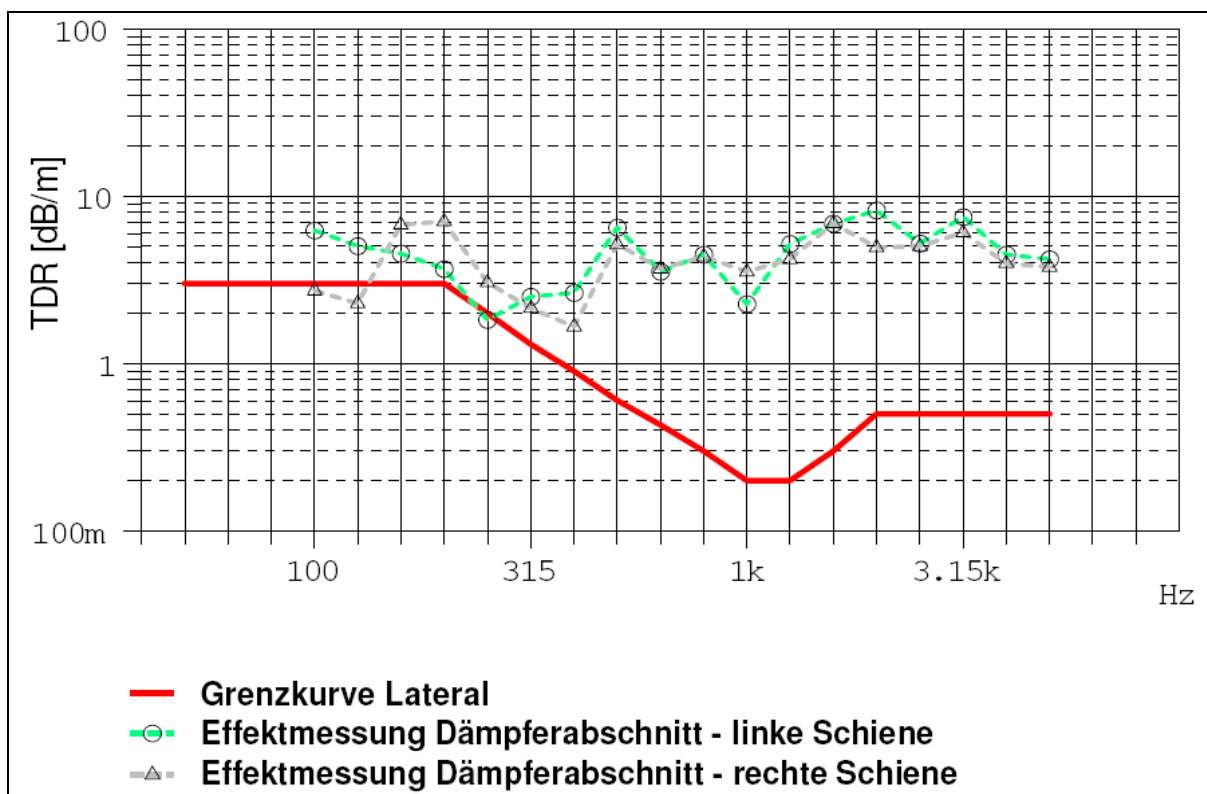
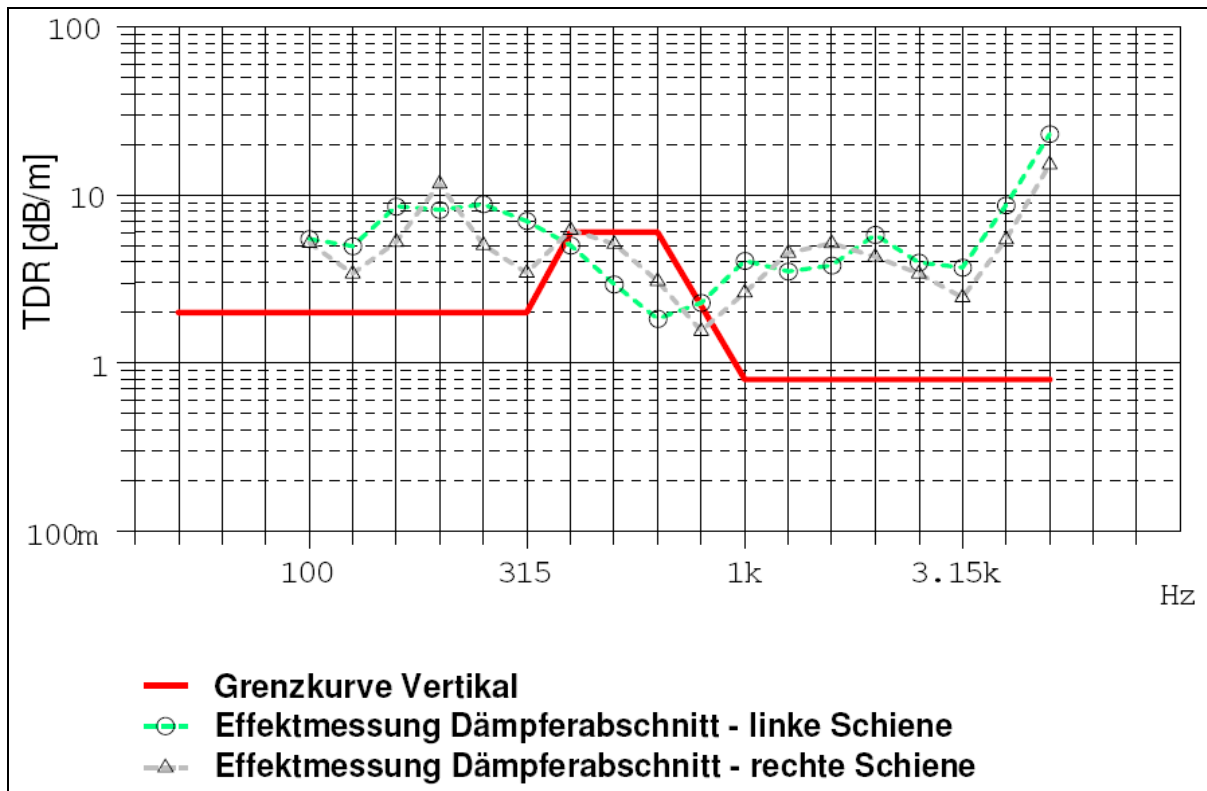
Nach Einbau der Schienendämpfer am 26.10.2009 wurden direkt anschließend am 27.10.2009 die Gleisabklingraten des gedämpften Gleises – wiederum separat für beide Gleise - bestimmt. Die Resultate sind in den Abbildungen 2.29a-c dargestellt.



**Abb. 2.29a:** Vertikale (oben) und laterale (unten) Gleisabklingraten der linken Schiene: Vergleich des Testgleises ohne Dämpfer (grau) mit dem Testgleis mit Dämpfern (grün)



**Abb. 2.29b:** Vertikale (oben) und laterale (unten) Gleisabklingraten der rechten Schiene: Vergleich des Testgleises ohne Dämpfer (grau) mit dem Testgleis mit Dämpfern (grün)



**Abb. 2.29c:** Vertikale (oben) und laterale (unten) Gleisabklingraten der beiden Schienen des Testgleises mit Schienendämpfern (linke Schiene: grün / rechte Schiene: grau / TSI-Grenzkurve: rot).

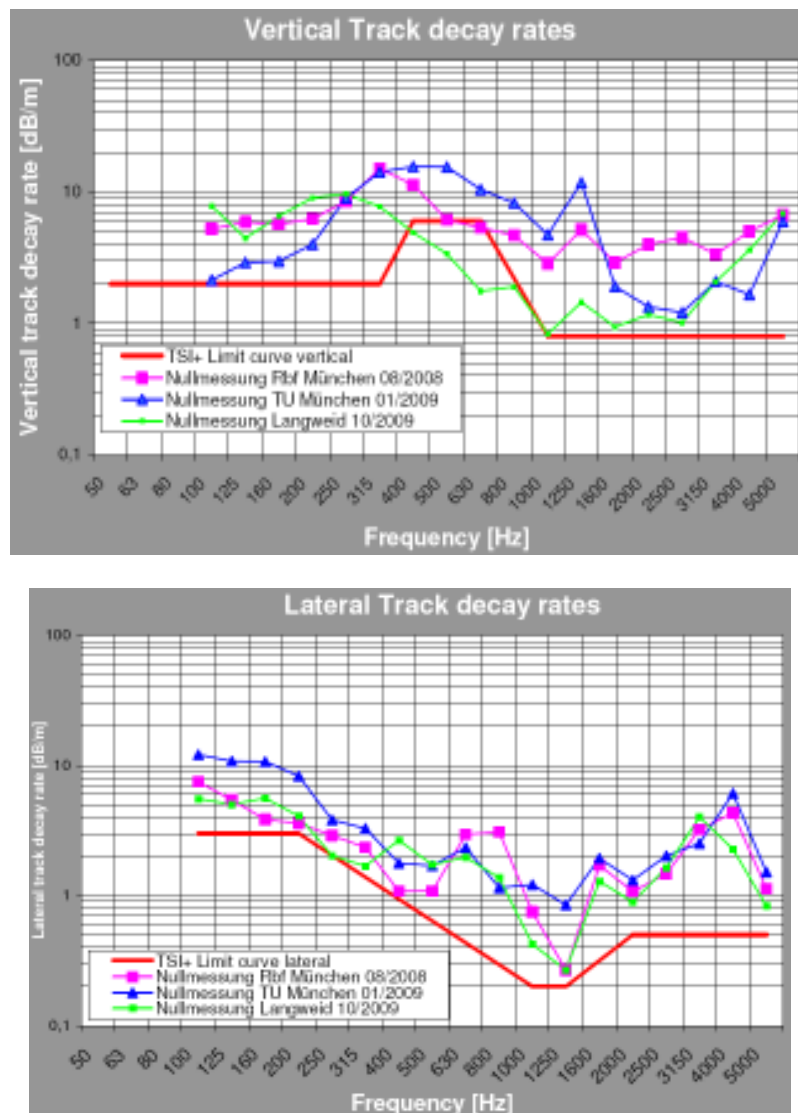
Die Gleisabklingraten der linken und rechten Schiene des Testgleises mit Schienendämpfern (siehe Abb. 2.29c) sind im Rahmen der bereits angesprochenen Messgenauigkeit vergleichbar. Anhand der in den Abbildungen 2.29a und 2.29b gezeigten Effektmessungen ist bei vertikalen Schienenschwingungen eine Wirkung der Schienendämpfer ab  $f > 1000$  Hz zu erwarten.

Die Messungen der Gleisabklingraten unterschiedlicher Gleisabschnitte im Verlauf der Dämpferentwicklung zeigen einen interessanten Effekt: Bei allen betrachteten Gleisabschnitte

- im Rangierbahnhof München-Nord
- im Oberbauprüfstand der TU München
- am realen Gleis der Strecke Donauwörth-Augsburg

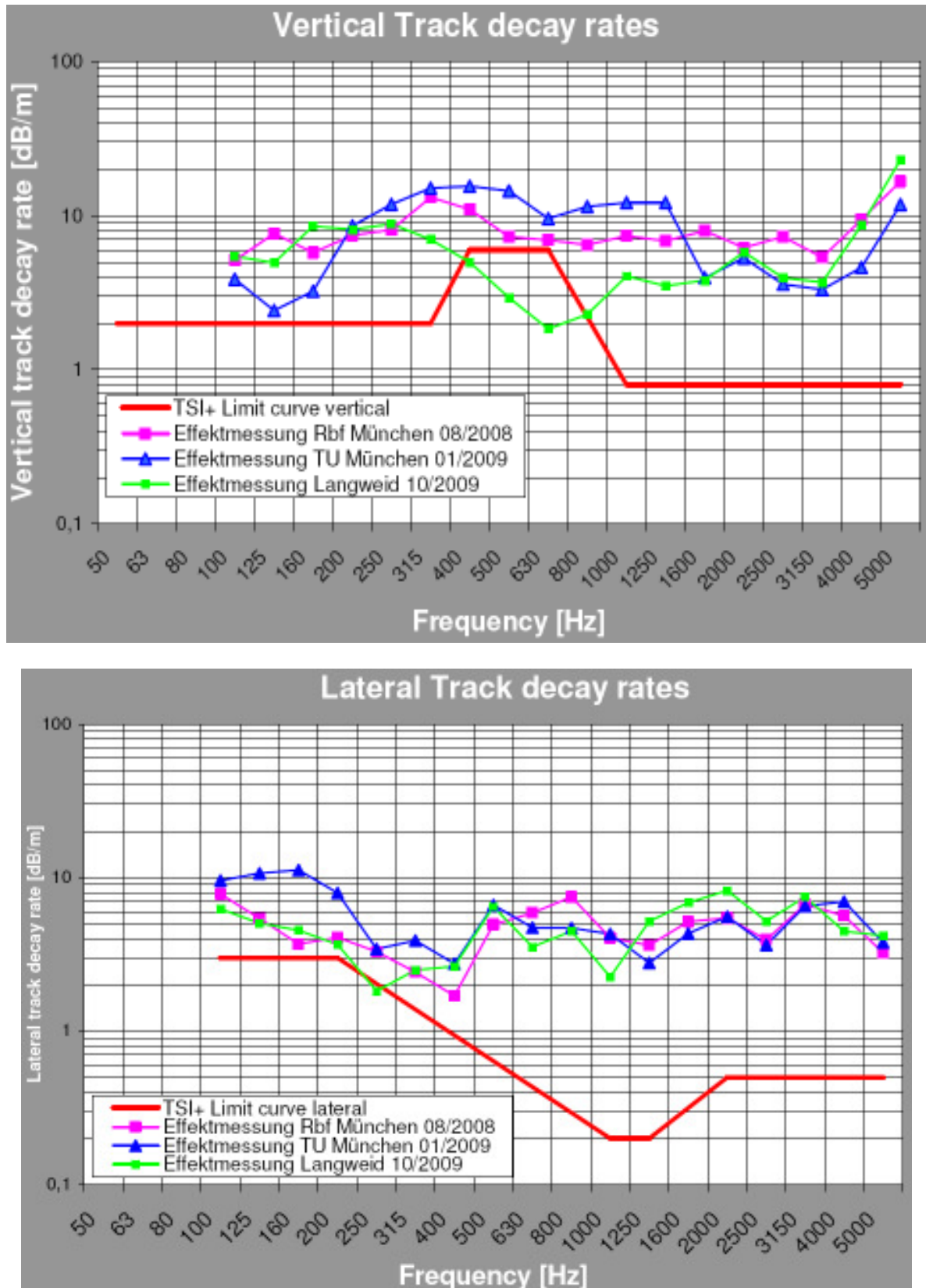
handelte es sich um denselben Oberbautyp: Schotterbett, Betonschwellen B70, Schiene UIC 60, harte Zwischenlage ZW 687a. Dennoch waren die Gleisabklingraten – insbesondere die vertikale Gleisabklingrate – dieser drei Gleise deutlich unterschiedlich (Abb. 2.30a). Für den Dämpfungszustand eines Gleises ohne Schienendämpfer ist also nicht alleine die Härte der Zwischenlage, sondern die gesamte Konfiguration des Oberbaus (Zustand der Schottersteine, Stopfungszustand des Gleises, Instandhaltungszustand des Gleises, Gleislage, Schwellenlage, ggf. auch Alter der Zwischenlage, ...) relevant.

Wird nun ein Gleis mit Schienendämpfern versehen, so folgt daraus zwangsläufig, dass die Wirkung des Schienendämpfers nicht nur von der Qualität des Dämpfers selbst, sondern auch von der Oberbaukonfiguration abhängt. Dies zeigt anschaulich die Abbildung 2.30b.



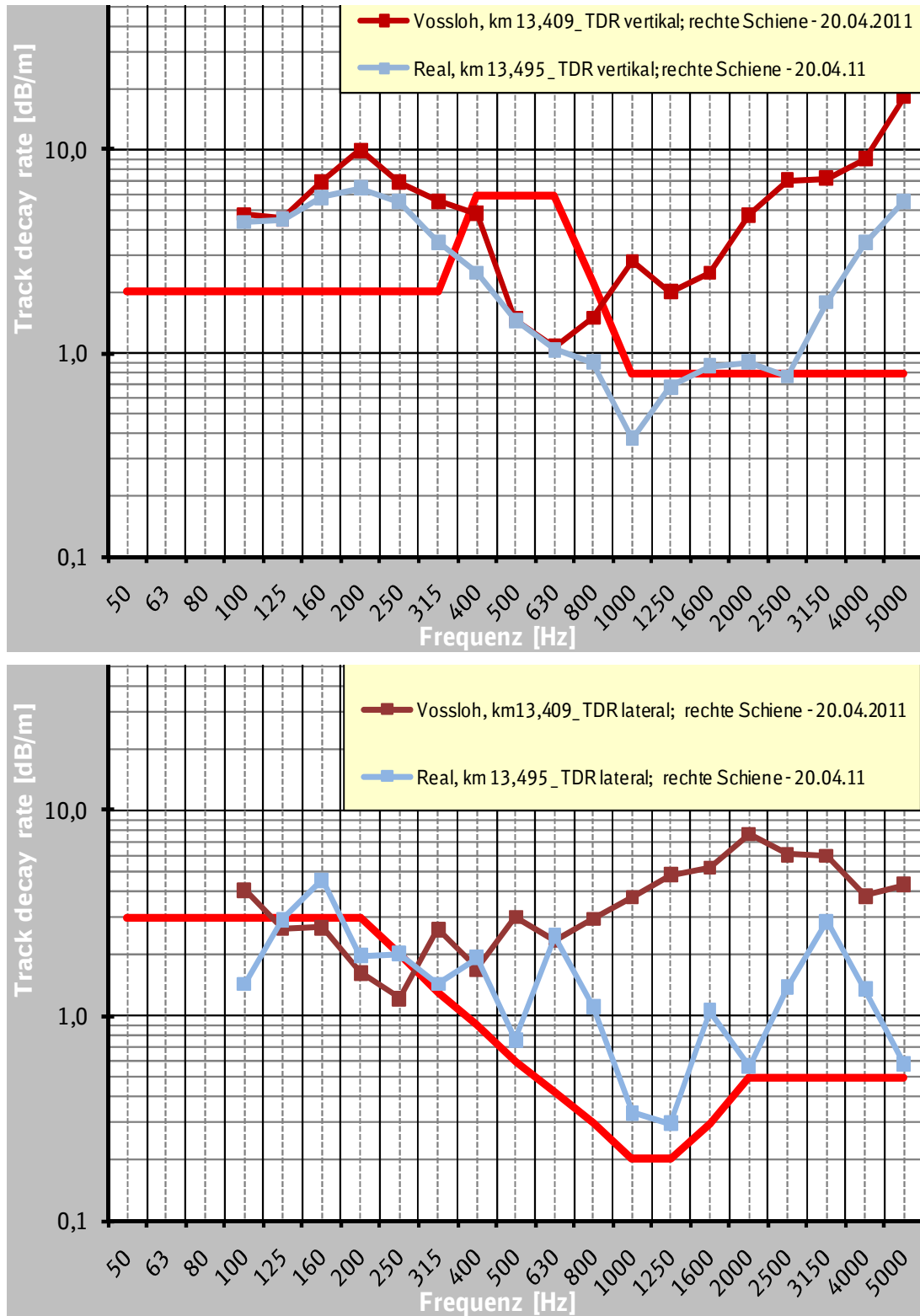
**Abb. 2.30a:** Vertikale (oben) und laterale (unten) Gleisabklingraten der ungedämpften Gleise von drei verschiedenen Oberbaukonfigurationen: Rangierbahnhof München-Nord (rosa), Oberbauprüfstand der TU München (blau) und Regelgleis bei Augsburg (grün).





**Abb. 2.30b:** Vertikale (oben) und laterale (unten) Gleisabklingraten der gedämpften Gleise von drei verschiedenen Oberbaukonfigurationen: Rangierbahnhof München-Nord (rosa), Oberbauprüfstand der TU München (blau) und Regelgleis bei Augsburg (grün).

Doch auch beim selben Gleis kann die Gleisabklingrate im zeitlichen Verlauf aufgrund Änderungen am Zustand des Oberbaus variieren. Die folgende Abbildung 2.31 zeigt im April 2011 gemessene Gleisabklingraten des bereits im Oktober 2009 untersuchten Regelgleises bei Augsburg – sowohl den gedämpften Referenzabschnitt als auch den gedämpften Testabschnitt.



**Abb. 2.31:** Vertikale (oben) und laterale (unten) Gleisabklingraten des ungedämpften Referenzgleises (hellblau) und des gedämpften Testgleises (braun) Gleise der Regelstrecke bei Augsburg.

Die blauen Kurven in Abb. 2.31 und die grünen Kurven in Abb. 2.30a zeigen somit die zeitliche Entwicklung der Gleisabklingraten desselben ungedämpften Referenzgleises. Die Dämpfung des Referenzgleises hat sich somit binnen 1 ½ Jahren deutlich verschlechtert, was eine höhere Wirksamkeit von Schienendämpfern erwarten lässt. Ebenso stellen die braunen Kurven in Abb. 2.31 und die grünen Kurven in Abb. 2.30b die zeitliche Entwicklung der Gleisabklingraten desselben gedämpften Testgleises dar. Vor allem die vertikale Dämpfung des gedämpften Gleises ab  $f > 1600$  Hz hat sich erhöht. Dies könnte eine Erklärung dafür sein, dass die im Oktober 2009 gemessene Reduktionswirkung der Vossloh-Schienendämpfer auf das Vorbeifahrtgeräusch (siehe nächstes Kapitel 2.2.8.3) geringer ausgefallen ist als die im April 2011 gemessene Reduktionswirkung.

Diese zahlreichen Messungen der Gleisabklingraten von ungedämpften Referenzabschnitten und gedämpften Testabschnitten sowohl an unterschiedlichen Gleisen als auch am selben Gleis zu unterschiedlichen Zeiten zeigen deutlich, dass die Dämpfungseigenschaften eines Gleises mit und auch ohne Schienendämpfer von der jeweiligen detaillierten Oberbaukonfiguration abhängig sind. Anschauliche Erklärungen dafür liefert neben den gezeigten Messwerten auch die theoretische Betrachtung des Rollgeräusches und der Anteil der Schiene, wie in Kapitel 2.1 erläutert. Bei Effektmessungen von Schienendämpfern sollten also zwingend sowohl die Gleisabklingraten von gedämpften und ungedämpften Gleis als auch die absoluten Pegel der Zugvorbeifahrt betrachtet werden. Denn oft sind Zugvorbeifahrten auf Strecken mit einer bereits stark gedämpften Oberbaukonfiguration (auch ohne Schienendämpfer) leiser auf Strecken mit einer gering gedämpften Oberbaukonfiguration. Dass sich nun – wie in diesem Kapitel gezeigt – der Dämpfungszustand einer Oberbaukonfiguration im zeitlichen Verlauf ändern kann, sollte bei der Entscheidung für die Montage von Schienendämpfer berücksichtigt werden.

### 2.2.8.3. Messung der schallreduzierenden Wirkung der Schienenabsorber

Ende Oktober 2009 wurde die Wirksamkeit der Vossloh-Schienendämpfer auf den Vorbeifahrtpegel von Regelzügen durch Vergleich der Schallabstrahlung bei der Fahrt auf dem ungedämpften Referenzgleis und gedämpften Testgleis gemessen. Hierbei wurden nur ungestörte Zugvorbeifahrten (ohne Flachstelle, etc.), bei konstanter Vorbeifahrtgeschwindigkeit berücksichtigt. Zugvorbeifahrten mit einer Abweichung der Ein- ( $v_1$ ) bzw. Ausfahrtgeschwindigkeiten ( $v_2$ ) von größer 3% von der mittleren Geschwindigkeit  $v_m$  wurden nicht ausgewertet.

Es wurden die in Abbildung 2.32 gelisteten Züge gemessen und ausgewertet.

Zugkategorie	Zugarten	Messkampagne	$v_M$ km/h	$v_m$ [km/h]		n
				min	max	
a) RZ	Reisezüge (ICE+IC)	Effektmessung	<b>186</b>	140	200	11
a1) ICE	ICE2, ICET	Effektmessung	<b>192</b>	150	200	8
a2) IC	IC-Züge	Effektmessung	<b>173</b>	140	194	3
b) RB-DoSto	Regionalbahn	Effektmessung	<b>129</b>	112	139	7
c) GZ	Güterzüge	Effektmessung	<b>92</b>	70	100	17
d) ET 440	S-Bahn-Züge (BR 440)	Effektmessung	<b>124</b>	105	160	33
e) RE	VT 612	Effektmessung	<b>159</b>	158	159	2

**Abb. 2.32:** Zugkategorien und ausgewertete Züge ( $L_{pAeq,Tp}$ ) bei der Messung der Wirksamkeit der Schienendämpfer der Fa. Vossloh. Hierbei ist  $v_m$  = Mittlere Geschwindigkeit einer einzelnen Zugfahrt über die 2 Messabschnitte,  $v_M$  = Mittlere Geschwindigkeit eines Zugkollektivs (Mittelwert der  $v_m$  aus „n“ Fahrten einer Zugkategorie) und n = Anzahl der ausgewerteten (gemittelten) Versuche.

Jede gültige Zugvorbeifahrt wurde über die Dauer der geometrischen Vorbeifahrt  $T_p$  des ganzen Zuges durch die Referenz- bzw. Dämpfer-Messebene ausgewertet (siehe Abbildung 2.33).

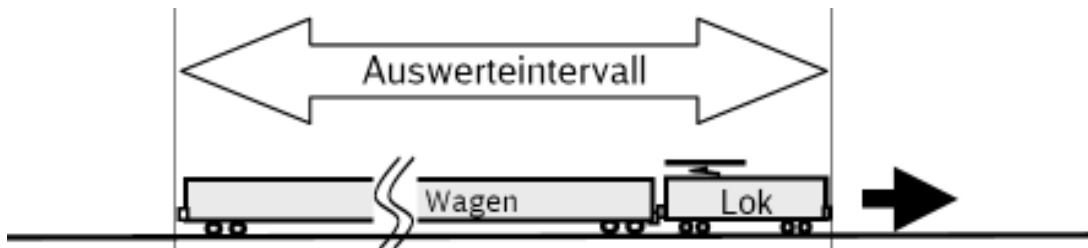


Abb. 2.33: Auswertintervall über die Dauer  $T_p$  der geometrischen Zugvorbeifahrt

Die Wirkung der Dämpfer wurde für jede Zug-Kategorie aus der Differenz der mittleren Differenzen (Dämpfer – Referenz) bei der Effektmessung errechnet und ist in Abb. 2.34 dargestellt.

Zugkategorie	Messkampagne	n	$V_E$ / [km/h]	Dämpferwirkung / [dB]
a_RZ (ICE+IC)	Effektmessung	11	200	-0,9
b_RB-DoSto	Effektmessung	7	140	-1,1
c_GZ	Effektmessung	17	100	-1,5
d_ET440	Effektmessung	33	120	-1,2
e_RE	Effektmessung	2	160	-0,8

Abb. 2.34: Lärminderungswirkung der Dämpfer bei den verschiedenen Zugkategorien

Es wurden für die Regelzüge Terzfrequenzspektren der Vorbeifahrten auf beiden Gleisabschnitten und so die Dämpferwirkung anhand der Terzpegeldifferenzen ermittelt. Die Abbildungen 2.35a-c zeigen exemplarisch die Differenzen der Effektmessung zwischen dem gedämpften Testabschnitt und dem ungedämpften Referenzabschnitt für die Zuggattungen ICE bei 200 km/h (Abb. 2.35a), Güterzüge bei 100 km/h (Abb. 2.35b) sowie die Triebzüge ET440 bei 120 km/h (Abb. 2.35c).

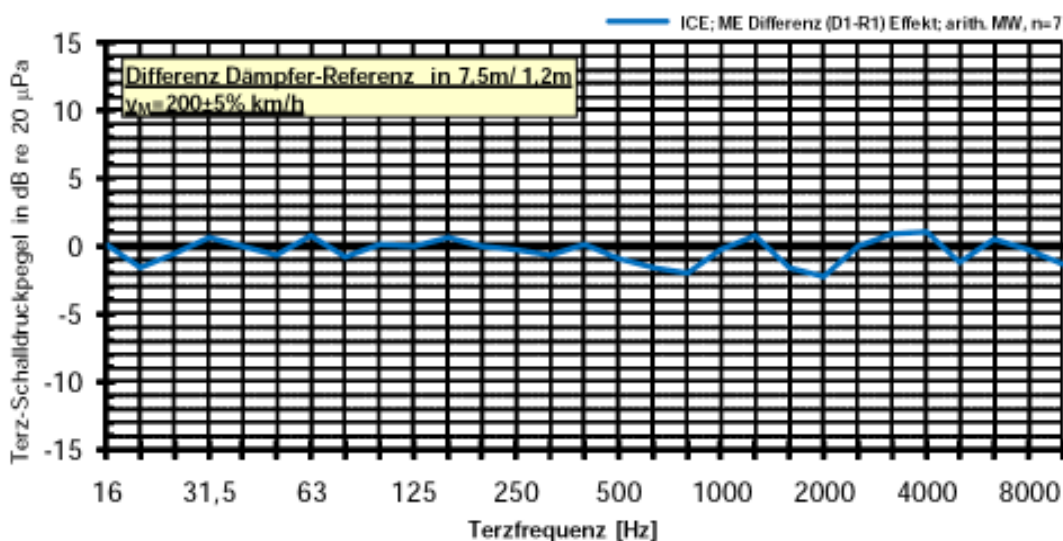


Abb. 2.35a: Differenzen der Effektmessung zwischen Dämpfer- und Referenzabschnitt für ICE-Züge

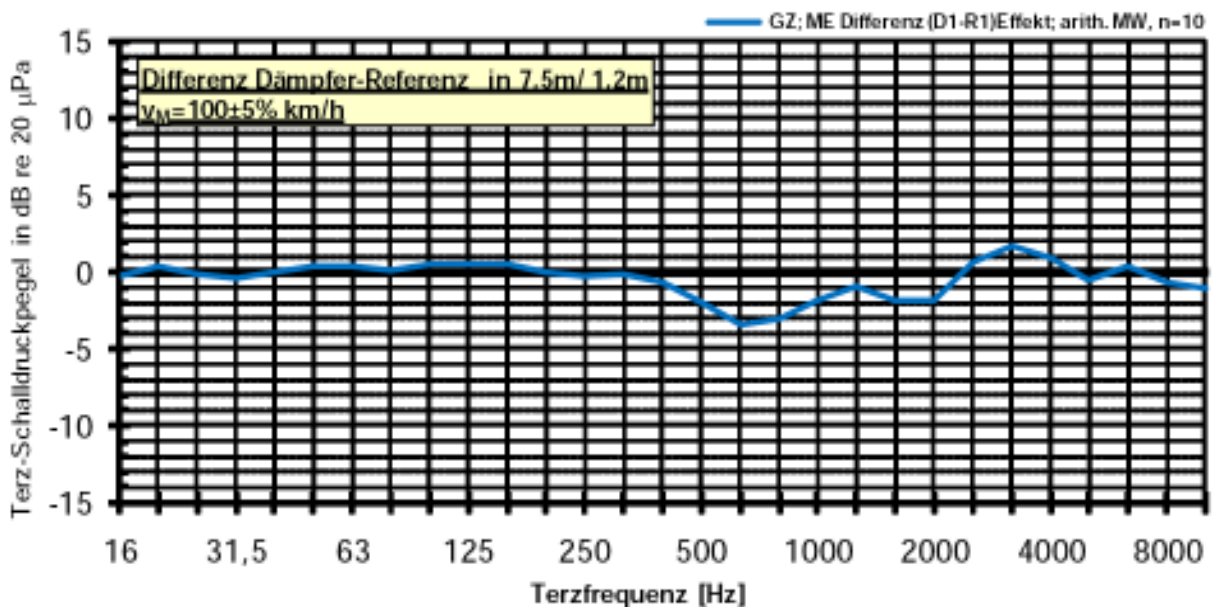


Abb. 2.35b: Differenzen der Effektmessung zwischen Dämpfer- und Referenzabschnitt für Güterzüge

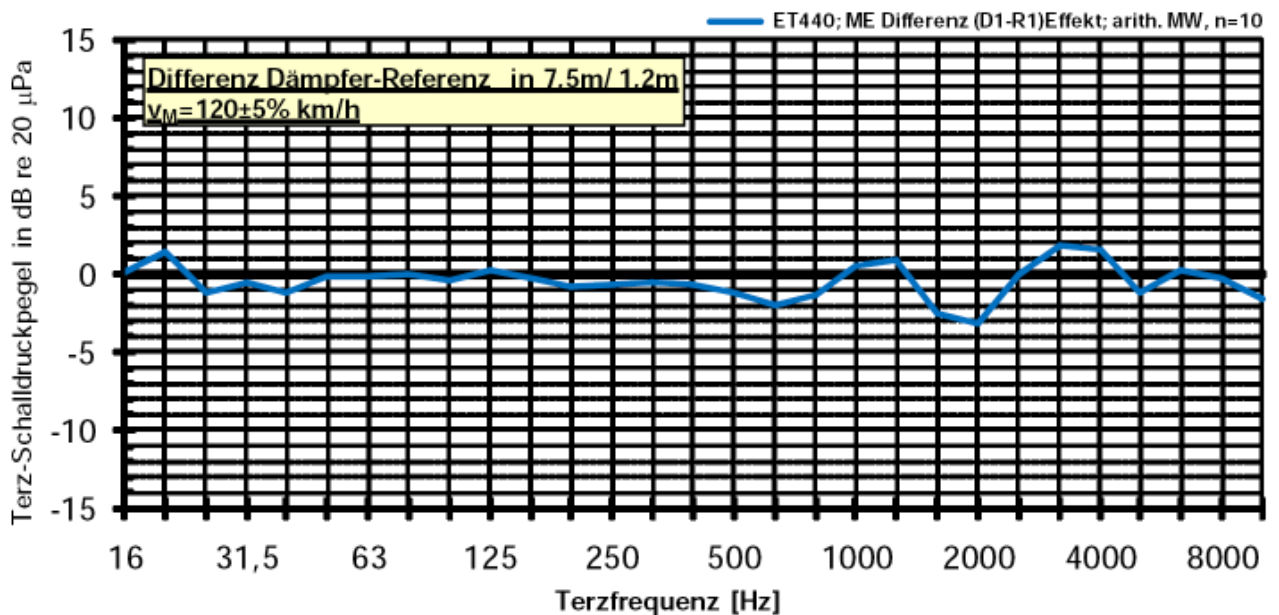


Abb. 2.35c: Differenzen der Effektmessung zwischen Dämpfer- und Referenzabschnitt für Triebzüge ET440

Die Terzspektren zeigen, dass die Schienendämpfer bei diesen Regelzügen hauptsächlich im Frequenzbereich zwischen den 630-Hz- und 2-kHz Terzen wirken. Die Dämpfer scheinen bei  $f = 1250$  Hz nicht zu wirken. Bei dieser Frequenz strahlen jedoch Räder dominant Schall ab. Hier dürfte somit eine ähnliche Situation wie in Abbildung 2.2 gezeigt vorliegen, bei der im Frequenzbereich von 1250 Hz die Räder derart dominant zum Rollgeräusch beitragen, dass eine mögliche physikalische Wirkung des Schienendämpfers nicht zu einer Reduktion des Rollgeräusches beitragen.

## 2.3. Entwicklung einer hochelastischen Schienenbefestigung der Fa. Vossloh

### 2.3.1. Entwicklungsziel

Neben der Reduktion des Roll- bzw. Vorbeifahrtgeräusches eines Zuges, das hauptsächlich durch die Schallabstrahlung von Rad und Schiene verursacht wird, war auch die Reduktion des sekundären Luftschalls an Sonderbereichen ein Projektziel, das im Teilpaket B3 zu Lösungen führen sollte. Zu Sonderbereichen zählen insbesondere Tunnel, Brücken sowie Weichen (s. Abb. 2.36).

Bei Zugfahrt auf einer freien Strecke werden über das Gleis und den Oberbau Erschütterungen in den Boden eingeleitet, die sich durch den Boden bis zu den nahegelegenen Häusern fortpflanzen. Dort können die „Erschütterungswellen“ die Gebäudekonstruktion anregen, was letztlich zur Schallabstrahlung von Wänden und Decken im Haus führen kann. Befinden sich auf der freien Strecke Weichen oder Schienenstöße, können die in den Boden geleiteten Erschütterungen aufgrund anderer Amplitude oder anderer Frequenzverteilung zu anderen Anregungsbedingungen am Haus und somit zu einem ggf. lauterem sekundären Luftschall im Haus führen.

Eine Zugfahrt im Tunnel zeigt ein ähnliches Verhalten. Auch hier können in den Boden und die Tunnelwand Erschütterungen eingeleitet werden, die sich bis zu nahegelegenen Häusern fortpflanzen können.

Bei einer Zugfahrt auf einer Brücke wird die Brückenkonstruktion durch Einleitung von Erschütterungen zu Schwingungen angeregt, so dass die Brücke selbst sekundären Luftschall abstrahlt. Dieser Lärm ist meist tieffrequent und wird daher als „Brückendröhnen“ bezeichnet. Bei besonders lauten Brücken kann diese Schallabstrahlung bei tiefen Frequenzen dominant sein gegenüber dem Rollgeräusch des Zuges.

Abbildung 2.36 zeigt den Entstehungsmechanismus von sekundärem Luftschall (blaue Pfeile in der Abbildung) aufgrund der in den Oberbau bzw. das Gebäude eingeleiteten Erschütterungen (rote Pfeile in der Abbildung).

Zur Reduktion des sekundären Luftschalls, bedingt durch Zugfahrten auf einer freien Strecke oder in einem Tunnel, gibt es bereits zahlreiche Minderungsmaßnahmen.

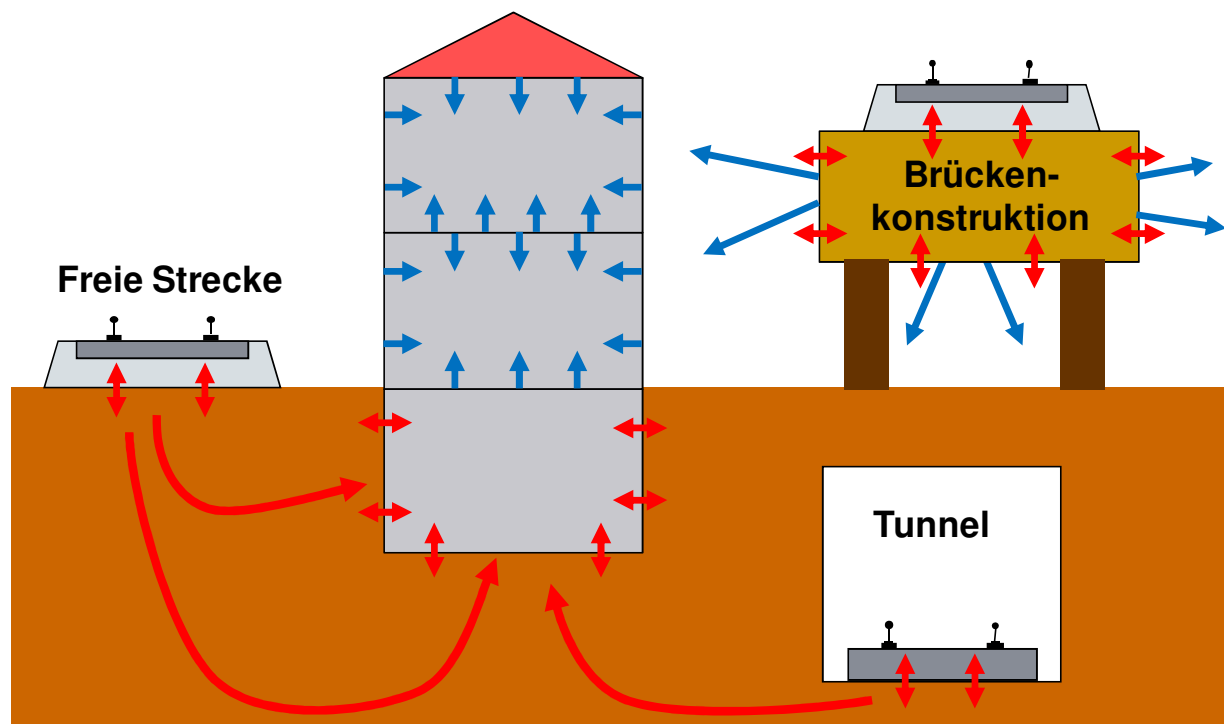
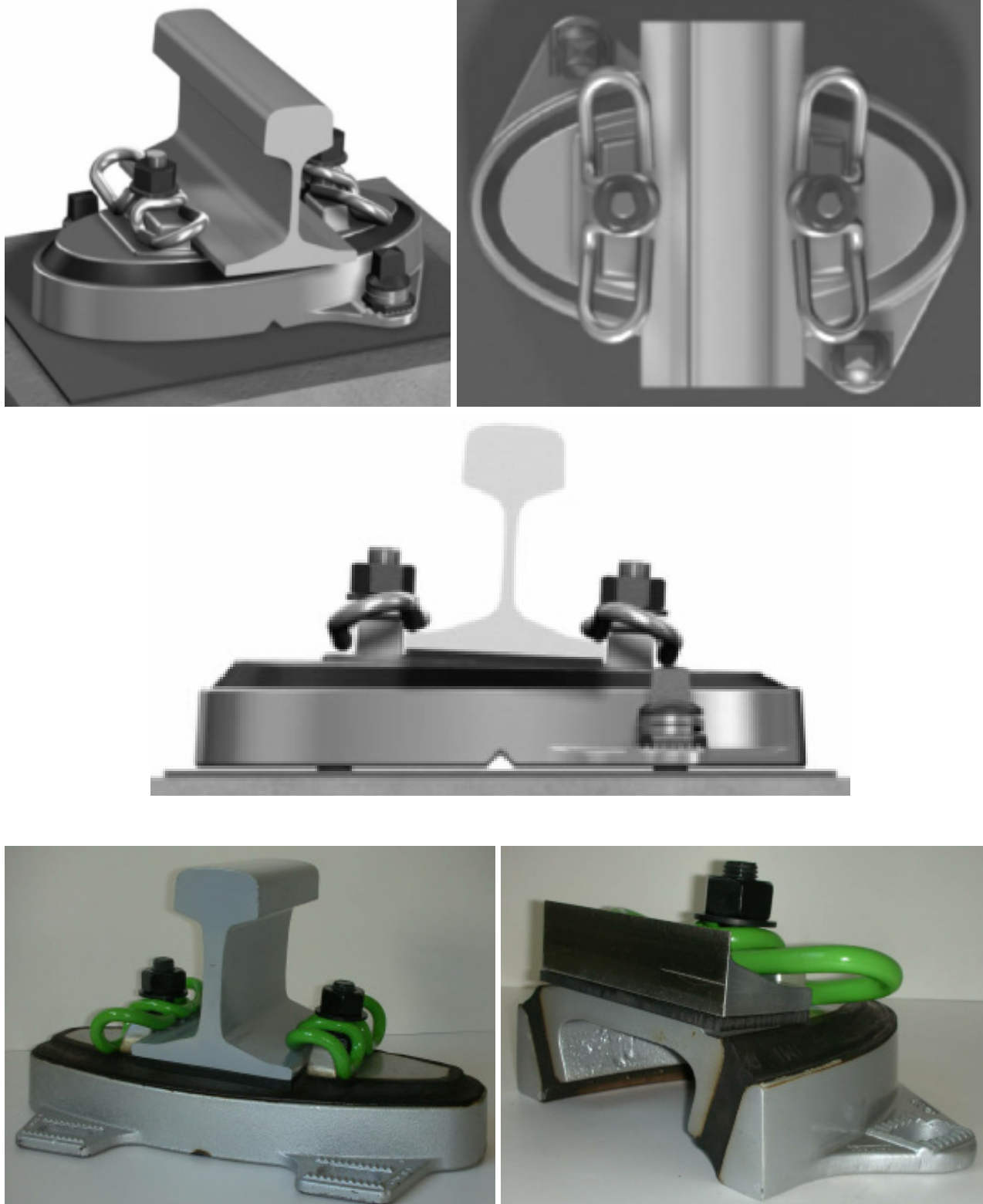


Abb. 2.36: Entstehung von sekundärem Luftschall bei Zugfahrten an Sonderbereichen

Zur Reduktion des sekundären Luftschalls, bedingt durch Zugfahrten auf einer freien Strecke oder in einem Tunnel, gibt es bereits zahlreiche Minderungsmaßnahmen. Eine davon ist die hochelastische Schienenbefestigung, die z. B. bei Tunnelbauwerken geeignet ist. Abbildung 2.37 zeigt eine derartige hochelastische Schienenbefestigung, das sogenannte „Kölner Ei“.



**Abb. 2.37:** Das „Köllner Ei“ der Fa. Vossloh in zwei unterschiedlichen Ausführungen. Die oben gezeigte Variante (Graustufen) benötigt zwei Befestigungsschrauben, die unten gezeigte Variante (farbig) dagegen vier Befestigungspunkte.

Die Anwendung von Minderungsmaßnahmen zur Reduktion des Brückendröhnens hängen von der Brückenkonstruktion und dem Oberbau auf der Brücke ab. Im Fall von Hohlkastenbrücken mit einem Schotteroberbau kommen zum Beispiel ggf. Maßnahmen wie besohlte Schwellen in Betracht. Für direkt befahrene Brücken gibt es jedoch nur wenig effektive Minderungsmaßnahmen.

Abbildung 2.38 gibt für die drei Sonderbereiche „Tunnel“, „Brücken“ und „Weichen“ eine Übersicht über Fakten von Anregungsmechanismen bis hin zur Durchführung von Maßnahmen zur Reduktion des sekundären Luftschalls.

	Tunnel	Brücken	Weichen
Anregungsmechanismen	Körperschallemission, Übertragung über Boden und Abstrahlung im Haus	Abstrahlung von sekundärem Luftschall und Übertragung über Luft	Körperschallemission, Übertragung über Boden und Abstrahlung im Haus
Einflüsse auf die Emission	Emission abhängig von Oberbau und Einbettung des Tunnels in Umgebung	Emission abhängig vom Brücken- und Oberbautyp und von konstrukt. Details	Abhängig vom Radius und vom Wartungszustand der Weiche
Frequenzbereich	Maximum bei 20-100 Hz, mittlere Schwankungen bei der Emission, hohe Schwankungen bei der Übertragung zum Haus	Maximum bei 25-1000 Hz, große Schwankungen bei der Emission und der Abstrahlung, geringe bei Übertragung zum Haus	Maximum bei 16-40 Hz, große Schwankungen bei der Emission, hohe Schwankungen bei der Übertragung zum Haus
Belästigungsumfeld	Einige 10 bis 100 m	Einige 10 bis 100 m	Einige 1 bis 10 m
Maßnahmen zur Reduktion des sek. Luftschalls	Maßnahmen werden auf Basis ausführlicher Prognosen empfohlen.	Maßnahmen werden bei Stahlbrücken häufig ohne Prognose durchgeführt.	Maßnahmen erfolgen nur in seltenen Fällen (z. B. bei Weichen im Tunnel).

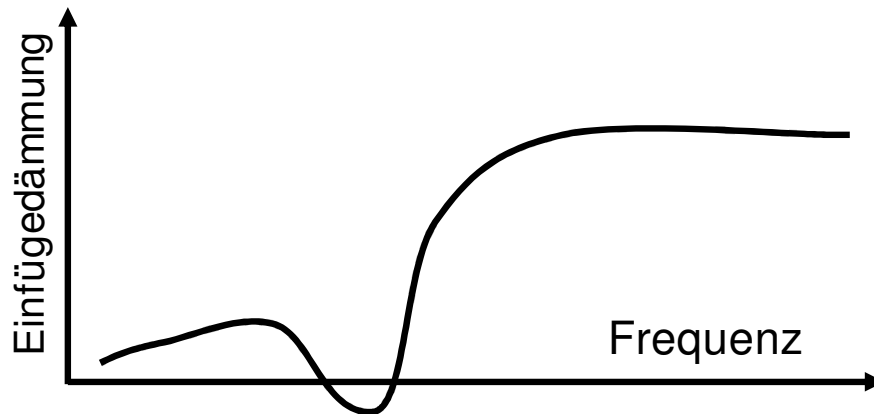
**Abb. 2.38:** Übersicht über die Problematik des sekundären Luftschalls bei Sonderbereichen

Ziel im Teilpaket B3 war es daher, eine hochelastische Schienenbefestigung für direkt befahrene Brücken zu entwickeln, deren Wirksamkeit außerdem bereits deutlich unter 80 Hz beginnt. Eine derartige Entwicklung kann natürlich auch in Tunnelbauwerken oder auf bestimmten Konstruktionen einer Festen Fahrbahn verwendet werden, doch gerade für die Verwendung auf einer direkt befahrenen Brücke müssen einige spezielle Randbedingungen bedacht werden, die die Konstruktion besonders aufwändig macht. Die Abbildungen einer aufgeschnittenen hochelastischen Schienenbefestigung (Abb. 2.37 unten) zeigen die prinzipielle Wirkungsweise: durch eine dicke Gummischicht werden Schwingungen der Schiene (verursacht aufgrund der Zufahrt bzw. der Anregung im Rad-/Schiene-Kontakt) von der Befestigung an der Schwelle entkoppelt, so dass in das Brückenbauwerk möglichst wenig Erschütterungen eingeleitet werden können. Auf den ersten Blick muss also „nur“ das bereits vorhandene „Köllner Ei“ in seiner Konstruktion derart angepasst werden, dass die Grundfläche kleiner wird und so auf eine Schwelle der direkt befahrenen Brücke passen könnte. Es gibt jedoch weit mehr Details, die beachtet werden müssen. Diese werden in den folgenden Kapiteln dargestellt.



### 2.3.2. Randbedingungen für die Entwicklung einer hochelastischen Schienenbefestigung Für direkt befahrene Brücken

Die Wirkung einer hochelastischen Schienenbefestigung beruht auf der Theorie eines Einmassenschwingers (Abb. 2.39): unterhalb der Resonanzfrequenz zeigt die Maßnahme keine Wirkung, bei der Resonanzfrequenz ergibt sich eine erhöhte Eintragung von Schwingungen in den Untergrund und oberhalb der Resonanzfrequenz ergibt sich eine Reduktion der Schwingungen.



**Abb. 2.39:** Eine hochelastische Schienenbefestigung wirkt – analog zur Theorie eines Einmassenschwingers – oberhalb der Resonanzfrequenz der Schienenbefestigung.

Es ist davon auszugehen, dass die Wirkung einer hochelastischen Schienenbefestigung durch die Stützpunktsteifigkeit bestimmt wird. Dabei führen weichere Schienenlager zu höherer Wirksamkeit und niedrigeren Abstimmfrequenzen. Zur Festlegung der minimalen Stützpunktsteifigkeit muss der Unterbau der Brücke berücksichtigt werden. Es werden derart weiche Stützpunktsteifigkeiten angestrebt, dass die Resonanzfrequenz deutlich unter 80 Hz liegt.

Während die technische Entwicklung dieser hochelastischen Schienenbefestigung seitens der Fa. Vossloh erfolgte, hatte die Deutsche Bahn als Betreiber folgende primäre Aufgaben:

- Suche einer geeigneten Brücke zum Einbau und Test der Schienenbefestigung sowohl unter Gesichtspunkten der Tauglichkeit für das entwickelte Schienenbefestigungssystem als auch unter betrieblichen Aspekten der Durchführbarkeit.
- Messung der Wirksamkeit der Schienenbefestigung nach deren Einbau. Diese Nachweismessungen sollten durch das EBA akzeptiert werden, damit der finanzielle Nutzen der akustischen bzw. erschütterungstechnischen Wirkung auch tatsächlich durch die DB genutzt werden kann.

Bei der Wahl der Brücke zum Einbau sollten bzw. mussten folgende Kriterien gegeben sein:

- Mischverkehr, Geschwindigkeit bis 160 km/h, gerade Strecke
- Messungen von sekundärem Luftschall und Rollgeräusch möglich, eventuell Trennung mit Hilfe von Körperschallmessungen, Länge des Abschnittes größer gleich 50 m
- Einbau von Schienendämpfern möglich (falls die hochelastische Schienenbefestigung zu einer Erhöhung des Rollgeräusches führen sollte, könnte dies mit Schienendämpfern wiederum reduziert werden.
- Auffälligkeit im Sinne des sekundären Luftschalls, so dass die eingebaute Maßnahme im Falle ihrer Wirksamkeit auch Nutzen für die Anwohner im Bereich der Brücke hat.
- Sehr gute Zugänglichkeit, keine Hintergrundgeräusche

Außerdem kann der Einbau von hochelastischen Schienenbefestigungen an einer Brücke nur im Rahmen eines aus oberbautechnischen Gründen erforderlichen Umbaus erfolgen. Schließlich bedeutet der Einbau von neuen Schienenbefestigungssystemen die Streckenstilllegung des betroffenen Gleises für mehrere Tage, was bereits teils 2 Jahre im Voraus bei der Fahrplangestaltung (Sperrpausen!) und der Planung anderer Instandhaltungsarbeiten benachbarter Strecken berücksichtigt werden muss. Auch aus finanzieller Sicht ist der Einbau von neuen Schienenbefestigungen zur Erprobung nur im Rahmen von regulär geplanten Umbauten möglich, da in einem Innovationsbudget meist nur die Gelder für die neuen Befestigungssysteme und ggf. zusätzlich erforderlicher Baumaßnahmen vorhanden sind, nicht jedoch die erforderlichen Gelder für die mit dem Umbau in Verbindung stehender Betriebsausfallkosten und langfristiger Bauplanungskosten.

Als möglicher und zugleich sehr gut geeigneter Testabschnitt war bereits zu Beginn des Projektes LZarG die Braunauer Brücke in München ausgewählt (Abb. 2.40a: Gesamtansicht; Abb. 2.40b: Detailansicht des Oberbaus): diese Brücke sollte im Rahmen der Lärmsanierung im Jahr 2009 umgebaut werden, so dass der Einbau der hochelastischen Schienenbefestigung im Rahmen dieser Baumaßnahme erfolgen konnte.



**Abb. 2.40a:** Zu Projektbeginn erschien die Braunauer Brücke in München zum Einbau und Test der hochelastischen Schienenbefestigung geeignet, deren Umbau im Jahr 2009 vorgesehen war. Das obere Foto zeigt die seitliche Gesamtansicht, die unteren Fotos zeigen die Draufsicht von beiden Brückenköpfen aus.



Foto: DB Systemtechnik, W. Behr

**Abb. 2.40b:** Detailansicht des Oberbaus der Brücke und der freien Strecke im Übergangsbereich

Von dieser Brücke lagen – aufgrund von Bürgerbeschwerden – bereits Messungen zum sekundären Luftschall vor, die ein deutliches Brückendröhnen zeigten (Abb. 2.41).

