

Gleisseitige Schallemission - Experimentelle Quantifizierung und Bewertung konstruktiver Maßnahmen

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Christoph Gramowski
aus Münster

von der Fakultät V - Verkehrs- und Maschinensysteme
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing Jürgen Siegmann

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Markus Hecht

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Michael Beitelschmidt

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 8. Februar 2013

Berlin, 2013

D 83

Danksagung

Diese Arbeit konnte nur durch die Unterstützung meiner Kollegen inner- und außerhalb der Technischen Universität Berlin und meiner Familie entstehen.

Vor allem möchte ich Prof. Dr. M. Hecht für die lehrreiche und außergewöhnlich praxisorientierte Zeit am Fachgebiet Schienenfahrzeuge der TU Berlin danken. Ich konnte in einem sehr kollegialen Umfeld viele interessante Projekte durchführen, aus denen schließlich die Ideen zu dieser Arbeit entstanden. Theoretischen Ansätze wurden immer wieder von Prof. Hecht durch Denkanstöße zu bahnspezifischen Randbedingungen weiterentwickelt.

Auch meinem Zweitgutachter, Prof. Dr. M. Beitelschmidt von der TU Dresden, möchte ich für die pragmatische Begleitung in der Ausarbeitungsphase danken. Durch die Gespräche haben sich neue Ansichten und Fragestellungen ergeben, die für diese Arbeit sehr förderlich waren.

Ebenso danke ich Prof. Dr. J. Siegmann, TU Berlin, für die Gespräche zu aktuellen Aspekten der Fahrwegtechnik und die Übernahme des Vorsitz des Promotionsausschusses.

Die Forschungsprojekte an der TU Berlin wären nicht möglich gewesen, wenn nicht mit Systemhäusern, Zulieferern, Verkehrsunternehmen, Mess- und Prüfbüros, Umwelt- und Verkehrsbehörden und befreundeten Forschungseinrichtungen fruchtbare Kooperationen bestanden hätten. Allein die Bereitschaft vieler Unternehmen, auch sehr innovative Ansätze praktisch zu testen, ist nicht selbstverständlich.

Bei den vielen Messkampagnen wurde ich von meinen Kollegen des Fachgebietes tatkräftig unterstützt. Vor allem Michael Schmidt und Harald Jakatt aus der Laborwerkstatt des Fachgebietes Schienenfahrzeuge haben auch ungewöhnliche Messprogramme unter schwierigen Bedingungen umsetzen können. Vielen Dank für Eure Erfahrung und Ausdauer!

Die Durchführung und Auswertungen aller Messungen war nur mit Unterstützung der Studentischen Hilfskräfte möglich. Vielen Dank an Marco Wienert, Mike Fieber, Robert Sieglitz, Sascha Nesterow, Daniel Jobstfinke und Louis Grohe.

Der Bezug zum Gesamtsystem der Bahntechnik wurde durch Gespräche mit meinen (Ex-) Kollegen und den Gastreferenten am Fachgebiet Schienenfahrzeuge stets erneuert, vielen Dank an alle Beteiligten.

Sehr hilfreich in der Schlussphase der Promotion war auch die Unterstützung meines Arbeitgebers. Ich möchte mich ausdrücklich bei G. Veit und H. Venghaus für die Flexibilität und die Möglichkeit, das Erarbeitete jederzeit praktisch anzuwenden, bedanken.

Die finale Durchsicht dieser Arbeit war enorm nützlich. Vielen Dank an Doris Luther, Helene Kaps, Marc Wiemers, Henning Schelle und Georg Schäpermeier für Eure Hilfe!

Dieser ganze Zeitabschnitt wäre ohne den Rückhalt in meiner Familie unmöglich gewesen. Speziell meine Frau Jördis hat hier oft auf gemeinsame Freizeit verzichtet und mir auch zu ungewöhnlichen Zeitpunkten die Ausarbeitung ermöglicht. Gleichzeitig hat sie zum richtigen Moment an das Leben jenseits des Schreibtisches erinnert und so einen wunderbaren Ausgleich geschaffen. Daran haben auch meine Kinder Quintus, Jasira, Tarsitus und Falina mitgewirkt, deren Entwicklung den beruflichen Gedanken eine ganz neue Gewichtung gab.

Schließlich haben meine Eltern das Interesse für technische Zusammenhänge erst entstehen lassen und mich stets in der Ausbildung gefördert, vielen Dank!

Inhaltsverzeichnis

1 Zusammenfassung	XIV
2 Summary	XV
3 Einleitung	1
3.1 Motivation und Ausgangslage	1
3.2 Ziel und Gliederung dieser Arbeit	2
4 Grundlagen der Gleisdynamik	5
4.1 Strukturdynamik	5
4.1.1 Mechanische Ersatzmodelle	5
4.1.2 Einfluss der diskreten Schienenlagerung	8
4.1.3 Einfluss der praktisch umgesetzten Konstruktion	10
4.2 Anregung	11
4.3 Schallabstrahlung	12
5 Konstruktive Minderungsmaßnahmen	15
5.1 Schallschutzwände	17
5.2 Schieneneinhausung	17
5.3 Körperschall-Dämpfer / -Tilger	18
5.4 Schienenprofil	20
5.5 Zwischenlage	21
5.6 Schwellen	23
5.7 Schotterbett	24
5.8 Weitere konstruktive Maßnahmen	25
5.9 Reduktion der Schienenrauheit	26
5.10 Rückwirkung auf die Emission des Rades	27
6 Nutzenquantifizierung - Aktuelles Vorgehen	29
6.1 TDR - direktes Messverfahren	31
6.1.1 Detail: Impulsanregung	33
6.1.2 Detail: Impulsanregung - Variation der Hammereigenschaften	34
6.1.3 Detail: Impulsanregung - Sensitivität der Anregungsrichtung	34
6.1.4 Detail: Messaufbau	36
6.1.5 Detail: Signalverarbeitung	37
6.1.6 Detail: Randbedingung der Feldmessung/ Detaillierung der EN 15461	42
6.1.7 Detail: TDR-Einzahlwert	44
6.1.8 Detail: Weitere Anwendung der direkten TDR-Messung	45
6.1.9 Detail: Analyse der TDR-Ergebnisse in dieser Arbeit	46
6.1.10 Zusammenfassende Empfehlungen	46
6.2 TDR - indirektes Messverfahren	46
6.2.1 Grundlagen	48

6.2.2	Empfehlungen und Weiterentwicklung	49
6.3	Schienenrauheit	50
6.4	Simulation des Gesamtnutzen	50
7	Alternative TDR-Analyse	53
7.1	Einführung des statistischen Analyse-Verfahrens	54
7.1.1	Gewichtung nach physikalischen Merkmalen	55
7.1.2	Alternative Gewichtungen	57
7.2	Durchführung der statistischen Analyse	58
7.2.1	Gewichtung nach physikalischen Merkmalen	58
7.2.2	Alternative Gewichtungen	59
7.3	Ergebnisse der statistischen Analyse	59
7.3.1	TDR-Absolutbeträge - Vertikale Richtung	60
7.3.2	TDR-Absolutbeträge - Laterale Richtung	61
7.3.3	Charakteristische lokale Verläufe - Vertikale Richtung	62
7.3.4	Charakteristische lokale Verläufe - Laterale Richtung	63
7.3.5	Zusammenfassung	63
8	TDR-Vergleich mit EN 15461 / indirekter Messung	65
8.1	Vergleich mittels TDR-Spektren	65
8.2	Vergleich mittels L_{FRF} - x -Diagramme	65
8.2.1	Vorbemerkung L_{FRF} - x -Diagramme	66
8.2.2	Lin. Regression mit Exponent m von 0.5	67
8.2.3	Lin. Regression mit linearer Gewichtung	68
8.2.4	Lin. Regression mit exponentieller Gewichtung	69
8.3	Vergleich mit TDR nach indirektem Messverfahren	70
8.4	TDR-Vergleich - Zusammenfassung	71
9	TDR-Analyse verschiedener Oberbauformen	73
9.1	Konstruktive Merkmale	73
9.2	Ergebnisse der TDR-Analyse	76
9.3	Ergebnisse der TDR-Analyse - Zusammenfassung	95
10	Diskussion der TDR-Ergebnisse	97
10.1	Abgrenzung der Anwendung der TDR	97
10.2	Konstruktive Änderungen	97
10.3	Betriebliche Änderungen	100
11	Empfehlungen	105
11.1	Empfehlungen zur Nutzenermittlung	105
11.2	Empfehlungen zur Gleiskonstruktion	106
12	Abkürzungen und Symbole	107

Literatur	109
A Herleitung der TDR	121
B Auswirkung definiert schräger Impulse	123
C Messtechnik	125
C.1 Übersicht	125
C.2 Magnet. Befestigung	125
C.3 Versch. Hämmer	128
C.4 Variation der Grenzfrequenzen	131
D r_i-x-Diagramme	133
E L_{FRF}-x-Diagramme	135
F $L_{HW,tr}$-Spektren und TDR-Ergebnisse	147
G TDR-Spektren nach EN 15461 und Lin. Regression	151
H Details der Messstellen	163
I Ansicht der Messstellen	167
J Obere Grenzfrequenz	175
K Anregung - Eingangsspektren	177