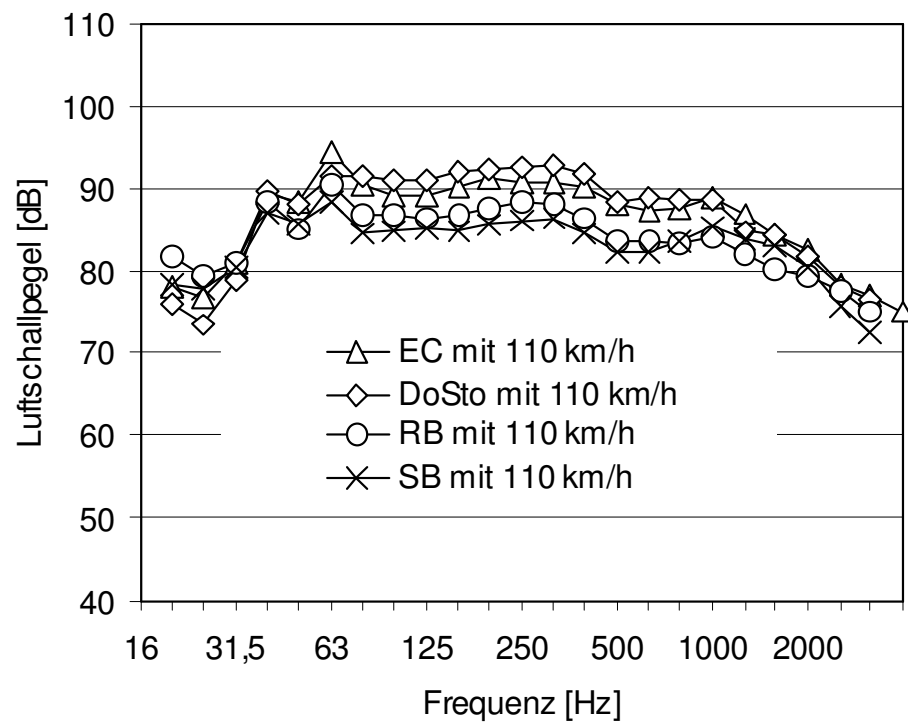
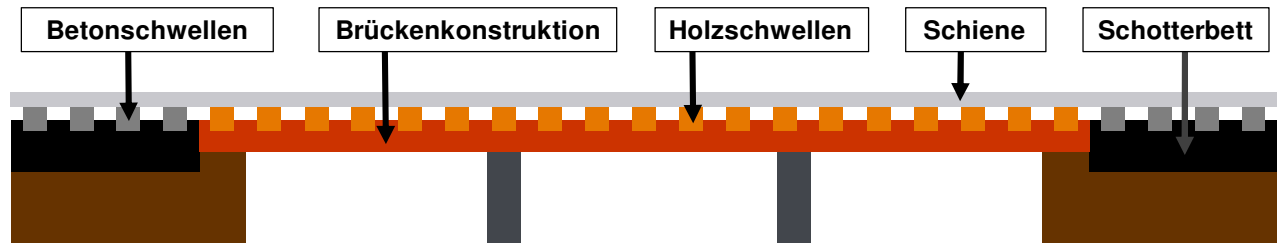
**Abb. 2.41:** Luftschall-Messungen seitlich der Braunauer Brücke zeigen ein deutliches Dröhnen bei 63 Hz.

Abbildung 2.42 schematisiert diese Brücke, um im Folgenden Aspekte erläutern zu können, die beim Einbau von hochelastischen Schienenbefestigungen berücksichtigt werden müssen.

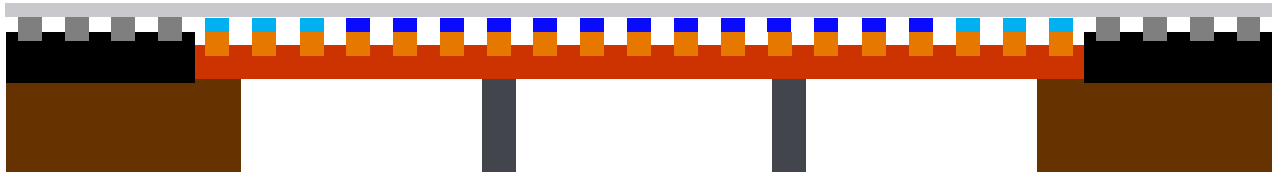


**Abb. 2.42:** Schemazeichnung der Braunauer Brücke

### 2.3.3. Einbau von hochelastischen Schienenbefestigungen als Retrofit-Maßnahme

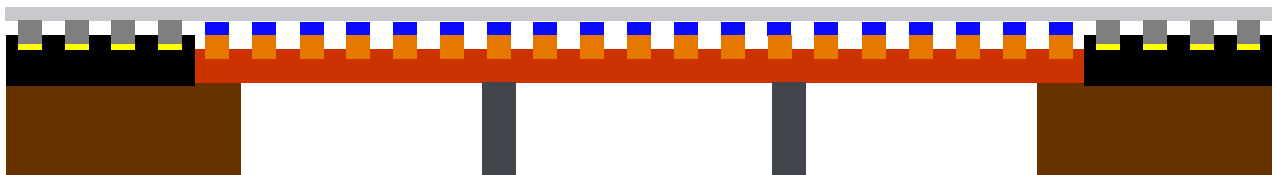
Die im Projekt LZarG entwickelten Maßnahmen sollen als Retrofit-Maßnahmen konzipiert sein. Das bedeutet in diesem Fall, dass die hochelastischen Schienenbefestigungen nachträglich auf einer direkt befahrenen Brücke im Falle einer hinsichtlich des Brückendröhnens auffälligen Brücke – quasi im Austausch zu dem bestehenden Schienenbefestigungssystem – eingebaut werden sollen. Im Gegensatz zu einem Brückenneubau mit hochelastischen Schienenbefestigungen gilt es hier, viele Randbedingungen zu beachten. Diese sollen nun dargestellt werden.

Aus den Abbildungen 2.37 und 2.40b wird deutlich, dass beim nachträglichen Einbau einer hochelastischen Schienenbefestigung die Schiene nach dem Einbau deutlich höher liegen wird. Dieser Höhenunterschied liegt im Bereich von ggf. mehreren cm, so dass ein „Abschleifen“ der Holzschwellen auf der Brücke nicht in Frage kommt. Abbildung 2.43 verdeutlicht dies: die größere Bauhöhe der hochelastischen Schienenbefestigung (im Bild als dunkel- bzw. hellblaue Elemente auf die Holzschwellen der Brücke aufgesetzt) bewirkt die höhere Position der Schiene auf der Brücke. Demzufolge müssten – bei der dargestellten Lösung – die Betonschwellen im Schotterbett der freien Strecke beidseits der Brücke angehoben werden. Diese Anhebung des Schotterbettes erkennt man beim Vergleich der Abbildungen 2.43 mit 2.42. Diese Anhebung des Schotterbettes bedeutet jedoch im Fall der Braunauer Brücke nicht etwa nur ein einfaches Stopfen des Schotter mit gleichzeitigem Auffüllen des Schotter und Anhebung der Schiene um ein einige cm, sondern hat eine Neukonstruktion der Fang- und Führungsvorrichtung im Bereich der beiden Brückenköpfe zur Folge. Dies kann man anhand der Abbildung 2.40a (untere Fotos) leicht anschaulich nachvollziehen. Doch diese Lösungsvariante birgt ein weiteres technisches Problem. Da die hochelastischen Schienenbefestigungen eine möglichst bzw. sehr weiche Schienenlagerung ermöglichen sollen (in Abbildung 2.43 in dunkelblauer Farbe), wäre der Steifigkeitsunterschied zu der deutlich härteren Lagerung der Schiene auf der freien Strecke beidseits der Brücke zu groß, so dass ein Übergangsbereich mit einer mittleren Steifigkeit zwischen den hochelastischen Schienenbefestigungen auf der Brücke und der freien Strecke eingerichtet werden müsste. In Abbildung 2.43 ist dies mit (hoch)elastischen Schienenbefestigungen angedeutet, die eine geringere Steifigkeit haben (in Abbildung 2.43 in hellblauer Farbe). Doch eine derartige Lösung würde das Brückendröhnen aller Erfahrung nach deutlich weniger reduzieren können, da dann die Brückenkonstruktion über diese Schienenbefestigungen (hellblau) angeregt werden würde und somit die hochelastischen Schienenbefestigungen (dunkelblau) nicht mit maximal möglichem Reduktionseffekt des Brückendröhnens wirken könnten.

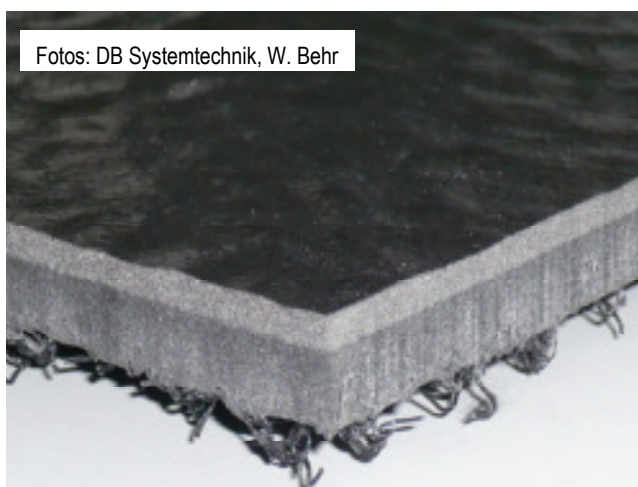


**Abb. 2.43:** Schemazeichnung der Braunauer Brücke mit dem nachträglichen Einbau von hochelastischen Schienenbefestigungen (auf den Holzschwellen der Brücke dunkelblau bzw. hellblau dargestellt).

Der erforderliche Übergangsbereich zur Anpassung der Steifigkeit von der freien Strecke an die hochelastische Schienenlagerung auf der Brücke muss also aus Gründen der akustischen Wirkung vor und nach der Brücke nach den anfänglichen Planungen und Überlegungen im Bereich der freien Strecke liegen. Die Anpassung der Steifigkeit könnte auch mit besohnten Schwellen erfolgen, wobei bei den anfänglichen Planungen diesbezüglich noch unklar war, ob Schwellen, an denen Fang- und Führungsvorrichtungen montiert sind, besohlt sein dürfen. Außerdem handelt es sich bei den Schwellen vor und nach dem Brückenkopf um Spezielschwellen (siehe Abbildungen 2.40a und 2.40b). Besohlte Schwellen dürften also in diesem Fall ein Problem darstellen, da Schwellenbesohlungen bereits bei der Herstellung der Schwellen in den noch zäh flüssigen Beton integriert werden (Abb. 2.45). Im Falle dieser Lösung müssten also einige wenige Schwellen – quasi als Einzelanfertigung – als besohlte Schwellen hergestellt werden, eine „nachträgliche“ Besohlung von bereits existierenden Schwellen im Sinne einer Retrofit-Lösung ist also nicht möglich.



**Abb. 2.44:** Schemazeichnung der Braunauer Brücke mit dem nachträglichen Einbau von hochelastischen Schienenbefestigungen. Der Übergangsbereich zur Anpassung der Steifigkeitsunterschiede liegt vor und nach der Brücke in Form von besohnten Schwellen.

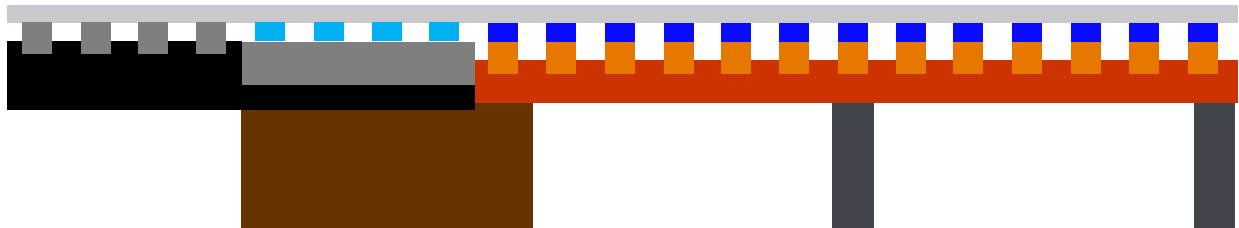


Fotos: DB Systemtechnik, W. Behr



**Abb. 2.45:** Schwellensohlen werden bei der Herstellung mit einem Kunststoffgeflecht („Wirrgelege“) versehen. Die so hergestellten Schwellensohlen werden bei der Herstellung von Betonschwellen an die noch nicht gehärteten Betonschwellen angefügt und somit verbunden.

Bleibt als weitere Überlegung, die auf der Brücke verwendeten hochelastischen Schienenbefestigungen auch vor und nach der Brücke im Übergangsbereich einzusetzen, dann allerdings mit einer geringeren Steifigkeit als auf der Brücke. Diese bauliche Umsetzungsvariante zeigt die Abbildung 2.46. Da jedoch im Streckennetz der Deutschen Bahn keine hochelastischen Schienenbefestigungen im Schotterbett eingesetzt werden, müsste in diesem Fall eine weitere Sonderlösung getroffen werden, z. B. eine „kurze Feste Fahrbahn“, auf die die mittelweichen Schienenbefestigungen aufgebracht werden würden. Ob ein wie in Abbildung 2.46 dargestellter Übergangsbereich noch die Befestigung einer Fang- und Führungsvorrichtung erlaubt bzw. ermöglicht, bleibt bei dieser Überlegung vorerst noch unberücksichtigt.

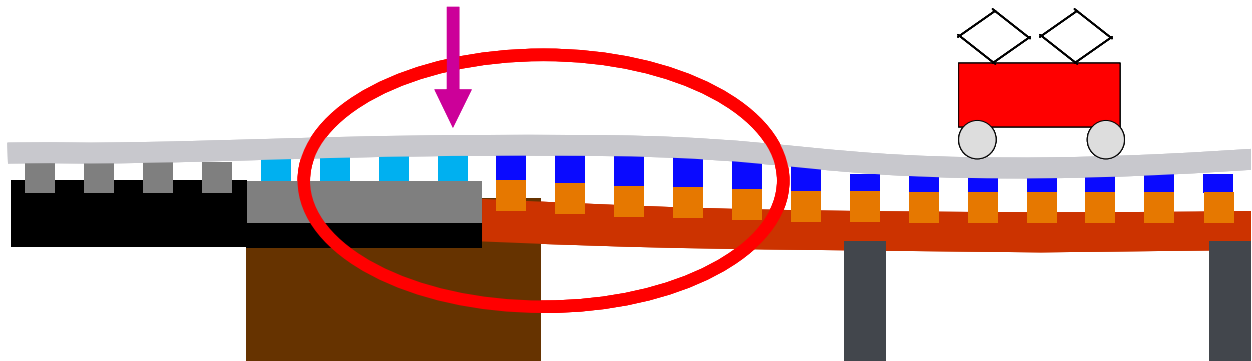


**Abb. 2.46:** Schemazeichnung der Braunauer Brücke (linke Teilansicht) mit dem nachträglichen Einbau von hochelastischen Schienenbefestigungen. Der Übergangsbereich zur Anpassung der Steifigkeitsunterschiede liegt vor und nach der Brücke in Form von elastischen Schienenbefestigungen. Dazu müsste noch eine „feste Tragschicht“ in den Übergangsbereichen integriert werden.

Die in den Abbildungen 2.43, 2.44 und 2.46 dargestellten Lösungen zeigen lediglich Überlegungen und mögliche Probleme, die sich bei einer nachträglichen Befestigung von hochelastischen Schienenbefestigungen auf einer direkt befahrenen Brücke ergeben. Diese Schemazeichnungen stellen keinesfalls „freigegebene“ oder technisch definitiv umsetzbare Einbauvarianten dar. So werden jedoch die Anforderungen bei der Suche einer geeigneten Brücke zum nachträglichen Einbau von hochelastischen Schienenbefestigungen deutlich. Im Gegensatz zu anderen „universellen“ Maßnahmen wie besohnten Schwellen oder Unterschottermatten müssen beim Einbau von hochelastischen Schienenbefestigungen auf einer direkt befahrenen Brücke auch die freie Strecke vor und hinter der Brücke (insbesondere des dort verwendeten Oberbaus) betrachtet werden sowie natürlich Besonderheiten der Brücke selbst wie die verwendete Fang- und Führungsvorrichtung sowie die verwendeten Schwellen auf der Brücke. Gerade bei den bereits verwendeten Schwellen auf der Brücke sind die Maße dieser Schwellen und das Schienenbefestigungssystem, das es auszutauschen gilt, entscheidend. So müssen bei der Befestigung von neuen hochelastischen Schienenbefestigungen bestimmte Abstände zum Rand der Schwelle sowie zu den alten Bohrlöchern eingehalten werden. Dies zeigt, dass ein bestehendes hochelastisches Schienenbefestigungssystem, das im Rahmen des Projektes LZarG entwickelt werden soll, dann ggf. für jede Brücke separat in Details angepasst werden müsste. Plant man dagegen einen Brückenneubau mit dem im Projekt entwickelten Schienenbefestigungssystem, entfallen natürlich diese Randbedingungen.

Daher wurde im Teilpaket B3 das hochelastische Schienenbefestigungssystem im Hinblick auf eine spezielle erste Verwendung auf der Braunauer Brücke entwickelt. Daher musste vor der weiteren Entwicklung zuerst geprüft werden, ob die Braunauer Brücke aufgrund Ihrer Konstruktion aus Sicht des Oberbaus geeignet ist für die nachträgliche Montage von hochelastischen Schienenbefestigungen. Denn schließlich bedeutet die Verwendung derartiger Schienenbefestigungssysteme mit geringer Steifigkeit auch eine möglicherweise grenzwertige Belastung von Schiene und Oberbau, wie die folgende Abbildung 2.47 zeigen soll: Befährt ein Zug die mit hochelastischen Schienenbefestigungen versehene Brücke (hier im Modell die relativ lange Braunauer Brücke), so bewirkt die Belastung einerseits eine Durchbiegung der Brücke selbst. Andererseits werden die weichen Lagerungen (dunkelblau dargestellt) ebenfalls komprimiert. Dies führt – schematisch – zu

der in Abbildung 2.47 gezeigten Durchbiegung der Schiene: die Lastabtragung der Schiene führt zu einer Biegelinie, die durch eine Einsenkung und eine vor- und nachlaufende Abhebewelle (rot umkreister Bereich in der Abbildung 2.47) gekennzeichnet ist. Ein weiterer Aspekt bei Brücken ist, dass an den Brückenköpfen (Anfang und Ende einer Brücke) durch die Brückendurchbiegung Auflagerverdrehungen entstehen (diese Brückendurchbiegung ist in Abbildung 2.47 durch einen leicht durchgebogenen roten Brückenbalken veranschaulicht). Wenn der Stützpunkt hinter dem Auflager (zum Brückenende hin) liegt, führen diese Auflagerverdrehungen zu sehr viel größeren Abhebungen der Schiene (aufgrund der geometrischen Verformung), verbunden mit sehr hohen Abhebekräften. Der kritische Bereich hinsichtlich der Abhebekräfte liegt also bei den Lagern hinter der Brücke (violetter Pfeil in Abbildung 2.47).

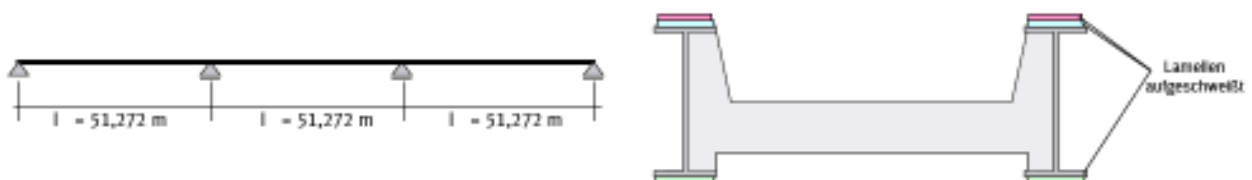


**Abb. 2.47:** Bei einer Zugüberfahrt treten dynamische Kräfte und Verschiebungen in Gleis, Oberbau und Schienenbefestigung auf, die berücksichtigt werden müssen.

### 2.3.3.1. Schienenfußspannungen bei Einsatz höher elastischer Schienenstützpunkte

Die prinzipielle Tauglichkeit der Braunauer Brücke zum Einsatz von hochelastischen Schienenbefestigungen wurde von der zuständigen Fachabteilung der DB Systemtechnik geprüft. Dazu wurde die Schienenfußspannung dieser zum Einbau vorgesehenen Braunauer Brücke unter Berücksichtigung der dynamischen Einflüsse bei einer Zugüberfahrt untersucht. Die Konstruktion dieser Brücke stellte sich dar wie folgt:

Das statische System der Brücke ist ein Durchlaufträger mit drei gleichen Stützweiten von ca. 51,3 m. Die Brücke ist für jede Richtung getrennt, die Haupttragelemente in Längsrichtung sind jeweils durch zwei Doppel-T-Träger realisiert. Die Doppel-T-Träger werden entsprechend ihrer Beanspruchung mit aufgeschweißten Lamellen stufenweise an den Gurten verstärkt (Abbildung 2.48).

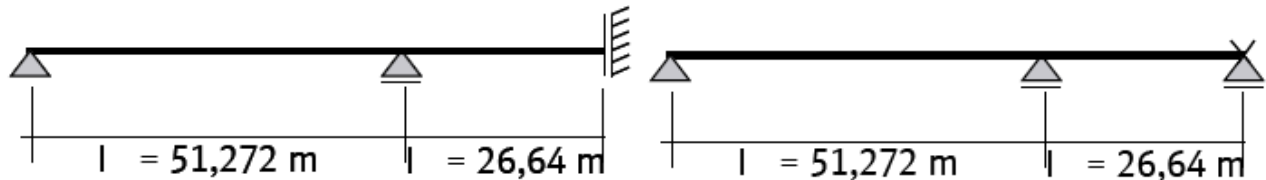


**Abb. 2.48:** Statisches System (links) und Brückenquerschnitt (rechts) der Braunauer Brücke in München

Die Berechnung der Schienenfußspannung erfolgte in mehreren Teilschritten: zuerst wurden die Systemsteifigkeit der Brücke mit dem Programmsystem ANSYS berechnet, anschließend wurden diese berechneten Steifigkeiten an das Programmsystem SiRaGe übergeben und so die Berech-

nung der dynamischen Rad-Schiene-Kräfte durchgeführt. Diese Resultate wurden wiederum in ANSYS implementiert und so im Programmsystem ANSYS die Schienenfußspannung berechnet.

Für den ersten Schritt zur Untersuchung der Systemsteifigkeiten wurde die Brücke bis zur Symmetrieachse in der Mitte der Brücke modelliert. Die Auflagerbedingungen ergeben sich dann je nach Lastfall für symmetrische Lastanteile als in vertikaler Richtung verschiebbare Einspannung und für antimetrische Lastanteile als in vertikale Richtung fixierte Gabellagerung (Abb. 2.49).



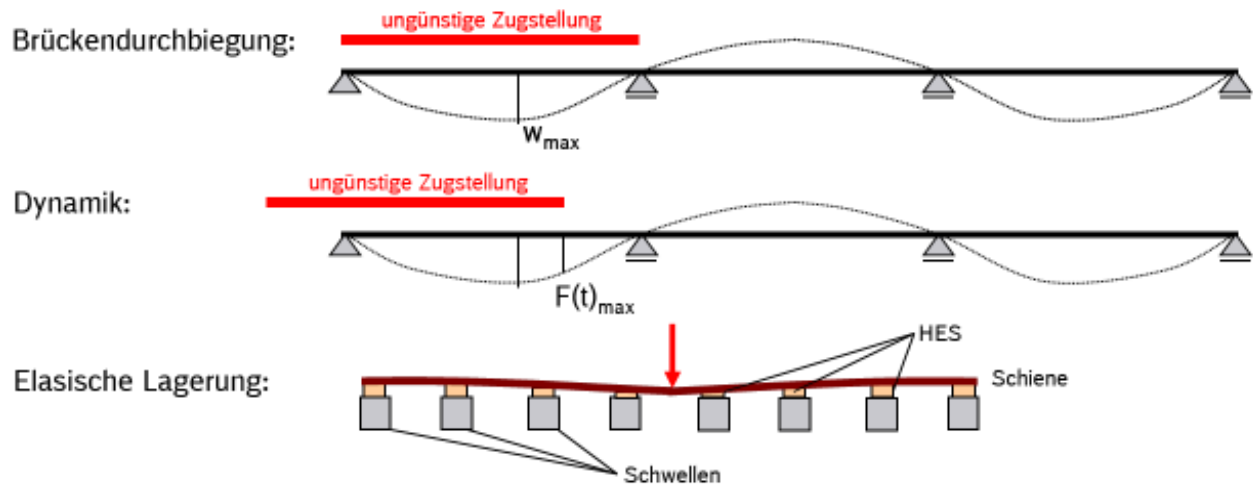
**Abb. 2.49:** Auflagerbedingungen für symmetrische (links) und asymmetrische (rechts) Lastanteile.

Die Berechnung der Fahrzeug-Fahrweg-Dynamik erfolgte im Zeitbereich mit dem Simulationstool SiRaGe. Das Modell bestand aus einem Teilmodell für das Fahrzeug und einem Teilmodell für den Fahrweg einschließlich Brücke. Beide Modelle waren über eine nichtlineare Kontaktmechanik gekoppelt. Die Anregung erfolgte zum einen durch den Fahrweg mit seinen unterschiedlichen Steifigkeiten und zum anderen durch Gleislagefehler und Fehler der Radsätze, wie z.B. unrunde Räder. Das Fahrwegmodell erfasste den Oberbau, die Brücke und das Erdplanum. Die Schienenauszüge wurden in der Simulation nicht berücksichtigt. Im Gegensatz zum komplexen FE-Modell in ANSYS wurde die Brücke in diesem Modell mit schubweichen Balken beschrieben. Gemäß der vorliegenden Brücke wurden unterschiedliche Biegesteifigkeiten in Feldmitte und über den Lagern berücksichtigt. Die Verifizierung des vereinfachten Brückenmodells erfolgte anhand der untersten Eigenfrequenzen, die mit max. 10 % Abweichung mit denen mit ANSYS berechneten Eigenfrequenzen übereinstimmen mussten. Das Fahrwegmodell erfasste neben der Brücke und dem angrenzenden Erdplanum die Schiene als schubweichen Balken, die Zwischenlagen als Feder und Dämpfer, die diskreten Schwellen als starre Körper mit eigenen Freiheitsgraden und auf dem Erdplanum den Schotter mit seinen dynamischen Eigenschaften und Masse.

Ziel der Untersuchung war die Berechnung der maximalen Schienenfußspannung unter Berücksichtigung der dynamischen Effekte bei Zugüberfahrt. Hierbei kam der Frage nach der ungünstigsten Laststellung besondere Bedeutung zu.

Einen Einfluss auf die Schienenfußspannung durch die Änderung der Steifigkeit der Stützpunkte hatten der Endtangentialdrehwinkel, die Brückendurchbiegung, die Dynamik und die lokale Laststellung. Für die Brückendurchbiegung ergab sich ein Maximalwert bei Belastung des ersten Felds der Brücke. Die maximale dynamische Kraft ergab sich nach Durchfahrt der maximalen Durchbiegung am Punkt mit der maximalen Steigung im Durchbiegungsverlauf (Abbildung 2.50). Die ungünstigste Laststellung für die lokale Lagerung ergibt sich zwischen zwei Schienenstützpunkten.

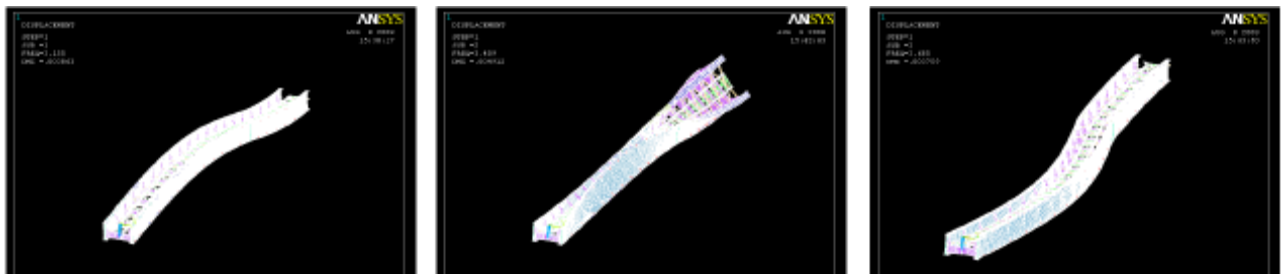




**Abb. 2.50:** Beeinflussung der Schienenfußspannung durch die Laststellung

Als Fahrzeuge für die Simulation der Zugüberfahrt wurden ein ICE-Triebkopf und ICE-Mittelwagen verwendet. Die Anregung bestand aus einer Kombination von verschiedenen typischen unrunder Rädern, die als Messung von realen unrunder Rädern vorlagen, sowie eines synthetischen Gleislagefehlers, der ein weites Wellenlängenspektrum abdeckt.

Die Berechnung der Eigenfrequenzen der Brücke mit ANSYS ergab drei wesentliche Unterschiede für die Schwingungsformen: es traten Schwingungsformen in vertikaler Richtung, Torsionsformen und Formen in horizontaler Richtung auf (Abb. 2.51). Der Bereich der ersten fünf Frequenzen reichte von ca. 3 Hz bis ca. 5 Hz für das symmetrische Modell und für das antimetrische Modell zwischen ca. 4 Hz und 9 Hz. Hieraus ergaben sich die Ersatzquerschnitte für das Programmsystem SiRaGe mit  $I_{y_{\text{Feld}}} = 0.453 \text{ m}^4$  im Brückenfeld und  $I_{y_{\text{Stütz}}} = 0.314 \text{ m}^4$  im Bereich der Lager.



**Abb. 2.51:** Beispiele für berechnete Eigenfrequenzen der Braunaauer Brücke

Zur Abstimmung der Programmsysteme wurden die Modelle durch das Lastbild eines ICE-Triebkopfes beansprucht und die Durchbiegungen verglichen. Der Vergleich ergab eine sehr gute Übereinstimmung der beiden Modelle und verifizierte dadurch den Ersatzquerschnitt für das Programmsystem SiRaGe. Mit den Steifigkeitswerten aus ANSYS für die Brücke konnten die dynamischen Kraftwirkungen auf die Schiene mit dem Programmsystem SiRaGe berechnet werden. Die maximalen dynamischen Kräfte ergaben dabei 133 kN pro Rad bei einer Geschwindigkeit von 160 km/h. Maximale dynamische Überhöhungen traten im Bereich der Oberbauresonanz zwischen 30 Hz und 48 Hz auf. Die errechneten maximalen Schieneneinsenkungen betragen ca. 3 mm. Die Analyse der Schienenfußspannungen mit diesen Lasten in ANSYS ergaben maximale Schienenfußspannungen von  $100 \text{ N/mm}^2$ . Bei einer zulässigen Schienenfußspannung von bis zu  $200 \text{ N/mm}^2$  (dieser Wert hängt von der Unterspannung der Schiene ab und kann z. B. bei einer angenommenen Eigenspannung der Schiene von  $80 \text{ N/mm}^2$  und einer Temperaturdifferenz von 40 K mit  $180 \text{ N/mm}^2$  auch niedriger sein) wird die diesbezügliche theoretische Sicherheit von 1,4 eingehalten.

### 2.3.3.2. Entwicklungsbegleitung der hochelastischen Schienenbefestigung

Die Entwicklung und Konstruktion der hochelastischen Schienenbefestigung seitens der Fa. Vossloh Fastening Systems wurde von der zuständigen Fachabteilung TTZ 116 der DB Systemtechnik begleitet. Hierbei wurde auch zusammen mit der Fa. Vossloh Fastening Systems eine Sicherheitsanalyse und Risikoabschätzung des zu entwickelnden Bauteils durchgeführt, die seitens der Fa. Vossloh in die Konstruktion des Bauteils einfließen und teils auch aufwändige Änderungen erforderlich machten. Die konstruktionsbegleitende „Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse“ (engl. „**F**ailure **M**ode and **E**ffects **A**nalysis = FMEA-Analyse) wurde entsprechend der VDA 96 in fünf Schritten durchgeführt, wie in Abbildung 2.52 dargestellt. Aufgrund der schwierigen Thematik und der zahlreichen erforderlichen Abstimmungen dauerte diese FMEA-Analyse ca. ein Jahr.

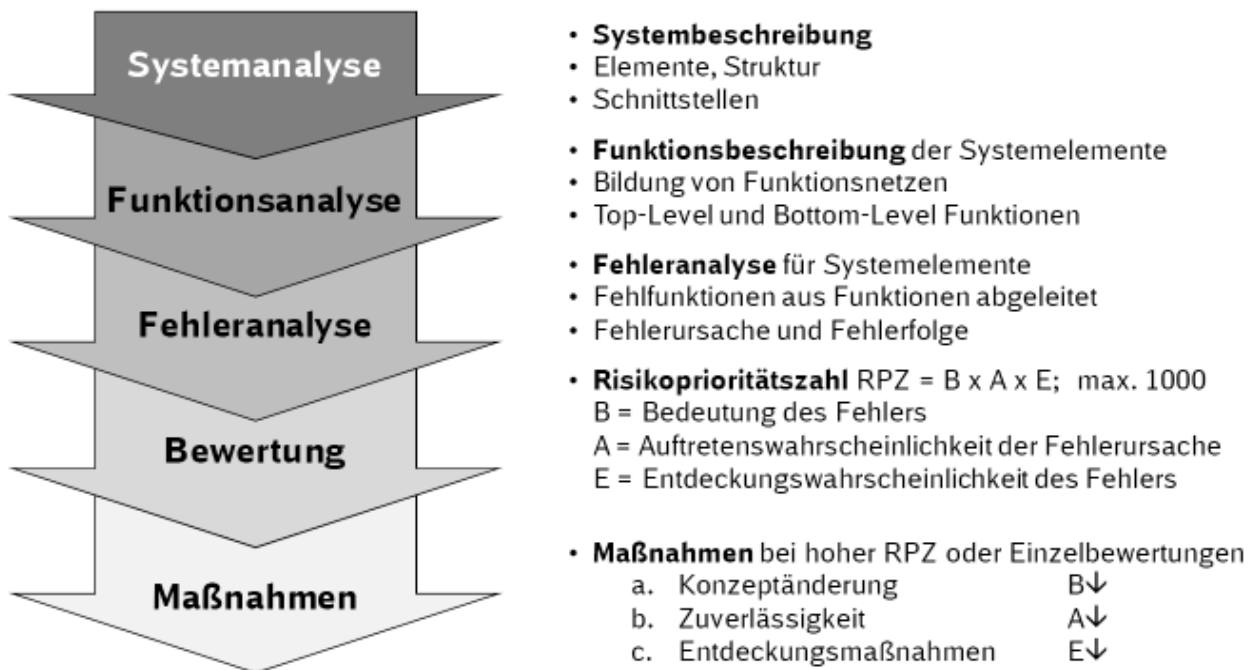


Abb. 2.52: Die fünf Schritte einer FMEA-Analyse

In der **Systemanalyse** wurde die Schienenbefestigung in ihre Teilsysteme und Komponenten zerlegt und eine Systemstruktur erstellt. Durch die Beschränkung auf die wesentlichen Bauteile und Komponenten sollte der Untersuchungsumfang sinnvoll eingegrenzt werden.

In der **Funktionsanalyse** wurde die jeweilige bestimmte Aufgabe eines jeden Teilsystems bestimmt, so dass der Stützpunkt seine Aufgaben erfüllen kann. Diese Aufgaben werden in diesem Schritt als Funktionen beschreiben.

Bei der **Fehleranalyse** werden Fehlfunktionen aufgrund von Fehlerereignissen beschrieben, die sich ergeben, wenn ein Teilsystem oder eine Komponente seine Aufgaben nicht erfüllt. Die Fehlfunktionen der verschiedenen Bestandteile der Schienenbefestigung stehen in einem Ursache-Wirkungs-Zusammenhang, die in einem Fehlernetz festgelegt wurden.

Bei der **Bewertung** erfolgt eine Risikoabschätzung: das Risiko, das jede Fehlerursache repräsentiert, hängt von drei Faktoren ab:

- wie oft tritt die Fehlerursache trotz der Einsetzen geeigneter Vermeidungsmaßnahmen auf?
- wie hoch ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Fehlerursache durch das Einsetzen von geeigneten Entdeckungsmaßnahmen entdeckt wird?
- wie schwer ist die Folge ist, zu der die Fehlerursache über den Fehler führen wird?

Wenn das Risiko, das eine Fehlerursache repräsentiert, sich als zu hoch erweist, werden neue verbesserte **Maßnahmen** definiert, um dieses Risiko zu reduzieren oder zu vermeiden.

Im Anschluss an die FMEA wurde eine fokussierte Fehlerbaumanalyse zur Quantifizierung des Risikos durchgeführt. Während die FMEA lediglich den einzelnen Stützpunkt sieht und somit beim Ausfall des Stützpunktes eine sehr hohe Risikoprioritätszahl liefert, können mit einer Fehlerbaumanalyse das Zusammenwirken von mehreren Stützpunkten erfasst und hinsichtlich des Risikos für das Gesamtsystem abgeschätzt werden. Durch logische Verknüpfungen von Fehlern bzw. Systemkomponenten mit *UND* oder *ODER* können realitätsnahe Risikobewertungen durchgeführt werden. So führt z.B. der Ausfall eines einzelnen Stützpunktes noch nicht zum Ausfall der Fahrbahn, sondern erst der Ausfall mehrerer aufeinander folgender Stützpunkte zu einem Gesamtsystemausfall. Diese Tatsache wird durch die logische *UND*-Verknüpfung beschrieben. Dadurch sinkt das Risiko für den Ausfall der Fahrbahn deutlich. Wenn jedoch ein Fehler A oder ein Fehler B zum Ausfall der Fahrbahn führen können, werden die Fehler mit einem logischen *ODER* verknüpft und es ergibt sich ein höheres Ausfallrisiko.

Bei diesen konstruktionsbegleitenden Analysen wurden u.a. folgende Aspekte betrachtet und bei der Konstruktion der hochelastischen Schienenbefestigung seitens der Fa. Vossloh berücksichtigt:

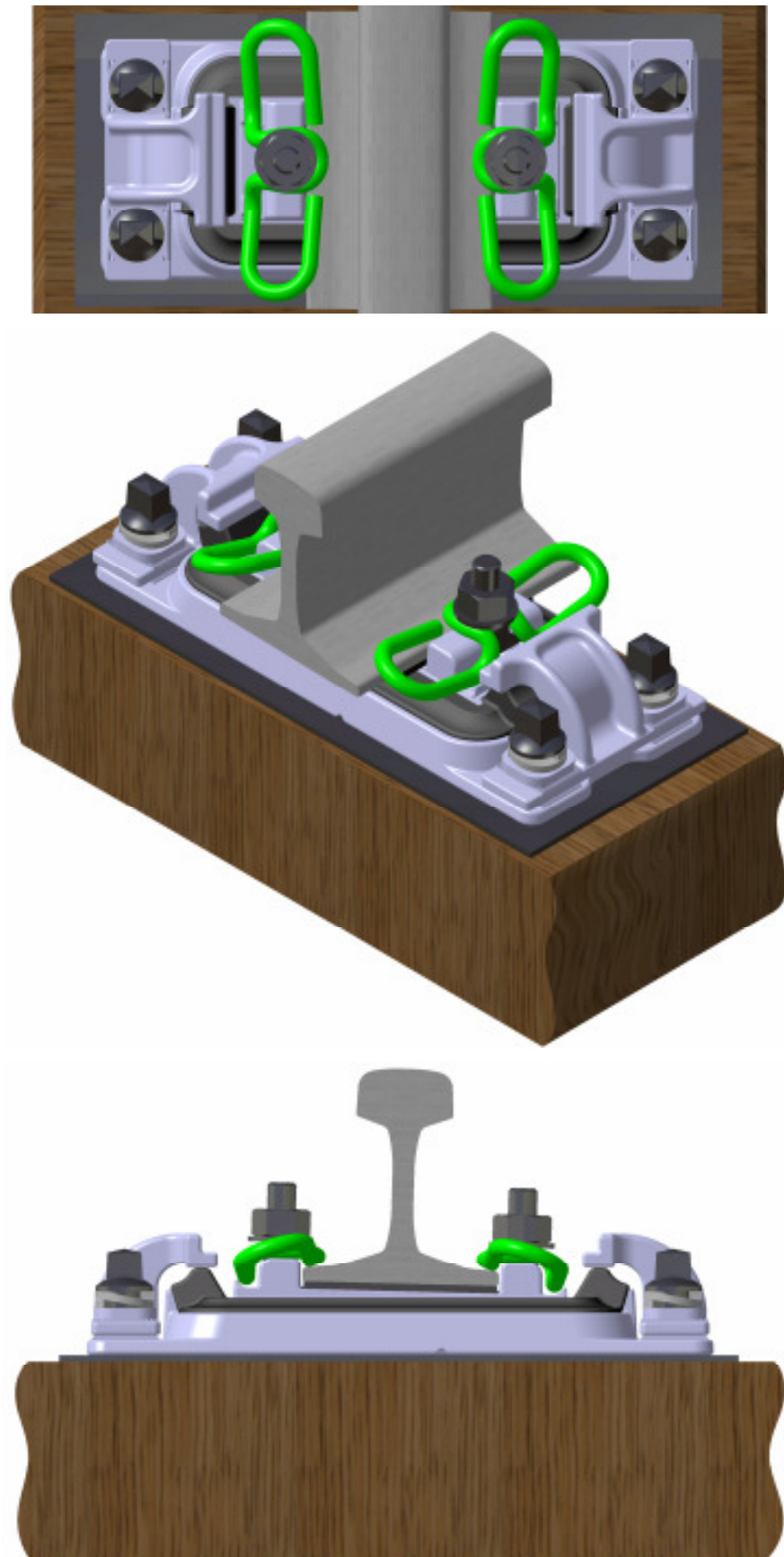
- Eindringen von Wasser in die Bodenplatte
- Ablösen der Rippenplatte vom Elastomer
- Lösen des Abhebeschutzes
- Lockern der Schwellenschraube
- Hohe lokale Pressungen auf Holzschwelle
- Rissbildung in Elastomer
- Steifigkeitsreduktion durch Alterung / Betrieb
- Versteifung des Elastomers, dynamisch, Alterung oder Temperatur
- Verlust der Vorspannkraft

Abschließend ergab die Untersuchung, dass die funktionalen Lastenheftvorgaben erfüllt werden. Aufgrund der vorliegenden Ausfallraten konnte dem Stützpunkt ein sicherer Betrieb bescheinigt werden, so dass einer Erprobung nichts im Wege stand. Selbst im ungünstigsten Fall kann das Versagen dreier aufeinander folgender Stützpunkte, das zum Entgleisen des Zuges führen kann, zwischen zwei Inspektionen sicher erkannt werden.

Es wurde empfohlen, zusätzlich zu den Standardinspektionen spezielle Inspektionsvorgaben für diesen Stützpunkt zumachen. Dieses betrifft u.a.

- Visuelle Kontrolle des Zustand des Elastomers,
- Visuelle Kontrolle der Verbindung zwischen Elastomer und Boden- und Rippenplatte,
- Kontrolle der Spaltbreite zwischen Abhebeschutz und Rippenplatte mit einer Lehre,
- Visuelle Kontrolle des Verspannungszustand, ggf. mit einem Drehmomentschlüssel
- Visuelle Kontrolle der Entwässerungsbohrung, ggf. Kontrolle mit einem Dorn.

So konnte die Fa. Vossloh eine hochelastische Schienenbefestigung entwickeln, der die Konstruktionsfreigabe seitens der Deutschen Bahn hatte (Abb. 2.53). Dieser Stützpunkt erhielt in Anlehnung an den Projektnamen die Bezeichnung „LIZARG“.



**Abb. 2.53:** Die hochelastische Schienenbefestigung „LIZARG“ der Fa. Vossloh erhielt die Konstruktionsfreigabe der Deutschen Bahn; dies ermöglichte den potenziellen Einbau im Streckennetz zur Betriebserprobung.

### 2.3.3.3. Planungen zur Betriebserprobung

Nach der Konstruktionsfreigabe war die technische Entwicklung des Prototypen „LIZARG“ zunächst abgeschlossen und die weiteren Schritte zur Betriebserprobung rückten in den Fokus. Seitens der Fa. Vossloh mussten nun Werkzeuge zur Herstellung einiger Prototypen erstellt werden. Die anschließend hergestellten Prototypen sollten dann zunächst im Entwicklungslabor der Fa. Vossloh technisch überprüft werden, anschließend sollte eine „neutrale“ Überprüfung nach Euro-norm in den Laboren der Technischen Universität München erfolgen, um so eine EBA-Zulassung zu bewirken. Parallel zu diesen Arbeiten bei der Fa. Vossloh und der TU München standen seitens der Deutschen Bahn die Planungen zum Einbau des LIZARG auf einer Testbrücke im Fokus. Die Besichtigung und projektseitige Bewertung der Braunauer Brücke erfolgte am 29.04.2008, der Einbau zur Betriebserprobung auf der Braunauer Brücke war zum damaligen Zeitpunkt fest eingeplant.

Im Laufe des Jahres 2009 stellte sich heraus, dass der geplante Umbau der Braunauer Brücke aus betrieblichen Gründen frühestens im Jahr 2011, ggf. auch erst später, erfolgen kann. Da die Projektlaufzeit des Projektes LZarG nach den im Jahr 2009 aktuellen Planungen im Jahr 2010 endete, muss somit eine andere Brücke für den geplanten Einbau der hochelastischen Schienenbefestigung „LIZARG“ gesucht werden. Somit wurden alle direkt befahrene Brücken also Option betrachtet, bei denen im Rahmen der Lärmsanierung oder anderen betrieblichen Gründen im Verlauf des Jahres 2010 ein Umbau geplant war, der den Einbau einer hochelastischen Schienenbefestigung ermöglicht hätte. Natürlich mussten neben der reinen Tatsache des geplanten Umbaus auch weitere Randbedingungen erfüllt sein wie u. a. die Messbarkeit der Wirksamkeit dieser Maßnahme.

Aus technischer Sicht hätte sich so z. B. eine eingleisige Brücke bei Schwindegg geeignet (Abb. 2.54). Hier handelt sich um zwei Überbauten mit einer Stützweite von jeweils 15,4 m. Die Überbauten dieser Brücke sind Trägerkonstruktionen aus Stahl mit offener Fahrbahn, auf der Holzschwellen und Fangschienen liegen. Die maximale Streckengeschwindigkeit im Bereich dieser Brücke beträgt 160 km/h. Auf dieser Brücke war im Jahr 2011 der Austausch der Brückenbalken geplant. Bei näherer Betrachtung der Randbedingungen (Umfang der geplanten Umbauten und der bereits getroffenen Vorbereitungen, zeitlich bereits festgelegten Umbauterminen, ...) musste diese Brücke für den Einbau der Schienenbefestigung LIZARG verworfen werden.



**Abb. 2.54:** Die Brücke bei Schwindegg wurde als mögliche Testbrücke für den Einbau der hochelastischen Schienenbefestigung LIZARG in Erwägung gezogen, musste dann jedoch verworfen werden.

Als weitere Brücke war eine direkt befahrene Brücke bei Winterhausen (Abb. 2.55) im Rahmen der Lärmsanierung für einen Umbau vorgesehen. Auch diese Brücke wurde 03.12.2008 begangen, bewertet und anschließend als mögliche Brücke für den Einbau der hochelastischen Schienenbefestigung vorgeschlagen. Diese Brücke hätte – im Gegensatz zu der Brücke bei Schwindingg – auch sehr gut in den terminlichen Rahmen des Projektes LZarG gepasst, da deren Umbau im Jahr 2010 vorgesehen war. Doch im Rahmen der Lärmsanierung wurde eine feste Fahrbahnplatte mit eingebetteten Schienen als Maßnahme vorgesehen.



Fotos: DB Systemtechnik, W. Behr

**Abb. 2.55:** Die Brücke bei Winterhausen wurde für den Einbau von hochelastischen Schienenbefestigungen vorgesehen, doch im Rahmen der Lärmsanierung fiel die Entscheidung von DB Netz für eine andere Maßnahme.

Die Suche nach einer anderen Brücke, bei der im Rahmen von regulären Instandhaltungsarbeiten der Einbau von hochelastischen Schienenbefestigungen möglich wäre, wurde fortgesetzt. Bei einer Brücke in der Nähe von Neustadt an der Aisch waren im Juni 2010 umfangreiche Instandhaltungsarbeiten inkl. Austausch der Brückenbalken vorgesehen – ein idealer Zeitpunkt aus Sicht des Projektes LZarG (Abb. 2.56). Diese Brücke befand sich außerdem fernab jeglicher Wohnbebauung und lieferte so ideale akustische Messbedingungen für die Vor- und Effektmessung zur Bestimmung der akustischen Wirksamkeit der hochelastischen Schienenbefestigungen.

Eine Besichtigung des bestehenden Oberbaus der Brücke bei Neustadt a. d. Aisch am 05.08.2009 offenbarte jedoch eine veraltete Fang- und Führungsvorrichtung. Eine zwischenzeitliche Überarbeitung der DB-Richtlinie 820.2040 regelte die Anforderungen an diese Führungsvorrichtungen neu: bei Neu- und Umbauten muss eine Führungsvorrichtung eine horizontale Seitenkraft von 100 kN und eine vertikale nach oben gerichtete Kraft von 25 kN halten. Eine derartige Führungsvorrichtung gab es jedoch im Jahr 2009 für Holzbalken noch nicht! Eine hochelastische Schienenbefestigung müsste also nun aufgrund dieser neuen Anforderungen der DB-Richtlinie 820.2040 inklusive einer integrierten Führungsschiene konstruiert werden. Dies war bei der Konstruktion des Schienenstützpunktes LZARZ nicht vorgesehen und in der verbleibenden Projektlaufzeit unmöglich.



Fotos: DB Systemtechnik, W. Behr

**Abb. 2.56:** Eine Brücke bei Neustadt a. d. Aisch sollte im Projektzeitraum umgebaut werden und war für den Einbau der hochelastischen Schienenbefestigung vorgesehen. Aufgrund der alten Führungsvorrichtungen konnten die Planungen jedoch nicht umgesetzt werden.

Somit konzentrierte sich die Suche nach einer weiteren Testbrücke nun auf ein Bauwerk, das kürzer als 15 m ist. Denn bei Brücken mit einer Länge von weniger als 15 m sind keine Fang- und Führungsvorrichtungen erforderlich. So konnte am 26.10.2009 eine zweigleisige Brücke bei Bernau besichtigt werden, bei der die Umbauten bereits begonnen hatten (Abb. 2.57a). Auch eine akustische Messung wäre an dieser Brücke gut möglich gewesen aufgrund einer parallel verlaufenden Straßenbrücke (siehe Abb. 2.57c, linkes Foto).



Foto: DB Systemtechnik, W. Behr

**Abb. 2.57a:** Die Brücke bei Bernau war kürzer als 15 m und hatte daher keine Führungsvorrichtung.

Ein Blick auf die Brücke bei Bernau von unten zeigt die offene Fahrbahnkonstruktion und die abstrahlenden Flächen der Brückenkonstruktion (Abb. 2.57b). Abbildung 2.57c zeigt den bereits erfolgten Beginn der Bauarbeiten: beim linken Gleis wurden bereits die Holzschwellen vor und nach der Brücke durch Betonschwellen ersetzt. Bei einem Einbau der hochelastischen Schienenbefestigung wäre keine Führungsvorrichtungen zu berücksichtigen gewesen, auch der Übergangsbereich wäre mit besohnten Schwellen planbar gewesen. Aufgrund der fortgeschrittenen Bauarbeiten und den Planungen war hier der kurzfristige Einbau der hochelastischen Schienenbefestigung im Hinblick auf die dann erforderlichen Neuplanungen jedoch nicht mehr durchführbar.



Foto: DB Systemtechnik, W. Behr

**Abb. 2.57b:** Ansicht der Brücke bei Bernau von unten

Fotos: DB Systemtechnik, W. Behr

**Abb. 2.57c:** Blick auf den Oberbau der Brücke bei Bernau



#### **2.3.3.4. Weitere Projektarbeiten hinsichtlich der hochelastischen Schienenbefestigung**

Als sich im Herbst 2008 abzeichnete, dass sich der Zeitpunkt für die geplanten Sanierungsarbeiten an der Braunauer Brücke in München aus betrieblichen Gründen deutlich verzögern wird und somit der Einbau der hochelastischen Schienenbefestigung im Projektzeitraum bis spätestens Mitte 2010 mit anschließender Effektmessung im Herbst 2010 unrealistisch wird, wurde im Jahr 2009 bundesweit nach einer anderen möglichen Brücke zum Einbau der hochelastischen Schienenbefestigung bis spätestens Mitte 2010 gesucht, wie im vorausgegangenen Kapitel 2.3.3.3 dargestellt. Einige dieser Brücken waren für die Erprobung der im Rahmen des Projektes LZarG entwickelten hochelastischen Schienenbefestigung „LIZARG“ nur bedingt geeignet, bei anderen Brücken waren die Vorbereitungen und Planungen für die vorgesehenen Instandhaltungsarbeiten schon derart weit fortgeschritten, dass ein Einbau der hochelastischen Schienenbefestigung nicht mehr derart kurzfristig durchführbar war. Hierbei wurden im Rahmen dieses Teilpakets B3 wichtige Erkenntnisse hinsichtlich der erforderlichen Vorlaufzeit vom Einbau von hochelastischen Schienenbefestigungen auf Brücken gewonnen: sie beträgt mehrere Jahre!

Gründe dafür sind sowohl betrieblicher als auch technischer Art. Zu den betrieblichen Gründen zählt u. a. die Fahrplangestaltung. Auf international befahrenen Strecken (im Fall der Braunauer Brücke in München handelte es sich um die Strecke Richtung Rosenheim und dann im weiteren Verlauf nach Österreich) müssen Bauarbeiten aufgrund der damit verbundenen Streckensperrungen bereits einige Jahre im Voraus geplant und festgelegt werden, um eine rechtzeitige Berücksichtigung bei der Fahrplangestaltung zu gewährleisten. Zu den technischen Gründen zählt u. a. die erforderliche Behandlung von neuen Holzschwellen, die auf der Brücke befestigt werden sollen: sind auf einer direkt befahrenen Brücke Instandhaltungsarbeiten lediglich an den Gleisen geplant, können in der Regel die Holzschwellen belassen werden. Sollen nun jedoch die bestehenden Schienenbefestigungssysteme durch neue zur Erprobung und akustischen Bewertung relevante Schienenbefestigungssysteme ersetzt werden (wie es im Innovationsprojekte LZarG der Fall gewesen wäre), so müssen ggf. die Holzschwellen ausgetauscht werden. Die Dicke dieser Holzschwellen muss ggf. an die Randbedingungen der Brücke angepasst werden, so dass die Holzschwellen nach der Beschaffung ggf. noch bearbeitet und anschließend wieder mit speziellen Verfahren wetterbeständig gemacht werden müssen. Dieser Vorgang kann mehrere Monate erfordern. Natürlich bedeutet der Austausch von Schwellen auf einer direkt befahrenen Brücke ebenfalls längere Umbauzeiten (und somit auch Sperrzeiten) der Brücke als bei ursprünglich geplanten Instandhaltungsarbeiten ohne Schwellentausch. Diese Beispiele zeigen die Schwierigkeit auf, bei bereits seit Jahren geplanten Instandhaltungsarbeiten an einer Brücke kurze Zeit vor diesem Arbeiten den Einbau von hochelastischen Schienenbefestigungssystemen in Abänderungen der bisherigen Planungen zu ermöglichen.

Somit stellte sich zum Jahresende 2009 heraus, dass die hochelastische Schienenbefestigung LIZARG nicht mehr im Rahmen der Projektlaufzeit bis spätestens Mitte 2010 auf einer Brücke eingebaut werden kann, um deren akustische Wirksamkeit im Herbst 2010 messen zu können. Daher verständigte man sich auf folgendes weitere Vorgehen: nach der offiziellen Freigabe der Konstruktion des hochelastischen Schienenstützpunktes LIZARG werden folgende Arbeiten – ggf. auch über den Projektzeitraum und somit ohne finanzielle Förderung – fortgeführt:

- Anfertigung von Werkzeugen zur Erstellung eines Prototypen
- Herstellung von Prototypen
- Laboruntersuchungen im eigenen Labor der Fa. Vossloh
- Laborprüfungen seitens der TU München (Lehrstuhl und Prüfamts für Verkehrswegebau, PA VWB)
- Durchführung der erforderlichen Zulassungsverfahren beim EBA
- Erteilung der Einbau- und Betriebsgenehmigung seitens DB Netz

Im Anschluss sollen dann zusammen mit DB Netz weitere Planungen erfolgen (Auswahl einer „Testbrücke“ bis hin zu detaillierten Bauplanungen wie Festlegung der Streckensperrung bis hin zur Bestellung der neuen erforderlichen Brückenschwellen usw.)

Nach einer umfangreichen und daher nahezu ein Jahr dauernden FMEA-Analyse (siehe Kap. 2.3.3.2) und der anschließenden Freigabe der Konstruktion seitens DB Netz wurden noch im Projektzeitraum Prototypen des Stützpunktes LIZARG hergestellt. Einen dieser Prototypen zeigt Abbildung 2.58. Mit diesem Prototypen können nun die erforderlichen Laborprüfungen begonnen werden.



**Abb. 2.58:** Prototyp der hochelastischen Schienenbefestigung LIZARG der Fa. Vossloh Fastening Systems: Draufsicht (oberes Foto) und Untersicht (unteres Foto).

## 2.4. Entwicklung spezieller Schwellenbesohlungen

Wie bereits im Kapitel 2.3.1 erläutert, können auch besohlte Schwellen die Einleitung von Erschütterungen im Bahnbetrieb beeinflussen und somit den sekundären Luftschall in Gebäuden reduzieren. Aus theoretischer Sicht hätten Schwellensohlen eine umso bessere Wirksamkeit hinsichtlich der Reduktion dieser Erschütterungen, je geringer ihre Steifigkeit ist. Diese Aussage ist jedoch nicht pauschal korrekt, denn auch Dämpfungsverhalten und weitere dynamische Kennwerte von Schwellensohlen spielen eine Rolle. Je weicher jedoch eine Schwellensohle ist, umso größer sind auch die Einsenkungen bei einer Zugüberfahrt über diese Schwellen, was aus Sicht der Gleisdynamik Einschränkungen hinsichtlich der Zuggeschwindigkeit und weiterer Aspekte haben könnte. Daher war neben der Entwicklung und Erprobung einer möglichst weichen Schwellenbesohlung, die zugleich aus betrieblicher Sicht vertretbar war, auch die Entwicklung von besonderen Lastverteilschichten ein Entwicklungsthema im Rahmen dieses Teilpaketes B3. Es bestand zu Beginn des Projektes LZarG die Überlegung, ob mit einer Schwellenbesohlung mittlerer Steifigkeit zusammen mit einer besonderen weiteren Beschichtung der Schwellensohle vergleichbare Effekte hinsichtlich der Erschütterungsreduktion erreicht werden könnten wie mit einer Schwellenbesohlung geringer Steifigkeit.

Die Entwicklung dieser verschiedenen Schwellensohlen erfolgte seitens der Fa. Getzner in enger Zusammenarbeit mit der TU München (Lehrstuhl und Prüfamf für Verkehrswegebau, PA VWB). Die Abbildung 2.59 kann hier nur einen exemplarischen Eindruck verschaffen und zeigt unterschiedliche Belastungsversuche bei der TU München. Die Aufgabe der Deutschen Bahn bestand hier – ähnlich wie im Falle der Entwicklungsbegleitung der hochelastischen Schienenbefestigung (siehe Kapitel 2.3) – bei der Suche einer geeigneten Teststrecke zum Einbau der besohnten Schwellen mit allen aus betrieblicher Sicht erforderlicher Vorbereitungen auch im Anbetracht von bestehenden Sicherheitsaspekten sowie der Durchführung der akustischen Validierungsmessungen.



**Abb. 2.59:** Laborversuche in der TU München an einer besohnten Schwelle (linkes) bzw. an einem Teilstück einer Schwellenbesohlung (rechts).

### 2.4.1. Suche einer geeigneten Teststrecke

Sowohl aus Kosten- als vor allem auch aus betrieblichen Gründen kamen nur Strecken in Frage, bei denen im Rahmen von Instandhaltungsarbeiten ein Umbau vorgesehen war. Nur unter diesen Umständen mussten aus dem Projektbudget lediglich die (Mehr-)Kosten für die besohlenen Schwellen aufgebracht werden, die um ein vielfaches höhere Kosten für Streckensperrung, Gleisinstandhaltung etc. wurden im Rahmen der sowieso eingeplanten Umbaukosten getragen. Somit konnte jedoch – ähnlich wie im Fall der Braunauer Brücke, die für den Einbau der hochelastischen Schienenbefestigung vorgesehen war – der Zeitpunkt des Gleisumbaus sowie der Zeitablauf nicht oder nur unwesentlich vom Projekt LZarG beeinflusst werden.

Eine Teststrecke muss insbesondere folgende Anforderungen haben:

- Gerade Strecke
- Keine Beschleunigungen der Züge
- Keine / geringe Dammlage
- Befahren von allen Zugattungen
- Körperschallmessung möglich (topographisch!)
- Zufahrtmöglichkeit für Kfz der akustischen Messgruppe
- homogene Bodeneigenschaften
- Sicherheitsanforderungen beachten

Da auch der Einbau von weichen Schwellenbesohlungen geplant war, durfte die Teststrecke nur eine Streckenhöchstgeschwindigkeit von maximal 160 km/h haben. Dies machte die Suche nicht gerade einfach, da viele der betrieblich geplanten Streckenumbauten das Ziel hatten, die Streckenhöchstgeschwindigkeit auf 200 km/h zu erhöhen.

Auf der Strecke Hamburg – Berlin (Abb. 2.60) waren im Frühjahr 2009 umfangreiche Baumaßnahmen geplant, insbesondere sollten viele Schwellen erneuert werden. Daher wurde untersucht, ob auf dieser Strecke ein Testabschnitt mit besohlenen Schwellen möglich wäre. Allerdings wird der größte Teil der Strecke mit einer Geschwindigkeit von 230 km/h befahren. Auch war der Zeitpunkt dieser Baumaßnahmen noch zu früh im Rahmen der geplanten Projektstätigkeit und konnte nicht beeinflusst werden. Daher konnte diese Strecke nicht als Testabschnitt verwendet werden.



**Abb. 2.60:** Die Baumaßnahmen an der Strecke Hamburg – Berlin erfolgten vor Abschluss der Entwicklung der Schwellenbesohlungen, so dass diese Strecke nicht als Testabschnitt verwendet werden konnte.

Für einen späteren Zeitpunkt waren an der Strecke 6087 bei Berlin Instandhaltungsarbeiten geplant. Bei dieser Strecke handelte es sich um einen geraden Abschnitt auf einem ca. 1 m hohen Damm ohne erkennbare Störquellen im Umfeld des Gleises (Abb. 2.61). Allerdings war dieser Gleisabschnitt kaum für Kfz zugänglich, so dass er für eine Effekt-Messung nach einem Einbau von besohnten Schwellen nicht geeignet war.



**Abb. 2.61:** Die Strecke 6087 bei Berlin war nicht für die Fahrzeuge der akustischen Messgruppe zugänglich, so dass diese Strecke nicht als Testabschnitt verwendet werden konnte.

Ebenfalls in der Nähe von Berlin sollten an der Strecke 6067 Umbauarbeiten erfolgen, in dessen Rahmen der Einbau von besohnten Schwellen möglich gewesen wäre. Diese Strecke wäre recht gut zugänglich für Fahrzeuge gewesen, so dass eine akustische Messung durchführbar gewesen wäre. Allerdings handelte es sich um mehrere parallel verlaufende Gleise einer stark befahrenen Strecke, so dass bei einer Messung viele Zugbegegnungen zu erwarten gewesen wären (Abb. 2.62). Dies bedeutet eine wesentliche Störung bei akustischen Messungen. Auch waren im Umfeld stark befahrene Straßen (an einer Stelle sogar der Parkplatz eines Supermarktes mit häufiger Anlieferung durch Lastwagen), die die geplanten Luft- und Körperschallmessungen ebenfalls gestört hätten.



**Abb. 2.62:** Neben der mehrgleisigen Strecke 6067 bei Berlin verliefen auch seitlich teils stark befahrene Straßen, so dass diese Strecke nicht als Testabschnitt verwendet werden konnte.

In der Nähe von Regensburg sollten im Herbst 2010 massive Instandhaltungsarbeiten erfolgen, bei der teilweise das gesamte Gleisbett inkl. der Gleise ausgetauscht werden sollte. Der Termin der geplanten Umbauten war zwar angesichts der geplanten Projektlaufzeit bis zum 30.11.2010 sehr spät, jedoch erfüllte diese Strecke augenscheinlich alle anfangs genannten Anforderungen. Daher wurde dieser Abschnitt als Testabschnitt gewählt und im Weiteren erfolgten alle erforderlichen Abstimmungsarbeiten zwischen der DB Systemtechnik, DB Projektbau, DB Netz und natürlich der Fa. Getzner.



Foto: DB Systemtechnik, W. Behr

**Abb. 2.63:** Der Streckenabschnitt Mangolding – Sünching bei Regensburg erfüllte alle Anforderungen einer Teststrecke (gerade Strecke, geringe Dammlage, Zugänglichkeit bis zum Gleis, keine Störquellen aus Sicht von Akustik und Erschütterungen, ...) und wurde daher zum Einbau der beschlittenen Schwellen ausgewählt.

Folgende Umbautermine waren festgelegt:

- Umbau des Gleises Mangolding → Sünching (Testgleis): 03.08.-19.08.2010
- Umbau des Gleises Sünching → Mangolding: 20.08.-14.09.2010
- Belastungsstopfen: 28./29.11.2010

Der Einbau der beschlittenen Schwellen erfolgte am 07./08.08.2010 (Abb. 2.64) und wurde seitens der DB Systemtechnik begleitet (Abb. 2.65). Hierbei wurde insbesondere geprüft, dass die jeweiligen beschlittenen Schwellen auf dem jeweils korrekten Verladewagen gestapelt waren und am zutreffenden Ort von der Einbaumaschine vom jeweiligen Verladewagen zum korrekten Zeitpunkt in den Einbauvorgang „eingefädelt“ wurden. So konnte der Einbau der jeweils unterschiedlichen beschlittenen Schwellen sowohl in der vorgesehenen Reihenfolge als auch an der korrekten Stelle erfolgen.



Fotos: DB Systemtechnik, W. Behr

**Abb. 2.64:** Der Einbau der beschlittenen Schwellen erfolgte mit einem kilometerlangen Spezial-Einbauzug.



Fotos: DB Systemtechnik, W. Behr



**Abb. 2.65:** Beim Einbau der beschlittenen Schwellen wurde die deren Reihenfolge und Verlegeort überwacht.

Es wurden folgende besohlte Schwellen verlegt:

Bezeichnung der Besohlung	Bettungsmodul	Bemerkung
G02	0,20 N/mm <sup>3</sup>	
G03	0,15 N/mm <sup>3</sup>	Schicht aus Geotextil-Material
G03-L	0,15 N/mm <sup>3</sup>	wie G03, mit zusätzlicher Lastverteilschicht "LVD"
G04	0,10 N/mm <sup>3</sup>	Schicht aus Geotextil-Material

Die unterschiedlich besohnten Schwellen waren entsprechend farblich beschriftet sowie in der Betonschwelle selbst mit einer Gravurschrift versehen (Abb. 2.66):

- mit „G02“ besohlte Schwelle: gelb
- mit „G03“ besohlte Schwelle: blau bzw. violett
- mit „G03L“ besohlte Schwelle: orange
- mit „G04“ besohlte Schwelle: grün



Abb. 2.66: Die besohnten Schwellen waren farblich markiert und mit Gravurschrift versehen.

Abbildung 2.67 zeigt im Überblick den gesamten Testabschnitt mit den verlegten besohnten Schwellen. In dieser Abbildung sind außerdem die Messebenen für geplanten Luft- und Körperschallmessungen eingetragen.

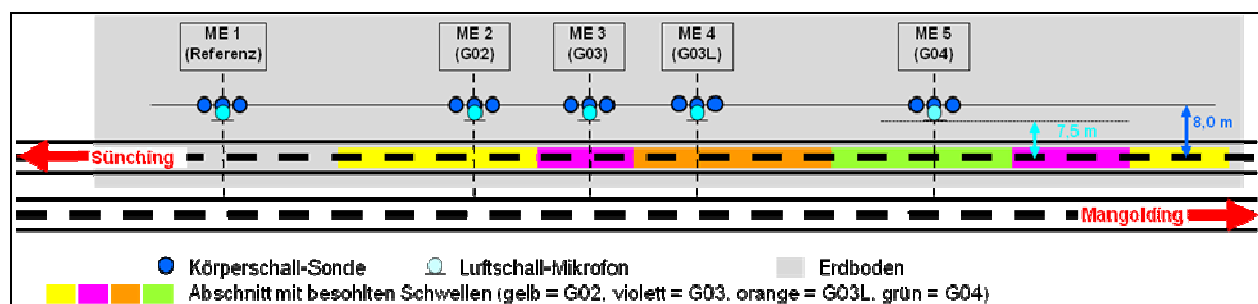


Abb. 2.67: Messabschnitt mit den Messebenen für die Luft- und Körperschallmessungen.



#### 2.4.2. Messung des Querverschiebewiderstands

Nach Inbetriebnahme der Strecke erfolgt aufgrund der Belastung des Schotterbettes durch die Zugfahrten eine Konsolidierung des Schotters. Anschaulich betrachtet werden dabei die einzelnen Schottersteine verdichtet und entsprechend in die Schwellenbesohlungen gepresst. Je nach Belastung kann diese Konsolidierung mehrere Wochen dauern. Während dieser Konsolidierungsphase ändert sich der Querverschiebewiderstand der besohnten Schwellen. Dieser wurde noch vor Inbetriebnahme der Strecke am 18.08.2010 gemessen (während des Umbaus des zweiten Gleises Sünching → Mangolding ab dem 20.08.2010 wurde das bereits umgebaute Gleis Mangolding → Sünching von Regelzügen mit Geschwindigkeiten bis 70 km/h befahren; ab Mitte September wurde die Strecke zweigleisig ohne Einschränkungen befahren), um den Anfangswert zu erhalten. Eine zweite Messung erfolgte ca. 6 Wochen später am 26.09.2010. Die Belastung dieser Strecke seit Inbetriebnahme bis zu der zweiten Querverschiebewiderstands-Messung wurde auf ca. 1.700.000 Lasttonnen geschätzt.

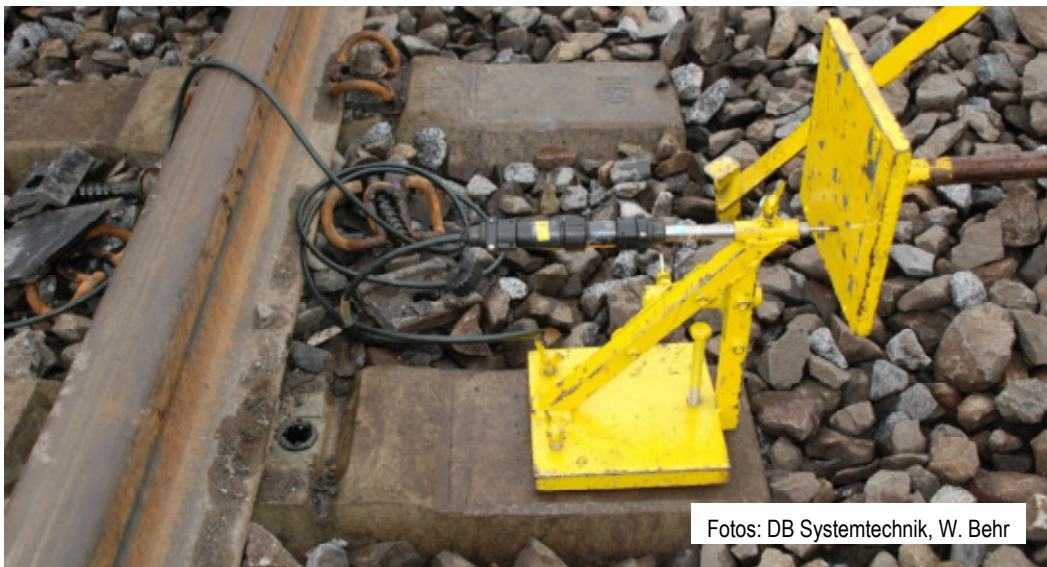
Zur Messung des Querverschiebewiderstands der besohnten (bzw. auch unbesohnten) Schwellen wurden die Schienenbefestigung und die Zwischenlagen der zu messenden Schwellen komplett ausgebaut (in der Regel höchstens jede dritte Schwelle). In Fahrtrichtung rechts wurden außen Winkel montiert. Dann wurde das Gleis wieder kraftschlüssig verspannt (Abb. 2.68).

Die zu messenden Schwellen wurden mittels eines Hydraulikzylinders quer zur Fahrtrichtung um 6 mm verschoben. Der Weg wurde mit einem induktiven Wegaufnehmer, und die aufgewendete Kraft mittels einer Druckdose ermittelt. Die Messsignale sind mit einem MGC-Messverstärker und einem mobilen PC aufgezeichnet worden (Abb. 2.69).



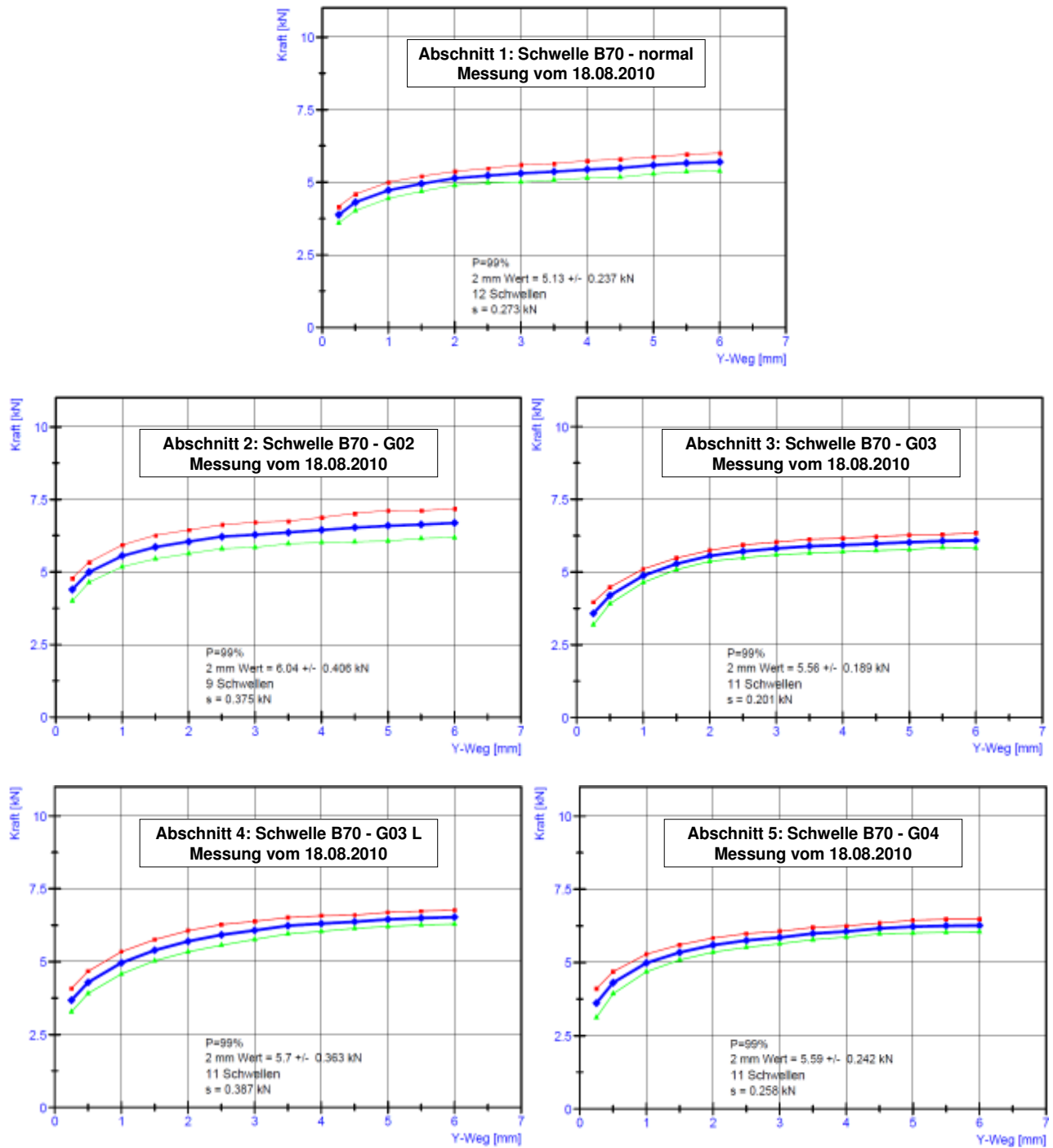
Foto: DB Systemtechnik, W. Behr

**Abb. 2.68:** Bei der Messung des Querverschiebewiderstands von Schwellen im Schotterbett wird jede dritte Schwelle gelockert und die Kraft ermittelt, die zur Verschiebung um einen bestimmten Weg erforderlich ist.

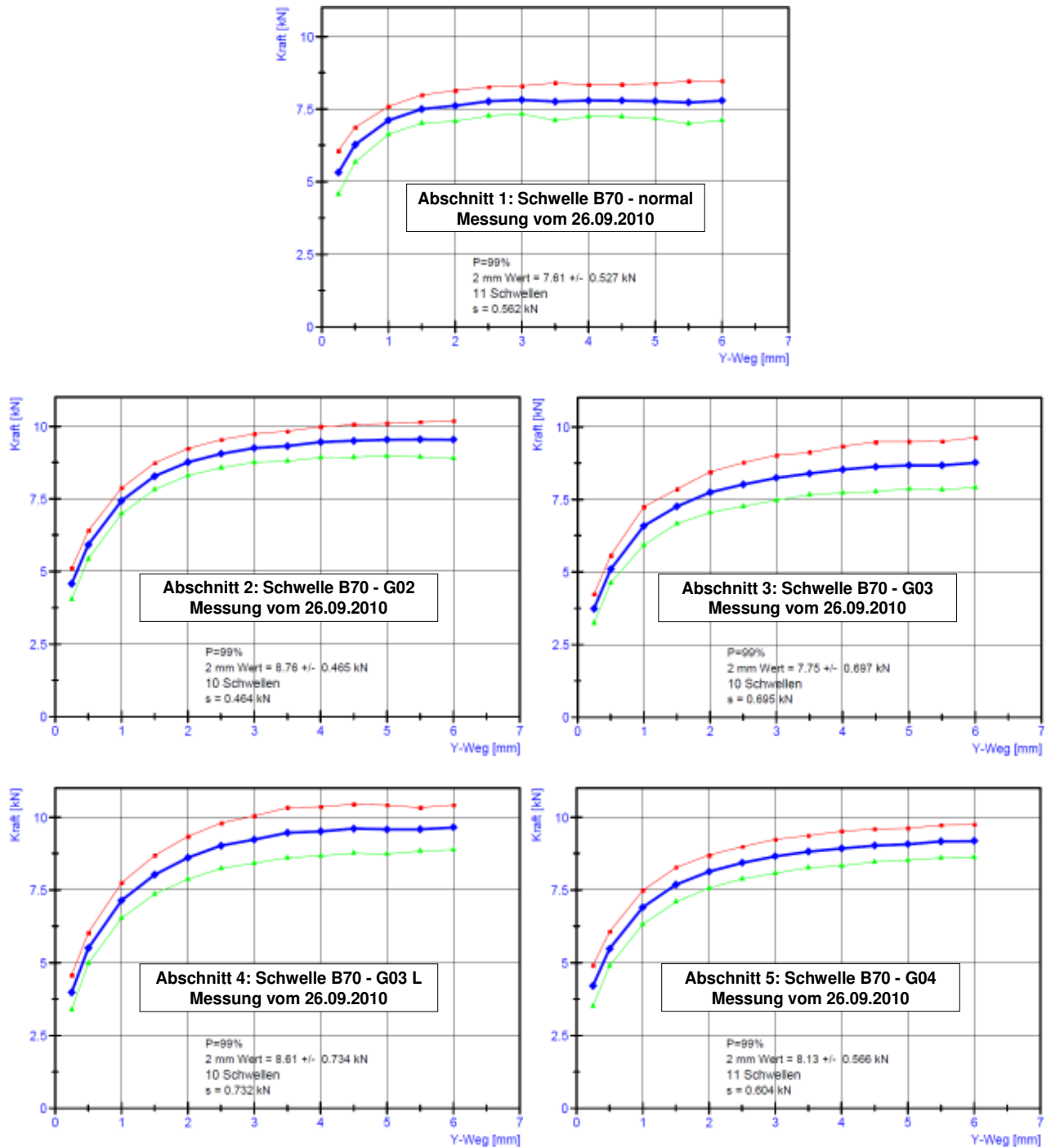


**Abb. 2.69:** Mit einem Hydraulikzylinder wird die Schwelle gegenüber dem als fix zu betrachtenden Gleis verschoben (links), ein Wegaufnehmer zeichnet zeitgleich den erfolgten Verschiebeweg auf (rechts).

Die Resultate dieser Messungen sind für jede unterschiedlich besohlte Schwelle in den Abbildungen 2.70a-e bzw. 2.71a-e dargestellt. Die Abbildung 2.70 zeigt dabei die Resultate der Querverschiebewiderstände noch vor Inbetriebnahme („Nullmessung“), die Abbildung 2.71 zeigt die Resultate der zweiten Messung nach einer Belastung von ca. 1.700.000 Lasttonnen. Der Querverschiebewiderstand wurde an jeweils 12 Schwellen gemessen, wobei einige Einzelmessungen hinsichtlich der Auswertung verworfen werden mussten. In den Diagrammen 2.70a-e bzw. 2.71a-e sind jeweils die Anzahl der ausgewerteten Schwellen angegeben. Ferner ist in diesen Diagrammen der jeweilige „2 mm – Wert“ angegeben, der die Kraft angibt, die erforderlich ist, um die jeweilige Schwelle um 2 mm zu verschieben. Die in den Diagrammen 2.70a-e bzw. 2.71a-e jeweils blau dargestellte Kurve zeigt den Mittelwert, die grün bzw. rot dargestellte Kurve die untere bzw. obere Vertrauensbereichsgrenze.

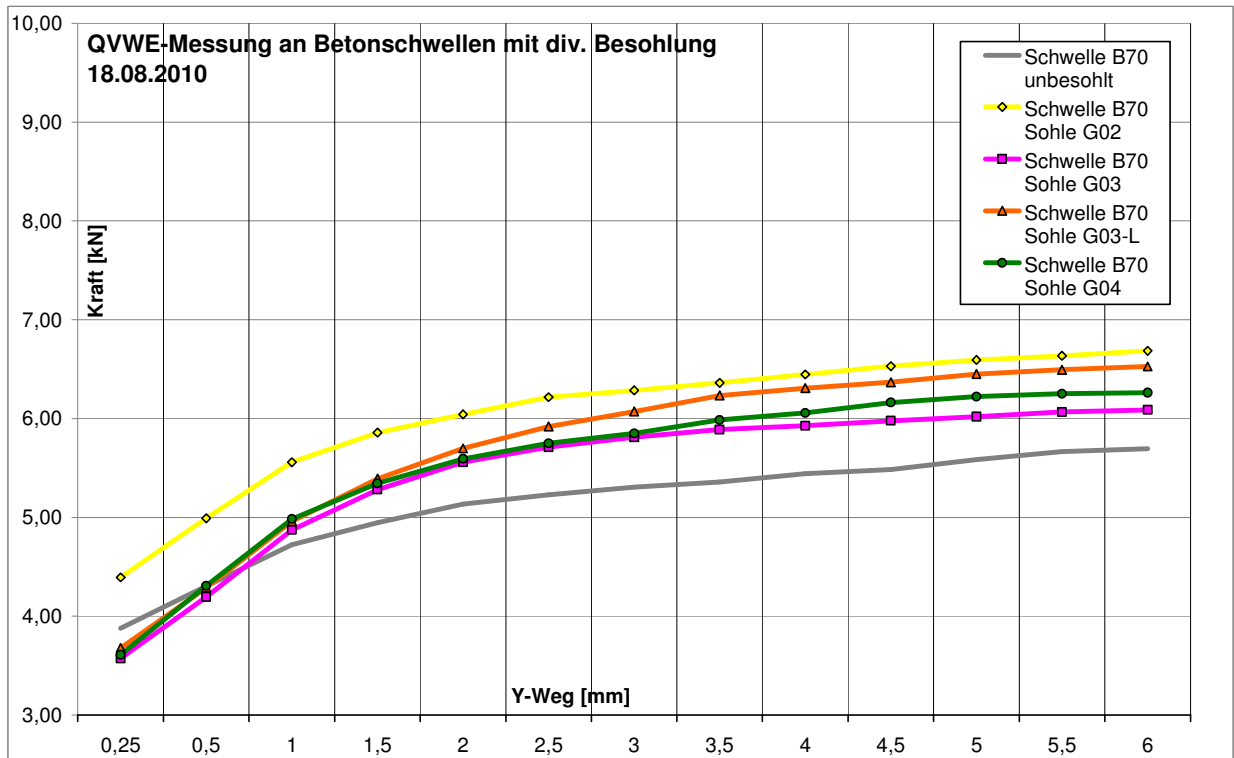


**Abb. 2.70:** Resultate der QVWE-Messungen vom 18.08.2010 vor Inbetriebnahme (Darstellung der einzelnen QVWE-Verläufe mit Angabe des jeweiligen Vertrauensbereiches).

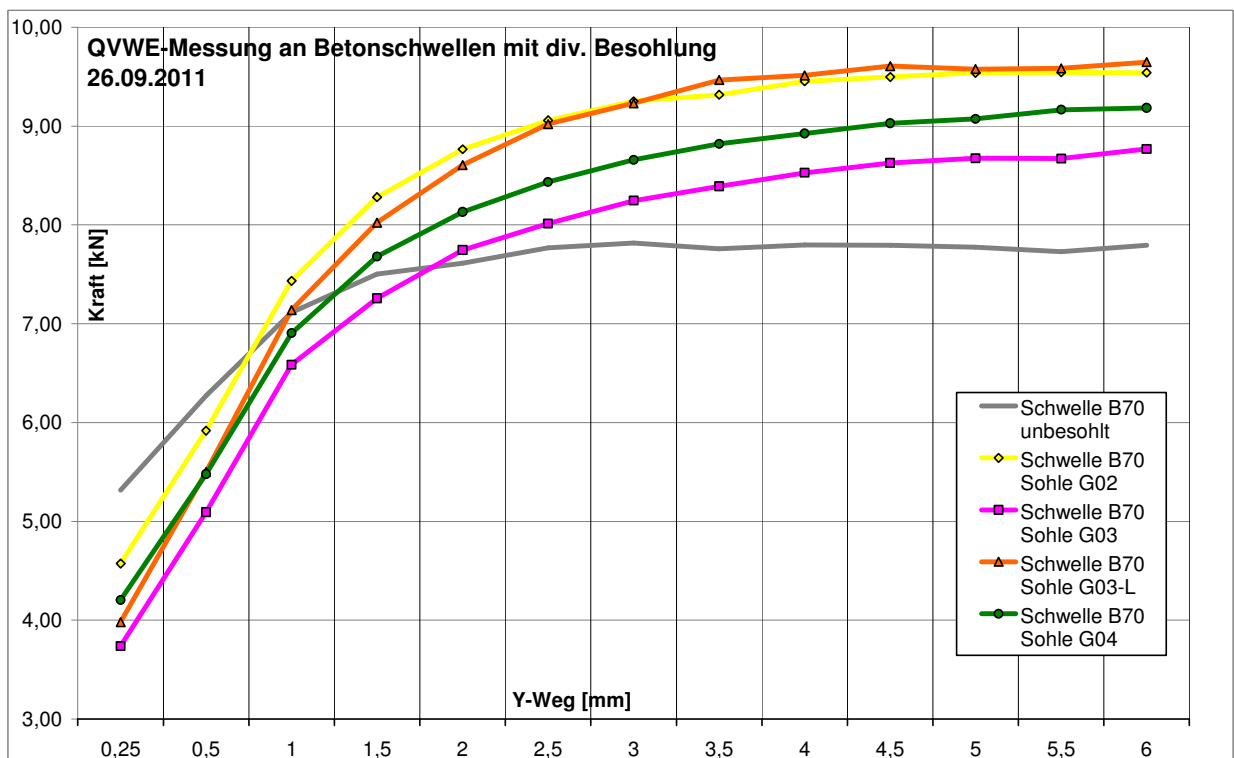


**Abb. 2.71:** Resultate der QVWE-Messungen vom 26.09.2010 nach Inbetriebnahme nach einer Belastung von ca. 1.700.000 Lasttonnen (Darstellung der einzelnen QVWE-Verläufe mit Angabe des jeweiligen Vertrauensbereiches).

Neben den in den jeweiligen Diagrammen 2.70a-e bzw. 2.71a-e dargestellten „2 mm – Werten“ ist auch der Zuwachs der Kraft bei diesem 2 mm – Wert von Bedeutung. Daher sind in den Abbildungen 2.72 und 2.73 die QVWE-Verlaufskurven aller Schwellensohlen gegenübergestellt. So erkennt man, dass die Schwellenbesohlung G03-L den größten Zuwachs beim 2 mm – Wert erreicht.



**Abb. 2.72:** Resultate der QVWE-Messungen vom 18.08.2010 vor Inbetriebnahme (Vergleich der einzelnen QVWE-Verläufe für alle Schwellenbesohlungen).

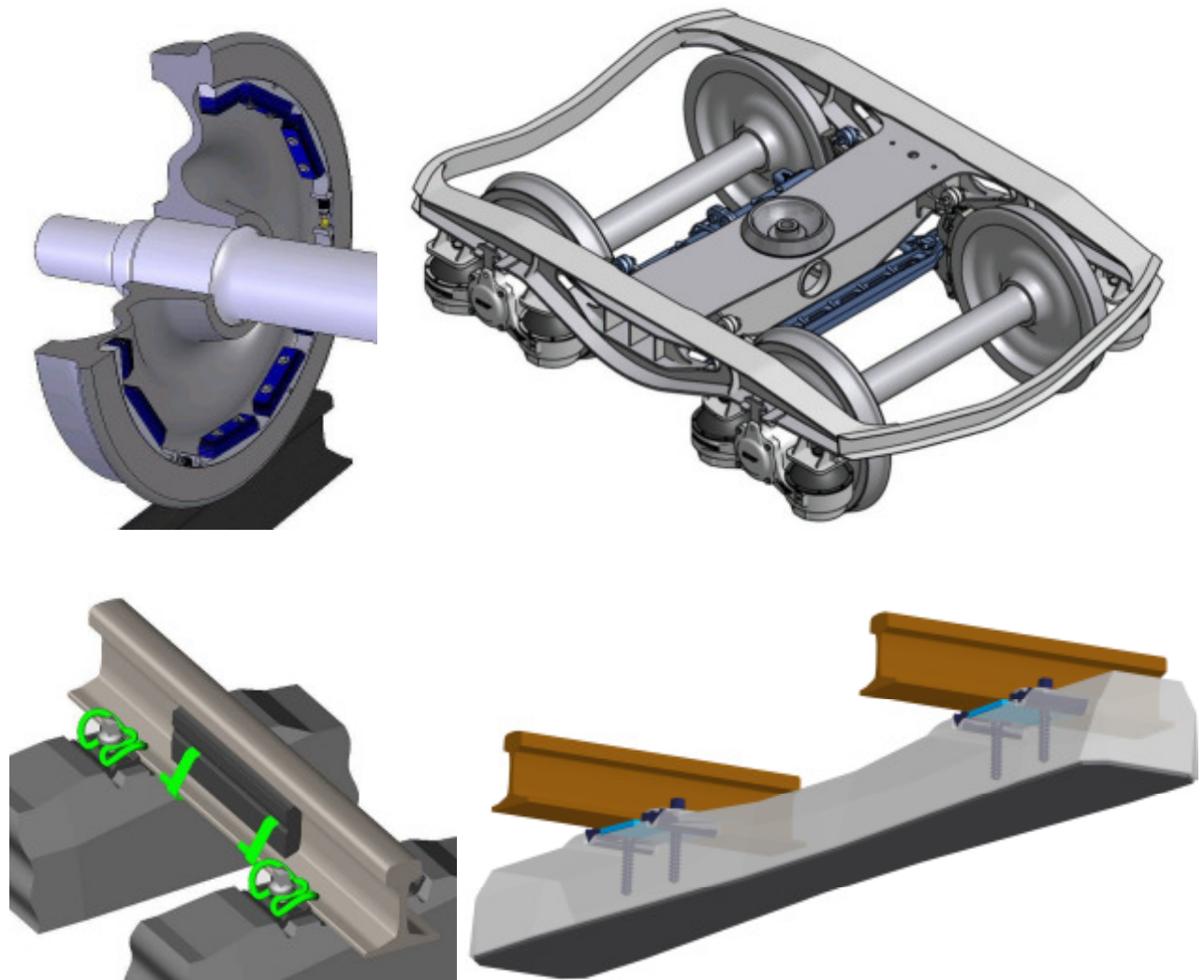


**Abb. 2.73:** Resultate der QVWE-Messungen vom 26.09.2011 nach Inbetriebnahme nach einer Belastung von ca. 1.700.000 Lasttonnen (Vergleich der einzelnen QVWE-Verläufe für alle Schwellenbesohlungen).

### 3. Maßnahmenvalidierung und Bewertung (Teilprojekt C)

Im Rahmen der abschließenden Validierungsmessungen konnten folgende in den Teilpaketen B1, B2 und B3 entwickelten Maßnahmen gemessen und hinsichtlich ihrer akustischen Wirksamkeit bewertet werden:

- Radsatzbauart BVV-BA309 mit / ohne zugehörigen BVV-Raddämpfern (aus TP B1)
- Radsatzbauart GHH-BA308 mit / ohne zugehörigen S&V-Raddämpfern (aus TP B2)
- optimiertes Drehgestell DRSS25L (aus TP B1)
- Vossloh-Schienenstegdämpfer (aus TP B3)
- Getzner-Schwellensolehnen (aus TP B3)



**Abb. 3.1:** Im Rahmen von fünf Validierungsmessungen wurde der akustische Effekt von bedämpften Radsätzen, einem Drehgestell, Schienenstegdämpfern sowie verschiedene Schwellensolehnen gemessen und bewertet, die im Projekt LZarG neu entwickelt bzw. optimiert wurden.

Alle Maßnahmen außer den Schwellenbesohlungen wurden mit einer umfassenden mehrwöchigen Messkampagne bei Augsburg im August/September 2010 gemessen. Bei dieser Bahnstrecke standen drei Gleisabschnitte zur Verfügung:

- reales Gleis
- reales gedämpftes Gleis (bestückt mit Vossloh-Schienenendämpfern)
- TSI-konformes Gleis

Die Messungen erfolgten mit einem speziellen Testzug, der aus insgesamt 12 baugleichen Güterwagen (Tanoos896) bestand, die alle mit K-Sohle-Bremssystem ausgestattet waren:

- 3 Güterwagen mit Referenz-Drehgestell Y25 und Referenz-Radsatz BA318 → Referenz
- 3 Güterwagen mit Referenz-Drehgestell Y25 und Test-Radsatz BA308 mit/ohne Raddämpfern
- 3 Güterwagen mit Referenz-Drehgestell Y25 und Test-Radsatz BA309 mit/ohne Raddämpfern
- 3 Güterwagen mit Test-Drehgestell DRSS25L und Referenz-Radsatz BA318

Da die Test-Radsätze BA308 und BA309 nicht bei allen Fahrten mit den zugehörigen Radabsorbern bestückt waren, konnte die Wirkung der Wagen des Testzuges mit und ohne Radabsorber ermittelt werden. Mit dieser geschickten Variation des Test-Zuges und anhand einer umfassenden Kombination der unterschiedlichen Messungen konnte so die akustische Wirksamkeit der einzelnen Maßnahmen ermittelt werden. Zu diesem Zweck war das Test-Drehgestell DRSS25L mit den Referenz-Radsätzen ausgestattet.

Um den maximalen akustischen Gesamteffekt bestimmen zu können, musste das Test-Drehgestell DRSS25L mit optimierten gedämpften Radsätzen bestückt werden. Dies war erst im Anschluss an diese „erste“ Messkampagne“ nach einer entsprechenden Umrüstung (Radsatztausch in einem Betriebswerk) im Rahmen einer zweiten Validierungsmessung möglich. Diese zweite Messkampagne erfolgte im April 2011 ebenfalls bei Augsburg mit einem Teil des oben genannten Testzuges, nämlich:

- 3 Güterwagen mit Referenz-Drehgestell Y25 und Referenz-Radsatz BA318 → Referenz
- 3 Güterwagen mit Test-Drehgestell DRSS25L und gedämpften Test-Radsatz BA308

Das optimierte Drehgestell DRSS25L erlaubt eine geringfügige radiale „Beweglichkeit“ der Radsätze. Da die Radsätze im Gegensatz zum Referenz-Drehgestell Y25 nicht starr befestigt sind, ist bei Kurvenfahrten ein geringerer Rollwiderstand (und demzufolge geringe Zugkräfte und somit geringe Traktionskosten) zu erwarten. Die Messung dieses Rollwiderstandes konnte nur auf einer sehr kurvenreichen Strecke erfolgen und wurde im April 2011 bei Saalfeld durchgeführt.

Die Wirksamkeit der mit den optimierten Schwellensohlen bestückten Schwellen wurde im September 2010 bei Regensburg im gemessen. Da die besohlenen Schwellen erst wenige Wochen vor der Messung im Rahmen einer kompletten Erneuerung des Oberbaus verlegt wurden, war das Schotterbett noch nicht konsolidiert. Eine spätere Messung im Winter 2010, bei der die Konsolidierung des Schotters abgeschlossen wäre, war aufgrund der Randbedingungen einer derartigen Messung hinsichtlich Temperatur und Bodenbeschaffenheit nicht möglich. Daher wurde diese Messung zur Bestimmung der Einfügedämmung im April 2011 wiederholt, um so neben einer sicheren Bestimmung der Einfügedämmung auch weitergehende Aussagen zum zeitlichen Konsolidierungsverhalten der unterschiedlichen Schwellensohlen zu erhalten.

Diese fünf Validierungsmessungen werden nun hinsichtlich der Resultate dargestellt.

### 3.1. Luftschallmessung der Einzelmaßnahmen [1]

#### 3.1.1. Beschreibung des Testzuges

Messobjekt war der Güterwagen der BA Tanoos<sup>896</sup>, an dem die von den Projektpartnern entwickelten Maßnahmen bzw. neue Radsätze eingebaut wurden. Der Testzug bestand aus vier Einheiten zu jeweils drei Güterwagen. Eine Einheit stellte die Referenz dar, bei den drei weiteren Einheiten waren die entwickelten Optimierungen als jeweils einzelne Maßnahme integriert.

Alle Wagen waren mit K-Sohle gebremst.

Alle Radsätze waren mit neuwertigen Rädern bestückt, so dass alle Räder Maximalprofil hatten. Das akustische Einfahren erfolgte auf einer Überführungsfahrt zum Technologiezentrum der Deutschen Bahn in München.



Foto: DB Systemtechnik, W. Behr

**Abb. 3.2:** Die entwickelten Maßnahmen wurde am Güterwagen der Bauart Tanoos<sup>896</sup> eingebaut und getestet. Das Bild zeigt die Wagen im DB-Technologiezentrum vor der Zusammenstellung zum Testzug.

#### - Referenz: Drehgestellbauart Y25 mit K-Sohle-Bremseinheit und Radsatz BA 318



Foto: DB Systemtechnik, W. Behr



**Abb.3.3:** Die Referenz-Wagengruppe hatte Y25-Drehgestelle mit Radsätzen der Bauart 318.



### - Maßnahme 1: Drehgestellbauart DRRS25 mit der kompakten Klotzbremse CFCB

Das DRRS25 Drehgestell der Fa. Waggonbau Niesky GmbH (WB Niesky) ähnelt dem Y25-Drehgestell. Jedoch sind als Federpaket zwei Gummiringe mit kreisförmigem Querschnitt, die zwischen den glockenförmigen Federtöpfen sitzen, eingebaut. Die Radsätze werden in Längsrichtung über federbelastete Reibstößel geführt. Bei der kompakten Klotzbremse CFCB der Fa. Knorr Bremse AG wird die Kraft über Gestängesteller direkt übertragen. Zylinder und Übersetzungshebel sind komplett abgedichtet. Der Klotz- und Radverschleiß wird automatisch nachgestellt.

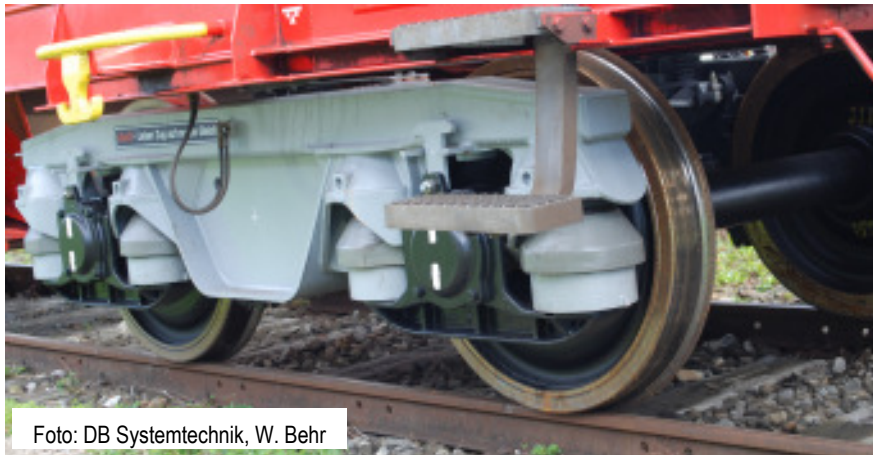


Foto: DB Systemtechnik, W. Behr



**Abb. 3.4:** Drehgestellbauart DRRS25L der Fa. Waggonbau Niesky GmbH mit der kompakten Klotzbremse CFCB der Fa. Knorr, Gummifederung der Fa. Contitech und Radsätzen der Bauart 318

### - Maßnahme 2: Güterwagenradsätze der Fa. Gutehoffnungshütte Radsatz GmbH (GHH)

Die Güterwagenradsätze der BA 308 von GHH bestehen aus zwei Vollrädern mit Absorbern. Die Radsätze bzw. Räder Typ VMS (Valdunes Mountain Safety) sind in ihrer prinzipiellen geometrischen Gestaltung der Radscheiben baugleich mit der BA 325 und BA 315 (Glockenräder) und gehören zur Familie der thermisch beständigen Räder. Zur schalltechnischen Optimierung gehört die Ausrüstung der Vollräder mit auf das Raddesign abgestimmten Schallabsorbern Typ VICON-RSI der Fa. Schrey & Veit GmbH. Die Absorber werden anhand einer im Radkranz gefrästen Nut an den Rädern montiert. Sie verlieren durch die Erhitzung des Rades beim Bremsvorgang ihre Wirkung nicht.



Foto: DB Systemtechnik, W. Behr



**Abb. 3.5:** Radsatz BA 308 der Fa. GHH mit Raddämpfern vom Typ VICON-RSI der Fa. Schrey & Veit GmbH





**Abb. 3.7:** Die akustischen Effekte der entwickelten Einzelmaßnahmen wurden mit einem speziell zusammengestellten Testzug ermittelt.

Während der Messung wurde der gesamte Messzug gedreht (Dreiecksfahrt) und verkehrte so teils in entsprechender umgekehrter Reihenfolge. Bei den Vorbeifahrten wurden so im Rahmen der gesamten Messkampagne beide Seiten des Testzuges berücksichtigt.

#### - Fahrzeugbedingungen

- Die Tanoos<sup>896</sup>-Wagen wurden im Werk Paderborn umgebaut und anschließend nach München-Freimann auf das Gelände der DB Systemtechnik überführt und im Rahmen der üblichen Betriebsbremsungen eingebremst. Die Überführungsstrecke betrug ca. 1000 km.
- Zusätzliche Einbremsungen der Wagen erfolgten bei der Überführung des Messzuges zur Messstelle bei Augsburg (ca. 70 km) und während der Messfahrten. Die Lokführer wurden angewiesen möglichst oft und ausschließlich mit der pneumatischen Bremse zu bremsen.
- Aufgrund des Einbaus neuer Radsätze in allen 12 Tanoos<sup>896</sup>-Wagen wurden die Räder vor Beginn der Messfahrten entsprechend den Anforderungen der DIN EN ISO 3095:2005 [3] eingefahren und eingebremst.
- Bei der Überführung und den Messungen waren alle Wagen unbeladen.
- Die Radoberflächen waren in einem optisch guten Zustand. Während der Vorbeifahrten waren an den Tanoos<sup>896</sup>-Wagen keine Flachstellen oder andere Unregelmäßigkeiten hörbar.
- Bei einigen BVV-Radsätzen Ba309 erhielten die Radoberflächen seitens BVV eine Sonderwärmehandlung. Nach der ersten Messwoche wurde bei der Zwischenmessung der Radrauheit festgestellt, dass alle Radsätze von BVV am Anfang der Messkampagne noch nicht eingefahren waren und eigentlich mehr Kilometerlaufleistung für das Einfahren benötigt hätten.

#### - Teststrecke

Bei der Strecke „Augsburg – Donauwörth“ stand bei Langweid eine „reale Strecke“ zur Verfügung, die im Regelbetrieb von allen Zuggattungen „Güterzug“, „Regionalzug“ sowie „ICE“ befahren wird. Hier wurden auf dem Richtungsgleis nach Augsburg die im Teilpaket B3 entwickelten Schienestegdämpfer der Fa. Vossloh eingebaut. Das Gegengleis Richtung Donauwörth hat im Bereich Langweid aufgrund ständiger Instandsetzungsmaßnahmen hinsichtlich Schienenrauheit und Schotterstopfung die gemäß TSI-Standard geforderten Qualitäten. Somit standen folgende drei Messebenen in unmittelbarer Nähe zur Verfügung (Abb. 3.8a):

- Reales unbedämpftes Gleis
- Reales bedämpftes Gleis
- TSI-Gleis

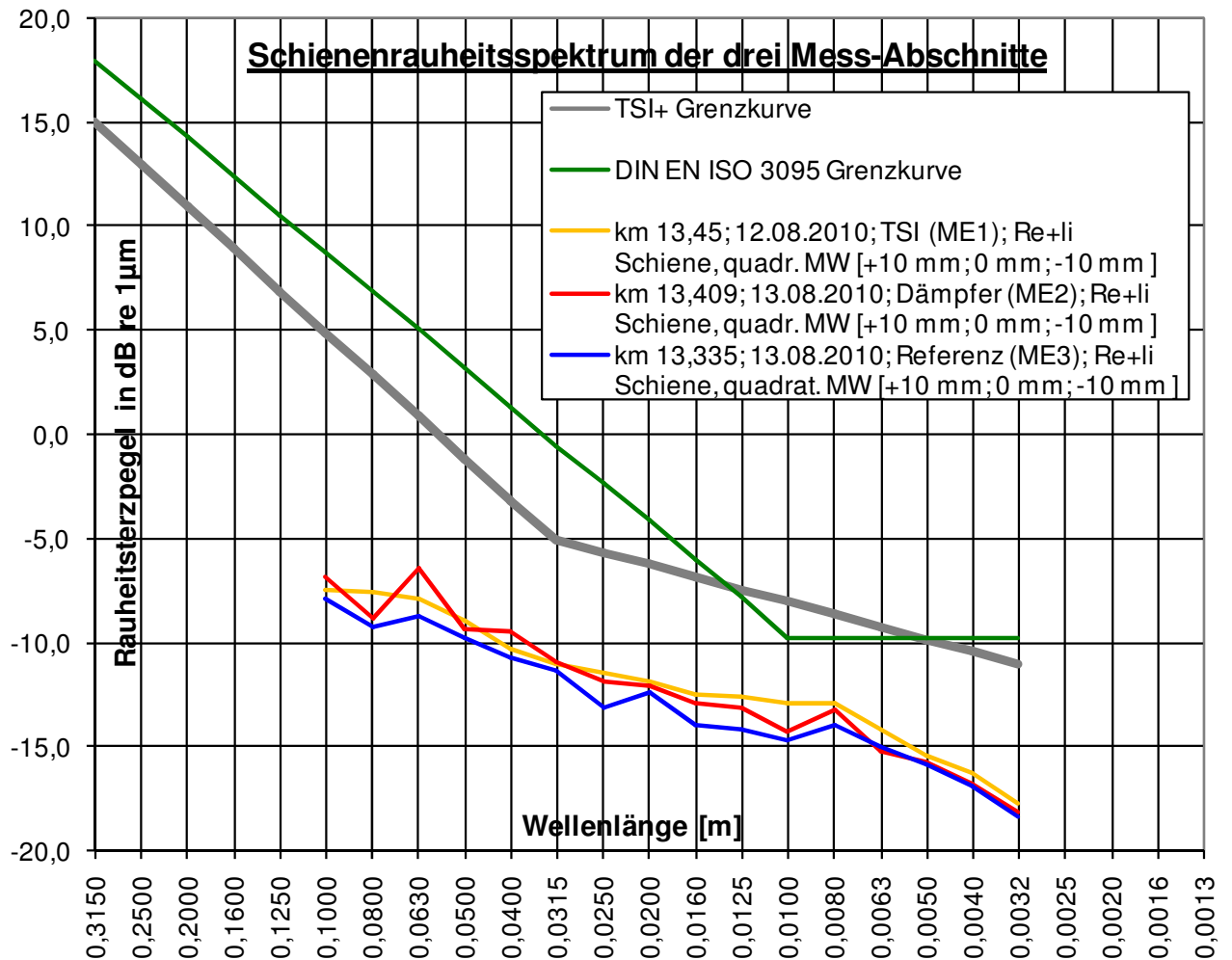


**Abb. 3.8a:** Bei der Teststrecke nahe Langweid standen drei unterschiedliche Streckenabschnitte zur Verfügung: ein reales Gleis mit Schienenstegdämpfern (im Bild das vordere Gleis) sowie ein TSI-Abschnitt (im Bild das hintere Gleis).

### 3.1.2. Messung der Schienenrauheiten der Teststrecke

Die Schienenrauheit der drei Messabschnitte (reales Gleis, Dämpfer- und TSI-Abschnitt) wurde entsprechend der Norm DIN EN ISO 3095:2005, Anhang A [3] gemessen.

Die Ergebnisse der Schienenoberflächenmessungen der drei Messabschnitte sind als Wellenlängenterspektren dargestellt. Dabei wurden die Spektren aller Einzelspuren beider Schienen quadratisch gemittelt und im Vergleich zu der TSI – Grenzkurve zur Orientierung bzw. DIN EN ISO 3095 - Grenzkurve dargestellt.



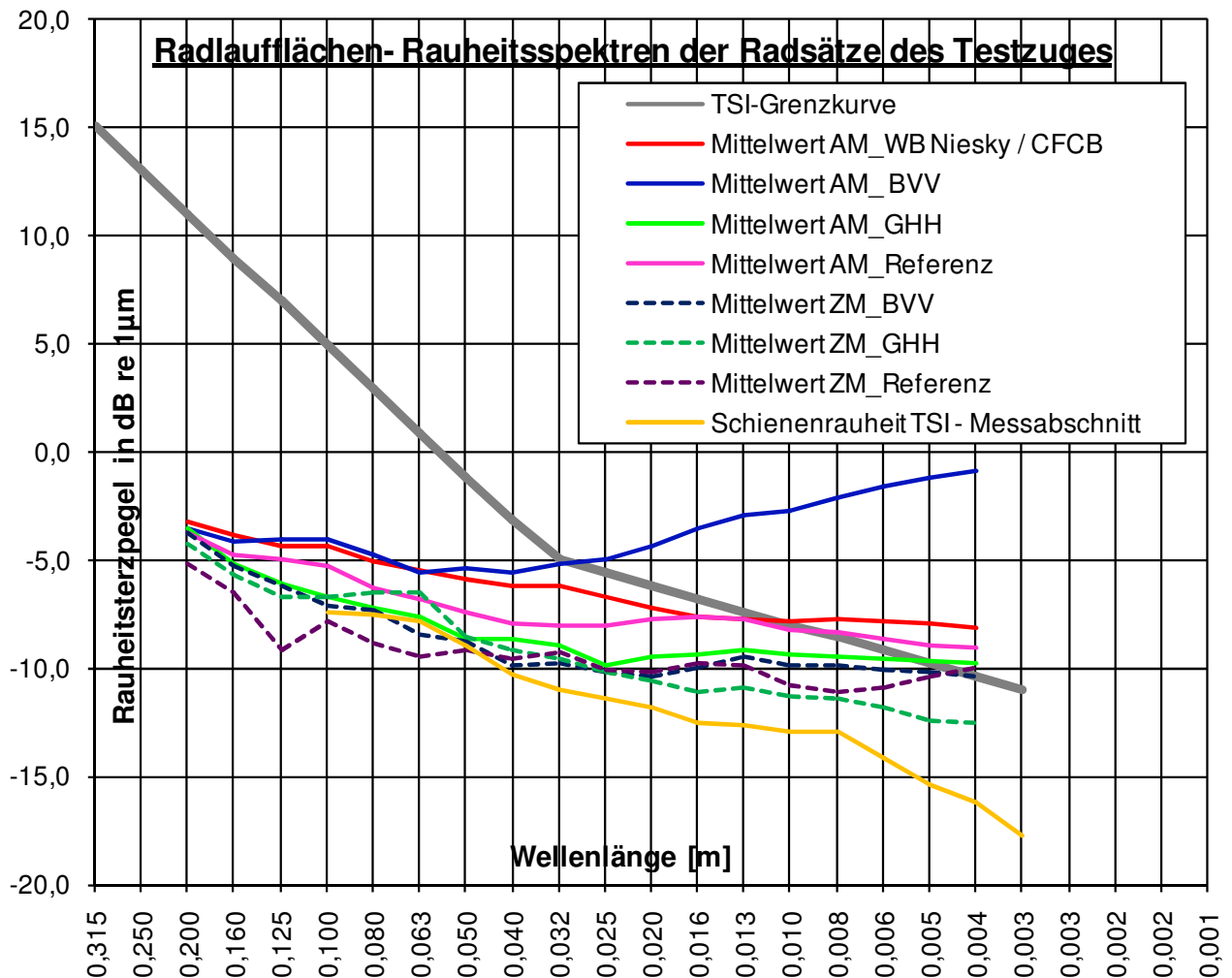
**Abb. 3.8b:** Die Schienenriffel der drei Testabschnitte waren vergleichbar, so dass bei der Aus- und Bewertung der Effektmessung keine Ausgleichsrechnung erfolgen musste.