Abbildungsverzeichnis

4.1	Skizze, Vergrößerungsfunkt. von Ein- und Zwei-Massen-Schwinger . . .	6
4.2	Gleisfrequenzen mit typischem TDR-Spektrum, vert. Richtung	8
4.3	Gleisfrequenzen mit typischem TDR-Spektrum, later. Richtung	9
4.4	Rollgeräusches-Quellanteile	13
5.1	Kosten-Nutzen-Verhältnisse verschiedener Minderungsmaßnahmen . . .	15
5.2	Unterscheidung der Primär- und Sekundär-Schallemission	16
5.3	Schienenprofil VA71b	20
5.4	Schienenprofil 'Leise Schiene'	20
5.5	Schienenprofil 'Silent Rail'	21
6.1	Impulsanregung des Gleises	32
6.2	Raster der 29 Anregungspositionen der TDR-Messung	33
6.3	Kohärenzspektrum bei Anregung mit schwerem Hammer mit weicher Schlagkalotte und mit leichtem Hammer mit harter Schlagkalotte . .	34
6.4	Anordnung schräger Impulsschläge	35
6.5	Beispielhafte Messsoftware-Oberfläche	36
6.6	Nutzbarer Frequenzbereich (Skizze)	37
6.7	Zeitverläufe eines Hammer-Impulssignals und Forcefensters	38
6.8	Leistungsspektrum eines force- / rechteckgefensterten Impulssignals . .	38
6.9	Zeitverläufe eines typischen Beschleunigungs-Antwortsignals und ent- sprechender Exponential-Fenster	39
6.10	Übertragungsfunktionen und Kohärenzen bei unterschiedl. Fensterung	39
6.11	Zeitabschnitte zur Messzeitraum-Analyse	41
6.12	Amplitudenverhältnisse der Messzeitraum-Analyse	41
7.1	Schema: Vorgehen der alternativen TDR-Analyse	53
7.2	Gewichtung q_i in Abhängigkeit von ΔL_{FRF} bei var. Exponent m . . .	56
7.3	Beispielhafte L_{FRF} -Gewichtung r der AP bei var. Exponent m	57
7.4	Beispielhafte L_{FRF} -Gewichtung t der AP	60
10.1	Anregungsspektren im Güterverkehr	101
10.2	Anregungsspektren im Personenverkehr	101
B.1	L_{FRF} von definiert schrägen Schlägen im Schwellenfach	123
B.2	L_{FRF} von definiert schrägen Schlägen auf der Schwelle	123
C.1	Skizze der Versuchsanordnung für Sensor-Befestigungs-Messungen . .	126
C.2	Sensor-Befestigungsversuche - exemplarische Kraft-Leistungsspektren	126
C.3	Sensor-Befestigungsversuche - Frequenzen der 35 dB-Reduktion . . .	127
C.4	Sensor-Befestigungsversuche - exempl. Terzspektren der L_{FRF} -Diff. .	127
C.5	Leistungsspektrum typischer Hammerimpulse, vertikale Anregung . .	128
C.6	Leistungsspektrum typischer Hammerimpulse, laterale Anregung . . .	128
C.7	Punkteingangs- L_{FRF} , vertikale Anregung	129

C.8	Punkteingangs- L_{FRF} , laterale Anregung	129
C.9	L_{FRF} bei Position 19, vertikale Anregung	130
C.10	L_{FRF} bei Position 19, laterale Anregung	130
C.11	Obere Grenzfrequenz bei 29 AP, leichter Hammer, vertikale Anreg.	131
C.12	Obere Grenzfrequenz bei 29 AP, leichter Hammer, lateral Anreg.	131
D.1	r_i -x-Verläufe, MS C5 , vert. Anregung. Lin. Reg. mit Exponent m_{opt}	133
D.2	r_i -x-Verläufe, MS C9 , vert. Anregung. Lin. Reg. mit Exponent m_{opt}	134
E.1	L_{FRF} -x-Verläufe, MS A , vert. Anreg. Lin. Reg. mit Exponent m_{opt}	135
E.2	L_{FRF} -x-Verläufe, MS A , vert. Anreg. Lin. Reg. mit lin. Gewicht.	136
E.3	L_{FRF} -x-Verläufe, MS A , vert. Anreg. Lin. Reg. mit exp. Gewicht.	137
E.4	L_{FRF} -x-Verläufe, MS A , lat. Anreg. Lin. Reg. mit Exponent m_{opt}	138
E.5	L_{FRF} -x-Verläufe, MS A , lat. Anreg. Lin. Reg. mit lin. Gewichtung	139
E.6	L_{FRF} -x-Verläufe, MS A , lat. Anreg. Lin. Reg. mit exp. Gewichtung	140
E.7	L_{FRF} -x-Verläufe, MS I , vert. Anreg. Lin. Reg. mit Exponent m_{opt}	141
E.8	L_{FRF} -x-Verläufe, MS K , vert. Anreg. Lin. Reg. mit Exponent m_{opt}	142
E.9	L_{FRF} -x-Verläufe, MS I , lat. Anreg. Lin. Reg. mit Exponent m_{opt}	143
E.10	L_{FRF} -x-Verläufe, MS K , lat. Anreg. Lin. Reg. mit Exponent m_{opt}	144
E.11	L_{FRF} -x-Verläufe, MS I , lat. Anreg. Lin. Reg. mit lin. Gewichtung	145
F.1	$L_{HW,tr}$ - und TDR-Spektren (Variation) MS C1	147
F.2	$L_{HW,tr}$ - und TDR-Spektren (Variation) MS C2	147
F.3	$L_{HW,tr}$ - und TDR-Spektren (Variation) MS C3	147
F.4	$L_{HW,tr}$ - und TDR-Spektren (Variation) MS C4	148
F.5	$L_{HW,tr}$ - und TDR-Spektren (Variation) MS C5	148
F.6	$L_{HW,tr}$ - und TDR-Spektren (Variation) MS C6	148
F.7	$L_{HW,tr}$ - und TDR-Spektren (Variation) MS C7	148
F.8	$L_{HW,tr}$ - und TDR-Spektren (Variation) MS C8	149
F.9	$L_{HW,tr}$ - und TDR-Spektren (Variation) MS C9	149
F.10	$L_{HW,tr}$ - und TDR-Spektren (Variation) MS D1	149
F.11	$L_{HW,tr}$ - und TDR-Spektren (Variation) MS D2	149
F.12	$L_{HW,tr}$ - und TDR-Spektren (Variation) MS D3	150
F.13	$L_{HW,tr}$ - und TDR-Spektren (Variation) MS D4	150
F.14	$L_{HW,tr}$ - und TDR-Spektren (Variation) MS D5	150
G.1	TDR-Spektrum, vertikale Anregung. MS A bis B2	151
G.2	TDR-Spektrum, laterale Anregung. MS A bis B2	151
G.3	TDR-Spektrum, vertikale Anregung. MS C1 bis C4	152
G.4	TDR-Spektrum, laterale Anregung. MS C1 bis C4	152
G.5	TDR-Spektrum, vertikale Anregung. MS C5 bis C8	153
G.6	TDR-Spektrum, laterale Anregung. MS C5 bis C8	153
G.7	TDR-Spektrum, vertikale Anregung. MS C9 bis D3	154
G.8	TDR-Spektrum, laterale Anregung. MS C9 bis D3	154

G.9	TDR-Spektrum, vertikale Anregung. MS D4 und D5	155
G.10	TDR-Spektrum, laterale Anregung. MS D4 und D5	155
G.11	TDR-Spektrum, vertikale Anregung. MS E1 und E2	156
G.12	TDR-Spektrum, laterale Anregung. MS E1 und E2	156
G.13	TDR-Spektrum, vertikale Anregung. MS F bis H	157
G.14	TDR-Spektrum, laterale Anregung. MS F bis H	157
G.15	TDR-Spektrum, vertikale Anregung. MS I bis K	158
G.16	TDR-Spektrum, laterale Anregung. MS I bis K	158
G.17	TDR-Spektrum, vertikale Anregung. MS L und M	159
G.18	TDR-Spektrum, laterale Anregung. MS L und M	159
G.19	TDR-Spektrum, vertikale Anregung. MS N und O	160
G.20	TDR-Spektrum, laterale Anregung. MS N und O	160
G.21	TDR-Spektrum, vertikale Anregung. MS P1 bis R	161
G.22	TDR-Spektrum, laterale Anregung. MS P1 bis R	161
G.23	TDR-Spektrum, vertikale Anregung. MS S bis U	162
G.24	TDR-Spektrum, laterale Anregung. MS S bis U	162
I.1	Ansicht der MS A , baugleich mit B1 und B2	167
I.2	Ansicht der MS C2 , baugleich mit C1 , C3 und C4	167
I.3	Ansicht der MS C5 , baugleich mit C6 bis C8	167
I.4	Ansichten der MS D1 , baugleich mit D3	168
I.5	Ansichten der MS D2	168
I.6	Ansicht der MS D4	168
I.7	Ansicht der MS D5 (Detail)	169
I.8	Ansicht der MS E1 , baugleich mit E2	169
I.9	Ansicht der MS F	169
I.10	Ansicht der MS I	170
I.11	Ansichten der MS J	170
I.12	Ansicht der MS K	170
I.13	Ansicht der MS L	171
I.14	Ansicht eines Gleises ähnlich der MS M	171
I.15	Ansicht der MS N	171
I.16	Ansicht der MS O	172
I.17	Ansichten der MS Q , auch P1 , jedoch ohne Dämpfer	172
I.18	Ansichten der MS R , auch P2 , jedoch ohne Dämpfer	172
I.19	Ansicht der MS S	173
I.20	Ansicht der MS T	173
I.21	Ansicht der MS U	173
J.1	Obere Grenzfrequenz - schwerer Hammer, vertikale Anregung	175
J.2	Obere Grenzfrequenz - schwerer Hammer, laterale Anregung	175
J.3	Obere Grenzfrequenz - leichter Hammer, vertikale Anregung	176
J.4	Obere Grenzfrequenz - leichter Hammer, laterale Anregung	176

K.1	Typische Radrauheitsspektren bei verschiedenen Fahrzeugarten . . .	177
K.2	Kontaktfilterspektren bei verschiedenen Raddurchmessern und -lasten	178
K.3	Typische Schienenrauheitsspektren	178

Tabellenverzeichnis

5.1	Einfluss von Gleisbauteilen auf die Luftschallemission	16
5.2	Gliederung der Zw-Steifigkeiten	21
5.3	Verbreitete Zw-/ Stützpunkt-Bauarten und Steifigkeiten	22
5.4	Gewichte verbreitet angewandter Schwellen	24
6.1	Empfehlungen zur direkten TDR-Messung	47
8.1	Betriebliche Differenzen der Vergleichs-Messstellen indirekter TDR . .	70
9.25	MS P1 bis R - vertikale ‘pinned-pinned’-Frequenzen	91
9.27	MS P1 bis R - laterale ‘pinned-pinned’-Frequenzen	92
C.1	Geräteliste Track Decay Rate	125
H.1	Aufbau Messstellen, Randbedingungen während der Messung	163
H.2	Abschätzung der Gleisfrequenzen aller MS	165

1 Zusammenfassung

Diese Arbeit untersucht die Methoden zur Quantifizierung der gleisseitigen Schallemission. Dazu wird die Strukturodynamik im akustisch relevanten Frequenzbereich analysiert so dass aus Messergebnissen verschiedener Gleisbauarten Konstruktionsempfehlungen resultieren.

Vorangestellt ist eine zusammenfassende Einführung in die Gleisdynamik und eine Übersicht der aktuellen konstruktiven Minderungsmaßnahmen.

Der gleisseitige Einfluss auf das Rollgeräusch wird stark durch die Strukturodynamik bestimmt, die durch die Track Decay-Rate (TDR) beschrieben wird. Das aktuelle TDR-Messverfahren ist in EN 15461 definiert, ohne alle praktisch relevanten Details aufzuführen. Im ersten Teil dieser Arbeit werden daher weitere Aspekte (Messaufbau, Signalverarbeitung, Richtungssensitivität der Anregung) ermittelt, analysiert und Empfehlungen zur Umsetzung abgeleitet. Es zeigt sich, dass kleine Veränderungen zu deutlichen Unterschieden im Ergebnis führen. Dies ist besonders bei Vergleichen mit gesetzlichen Grenzwerten wichtig.

Das wesentliche Qualitätskriterium der TDR-Ergebnisse ist die räumliche Verteilung der Übertragungsfunktions-Beträge der 29 Anregungspositionen. In diesen frequenzspezifischen Diagrammen zeigen sich teilweise unplausible Differenzen zu dem erwarteten Abklingverhalten. Um dies zu verbessern, werden im zweiten Teil drei alternative Analysemethoden, basierend auf der Linearen Regression, erstellt. Bei der physikalisch begründeten Methode wird eine Parametervariation durchgeführt. Anschließend werden die Ergebnisse anhand von gleisseitigen Luftschall-Transferfunktionen bei 14 Messstellen bewertet. Eine Variante führt zu ähnlich hohen Übereinstimmungen wie die Ergebnisse nach EN 15461, ist jedoch deutlich anfälliger für Abweichungen vom theoretischen Abklingverhalten. Daher können diese alternativen Methoden für die praktische Anwendung nicht empfohlen werden.

Im dritten Teil dieser Arbeit wird die bisherige Methode nach EN 15461 genutzt, um die TDR von insgesamt 36 unterschiedlichen Messungen zu erstellen. Diese umfassen Schotteroberbau mit unterschiedlichen Schienenprofilen, Stützpunkten, Zwischenlagen, Schwellen, Schwellenabständen, Schotterbettverschäumung, Unterschottermatte, Schienendämpfern; ebenso Feste Fahrbahn, Gleise in Bogenlage und gleiche Oberbauformen bei unterschiedlichen Temperaturen. Die Ergebnisse werden anhand der spektralen Lage von charakteristischen Frequenzen mit analytischen Gleismodellen verglichen. Der Einfluss konstruktiver Unterschiede auf die akustisch relevante Strukturodynamik ist meistens deutlich zu sehen.

Aus diesen Analysen resultieren Empfehlungen für die Auslegung einzelner Bauteile des Gleises. Dabei wird auch der Einfluss unterschiedlicher Betriebsarten (Fahrgeschwindigkeit, Güter- / Personenverkehr) berücksichtigt.

Es wird aufgezeigt, dass die Messung und Analyse der TDR unter praktischen Umständen genutzt und mit dem Ergebnis die akustische Gleisqualität ermittelt werden kann.

2 Summary

This thesis concerns about the trackside noise emission by analysing the structure dynamic in the acoustic frequency range of interest and deducing constructive recommendations from measurement results.

The main study is preceded by a short introduction in track dynamics and a summary of common used constructive noise reducing measures.

The trackside influence on the rolling noise is strongly determined by the structure dynamic which is described by the Track Decay Rate (TDR). The current TDR measurement procedure is defined in EN 15461, but not all practical relevant details are described. Therefore, in the first part of this thesis, further aspects (measurement set up, signal conditioning, sensitivity of impact direction) are identified, analysed and recommendations for applications are concluded. It is shown that here small derivations led to significant differences in the result. This is of particular interest when the results are compared with legal limits.

The most important quality criteria of a TDR result is the spatial distribution of the frequency response function magnitude from each of the 29 impact points. Sometimes remarkable differences from the expected decaying characteristic occur when these magnitudes are plotted in frequency specific diagrams. To improve this, in the second part of this thesis three alternative analysing methods, based on the linear regression, are created. The physically justified one is used for a parameter variation. These results are reviewed by the trackside noise transfer function of 14 measurement sites. One result shows a similar high accordance to the result from the EN 15461 procedure, but is much more sensitive for deviations from the expected decaying characteristic. Therefore these alternative methods cannot be recommended for practical use.

In the third part of this thesis the TDR of 36 different measurement sites are computed according the definition in EN 15461. The track construction comprises ballasted tracks with different rail profiles, rail supports, rail pads, sleepers, sleeper distances, foamed ballast, ballast mats, rail dampers; as well as slab track, curved track and ballasted track at different temperatures. These measured results are compared by the spectral position of characteristic frequencies with analytic track models. The influence of constructive differences on the acoustical relevant structure dynamic is often clearly visible.

Finally, recommendations for the design of structural elements are given. Here are also operating conditions like train speed or different impacts from freight / passenger vehicles considered.

It is shown that the TDR measurement and analysis procedure can be used under practical circumstances and their results allows the investigation of the acoustic track quality.

3 Einleitung

3.1 Motivation und Ausgangslage

Die Schallemission wird auch als ökologische ‘Achillesferse’ des Schienenverkehrs bezeichnet [3] [9] [22]. Wurde diese in der Vergangenheit als praktisch nicht veränderlich angenommen, ist heute einem Großteil der Beteiligten (vor allem Streckenanwohnern, Politikern, Netz- und Fahrzeug-Betreibern als auch -Herstellern) bekannt, dass einsatzreife technische Möglichkeiten bereit stehen.

Verstärkt durch eine europaweit umweltorientierte Ausrichtung der Politik werden die realen Belastungen objektiviert, kommuniziert und auf kommunaler Ebene Maßnahmenkataloge zur Minderung erstellt [126]. Vor diesem Hintergrund haben einige Infrastrukturbetreiber konkrete Minderungspläne (Umsetzungszeitraum, technische Maßnahmen) präsentiert [14].

Der öffentliche Druck zur schnellen Umsetzung nimmt, speziell durch die prognostizierte Steigerung der Verkehrsleistung [23], stetig zu. Die Öffentlichkeit verlangt vor allem streckenseitige Maßnahmen, die kurzfristig lokale Belastungen reduzieren.

Die Anwendung von Minderungsmaßnahmen im Gleis ist (relativ zu anderen Technologien) noch jung. Bis vor einigen Jahren wurde die Schallemission überwiegend unter dem Aspekt des Fahrkomforts und daher fahrzeugspezifisch betrachtet. Aufgrund der komplexen Systemzusammenhänge konnten erst durch die Grundlagenforschung zur Rollgeräuschenstehung Maßnahmen am Gleis als sinnvoll erkannt und Anforderungen identifiziert werden.

Darüber hinaus motivieren die folgenden Gründe die Anwendung von gleisseitigen Maßnahmen:

- In Europa wird die fahrzeugseitige Emission durch die Revision der TSI Noise bzw. höheren Anforderungen im städtischen Nahverkehr tendenziell abnehmen. Da sich schon heute das Gesamtgeräusch aus etwa gleichen Gleis- und Fahrzeug-Anteilen zusammensetzt (siehe Kapitel 4.3), wird zukünftig öfter der Gleisanteil das Gesamtgeräusch dominieren.
- Die bisherige Minderungsmaßnahme, die Schallschutzwand, ist volkswirtschaftlich gegenüber quellennahen Maßnahmen nachteilig. Gleichzeitig sinkt die Akzeptanz durch die Anwohner (siehe Kapitel 5).

Mittelfristig zeichnet sich die Einführung von verbindlichen Anforderungen an die akustische Gleisemission ab [84].

Durch die Revision der gültigen nationalen Schallimmissionsrichtlinie Schall 03 [127] wird es künftig auch möglich sein, gleisseitige adaptive Maßnahmen als Minderungsmaßnahme rechtlich anzuerkennen.

Durch die relativ langen Lebensdauer von Gleiskomponenten sind kurzfristig keine netzweiten Änderungen zu erwarten. So hat sich ein Bedarf für adaptive Maßnahmen entwickelt, die inzwischen kommerziell verfügbar sind.

Ergänzend besteht die Möglichkeit, durch geringe Oberflächenrauheiten von Rad und Schiene die Schallemission zu reduzieren. Signifikante Emissionsreduktionen

erfordern geringe Rauheiten auf beiden Oberflächen (‘Summenrauheit’, siehe Kapitel 4.2). Praktisch wird dies oft nicht erreicht:

- Vollbahn - Güterverkehr: Der heutige Einsatz von Grauguss- (GG-) Bremsklötzen führt zu sehr hohen Radrauheiten. Erst in einem Zeitraum von rund 30 Jahren kann der europaweite Austausch dieser Bremstechnik erwartet werden. Somit kann kurz- und mittelfristig nicht von signifikant geringeren Radrauheiten ausgegangen werden.
- Vollbahn - Personenverkehr: Durch den Einsatz von Bremsscheiben werden die Radlaufflächen nicht beeinflusst. Die Summenrauheit wird daher von der Schienenrauheit dominiert.
- Straßen- / Stadtbahnen: Da überwiegend Bremsscheiben eingesetzt werden, ist hier die Bauform der Gleisanlage relevant: Bei straßenbündigem Bahnkörper werden oft durch den Straßenverkehr Schmutzpartikel eingebracht. Sie walzen sich in die Kontaktflächen ein und führen so netzweit zu hohen Summenrauheiten. Zusätzlich führen die typischerweise kleinen Bogenradien zu erhöhter Schienenrauheit und Riffelbildung. Durch die oft konstruktiv ähnlichen Fahrzeuge werden diese Wellen nicht reduziert. Hier bilden sich, aufgrund der Fahrgeschwindigkeit und Wellenlänge, vor allem für die Erschütterung relevante Frequenzen aus.

Somit sind in den überwiegenden betrieblichen Situationen keine reduzierten Summenrauheiten und damit reduzierten mechanischen Anregungen zu erwarten. Eine Emissionsreduktion muss daher auch durch den konstruktiven Aufbau des Gleises oder durch adaptive Maßnahmen umgesetzt werden.

Parallel zu den Minderungstechnologien wurde die methodische Quantifizierung des akustischen Gleisverhaltens entwickelt. Zwei wesentliche Methoden, die Messung der Oberflächenrauheit und der Track Decay Rate, werden seit ca. fünf Jahren verbreitet genutzt. So können bestehende Konstruktionen als auch adaptive Maßnahmen bewertet werden.

Es zeigt sich jedoch, dass die Durchführung und Analyse nicht ausreichend genau beschrieben sind, so dass beispielsweise für verschiedene Minderungstechnologien unbefriedigende Nachweise des realen Nutzen vorliegen.

Die Analyse von gleisseitigen Minderungsmaßnahmen sollte stets Feldversuche beinhalten. Dies ist meist im Anschluss an die Entwicklung einzelner Maßnahmen erfolgt. Gleichzeitige Untersuchungen mehrerer Technologien wurden bisher nur in den EU-Forschungsprojekten ‘Silent Track’ [39] und ‘QCity’ [81] durchgeführt.