Der Effekt der Schienendämpfer wird durch einen Vergleich der Schallabstrahlung des Testzuges auf dem realen ungedämpften und realen gedämpften Gleis ermittelt. Dies war ohne weitere Korrekturen nur möglich, da beide Gleisabschnitte eine vergleichbare Schienenverriffelung aufweisen.

Die Entwicklung der Schienenrauheiten während der zweiwöchigen Messkampagne wurde anhand der Messung und Auswertung der indirekten kombinierten Rauheit beobachtet. Dabei stellte sich eine Veränderung der Gleisbedingungen des TSI-Gleises in der zweiten Messwoche heraus. Daher wurden Messfahrten in der zweiten Messwoche auf dem TSI-Gleis nicht berücksichtigt. In der zweiten Messwoche wurde jedoch schwerpunktmäßig der Effekt der optimierten Radsätze BA 308 und BA309 ohne Raddämpfer und insbesondere deren Wirkung auf dem gedämpften Gleisabschnitt untersucht. Auswertungen der Testfahrten in der zweiten Messwoche auf dem TSI-Gleis wären allenfalls im Hinblick auf eine Verbesserung der Statistik aufgrund einer höheren Anzahl der Fahrten des Testzuges vorgesehen gewesen. Jedoch unterlagen bereits die Fahrten während der ersten Messwoche einer geringen Streuung, so dass es keinerlei negativen Folgen für die gesamte Messung hatte, die Zugfahrten auf dem TSI-Gleis in der zweiten Messwoche unberücksichtigt zu lassen.

### 3.1.3. Messung der Radrauheiten des Testzuges

Die mittleren Radrauheitsspektren der jeweiligen Wagengruppe sind im folgenden Diagramm für die Ausgangs- und Zwischenmessung dargestellt. Zum Vergleich der Größenordnung ist das mittlere Spektrum der Schienenrauheit exemplarisch für den TSI-Messabschnitt angegeben. Zusätzlich wurde zur Orientierung die TSI-Grenzkurve für Schienenrauheit mit dargestellt.



**Abb. 3.9:** Die Radriffel der Radlaufflächen der unterschiedlichen Testradsätze wurden vor und während der Messkampagne gemessen (AM = Anfangsmessung, ZM = Zwischenmessung) und waren im zweiten Teil der Messkampagne vergleichbar. Die anfangs vor der akustischen Messung ermittelten höheren Radriffel der BVV-Radsätze waren auch in der ersten Messwoche vergleichbar zu den anderen Radsätzen, wie eine weitere Analyse ergab.

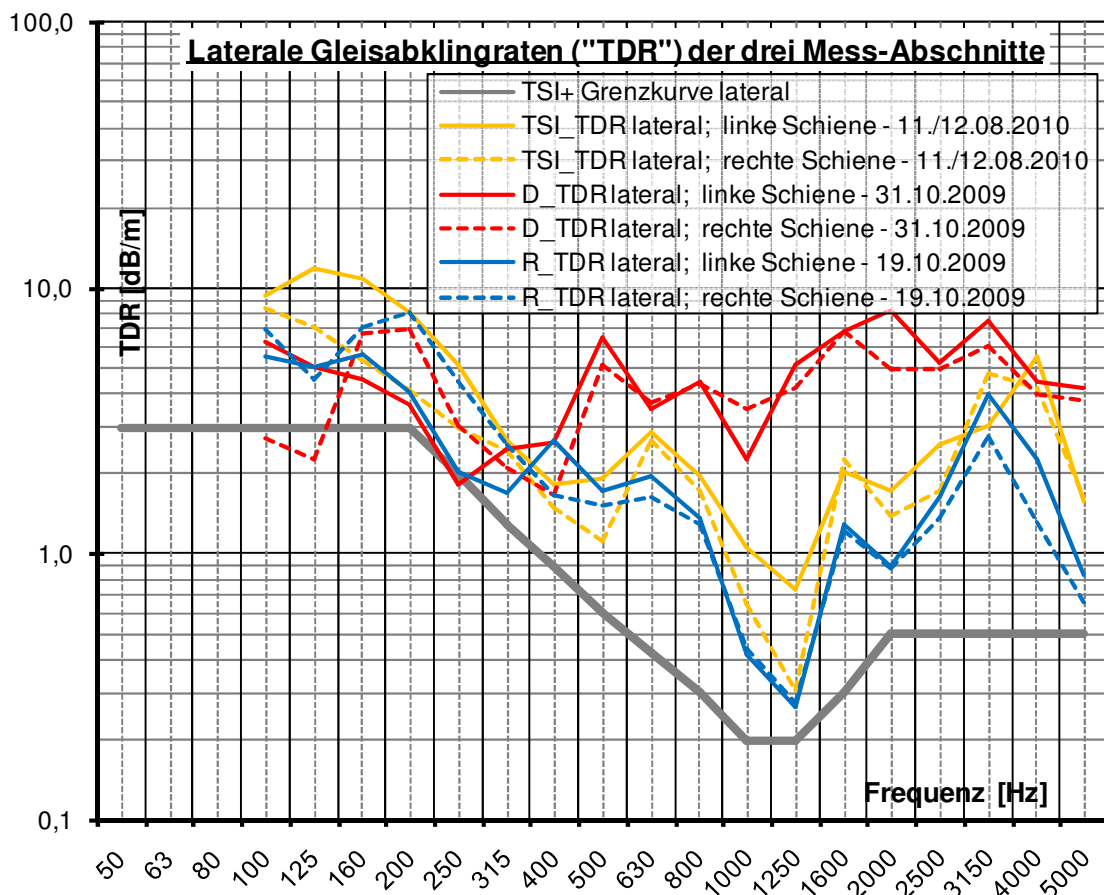
Bei den Ausgangsmessungen vor der 1. Messwoche wiesen die Radlaufflächen der Wagengruppe WB Niesky und Referenz vergleichbare mittlere Rauheitsspektren auf. Die Radrauheitsspektren der GHH-Wagengruppe waren über den gesamten Wellenlängenbereich 1 dB - 2 dB niedriger. Die BVV-Wagengruppe wies unterhalb  $\lambda = 0,032$  m bis zu 10 dB höhere Pegel auf. Bei der stichprobenhaften Zwischenmessung nach der 1. Messwoche wurden bei den Radsätzen der Wagen GHH und Referenz bis zu 2 dB niedrigere Rauheitspegel festgestellt. Bei der Wagengruppe von BVV ist eine deutliche Verbesserung erkennbar. Das mittlere Spektrum der Radlaufflächen der Wagengruppe von BVV war somit nach der 1. Messwoche mit den anderen Wagengruppen vergleichbar. Daraus lässt sich schließen, dass die durchgeführte 1000 km lange Sonderfahrt zum Einfahren der BVV-Räder nicht ausreichte.

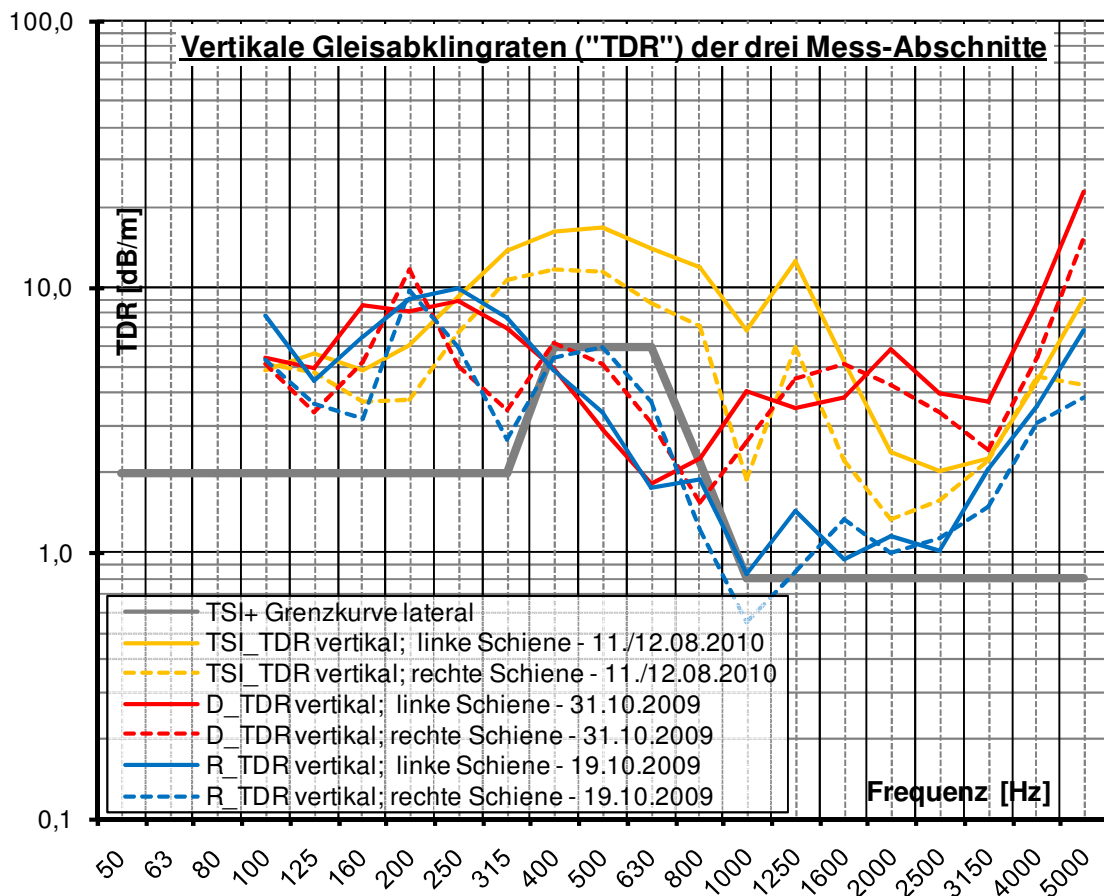
Während der Vorbeifahrtmessungen wurden außerdem Körper- und Luftschallsignale aufgenommen, die die Bestimmung der kombinierten indirekten Rauheit ermöglichen. Deren Auswertung zeigte, dass sich einerseits die kombinierte indirekte Rauheit der Wagengruppe mit den BVV-Radsätzen BA 309 im Wochenverlauf der ersten Messwoche nicht nennenswert änderte und andererseits die Resultate der kombinierten indirekten Rauheit der Wagengruppe mit den BVV-Radsätzen mit den kombinierten indirekten Rauheiten der anderen Wagengruppen vergleichbar war. Somit lässt sich schlussfolgern, dass die noch vor akustischen Messkampagne registrierten erhöhten Radriffel der BVV-Radsätze sich bereits auf der Überführungsfahrt des Testzuges vom Technologiezentrum der Deutschen Bahn in München (dort fanden die Radriffel-Messungen statt!) zur Teststrecke bei Augsburg weiter glätteten. Somit können auch die während der ersten Messwoche erzielten Ergebnisse der Wagengruppe mit den BVV-Radsätzen BA 309 als verwertbar betrachtet werden.

### 3.1.4. Messung der Gleisabklingrate der Teststrecke

Es wurden in allen Messabschnitten die Gleisabklingraten (engl. Track decay rate = TDR) gemessen. Die Messung der TDR erfolgte im Jahr 2009 zum Zeitpunkt des Einbaus der Schienenstegdämpfer der Fa. Vossloh im Rahmen des Teilpaketes B3 und wurde im Frühjahr 2011 vor einer weiteren Messkampagne wiederholt.

Die Ergebnisse der TDR-Messungen sind in Abbildung 3.10 dargestellt. Im relevanten Frequenzbereich (vertikale TDR:  $f = 630 - 1600\text{Hz}$  / laterale TDR:  $f = 315 - 630\text{ Hz}$ ) ist hinsichtlich des Beitrages des Gleises zur Gesamtschallemission die Gleisabklingrate des bedämpften bzw. realen Abschnitts niedriger als die des TSI – Messabschnitts. Aufgrund der 2007 bereits genannten Sanierung im TSI-Abschnitt weist dieses Gleis eine höhere Dämpfung auf.





**Abb. 3.10:** Ein Vergleich der Gleisabklingraten der drei Gleisabschnitte („TSI“ = TSI-Abschnitt, „D“ = realer gedämpfter Abschnitt mit Schienenendämpfern, „R“ = realer Gleisabschnitt ohne Schienenendämpfer) zeigt, dass der TSI-Abschnitt lateral geringfügig bzw. vertikal deutlich mehr gedämpft ist als der reale Gleisabschnitt. Außerdem liegen die TDR-Werte des TSI-Abschnittes über der TSI-Grenzkurve und bestätigen somit die Qualität des TSI-Abschnittes.

### 3.1.5. Umgebungsbedingungen der Messung (Wetter)

Während des gesamten Messablaufs waren bei den Versuchsfahrten die Vorgaben der DIN EN ISO 3095:2005 hinsichtlich der akustischen Umgebung und des Streckenzustands, der meteorologischen Voraussetzungen und des Fremdgeräuschpegels erfüllt. Zeitweise hat es geregnet. Messfahrten bei gelegentlichem Regen wurden bei der Auswertung der Ergebnisse nicht berücksichtigt.

### 3.1.6. Aufbau der Messpunkte und Durchführung der Messung der Vorbeifahrt

In der Mitte der drei Gleisabschnitte wurde jeweils eine Messebene

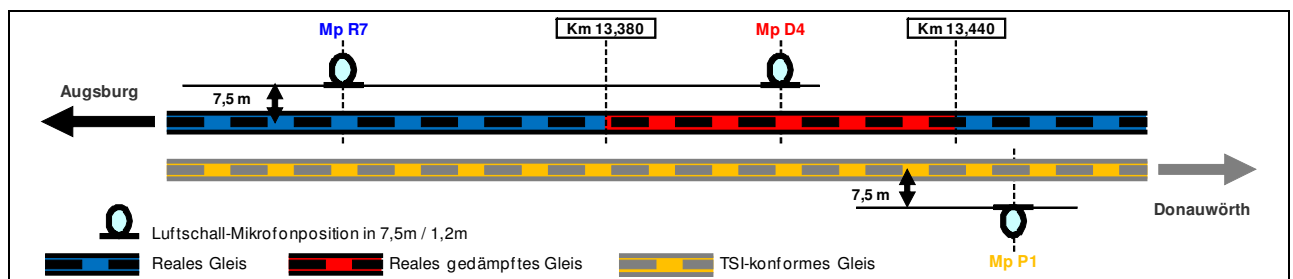
- bei km 13,410 (bedämpftes Gleis) bzw.
- bei km 13,335 (reales Gleis) und
- bei km 13,45 (TSI-Gleis) festgelegt.

In den drei Messebenen wurden jeweils ein Luftschallmesspunkt in einer Entfernung von 7,5 m zum Gleis und einer Höhe von 1,2 m über dem Gleis aufgebaut (Messpunkte P1, D4 und R7).





**Abb. 3.11a:** Die Messungen wurden auf der Strecke Augsburg-Donauwörth in der Nähe von Langweid durchgeführt. Dort war die Strecke gerade ohne eine Dammlage, die Schallausbreitungsbedingungen waren ideal und es gab keine Störgeräusche in der Umgebung.



**Abb. 3.11b:** Die Position der Luftschallmikrofone an den drei Gleisabschnitten

Die Vorbeifahrermessungen wurden an der zweigleisigen Strecke zwischen Augsburg und Donauwörth rechts vom Gleis in Richtung Donauwörth bzw. rechts vom Gleis in Richtung Augsburg im Bereich zwischen den Streckenkilometern 13,290 und ca. 13,480 durchgeführt. Der Messzug pendelte zwischen den Bahnhöfen Augsburg und Meitingen.

In den drei Messabschnitten war der Oberbau, bis auf die Schienendämpfer im bedämpften Messabschnitt, identisch und die Strecke gerade und mit optimalen Ausbreitungsbedingungen. Das Gleis Augsburg-Donauwörth war in einem guten Unterhaltungszustand. Es wurden die Schienen im Juni 2007 ausgetauscht. Über den Unterhaltungszustand des Gleises Donauwörth – Augsburg gibt es keine Angaben.

Der Ablauf der gesamten Messkampagne stellte sich folgendermaßen dar:

- 11.-12.08.2010 Messung der TDR im TSI-Abschnitt
- 12.-13.08.2010 Messung der Schienenrauheit der drei Messabschnitte
- 16.-19.08.2010 Messung der Radrauheit an allen 12 Tanoos<sup>896</sup>-Wagen, Eingangsprüfung
- 24.-25.08.2010 Erste Messkampagne mit eingebauten Radabsorbern (bei BA 308 und BA 309), Messung der einen Wagen- bzw. Zugseite
- 26.-27.08.2010 Erste Messkampagne mit eingebauten Radabsorbern (bei BA 308 und BA 309), Messung der zweiten Wagenseite (nach einer Drehung des gesamten Testzuges im Rahmen einer Dreiecksfahrt)
- 30.08.2010 Ausbau der Radabsorber und Zwischenmessung der Radrauheit an einigen exemplarisch Radsätzen
- 31.08.-02.09.10 Zweite Messkampagne ohne Radabsorber an den entsprechenden Radsätzen der BA 308 und BA 309, Messung der zweiten Wagenseite

### 3.1.7. Theoretische Grundlagen der Schallabstrahlung einer Zugvorbeifahrt mit Bezug zu den gemessenen Resultaten

Die akustische Schallabstrahlung von Zugvorbeifahrten wird von vielen Faktoren beeinflusst, z. B.:

- den Rauheiten von Rad und Schiene,
- den dynamischen Eigenschaften der Zwischenlage,
- dem Zustand des Schotterbettes (Qualität bzw. Alter der Schottersteine, Stopfungszustand),
- dem Einbettungszustand der Schwelle im Schotterbett (Schwellenhohllagen) usw.

Beim Vergleich zweier Zugvorbeifahrten können manche Parameter belanglos werden, da sie bei der vergleichenden Subtraktion zweier Pegelverläufe in den resultierenden Pegeldifferenzen „herausgekürzt“ werden. So ist z. B. die exakte Steifigkeit einer Zwischenlage keine Auswirkung beim Vergleich zweier Radbauformen. Andere Effekte können jedoch den Pegelverlauf einer Zugvorbeifahrt selbst in einer geringen Auswirkung von 1 – 2 dB derart beeinflussen, dass es die Bewertung eines akustischen Effektes anhand zweier Pegeldifferenzen erschwert, da ein ermittelter Effekt oft selbst nur die Größenordnung von 2 – 3 dB hat. Daher muss der prinzipielle Pegelverlauf einer Zugvorbeifahrt bekannt sein, um eine einzelne Zugfahrt und die Pegeldifferenzen zweier Zugfahrten aus bahntechnischer Sicht bewerten zu können. Im Wesentlichen setzt sich die Schallabstrahlung einer Zugvorbeifahrt aus den drei Komponenten bzw. Ursachen „Schwelle“, „Schiene“ und „Rad“ zusammen.

Allgemein gilt folgende grobe „Faustregel“ für die Dominanz der einzelnen Komponenten bei der Schallabstrahlung einer Zugvorbeifahrt:

- $f < 500$  Hz: Dominanz der Schwelle
- $500 \text{ Hz} < f < 1500$  Hz: Dominanz der Schiene (auf weicher Zwischenlage)
- $500 \text{ Hz} < f < 2500$  Hz: Dominanz der Schiene (auf harter Zwischenlage)
- $f > 1500$  Hz: Dominanz des Rades

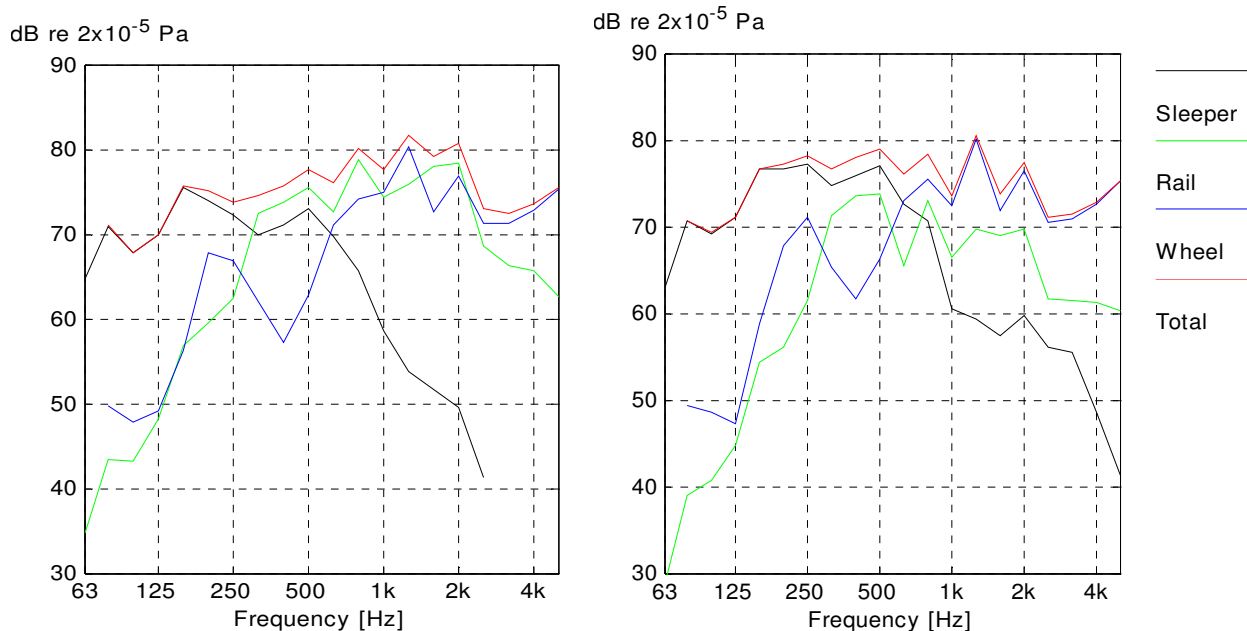
In Abbildung 3.11c sind die Schalldruckpegel für die Vorbeifahrten eines Güterzuges auf einem Schottergleis mit weichen bzw. harten Zwischenlagen in einer Entfernung von 7,5 m zum Gleis simuliert ( $v = 100$  km/h). Man erkennt die Dominanz - der Schwelle im tiefen Frequenzbereich

- der Schiene im mittleren Frequenzbereich
- des Rades im hohen Frequenzbereich.

Diese Abbildung 3.11c soll nur exemplarisch dienen. So scheint gemäß Abb. 3.11c die Schallabstrahlung der Schiene nur eine geringe Rolle zu spielen, falls im Gleisoberbau eine harte Zwischenlage verwendet wird. Ist dagegen eine weiche Zwischenlage verwendet, so scheint die Schallabstrahlung der Schiene nur im Bereich von  $f = 500 - 2000$  Hz eine bedeutende Rolle zu spielen (bei 1250 Hz ist im gewählten Beispiel die Abstrahlung des Rades dominant, da hier das Rad eine besonders ausgeprägte Schwingungsmode hat) und die Schallabstrahlung der Schiene scheint bereits ab  $f > 315$  Hz dominanter zu sein als die Schallabstrahlung der Schwelle. Hier sind die Übergänge fließend und in der Simulation auch von den explizit wählbaren Größen wie Radbauform, Schottersteifigkeit, Zuggeschwindigkeit etc. abhängig.

Mit Hilfe derartiger theoretischer Betrachtungen lassen sich jedoch manche prinzipielle Zusammenhänge erkennen. So erklärt Abb. 3.11c anschaulich, dass Schienendämpfer prinzipiell bei hart gelagerten Schienen nur einen deutlich geringeren Effekt haben können (bis hin zu „kein Effekt“!) als wenn dieselben Schienendämpfer an einer weich gelagerten Schiene angebracht sind. Weiterhin sieht man, dass der Anteil der Schallabstrahlung des Rades ab  $f > 1000$  Hz unabhängig von der Zwischenlage ist. Man sieht u. a. weiterhin, dass der Absolutpegel des Anteils der Schwelle zur Schallabstrahlung im Fall einer harten Zwischenlage insbesondere im Bereich  $160 \text{ Hz} < f < 630$  Hz deutlich höher ist als im Fall einer weichen Zwischenlage. Versteht man die Steifigkeit der

Zwischenlage in einer groben Abschätzung als Repräsentant für die „Weichheit des Oberbaus“, bedeutet dies, dass der absolute Pegel des Anteils der Schwelle an der Schallabstrahlung im Bereich  $160 \text{ Hz} < f < 630 \text{ Hz}$  auch vom Grad der Instandhaltung des Schottergleises abhängt. Hier wird sich anhand der späteren Resultate ein Unterschied des „realen Gleises“ zum „TSI-Gleis“ herausstellen.



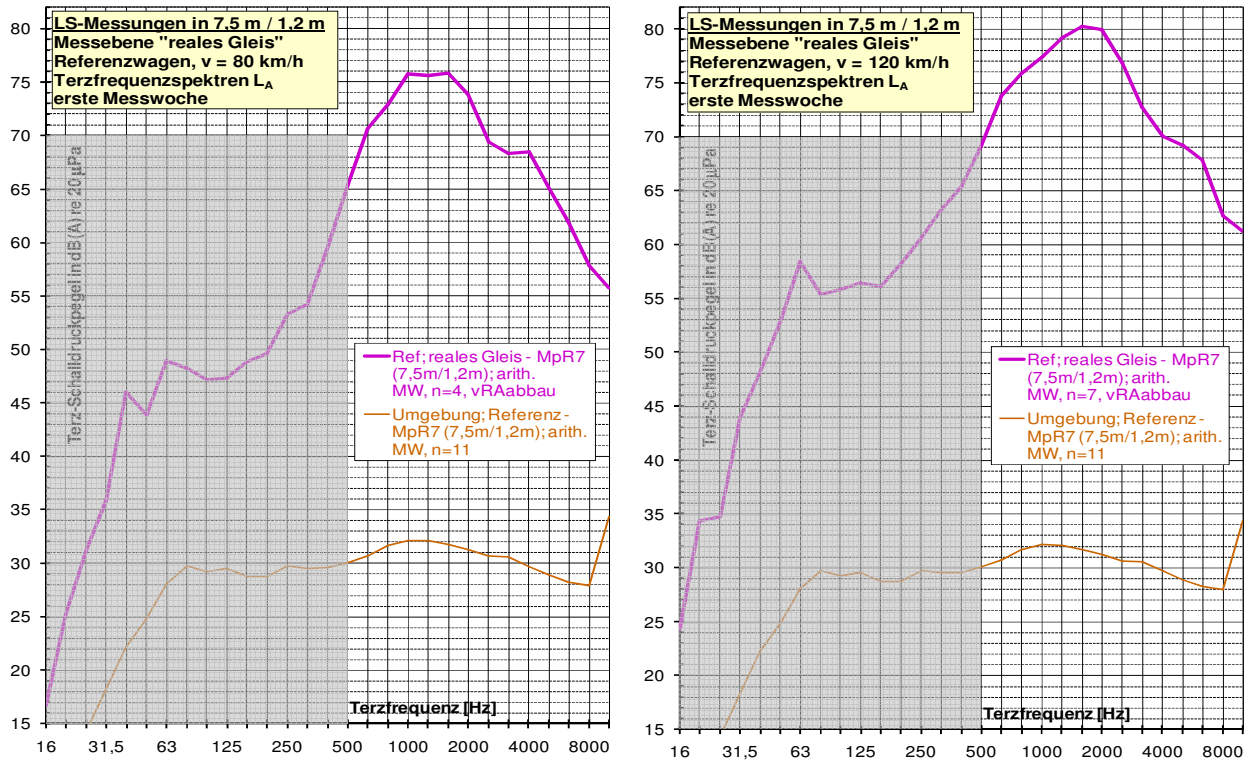
**Abb. 3.11c:** TINWS-Simulation eines linearen Schalldruckpegelverlaufs einer Güterzug-Vorbeifahrt mit  $v = 100 \text{ km/h}$  in einer Entfernung von 7,5 m zum Gleis (links: weiche Zwischenlage, rechts: harte Zwischenlage).

Mit der A-Bewertung eines linearen Schalldruckpegelverlaufs werden jedoch die Anteile der Abstrahlung der Schwelle am Vorbeifahrtpegel (Summenpegel) vernachlässigbar, da Schall im tiefen Frequenzbereich vom menschlichen Ohr deutlich schlechter wahrnehmbar als die hochfrequenten Schallanteile im Bereich  $f > 800 \text{ Hz}$ .

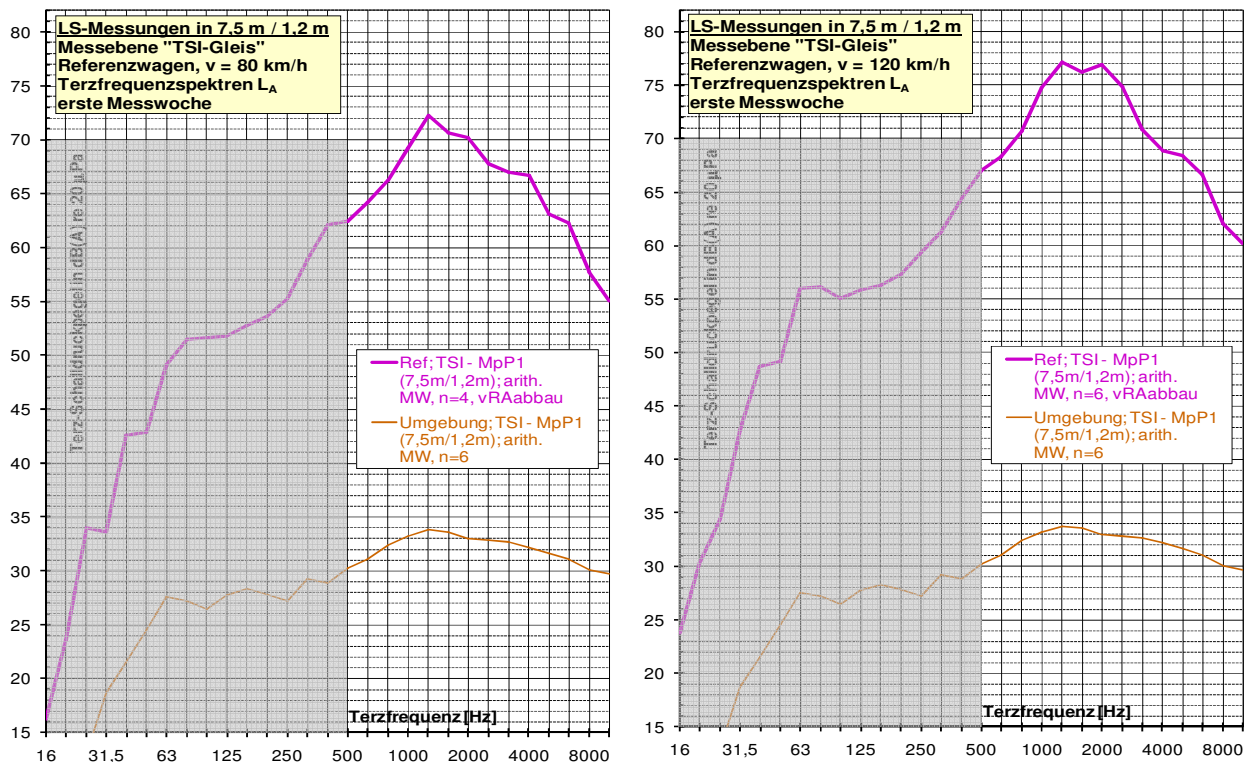
Die Abbildung 3.11d zeigt exemplarisch die in der Meßkampagne gemessenen A-bewerteten Terz-Schalldruckpegelverläufe für die Referenz-Wagengruppe des Testzuges bei einer Zugvorbeifahrt von 80 km/h und 120 km/h auf dem realen ungedämpften Gleisabschnitt. Der durch die Abstrahlung der Schwellen verursachte Schall im Frequenzbereich  $f < 500 \text{ Hz}$  hat für beide Zuggeschwindigkeiten deutlich geringere Pegel als der jeweils durch Rad und Schiene verursachte Schall und trägt somit zum A-bewerteten Summenpegel nur sehr gering bei.

Die Abbildung 3.11e zeigt exemplarisch die in der Meßkampagne gemessenen A-bewerteten Terz-Schalldruckpegelverläufe für die Referenz-Wagengruppe des Testzuges bei einer Zugvorbeifahrt von 80 km/h und 120 km/h auf dem TSI-Gleisabschnitt. Der durch die Abstrahlung der Schwellen verursachte Schall im Frequenzbereich  $f < 500 \text{ Hz}$  hat für beide Zuggeschwindigkeiten deutlich geringere Pegel als der jeweils durch Rad und Schiene verursachte Schall und trägt somit zum A-bewerteten Summenpegel nur sehr gering bei.

Dennoch ist bemerkenswert, dass bei Zugfahrten auf dem realen Gleis mit  $v = 120 \text{ km/h}$  der Pegel im Frequenzbereich  $125 \text{ Hz} < f < 250 \text{ Hz}$  um ca. 9 dB zunimmt, auf dem TSI-Gleis dagegen nur um ca. 4 dB. Dies ist ein Anzeichen für den unterschiedlichen Zustand des Oberbaus zwischen TSI-Gleis und realem Gleis. Diese Tatsache spiegelt sich insbesondere bei der Differenzbildung zweier Vorbeifahrt-Spektren zur Ermittlung des akustischen Effekts einer Maßnahme wider.



**Abb. 3.11d:** Die A-bewerteten Terz-Schalldruckpegelverläufe der Referenzwagengruppe des Testzuges bei Vorbeifahrt auf dem realen ungedämpften Gleis mit einer Zuggeschwindigkeit von  $v = 80$  km/h (links) bzw.  $v = 120$  km/h (rechts) zeigen, dass die Schallabstrahlung der Schwelle bei Frequenzen  $f < 500$  Hz nahezu keinen Effekt auf den Vorbeifahrt-Summenpegel hat, da deren Terzpegel deutlich unter den durch Schiene und insbesondere Rad verursachten Maximalpegeln bei  $1000 \text{ Hz} < f < 2000 \text{ Hz}$  liegen.



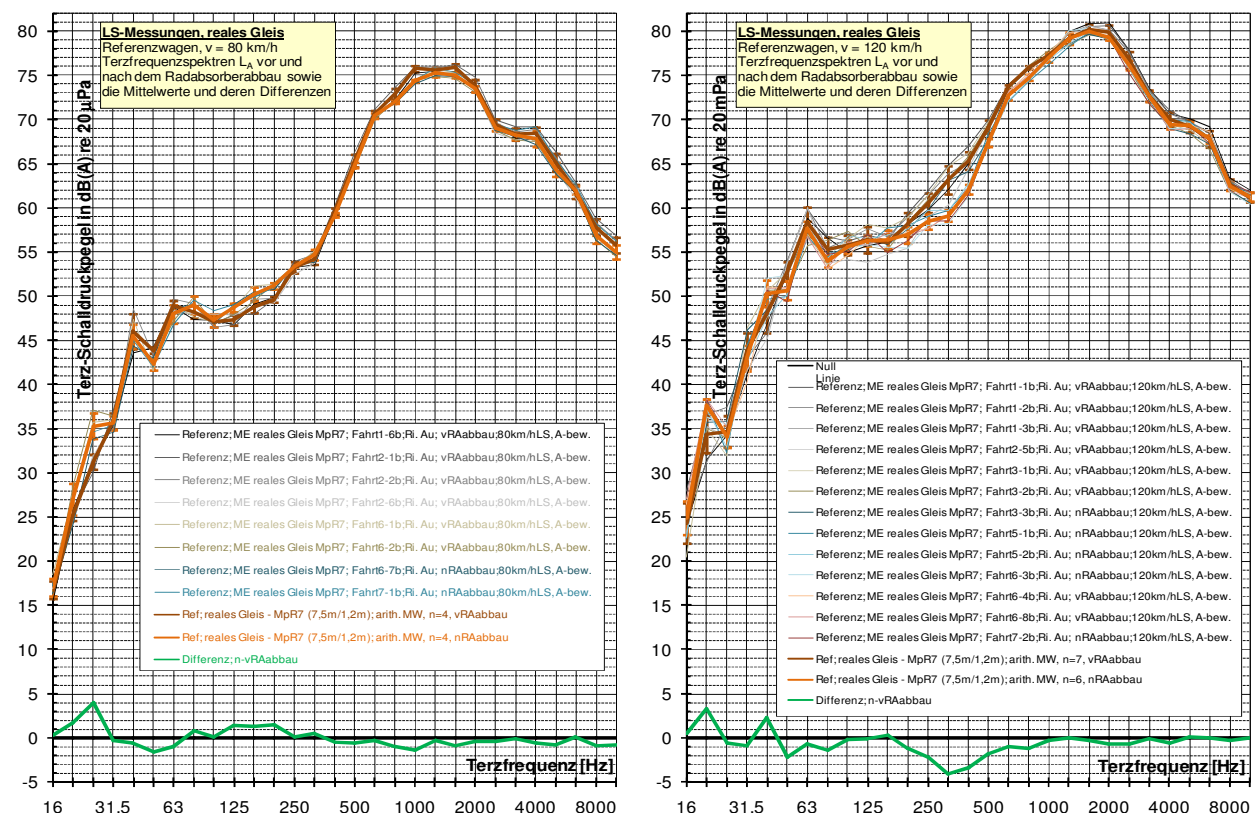
**Abb. 3.11e:** Die A-bewerteten Terz-Schalldruckpegelverläufe der Referenzwagengruppe des Testzuges bei Vorbeifahrt auf dem TSI-Gleis mit einer Zuggeschwindigkeit von  $v = 80$  km/h (links) bzw.  $v = 120$  km/h (rechts) zeigen, dass die Schallabstrahlung der Schwelle bei Frequenzen  $f < 500$  Hz nahezu keinen Effekt auf den Vorbeifahrt-Summenpegel hat, da deren Terzpegel deutlich unter den durch Schiene und insbesondere Rad verursachten Maximalpegeln bei  $1000 \text{ Hz} < f < 2000 \text{ Hz}$  liegen.

Zur Verdeutlichung des unterschiedlichen Zustands des Oberbaus des realen (ungedämpften und gedämpften) Gleises im Vergleich zum TSI-Gleis gibt der Vergleich zweier „theoretisch identischer“ Zugkonfigurationen Aufschluss.

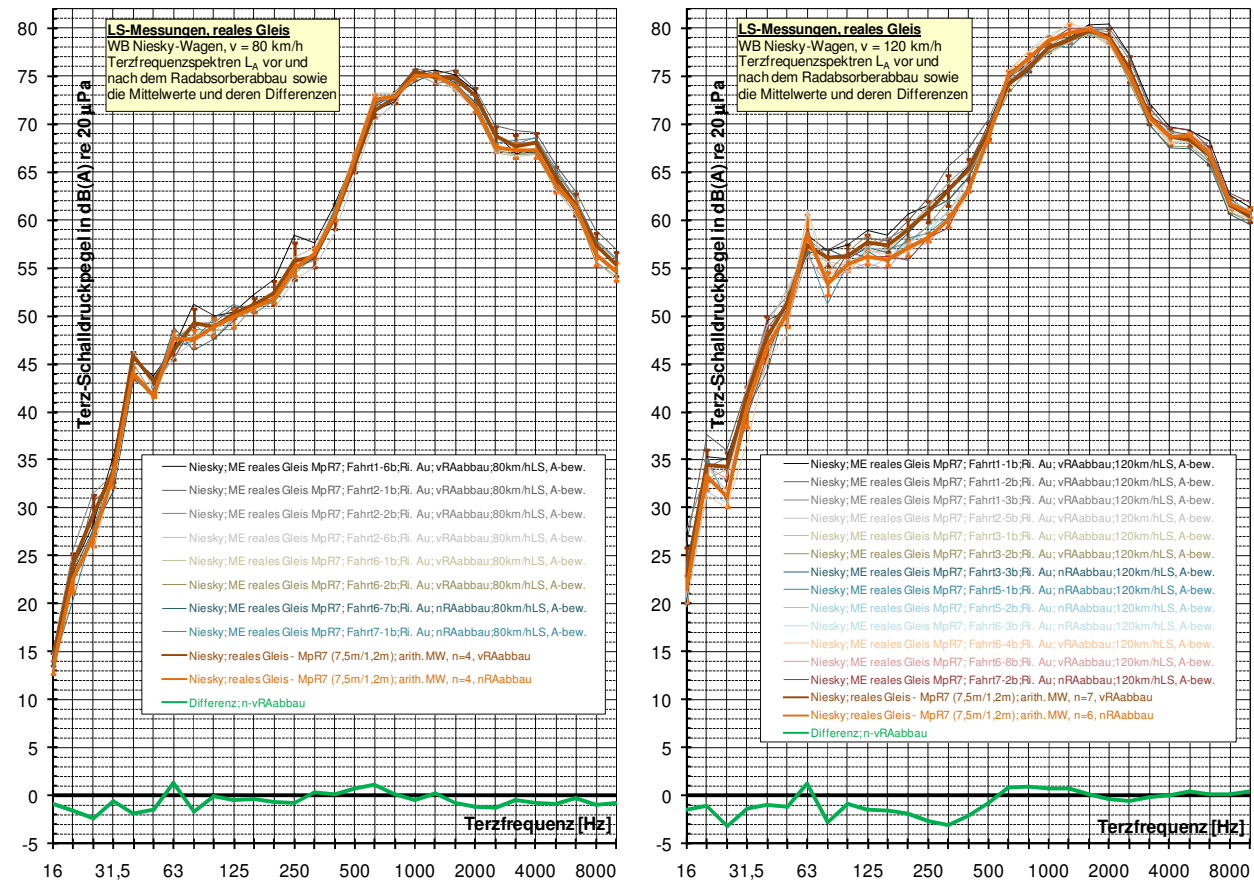
Die Messkampagne wurde innerhalb von zwei Wochen durchgeführt. Zwischen beiden Messwochen wurden die Radabsorber der bedämpften Radsätze entfernt. Somit waren in beiden Messwochen die zwei Wagengruppen mit den Radsätzen BA 308 und BA 309 unterschiedlich, die beiden anderen Wagengruppen „Referenz“ und „DRSS25L“ waren jedoch identisch. Betrachtet man nun durch Vergleich der Vorbeifahrtspektren einer jeweiligen Wagengruppe den „akustischen Effekt“ zwischen den beiden Messwochen, müsste das Resultat „theoretisch“ keinen Effekt ergeben. Abbildung 3.11f zeigt den „Effekt“ der Referenz-Wagengruppe auf dem realen Gleisabschnitt.

Abbildung 3.11g zeigt den „Effekt“ der DRSS25L-Wagengruppe auf dem realen Gleisabschnitt.

Beide Wagengruppen zeigen das erwartete Resultat der Pegelgleichheit erst für Frequenzen  $f > 630$  Hz (im Rahmen von der üblichen Messgenauigkeit von  $< 1$  dB). Unterhalb von 630 Hz ergeben sich jedoch Verbesserungen bzw. Verschlechterungen von teils bis ca  $\pm 5$  dB. Hierbei handelt es sich gemäß der derzeit anerkannten Theorie der Schallabstrahlung von Zügen bzw. Zugfahrten NICHT um unterschiedliche Luftschall-Effekte des Testzuges bzw. einer Wagengruppe des Testzuges, sondern um unterschiedliche Schallpegel, die von der Schwelle abgestrahlt wurden. Die auf den Frequenzbereich  $80 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$  begrenzte Streuung der einzelnen Zugfahrten bei höheren Geschwindigkeiten bekräftigt diese Tatsache, da genau in diesem Frequenzbereich die ersten beiden Schwingungsmoden einer Betonschwelle B70 liegen (dieser in den Abbildungen 3.11f und 3.11g sichtbare Effekt bei jeweils  $v = 120 \text{ km/h}$  tritt bereits mit etwas niedrigeren Pegeldifferenzen auch bei  $v = 100 \text{ km/h}$  – in diesem Bericht nicht explizit dargestellt – auf).



**Abb. 3.11f:** Die A-bewerteten Terz-Schalldruckpegelverläufe der einzelnen Zugfahrten der Referenzwagen- gruppe des Testzuges bei Vorbeifahrt auf dem realen ungedämpften Gleis mit einer Zuggeschwindigkeit von  $v = 80 \text{ km/h}$  (links) bzw.  $v = 120 \text{ km/h}$  (rechts) zeigen eine hohe Streuung der Pegel ausschließlich im Frequenzbereich  $80 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ . Vergleicht man die Mittelung über alle Fahrten der ersten Messwoche („vRAabbau“) mit der Mittelung über alle Fahrten der zweiten Messwoche („nRAabbau“), so zeigen sich für  $f < 630 \text{ Hz}$  berechnete Wirksamkeiten, die kein Luftschall-Effekt der Wagengruppe sind, sondern Schwankungen bei der Schallabstrahlung der Schwellen des realen Gleises als Ursache haben.



**Abb. 3.11g:** Die A-bewerteten Terz-Schalldruckpegelverläufe der einzelnen Zugfahrten der Wagengruppe „DRRS25L“ des Testzuges bei Vorbeifahrt auf dem realen ungedämpften Gleis mit einer Zuggeschwindigkeit von  $v = 80 \text{ km/h}$  (links) bzw.  $v = 120 \text{ km/h}$  (rechts) zeigen eine hohe Streuung der Pegel ausschließlich im Frequenzbereich  $80 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ . Vergleicht man die Mittelung über alle Fahrten der ersten Messwoche („vRAabbau“) mit der Mittelung über alle Fahrten der zweiten Messwoche („nRAabbau“), so zeigen sich für  $f < 630 \text{ Hz}$  berechnete Wirksamkeiten, die kein Luftschall-Effekt der Wagengruppe sind, sondern Schwankungen bei der Schallabstrahlung der Schwellen des realen Gleises als Ursache haben.

**Folgerungen:**

Für die Bewertung der im Projekt entwickelten Radsätze, Radabsorber und Schienenstegdämpfer ist in den A-bewerteten Terz-Schalldruckpegelverläufen ausschließlich der Frequenzbereich  $f > 630 \text{ Hz}$  relevant. Diese Maßnahmen haben nach derzeitigen Erkenntnissen keinen Effekt auf die Schallabstrahlung für Frequenzen  $f < 500 \text{ Hz}$ .

Die bei der Zugvorbeifahrt abgestrahlten Schallpegel im Frequenzbereich  $f < 500 \text{ Hz}$  werden dominant von den Schwellen abgestrahlt. Die bei Zugfahrten auf dem realen Gleis (ungedämpft und gedämpft) auftretenden hohen Pegelunterschiede und Schwankungen sind mit hoher Wahrscheinlichkeit ausschließlich durch Inhomogenitäten im Oberbau verursacht (Stopfungszustand des Schotter, Alter und Form der Schottersteine, ggf. Schwellenhohllagen, ...), die als eine Eigenschaft eines realen Gleises zu verstehen sind. Beim TSI-Gleis, dessen Oberbauzustand ständig überwacht und auf sehr hohem Niveau instand gehalten wird, trat dieser Effekt nicht auf.

Ein „reales Gleis“ unterscheidet sich von einem „TSI-Gleis“ nicht nur durch die Verriffelung der Schiene, sondern auch durch den Zustand des gesamten Oberbaus. Zwar lagen die Schienenriffel des realen Gleises auch unter der „TSI-Grenzkurve“ und waren sogar mit der Verriffelung des TSI-Gleises vergleichbar (siehe Abb. 3.8b), hinsichtlich der „Einbettung der Schwellen im Schotterbett“

und des gesamten Zustandes des Oberbaus waren jedoch Unterschiede zwischen dem realen Gleis und dem TSI-Gleis deutlich.

Im Gegensatz zum Drehgestell Y25 mit starren Radsätzen, mit dem die drei Wagengruppen „Referenz“, „BA308“ und „BA309“ ausgestattet waren, sind die Radsätze im Drehgestell DRRS25L radial beweglich gelagert. Diese radiale Beweglichkeit könnte „theoretisch“ tieffrequente Anregekräfte verursachen, die sich über die Schiene und harte (!) Zwischenlage auf die Schwelle übertragen und so die Schwelle in deren Resonanzfrequenzen im Bereich  $100 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$  zu erhöhten Schwingungen anregen. Dies könnte eine mögliche Begründung für das durch den Testzug verursachte inhomogene Schallabstrahlungsverhalten im tiefen Frequenzbereich sein.

Somit könnte neben den inhomogenen Eigenschaften des Oberbaus und des Schotterzustandes eines realen Gleises auch die radiale Beweglichkeit der Radsätze im Drehgestell DRRS25L ein weiterer Faktor für die erhöhten Schallpegel im tiefen Frequenzbereich sein. Diese Fragestellung lässt sich jedoch anhand der wenigen Zugfahrten mit dem Testzug im Rahmen des Projektes LZarG nicht abschließend bewerten. Aufgrund der A-Bewertung der abgestrahlten Luftschalls hat diese Tatsache jedoch keine Auswirkung auf den Summenpegel der Zugvorbeifahrt und muss somit im Rahmen dieses Projektes nicht weiter beachtet werden. Eine mögliche andere Anregeverhalten des Oberbaus durch das Drehgestell DRRS25L mit radial beweglichen Radsätzen im Vergleich zum Drehgestell Y25 mit radial starren Radsätzen könnte jedoch beim Befahren von Hohlkasten-Brücken mit Schotteroberbau Auswirkungen hinsichtlich des von der Brückenkonstruktion abgestrahlten Schalls haben und sollte daher im Rahmen einer separaten Untersuchung betrachtet werden.

### **3.1.8. Resultate der Messung (spektrale Lärminderungswirkung inkl. Pegelwerte)**

Für alle gültigen Zugvorbeifahrten wurden mittlere Terzfrequenzspektren  $L_A$  für beide Messwochen ermittelt. Zwischen den beiden Messwochen wurden die Radabsorber an den bedämpften Radsätzen entfernt. Somit waren die Wagengruppen „Referenz“ und „DRRS25L“ in beiden Messwochen identisch. Die beiden Wagengruppen „BA308“ und „BA309“ waren in der ersten Messwoche mit den jeweils zugehörigen Radabsorbern versehen und ermöglichten so Aussagen zur Wirksamkeit der bedämpften Radsätze. In der zweiten Messwoche waren die Absorber dieser Radsätze abgebaut und ermöglichten so Aussagen der Wirksamkeit der ungedämpften Radsatzbauart BA308 bzw. BA309 im Vergleich zu anderen Radsatzbauarten, die ihrerseits keine Dämpferbefestigung erlauben. In manchen Grafiken wird daher auch die erste Messwoche mit der Bezeichnung „vor Radabsorberabbau (vRAabbau)“ und die zweite Messwoche mit der Bezeichnung „nach Radabsorberabbau (nRAabbau)“ benannt.

Akustische Wirksamkeiten wurden durch die entsprechenden Terzpegeldifferenzen  $\Delta L_A$  mit der jeweiligen Standardabweichung auf allen drei Abschnitten ermittelt.

#### **3.1.8.1. Wirkung der entwickelten Maßnahmen am Fahrzeug**

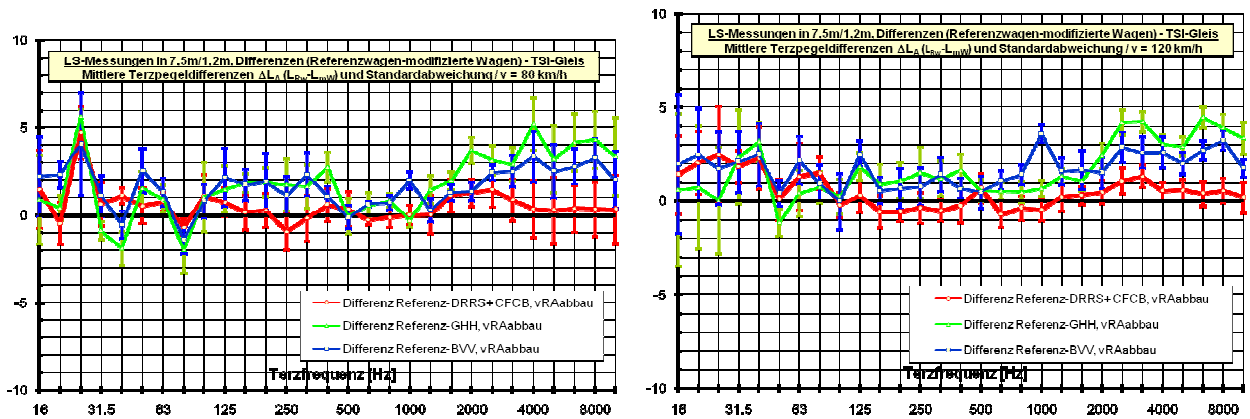
Die jeweils einzelne Wirkung der Maßnahmen

- optimiertes Drehgestell DRRS25L (rote Kurve in Abb. 3.12b-d)
- optimierter GHH-Radsatz BA 308 mit zugehörigen S&V-Raddämpfern (grüne Kurve in Abb. 3.12b-d)
- optimierter BVV-Radsatz BA 309 mit zugehörigen BVV-Raddämpfern (blaue Kurve in Abb. 3.12b-d)

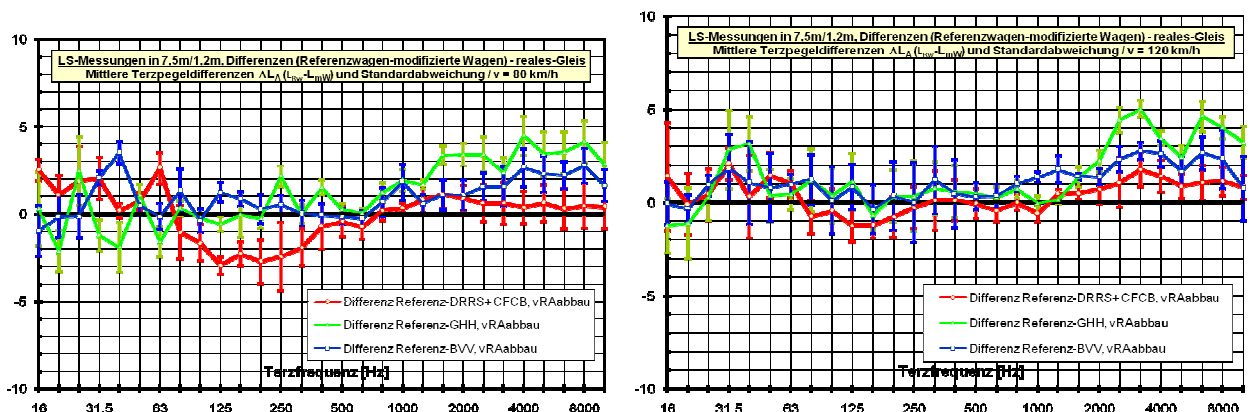
wurde für jeden Gleisabschnitt separat durch Vergleich des Vorbeifahrtpegels mit der Referenz (Drehgestell Y25, Radsatz BA 318) ermittelt.