3.2 Ziel und Gliederung dieser Arbeit

Diese Arbeit verfolgt daher drei Ziele:

1. Erarbeitung von konkreten Vorschlägen für die Durchführung einer robusten Messung der Track Decay Rate
2. Prüfung der Möglichkeit, aussagefähigere Ergebnisse der Track Decay Rate durch eine alternative Analysemethode zu erhalten und
3. Erarbeitung von Hinweisen zu Gleiskonstruktion mit hohen Track Decay Rate-Werten anhand der Analyse unterschiedlicher Oberbauformen.

Das Verständnis der Einflüsse auf die Nutzenmessung und die Reaktion unterschiedlicher Konstruktionen ist ohne grundlegende Kenntnisse des strukturdynamischen Gleisverhaltens nicht möglich. Daher wird eine Einführung im Kapitel 4 dieser Arbeit vorangestellt. Im folgenden Kapitel 5 werden die aktuell genutzten konstruktiven Maßnahmen (betriebliche Maßnahmen etc. werden hier nicht betrachtet) vorgestellt und ihre Vor- und Nachteile diskutiert.

Aufbauend auf dem in Kapitel 3.1 aufgezeigten Entwicklungsstand werden in dieser Arbeit drei Schwerpunkte behandelt:

1. Kapitel 6: Analyse von Einflussfaktoren und Ableitung von detaillierteren Anforderungen an die Nutzenmessung, speziell der Track Decay Rate-Messung. Dazu werden (auch praktisch auftretende) Variationen der Messdurchführung und unterschiedliche Einstellungen der Signalverarbeitung verglichen.
2. Kapitel 7 und 8: Prüfung einer alternativen Analysemethode der Track Decay Rate-Messung. Die Anwendung dieser Methode ist durch eine Plausibilitätskontrolle des Endergebnisses motiviert. Sie basiert auf einer statistischen Regressionsanalyse mit unterschiedlichen Gewichtungsfunktionen. Die Bewertung der Ergebnisse erfolgt durch die gleisseitige Luftschallemission.
3. Kapitel 9 und 10: Vergleich unterschiedlicher Oberbauformen anhand der ermittelten Analysemethode. Hier werden insgesamt 36 Messstellen mit variierender Oberbauformen, darunter auch Gleise in Bogenlage und mit zusätzlichen Strom- oder Fahrschienen, analysiert.

Die Reihenfolge berücksichtigt, dass stabile Track Decay Rate-Ergebnisse für einen objektiven Vergleich der Oberbauformen notwendig sind.

Der Stand des Wissens wird nicht in einem separaten Kapitel, sondern inhaltlich differenziert in den Kapiteln 4 *Grundlagen der Gleisdynamik* und 5 *Konstruktive Minderungsmaßnahmen* vorgestellt.

4 Grundlagen der Gleisdynamik

Der eigentlichen Analyse in dieser Arbeit soll eine kurze Einführung in die Gleisdynamik des akustisch relevanten Frequenzbereiches vorangestellt werden. So werden die im weiteren Verlauf erstellten Aussagen und Ergebnisse nachvollziehbar.

Dazu wird zuerst das strukturdynamische Verhalten (Kapitel 4.1), anschließend die dynamische Anregung (Kapitel 4.2) und schließlich die Luftschallemission (Kapitel 4.3) vorgestellt. Weitere strukturdynamische Untersuchungen, verschiedene Simulationsansätze und Untersuchungen des Körperschall-Luftschall-Übergangs sind in der Literatur zu finden [29] [49] [54] [94] [96] [99].

Die Benennung der Parameter erfolgt entsprechend der gängigen Schreibweise (z. B. in [94]). Die Bezeichnungen werden im Kapitel 12 erläutert.

4.1 Strukturdynamik

Das strukturdynamische Gleisverhalten wird zuerst im Kapitel 4.1.1 anhand mechanischer Ersatzmodelle vorgestellt. Im Kapitel 4.1.2 wird auf die diskrete und periodische Lagerung der Schiene eingegangen. Das letzte Kapitel 4.1.3 beschreibt Einflüsse durch die praktische konstruktive Umsetzung.

4.1.1 Mechanische Ersatzmodelle

Ein Gleis mit Schotter-Oberbau kann durch einen zweifach elastisch gelagerten Biegebalken nachgebildet werden. Bei Approximation durch einen Zwei-Massen-Schwinger mit in x-Richtung längenspezifischen Parametern (Masse/Länge m' , Steifigkeit/Länge s') bilden sich die für die Schallemission relevanten strukturdynamischen Effekte aus. Im tief- und hochfrequenten Bereich können diese Effekte auch durch (jeweils unterschiedliche) Ein-Massen-Schwinger (siehe Abbildung 4.1 links) beschrieben werden.

Für allgemeine Erkenntnisse wird in diesem Ansatz auf jegliche Dämpfung verzichtet. Die Vergrößerungsfunktion der entsprechenden Ein- und Zwei-Massen-Schwinger, siehe Abbildung 4.1 rechts, zeigt eine bzw. zwei Resonanzstellen mit lokalen Maxima. Das lokale Minimum zwischen beiden Maxima wird als ‘Tilgerpunkt’ bezeichnet. Das Systemverhalten kann zielführend in die drei gekennzeichneten tief-, mittel- und hochfrequenten Bereiche unterteilt werden. Sie werden durch ‘charakteristische Frequenzen’ des Zwei-Massen-Schwingers getrennt:

- Erste Eigenfrequenz $f_{ZMS,1}$ (beide Massen schwingen in Phase)
- Tilgerfrequenz f_T (die Schienenmasse führt keine Bewegung aus, die Schwellenmasse zeigt maximale Auslenkung, ‘Tilgerpunkt’ und ‘Antiresonanz’)
- Zweite Eigenfrequenz $f_{ZMS,2}$ (die Schwellenmasse führt keine Bewegung aus)

Beide Schwingsysteme zeigen in diesen Bereichen unterschiedliche Eigenschaften, die auf das dynamische Verhalten des Gleises übertragen werden können:

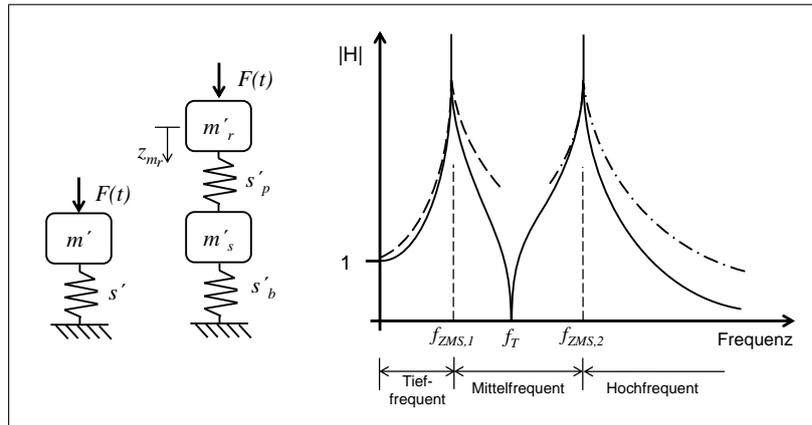


Abb. 4.1: Skizze (links) und Vergrößerungsfunktion $\frac{F}{z_{m_r}}$ (rechts) der Systeme (—) Zwei-Massen-Schwinger; Ein-Massen-Schwinger: (- - -) Steifigkeit s'_b und Masse $m'_s + m'_r$, (-.-) Steifigkeit s'_p und Masse m'_r .

- **Tieffrequent** Der Zwei-Massen-Schwinger kann durch den Ein-Massen-Schwinger der Steifigkeit s'_b und Masse $m'_s + m'_r$ approximiert werden. Dies entspricht der Schwingung des Gleisrostes auf der Schottersteifigkeit.
- **Mittelfrequent** Der Zwei-Massen-Schwinger zeigt bei $f_T = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s'_p + s'_b}{m'_s}}$ für die Masse m'_r keine Auslenkung, da hier das Tilgerprinzip erfüllt ist. Dies entspricht der Schwellenschwingung, eingebunden in die Stützpunkt- und Schottersteifigkeit.
- **Hochfrequent** Der Zwei-Massen-Schwinger kann durch einen Ein-Massen-Schwinger (Steifigkeit s'_p , Masse m'_r) approximiert werden. Dies entspricht der Schienenschwingung auf der Stützpunkt-Steifigkeit.

Die unendliche Ausdehnung der Schiene kann jedoch nur durch den genannten zweifach elastisch gelagerten Biegebalken mit Anregung an der Schiene erreicht werden. Entsprechende Simulationen werden u. a. in [94] zusammenfassend vorgestellt. Es zeigen sich (frequenzabhängige) unterschiedlich räumlich ausgedehnte Bereiche, in denen akustisch relevante Gleisschwingungen auftreten. Sie werden auch als 'Nah- und Fernfeld' bezeichnet, ohne dass es ursächliche Parallelen zu diesem Effekt der Luftschallabstrahlung gibt.

Da jeweils bei den zwei Eigenfrequenzen des Zwei-Massen-Schwingers die Wellenausbreitung einsetzt, werden diese auch als 'cut-on'-Frequenzen bezeichnet. Somit existieren drei in der akustischen Gleisdynamik relevante Frequenzen (im Folgenden 'Gleisfrequenzen' genannt):

- $f_2 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s'_p + s'_b}{m'_s}}$, typischerweise bei $f \approx 360$ Hz (vertikal) / 120 Hz (lateral). Resonanz der Schwelle zwischen Zwischenlage und Schotter, entspricht f_T des

oben genannten Zwei-Massen-Schwingers. Aufgrund der Zwischenlagen- und Schotter-Dämpfung breitbandig, oft bis ca. f_{c2} , ausgebildet [108].

- $f_{c1} \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s'_b}{m'_s + m'_r}}$, falls $m'_r \ll m'_s$ (erste 'cut-on'-Frequenz)¹, typischerweise bei $f \approx 270$ Hz (vertikal) / 100 Hz (lateral). Näherung entspricht der Resonanz des Gleisrostes auf Schotter, dies stellt die erste Eigenfrequenz $f_{ZMS,1}$ des oben genannten Zwei-Massen-Schwingers dar.
- $f_{c2} \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s'_p}{m'_r}}$, falls $s'_b \ll s'_p$ und $m'_r \ll m'_s$ (zweite 'cut-on'-Frequenz)², typischerweise bei $f \approx 700$ Hz (vertikal) / 250 Hz (lateral). Näherung entspricht der Resonanz der Schiene auf der Zwischenlagen-Steifigkeit, dies stellt die zweite Eigenfrequenz $f_{ZMS,2}$ des oben genannten Zwei-Massen-Schwingers dar³.

Die Frequenzbeispiele stehen für gleisbautypische Bauteil-Parameter (Schienenprofil 60E1 auf Schotteroberbau mit Beton-Monoblock-Schwellen, Stützpunkt mit 'harter' Zwischenlage) [94].

Die in der Aufzählung zuerst genannte Frequenz wird als f_2 bezeichnet, da eine weitere Resonanzfrequenz $f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s'_b}{m'_s}}$ vorliegt. Aufgrund der tieffrequenten Lage hat sie jedoch für das akustisch relevante Gleisverhalten keine praktische Bedeutung. In Abbildung 4.2 und 4.3 sind diese Frequenzen zusammen mit typischen TDR-Spektren abgetragen. Da die 'cut-on'-Frequenzen typischerweise in lateraler Schwingungsrichtung betragsmäßig niedriger als in vertikaler Richtung ausbilden, zeigen sich hier bereits bei tieferen Frequenzen geringere TDR-Werte.

Die Bereiche $f < f_{c1}$ und $[f_2; f_{c2}]$ werden aufgrund der unterdrückten Wellenausbreitung als 'blocked zones' oder 'attenuation zones' bezeichnet. Obwohl keine Dämpfung im eigentlichen Sinne vorliegt, zeigen sich in diesen Frequenzbändern aufgrund der Antiresonanzen hohe TDR-Werte.

Die Lage dieser 'blocked-zones' sind mittels [68] [79] [80] bestätigt worden. Hier zeigen sich Frequenzbänder ohne Eigenmoden, die durch Eigenwert-Häufungspunkte begrenzt werden. Beide Grenzfrequenzen sind gleich den Gleisfrequenzen f_{c1} und f_{c2} . Für verschiedene Gleisfrequenzen wurden die Einflüsse durch als relevant identifizierte Parameter untersucht [63]. Die Einflussfaktoren zeigen folgende Ergebnisse:

$$f_2 = 0.0253 \cdot l_s^{-0.15} \cdot EI_r^{-0.20} \cdot s_p^{0.50} \quad (4.1)$$

$$f_{c2} = 0.0275 \cdot m_r^{-0.30} \cdot m_s^{-0.11} \cdot s_p^{0.59} \quad (4.2)$$

¹Exakte Gleichung: $f_{c1} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{0.5 \cdot (f_0^2 + f_2^2) - \sqrt{0.25 \cdot (f_0^2 + f_2^2)^2 - f_0^2 \cdot f_1^2}}$ mit $f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s'_p}{m'_r}}$.

²Exakte Gleichung: $f_{c2} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{0.5 \cdot (f_0^2 + f_2^2) + \sqrt{0.25 \cdot (f_0^2 + f_2^2)^2 - f_0^2 \cdot f_1^2}}$ mit $f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s'_p}{m'_r}}$.

³Dieser Effekt der reduzierten Übertragungsfunktion, auch 'dynamische Entkoppelung' genannt, wird auch bei der elastischen Lagerung von z. B. Maschinen, Fahrbahnen oder Gebäuden genutzt.

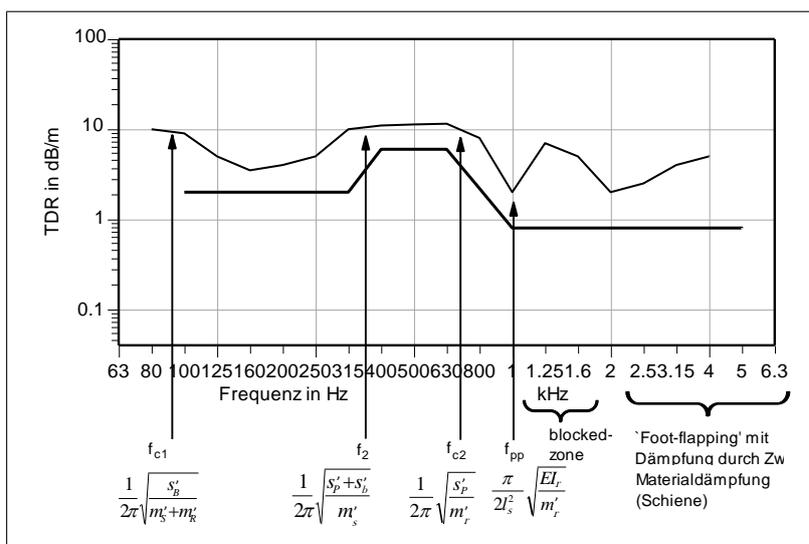


Abb. 4.2: Frequenzen des Schottergleises, vertikale Richtung. (—) Typisches TDR-Spektrum, (---) TDR-Grenzspektrum nach TSI 2006.

Diese Ergebnisse wurden an drei Gleistypen validiert und ergaben hohe Übereinstimmungen. Deutlich zeigt sich der hohe Einfluss der Stützpunktsteifigkeit auf die Höhe beider Frequenzen.

Die Wellenausbreitung im Bereich $f < 5$ kHz in der Schiene muss in Simulationsmodellen mittels einer schubweichen und lateral elastischen Schiene berücksichtigt werden. Ein Gleismodell mit diskret gelagertem Timoshenko-Rayleigh-Balken eignet sich gut, um auch die im folgenden Kapitel 4.1.2 genannten Effekte abzubilden [96]. Alternativ sind Modelle mit Platten-Scheiben-Komponenten und mittels Finite-Elemente-Methode entwickelt worden [56] [85]. Ein häufig angewandtes und im weiten Frequenzbereich validiertes Modell ist 'Cobra'. Es besteht aus je einem Balken für die vertikale und laterale Schwingungsrichtung und ist auf einer unendlichen Bettung diskret gelagert [49].

4.1.2 Einfluss der diskreten Schienenlagerung

Die Schiene ist im Gegensatz zu der im Kapitel 4.1.1 getroffenen Annahme nicht kontinuierlich, sondern in 'Stützpunkten' diskret auf den Schwellen gelagert. Dies ist für die Wellenausbreitung in der Schiene relevant, da sich so bevorzugte Wellenlängen bei stehenden Wellen ausbilden. Hier befinden sich die Schwingungsknoten in den Stützpunkten, so daß die Wellenlänge dem zweifachen Stützpunktabstand entspricht. Die dazugehörige Frequenz wird als 'pinned-pinned'-Frequenz f_{pp} bezeichnet und bietet eine nur schwach gedämpfte Energieweiterleitung. Aufgrund der spektralen Lage im Bereich hoher menschlicher Gehörsensibilität, typischerweise $f = 1$ kHz (vertikal) / 0.6 kHz (lateral)⁴, ist diese Wellenform für die Schallemission

⁴Typische Werte sind 15–18% des Trägheitsmoments bei Biegung um die y-Achse.

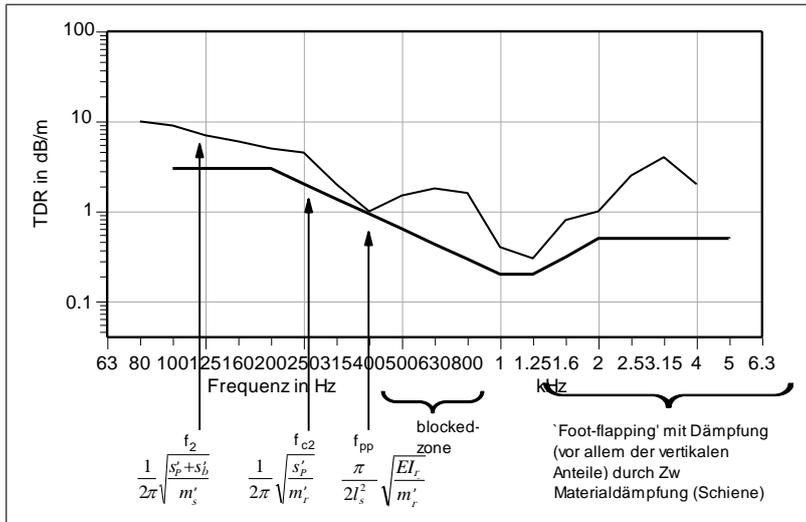


Abb. 4.3: Frequenzen des Schottergleises, laterale Richtung. (—) Typisches TDR-Spektrum, (---) TDR-Grenzspektrum nach TSI 2006.

besonders relevant.⁵

Es existieren unendlich viele Wellenlängen, die ein Teiler des zweifachen Stützpunktabstandes sind. Diejenige mit exakt dem zweifachen Stützpunktabstand zeigt (bei geringster Frequenz) die höchsten Amplitude und somit die höchste Schallemission. Sie ergibt sich bei einem biegeweichen Balken mit drehweicher und punktförmiger Einspannung zu [63]

$$f_{pp} = \frac{\pi}{2l_s^2} \sqrt{\frac{EI_r}{m_r}} \quad (4.3)$$

Praktische Werte sind durch die flächige und elastische Lagerung (Zwischenlage und elastisch gelagerte Schwelle) ungenau. Zusätzlich fällt auf, dass die aus Gleichung 4.3 resultierenden Frequenz oft höher als die gemessenen (siehe Kapitel 9.2) oder simulierten (beispielsweise bei Vergleich der Gleisparameter aus [99]) Frequenzen ausfällt. In Kapitel 10.3 wird gezeigt, dass ein möglicher Schienenverschleiß die tieffrequenter Lage in vertikaler Richtung nicht begründen kann. In lateraler Richtung ist verschleißbedingt nur eine geringfügig höherfrequente Lage möglich.

In lateraler Richtung zeigt sich ein geringerer Einfluss durch den ‘pinned-pinned’-Effekt. Hier befindet sich die Schwingungsrichtung nicht in einer Achse mit der Schienen-Befestigung, so dass die zusätzliche Elastizität des Schienenprofils die effektive Steifigkeit der Lagerung reduziert.

Ebenso wie für die Frequenzen f_2 und f_{c2} (vgl. auch Gleichungen 4.1 und 4.2) wurde auch für die ‘pinned-pinned’-Frequenz der Einflüsse durch verschiedene Parameter untersucht [63]. Es zeigt sich das folgende Ergebnis:

$$f_{pp} = 10.2 \cdot l_s^{-1.61} \cdot EI_r^{0.33} \cdot m_r^{-0.33} \quad (4.4)$$

⁵Die tieffrequenter Lage in lateraler Richtung resultiert aus dem reduzierten Trägheitsmoment der Schiene (bei Biegung um die z-Achse).