**Abb. 3.12a:** Die Bestimmung der Wirkung einer einzelnen Maßnahme erfolgte für jeden Messabschnitt separat durch Vergleich der einzelnen Maßnahme mit der Referenz (Foto: gedämpfter Gleisabschnitt)

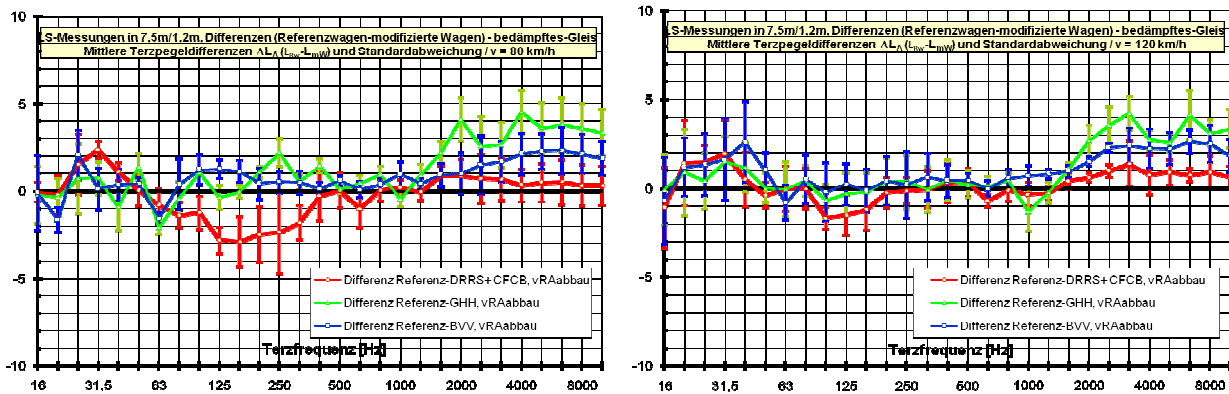


**Abb. 3.12b:** Terz-Schalldruckpegel-Differenzen in dB(A) re 20  $\mu$ Pa zeigen die Wirkung der Maßnahmen „Drehgestell DRRS25L“, „gedämpfter Radsatz BA 308“ sowie „gedämpfter Radsatz BA309“ auf dem TSI-Gleisabschnitt bei den Zuggeschwindigkeiten  $v = 80$  km/h und  $v = 120$  km/h.



**Abb. 3.12c:** Terz-Schalldruckpegel-Differenzen in dB(A) re 20  $\mu$ Pa zeigen die Wirkung der Maßnahmen „Drehgestell DRRS25L“, „gedämpfter Radsatz BA 308“ sowie „gedämpfter Radsatz BA309“ auf dem realen unbedämpften Gleis-Abschnitt bei den Zuggeschwindigkeiten  $v = 80$  km/h und  $v = 120$  km/h.





**Abb. 3.12d:** Terz-Schalldruckpegel-Differenzen in dB(A) re 20  $\mu$ Pa zeigen die Wirkung der Maßnahmen „Drehgestell DRRS25L“, „gedämpfter Radsatz BA 308“ sowie „gedämpfter Radsatz BA309“ auf dem realen bedämpften Gleis-Abschnitt bei den Zuggeschwindigkeiten  $v = 80$  km/h und  $v = 120$  km/h.

Für das **Drehgestell DRRS25** ist keine signifikante Lärminderungswirkung im Terzspektrum zu sehen. Die auf dem realen ungedämpften bzw. realen gedämpften Gleis dargestellte Verschlechterung von bis zu 3 dB(A) zwischen 63 Hz bis ca. 400 Hz dürfte eine Eigenschaft des „realen“ Gleiszustand infolge einer erhöhten Schallabstrahlung der Schwellen sein (siehe Kap. 3.1.7). Da dieser Effekt nur bei Zugfahrten auf dem realen Gleisabschnitt und nicht auf dem TSI-Gleis auftritt, ist der reale Gleiszustand als einzige Ursache dieser erhöhten Schallabstrahlung wahrscheinlich. Da dieser Effekt jedoch bei geringeren Zuggeschwindigkeiten größer ist als bei hohen Zuggeschwindigkeiten des Test-Güterzuges, kann auch eine verstärkte Anregung der Schwellenschwingungen durch Eigenschaften des Drehgestells DRRS25L nicht ausgeschlossen werden (wäre es ausschließlich ein Effekt des Oberbaus, so sollte dieser Effekt mit steigender Zuggeschwindigkeit ansteigen).

Für das Vorbeifahrtgeräusch auf freier Strecke ist diese leichte Pegelzunahme – aus welchen Gründen auch immer – in der A-Bewertung nicht pegelbestimmend.

Die Wirkung der **GHH-Radsätze BA308 mit S&V-Radabsorbern** beträgt für beide Zuggeschwindigkeiten von  $v = 80$  km/h und  $v = 120$  km/h und auf allen drei Gleisabschnitten frequenzselektiv bis zu 5 dB.

Die Wirkung der **BVV-Radsätze BA 309 mit BVV-Radabsorbern** beträgt für beide Zuggeschwindigkeiten von  $v = 80$  km/h und  $v = 120$  km/h und auf allen drei Gleisabschnitten frequenzselektiv bis zu 3 dB:

Somit ist die frequenzselektive Wirkung der **GHH-Radsätze BA308 mit S&V-Radabsorbern** teils etwas höher als die der **BVV-Radsätze BA 309 mit BVV-Radabsorbern**. Dafür beginnt die Wirkung der **BVV-Radsätze BA 309 mit BVV-Radabsorbern** bei höheren Geschwindigkeiten bereits bei tieferen Frequenzen ( $f > 800$  Hz) als bei dem **GHH-Radsätze BA308 mit S&V-Radabsorbern** (Wirkung ab  $f > 1600$  Hz). Dies ist jedoch möglicherweise kein Effekt der jeweiligen Dämpfer, sondern der jeweiligen Radbauform, die sich voneinander deutlich unterscheiden (siehe Abbildungen 3.5 und 3.6). Hat die erste für den Luftschall relevante Schwingungsmode des Rades BA 308 eine höhere Modalfrequenz als das Rad BA 309, so kann die Wirkung des gedämpften Radsatzes BA 308 auch erst bei höheren Frequenzen als die Wirkung des gedämpften Radsatzes BA 309 beginnen.

Aus den jeweiligen Zugvorbeifahrten lassen sich die A-bewerteten Vorbeifahrtpegel bestimmen. Zwar ist die Aussagekraft eines einzelnen Pegelwertes für eine Vorbeifahrt geringer als die in ei-

nem Vorbeifahrtspektrum enthaltene Information, doch erlauben Pegelvergleiche eine komfortable Bewertung einzelnen Maßnahmen untereinander.

Die in folgender Tabelle dargestellten Pegeldifferenzen zeigen die Differenzen der A-bewerten und über alle relevanten Zugfahrten gemittelten Vorbeifahrtpegel einer bestimmten Wagengruppe im Vergleich zur Referenz-Wagengruppe bei allen gemessenen Zuggeschwindigkeiten:

Einzelmaßnahme „am Zug“	TSI-Gleis	Reales Gleis	Reales gedämpftes Gleis
	80 / 100 / 120 km/h	80 / 100 / 120 km/h	80 / 100 / 120 km/h
Niesky-Drehgestell DRRS25L	- 0,5 / - 0,4 / - 0,2 dB	- 0,6 / - 0,3 / - 0,4 dB	- 0,1 / - 0,3 / - 0,2 dB
BVV-Rad BA309 mit BVV-Raddämpfern	- 1,4 / - 1,4 / - 1,9 dB	- 1,1 / - 1,3 / - 1,5 dB	- 0,8 / - 1,1 / - 1,1 dB
GHH-Rad BA308 mit S&V-Raddämpfern	- 2,1 / - 1,9 / - 1,9 dB	- 2,2 / - 1,7 / - 1,5 dB	- 1,3 / - 1,2 / - 1,1 dB

**Abb. 3.12e:** Zusammenstellung der Wirkung der einzelnen Maßnahmen auf jedem der drei Gleisabschnitte bei allen drei gemessenen Zuggeschwindigkeiten.

### **Folgerungen:**

- das Drehgestell DRRS25L hat im gesamten Geschwindigkeitsbereich auf gerader Strecke nur einen geringen Einfluss auf das Rollgeräusch
- die gedämpften Radsätze GHH-BA308 und BVV-BA309 reduzieren das Rollgeräusch im gesamten Geschwindigkeitsbereich um bis zu 2 dB(A) auch bereits bei sehr gering verriffelten Radlaufflächen. Diese Aussage bezieht sich auf die Räder im Maximalprofil (Durchmesser 920 mm).
- die beiden verschiedenen gedämpften Radsätze verhalten sich hinsichtlich ihrer Wirkung im Frequenzspektrum unterschiedlich hinsichtlich des Wirkungsbegins und der maximalen Reduktionswirkung in einzelnen Frequenzbereichen.

### **3.1.8.2. Wirkung der Radsatzbauart**

Die unter Kap. 3.1.8.1. dargestellte Messung erlaubt nur eine Aussage der Wirksamkeit des kompletten entwickelten Radsatzes BA 308 bzw. BA 309 mit jeweils zugehörigen und für die jeweilige Radbauform speziell entwickelten Raddämpfer. Die ermittelten Effekte lassen sich nicht anteilig der Radbauform bzw. dem Raddämpfer zuordnen.

Nach der ersten Messwoche wurden die Raddämpfer von den gedämpften Radsätzen abgebaut, so dass in der zweiten Messwoche die Fahrten des Testzuges mit den oben genannten Radsätzen ohne zugehörige Raddämpfer erfolgten. Dies ermöglichte nun auch Aussagen zur separaten Wirkung der Radbauformen und der jeweiligen Raddämpfer (siehe Kap. 3.1.8.3).

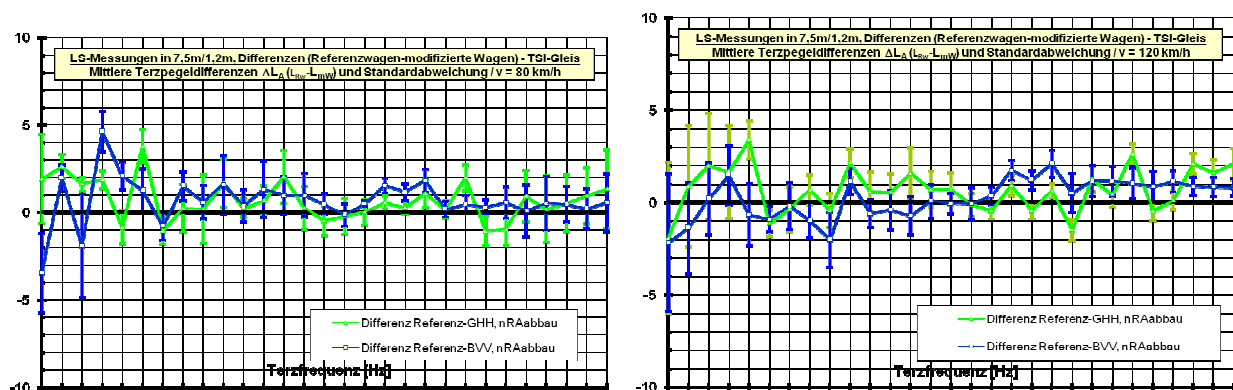
Die jeweils einzelne Wirkung der Radbauformen

- optimierter GHH-Radsatz BA 308 ohne zugehörige S&V-Raddämpfer (grüne Kurve in Abb. 3.13b-d)
- optimierter BVV-Radsatz BA 309 mit zugehörige BVV-Raddämpfer (blaue Kurve in Abb. 3.13b-d 2)

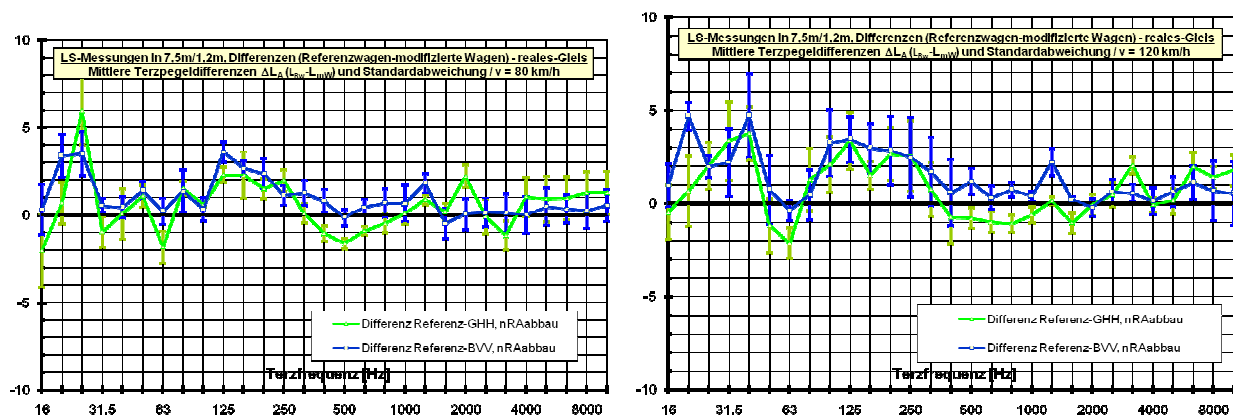
wurde für jeden Gleisabschnitt separat durch Vergleich des Vorbeifahrtpegels mit der Referenz (Drehgestell Y25, Radsatz BA 318) analog zur in Kap. 3.1.8.1. beschriebenen Messung ermittelt.



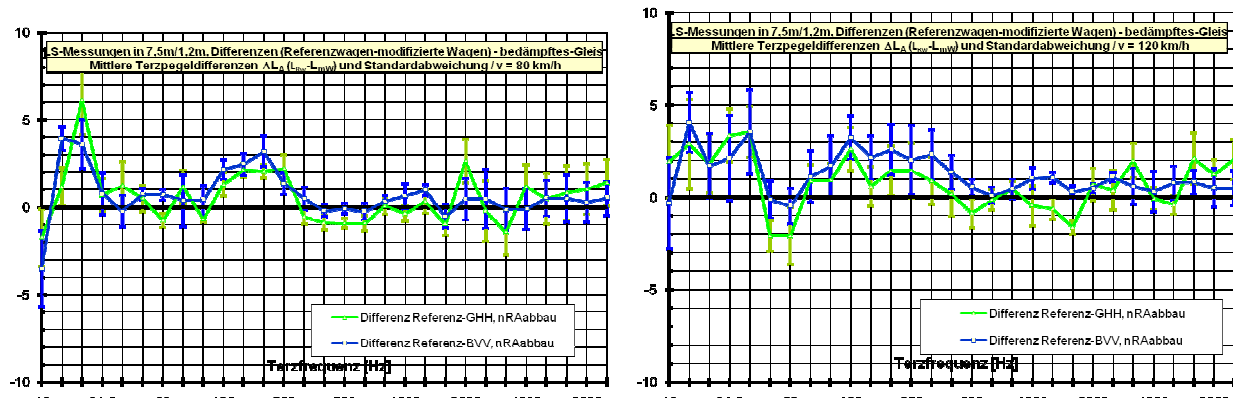
**Abb. 3.13a:** Die Bestimmung der Wirkung einer einzelnen Maßnahme erfolgte für jeden Messabschnitt separat durch Vergleich der einzelnen Maßnahme mit der Referenz (Foto: gedämpfter Gleisabschnitt)



**Abb. 3.13b:** Terz-Schalldruckpegel-Differenzen in dB(A) re 20 µPa zeigen die Wirkung der ungedämpften Radsätze auf dem TSI-Gleisabschnitt bei den Zuggeschwindigkeiten  $v = 80$  km/h und  $v = 120$  km/h.



**Abb. 3.13c:** Terz-Schalldruckpegel-Differenzen in dB(A) re 20 µPa zeigen die Wirkung der ungedämpften Radsätze „GHH-BA308“ und „BVV-BA309“ auf dem realen Gleisabschnitt bei den Zuggeschwindigkeiten  $v = 80$  km/h und  $v = 120$  km/h.



**Abb. 3.13d:** Terz-Schalldruckpegel-Differenzen in dB(A) re 20  $\mu$ Pa zeigen die Wirkung der Maßnahmen „ungedämpfter Radsatz BA 308“ sowie „ungedämpfter Radsatz BA309“ auf dem realen bedämpften Gleisabschnitt bei den Zuggeschwindigkeiten  $v = 80$  km/h und  $v = 120$  km/h.

Die Wirkung der **GHH-Radsätze BA308 ohne Radabsorber** ist im für Radsätze relevanten Frequenzbereich  $f > 1000$  Hz gering und liegt im Rahmen Messungengenauigkeit. Da es bei den Terz-Schalldruckpegel-Differenzen Frequenzbereiche mit geringer positiver und geringer negativer Wirkung gibt, mitteln sich die Effekte im gesamten Frequenzbereich für  $f > 1000$  Hz heraus, so dass die Radbauform BA 308 hinsichtlich des A-bewerteten Summenpegels akustisch gleichwertig zum Referenz-Rad BA 318 angesehen werden kann.

Die Wirkung der **BVV-Radsätze BA309 ohne Radabsorber** ist im für Radsätze relevanten Frequenzbereich  $f > 1000$  Hz nicht signifikant, zeigt jedoch einen Effekt, der den Rahmen der Messungengenauigkeit übersteigt. Da die Differenz zwischen der Radbauform BA 309 und der Referenz-Radbauform BA 318 im gesamten relevanten Frequenzbereich ab  $f > 1000$  Hz positiv ist, kann die Radbauform BA 309 hinsichtlich des A-bewerteten Summenpegels akustisch als etwas besser im Vergleich zum Referenz-Rad BA 318 angesehen werden. Dieser Effekt ist auf dem TSI-Gleis signifikanter als auf dem realen Gleis. Dieser Effekt beruht möglicherweise nicht auf der Radbauform BA 309 an sich, sondern auf den Materialeigenschaften. Im Gegensatz zu den Radbauformen BA 318 und BA 308 wurde bei dem BVV-Rad BA 309 ein spezielles Herstellungsverfahren („Güte und Härtung des Stahls“) verwendet, das diese akustische Verbesserung verursacht.

Der teils positiv scheinende Effekt beider Radsätze BA 308 und BA309 bei Frequenzen  $f < 500$  Hz hat nichts mit der Schallabstrahlung des Rades zu tun. Er zeigt lediglich, dass bei den Zugvorbeifahrten während der zweiten Messwoche die Schwellen während der Pegelmessung der Referenzradsätze mehr Schall abgestrahlt haben als während der Pegelmessung der Wagengruppen mit den Radsätzen BA 308 bzw. BA 309. Diese Tatsache ist in Kapitel 3.1.7 diskutiert.

Aus den jeweiligen Zugvorbeifahrten lassen sich die A-bewerteten Vorbeifahrtpegel bestimmen. Zwar ist die Aussagekraft eines einzelnen Pegelwertes für eine Vorbeifahrt geringer als die in einem Vorbeifahrtsspektrum enthaltene Information, doch erlauben Pegelvergleiche eine komfortable Bewertung einzelnen Maßnahmen untereinander.

Die in folgender Tabelle dargestellten Pegeldifferenzen zeigen die Differenzen der A-bewerten und über alle relevanten Zugfahrten gemittelten Vorbeifahrtpegel einer bestimmten Wagengruppe im Vergleich zur Referenz-Wagengruppe bei allen gemessenen Zuggeschwindigkeiten:

Einzelmaßnahme am Zug	TSI-Gleis	Reales Gleis	Reales gedämpftes Gleis
	80 / 100 / 120 km/h	80 / 100 / 120 km/h	80 / 100 / 120 km/h
BVV-Rad BA309 ohne Raddämpfer	- 0,8 / - 0,9 / - 1,1 dB	- 0,4 / - 0,6 / -0,6 dB	- 0,3 / - 0,5 / -0,6 dB
GHH-Rad BA308 ohne Raddämpfer	- 0,4 / - 0,4 / - 0,2 dB	- 0,3 / -0,4 / + 0,1 dB	+ 0,1 / 0,0 / + 0,2 dB

**Abb. 3.13e:** Zusammenstellung der Wirkung der optimierten Radbauformen BA 308 und BA309 ohne die für diese Radbauformen entwickelten Radabsorber auf jedem der drei Gleisabschnitte bei allen drei gemessenen Zuggeschwindigkeiten.

### Folgerungen:

- das BVV-Rad **BA 309 ohne Raddämpfer** ist auf einem realen ungedämpften und realen gedämpften Gleis bei Betrachtung des Summenpegels nur geringfügig um ca. 0,5 dB leiser als der Referenzradsatz BA 318, auf einem TSI-Gleis liegt die Verbesserung bei knapp 1 dB. Im Rahmen der Messungenauigkeit kann es jedoch auf einem realen Gleis als akustisch gleichwertig zum Referenzrad betrachtet werden. Der auf dem TSI-Gleis gezeigte Effekt liegt jedoch etwas über der Messungenauigkeit, so dass dieses Rad bei optimalen Gleisbedingungen als akustisch geringfügig besser als das Referenzrad betrachtet werden kann.
- das GHH-Rad **BA 308 ohne Raddämpfer** ist auf einem realen ungedämpften und realen gedämpften bei Betrachtung des Summenpegels gleich laut wie das Referenzrad BA 318, auf dem TSI-Gleis ist es geringfügig leiser. Dieser Effekt liegt jedoch im Rahmen der Messungenauigkeit, so dass dieses Rad als akustisch gleichwertig zum Referenzrad BA 318 betrachtet werden kann.

### **3.1.8.3. Wirkung der Radabsorber**

Die unter Kap. 3.1.8.1. dargestellte Messung erlaubt nur eine Aussage der Wirksamkeit des kompletten entwickelten Radsatzes BA 308 bzw. BA 309 mit jeweils zugehörigem und für die jeweilige Radbauform speziell entwickeltem Raddämpfer. Die ermittelten Effekte lassen sich nicht anteilig der Radbauform bzw. dem Raddämpfer zuordnen. Nach der ersten Messwoche wurden die Raddämpfer von den gedämpften Radsätzen abgebaut, so dass in der zweiten Messwoche die Fahrten des Testzuges mit den oben genannten Radsätzen ohne zugehörige Raddämpfer erfolgten. Dies ermöglichte nun auch Aussagen zur separaten Wirkung der Radbauformen und der jeweiligen Raddämpfer (siehe auch Kap. 3.1.8.2).

Die jeweils einzelne Wirkung der Radabsorber

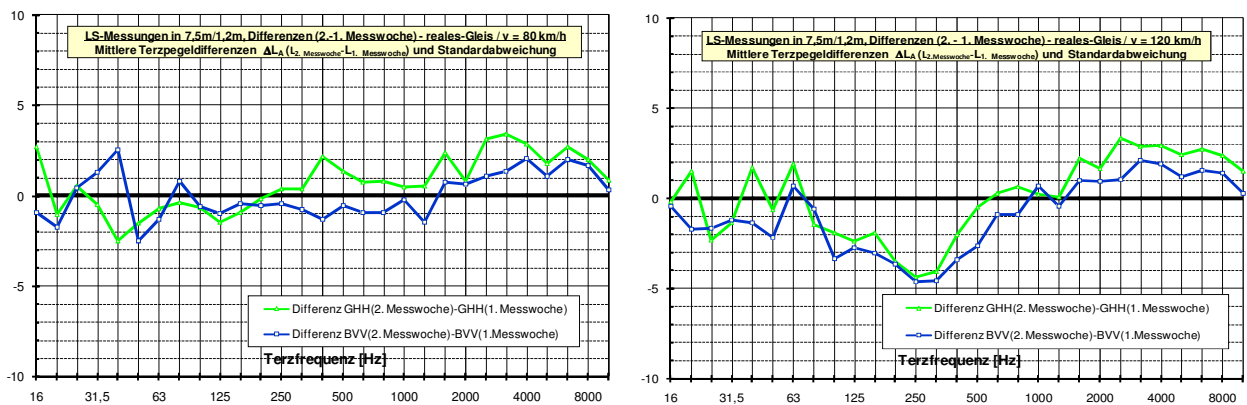
- S&V-Raddämpfer am optimierten GHH-Radsatz BA 308 (grüne Kurve in Abb. 3.14b/c)
- BVV-Raddämpfer am optimierten BVV-Radsatz BA 309 (blaue Kurve in Abb. 3.14b/c)

wurde für jeden Gleisabschnitt separat durch Vergleich des Vorbeifahrtpegels der Messung mit Radabsorber (Messwoche 1) und der Messung ohne Radabsorber (Messwoche 2) ermittelt.

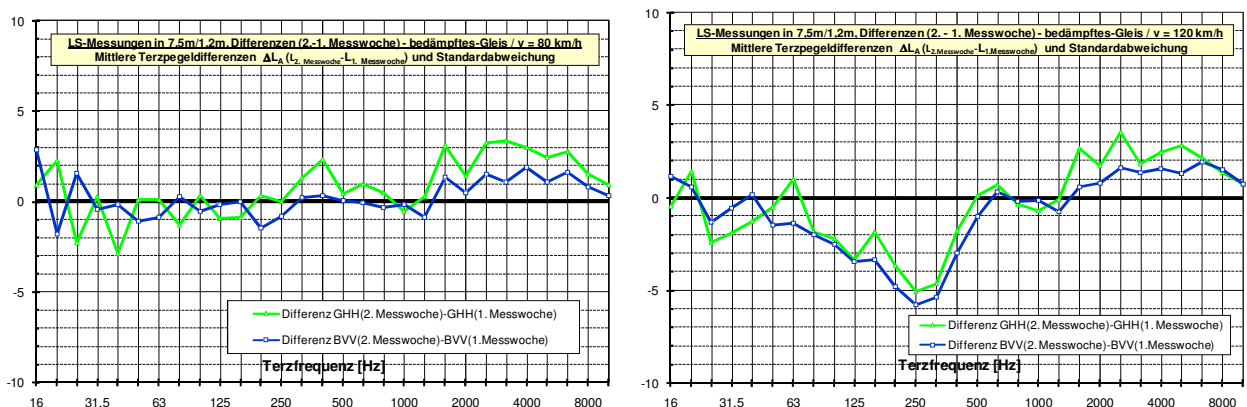


Fotos: DB Systemtechnik, W. Behr

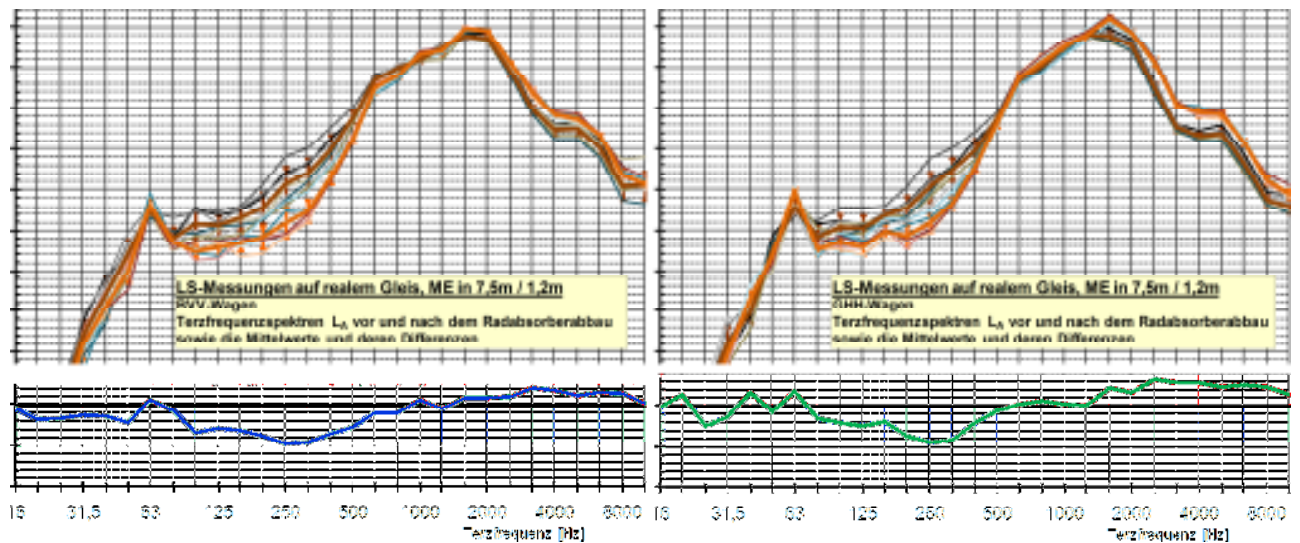
**Abb. 3.14a:** Die Bestimmung der Wirkung der Radabsorber erfolgte für jeden Messabschnitt (Foto exemplarisch: bedämpfter Gleisabschnitt) separat durch Vergleich der Zugvorbeifahrt der Wagen mit Radabsorber (Messwoche 1) und der vergleichbaren Zugvorbeifahrt der Wagen ohne Radabsorber (Messwoche 2).



**Abb. 3.14b:** Terz-Schalldruckpegel-Differenzen in dB(A) re 20 µPa zeigen die separate Wirkung der jeweiligen Radabsorber im eingebauten Zustand auf dem realen unbedämpften Gleisabschnitt bei den Zuggeschwindigkeiten  $v = 80 \text{ km/h}$  und  $v = 120 \text{ km/h}$ . Der Effekt im tiefen Frequenzbereich steht in keinem Zusammenhang zur Schallabstrahlung des Rades bzw. der Wirksamkeit des Raddämpfers, sondern wird durch die Schallabstrahlung der Schwellen verursacht (siehe Kap. 3.1.7 sowie Abb.3.14bc-Anmerk).



**Abb. 3.14c:** Terz-Schalldruckpegel-Differenzen in dB(A) re 20 µPa zeigen die separate Wirkung der jeweiligen Radabsorber im am zugehörigen Rad eingebauten Zustand auf dem realen bedämpften Gleisabschnitt bei den Zuggeschwindigkeiten  $v = 80 \text{ km/h}$  und  $v = 120 \text{ km/h}$ . Der Effekt im tiefen Frequenzbereich steht in keinem Zusammenhang zur Schallabstrahlung des Rades bzw. der Wirksamkeit des Raddämpfers, sondern wird durch die Schallabstrahlung der Schwellen verursacht (siehe Kap. 3.1.7 sowie Abb.3.14bc-Anmerk).



**Abb. 3.14bc-Anmerk:** Bei der Geschwindigkeit von  $v = 120$  km/h streuen die abgestrahlten Luftschallpegel der einzelnen Zugfahrten des Testzuges im tiefen Frequenzbereich in einem ungewöhnlich hohem Maße, im restlichen Frequenzbereich ist jedoch nur eine minimale Streuung festzustellen (links: Terzfrequenzspektren für die BVV-Wagengruppe vor bzw. nach Radabsorberabbau, rechts: Terzfrequenzspektren für die GHH-Wagengruppe vor bzw. nach Radabsorberabbau). Der im Frequenzbereich  $80 \text{ Hz} < f < 630 \text{ Hz}$  aufgetretene Effekt besagt lediglich, dass bei den Zugfahrten auf dem realen Gleis die durch die Schwellen verursachte Schallabstrahlung in der ersten Messwoche geringer war als in der zweiten Messwoche. Ursache dafür können Unterschiede im Oberbau des realen Gleises (z. B. Schwellenhohllagen etc.) sein, die sich auch im Verlauf von Tagen ändern können. Die starke Streuung der gemessenen Vorbeifahrtsspektren bekräftigt dies.

Die Wirkung der **S&V-Radabsorber am GHH-Radsatz BA308** beträgt im für Radsätze relevanten Frequenzbereich  $f > 1000 \text{ Hz}$  bis zu 3 dB.

Die Wirkung der **BVV-Radabsorber am BVV-Radsatz BA309** beträgt im für Radsätze relevanten Frequenzbereich  $f > 1000 \text{ Hz}$  bis zu 2 dB.

Der teils negativ scheinende Effekt beider Radabsorber bei Frequenzen  $f < 500 \text{ Hz}$  hat nichts mit den Radabsorbern zu tun. Ein Raddämpfer kann die Schallabstrahlung bzw. den Vorbeifahrtpegel nur in dem Frequenzbereich reduzieren, in dem das Rad Schall abstrahlt. Die Schallemission durch das Rad dominiert bei Frequenzen  $f > 1000 \text{ Hz}$ . Somit zeigt der im Bereich  $63 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$  aufgetretene Effekt lediglich, dass die Schwellen bei den Zugvorbeifahrten in der ersten Messwoche während der Pegelmessung der Radsätze mit Absorber weniger Schall abgestrahlt haben als bei den Zugvorbeifahrten in der zweiten Messwoche während der Pegelmessung der Radsätze ohne Absorber. Diese Tatsache ist in Kapitel 3.1.7 diskutiert.

Aus den jeweiligen Zugvorbeifahrten lassen sich die A-bewerteten Vorbeifahrtpegel bestimmen. Zwar ist die Aussagekraft eines einzelnen Pegelwertes für eine Vorbeifahrt geringer als die in einem Vorbeifahrtsspektrum enthaltene Information, doch erlauben Pegelvergleiche eine komfortable Bewertung einzelnen Maßnahmen untereinander.

Die in folgender Tabelle dargestellten Pegeldifferenzen zeigen die Differenzen der A-bewerten und über alle relevanten Zugfahrten gemittelten Vorbeifahrtpegel der Wagengruppe „BA308 mit Radabsorber“ bzw. „BA309 mit Radabsorber“ im Vergleich zur selben Wagengruppe ohne an den Rädern angebrachten Radabsorbern bei allen gemessenen Zuggeschwindigkeiten:

Einzelmaßnahme Radabsorber	Reales Gleis	Reales gedämpftes Gleis
	80 / 100 / 120 km/h	80 / 100 / 120 km/h
BVV-Absorber am BVV-Rad BA309	- 0,0 / - 0,4 / -0,4 dB	- 0,3 / - 0,5 / -0,2 dB
S&V-Absorber am GHH-Rad BA308	- 1,1 / -1,1 / -1,2 dB	-1,2 / -1,0 / -1,0 dB

**Abb. 3.14e:** Zusammenstellung der Wirkung der Radabsorber auf den beiden realen Gleisabschnitten (für das TSI-Gleis erfolgte keine Auswertung, da die Fahrten der ersten und der zweiten Messwoche auf dem TSI-Gleis nur bedingt vergleichbar waren) bei allen drei Zuggeschwindigkeiten.

### 3.1.8.4. Wirkung der Schienendämpfer der Fa. Vossloh

Das Vorbeifahrtgeräusch eines Zuges setzt sich aus einzelnen Schallabstrahlungskomponenten des Rades und der Schiene (sowie der Schwelle etc.) zusammen. Der Anteil des von der Schiene abgestrahlten Luftschalls wird damit auch von den Anregefrequenzen der Schiene aufgrund der Zugfahrt beeinflusst. Entscheidende Größen hinsichtlich der Anregefrequenzen sind die Zuggeschwindigkeit sowie die Bremstechnik (Scheibenbremse ohne Beeinflussung der Radlauffläche bzw. Klotzbremse mit Beeinflussung der Radlauffläche). Die Stärke der Verriffelung der Räder hat zwar Einfluss auf den Vorbeifahrtpegel, nicht jedoch auf die Pegelunterschied bzw. die Pegelreduktion aufgrund der Schienendämpfer.

Sind nun Radabsorber an Güterwagenrädern befestigt, so hat dies auch Einfluss auf die Dämpfung bestimmter Modalfrequenzen des Rades (auch wenn ein Radabsorber idealerweise breitbandig wirken sollte) und somit auch auf die Anregung der Schiene und somit auch auf die Wirksamkeit von Schienendämpfern.

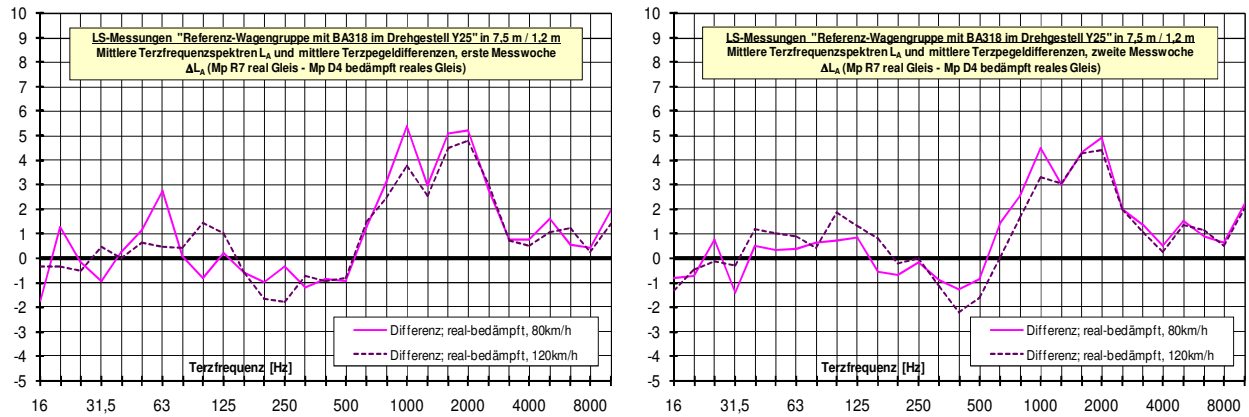
Daher wurde im Rahmen der Messkampagne die Wirksamkeit der Vossloh-Schienendämpfer separat für alle Wagengruppen ermittelt. Hierzu wurde die Differenz der mittleren Terzpegel zwischen real - und bedämpften Messabschnitt pro Wagengruppe gebildet. Die spektrale Darstellung ist nachfolgend für die Zuggeschwindigkeit von  $v = 80 \text{ km/h}$  und  $v = 120 \text{ km/h}$  für alle Wagengruppen zusammengefasst.



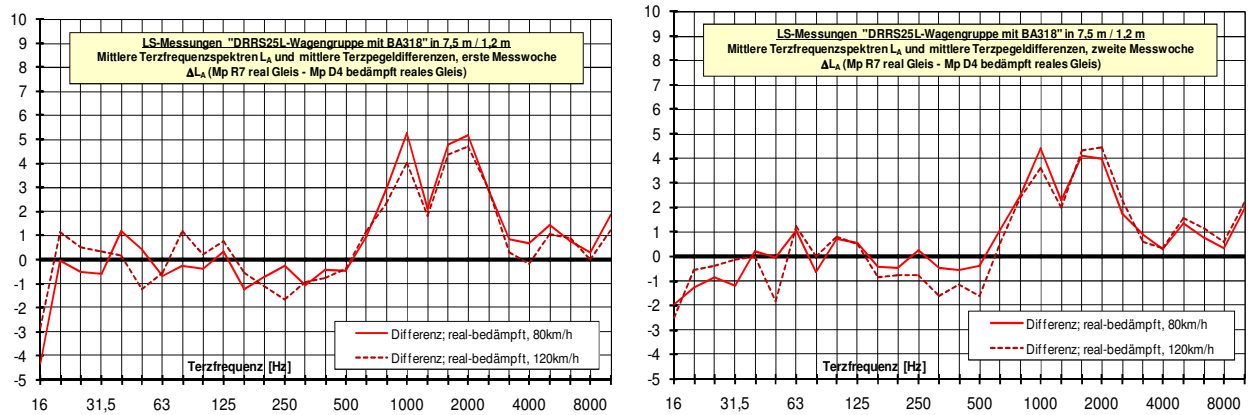
Fotos: DB Systemtechnik, W. Behr

**Abb. 3.15a:** Die Wirkung der Schienendämpfer wurde für jede Wagengruppe separat bestimmt durch Vergleich der Schallabstrahlung auf dem realen unbedämpften und dem realen bedämpften Gleisabschnitt.

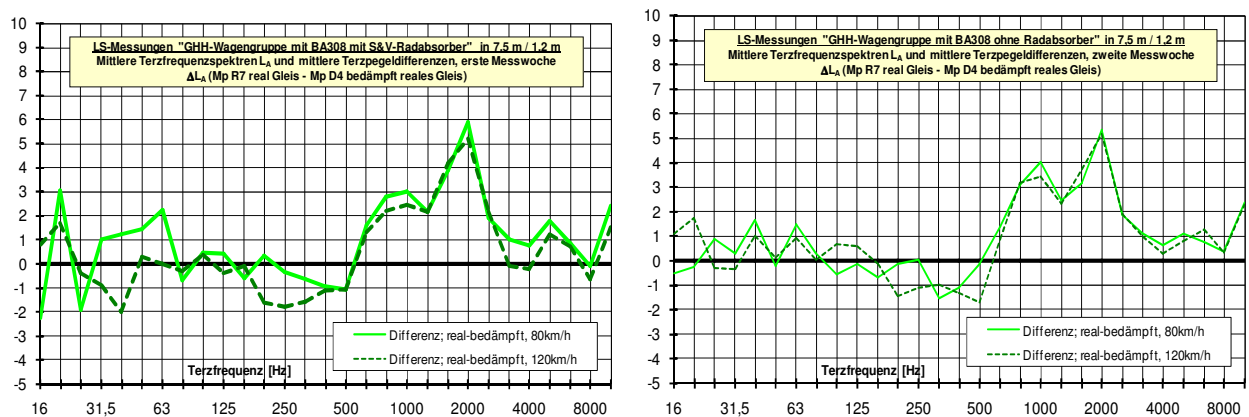




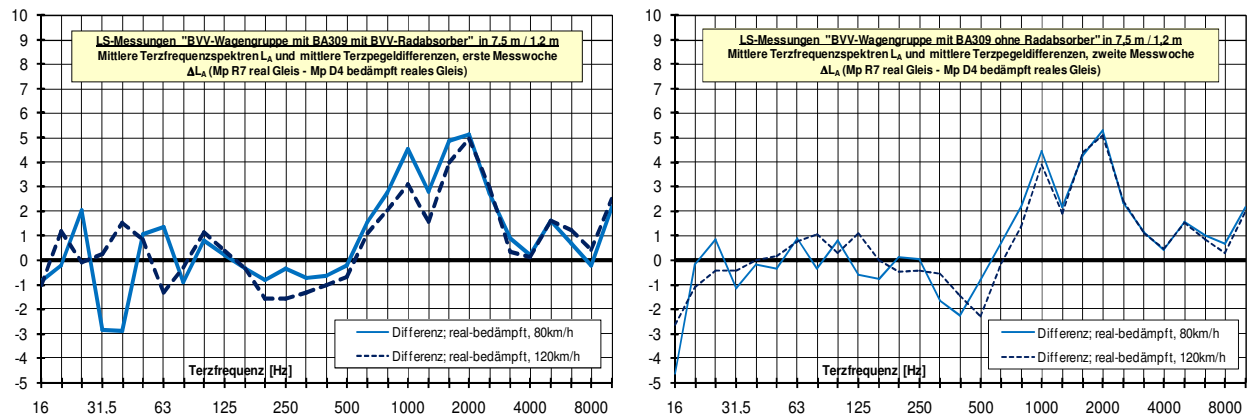
**Abb. 3.15b:** Wirkung der Vossloh-Schienenstegdämpfer auf das Terzspektrum für die Referenz-Wagengruppe bei  $v = 80 \text{ km/h}$  und  $v = 120 \text{ km/h}$ . Die erste und zweite Messwoche sind separat dargestellt.



**Abb. 3.15c:** Wirkung der Vossloh-Schienenstegdämpfer auf das Terzspektrum für die DRRS25L-Wagengruppe bei  $v = 80 \text{ km/h}$  und  $v = 120 \text{ km/h}$ . Die erste und zweite Messwoche sind separat dargestellt.



**Abb. 3.15d:** Wirkung der Vossloh-Schienenstegdämpfer auf das Terzspektrum für die GHH-Wagengruppe bei  $v = 80 \text{ km/h}$  und  $v = 120 \text{ km/h}$ . In der ersten Messwoche waren die GHH-Radsätze BA308 mit S&V-Radabsorbern versehen, die in der zweiten Messwoche entfernt waren.



**Abb. 3.15e:** Wirkung der Vossloh-Schienenstegdämpfer auf das Terzspektrum für die BVV-Wagengruppe bei  $v = 80 \text{ km/h}$  und  $v = 120 \text{ km/h}$ . In der ersten Messwoche waren die BVV-Radsätze BA309 mit BVV-Radabsorbern versehen, die in der zweiten Messwoche entfernt waren.

Die Resultate verdeutlichen anschaulich die im Kapitel 3.1.7 beschriebene Theorie, dass ein Schienendämpfer nur in dem Frequenzbereich effektiv wirken kann, in dem die Schiene zur Schallabstrahlung dominant beiträgt, nämlich im Frequenzbereich  $630 \text{ Hz} < f < 2500 \text{ Hz}$ .

Die Wirkung der Vossloh-Schienendämpfer beträgt bei manchen Terzfrequenzen bis zu 5 dB.

Der jeweilige Effekt wurde für alle Wagengruppen bei den Geschwindigkeiten  $v = 80 / 100 / 120 \text{ km/h}$  analog ermittelt. Aus den jeweiligen Zugvorbeifahrten lassen sich die A-bewerteten Vorbeifahrtpegel bestimmen. Zwar ist die Aussagekraft eines einzelnen Pegelwertes für eine Vorbeifahrt geringer als die in einem Vorbeifahrtsspektrum enthaltene Information, doch erlauben Pegelvergleiche eine komfortable Bewertung einzelnen Maßnahmen untereinander.

Die in folgender Tabelle dargestellten Pegeldifferenzen zeigen die Differenzen der über alle relevanten Zugfahrten gemittelten A-bewerteten Vorbeifahrtpegel einer bestimmten Wagengruppe auf dem bedämpften realen Gleisabschnitt zum unbedämpften realen Gleisabschnitt.

Einzelmaßnahme am Gleis: Vossloh-Schienendämpfer	Reales gedämpftes Gleis - Reales Gleis
	80 / 100 / 120 km/h
Referenz: Y25-Drehgestell + BA318 (1. Woche)	- 3,4 / - 2,9 / -2,9 dB
Referenz: Y25-Drehgestell + BA318 (2. Woche)	- 3,0 / - 2,8 / -2,8 dB
Niesky-Drehgestell DRRS25L + BA318 (1. Woche)	- 2,9 / - 2,9 / -2,7 dB
Niesky-Drehgestell DRRS25L + BA318 (2. Woche)	- 2,5 / - 2,7 / -2,7 dB
Y25 + BVV-Rad BA309 ohne Raddämpfer (2. Woche)	- 2,8 / - 2,7 / -2,8 dB
Y25 + BVV-Rad BA309 mit BVV-Raddämpfern (1. Woche)	- 3,1 / - 2,7 / - 2,5 dB
Y25 + GHH-Rad BA308 ohne Raddämpfer (2. Woche)	-2,5 / - 2,4 / - 2,7 dB
Y25 + GHH-Rad BA308 mit S&V-Raddämpfern (1. Woche)	-2,6 / - 2,3 / - 2,5 dB

**Abb. 3.15f:** Zusammenstellung der Wirkung der Vossloh-Schienendämpfer für alle Wagengruppen bei allen drei Zuggeschwindigkeiten.

In der 1. Messwoche beträgt die Schienendämpferwirkung für alle Wagentypen ca. 2,5 - 3 dB. Diese Wirkung bleibt vom Ausbau der Radabsorber nahezu unverändert.

**Folgerungen:**

- die Vossloh-Schienenendämpfer bewirken eine Reduktion des Vorbeifahrpegels um 2,5 - 3,5 dB.
- Radbauart und Drehgestell haben sehr geringen Einfluss auf die Wirkung der Schienenendämpfer.
- die Wirkung der Schienenendämpfer setzt ab 630 Hz an. In diesem Frequenzbereich erhöht sich auch die vertikale bzw. laterale Gleisabklingrate im Vergleich zur Gleisabklingrate des realen ungedämpften Gleises (siehe Abb. 3.10).

**3.1.8.5. Gesamtwirkung der fahrzeug- und fahrbahnseitigen Maßnahmen**

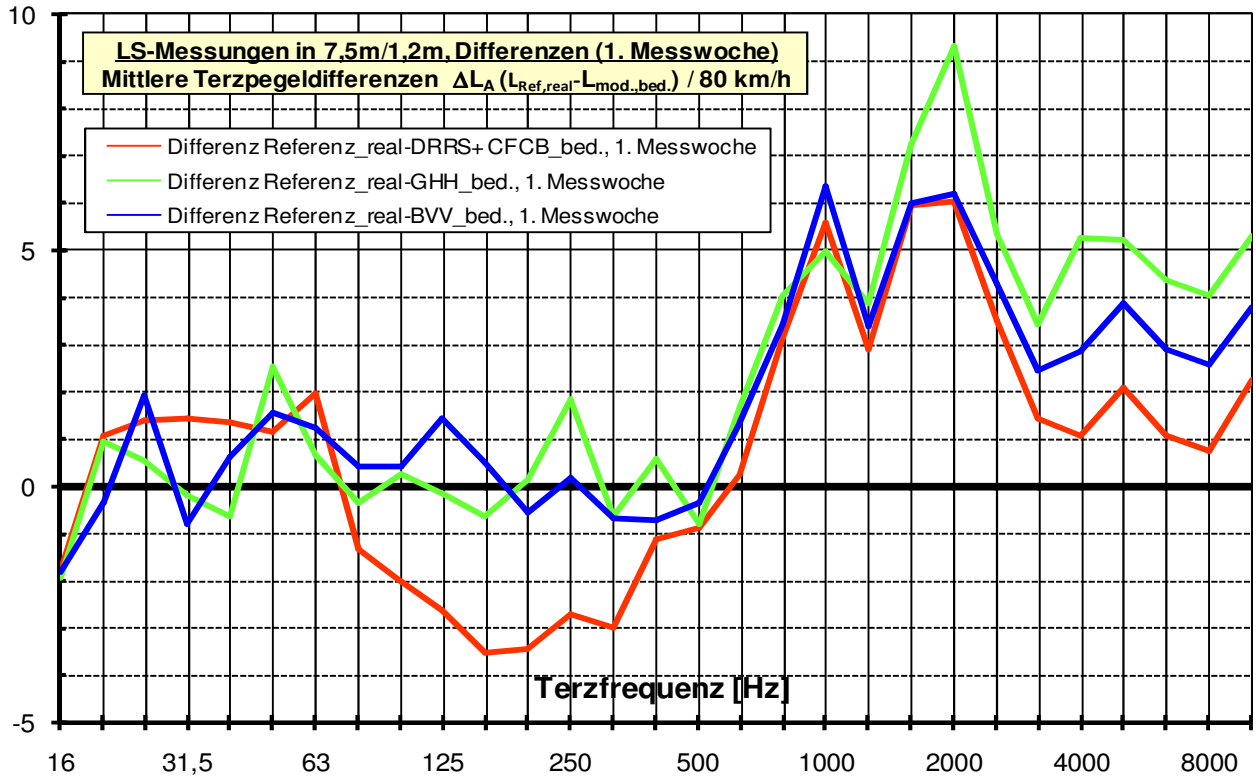
Aus früheren Untersuchungen der Bahnindustrie, der Deutschen Bahn sowie anderen europäischen Bahnen ist bereits bekannt, dass Radabsorber als Einzelmaßnahme eine gewisse Lärmreduktionswirkung von ca. 2 - 3 dB haben können. Ein ähnliches Lärmreduktionspotenzial konnte ebenfalls bei Schienenstegdämpfern als Einzelmaßnahme nachgewiesen werden. Diese Fakten konnten durch die im Rahmen von LZarG durchgeführten Validierungsmessungen der entwickelten Maßnahmen an Fahrzeug und Fahrweg bestätigt werden (siehe Kapitel 3.1.8.3 und 3.1.8.4).

Eine wichtige Fragestellung des Projekts LZarG war es, Aussagen über die Gesamtwirkung von Rad- und Schienenendämpfern zu erhalten. Bei einer optimalen Wirkung von Radabsorbern am Radsatz zusammen mit Schienenstegdämpfern am Gleis wäre theoretisch eine kombinierte Lärmreduktionswirkung denkbar, die höher als die Summe der jeweiligen Wirkung der Einzelmaßnahme „Radabsorber“ und „Schienenstegdämpfer“ ist. Eine derartige Untersuchung erfordert natürlich die genaue Kenntnis der jeweiligen Lärmreduktionswirkung zweier Einzelmaßnahmen. Diese Voraussetzungen waren im Rahmen des Projektes mit der Validierungsmessung gegeben.

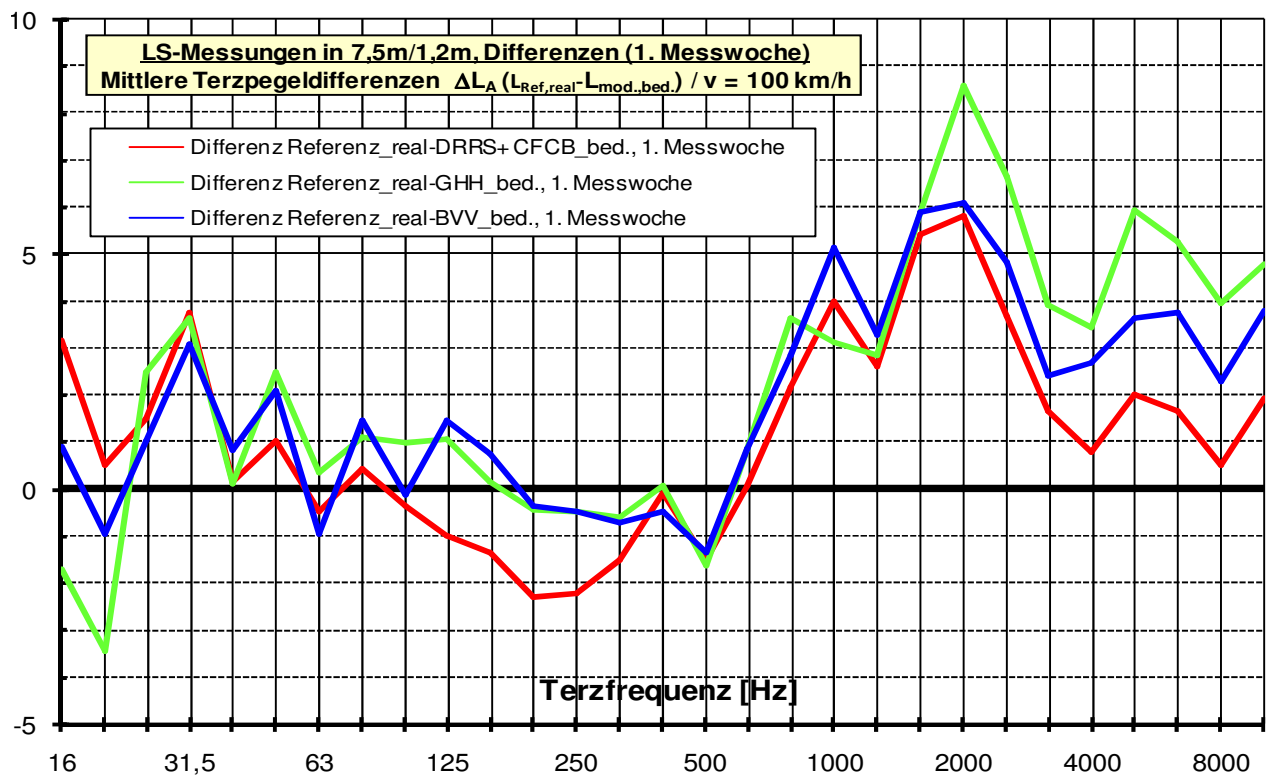
Zur Bestimmung der kombinierten Wirkung der fahrzeug- und fahrbahnseitigen Maßnahmen wurde die Differenz der mittleren Terzpegel zwischen der Referenzwagengruppe auf dem realen Messabschnitt und den modifizierten Wagengruppen auf dem bedämpften Messabschnitt gebildet, wie folgende Abbildung 3.16a veranschaulicht. Die spektrale Darstellung der kombinierten Wirkung der fahrzeug- und fahrbahnseitigen Maßnahmen der drei modifizierten Wagengruppen zeigen die Abbildungen 3.16b-d für alle drei gemessenen Zuggeschwindigkeiten.