Hier zeigt sich der hohe Einfluss des Stützpunktabstandes l_s . Im Bereich oberhalb der ‘pinned-pinned’-Frequenz zeigt sich eine weitere ‘blocked zone’, da Periodizitäten in der Strukturmechanik zu spektral wechselnden ‘attenuation’ und ‘propagating zones’ des Wellenausbreitungskoeffizienten führen [64]. Durch die ‘propagating zones’ resultieren Bereiche mit schwach gedämpfter Wellenausbreitung, die wiederum zu geringen TDR-Werten führt. In den ‘attenuation zones’ ergeben sich entsprechend höhere TDR-Werte.

4.1.3 Einfluss der praktisch umgesetzten Konstruktion

Ergänzend zu der Analyse des theoretischen Ersatzmodells sind die Einflüsse der praktisch ausgeführten Konstruktionen wichtig.

Die Gleisfrequenzen f_2 und f_{c2} befinden sich in lateraler Richtung in einer tieferfrequenten Lage als in vertikaler Richtung. Dies ist in der höheren vertikalen Zwischenlagen- (typisch Faktor 4–20 [54], aufgrund der Scherung- anstelle von Druckbelastung) und Schienensteifigkeit (aufgrund der Profilform) als in lateraler Richtung begründet.

Durch die Betriebsbelastung kann eine zeitlich zunehmende Steifigkeit der Elastomere erwartet werden [42]. Dies führt zu einer leicht höherfrequenten Lage der Frequenzen f_2 und f_{c2} . Die reale Änderung ist noch nicht analysiert worden.

Zusätzlich erhöht sich durch die quasistatische Vorlast (aufgrund der Radsatzlast) die effektive Zwischenlagen-Steifigkeit und somit auch die Lage der Frequenzen f_2 und f_{c2} [108].

Im hochfrequenten Bereich zeigt die Schiene Eigenformen, die vor allem bei den Randflächen (Kopf-Flanken, Fuß-Außenkanten) elastische Verformungen beinhalten (‘foot-flapping’). Im Falle der TDR-Messung in vertikaler Richtung wird der Antwortsensor jedoch in lateraler Schienenfußmitte angebracht (siehe Kapitel 6.1). Hier zeigen sich somit kleinere Schwingungsamplituden, so dass höhere TDR-Werte, als in dieser Schwingungsrichtung vorliegen, ermittelt werden.

Diese Schienenfuß-Verformungen werden aufgrund der flächigen Lagerung durch die Zwischenlage bedämpft. Hier zeigt die Zwischenlagen-Steifigkeit einen direkten Einfluss auf die Schwingungs-Amplitude. In diesem Frequenzbereich führen, aufgrund der elastischen Verformung, auch die überwiegend lateralen Eigenformen vertikale Schienenfußschwingungen aus (‘cross coupling’). So bedämpft die Zwischenlage auch in lateraler Richtung diese Schwingformen [99]. Zusätzlich tritt eine Torsionsbewegung auf.

Auch die innere Dämpfung der Schiene wird (aufgrund der zunehmenden inneren Verformung) in diesem Frequenzbereich relevant, so dass mit zunehmender Materialdämpfung auch höhere TDR-Werte resultieren [94].

In zweifach elastisch ausgeführten Stützpunkten (Zwischenplatte (Zwp) unter der Rippenplatte) treten Resonanzen auf. Durch hohe Steifigkeiten und geringe Massen ergeben sich relativ hochfrequente Resonanzfrequenzen $f_{Zw-Rp-Zwp}$ dieses Feder-Masse-Feder-Systems. Aufgrund des Tilgereffektes können in diesem Frequenzbe-

reich höhere TDR-Werte erwartet werden.

Ebenfalls ist die Auswirkung weiterer balkenförmiger Bauteile im Gleis auf die Gleisdynamik unbekannt (siehe Seite 87). Diese Bauteile können vor allem eine Stromschiene (Besonderheit: Auflager nicht auf jeder Schwelle), Fangschiene (als Entgleisungsschutz) oder dritte Fahrschiene (falls Fahrzeuge unterschiedlicher Spurweite auf gleichem Gleis verkehren) sein. Für diese Bauformen sind keine Simulationsergebnisse verfügbar.

Weiterhin wird ein Einfluss durch die Bogenlage des Gleises erwartet (siehe Seite 89). Die genauen Vorgänge sind jedoch, aufgrund fehlender Simulationsergebnisse, noch unbekannt [53]. Wird jedoch die kontinuierliche Änderung der Wellenausbreitungsrichtung berücksichtigt, können grundsätzlich höhere TDR-Werte als im geraden Gleis erwartet werden. Dieser Einfluss ist vor allem im Bereich der freien Wellenausbreitung plausibel, da hier die räumliche entfernten Bereiche auch für die Schwingung relevant sind. Zusätzlich liegt, bei kleinen Bogenradien, an der bogeninneren und -äußeren Schiene ein unterschiedlicher Stützpunktabstand vor. Ein möglicher Einfluss wird jedoch nur erwartet, falls sich die ‘pinned-pinned’-Frequenz tieffrequenter als die ‘cut-on’-Frequenz befindet, da sich so die Schienenschwingung noch nicht entkoppelt von der Schwelle einstellt.

Durch den betrieblich bedingten Verschleiß des Schienenkopfes ändern sich die ‘cut-on’-Frequenz und die ‘pinned-pinned’-Frequenz. Die praktischen Auswirkungen sind relativ gering. Die Analyse anhand einer beispielhaften Gleiskonstruktion ist in Kapitel 10.3 aufgeführt.

4.2 Anregung

Die Anregung des Gleises resultiert aus Oberflächen-Irregularitäten von Rad und Schiene. Diese Summenrauheit ergibt sich zu

$$L_{r,tot}(\lambda) = L_{r,rail}(\lambda) \oplus L_{r,wheel}(\lambda) . \quad (4.5)$$

Gleislagefehler (Hohllagen, Unterschiede der Klemmvorspannung, Höhenlageunterschiede) führen aufgrund typischer Wellenlängen von ca. 10 m, auch im Hochgeschwindigkeitsverkehr, zu Frequenzen $f < 10$ Hz und sind daher akustisch irrelevant [57].

Akustisch relevante Anregungen sind oft relativ breitbandig ausgeprägt, dabei wird der kurzwellige (bzw. hochfrequente) Bereich durch das sogenannte ‘Kontaktfilter’ geschwächt. Dieses Filter bezeichnet den stark unterdrückten Einfluss aller Anteile, deren Wellenlängen kleiner als der Kontaktflächendurchmesser in Fahrtrichtung (typischerweise 1 cm) sind. Das Kontaktfilter ist dabei vor allem von Raddurchmesser und Radlast abhängig [113] [114] (siehe auch Abbildung K.2).

Neben der breitbandigen tritt vereinzelt auch eine monofrequente Anregung auf. Dies kann z. B. bei Schienenriffeln, kurzzeitig nach Schleifvorgängen oder bei Rad-

Polygonisierung⁶ der Fall sein. Die Anregung durch Riffel ergibt sich jedoch nicht allein aus der Riffelwellenlänge und der Fahrgeschwindigkeit, sondern aufgrund der Impulscharakteristik zu einem breitbandigen Anregungsspektrum [80].

Die Reaktion des Gleises, vor allem der Schiene, hängt stark von der lateralen Lage des Kontaktpunktes ab. Mit zunehmendem Abstand zur Schienen-Symmetrieachse werden verstärkt hochfrequente Torsionsschwingungen angeregt. Diese nehmen relativ große Energiemengen auf, führen jedoch nur zu geringer Schallabstrahlung (in Relation zu Biegewellen) [94].

Aufgrund der räumlichen Ausrichtung der Rad-Schienen-Kontaktflächen zeigt die Anregung in vertikaler Richtung größere Amplituden als in lateraler Richtung. Da die Schiene in lateraler Richtung (bei Anregung am Schienenkopf) geringere Impedanzen als in vertikaler Richtung zeigt, resultieren typischerweise in beiden Schwingungsrichtungen ähnliche Schwingungsamplituden [94].

Die Geschwindigkeit der Anregung ist erst bei Geschwindigkeiten, bei denen die Gruppengeschwindigkeit der Biegewellen erreicht wird (2000 m/s bei freier, ungelagerter Schiene), relevant. Daher ist dieser Einfluss im realen Gleis irrelevant [55] [94].

4.3 Schallabstrahlung

Die emittierte Luftschalleistung L_W eines beliebigen Bauteils lässt sich durch die maschinenakustische Grundformel mittels der Summanden Kraftpegel L_F , Körperschallmaß L_h und Abstrahlmaß L_σ beschreiben [31]:

$$L_W(f) = L_F(f) + L_h(f) + L_\sigma(f).$$

Entsprechend kann die abgestrahlte Schalleistung W_{Wave} einer einzelnen Schiene durch eine inkohärente Linienschallquelle mittels

$$W_{Wave} \approx l_r h_r \sigma_r \rho_0 c_0 v^2 \quad (4.6)$$

beschrieben werden [107]. Dabei stellt $\rho_0 c_0$ die akustische Freifeldimpedanz dar. Der Absolutwert der Schnelle-Amplitude $v(f)$ ist durch die Anregung gegeben. Die effektive abstrahlende Länge $l_r(f)$ wird durch die TDR beschrieben. Das Produkt aus abstrahlender orthogonaler Größendimension (vertikale Richtung: Schienenhöhe, laterale Richtung: Schienenbreite) h_r und Abstrahlgrad $\sigma_r(f)$ wird nicht durch die TDR beschrieben. Dieser für die Schallemission wichtige Wert kann nur mit hohem Aufwand (Mikrofonarray) ermittelt werden. Daher empfiehlt sich eine Abschätzung auf Basis der Schienenhöhe und des Schienenprofils. Hier stehen Vergleichswerte aus Simulationen zur Verfügung. Speziell in vertikaler Richtung zeigen sich hier

⁶Rad-Polygonisierungen sind teilweise in System-Eigenfrequenzen des Radsatz-Fahrweg-Systems begründet [80], falls überwiegend gleiche Oberbauformen mit gleicher Fahrgeschwindigkeit befahren werden.

Interferenzeffekte der Schienenfuß- und Schienenkopf-Abstrahlung, die im Bereich $f \geq 400$ Hz bei einzelnen Frequenzbereichen zu erhöhter Abstrahlung führen [94].

Zusätzlich beeinflusst die ‘akustisch Härte’ der Fläche unter dem Schienenfuß die Schallabstrahlung. Je geringer der Absorptionsgrad dieser Fläche, desto intensiver bilden sich stehende Wellen aus. Dieser Effekt führt ebenfalls zu spektral unterschiedlichen Abstrahlgraden.

Bei Schotteroberbau zeigt sich eine Dominanz der Gesamtemission durch die Anteile von Rad, Schiene und Schwelle. Aufgrund der spezifischen Konstruktion bilden sie spektral unterschiedliche Emissionen aus, die beispielhaft in Abbildung 4.4 dargestellt sind.

Die gleisseitigen Anteile lassen sich weiter unterteilen:

- Schwelle: Vertikale Schwingung der Oberseite; grundsätzlich niederfrequent (Beispiel: Betonschwellen ca. $f \leq 400$ Hz), geringer Anteil am Gesamtgeräusch, jedoch relevant bei Stützpunkten mit hoher Steifigkeit (vor allem keine bzw. steife Zwischenlage)
- Schienenschwingung in vertikaler Richtung
- Schienenschwingung in lateraler Richtung und Torsion

Die Relevanz der beiden Schienenschwingungsrichtungen für die Gesamtabstrahlung wird durch die laterale Lage des Rad-Schiene-Kontaktpunktes beeinflusst, siehe Kapitel 4.2.

Messungen an diversen Oberbauformen bei Voll- und Straßenbahnen zeigen sowohl im geraden Gleis als auch im Bogen einen überwiegend außermittigen Fahrspiegel. Zusätzlich ist die asymmetrische Stützpunktsteifigkeit (bei Bi-Block-Schwellen geringer ausgeprägt) und die Einbauneigung der Schienen relevant. Daher kann in der Praxis nicht von vollständig entkoppelten vertikalen und lateralen Schwingungen ausgegangen werden.

In Gleichung 4.6 wird deutlich, dass die gleisseitige Schallemission, im Gegensatz zu typischen Problemen der

Maschinenakustik, nicht durch die Dämpfung einzelner Schwingungsformen reduziert werden kann. Vielmehr muss die effektive abstrahlende Gleislänge reduziert werden. Daher ist ein Indikator, der die räumliche Schwingungsreduktion quantifiziert, für die akustische Vergleichbarkeit sinnvoll.

Dieser wird, nach der Übersicht aktueller Minderungsmaßnahmen, im Kapitel 6.1 eingeführt.

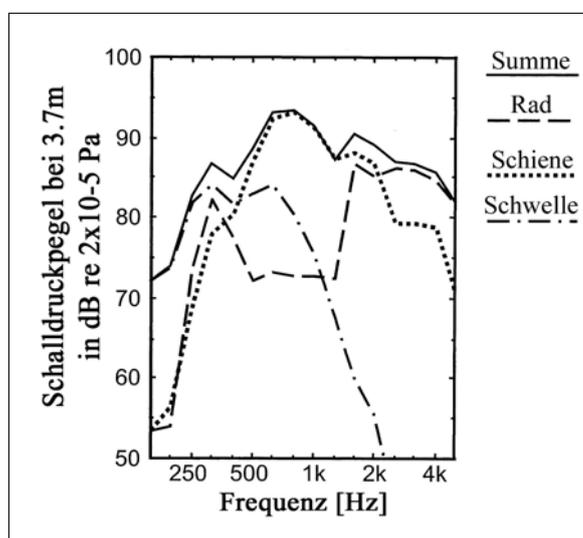


Abb. 4.4: Rollgeräusches-Quellanteile [94]

5 Aktuelle konstruktive Minderungsmaßnahmen

In diesem Kapitel werden in der Entwicklung befindliche und praktisch angewandte konstruktive Minderungsmaßnahmen vorgestellt. Die Kapitel 5.1 bis 5.8 beschreiben diese Maßnahmen und diskutieren ihre Vor- und Nachteile.

In zahlreichen Untersuchungen wurde eine höhere Effizienz durch Minderungsmaßnahmen an der Quelle als auf dem Ausbreitungsweg nachgewiesen [74]. Beispielhaft sind in Abbildung 5.1 Kosten-Nutzen-Verhältnisse verschiedener Minderungsmaßnahmen dargestellt.

In Deutschland werden quellennahe Maßnahmen auch als ‘aktiv’ und Maßnahmen auf dem Übertragungsweg als ‘passiv’ bezeichnet.

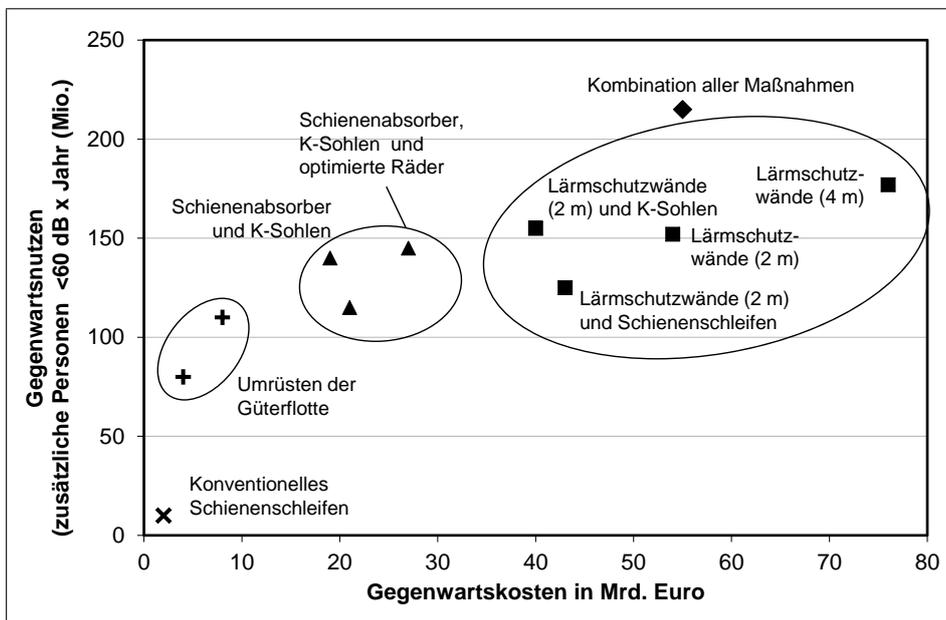


Abb. 5.1: Kosten-Nutzen-Verhältnisse verschiedener Minderungsmaßnahmen [74]

‘Aktive’ Maßnahmen können auf dem Fahrzeug und an dem Gleis eingesetzt werden. ‘Passive’ Maßnahmen sind allein an und im Umfeld der Strecke möglich. Beispiele sind die Schallschutzwand (SSW) (siehe Kapitel 5.1) und das ‘Besonders überwachte Gleis’ (BüG, siehe Kapitel 5.9). Fahrzeugseitige ‘aktive’ Maßnahmen sind aufgrund gesetzlicher Vorgaben für Neufahrzeuge weit verbreitet und führen zu einem netzweiten Nutzen. Bei Bestandsfahrzeugen ist dies nicht der Fall, so dass kurzfristige Emissionsreduktionen hier allein durch streckenseitige Maßnahmen eingebracht werden können. Aufgrund fehlender Alternativen konnten diese bis vor ca. 20 Jahren allein durch ‘passive’ Techniken umgesetzt werden.

Nachteilig an aktuell verfügbaren ‘passiven’ Maßnahmen ist, dass sie allein die Primär- oder Sekundär-Schallemission reduzieren, siehe auch Abbildung 5.2 und die Vorstellung weiterer Maßnahmen in den folgenden Kapiteln.¹ Diese Einschränkung ist in der physikalischen Wirkungsweise der ‘passiven’ Maßnahmen begründet,

¹Diese Differenzierung entfällt bei Gleisen auf Brücken, da hier (supplementär der Primärschallemission) die mittels der Erschütterungen angeregte Brückenkonstruktion Luftschall emittiert.

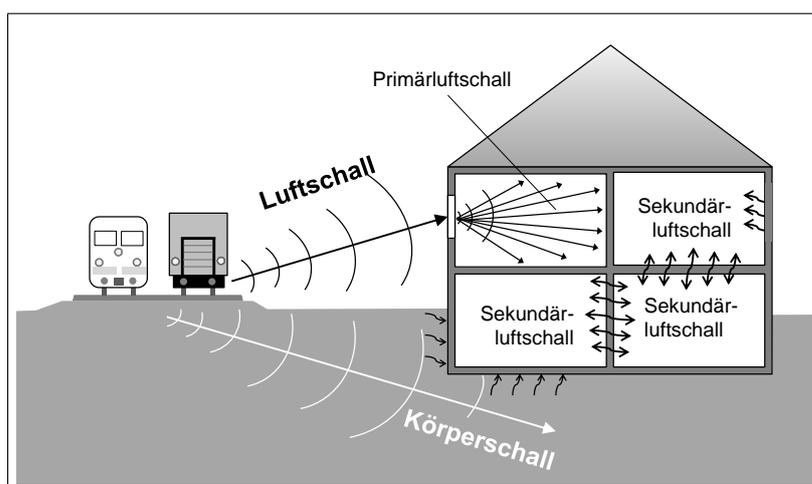


Abb. 5.2: Unterscheidung der Primär- und Sekundärschallemission

Tab. 5.1: Einfluss von Gleisbauteilen auf die Luftschallemission [66]

Gleisbauteil	Einfluss
Schienentyp	gering
Schienenfahrfläche	sehr groß (speziell Riffel)
Schienenbefestigung bei Schotteroberbau	eher gering
Schienenbefestigung bei Fester Fahrbahn	erheblich
Schwellentyp	eher gering
Schotterbettqualität	gering

die entweder als Luftschall-Absorption (SSW) oder -Dämmung (Schallschutzfenster) oder Erschütterungsdämmung (z. B. durch elastische Gebäudelagerung) wirkt. In der Anwendung führt dies zu objektiv reduzierten Emissionen, die jedoch durch die verstärkt wahrgenommene Schallquelle (bei Anwendung einer SSW oft der Sekundärschall) den Nutzen subjektiv reduziert, teilweise auch neutralisiert [72] [4]. Durch Maßnahmen direkt oder dicht an der Quelle kann oft der Primär- und Sekundärschall reduziert werden, so dass ein hoher Nutzen bei relativ geringen Kosten zu erwarten ist. Hier sind die unterschiedlichen Frequenzbereiche der Transmission vorteilhaft. Beispielsweise kann der Primärschall mittels Schienendämpfern und der Sekundärschall mittels Unterschottermatte (USM) reduziert werden, ohne dass eine Beeinflussung erwartet werden kann. Hier sind jedoch noch weitergehende Analysen notwendig.