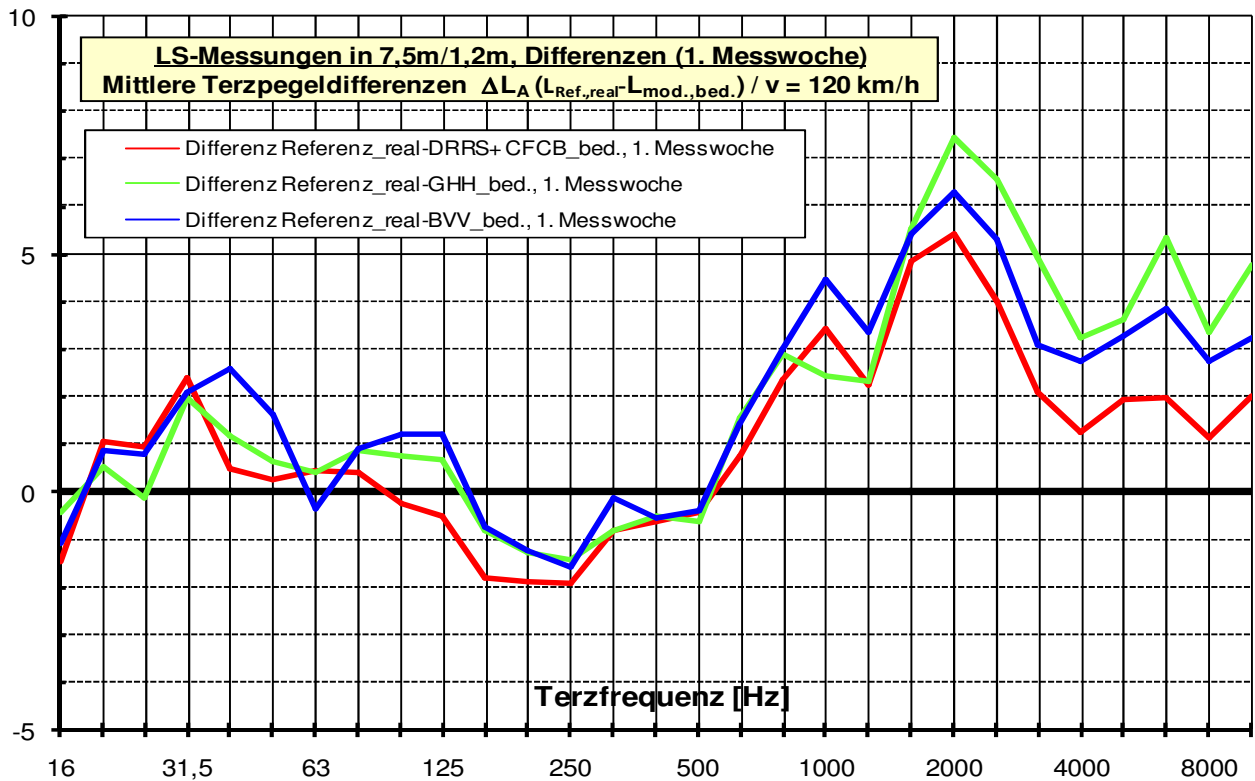
**Abb. 3.16a:** Die Bestimmung der Gesamtwirkung aller Maßnahmen erfolgte für jede Wagengruppe separat durch Vergleich der Schallabstrahlung der jeweiligen Wagengruppe auf dem realen bedämpften mit der Schallabstrahlung der Referenz-Wagengruppe auf dem realen bedämpften Gleisabschnitt.



**Abb. 3.16b:** Die spektrale Darstellung der Wirkung der fahrzeug- und fahrbahnseitigen Maßnahmen auf das Terzspektrum der drei modifizierten Wagengruppen bei der Zuggeschwindigkeit  $v = 80 \text{ km/h}$ .



**Abb. 3.16c:** Die spektrale Darstellung der Wirkung der fahrzeug- und fahrbahnseitigen Maßnahmen auf das Terzspektrum der drei modifizierten Wagengruppen bei der Zuggeschwindigkeit  $v = 100 \text{ km/h}$ .



**Abb. 3.16d:** Die spektrale Darstellung der Wirkung der fahrzeug- und fahrbahnseitigen Maßnahmen auf das Terzspektrum der drei modifizierten Wagengruppen bei der Zuggeschwindigkeit  $v = 120 \text{ km/h}$ .

Die Kombination der fahrzeug- und fahrbahnseitigen Maßnahmen zeigt auf allen drei Gleisabschnitten eine deutliche Wirkung. Für die Wagengruppe GHH sind es bei  $f = 2000 \text{ Hz}$  bis zu 9 dB Schallreduktion. Die Wagengruppen WB Niesky und BVV haben – ebenfalls bei 2000 Hz – eine maximale Schallreduktion von 6 dB.

Im Bereich  $80 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$  dominiert die Schallabstrahlung durch die Schwelle. Aufgrund der Eigenschaften des realen Gleises schwanken die Pegelwerte in diesem Frequenzbereich sowohl an unterschiedlichen Messtagen als auch bereits bei den einzelnen Zugvorbeifahrten. Die Folge sind im Rahmen der Differenzbildung von Pegelverläufen uneinheitliche Resultate hinsichtlich der Wirksamkeit. Die so in den Abbildungen 3.16b-d dargestellten Wirksamkeiten im Frequenzbereich  $f < 500 \text{ Hz}$  sind jedoch keine Effekte der entwickelten fahrzeug- und fahrbahnseitigen Maßnahmen und haben aufgrund der A-Bewertung keinen Effekt auf den Summenpegel der Zugvorbeifahrt.

Der jeweilige Effekt wurde für alle Wagengruppen bei den Geschwindigkeiten  $v = 80 / 100 / 120 \text{ km/h}$  analog ermittelt. Aus den jeweiligen Zugvorbeifahrten lassen sich die A-bewerteten Vorbeifahrtpegel bestimmen. Zwar ist die Aussagekraft eines einzelnen Pegelwertes für eine Vorbeifahrt geringer als die in einem Vorbeifahrtsspektrum enthaltene Information, doch erlauben Pegelvergleiche eine komfortable Bewertung einzelnen Maßnahmen untereinander.

Die in folgender Tabelle dargestellten Pegeldifferenzen zeigen die Differenzen der über alle relevanten Zugfahrten gemittelten A-bewerteten Vorbeifahrtpegel einer bestimmten Wagengruppe auf dem bedämpften realen Gleisabschnitt zur über alle relevanten Zugfahrten gemittelten A-bewerteten Vorbeifahrtpegel der Referenz-Wagengruppe auf dem unbedämpften realen Gleisabschnitt.

Fahrzeugseitige Maßnahme	Reales gedämpftes Gleis - Reales Gleis
	80 / 100 / 120 km/h
Niesky-Drehgestell DRRS25L + BA318	- 3,5 / -3,2 / - 3,1 dB
Y25 + BVV-Rad BA309 mit BVV-Raddämpfern	- 4,2 / - 4,0 / - 4,0 dB
Y25 + GHH-Rad BA308 mit S&V-Raddämpfern	- 4,7 / -4,1 / - 4,0 dB

**Abb. 3.16e:** Zusammenstellung der Gesamt-Wirkung der kombinierten Maßnahmen am Fahrzeug und Fahrweg für alle drei Zuggeschwindigkeiten.

### **Folgerungen:**

- Schienendämpfer und gedämpfte Radsätze bewirken eine Gesamt-Reduktion des Vorbeifahrpegels um mehr als 4 dB.
- die kombinierte Wirkung von Rad- und Schienendämpfern ist etwas geringer als die Summe der jeweiligen Wirkungen der Einzelmaßnahmen an Fahrzeug und Fahrweg, aber zugleich deutlich höher als die Wirkung einer Einzelmaßnahme alleine.
- Die Referenz-Wagengruppe war mit Rädern der BA 318 anstelle der bei DB Schenker sehr oft genutzten Standard-Bauart BA 004 ausgestattet. Da dieses Standardrad BA 004 ca. 1 dB lauter ist als das Referenzrad BA 318, erhöht sich die im Projekt nachgewiesene Gesamtwirkung der Kombination von gedämpften Rädern auf gedämpfter Schiene auf ca. 5 dB.

### **3.2. Luftschallmessung des akustischen Gesamteffektes [2]**

In der in Kapitel 3.1 beschriebenen Validierungsmessung der Einzelmaßnahmen im Sommer 2010 [1] war das Drehgestell DRRS25L mit Referenz-Radsätzen der Bauart 318 ausgestattet, um so den möglichen Einzeleffekt des optimierten Drehgestells feststellen zu können. In der Kombination mit diesen Referenz-Radsätzen BA 318 hatte das Drehgestell bei Fahrt auf gerader Strecke jedoch nur eine sehr geringe akustische Wirksamkeit von ca. 0,5 dB. Im Rahmen der Messkampagne im Sommer 2010 konnte so der kombinierte Effekt dieses Drehgestells DRRS25L in Kombination mit einem optimierten schallgedämmten Radsatz nicht gemessen werden. Dieser Nachweis sollte mit einer weiteren Messung erfolgen, die im April 2011 durchgeführt wurde [2]. Als gedämpfter Radsatz wurde der GHH-Radsatz BA308 mit den zugehörigen S&V-Radsabsorbern gewählt, da dieser gedämpfte Radsatz bei der Validierungsmessung im Sommer 2010 eine etwas bessere Wirksamkeit im Vergleich zum gedämpften BVV-Radsatz BA 309 zeigte.

Die Durchführung dieser Messung ist als Ergänzung zu der umfangreichen Messkampagne vom Sommer 2010 zu verstehen und wurde analog zu dieser Messung mit einem „verkürzten“ Testzug durchgeführt. Ziel war die Bestimmung des maximalen Schallreduktionseffektes eines K-Sohlegebremsten Güterzuges mit allen in LZarG entwickelten Maßnahmen

- schalloptimierter Radsatz (hier BA 309) mit S&V-Radabsorbern
- im optimierten Drehgestell DRRS25L
- auf einem realen gedämpften Gleis

im Vergleich zur Referenz

- Referenz-Radsatz BA 318
- im Referenzdrehgestell Y25
- auf einem realen ungedämpften Gleis.

### 3.2.1. Beschreibung des Testzuges

Der Testzug bestand aus zwei Einheiten zu je drei Güterwagen Tanoos<sup>896</sup>. Eine Einheit stellte die Referenz dar, die andere Einheit enthielt alle entwickelten Optimierungen. Alle Wagen waren mit K-Sohle gebremst. Die Räder aller Radsätze hatten nahezu noch Maximalprofil, denn zwischen der ersten Messung im Sommer 2010 und dieser zweiten Messung im April 2011 wurden die Wagen nur von München zur Fa. Waggonbau Niesky zum Austausch der Radsätze (BA 308 ← → BA318) in den sechs DRRS25L-Drehgestellen und anschließend zurück nach München überführt.

#### - Referenz: Drehgestellbauart Y25 mit K-Sohle-Bremseinheit und Radsatz BA 318



**Abb. 3.17:** Die Referenz-Wagengruppe hatte Y25-Drehgestelle mit Radsätzen der Bauart 318.

#### - Maßnahme: Drehgestellbauart DRRS25 mit der kompakten Klotzbremse CFCB und gedämpften GHH-Radsatz BA 309

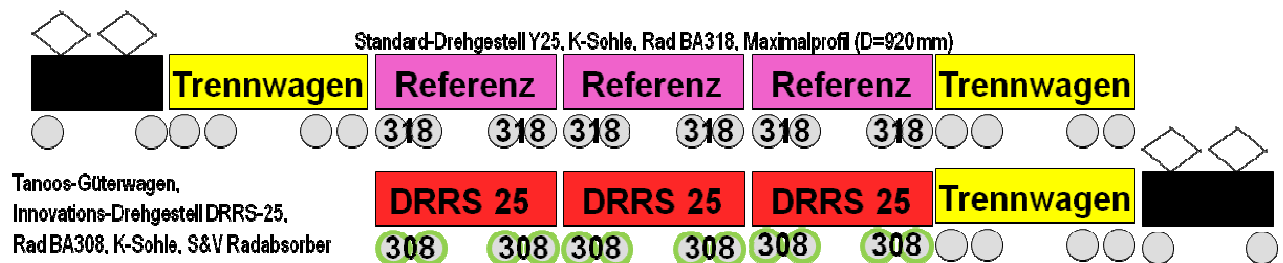
Das DRRS25 Drehgestell der Fa. Waggonbau Niesky GmbH (WB Niesky) ähnelt dem Y25-Drehgestell. Jedoch sind als Federpaket zwei Gummiringe mit kreisförmigem Querschnitt, die zwischen den glockenförmigen Federtöpfen sitzen, eingebaut. Die Radsätze werden in Längsrichtung über federbelastete Reibstößel geführt. Bei der kompakten Klotzbremse CFCB der Fa. Knorr Bremse AG wird die Kraft über Gestängesteller direkt übertragen. Zylinder und Übersetzungshebel sind komplett abgedichtet. Der Klotz- und Radverschleiß wird automatisch nachgestellt.



**Abb. 3.18:** Drehgestell DRRS25L der Fa. Waggonbau Niesky GmbH mit der kompakten Klotzbremse CFCB der Fa. Knorr, Gummifederung der Fa. Contitech und gedämpften GHH-Radsätzen der Bauart 308 mit S&V-Radabsorbern

### - Zusammenstellung des Testzuges

Bei den Vorbeifahrtgeräuschmessungen verkehrten die drei umgebauten und die drei Referenzwagen innerhalb eines Messzuges. Vor und hinter den untersuchten Tanoos<sup>896</sup>-Wagen war jeweils ein scheinbremses Fahrzeug eingestellt, so dass sich die zu messenden Wagen akustisch nicht untereinander beeinflussten.



**Abb. 3.19:** Der akustische Gesamteffekt aller entwickelten Maßnahmen wurde mit einem speziell zusammengestellten Testzug ermittelt.

### - Fahrzeugbedingungen

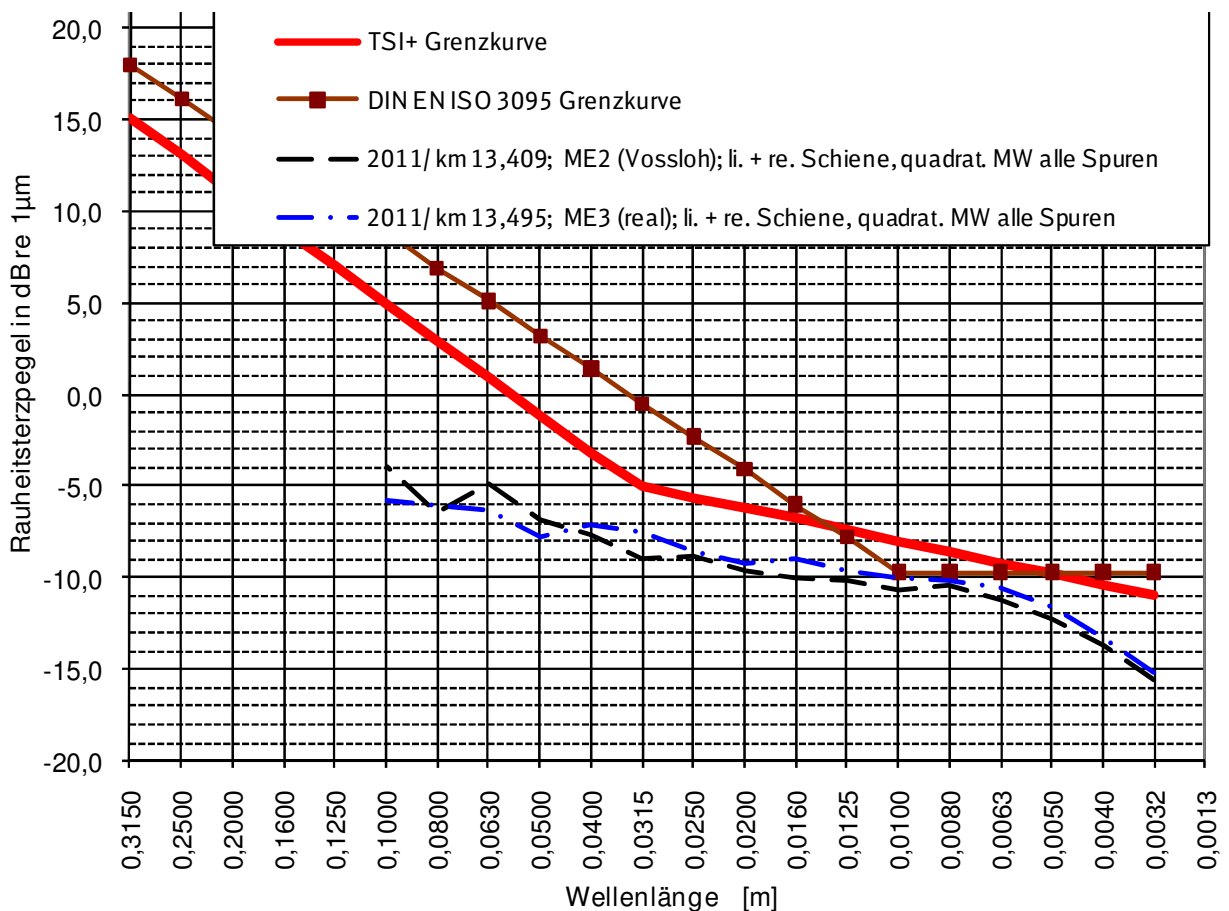
- Die Tanoos<sup>896</sup>-Wagen wurden in Vorbereitung zur Messung eingefahren und eingebremst. Die Strecke betrug ca. 2300 km.
- Zusätzliche Einbremsungen der Wagen erfolgten bei der Überführung des Messzuges zur Messstelle (ca. 70 km) und während der Messfahrten.
- Bei der Überführung und den Messungen waren alle Wagen unbeladen.
- Die Radoberflächen waren in einem optisch guten Zustand. Während der Vorbeifahrten waren an den Tanoos<sup>896</sup>-Wagen keine Flachstellen oder andere Unregelmäßigkeiten hörbar.



### 3.2.2. Messung der Schienenrauheiten der Teststrecke

Die Schienenrauheit der zwei Messabschnitte (reales Gleis und reales gedämpftes Gleis) wurde entsprechend der Norm DIN EN ISO 3095:2005, Anhang A [3] gemessen.

Die Ergebnisse dieser Schienenoberflächenmessungen sind als Wellenlängenterzspektren dargestellt. Dabei wurden die Spektren aller Einzelspuren beider Schienen quadratisch gemittelt und im Vergleich zu der TSI – Grenzkurve zur Orientierung bzw. DIN EN ISO 3095 - Grenzkurve dargestellt.

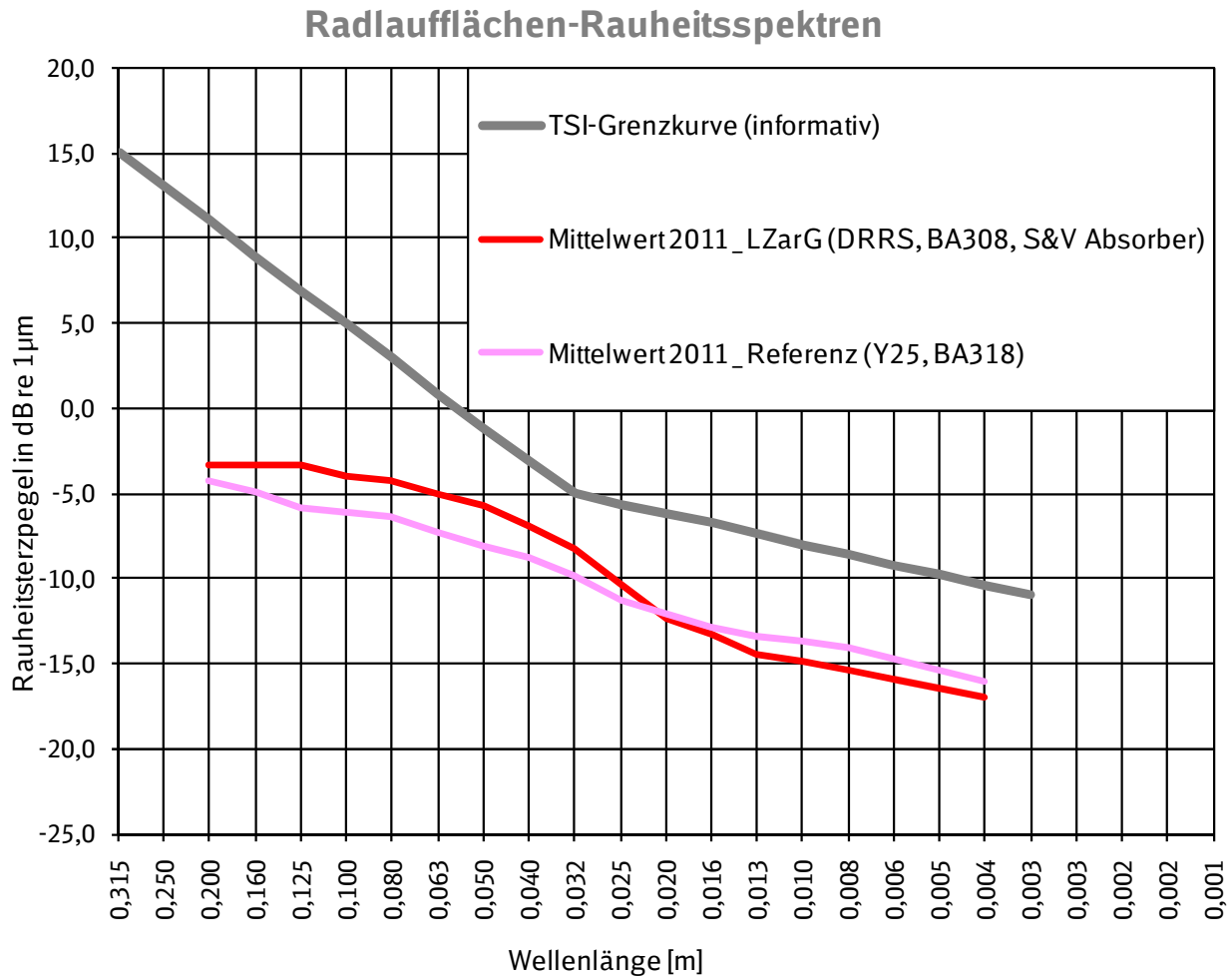


**Abb. 3.20:** Die Schienenriffel der zwei Testabschnitte waren vergleichbar, so dass bei der Aus- und Bewertung der Effektmessung keine Ausgleichsrechnung erfolgen musste.

Der Effekt der Schienendämpfer wird durch einen Vergleich der Schallabstrahlung des Testzuges auf dem realen ungedämpften und realen gedämpften Gleis ermittelt. Dies war ohne weitere Korrekturen nur möglich, da beide Gleisabschnitte eine vergleichbare Schienenverriffelung aufweisen.

### 3.2.3. Messung der Radrauheiten des Testzuges

Die mittleren Radrauheitsspektren der jeweiligen Wagengruppe vor den akustischen Vorbeifahrtmessungen sind im folgenden Diagramm dargestellt. Zur Orientierung wurde die TSI-Grenzkurve für Schienenrauheit mit dargestellt.

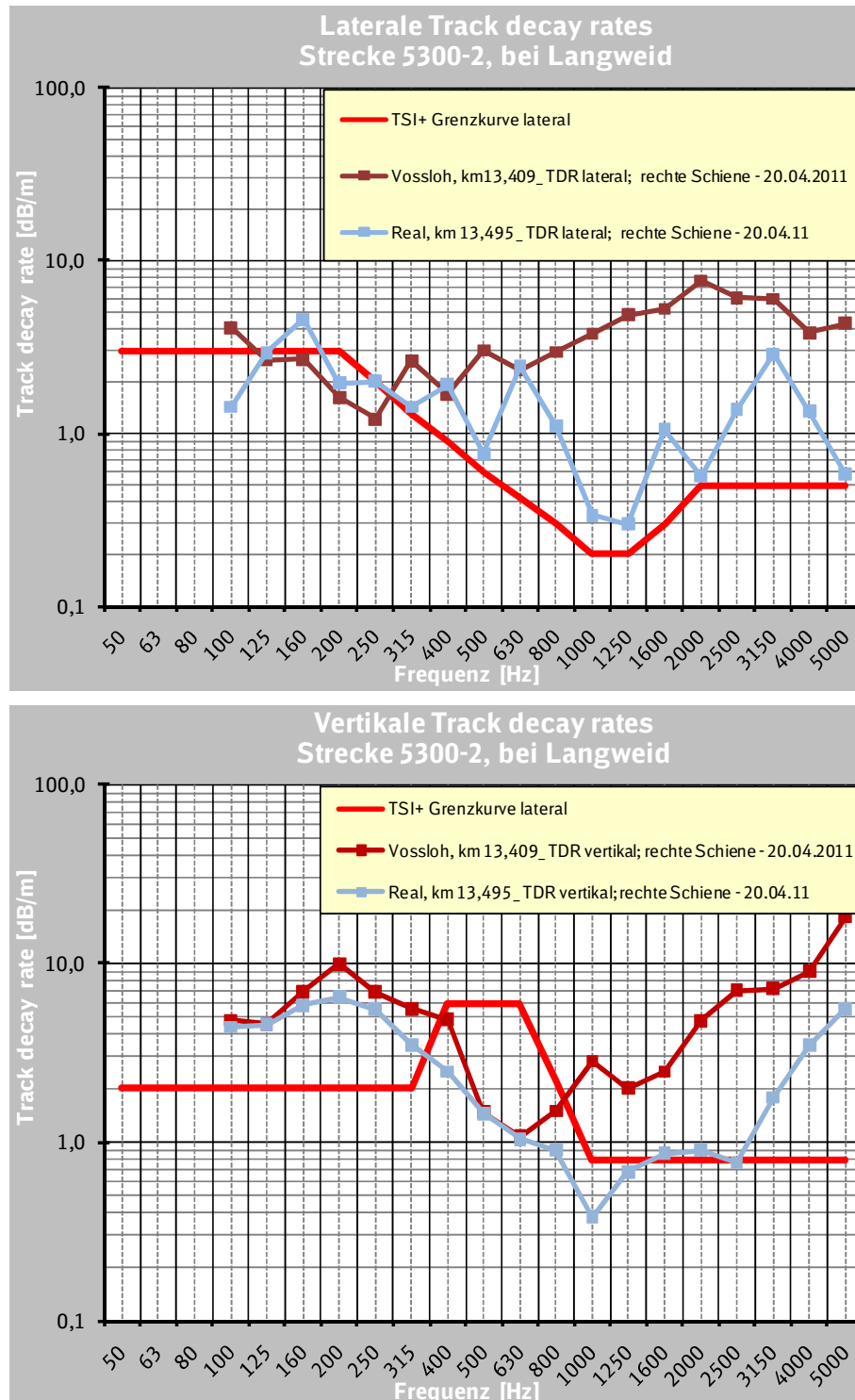


**Abb. 3.21:** Die Radriffel der Radlaufflächen der unterschiedlichen Testradsätze wurden vor der Messkampagne gemessen. Sie sind nahezu vergleichbar.

Die mittleren Radrauheitsspektren der Referenzwagen und der LZarG–Testwagen waren unterhalb der Wellenlänge  $\lambda \leq 0,032$  m vergleichbar. Bei den Wellenlängen  $\lambda > 0,032$  m wiesen die LZarG – Testwagen jedoch ein bis zu 2 dB höheres Radrauheitsspektrum auf als die der Referenzwagen. Die in diesem Wellenlängenbereich festgestellten Unterschiede der Radrauheitspegel im Bereich oberhalb von  $\lambda \geq 0,032$  m wirken sich umgerechnet für die untersuchten Fahrgeschwindigkeiten 80 km/h bzw. 120 km/h im Frequenzbereich unterhalb von 800 Hz bzw. von 1000 Hz aus. Da die Schienenrauheitspegel (siehe Abb. 3.20) in diesem Bereich in etwa vergleichbar sind, verringert sich dieser Effekt auf das Rollgeräusch aufgrund der quadratischen Summation der Rad- und Schienenrauheit auf maximal ca. 1 dB. Eine Abschätzung nach der Methode des Einzahndicators ergibt einen Einfluss von 0,88 dB [6].

#### 3.2.4. Messung der Gleisabklingrate der Teststrecke

Die Gleisabklingraten (engl. Track decay rate = TDR) wurden bereits im Jahr 2009 gemessen (siehe Abbildung 3.10). Da die Gleisabklingraten in gewisser Hinsicht auch Aussagen zum Gleiszustand liefern, wurden diese zur Kontrolle nochmals direkt vor den akustischen Vorbeifahrtmessungen in beiden Messabschnitten gemessen. Sie sind jeweils für die rechte Schiene in Abbildung 3.22 dargestellt.



**Abb. 3.22:** Ein Vergleich der Gleisabklingraten der zwei Gleisabschnitte („Vossloh“ = realer gedämpfter Abschnitt mit Schienendämpfern, „Real“ = realer Gleisabschnitt ohne Schienendämpfer) zeigt wiederum wie in Abb. 3.10, dass die Wirkung der Vossloh-Schienendämpfer bei Frequenzen  $f > 630$  Hz zu erwarten ist.

### 3.2.5. Umgebungsbedingungen der Messung (Wetter)

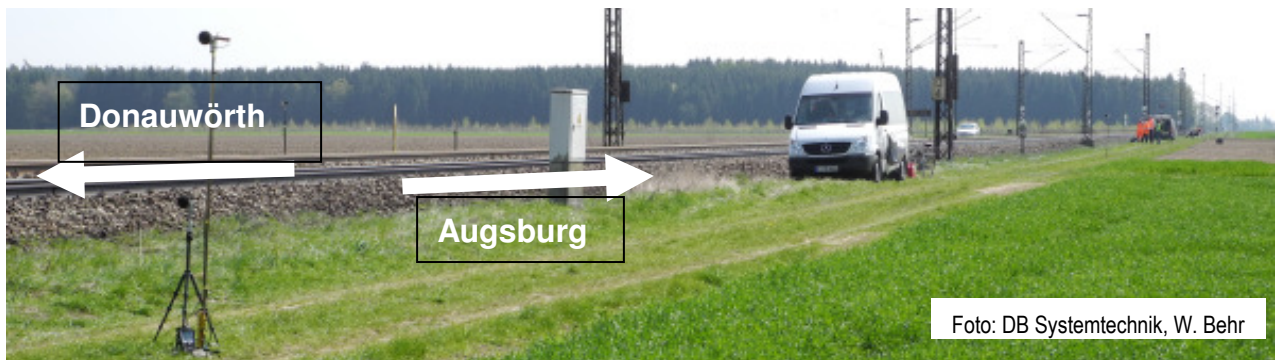
Während des gesamten Messablaufs waren bei den Versuchsfahrten die Vorgaben der DIN EN ISO 3095:2005 hinsichtlich der akustischen Umgebung und des Streckenzustands, der meteorologischen Voraussetzungen und des Fremdgeräuschpegels erfüllt.

### 3.2.6. Aufbau der Messpunkte für die Messung der Vorbeifahrt

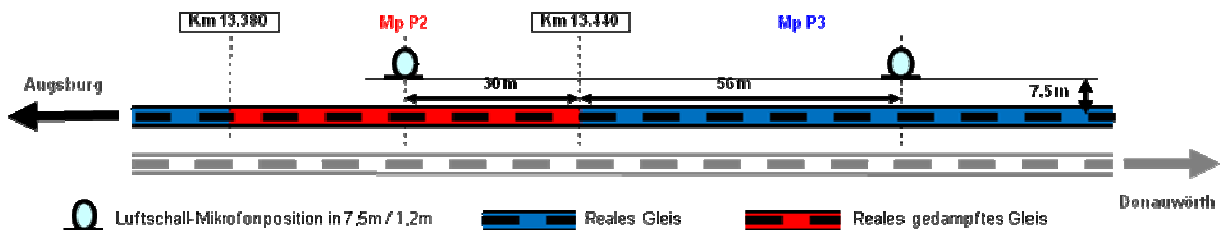
In der Mitte der zwei Gleisabschnitte wurde jeweils eine Messebene

- bei km 13,409 (reales bedämpftes Gleis) bzw.
- bei km 13,495 (reales unbedämpftes Gleis) festgelegt.

In den zwei Messebenen wurden jeweils ein Luftschallmesspunkt in einer Entfernung von 7,5 m zum Gleis und einer Höhe von 1,2 m über dem Gleis aufgebaut (Messpunkte P2 und P3).



**Abb. 3.23a:** Die Messungen wurden auf der Strecke Augsburg-Donauwörth in der Nähe von Langweid durchgeführt. Dort war die Strecke gerade ohne eine Dammlage, die Schallausbreitungsbedingungen waren ideal und es gab keine Störgeräusche in der Umgebung.



**Abb. 3.23b:** Die Position der Luftschallmikrofone an den zwei Gleisabschnitten

### 3.2.7. Durchführung der Messung

Die Vorbeifahrmessungen wurden an der zweigleisigen Strecke zwischen Augsburg und Donauwörth rechts vom Gleis in Richtung Augsburg im Bereich zwischen den Streckenkilometern 13,4 und 13,5 durchgeführt. Der Messzug pendelte zwischen den Bahnhöfen Augsburg und Meitingen.

In den zwei Messabschnitten war der Oberbau - bis auf die Schienendämpfer im bedämpften Messabschnitt - identisch und die Strecke gerade und mit optimalen Ausbreitungsbedingungen. Das Gleis Augsburg-Donauwörth war in einem guten Unterhaltungszustand.

Der Ablauf der gesamten Messkampagne stellte sich folgendermaßen dar:

- 12.-13.04.2011 Messung der Schienenrauheit für beide Messebenen
- 14.-15.04.2011 Messung der Radrauheit
- 18.04.2011 Vorbeifahrmessung der rechten Seite des Messzuges, Dreiecksfahrt
- 19.04.2011 Vorbeifahrmessung der linken Seite des Messzuges, Dreiecksfahrt
- 20.04.2011 Messung der TDR für beide Messebenen, Vorbeifahrmessung der rechten Seite des Messzuges, Dreiecksfahrt
- 21.04.2011 Vorbeifahrmessung der linken Seite des Messzuges

### 3.2.8. Resultate der Messung (spektrale Lärminderungswirkung inkl. Pegelwerte)

Für alle gültigen Zugvorbeifahrten wurden mittlere Terzfrequenzspektren  $L_A$  mit Standardabweichung und die entsprechenden Terzpegeldifferenzen  $\Delta L_A$  auf beiden Abschnitten ermittelt. Da der Testzug aus zwei Wagengruppen („Referenz“ und „alle Maßnahmen“) bestand und die Messung an zwei Messebenen („reales ungedämpftes Gleis“, „reales bedämpftes Gleis“) stattfand, konnten folgende akustischen Wirksamkeiten anhand der unten genannten Vergleiche ermittelt werden:

Einzelwirkung der fahrzeugseitigen Maßnahmen „gedämpfter GHH-Radsatz BA 308 mit S&V-Radabsorbern im Niesky-DRRS25L“ auf beiden Gleisabschnitten (Resultate in Kap. 3.2.8.1):

„LZarG-Wagen auf ungedämpften Gleis“ vs. „Referenz-Wagen auf ungedämpften Gleis“

„LZarG-Wagen auf gedämpften Gleis“ vs. „Referenz-Wagen auf gedämpften Gleis“

Einzelwirkung der fahrbahnseitigen Maßnahme „Vossloh-Schienendämpfer“ für beide Wagengruppen (Resultate in Kap. 3.2.8.2):

„Referenz-Wagen auf ungedämpften Gleis“ vs. „Referenz-Wagen auf gedämpften Gleis“

„LZarG-Wagen auf ungedämpften Gleis“ vs. „LZarG-Wagen auf gedämpften Gleis“

Maximale Gesamtwirkung (Resultate in Kapitel 3.2.8.3):

„Referenz-Wagen auf ungedämpften Gleis“ vs. „LZarG-Wagen auf gedämpften Gleis“

#### 3.2.8.1. Wirkung der entwickelten Maßnahmen am Fahrzeug

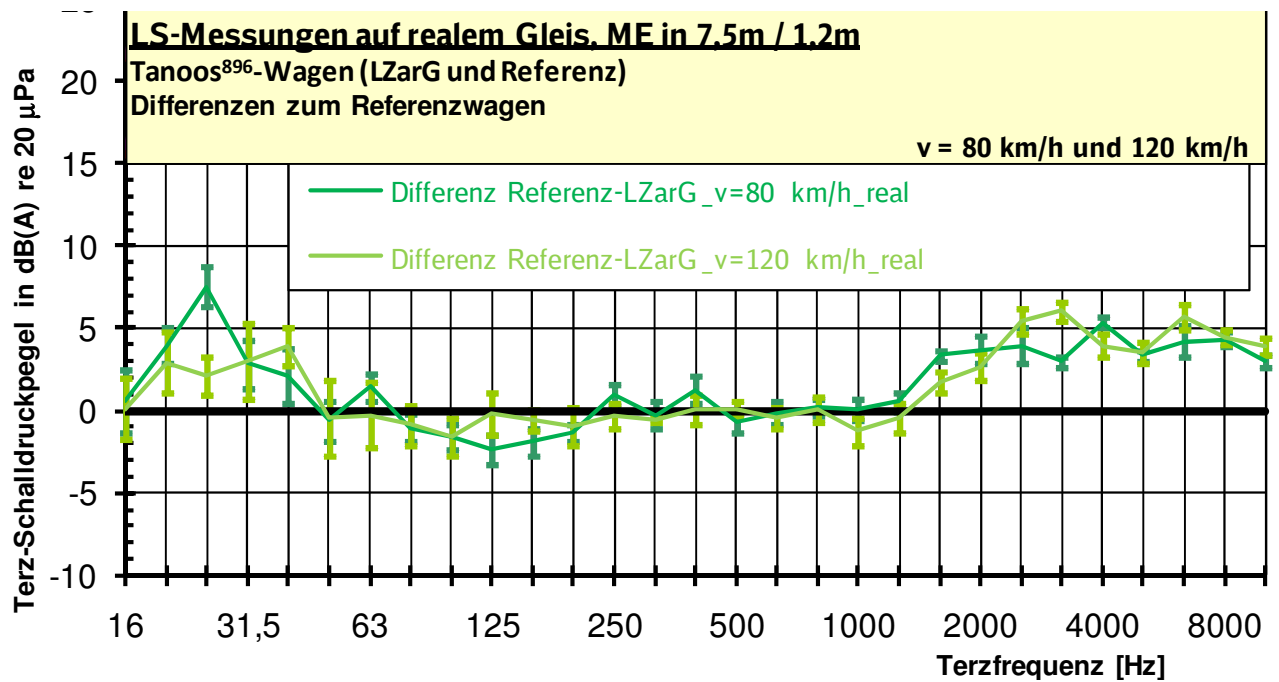
Die Wirkung der Maßnahme „optimiertes Drehgestell DRRS25L mit optimierten GHH-Radsatz BA 308 mit zugehörigen S&V-Raddämpfern“ wurde für beide Gleisabschnitt separat durch Vergleich des Vorbeifahrtpegels mit der Referenz (Drehgestell Y25, Radsatz BA 318) ermittelt.



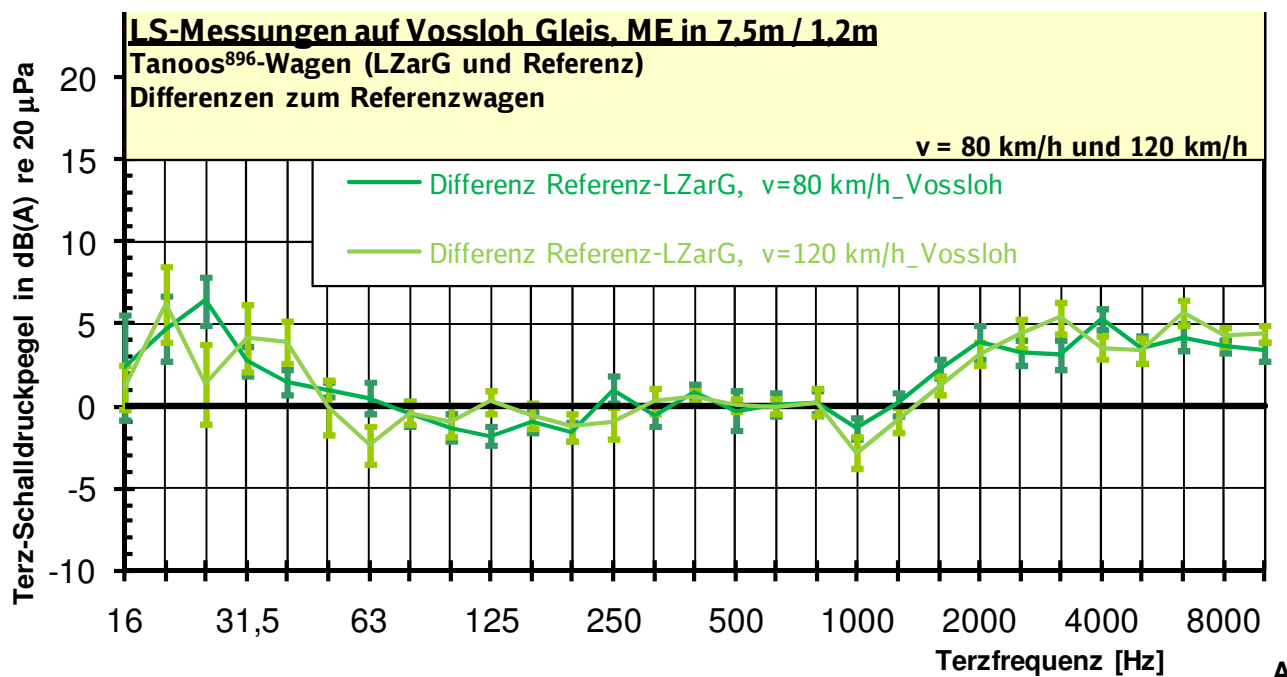
Foto: DB Systemtechnik, W. Behr

**Abb. 3.24a:** Die Bestimmung der Wirkung des mit den gedämpften Radsätzen BA308 bestückten Drehgestells DRRS25L erfolgte für jeden Messabschnitt (Foto: gedämpfter Abschnitt) separat durch Vergleich der LZarG-Wagengruppe mit der Referenz-Wagengruppe.

Die spektrale Lärminderungswirkung ist für diese Maßnahme für beide Geschwindigkeiten  $v = 80 \text{ km/h}$  und  $120 \text{ km/h}$  für beide Messabschnitte in folgender Abbildung 3.24b+c dargestellt.



**2.24b:** Terz-Schalldruckpegel-Differenzen in dB(A) re 20 µPa zeigen die Wirkung der Maßnahme „Drehgestell DRRS25L mit gedämpfter Radsatz BA 308“ auf dem realen ungedämpften Gleisabschnitt bei den Zuggeschwindigkeiten v = 80 km/h und v = 120 km/h.



**bb. 3.24c:** Terz-Schalldruckpegel-Differenzen in dB(A) re 20 µPa zeigen die Wirkung der Maßnahme „Drehgestell DRRS25L mit gedämpfter Radsatz BA 308“ auf dem gedämpften Gleisabschnitt bei den Zuggeschwindigkeiten v = 80 km/h und v = 120 km/h.

Aus den jeweiligen Zugvorbeifahrten lassen sich die A-bewerteten Vorbeifahrtpegel bestimmen. Zwar ist die Aussagekraft eines einzelnen Pegelwertes für eine Vorbeifahrt geringer als die in einem Vorbeifahrtspektrum enthaltene Information, doch erlauben Pegelvergleiche eine komfortable Bewertung einzelnen Maßnahmen untereinander.

Die in folgender Abbildung 3.24d tabellarisch dargestellten Pegeldifferenzen zeigen die Differenzen der A-bewerteten und über alle relevanten Zugfahrten gemittelten Vorbeifahrtpegel der LZarG-Maßnahme „optimiertes Drehgestell DRRS25L mit optimierten GHH-Radsatz BA 308 mit zugehörigen S&V-Raddämpfern“ im Vergleich zur Referenz-Wagengruppe bei beiden gemessenen Zuggeschwindigkeiten:

Einzelmaßnahme „am Zug“	Reales Gleis 80 / 120 km/h	Reales gedämpftes Gleis 80 / 120 km/h
Niesky-Drehgestell DRRS25L mit GHH-Rad BA308 mit S&V-Raddämpfern	- 1,8 / - 1,5 dB	- 1,1 / - 1,0 dB

**Abb. 3.24d:** Zusammenstellung der Wirkung der Maßnahmen „optimiertes Drehgestell DRRS25L mit optimierten GHH-Radsatz BA 308 mit zugehörigen S&V-Raddämpfern“ auf den beiden Gleisabschnitten bei beiden gemessenen Zuggeschwindigkeiten.

### Folgerungen:

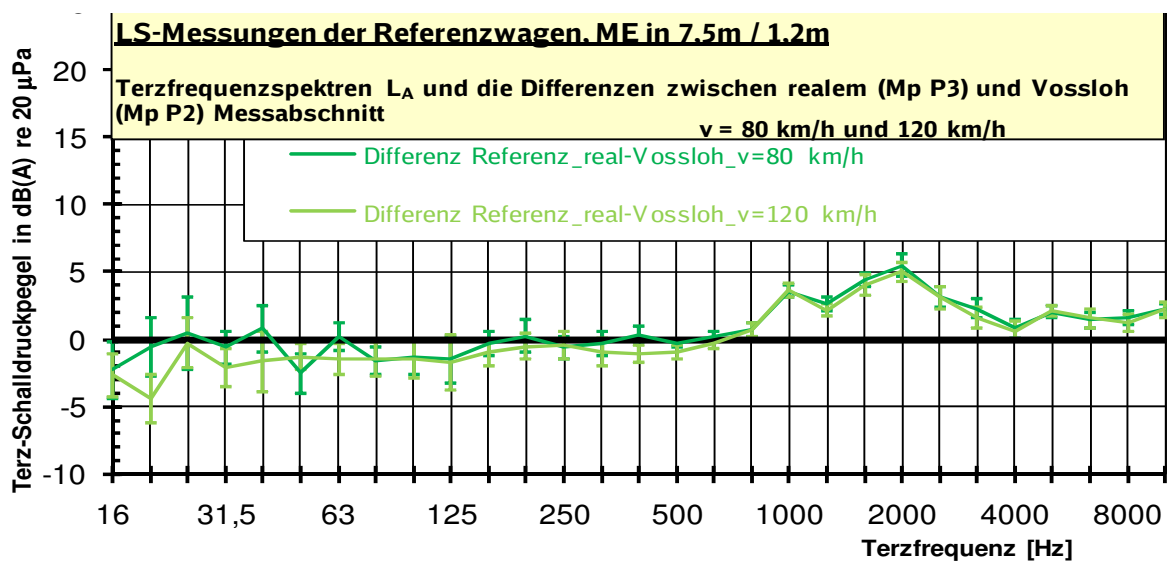
- Im Sommer 2010 wurden die akustischen Wirksamkeiten der Einzelmaßnahmen „DRRS25L“ sowie „gedämpfter Radsatz BA 308“ ermittelt (siehe Abb. 3.12e). Addiert man die Wirksamkeiten beider Maßnahmen, erhält man „theoretisch“ die Wirksamkeit beider Maßnahmen zusammen und erwartet für die kombinierte Maßnahme „optimiertes Drehgestell DRRS25L mit optimierten GHH-Radsatz BA 308 mit zugehörigen S&V-Raddämpfern“ eine Wirksamkeit von ca. 1,9 - 2,8 dB auf dem realen ungedämpften Gleis sowie eine Wirksamkeit von ca. 1,3 - 1,5 dB auf dem gedämpften Gleis.
- Berücksichtigt man, dass die geringeren Radriffel die Referenz-Wagengruppe mit ca. 1 dB bewertet werden können, ergibt sich eine tatsächliche Wirksamkeit der Maßnahme von ca. 2,5 dB auf dem realen unbedämpften Gleis bzw. eine tatsächliche Wirksamkeit der Maßnahme von ca. 2,0 dB auf dem realen bedämpften Gleis.
- Ein Vergleich mit der Wirksamkeit des Drehgestells DRRS25L mit Referenzrädern zeigt eine höhere Wirksamkeit dieses Drehgestells mit gedämpften Radsätzen. Dieser Effekt stimmt jedoch mit der separaten Wirksamkeit der gedämpften Radsätze selbst überein, so dass das Drehgestell als separate Maßnahme keine höhere Wirksamkeit hat, wenn es mit gedämpften Radsätzen ausgestattet ist (außer der durch die gedämpften Radsätze selbst verursachte verbesserte akustische Wirksamkeit).

### **3.2.8.2. Wirkung der Schienendämpfer der Fa. Vossloh**

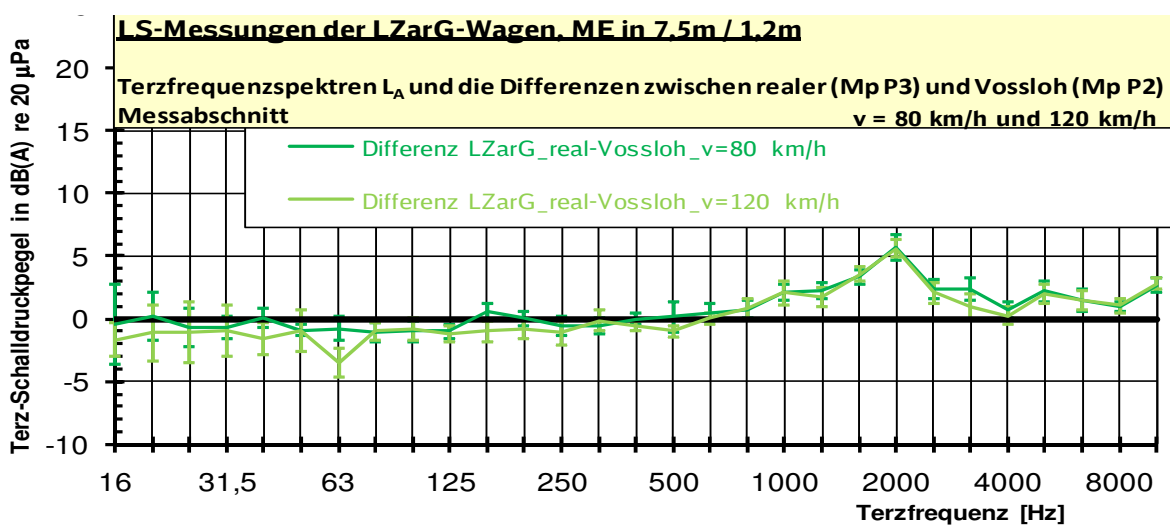
Es wurde die Wirksamkeit der Vossloh-Schienendämpfer separat für beide Wagengruppen ermittelt. Hierzu wurde die Differenz der mittleren Terzpegel zwischen realem unbedämpften und realem bedämpften Messabschnitt pro Wagengruppe gebildet. Die spektrale Darstellung ist nachfolgend für die Zuggeschwindigkeit von  $v = 80$  km/h und  $v = 120$  km/h für beide Wagengruppen zusammengefasst.



**Abb. 3.25a:** Die Wirkung der Schienendämpfer wurde für jede Wagengruppe separat bestimmt durch Vergleich der Schallabstrahlung auf dem realen unbedämpften und dem realen bedämpften Gleisabschnitt.



**Abb. 3.25b:** Spektrale Darstellung der Wirkung der Vossloh-Schienenstegdämpfer auf das Terzspektrum für die Referenz-Wagengruppe bei  $v = 80 \text{ km/h}$  und  $v = 120 \text{ km/h}$ .



**Abb. 3.25c:** Spektrale Darstellung der Wirkung der Vossloh-Schienenstegdämpfer auf das Terzspektrum für die LZarG-Wagengruppe „optimiertes Drehgestell DRRS25L mit optimierten GHH-Radsatz BA 308 mit zugehörigen S&V-Raddämpfern“ bei  $v = 80 \text{ km/h}$  und  $v = 120 \text{ km/h}$ .



Die frequenzselektive Wirkung der Vossloh-Schienendämpfer beträgt somit für beide Wagengruppen je nach Frequenz 1 - 6 dB im Frequenzbereich ab  $f > 800$  Hz. Diese Wirkung ist nahezu unabhängig von der Zuggeschwindigkeit.

Der jeweilige Effekt wurde für beide Wagengruppen bei den Geschwindigkeiten  $v = 80$  km/h und  $v = 120$  km/h ermittelt. Aus den jeweiligen Zugvorbeifahrten lassen sich die A-bewerteten Vorbeifahrtpegel bestimmen. Zwar ist die Aussagekraft eines einzelnen Pegelwertes für eine Vorbeifahrt geringer als die in einem Vorbeifahrtspektrum enthaltene Information, doch erlauben Pegelvergleiche eine komfortable Bewertung einzelnen Maßnahmen untereinander.

Die in folgender Tabelle dargestellten Pegeldifferenzen zeigen die Differenzen der über alle relevanten Zugfahrten gemittelten A-bewerteten Vorbeifahrtpegel der Referenz-Wagengruppe sowie der LZarG-Wagengruppe („optimiertes Drehgestell DRRS25L mit optimierten GHH-Radsatz BA 308 mit zugehörigen S&V-Raddämpfern“) auf dem bedämpften realen Gleisabschnitt zum unbedämpften realen Gleisabschnitt.

Einzelmaßnahme am Gleis: Vossloh-Schienendämpfer	Reales Gleis - Reales gedämpftes Gleis 80 / 120 km/h
Referenz: Y25-Drehgestell + BA318	- 2,7 / -2,8 dB
Niesky-Drehgestell DRRS25L + GHH-Rad BA308 mit S&V-Raddabsorbern	- 2,0 / -2,3 dB

**Abb. 3.25d:** Zusammenstellung der Wirkung der Vossloh-Schienendämpfer für beide Wagengruppen bei beiden Zuggeschwindigkeiten.

Die Wirkung der Vossloh-Schienendämpfer beträgt somit für die Referenz-Wagen nahezu 3 dB, für die LZarG-Wagen dagegen nur ca. 2,5 dB.

### **Folgerungen:**

- die Vossloh-Schienendämpfer bewirken eine Reduktion des Vorbeifahrtpegels um ca. 3 dB für die Referenz-Wagengruppe und bestätigen somit die im Sommer 2010 ermittelten Werte zur Wirksamkeit.
- die Vossloh-Schienendämpfer bewirken eine Reduktion des Vorbeifahrtpegels um ca. 2,5 dB für die LZarG-Wagengruppe. Im Sommer 2010 waren die Radsätze BA 308 mit den S&V-Radabsorbern im Drehgestell Y25 eingebaut, bei der hier dargestellten Messung vom April 2011 waren dieselben Radsätze im Drehgestell DRRS25L eingebaut. In beiden Fällen lag die Wirksamkeit bei ca. 2,5 dB. Somit bestätigt die aktuelle Messung vom April 2011 die im Sommer 2010 ermittelten Werte zur Wirksamkeit (siehe Abb. 3.15f).
- das Drehgestell hat sehr geringen Einfluss auf die Wirkung der Schienendämpfer.
- die Wirkung der Schienendämpfer setzt ab 800 Hz ein. In diesem Frequenzbereich erhöht sich auch die vertikale bzw. laterale Gleisabklingrate im Vergleich zur Gleisabklingrate des realen ungedämpften Gleises.

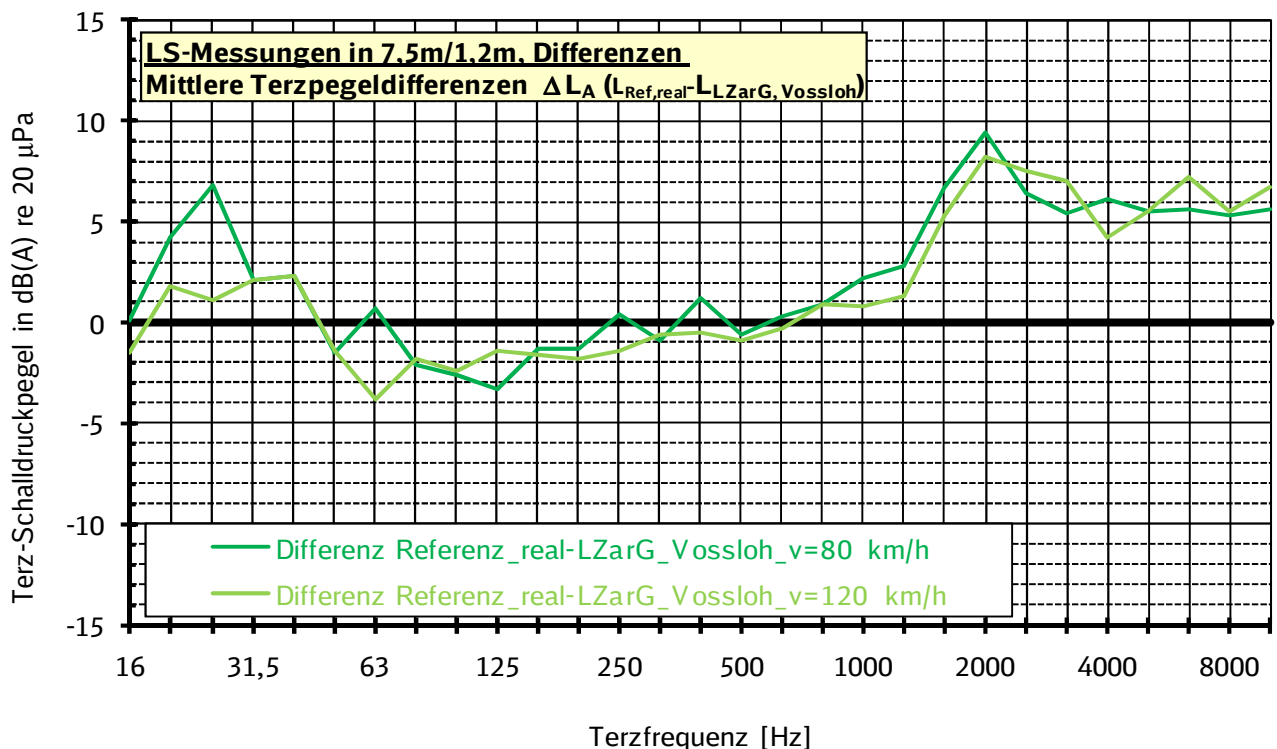
### 3.2.8.3. Gesamtwirkung der fahrzeug- und fahrbahnseitigen Maßnahmen

Zur Bestimmung der kombinierten Wirkung der fahrzeug- und fahrbahnseitigen Maßnahmen wurde die Differenz der mittleren Terzpegel zwischen der Referenzwagengruppe auf dem realen Messabschnitt und der modifizierten Wagengruppe auf dem bedämpften Messabschnitt gebildet, wie folgende Abbildung 3.26a veranschaulicht. Die spektrale Darstellung der kombinierten Wirkung der fahrzeug- und fahrbahnseitigen Maßnahmen der modifizierten Wagengruppe zeigt die Abbildungen 3.26b für beide gemessenen Zuggeschwindigkeiten.



**Abb. 3.26a:** Die Bestimmung der Gesamtwirkung aller Maßnahmen erfolgte für jede Wagengruppe separat durch Vergleich der Schallabstrahlung der LZarG-Wagengruppe auf dem realen bedämpften mit der Schallabstrahlung der Referenz-Wagengruppe auf dem realen bedämpften Gleisabschnitt.

Es wurde die Differenz der mittleren Terzpegel zwischen der Referenzwagengruppe auf dem realen Messabschnitt und der LZarG-Wagengruppe auf dem Vossloh-Messabschnitt gebildet. Die spektrale Darstellung ist für die Geschwindigkeiten von  $v = 80 \text{ km/h}$  und  $v = 120 \text{ km/h}$  in folgender Abbildung 3.26b zusammengefasst.



**Abb. 3.26b:** Spektrale Darstellung der gesamten Wirkung der fahrzeug- und fahrbahnseitigen Maßnahmen auf das Terzspektrum der LZarG-Wagengruppe bei beiden Zuggeschwindigkeiten.

Die Kombination der fahrzeug- und fahrbahnseitigen Maßnahmen betreffen Schallreduktionsmaßnahmen hinsichtlich der Schallabstrahlung von Rad und Schiene und können somit erst im Frequenzbereich ab  $f > 630$  Hz zur Wirkung kommen. Ab  $f > 800$  Hz ist eine deutliche Wirkung erkennbar, bei  $f = 2000$  Hz beträgt die Schallreduktion durch die LZarG - Wagengruppe 9 dB Schallreduktion bei einer Geschwindigkeit von  $v = 80$  km/h.

Die „Verschlechterung“ in dem Frequenzbereich bis  $f = 250$  Hz ist eine Folge des Oberbauzustandes des realen Gleises und wird durch die Schallabstrahlung der Schwellen verursacht. Aufgrund der A-Bewertung ist sie für den Summenpegel der Zugvorbeifahrt nicht pegelbestimmend.

Aus den jeweiligen Zugvorbeifahrten lassen sich die A-bewerteten Vorbeifahrtpegel bestimmen. Zwar ist die Aussagekraft eines einzelnen Pegelwertes für eine Vorbeifahrt geringer als die in einem Vorbeifahrtsspektrum enthaltene Information, doch erlauben Pegelvergleiche eine komfortable Bewertung einzelnen Maßnahmen untereinander.

Die in folgender Tabelle dargestellten Pegeldifferenzen zeigen die Differenzen der über alle relevanten Zugfahrten gemittelten A-bewerteten Vorbeifahrtpegel der LZarG-Wagengruppe auf dem bedämpften realen Gleisabschnitt zur über alle relevanten Zugfahrten gemittelten A-bewerteten Vorbeifahrtpegel der Referenz-Wagengruppe auf dem unbedämpften realen Gleisabschnitt.

Fahrzeugseitige Maßnahme	Reales Gleis - Reales gedämpftes Gleis 80 / 120 km/h
Niesky-DRRS25L + GHH-BA308 + S&V-Radabsorber	- 3,8 / -3,8 dB

**Abb. 3.26c:** Zusammenstellung der Gesamt-Wirkung der kombinierten Maßnahmen am Fahrzeug und Fahrweg für beide Zuggeschwindigkeiten.

### **Folgerungen:**

- Schienendämpfer + gedämpfte Radsätze bewirken eine Gesamt-Reduktion des Vorbeifahrtpegels um mehr als 3,8 dB. Berücksichtigt man, dass die geringeren Radriffel die Referenz-Wagengruppe mit ca. 0,8 dB bewertet werden müssen, ergibt sich eine tatsächliche Wirksamkeit von ca. 4,6 dB. Dies bestätigt die Messung vom Sommer 2010. Hier betrug die Gesamt-Wirkung etwas mehr als 4 dB ohne die Berücksichtigung einer Einzelwirkung von ca. 0,5 dB aufgrund des Drehgestells DRRS25L.
- die kombinierte Wirkung von Rad- und Schienendämpfern ist etwas geringer als die Summe der jeweiligen Wirkungen der Einzelmaßnahmen an Fahrzeug und Fahrweg, aber zugleich deutlich höher als die Wirkung einer Einzelmaßnahme alleine.
- Die Referenz-Wagengruppe war mit Rädern der BA 318 anstelle der bei DB Schenker sehr oft genutzten Standard-Bauart BA 004 ausgestattet. Da dieses Standardrad BA 004 ca. 0,5 - 1 dB lauter ist als das Referenzrad BA 318, erhöht sich die im Projekt nachgewiesene Gesamtwirkung der Kombination von gedämpften Rädern auf gedämpfter Schiene auf über 5 dB.

### 3.3. Einfügedämmung der besohnten Schwellen im unkonsolidierten Schotterbett [3]

Die mit Zugfahrten verbundenen dynamischen Kräfte werden in Form von Körperschall über den Oberbau in den Boden übertragen. Dort pflanzen sich „Erschütterungswellen“ weiter fort bis hin zur Wohnbebauung. So können in Häusern im Nah-Bereich von Bahnstrecken Vibrationen bzw. Erschütterungen sowie sekundärer Luftschall entstehen, die durch den Bahnverkehr verursacht wurden.

Werden Betonschwellen an der Unterseite mit einer speziellen Dämpfungsschicht versehen (siehe Abb. 3.27), so kann die Weiterleitung von Erschütterungswellen in den Oberbau unterhalb der Schwellen deutlich reduziert werden. Aus akustischer Sicht scheinen derartige besohnte Schwellen die Erschütterungen und den daraus entstehenden sekundären Luftschall umso mehr zu reduzieren, je höher deren Elastizität ist. Aus Gründen der Oberbaudynamik und der Gleisstabilität kann jedoch eine Schwellenbesohlung nicht beliebig weich gewählt werden.

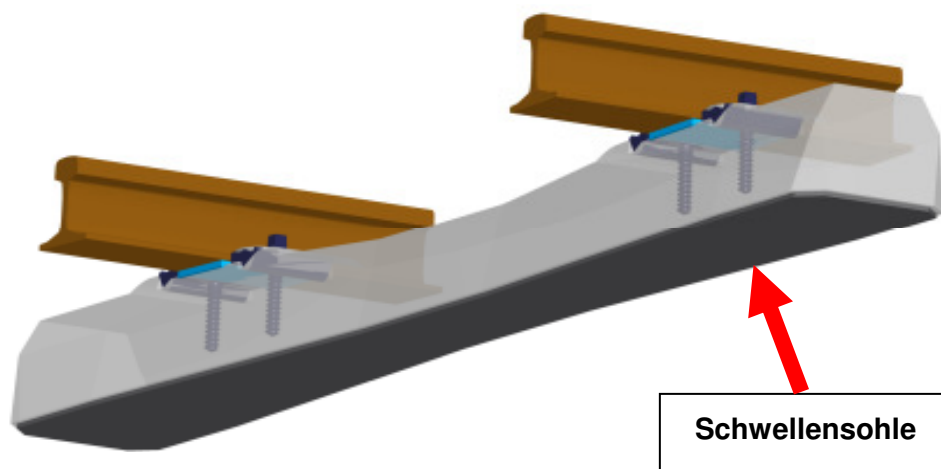


Abb. 3.27: Schema-Zeichnung einer besohnten Schwelle (© Fa. Getzner)

Im Rahmen des Projektes LZarG sollten daher Schwellensoles unterschiedlicher Steifigkeiten (bis hin zu einer möglichst geringen Steifigkeit) entwickelt und im Netz der Deutschen Bahn eingebaut werden, um deren Wirksamkeit anhand der Einfügedämmung zu bewerten.

Im Rahmen des Teilprojektes B3 wurden seitens der Fa. Getzner in Kooperation mit der TU München verschiedene Schwellenbesohlungen mit folgenden Steifigkeiten bzw. Variationen entwickelt:

Bezeichnung der Besohlung (Fa. Getzner)	Bettungsmodul $\text{N/mm}^3$	Bemerkung
G02	0,20	Datenblatt SLB 2210 G
G03	0,15	Lastverteilschicht aus Geotextil-Material; Datenblatt SLN 1510 G DB
G03-L	0,15	wie G03, jedoch mit einer speziellen Lastverteilschicht "LVD"
G04	0,10	Lastverteilschicht aus Geotextil-Material; Datenblatt SLN 1010 G

Abb. 3.28: Übersicht der entwickelten unterschiedlichen Schwellenbesohlungen der Fa. Getzner

Die in Abbildung 3.28 genannten besohnten Schwellen wurden bei Regensburg eingebaut und deren akustische Wirksamkeit mittels Regelzüge gemessen [3].

### 3.3.1. Beschreibung der Einbaustelle der besohnten Schwellen

Die besohnten Schwellen wurden auf der zweigleisigen Strecke 5830 (Passau - Obertraubling) zwischen den Bahnhöfen Mangolding und Sünching im Rahmen einer zweigleisigen Gleiserneuerung eingebaut. Der Einbau der besohnten Schwellen erfolgte am 07. und 08.08.2010 auf dem Gleis in Richtung Passau. Die Inbetriebnahme der Strecke erfolgte am 19.08.2010 zunächst eingleisig auf diesem Streckengleis Richtung Sünching mit einer Geschwindigkeitsbegrenzung von 70 km/h, während das zweite Gleis Richtung Mangolding erneuert wurde. Die zweigleisige Inbetriebnahme der Strecke ohne Geschwindigkeitsbegrenzung erfolgte am 14.09.2010.

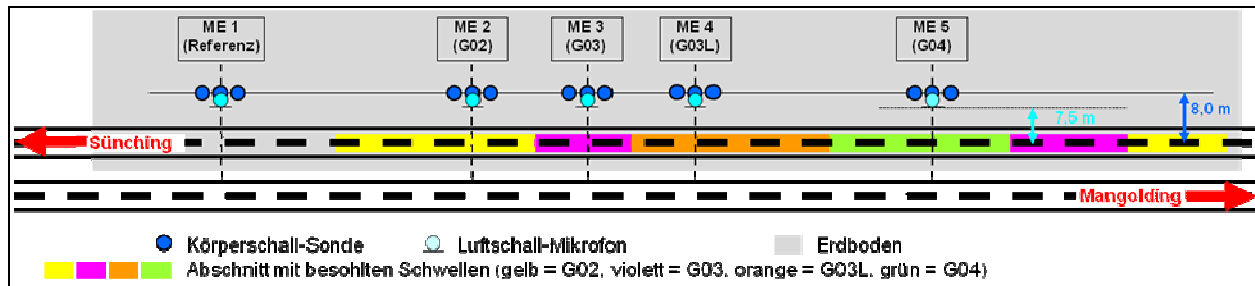
Bei dem Oberbau der RE160-Strecke handelte es sich um einen klassischen Schotteroberbau mit Betonschwellen des Typs B70, Schiene UIC 60 sowie weichen Zwischenlagen ZW 700 b.



Fotos: DB Systemtechnik, W. Behr

**Abb. 3.29:** Die Messungen wurden an der Strecke Passau – Obertraubling zwischen Mangolding und Sünching durchgeführt (unten). Pro Mess-Ebene waren drei Körperschall-Sonden und ein Luftschall-Mikrofon eingerichtet (links). Die Fotos rechts zeigen die besohnten Schwellen vor dem Einbau auf dem Verlegebauwagen (rechts oben) sowie nach dem Verlegen noch vor der Einschotterung (rechts mitte).

Der Referenzabschnitt der Messungen (unbesohlte Schwellen) befand sich zwischen km 102,13 und km 102,63, die Versuchsabschnitte mit Besohlungen unterschiedlichen Typs lagen zwischen km 102,63 und km 103,25 (siehe Abbildung 3.30).



**Abb. 3.30:** Position der besohlenen Schwellen sowie der fünf Mess-Ebenen. Bei der Messung [5] im April 2011 waren in der Referenz-Messebene 1 zwei Messposition mit jeweils 3 Körperschall-Sonden eingerichtet.

### 3.3.2. Beschreibung der Prüfung

Es wurden Körperschall- und Luftschallmessungen in fünf Messebenen an Regelzügen durchgeführt. Die Berechnung der Vorbeifahrtgeschwindigkeit der Züge erfolgte mittels Zeitmessung.

Das Vorbeifahrgeräusch der Regelzüge wurde gemäß [3-2] gemessen und ausgewertet. Abweichend von [3-2] fand keine Messung der Schienenrauheit statt.

Die KS-Messungen wurden entsprechend den Vorgaben nach [3-3] durchgeführt und gemäß [3-4] ausgewertet. Dabei traten folgende Abweichungen zu den Normen auf:

- Um konsequent mit [3-2] zu sein, wurde die Mittelung der gültigen Zugfahrten arithmetisch vorgenommen (laut [3-4]: energetische Mittelung)
- Die Länge der Versuchsabschnitte laut Kapitel 3.1.3 lag teilweise unterhalb der in [3-3, Pkt. 7.3.1] geforderten Mindestlängen

Aus Gründen der Redundanz wurden in jeder Messebene drei Körperschall-Messpunkte seitlich des Regelgleises Richtung Sünching eingerichtet (Abstand von GM = 8m). Die Körperschall-Terz-Schnelle-Spektren dieser jeweils 3 Messpunkte wurde auf deren Vergleichbarkeit hin geprüft. Im Falle der Fehlerfreiheit der Messsignale wurden die Messergebnisse der drei Körperschall-Messpunkte einer jeweiligen Messebene für jede gültige Einzelzugfahrt energetisch gemittelt.

Einzelzugdurchfahrten, die mindestens eines der folgenden Kriterien erfüllten, wurden als ungültig bewertet und daher *nicht* ausgewertet:

- Versuche bremsender Züge bzw. Züge mit einer Geschwindigkeitsschwankung innerhalb einer Messebene oder zwischen den Messebenen von über  $\pm 5\%$
- Versuche mit Zugkreuzungen
- Güterzüge mit überwiegend K-Sohle-gebremsten Güterwagen
- Lokfahrten
- Fahrten von Nebenfahrzeugen

Die Klassierung der Züge wurde automatisiert und basierend auf dem Achsbild der Züge durchgeführt. Zusätzlich erfolgte eine Bildaufzeichnung der Zugvorbeifahrten. Es wurden nur Zugfahrten aufgenommen bzw. ausgewertet, die auf dem Regelgleis in Richtung Sünching verkehrten.

Zur weiteren Auswertung wurden Zugkategorien gebildet, in denen möglichst viele gültige Zugfahrten gemittelt werden konnten:

- Güterzüge mit einer mittleren Vorbeifahrtgeschwindigkeit: 79 km/h - 103 km/h (n = 17)
- Güterzüge mit einer mittleren Vorbeifahrtgeschwindigkeit: 86 km/h - 92 km/h (n = 7)
- Güterzüge mit einer mittleren Vorbeifahrtgeschwindigkeit: 97 km/h - 101 km/h (n = 4)
- ICE mit einer mittleren Vorbeifahrtgeschwindigkeit:  $156 \text{ km/h} \leq v \leq 160 \text{ km/h}$  (n = 4)
- RB mit einer mittleren Vorbeifahrtgeschwindigkeit:  $127 \text{ km/h} \leq v \leq 134 \text{ km/h}$  (n = 8)

Zur Durchführung der Körperschall-Terzanalysen wurden die Beschleunigungssignale der Körperschallmesspunkte seitlich des Gleises zunächst durch Integration in Schnellesignale umgerechnet. Anschließend wurden über Zeitintervalle von 125 ms KS-Terz-Schnelle-Spektren  $L_v$  (in RMS und Zeitbewertung Fast) gemäß DIN 45672-2 [5] ausgewertet. Abschließend wurden die KS-Terz-Schnelle-Spektren  $L_v$  über die Dauer der *geometrischen Vorbeifahrt* ( $T_p$ ) des einzelnen Zuges energetisch gemittelt. Die ermittelten Schnelle-Pegel  $L_v$  beziehen sich auf den Referenzwert:  $v_0 = 5 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ . Die Körperschall-Messungen wurden im Frequenzbereich zwischen 3,15 Hz und 315 Hz ausgewertet.

Zur Durchführung der Luftschall-Terzanalysen wurden für jede gültige Güterzug-Vorbeifahrt die über die *Dauer der geometrischen Vorbeifahrt* ( $T_p$ ) energetisch gemittelten LS-Terz-Spektren  $L_{lin}$  (unbewertet) ausgewertet. Die ermittelten Pegelangaben des Luftschalls beziehen sich auf den Referenzwert:  $p_0 = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ . Die Luftschall-Messungen wurden im Frequenzbereich zwischen 16 Hz und 5 kHz ausgewertet.

### 3.3.3. Auswertung der Messungen

Die **Einfügedämmungen der Schwellenbesohlungen (SB) i** wurden für jede gültige Einzelzugfahrt j wie folgt ermittelt: Einfügedämmung $_{SB i, j} = L_v \text{ Referenzabschnitt, j} - L_v \text{ Prüfobjekt i, j}$  mit

Einfügedämmung $_{SB i, j}$  (frequenzabhängige) Verbesserung oder Verschlechterung der Erschütterungsemissionen für die Einzelzugfahrt j durch den Einbau des Schwellenbesohlung i

$L_v \text{ Referenzabschnitt, j}$  Energetisch gemittelte KS-Terz-Schnelle-Spektren der  $M_p$  in der ME des Referenzabschnitts für die gültige Einzelzugfahrt j

$L_v \text{ Prüfobjekt i, j}$  Energetisch gemittelte KS-Terz-Schnelle-Spektren der  $M_p$  in der ME der Schwellenbesohlung i für die gültige Einzelzugfahrt j

Diese Bestimmung der Einfügedämmung erfolgte unter der Annahme, dass der Boden in allen Messebenen (in Abbildung 3.30 grau markiert) identisch ist. Das „übliche“ Vorgehen, die Körperschallpegel im jeweils gleichen Messabschnitt vor und nach dem Einbau der besohlenen Schwellen zu messen, war in diesem Fall aufgrund des kompletten Umbaus dieses Streckenabschnittes nicht möglich.

Im Rahmen der Nachfolgemessung [5] im April 2011 stellte sich heraus, dass der Boden in den unterschiedlichen Messebenen unterschiedliche Eigenschaften hinsichtlich der Erschütterungsausbreitung hat, so dass die nach oben beschriebenen Vorgehen bestimmten Einfügedämmungen noch mit einer Bodenkorrektur versehen werden müssen (siehe Kap. 3.4.2.2).

Die **LS-Differenzspektren zu den Schwellenbesohlungen (SB) i** wurden für jede gültige Einzelzugfahrt j wie folgt ermittelt: LS-Differenzspektren<sub>SB i, j</sub> =  $L_{\text{Lin Referenzabschnitt, j}} - L_{\text{Lin Prüfobjekt i, j}}$  mit

LS-Differenzspektren<sub>SB i, j</sub> (frequenzabhängige) Verbesserung oder Verschlechterung der Luftschallemissionen für die Einzelzugfahrt j durch den Einbau des Schwellenbesohlung i

$L_{v \text{ Referenzabschnitt, j}}$  LS-Terz-Spektren des Mp in der ME des Referenzabschnitts für die gültige Einzelzugfahrt j

$L_{v \text{ Prüfobjekt i, j}}$  LS-Terz-Spektren des Mp in der ME der Schwellenbesohlung i für die gültige Einzelzugfahrt j

Die, aus den gültigen Einzelzugfahrten ermittelten Einfügedämmungen bzw. LS-Differenzspektren jedes jeweiligen Prüfobjektes (Einfügedämmung<sub>SB i, j</sub> bzw. LS-Differenzspektren<sub>SB i, j</sub>) wurden für jede Zugkategorie über alle gültigen Zugfahrten arithmetisch gemittelt.

### 3.3.4. Resultate

#### 3.3.4.1. Einfügedämmung (Schotter nicht konsolidiert, ohne Bodenkorrektur)

Es wurde die mittlere Einfügedämmung der Schwellenbesohlungen G02, G03, G03L und G04 für folgende drei Zugkategorien ermittelt:

**17 Güterzugvorbeifahrten** mit einer Zuggeschwindigkeit von **79 km/h  $\leq v \leq$  103 km/h** (Darstellung in Abbildung 3.32a). Eine gesonderte Auswertung der Güterzüge mit einer Zuggeschwindigkeit von 86 km/h  $\leq v \leq$  92 km/h und einer Zuggeschwindigkeit von 97 km/h  $\leq v \leq$  103 km/h ergab keine deutlichen Unterschiede.

**4 ICE-Vorbeifahrten** mit einer Zuggeschwindigkeit von **156 km/h  $\leq v \leq$  160 km/h** (Darstellung in Abbildung 3.32b).

**8 Regio-Vorbeifahrten** mit einer Zuggeschwindigkeit von **127 km/h  $\leq v \leq$  134 km/h** (Darstellung in Abbildung 3.32c).

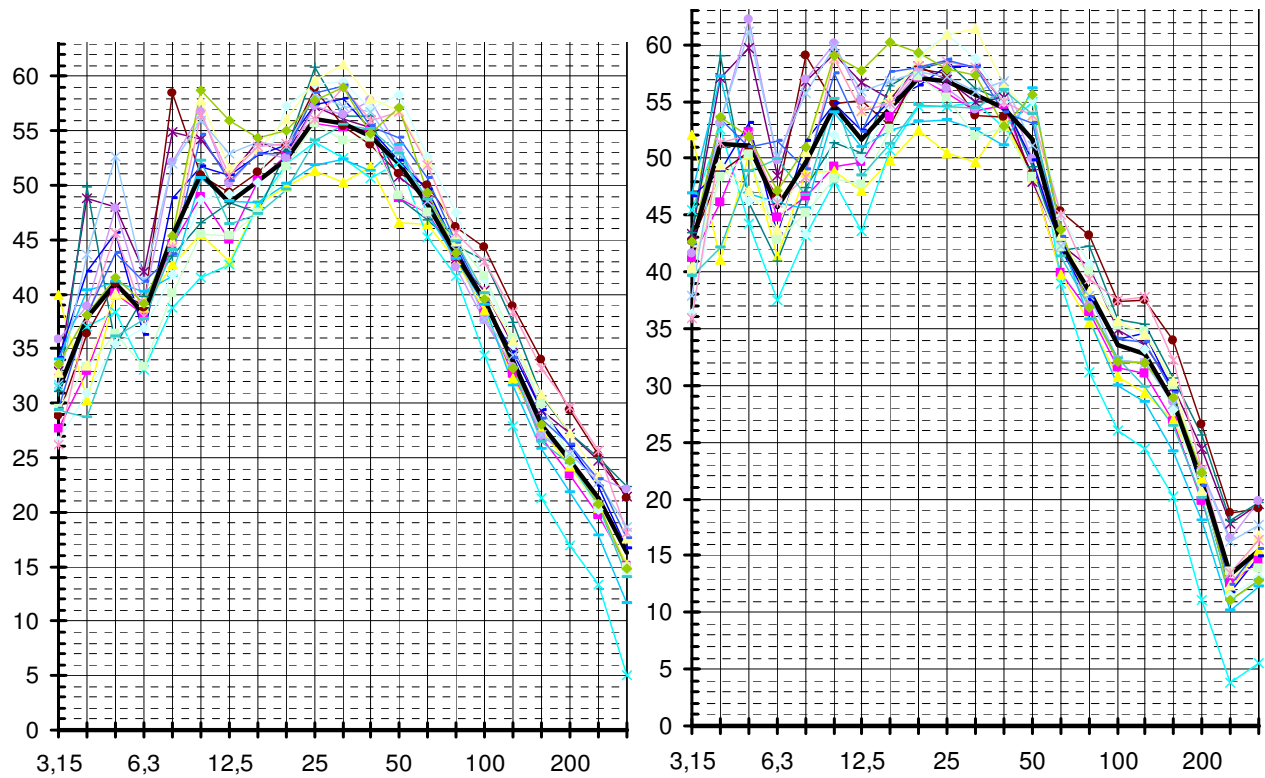
Auch wenn in den Abbildungen 3.32a-c der gesamte ausgewertete Frequenzbereich von 3,15 Hz bis 315 Hz dargestellt ist, so sind nur die Resultate im Bereich von 12,5 Hz bis 100 Hz relevant bzw. aussagekräftig:

Für Frequenzen  $f < 12,5$  Hz spielen u. a. Nahfeldeffekte eine große Rolle, die die Resultate aufgrund der großen Streuung der Körperschallsignale verfälschen können. Auch angesichts der geringen Zugzahlen pro Zugkategorie sind daher die Resultate für diese niedrigeren Frequenzen nicht aussagekräftig.

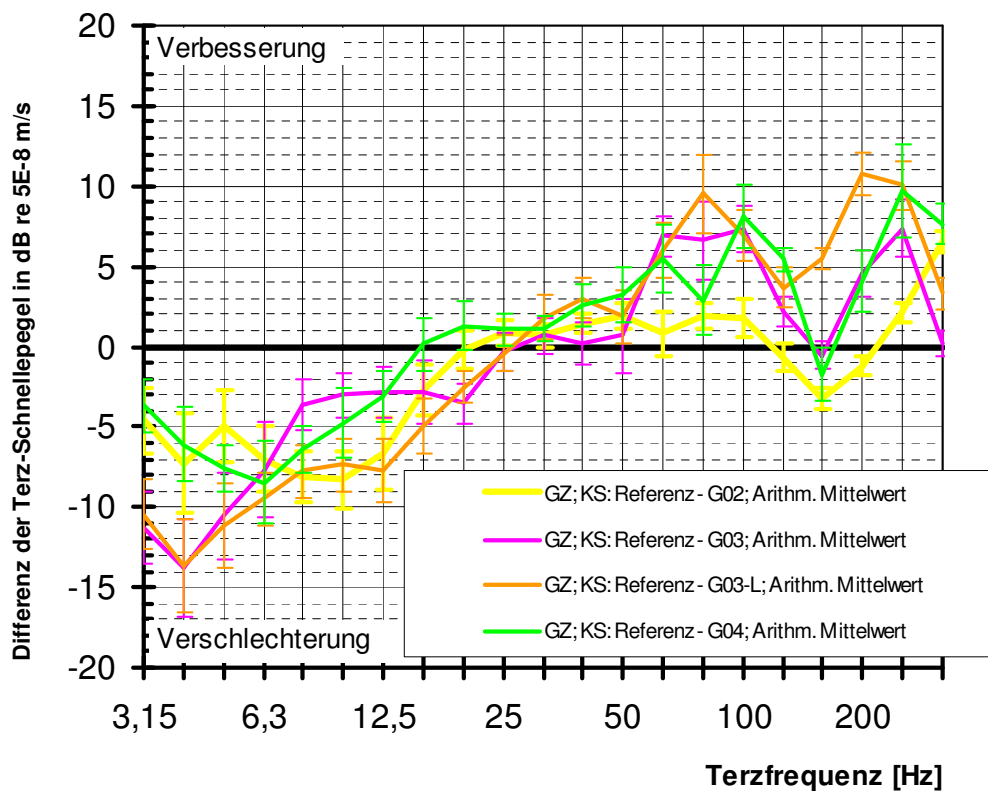
Für Frequenzen  $f > 160$  Hz sind die Körperschallsignale deutlich niedriger und spielen daher nur eine sehr geringe Rolle.

Diesen Sachverhalt zeigt Abbildung 3.31 exemplarisch anhand aller 17 ausgewerteter Güterzüge im Referenzabschnitt und im Abschnitt mit der besohlenen Schwelle G03.

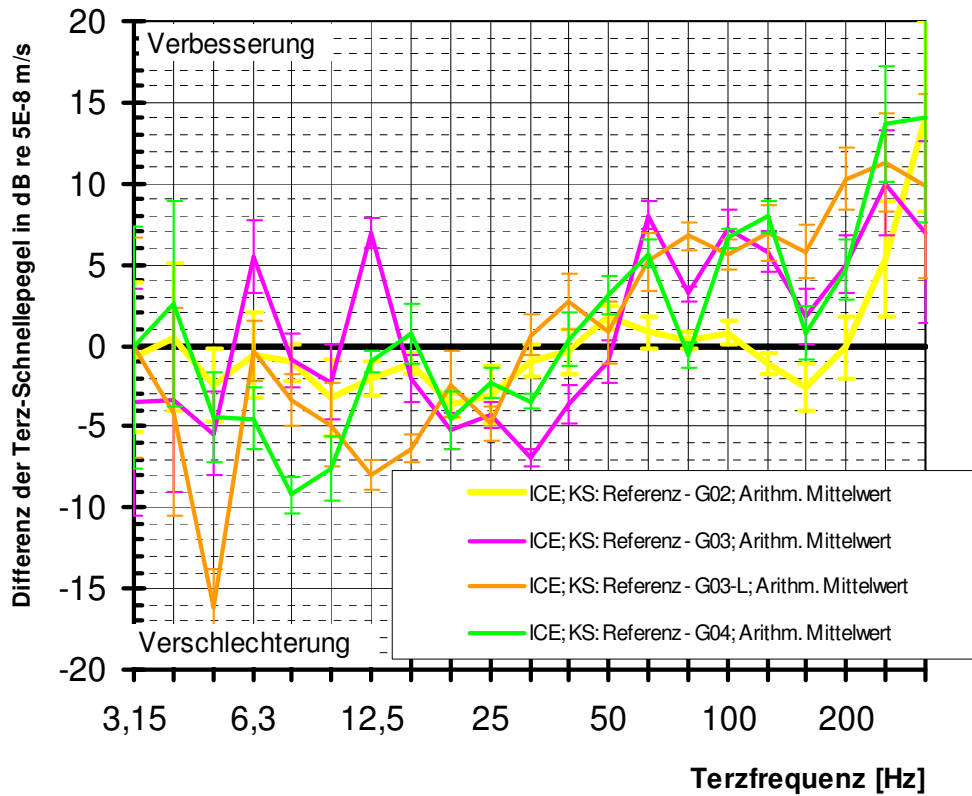




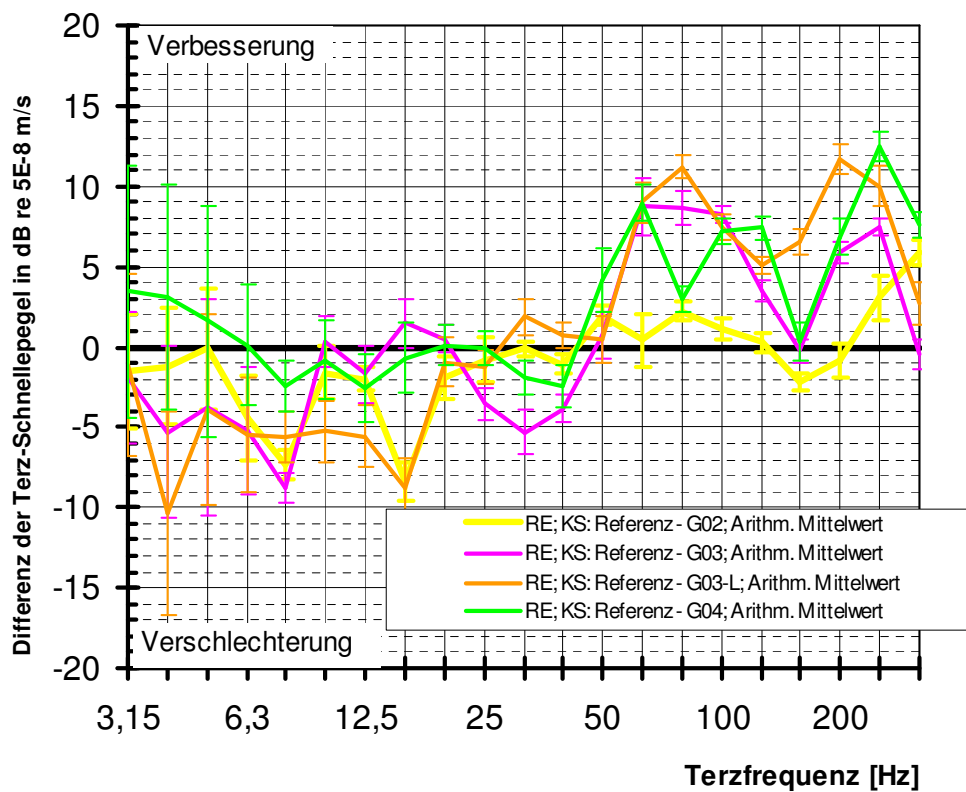
**Abb. 3.31:** Die Körperschall-Spektren aller 17 Güterzüge in der Messebene 1 mit den unbesohnten Referenzschwellen (links) sowie in der Messebene 3 mit der Schwellensohle G03 (rechts) zeigen beispielhaft: für  $f < 12,5$  Hz streuen die Werte stark, für  $f > 160$  Hz sind die Pegelwerte sehr gering im Vergleich mit den Maximalwerten (Terz-Schnellepegel in dB re  $5E-8$  m/s).



**Abb. 3.32a:** Arithmetische Mittelwerte der Einfügedämmungen der Schwellenbesohlungen G02, G03, G03L und G04 ermittelt aus insgesamt 17 Güterzugvorbeifahrten mit einer Vorbeifahrtsgeschwindigkeit  $79 \text{ km/h} \leq v \leq 103 \text{ km/h}$ . Die Fehlerbalken entsprechen der Standardabweichung.



**Abb. 3.32b:** Arithmetische Mittelwerte der Einfügedämmungen der Schwellenbesohlungen G02, G03, G03L und G04 ermittelt aus insgesamt 4 ICE-Vorbeifahrten mit einer Vorbeifahrgeschwindigkeit  $156 \text{ km/h} \leq v \leq 160 \text{ km/h}$ . Die Fehlerbalken entsprechen der Standardabweichung.



**Abb. 3.32c:** Arithmetische Mittelwerte der Einfügedämmungen der Schwellenbesohlungen G02, G03, G03L und G04 ermittelt aus insgesamt 8 Regio-Vorbeifahrten mit einer Vorbeifahrgeschwindigkeit  $127 \text{ km/h} \leq v \leq 134 \text{ km/h}$ . Die Fehlerbalken entsprechen der Standardabweichung.

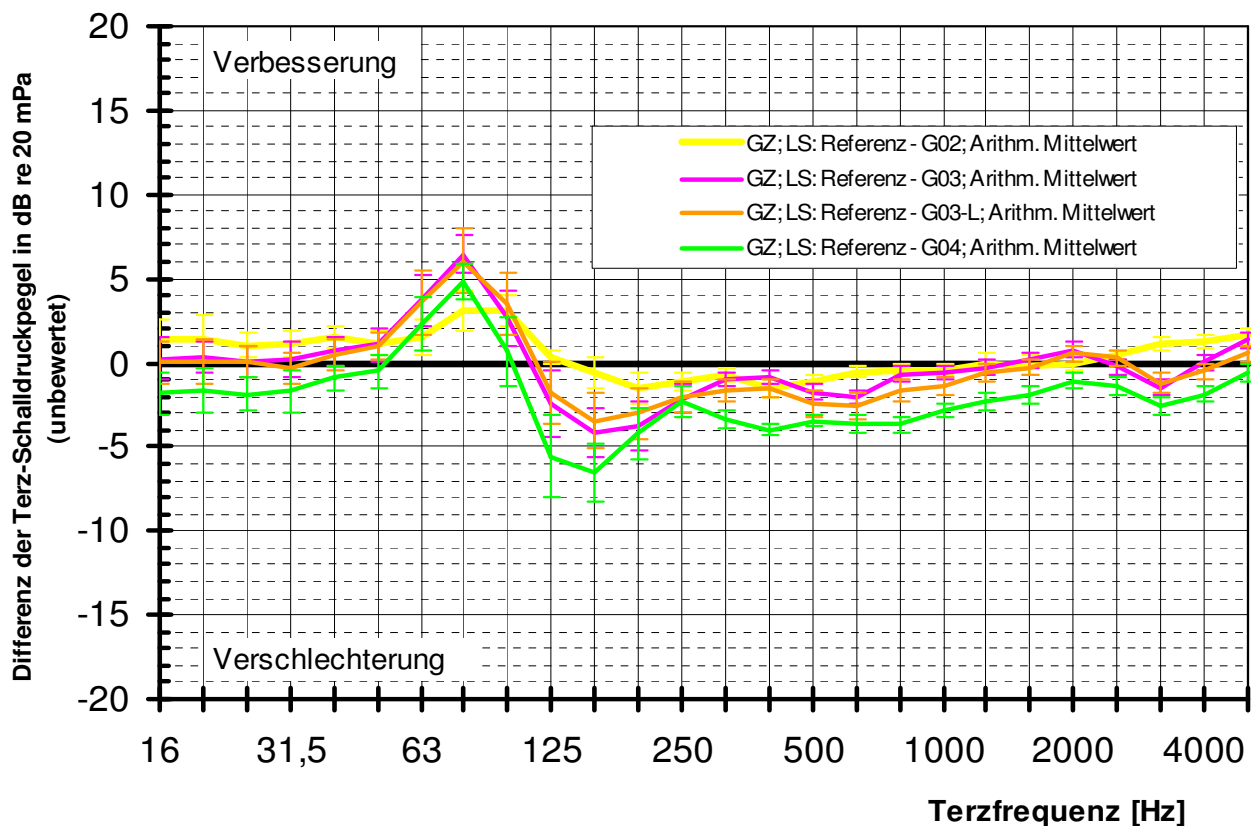
### Folgerungen:

Ein Vergleich der Abbildungen 3.32a-c zeigt, dass die Einfügedämmungen für die drei Zugkategorien „Güterzug“, „Regionalzug“ und „ICE“ unterschiedlich sind. Diese Aussage ist vorerst jedoch nur für den unkonsolidierten Schotterzustand zutreffend und muss noch bei konsolidiertem Schotterzustand erneut betrachtet werden (Messung [4]).

Unter Annahme der Bodengleichheit aller Messabschnitte scheint die Schwellenbesohlung G03L hinsichtlich der Erschütterungsreduktion im Frequenzbereich  $f > 50$  Hz die beste Wirksamkeit zu haben, gefolgt von der Schwellenbesohlung G03 und der Schwellenbesohlung G04. Im tiefen Frequenzbereich  $f < 40$  Hz zeigt die Schwellenbesohlung G03L jedoch ein schlechteres Verhalten im Vergleich zur Schwellenbesohlung G03. Die Folgemessung [4] zeigte jedoch sowohl einen Einfluss der Schotterkonsolidierung als auch die Tatsache unterschiedlicher Bodenbeschaffenheit, so dass die im Rahmen der Messung [3] bei unkonsolidiertem Schotterbett erzielten und in den Abbildungen 3.32a-c dargestellten Resultate neu bewertet werden müssen.

#### 3.3.4.2. Luftschall

Es wurde die mittleren Luftschall-Differenzspektren der Messabschnitte mit den Schwellenbesohlungen G02, G03, G03L und G04 für die Zugkategorie „Güterzug“ ermittelt. Hierbei wurden die **17 Güterzugvorbeifahrten** mit einer Zuggeschwindigkeit von  $79 \text{ km/h} \leq v \leq 103 \text{ km/h}$  bewertet (Darstellung in Abbildung 3.33). Eine gesonderte Auswertung der Güterzüge mit einer Zuggeschwindigkeit von  $86 \text{ km/h} \leq v \leq 92 \text{ km/h}$  und einer Zuggeschwindigkeit von  $97 \text{ km/h} \leq v \leq 103 \text{ km/h}$  ergab keine deutlichen Unterschiede.



**Abb. 3.33:** Arithmetische Mittelwerte der Luftschall-Differenzspektren der Schwellenbesohlungen G02, G03, G03L und G04 ermittelt aus insgesamt 17 Güterzug-Vorbeifahrten mit einer Vorbeifahrtsgeschwindigkeit  $79 \text{ km/h} \leq v \leq 103 \text{ km/h}$ . Die Fehlerbalken entsprechen der Standardabweichung.

**Folgerungen:**

Die Schallabstrahlung der Güterzüge auf den Gleisabschnitten mit besohlenen Schwellen ist im unkonsolidierten Schotterbett höher als auf dem unbesohlenen Referenz-Abschnitt. Die Zunahme der Schallabstrahlung scheint umso höher, je geringer die Steifigkeit der Schwellenbesohlung. Die Bewertung dieser Tatsache kann jedoch erst anhand der Folgemessung [4] bei konsolidiertem Schotter erfolgen.

**3.4. Einfügedämmung der besohlenen Schwellen im konsolidierten Schotterbett [4]**

Ziel der Messungen war es, die Einfügedämmung von Schwellenbesohlungen unterschiedlichen Typs im *konsolidierten* Zustand des Schotterbettes zu ermitteln. Die Messungen im September 2010 [3] erfolgten kurz nach dem Umbau des Gleises und somit im unkonsolidierten Zustand. Im April 2011 war der Schotter nach ca. 7 Monaten regulären Zugbetrieb nun mit Sicherheit konsolidiert. Des Weiteren sollte der Einfluss der Schwellenbesohlungen auf die Luftschallemission des Oberbaus untersucht werden.

Neben der Erfassung von Zugverkehren auf dem Regelgleis Richtung Sünching, dass mit Beton-schwellen B70 mit und ohne Schwellenbesohlungen ausgestattet war, wurden auch Zugverkehre auf dem Richtungsgleis ohne Besohlungen (Regelgleis Richtung Mangolding) aufgenommen. Mit diesen Messungen können ggf. Aussagen zur Bodeneigenschaft in den unterschiedlichen Messabschnitten gemacht werden.

Es wurde die im Kapitel 3.3 beschriebene Messung im April 2011 unter derselben Versuchsdurchführung wiederholt. Somit kann auf eine erneute Beschreibung der Messung verzichtet werden. Stattdessen werden sogleich die Resultate dargestellt und mit den Resultaten der Messung [3] im September 2010 verglichen.

Da mit dem Fahrplanwechsel im Winter 2010/11 der Betreiber der Regionalverkehrs wechselte, verkehrten im April 2011 neue Regio-Triebzüge der ET-Familie mit einer Geschwindigkeit von 160 km/h, die mit den im September 2010 verkehrenden Regionalzügen nicht vergleichbar waren. Daher wurden in der neuen Messkampagne nur Güterzüge und ICE-Züge gemessen und bewertet.

**3.4.1. Untersuchung der Bodeneigenschaften im Bereich der verlegten besohlenen Schwellen**

Die Berechnung der Einfügedämmung einer bestimmten Schwellenbesohlung nach dem in Kapitel 3.3.3 beschriebenen Verfahren ist nur möglich, wenn die Bodeneigenschaften im Messabschnitt der jeweiligen Schwellenbesohlung und im Messabschnitt der Referenz (unbesohlte Schwellen) zumindest hinsichtlich der Ausbreitungsgeschwindigkeit und Dämpfung von Longitudinal- und Transversalwellen gleich sind (siehe auch Abbildung 3.30). Eine Aussage zur Bodenbeschaffenheit hinsichtlich der Erschütterungsausbreitung kann man durch Messung der Erschütterungen, die durch einen Zug auf dem Gegengleis hervorgerufen werden, erhalten. Im Falle einer gleichen Bodenbeschaffenheit müssten die Erschütterungssignale in allen Messebenen gleich sein. Für diesen Versuch wählt man die Fahrten von ICE-Zügen, da diese nur sehr gering streuen.



**Abb. 3.34:** Zugfahrt eines ICE auf dem Testgleis mit unterschiedlichen besohlenen Schwellen. Eine Bestimmung der Einfügedämmung durch Vergleich der Erschütterungen in einem bestimmten besohlenen Abschnitt mit dem unbesohlenen Referenzabschnitt ist nur bei vergleichbaren Bodeneigenschaften in beiden Abschnitten möglich.



**Abb. 3.35:** Zugfahrt eines ICE auf dem unbesohlenen Gegengleis. Die durch diese Zugfahrt verursachten und mit den Körperschallsonden in den jeweiligen Messabschnitten gemessenen Erschütterungen ermöglichen eine Bewertung der Bodenbeschaffenheit der einzelnen Messebenen.

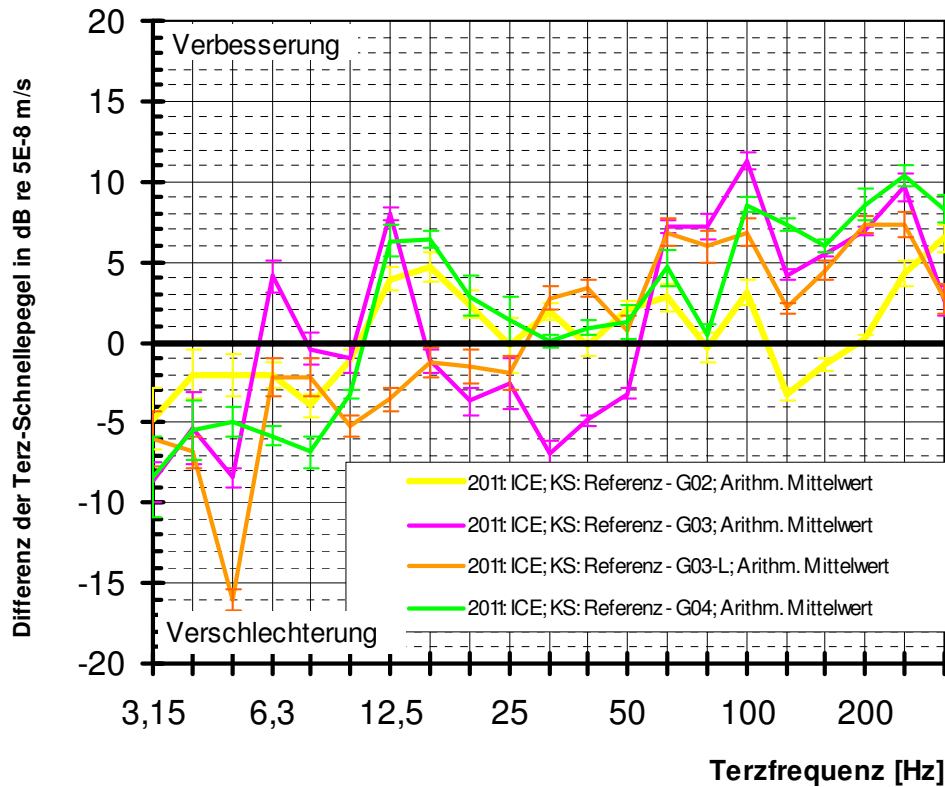
### 3.4.2. Resultate

#### 3.4.2.1. Einfügedämmung (Schotter konsolidiert, ohne Bodenkorrektur)

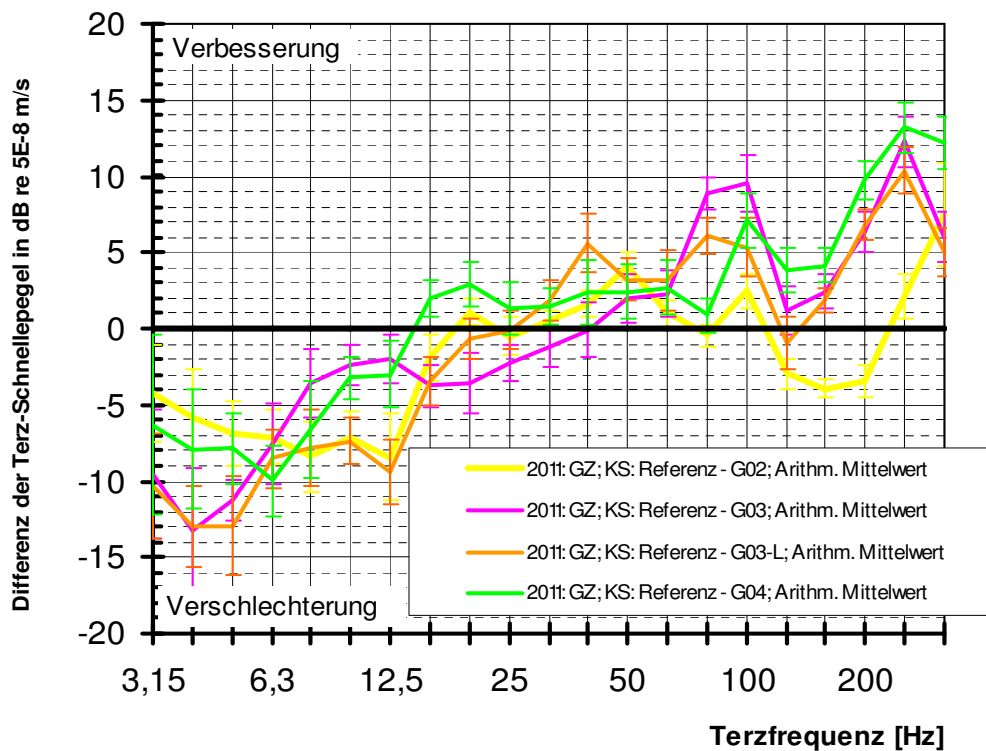
Es wurde die mittlere Einfügedämmung der Schwellenbesohlungen G02, G03, G03L und G04 für folgende zwei Zugkategorien ermittelt:

**25 Güterzugvorbeifahrten** mit einer Zuggeschwindigkeit von  $97 \text{ km/h} \leq v \leq 101 \text{ km/h}$  (Darstellung in Abbildung 3.34b).

**5 ICE-Vorbeifahrten** mit einer Zuggeschwindigkeit von  $156 \text{ km/h} \leq v \leq 160 \text{ km/h}$  (Darstellung in Abbildung 3.34a).

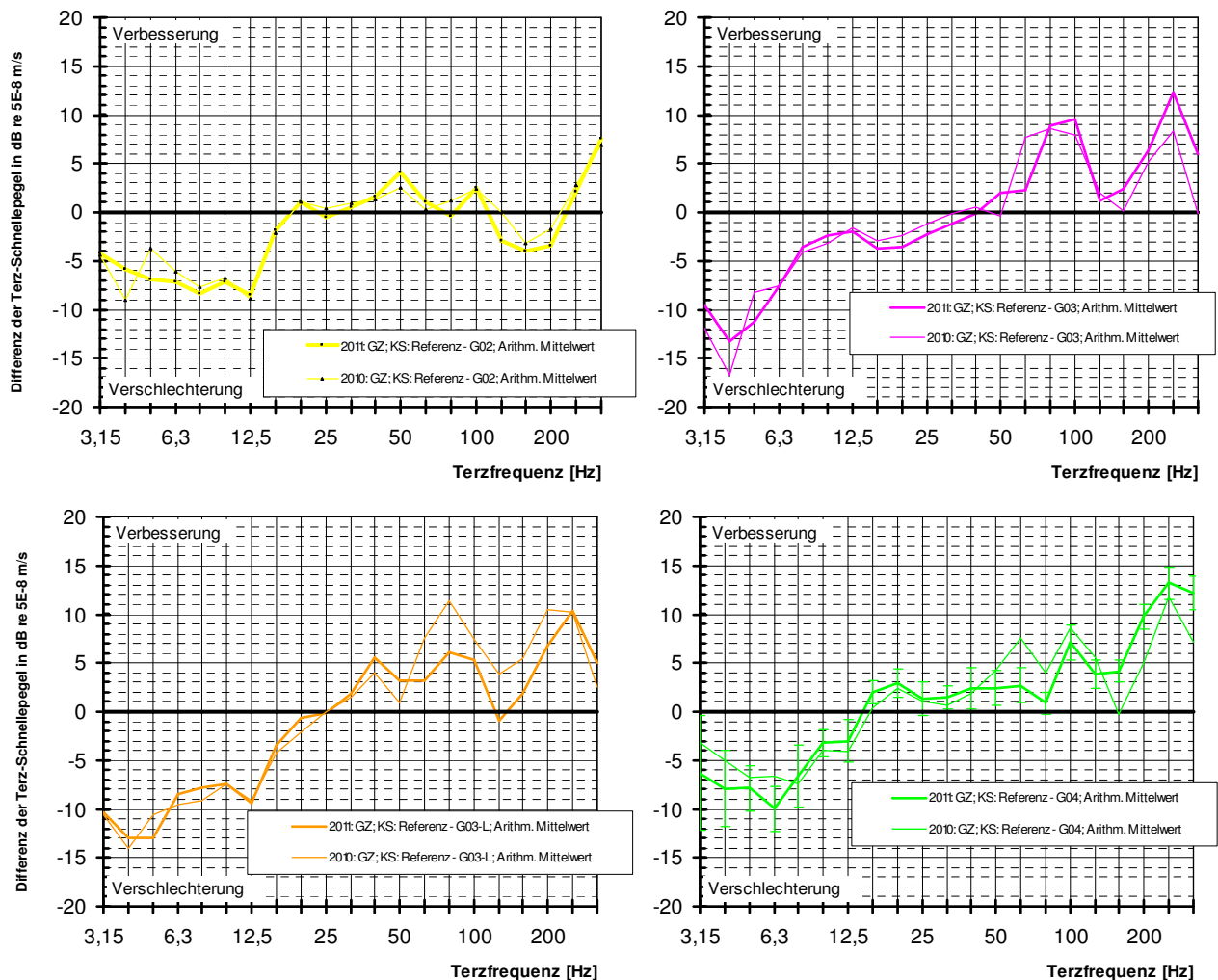


**Abb. 3.34a:** Arithmetische Mittelwerte der Einfügedämmungen der Schwellenbeschlungen G02, G03, G03L und G04 ermittelt aus insgesamt 5 ICE-Vorbeifahrten mit einer Vorbeifahrtsgeschwindigkeit  $156 \text{ km/h} \leq v \leq 160 \text{ km/h}$ . Die Fehlerbalken entsprechen der Standardabweichung.



**Abb. 3.34b:** Arithmetische Mittelwerte der Einfügedämmungen der Schwellenbeschlungen G02, G03, G03L und G04 ermittelt aus insgesamt 25 Güterzugvorbeifahrten mit einer Vorbeifahrtsgeschwindigkeit  $97 \text{ km/h} \leq v \leq 101 \text{ km/h}$ . Die Fehlerbalken entsprechen der Standardabweichung.

Die folgenden Abbildung 3.35 zeigt den Unterschied der Einfügedämmung aller Schwellensohlen zu den Messungen im September 2010 bei noch nicht konsolidiertem Schotterbett.



**Abb. 3.35:** Vergleich der Ergebnisse aus 2010 und 2011 für arithmetische Mittelwerte der Einfügedämmungen der Schwellenbesohlungen G02, G03, G03L und G04 ermittelt aus 25 Güterzugvorbeifahrten mit einer Vorbeifahrtgeschwindigkeit  $97 \text{ km/h} \leq v \leq 101 \text{ km/h}$ ).

### **Folgerungen:**

Die Einfügedämmung hat sich im Verlauf der Schotterkonsolidierung geändert. Dies gilt vor allem für die Schwellensohle G04 mit der geringsten Steifigkeit.

Der Konsolidierungseffekt für die Schwellensohle G02 ist sehr gering.

Der Konsolidierungseffekt ist für die Schwellensohle G03L trotz gleicher Steifigkeit größer als für die Schwellensohle G03. Dies bedeutet, dass die spezielle Lastverteilschicht „LVD“ eine längere Zeit braucht, bis diese Schwellensohle im Schotterbett konsolidiert ist.

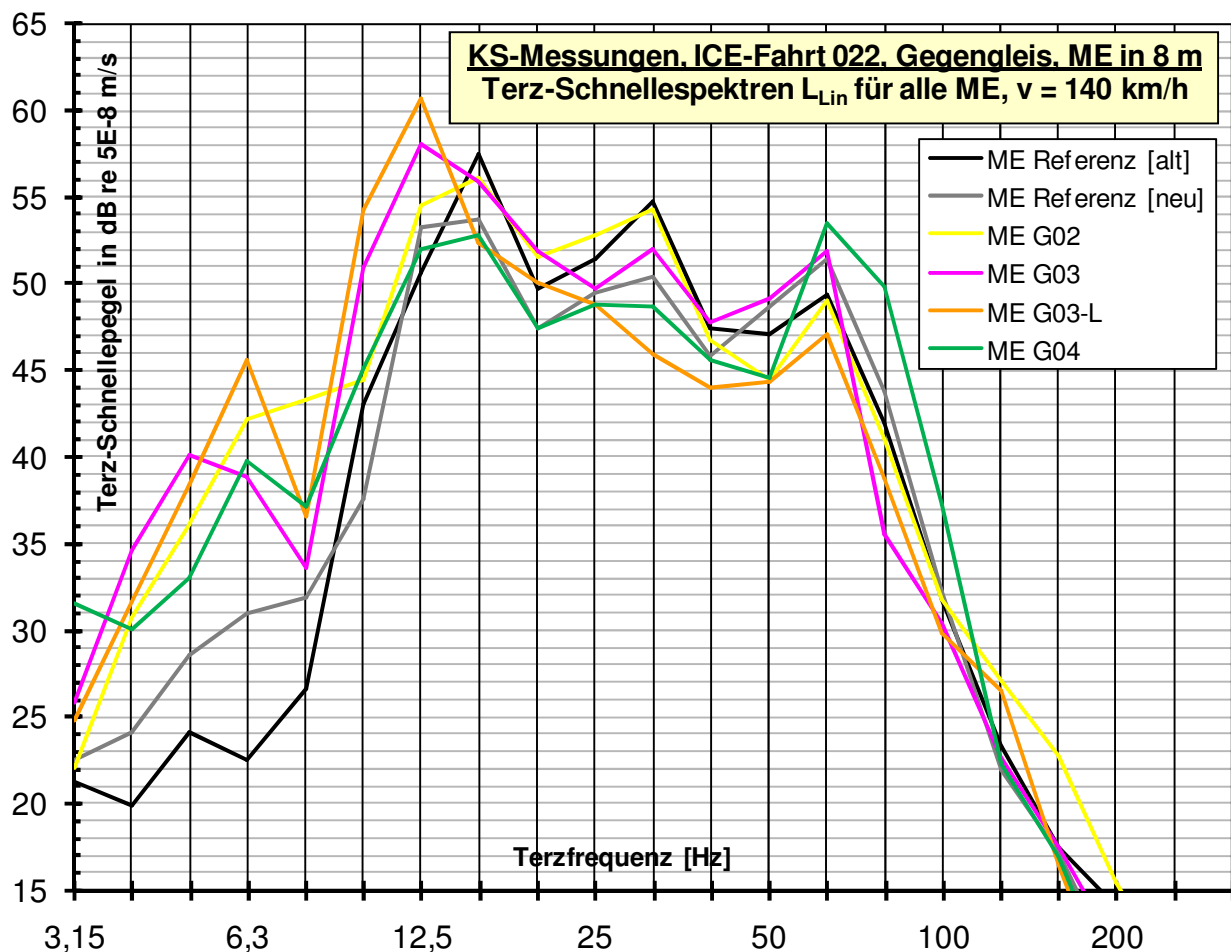
Der Konsolidierungseffekt wird insbesondere bei Frequenzen  $f > 50 \text{ Hz}$  relevant.

Ein Vergleich der Abbildungen 3.34a und 3.34b zeigt, dass die „unkorrigierte“ Einfügedämmung der unterschiedlichen Schwellensohlen für die zwei Zugkategorien „Güterzug“ und „ICE“ auch für

den konsolidierten Schotterzustand unterschiedlich ist. Unter der plausiblen Annahme der gleichen Bodenkorrektur für ICE- und Güterzüge wäre diese Aussage auch für die entsprechend korrigierte Einfügedämmung (mit der erforderlichen Bodenkorrektur, siehe Kap. 3.4.2.2) zutreffend. Bisher wurde jedoch erst die Bodenkorrektur anhand von ICE-Zügen ermittelt, so dass eine abschließende Aussage diesbezüglich noch nicht möglich ist.

### 3.4.2.2. Bodenbeschaffenheit, korrigierte Einfügedämmung

Es wurden für jede einzelne ICE-Fahrt auf dem Gegengleis die Erschütterungswerte in allen Messebenen aufgenommen. Abbildung 3.36 zeigt beispielhaft das Resultat einer ICE-Vorbeifahrt bei  $v = 140 \text{ km/h}$ .



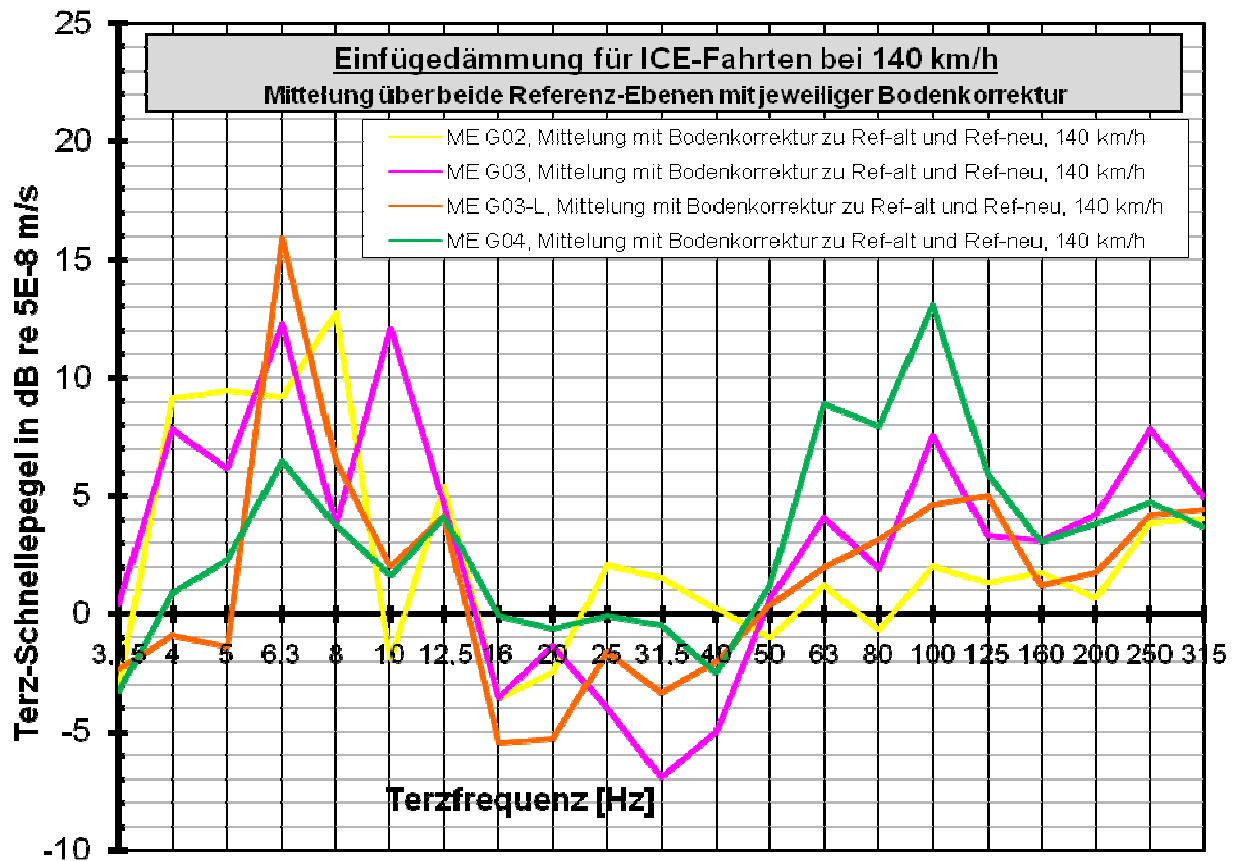
**Abb. 3.36:** Terz-Schnellespektren für die Körperschallwerte in allen Messebenen aufgrund einer einzelnen ICE-Vorbeifahrt mit  $v = 140 \text{ km/h}$  auf dem unbesohlenen Gegengleis.

Aus den Differenzen der Spektren der einzelnen besohlenen Abschnitte zum Referenzabschnitt erhält man eine Korrekturfunktion für die Bodenbeschaffenheit jedes einzelnen Messabschnittes. Um eine ausreichend gute Genauigkeit zu erhalten, waren bei der Messung zwei Messebenen im Referenzabschnitt in einem Abstand von ca. 60 m eingerichtet. Aus Abbildung 3.36 wird deutlich, dass selbst die Bodeneigenschaft in diesen zwei Referenz-Messebenen nicht identisch war.

Ermittelt an nun die Einfügedämmung für jede einzelne Schwellenbesohlung getrennt in Bezug auf beide Referenz-Ebenen, erhält man zwei „unterschiedliche“ Verläufe der Einfügedämmung in Ab-



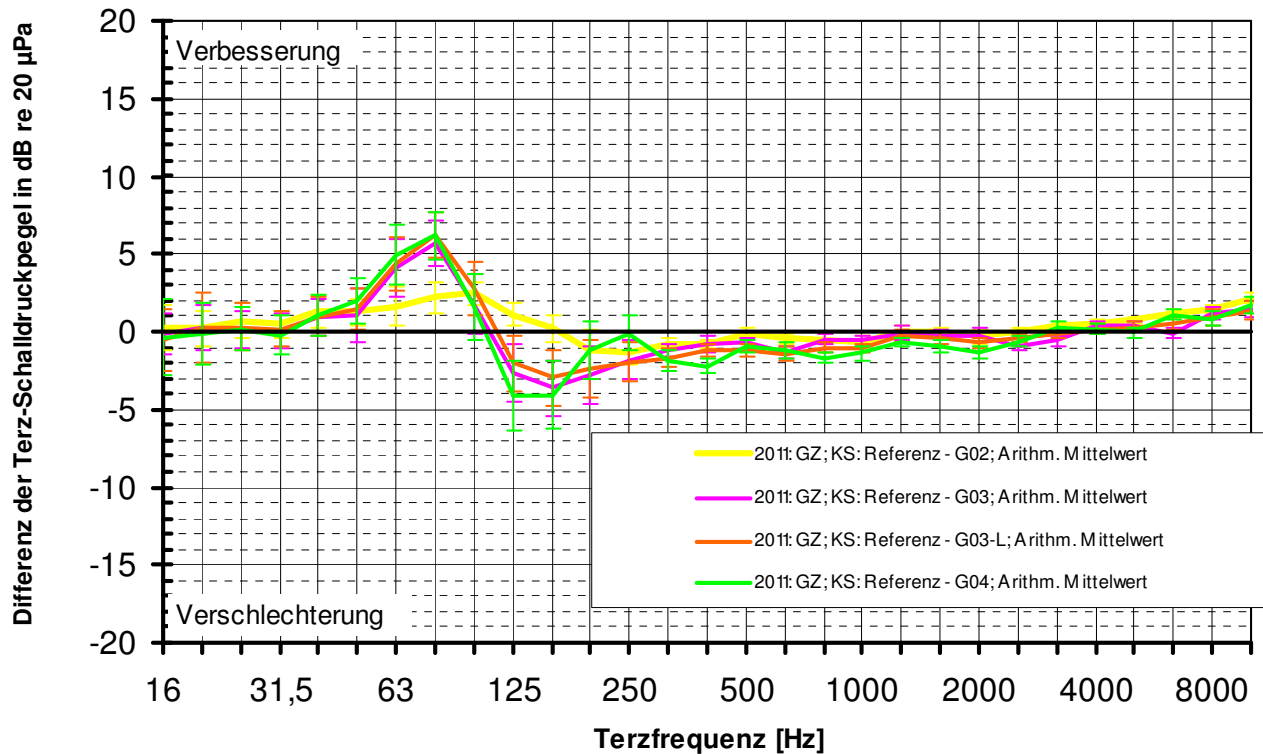
hängigkeit der gewählten Referenzebene (Abbildung 3.34a zeigt die so ermittelten Einfügedämmungen aller Schwellensohlen in Bezug auf die „alte“ Referenzebene). Korrigiert man nun beide Verläufe der Einfügedämmung mit der jeweils relevanten Korrekturfunktion, erhält man die „quantitativ korrekten Verläufe der Einfügedämmung. Abbildung 3.37 zeigt diese derart korrigierten Einfügedämmungen der unterschiedlichen Schwellenbesohlungen als nochmalige Mittelung der Resultate für beide Referenz-Ebenen.



**Abb. 3.37:** Einfügedämmung aller entwickelten Schwellenbesohlungen G02, G03, G03L und G04 im konsolidierten Schotterbett mit Berücksichtigung unterschiedlicher Bodeneigenschaften in den Messebenen und Mittelung über beide Referenzebenen.

### 3.4.2.3. Luftschall

Es wurde die mittleren Luftschall-Differenzspektren der Messabschnitte mit den Schwellenbeschlungen G02, G03, G03L und G04 für die Zugkategorie „Güterzug“ ermittelt. Hierbei wurden die **25 Güterzugvorbeifahrten** mit einer Zuggeschwindigkeit von  $97 \text{ km/h} \leq v \leq 101 \text{ km/h}$  bewertet (Darstellung in Abbildung 3.38).



**Abb. 3.38:** Arithmetische Mittelwerte der Luftschall-Differenzspektren der Schwellenbeschlungen G02, G03, G03L und G04 ermittelt aus insgesamt 25 Güterzug-Vorbeifahrten mit einer Vorbeifahrtgeschwindigkeit  $97 \text{ km/h} \leq v \leq 101 \text{ km/h}$ . Die Fehlerbalken entsprechen der Standardabweichung.

#### Folgerungen:

Im konsolidierten Schotterzustand bewirken die besohlenen Schwellen G02, G03, G03L keine signifikante Erhöhung des Luftschalls.

Eine aus Abb. 3.38 ablesbare Erhöhung des Luftschalls um maximal 1 dB im Falle der Einbaus der besohlenen Schwellen G04 sollte als singuläre Einzelaussage gewertet werden, die mit vergleichbaren Messungen an anderen Bahnstrecken noch validiert werden muss. Wahrnehmbar wäre eine derart geringe Pegelerhöhung jedoch nicht, so dass eine Reduktion dieser kleiner Pegeldifferenz mit Schienenstegdämpfern zwar theoretisch denkbar, jedoch als in der Praxis nicht erforderlich angesehen werden kann.

Ein Vergleich der beiden Messungen im unkonsolidierten und konsolidierten Schotterbett (Abb. 3.33 und Abb. 3.38) zeigt, dass es an einer Strecke unmittelbar nach dem Einbau von besohlenen Schwellen während der ersten Wochen der Schotterkonsolidierung zu einer vorübergehenden Erhöhung des Luftschalls bei Zugvorbeifahrten kommen kann.

### 3.5. Rollwiderstand des optimierten Drehgestells DRRS25L [5]

Für die Wagengruppe mit dem DRRS25L-Drehgestell (bestückt mit Radsätzen BA 318) wurde der Rollwiderstand auf einer kurvenreichen Strecke ermittelt und mit dem Rollwiderstand der Referenzwagengruppe (ebenfalls mit Radsätzen BA 318) bestückt verglichen.

Der Vergleich des Rollwiderstands erfolgt anhand von Zugkraftmessungen eines entsprechend zusammengestellten Testzuges mit den beiden relevanten Wagengruppen.

#### - Konfiguration des Testzuges

Der Testzug bestand aus 2 Wagengruppen à 3 Waggon. Die beiden Wagengruppen „Referenz“ und „DRRS25L“ waren identisch zu den in Messung [2] beschriebenen Wagen. Zwischen dem Messwagen der DB Systemtechnik und der ersten Referenzwagengruppe sowie zwischen der Referenzwagengruppe und der Wagengruppe mit den Test-Drehgestellen DRSS25L waren Messfedern zur Messung der Zugkraft eingekoppelt.



Abb. 3.39: Konfiguration des Testzuges



Fotos: DB Systemtechnik, W. Behr

Abb. 3.40: Testzug in Kurvenfahrt

#### - Durchführung der Messung

Die Feder F1 nahm die Zugkraft aller 6 Wagen auf, die Feder F2 nahm die Zugkraft der letzten 3 Wagen auf. Die Datenaufnahme und Datenverarbeitung erfolgte im Messwagen. So konnte mittels Differenzbildung über die Zugkraft der Rollwiderstand der drei ersten Referenzwaggons und der Rollwiderstand der drei letzten Testwaggons mit dem DRRS25L-Drehgestell separat ermittelt und anschließend verglichen werden.

Die Messungen wurden auf der kurvenreichen Strecke Saalfeld – Probstzella in der KW 15/2011 durchgeführt.

## - Resultat

Die folgende Tabelle 2.41 zeigt die berechneten Mittelwerte aus den ungeglätteten Messwerten:

Nummer der Messfahrt	Geschwindigkeit	Schienenzustand	Mittelwert	Mittelwert	Differenz
			F1 - F2 Zugkraft zweite	F2 Zugkraft erste	
19	30 km/h	nass	7,01 kN	6,76 kN	0,25 kN
20	30 km/h	trocken	6,57 kN	6,01 kN	0,56 kN
21	30 km/h	trocken / feucht	6,89 kN	6,08 kN	0,81 kN
22	30 km/h	nass	17,16 kN	15,96 kN	1,20 kN
23	80 km/h	trocken	8,5 kN	7,74 kN	0,76 kN
24	50 km/h	trocken	7,41 kN	6,87 kN	0,54 kN
25	30 km/h	trocken	17,16 kN	16,10 kN	1,06 kN

**Abb. 3.41:** Tabellarische Auflistung der Mittelwerte der Fahrwiderstände ausgewählter Messfahrten. Bei den Messfahrten 22 und 25 war Steigung mit teils bis zu 27 % höher als bei den anderen Messfahrten mit maximal 10 %.

## Folgerungen:

Die Mittelwerte der in Abbildung 3.41 gezeigten Messungen auf den gewählten Streckenabschnitten mit zahlreichen engen Bögen mit einem Kurvenradius bis zu 300 m zeigen die Tendenz, dass die leeren Güterwagen BA Tanoos296 mit den innovativen Drehgestellen DRSS25L und dessen radial einstellbaren Radsätzen ca. 8% weniger Zugkraft benötigen als die baugleichen leeren Güterwagen mit konventionellen Drehgestellen Y25 mit starren Radsätzen. Diese geringe Zugkraft würde eine geringe Traktionskraft und somit geringe Traktionskosten bedeuten.

Die einzelnen Messungen streuen stark, da der Rollwiderstand eines Güterwagens auch bei konstanter Geschwindigkeit und Beladung von vielen weiteren Einflussfaktoren im Rad-Schiene-Kontakt abhängig ist, die örtlich signifikante Unterschiede aufweisen können, u. a.

- Gleisrauhigkeit
- Gleisüberhöhung
- Tatsächliche Schienenkopfgeometrie
- Genaue Spurweite
- Feuchtigkeit der Schienen

## **4. Zusammenfassung**

### **4.1. Teilprojekt B3**

Im Teilpaket B3 konnten kostengünstige und dennoch effektive Schienendämpfer der Fa. Vossloh entwickelt, in einer Teststrecke eingebaut und getestet werden. Die Durchführung der Validierungsmessung zeigte eine akustische Wirksamkeit dieser Schienendämpfer von nahezu 3 dB (bei Güterwagen mit Verbundstoffsohle). Die Patentanmeldung dieser Schienendämpfer seitens der Fa. Vossloh erfolgte am 28.04.2011 unter der internationalen Veröffentlichungsnummer „WO 2011/048209 A4“.

Außerdem konnten weitere wichtige Ergebnisse hinsichtlich des Zusammenwirkens von Rad- und Schienendämpfer erzielt werden: die Einzelwirkung eines gedämpften Rades auf die gesamte Schallabstrahlung der Zugvorbeifahrt betrug im Falle des Radsatzes BA308 etwas mehr als 1 dB, die Einzelwirkung der Schienendämpfer auf die gesamte Schallabstrahlung der Zugvorbeifahrt betrug zwischen 2,5 dB und 3 dB. Diese Einzelwirkung der Schienendämpfer war nahezu unabhängig von der Radsatzbauart (getestet wurden de facto fünf unterschiedliche Bauarten: BA 318, BA 308 ohne Raddämpfer, BA 308 mit Raddämpfern, BA 309 ohne Raddämpfer, BA 309 mit Raddämpfern). Dieses Resultat bedeutet nun jedoch nicht, dass Schienendämpfer effektiver als Raddämpfer sind. Vielmehr war dies im Falle der Teststrecke bei Langweid und der hier vorliegenden Oberbaukonfiguration der Fall, bei anderen Oberbaukonfigurationen können dieselben Schienendämpfer weniger und dieselben gedämpften Radsätze mehr Einzelwirkung zeigen. Dies wird anhand der Bewertung der Gesamtwirkung der Rad- und Schienendämpfer deutlich: diese Gesamtwirkung von Rad- und Schienendämpfern auf die gesamte Schallabstrahlung der Zugvorbeifahrt betrug über 4 dB, im Falle der Zuggeschwindigkeit von 80 km/h sogar 4,7 dB. Somit war – im Falle des Zusammenwirkens der gedämpften Radsätze BA 308 (Einzelwirkung 1,2 dB) mit den Schienendämpfern (Einzelwirkung 2,6 dB) – bei einer Zuggeschwindigkeit von 80 km/h die Gesamtwirkung (4,7 dB) größer als die Summe der Einzelwirkungen ( $4,7 \text{ dB} > 1,2 \text{ dB} + 2,6 \text{ dB}$ ) und bestätigt somit die durchgeführten Simulationen mit der Software TWINS. Die spektrale Wirksamkeit bei einigen Frequenzen war sogar deutlich höher, bei 2000 Hz sogar 9 dB.

Berücksichtigt man ferner die Tatsache, dass am Testzug der Referenzradsatz BA 318 anstatt des zu Projektbeginn vorgesehenen Standardradsatzes BA 004 zur Verfügung stand und diese Radbauform BA318 gegenüber der Radbauform BA 004 etwas lauter ist, konnte das Projektziel einer Schallreduktion von 5 dB mit dem kombinierten Einsatz von Rad- und Schienendämpfern erreicht und nachgewiesen werden.

Im Teilpaket B3 konnte die hochelastische Schienenbefestigung LIZARG entwickelt werden. Es besteht eine Konstruktionsfreigabe der Deutschen Bahn. Die Anmeldung der Gebrauchsmusterschrift dieses Systems zur Befestigung einer Schiene seitens der Fa. Vossloh erfolgte am 25.02.2010 unter der Nummer „DE 20 2010 007 413 U1“. Derzeit werden Prototypen dieses Schienenstützpunktes umfangreichen Laboruntersuchungen unterzogen.

Im Teilpaket B3 konnten außerdem unterschiedliche Schwellensohlen der Fa. Getzner entwickelt bzw. weiter optimiert werden. Im Fokus standen hierbei insbesondere eine Schwellenbesohlung mit einer speziellen Lastverteilschicht „LVD“ sowie eine besonders weiche Schwellenbesohlung.

Mit der Technischen Mitteilung „TM 2010-1424 I.NVT 4“ vom 27.08.2010 wurde dem Einbau dieser Schwellen mit elastischer Sohle B70 So W mit vier verschiedenen Besohlungen im Gleis Mangolding – Sünching als Maßnahme im Rahmen des Projektes LZarG seitens DB Netz AG zugestimmt. Der Einbau wurde im August 2010 im Rahmen einer ohnehin geplanten Gleiserneuerung (mit Einsatz BRM) realisiert. Vor der Inbetriebnahme und nach ca. 5 ½ Wochen Betriebsbelastung wurden QVWE-Messungen durch die Fachabteilung TTZ 116.1 der DB Systemtechnik durchgeführt, die der Beurteilung der Stabilität des lückenlosen Gleises bei der Inbetriebnahme und da-

nach dienten. Die zu diesem Zeitpunkt gemessenen Querverschiebewiderstände der untersuchten besohnten Schwellen lagen hinsichtlich des jeweiligen 2 mm - Wertes über den Werten der unbe-sohnten Schwellen. Aus Sicht von DB Netz ist infolge der Betriebsbelastung mit einer weiteren Änderung bzw. Entwicklung der Querverschiebewiderstände zu rechnen. Ob sich der im Rahmen des Projektes LZarG ermittelte Trend dann bestätigt oder ob z.B. die nicht besohnte Schwelle „aufholt“ bzw. sich sonstige Effekte ergaben, sollte durch mindestens eine QVWE-Folgemessung in 2011 seitens DB Netz ermittelt werden. So können sich insbesondere mögliche Auswirkungen der über längerer Zeit höheren Geschwindigkeiten (> 90 km/h bis 160 km/h) besser als bisher zeigen, da innerhalb des Zeitraums von 38 Tagen mit Betriebsbelastung das Gleis nur an 12 Tagen mit Geschwindigkeiten > 90 km/h befahren wurde.

Die akustische Wirksamkeit dieser Schwellenbesohlungen wurde mit einer Validierungsmessung untersucht. Es konnten hohe Einfügedämmungen der entwickelten Schwellensohlen nachgewiesen werden: so betrug die Einfügedämmung der Schwellensohle G03 im Bereich 50 Hz < f < 160 Hz bis zu 7 dB, im Falle der weicheren Schwellensohle G04 konnte in diesem Frequenzbereich sogar Einfügedämmungen von bis zu 13 dB nachgewiesen werden.

## **4.2. Teilprojekt C**

Im Innovationsprojekt LZarG konnten folgende Einzelmaßnahmen entwickelt, optimiert und anschließend im eingebauten Zustand hinsichtlich der akustischen Wirksamkeit getestet werden:

- Radsatzbauart BA308 der Fa. Gutehoffnungshütte Radsatz GmbH mit / ohne zugehörigen Raddämpfern der Fa. Schrey & Veit GmbH
- Radsatzbauart BA309 der Fa. Bochumer Verein Verkehrstechnik GmbH mit / ohne zugehörigen Raddämpfern der Fa. Bochumer Verein Verkehrstechnik
- optimiertes Drehgestell DRSS25L mit radial einstellbaren Radsätzen und CFCB-Kompaktbremse der Firmen DB Waggonbau Niesky GmbH, Knorr-Bremse und ContiTech Luftfedersysteme GmbH.
- Schienenstegdämpfer der Fa. Vossloh Fastening Systems GmbH
- Schwellensohlen unterschiedlicher Steifigkeit der Fa. Getzner Werkstoffe GmbH.

Die Entwicklungen wurden begleitet von den Technischen Universitäten München, Dresden und Berlin.

### **4.2.1. Luftschallmessungen mit dem Testzug**

Beide gedämpften Radsätze – jeweils als Einzelmaßnahme betrachtet - zeigten eine ähnliche Reduktionswirkung von ca. 1 – 2 dB, wobei die Wirkung auf dem TSI-Gleis ca. 0,5 dB besser war als auf dem realen Gleis.

Beim gedämpften GHH-Radsatz BA 308 wurde diese akustische Verbesserung größtenteils vom Radabsorber der Fa. Schrey&Veit verursacht, die Radbauform BA308 war akustisch vergleichbar mit dem Referenzrad BA 318.

Beim gedämpften BVV-Radsatz BA309 wurde diese akustische Verbesserung teils vom Radabsorber der Fa. BVV, doch auch zu einem Anteil von 0,5 dB – 1,0 dB von der Radbauform BA309 (bzw. der speziellen thermischen Behandlung dieser Räder) verursacht.

Das Drehgestell DRSS25L zeigte auf gerader Strecke keine signifikante akustische Verbesserung der Luftschallpegel der Zugvorbeifahrt. Durch die radiale Einstellbarkeit der Radsätze im Drehgestell konnte die von den Radsätzen und der Schiene dominierte Schallabstrahlung einer Zugvor-

befahrt somit nicht positiv beeinflusst werden. Auch in Kombination mit dem gedämpften Radsatz BA308 konnte keine erhöhte Wirkung erzielt werden, die die Wirkung des gedämpften Radsatzes als Einzelmaßnahme erhöhte.

In Kurvenfahrten bewirkt die radiale Einstellbarkeit der Radsätze im Drehgestell jedoch eine Reduktion des Rollwiderstandes, was aufgrund der geringeren erforderlichen Zugkraft geringere Traktionskosten zur Folge hat.

Die Schienendämpfer der Fa. Vossloh konnten den Vorbeifahrtpegel um 2,5 dB – 3 dB reduzieren. Diese Wirksamkeit war nahezu unabhängig vom Radsatz.

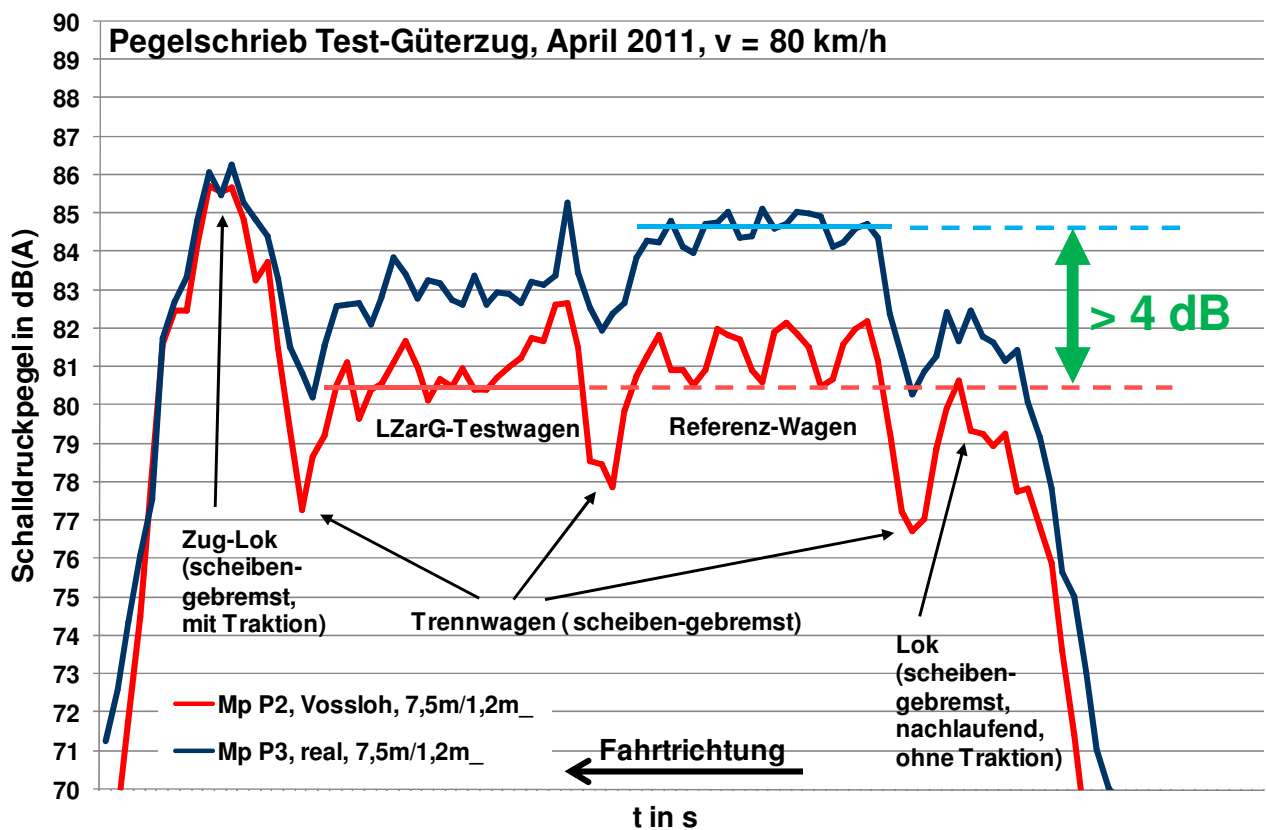
Die Kombination der Schallreduktionsmaßnahmen am Radsatz und am Gleis durch Dämpfungselemente bewirkt nahezu die Summe der Einzelmaßnahmen:

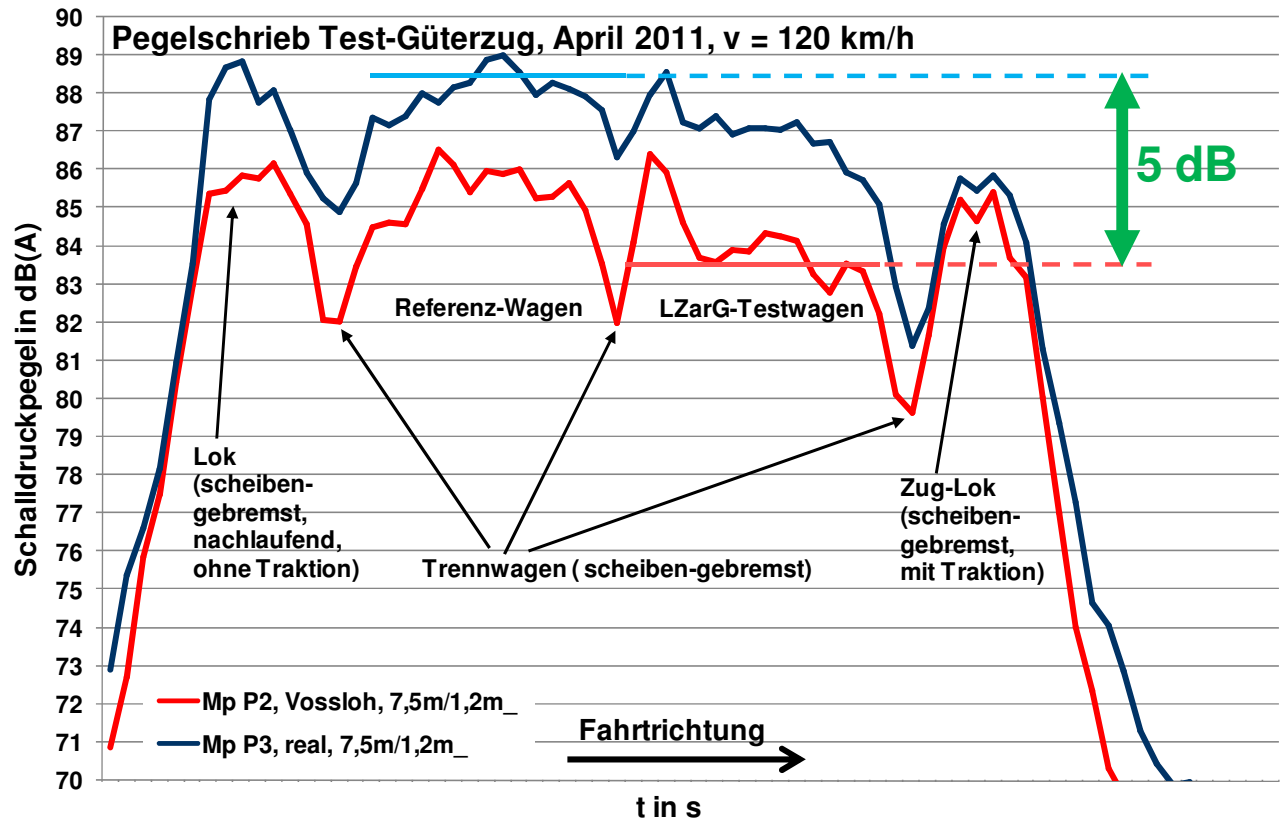
- Einzelwirkung der gedämpften Radsätze: **Wirkung 1 – 2 dB**
- Einzelwirkung der Schienendämpfer: **Wirkung 2,5 – 3 dB**
- Kombination „gedämpfte Radsätze auf gedämpften Gleis“: **Wirkung > 4 dB**

Die Kombination aller im Projekt LZarG entwickelten Maßnahmen bewirkte eine weitere geringfügige Verbesserung:

- „gedämpfte Radsätze im Drehgestell DRRS25L auf gedämpften Gleis“: **Wirkung 4,5 – 5 dB**

Abbildung 3.42 zeigt diese akustische Wirksamkeit aller Maßnahmen eindrucksvoll anhand von Pegelschrieben des Testzuges einer einzelnen Zugvorbeifahrt bei  $v = 80 \text{ km/h}$  bzw.  $v = 120 \text{ km/h}$ .





**Abb. 3.42:** Pegelschriebe von zwei einzelnen Zugvorbeifahrten des LZarG-Testzuges bei der Geschwindigkeit  $v = 80$  km/h (oben) und  $v = 120$  km/h (unten). Die jeweils blaue (bzw. rote) Kurve zeigt den Pegelverlauf der Zugvorbeifahrt auf dem realen unbedämpften (bzw. bedämpften) Gleis. Deutlich erkennt man die Wirkung der Schienendämpfer von ca. 2,5 dB – 3 dB.

Bezieht man die Resultate auf das „Standardrad BA 004“ statt auf das verwendete „Referenzrad BA 318“, so erhöht sich die Pegeldifferenz um ca. 0,5 dB – 1 dB, da die Radbauform BA004 bis zu 1 dB lauter ist als die Radbauform BA318 (siehe Abbildung 3.43).



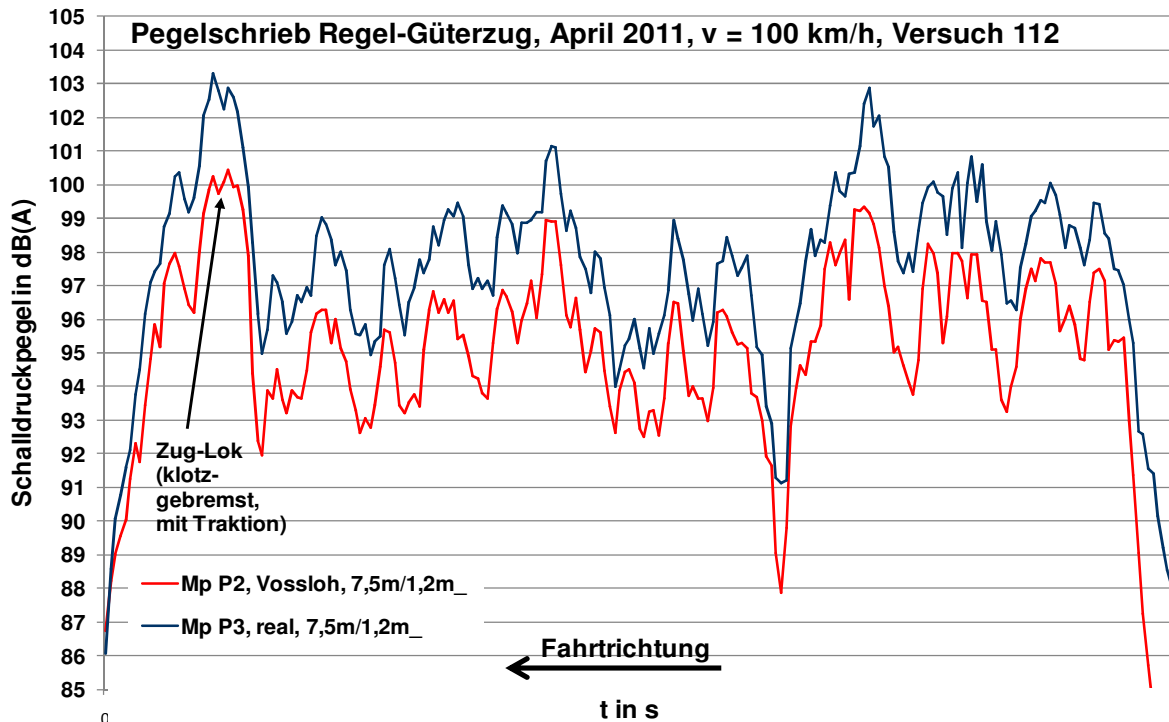
**Abb. 3.43:** Anstelle des Standardrades BA004 (rechts) wurde das Rad BA318 (links) als Referenzrad im LZarG-Testzug verwendet. Die Radscheibe des BA318 ist etwas dicker und anders geformt, so dass diese Radbauform BA318 bereits etwas leiser ist als die Radbauform BA004.

**Somit konnte das Gesamtziel einer Lärminderung um mindestens 5 dB aufgrund der im Innovationsprojekt LZarG entwickelten Maßnahmen erreicht werden.**

Die im Projekt LZarG entwickelten Maßnahmen sind als Retrofit-Maßnahmen konzipiert. Sie sollen eine weitere Reduktion des Vorbeifahrtgeräusches vor allem von Güterzügen bewirken, die bereits von der „lauten“ Grauguss-Bremssohle auf die „leise“ Verbundstoff-Sohle umgerüstet wurden



(siehe Abb. 1.1). Somit waren die Maßnahmen für Güterzüge mit Verbundstoff-Sohle konzipiert und optimiert, sie wirken jedoch auch als Retrofit-Maßnahme bei Güterzügen mit Grauguss-Bremssohle. So konnte im Fall der Schienendämpfer auch bei Regelgüterzügen mit Grauguss-Bremssklötzen mit ca. 2 dB eine Wirksamkeit nachgewiesen werden, die nur geringfügig unter der Wirksamkeit bei Güterzügen mit K-Sohle lag. Abb.3.44 zeigt exemplarisch die Vorbeifahrt eines Regel-Güterzuges auf der Teststrecke auf dem realen ungedämpften bzw.bedämpften Gleis.



**Abb. 3.44:** Pegelschriebe einer einzelnen Zugvorbeifahrt eines Regelgüterzuges auf der Teststrecke bei der Geschwindigkeit  $v = 100$  km/h. Die jeweils blaue (bzw. rote) Kurve zeigt den Pegelverlauf der Zugvorbeifahrt auf dem realen ungedämpften (bzw. bedämpften) Gleis. Deutlich erkennt man die Wirkung der Schienendämpfer auch bei Güterzügen mit Grauguss-Bremssohle. Bei diesem Zug ist das Rollgeräusch der Lok mit GG-Bremse größer als das Traktionsgeräusch, so dass die Schienendämpfer auch das Vorbeifahrtgeräusch der Lok reduzieren können.

Ein Vergleich der Abbildungen 3.42 und 3.44 zeigt ferner den deutlichen Unterschied zwischen den unterschiedlichen Bremssohlen „Grauguss“ bzw. „Komposit“.

Der Summenpegel der Zugvorbeifahrt des Testzuges, dessen Güterwagen ausschließlich mit K-Sohle ausgestattet waren, betrug für die Referenzwagen ohne LZarG-Retrofit-Maßnahmen zwischen 85 dB(A) – 89 dB(A) für die Zuggeschwindigkeiten 80 km/h bzw. 120 km/h. Die scheibengebremsten Trennwagen waren lediglich 4 dB leiser. Der Summenpegel der Zugvorbeifahrt eines willkürlichen Regel-Güterzuges betrug jedoch bei der Zuggeschwindigkeit 100 km/h teils deutlich über 100 dB(A). Dies bestätigt – als Nebeneffekt der Meßkampagne – die akustische Wirkung der K-Sohle um teils über 10 dB, falls die Radoberfläche der K-Sohle-Güterwagen entsprechend gering verriffelt sind.

Die Pegelunterschiede innerhalb des Regelgüterzuges von teils 8 dB im Vorbeifahrtgeräusch werden von den unterschiedlich verriffelten Radlaufflächen der Räder mit Grauguss-Bremssohle verursacht. Abbildung 3.44 zeigt, dass die Schienendämpfer auf alle Wagen annähernd gleich wirken. Somit belegt diese Zugvorbeifahrt bzw. deren Vergleich auf dem ungedämpften und ge-

dämpften Gleis ebenfalls als Nebeneffekt der Meßkampagne, dass die Wirkung von Schienen-dämpfern unabhängig von der Radrauheit der Räder des Zuges ist.

#### 4.2.2. Körperschallmessungen mit Regelzügen (mit Bodenkorrektur für ICE-T-Züge)

Mit den **Validierungsmessungen der besohnten Schwellen** konnte ebenfalls deren Wirksamkeit nachgewiesen werden (siehe Abbildung 3.37):

Die harte Schwellensohle G02 verhielt sich hinsichtlich der Einfügedämmung nahezu neutral. Sie muss jedoch im Übergangsbereich zu den weicheren Schwellenbesohlungen verlegt werden, da sonst der Sprung der Steifigkeit von unbesohnten Schwellen zu besohnten Schwellen (im Falle geringer Steifigkeit) hinsichtlich der Oberbaudynamik zu groß wäre.

Für die Schwellensohlen mittlerer (G03, G03L) und geringer Steifigkeit (G04) konnte eine teils deutliche Wirksamkeit nachgewiesen werden:

- |        |                          |                               |
|--------|--------------------------|-------------------------------|
| - G03L | Einfügedämmung bis 5 dB  | im Bereich 50 Hz < f < 160 Hz |
| - G03  | Einfügedämmung bis 7 dB  | im Bereich 50 Hz < f < 160 Hz |
| - G04  | Einfügedämmung bis 13 dB | im Bereich 50 Hz < f < 160 Hz |

Die Wirksamkeit in diesem Frequenzbereich beeinflusst vor allem den sekundären Luftschall in Gebäuden nahe einer Bahnstrecke.

Im tieferen Frequenzbereich haben Schwellensohlen systembedingt einen Einbruch der Wirksamkeit, der sich jedoch für die entwickelten Schwellensohlen als vertretbar gering herausstellte:

- |        |                               |                                |
|--------|-------------------------------|--------------------------------|
| - G03L | Einfügedämmung bis max. -5 dB | im Bereich 12,5 Hz < f < 40 Hz |
| - G03  | Einfügedämmung bis max. -7 dB | im Bereich 12,5 Hz < f < 40 Hz |
| - G04  | Einfügedämmung bis max. -3 dB | im Bereich 12,5 Hz < f < 40 Hz |

Die Wirkung in diesem Frequenzbereich beeinflusst vor allem den Körperschall in Gebäuden nahe einer Bahnstrecke.

Somit zeigt die weiche Schwellenbesohlung G04 klar eine bessere Wirksamkeit im Vergleich zur etwas härteren Schwellenbesohlung G03 bzw. G03L. Auf Strecken, auf denen die weiche Schwellenbesohlung G04 u. a. hinsichtlich Oberbaudynamik und Streckengeschwindigkeit zur Anwendung kommen kann, wird eine höhere Einfügedämmung erreicht als mit den Schwellensohlen G03 bzw. G03L.

Die spezielle Lastverteilsschicht der Schwellensohle G03L reduziert die negative Wirkung der Einfügedämmung im tieferen Frequenzbereich  $f < 40$  Hz im Vergleich zur Schwellensohle G03, allerdings zu Lasten einer etwas geringeren positiven Wirkung der Einfügedämmung im höheren Frequenzbereich für  $f > 50$  Hz.

Die Auswirkung der Schwellensohlen auf den Luftschallpegel des Vorbeifahrtgeräusches ist vernachlässigbar gering.

## 5. Unterschriften

Erstellt:

gez. Behr

Dr. Wolfgang Behr  
Technische Projektleitung  
DB Systemtechnik, T.TVI 32(1)

Geprüft:

gez. Lölgen

Dr. Thomas Lölgen  
DB Systemtechnik  
Leiter T.TVI32(1)

Freigegeben:

gez. Mather

Dr. Matthias Mather  
Gesamtleitung  
DB Umweltschutz (TUM)

# Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN Entfällt	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel <b>Innovationsprojekt „Leiser Zug auf realem Gleis“ (LZarG) – Abschlussbericht</b>	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Dr. Wolfgang Behr	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.08.2011
	6. Veröffentlichungsdatum Entfällt
	7. Form der Publikation Bericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) DB Systemtechnik GmbH, T.TVI32(1), Völkerstr. 5, 80939 München	9. Ber. Nr. Durchführende Institution 07-P-4115
	10. Förderkennzeichen 19 U 7020 A
	11. Seitenzahl 154
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) 53107 Bonn	13. Literaturangaben 10
	14. Tabellen 13
	15. Abbildungen 171
16. Zusätzliche Angaben entfällt	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) entfällt	
18. Kurzfassung  Dieser Bericht enthält die seitens der DB Systemtechnik erfolgten Arbeiten bei den im Projekt LZarG entwickelten Maßnahmen sowie die am Projektende durchgeführten Validierungsmessungen der im Projekt entwickelten Maßnahmen zur Schallreduktion im Schienenverkehr. <b>1. Derzeitiger Stand von Wissenschaft und Technik</b> Die Validierungsmessungen erfolgten mit einem Testzug auf drei unterschiedlichen Gleisabschnitten (TSI-Gleis, reales Gleis ohne Schienendämpfer, reales Gleis mit Schienendämpfern). Der Testzug bestand aus Referenzwagen sowie Testwagen mit den entwickelten Maßnahmen (innovatives Drehgestell, zwei unterschiedliche optimierte Radsätze mit Raddämpfern). Die Schallabstrahlung der Referenz-Güterwagen auf dem TSI- und realen Gleis ohne Dämpfer stellen somit den derzeitigen Stand der Technik dar, die Schallabstrahlung der Test-Wagen auf dem Testgleis zeigt das zukünftige Potenzial zur Schallreduktion bei Zugvorbeifahrten auf. Weiterhin erfolgten Messfahrten mit Regelzügen (Güterzug, Regiozug, ICE) auf einem weiteren Testgleis mit unterschiedlichen besohlenen Schwellen zur Bestimmung der Einfügedämmung der unterschiedlichen im Projekt entwickelten Schwellensolehnen. Auch hier zeigen die Resultate der Zugfahrten auf unbesohlenen Schwellen und auf den Schwellen mit bereits vorhandenen Schwellensolehnen den derzeitigen Stand der Technik, die Resultate der Zugfahrten auf den Schwellen mit den innovativen neu entwickelten Schwellenbesohlungen zeigen das zukünftige Potenzial zur Reduktion von sekundärem Luftschall und Erschütterungen bei Zugvorbeifahrten auf. <b>2. Zielsetzung der Untersuchung</b> Die Validierungsmessungen zeigen die akustische Wirksamkeit der entwickelten Maßnahmen auf. Ein weiterer Projektteil bewertet die unterschiedlichen Maßnahmen hinsichtlich deren Wirtschaftlichkeit. <b>3. Methode</b> Ein Vergleich der akustische Vorbeifahrtpegel zwischen Referenz und innovativen Maßnahmen ergibt die akustische Wirksamkeit der Maßnahmen „innovatives Drehgestell“, „gedämpfter Radsatz“ und „Schienendämpfer“ der entwickelten Produkte der im Projekt beteiligten Firmen sowie das Schallreduktionspotenzial aller Maßnahmen zusammen. Ein Vergleich der Einfügedämmung der unterschiedlichen Schienenabschnitte ergibt die Wirksamkeit der unterschiedlichen Schwellenbesohlungen der im Projekt beteiligten Firma. <b>4. Ergebnis</b> Mit allen entwickelten Maßnahmen in Kombination ist eine Schallreduktion von Zugvorbeifahrten von mehr als 5 dB möglich. <b>5. Schlussfolgerung/Anwendungsmöglichkeiten</b> Den Unternehmensbereichen DB-Netz und DB-Schenker sowie dem Bahnumweltzentrum stehen nun Produkte der Bahnindustrie und Kenntnisse über deren akustische Wirksamkeit sowie Aussagen zur Wirtschaftlichkeit aufgrund durchgeführter LCC-Analysen zur Verfügung, um zukünftige weitere Schritte zu einer leiseren Bahn unternehmen zu können.	
19. Schlagwörter Akustik, Schienendämpfer, Raddämpfer, LCC, Schallreduktion	
20. Verlag entfällt	21. Preis entfällt

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN Not applicable	2. type of document (e.g. report, publication) report
3. title <b>Innovationsprojekt „Leiser Zug auf realem Gleis“ (LZarG) – Abschlussbericht</b>	
4. author(s) (family name, first name(s)) Dr. Wolfgang Behr	5. end of project 31.08.2011
	6. publication date Not applicable
	7. form of publication report
8. performing organization(s) (name, address) DB Systemtechnik GmbH, T.TVI32(1), Völkerstr. 5, 80939 München	9. originator's report no. 07-P-4115
	10. reference no. 19 U 7020 A
	11. no. of pages 154
12. sponsoring agency (name, address)  Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) 53107 Bonn	13. no. of references 10
	14. no. of tables 13
	15. no. of figures 171
16. supplementary notes Not applicable	
17. presented at (title, place, date) Not applicable	
18. abstract  This report contains the work within the project LZarG done by DB Systemtechnik concerning the developed measures for the reduction of noise of rail traffic and the validation measurement campaign at the end of the project in order to validate the acoustical effect of the measures. <b>1. State of the art</b> The validation measurements were performed with a test train on three different track systems (TSI-track, real track without rail dampers, real track with rail dampers). The test train consisted of reference wagons and test wagons with the developed measures (innovative bogie, two different optimized wheelsets with wheel dampers). The sound radiation of the reference freight wagons rolling on the TSI-track and the real track without rail dampers demonstrate the state of the art. The sound radiation of the test freight wagons rolling on the test track (= real track with rail dampers) show in field tests the potential of sound reduction. Furthermore additional test runs were performed with regular trains (freight trains, regional train, high speed train) running on another test track equipped with different under sleeper pads in order to determine the insertion loss. The results of the train pass-bys on the track with regular sleepers (without under sleeper pads) demonstrate the state of the art. The results obtained with developed innovative under sleeper pads show the future potential of the possible reduction of ground borne noise and vibrations. <b>2. Purpose of the investigation</b> The validation measurements show the acoustic efficiency of the measures developed. Another part analyses the cost effectiveness of these measures. <b>3. Method</b> A comparison of the sound pressure levels of the train pass-bys (with and without measure) yields in the acoustical efficiency of the different measures developed within the project. Also the optimum effect of all measures acting together can be achieved with the test runs performed. <b>4. Result</b> All developed measures show in combination a sound reduction potential of more than 5 dB. <b>5. Conclusion and application possibility</b> Now important knowledge is available for different sectors of Deutsche Bahn like DB-Netz and DB-Schenker and also for the environment department of Deutsche Bahn concerning new and innovative measures and products to reduce the railway noise. Due to the considerations on life cycle costs and cost effectiveness now future steps and decisions can be done for low noise trains.	
19. keywords Acoustic, rail dampers, wheel dampers, life cycle costs, noise reduction	
20. publisher Not applicable	21. price Not applicable