Durch die Track Decay-Rate (TDR) wird vornehmlich das für den Primärschall relevante Gleisverhalten beschrieben. Um das Sekundärschallverhalten zu quantifizieren, sind Erschütterungsmessungen im Nahbereich notwendig. Hier existieren mit den Normenreihen DIN 4150 [116] und DIN 45672 [123] entsprechende Vorschriften für Emissions- und Immissionsmessungen.

In Tabelle 5.1 ist, basierend auf Erfahrungswerten, der Einfluss von Bauteiländerungen auf die Luftschallemission dargestellt. Weitere Minderungsmaßnahmen, speziell für den Nahverkehr, stellt [61] ausführlich vor.

5.1 Schallschutzwände

Da bis vor ca. 20 Jahren als streckenseitige Minderungsmaßnahme allein Schallschutzwände zur Verfügung standen, werden sie hier vergleichend vorgestellt.

SSW bestehen meist quellenseitig aus einer absorbierenden Wandfläche. Die tragende Struktur muss vor allem auf die aerodynamischen Belastungen bei Zugvorbeifahrt ausgelegt sein. Der akustische Nutzen ist aktuell durch die maximal zulässige Gesamtwandhöhe von 6 m (Sockel und Wand) begrenzt.

Zunehmend wird Kritik, die unter anderem den Denkmalschutz, städtebauliche Belange (Zerschneidungswirkung, Eingeschränkte Sichtbeziehungen, ‘Ghettoisierung’), die Minderung des Verkehrs- und Wohnwertes oder die Grundinanspruchnahme / Zerschneidung von Privatgrundstücken betrifft [58], geäußert. Teilweise werden SSW offensiv abgelehnt [71]).

Auch technische Gründe, vor allem Mehrkosten durch Änderung an Oberleitungsanlagen und Signalstandorten, zusätzliche Zugfunk-Repeater, die Erhöhung der Unterbau- und Brücken-Standfestigkeit und relativ hohe Windlasten (Schnellfahrstrecken), führen zu einem Bedarf an alternativen Technologien [58] [77]. Weitere Nachteile resultieren aus der verringerten Entwässerung des Oberbaus im Bereich der Wandgründung [44]. Dadurch verringert sich die Verformungseigenschaft des Untergrundes, die Änderung der Erschütterungsübertragung ist noch unbekannt.

Abgewandte Bauformen stehen in Form der sog. ‘Mini-SSW’ (Wandhöhe ca. 0.7 m) zur Verfügung. Aufgrund der reduzierten Bauhöhe müssen sie quellennah angeordnet werden, dies führt bei zweigleisigen Strecken zu drei SSW-Reihen. In Versuchsanwendungen wurden Emissionsreduktionen von 8–10 dB bei ähnlichen LCC von einreihigen SSW, ermittelt [92]. Die Akzeptanz ist relativ verhalten, da durch die gleisnahe Anordnung der Strecken-Unterhalt erschwert wird.

5.2 Schieneneinhausung

Eine alternative Anwendung überträgt die schallabsorbierende Wirkung der SSW (siehe Kapitel 5.1) in einem minimal möglichen Abstand an die Schiene, die oft die Gesamtemission dominiert. Unter dem Produktnamen ‘CalmRail’ der Fa. Sekisui wurde eine offenporige Luftschall-Absorptionsmatte, flächig an einer entdröhnten Stahlplatte verklebt, an der Schiene klemmend befestigt. Die Messergebnisse aus Überfahrten verschiedener Zugarten zeigen eine Luftschall-Reduktion im Gesamtpegel von 1.7 dB (ca. 2 dB $f \leq 400$ Hz, 5–11 dB $f \geq 400$ Hz) [59]. Da keine signifikante Körperschall-Beeinflussung des Gleises vorhanden ist, zeigt auch die TDR keine signifikante Änderung. Der akustische Nutzen wird daher allein der Luftschallabsorption zugeschrieben [51].

Weitere Möglichkeit der Schieneneinhausung (neben dem straßenbündigen Gleis bei Straßenbahnen) bieten Oberbauformen mit ‘hochliegendem Rasen’. Durch das Rasensubstrat wird das Schienenprofil bis auf die betrieblich notwendigen Bereiche des

Schienenkopfes (Fahrfläche, gleisinnere Kopfflanke) bedeckt. Die Schallpegelminderungen resultieren aus der reduzierten abstrahlenden Schienenfläche, sie fällt jedoch aus zwei Gründen geringer aus als es die Verhältnisse der Flächengröße vorher / nachher erwarten lassen [94]:

1. Die an die Schiene angrenzenden Bauteile emittieren ebenfalls Schall. Da es sich oft um relativ kleine Kunststoffbauteile handelt, schwingen sie mit der Schiene in Phase, wodurch sich der emittierte Schall verstärkt.
2. Die Schiene verliert ihren Dipol-Charakter (der bei einzelnen Frequenzen emissionsreduzierende Interferenzen ausbildet) und verhält sich wie ein Monopol. Dies führt im tieffrequenten Bereich zu erhöhter Luftschallemission.

Der akustische Nutzen ist daher abhängig von der Detailkonstruktion. Grenzt die Rasensubstrat-Schicht direkt an den Schienenkopf, entfällt der erstgenannte Nachteil.

Die Rasengleis-Oberfläche zeigt im Vergleich mit Schotteroberbau zwischen $f \approx 0.5$ und 4 kHz einen geringeren Absorptionskoeffizient [43].

5.3 Körperschall-Dämpfer / -Tilger

Nach dem in der Maschinenakustik verbreiteten Schwingungstilger-Prinzip kann, bei begrenztem emissionsrelevanten Frequenzbereich, die Oberflächenschnelle und damit die Luftschallemission reduziert werden. Dieses Prinzip wird gleisseitig genutzt, um die schallemittierende Länge zu reduzieren.

In Rollgeräuschsimulation mittels der Software TWINS wurden Bauformen mit Stahlquadern in einer Gummi-Ummantellung untersucht [107]. Hier wurden folgende Erkenntnisse gewonnen:

- Die Emissionsreduktion ist unabhängig von der Amplitudenhöhe der ‘effektiven Rauheit’ (Summenrauheit und Kontaktfilter, siehe Seite 101).
- Die Schwellenschwingung wird nicht beeinflusst.
- Die Erhöhung der Dämpfermasse von 5 auf 10 kg/Schwellenfach führt, bei den untersuchten Bauformen, zu geringfügig höherer Emissionsreduktion.
- Hohe Verlustfaktoren des Gummis führen zu breitbandiger Wirkung und höherer Emissionsreduktion.
- Durch die eher breitbandige Abstrahlung des Gleises ist eine breitbandige Abstimmung (hier wurden zwei Frequenzen analysiert) sinnvoll. Dies führt zu einer höheren Emissionsreduktion (4.5 statt 3.7 dB), jedoch nur bei mittlerer, nicht bei hoher Zwischenlagen- (Zw-)Steifigkeit.

Aus diesen theoretischen Arbeiten wurde ein Schienendämpfer, der aktuell durch die Fa. CORUS / TATA Steel vertrieben wird, entwickelt [97]. Kennzeichen sind wenige (meist drei) Stahlquader, die elastisch in einer Gummi-Ummantelung lagern. Mittels Stahl-Spannklemmen wird er am Schienenfuß befestigt und gegen den Schienensteg gespannt.

Eine alternative Bauform der der Fa. Schrey & Veit basiert auf mehreren, mittels Elastomerplatten verbundener Stahlbleche [103]. Diese Sandwich-Blöcke werden mittels einer Verschraubung am Schienenfuß befestigt.

Beide Bauformen können durch Anpassung der Stahl- und / oder Elastomer-Bauteile spektral auf die Strukturodynamik der Schiene abgestimmt werden. Durch die zusätzliche Anpassung an verschiedene Schienenprofile wird so ein relativ hoher Nutzen, typischerweise ca. 3 dB, erlangt.

Aktuell werden Betriebserfahrungen der zwei genannten Produkte, die vor allem die effiziente Montage und den Langzeitnutzen betreffen, ermittelt.

Die Anwendung eines Schienendämpfers der Fa. Wilson Acoustics, der ebenfalls auf dem Tilger-Prinzip beruht, ist aus Hong Kong bekannt [41].

Weitere Schienendämpfer werden aktuell durch die Fa. KRAIBURG Elastik (Produktname 'STRAILastic_A') [16] und die Fa. Vossloh / Fa. Wirthwein (Produktname 'Schienenstegdämpfer') [62] angeboten. Sie bestehen aus einteiligen Elastomerbauteilen und wirken, aufgrund fehlender Masse-Feder-Kombinationen, nicht nach dem Prinzip eines spektral abgestimmten Tilgers.

Zwei weitere Bauarten wurden in verschiedenen Forschungsprojekten getestet: Die Bauart JW Tiflex @10u8, Fa. James Walker / Alom, im Rahmen des 'Innovatieprogramma Geluid' [32]. Sie besteht aus drei Stahl-Sandwich-Streifen, die mittels einer Gummimatte verbunden und an Schienenfuß und -steg gedrückt werden. Weiterhin wurde die Bauart ABSORAIL, Fa. CDM, im Rahmen des Projektes 'Quiet City' angewandt [93]. Sie basiert auf Gummiblöcken, die im Schwellenfach an der Schiene verschraubt sind und seitlich ca. 10 cm über den Schienenfuß ausragen. Nach Abschluss beider Projekte sind jedoch keine weiteren Anwendungen bekannt.

Durch Messungen wurde die Unabhängigkeit der Emissionsreduktion von der Höhe der Radrauheit nachgewiesen [89].

Die zusätzliche Masse der Schiene, bei nur geringfügig erhöhter Biegesteifigkeit, führt zu einer tieferfrequenten Lage der 'pinned-pinned'-Frequenz (siehe Gleichung 4.3). Dieser Effekt wurde an Gleisen mit applizierten Dämpfern der Fa. Wilson Acoustics beobachtet [41] und konnte in eigenen Messungen bestätigt werden.

Die elastische Verbindung der Massen kann aktuell unter den praktischen Rahmenbedingungen nur durch Elastomere umgesetzt werden. Somit liegen Steifigkeiten und Verlustfaktoren vor, die von der Materialtemperatur abhängen. Der Einfluss auf die Schallreduktion ist anhand der Dämpferbauform der Fa. TATA untersucht worden. Hier wurde gezeigt, dass bei Differenzen zur Auslegungstemperatur die Schallreduktion abnimmt. Diese Reduktion steigt mit zunehmendem Verlustfaktor des Elastomers. [2]

Aktuell besteht der Bedarf an sicheren Schallprognose bei Einsatz der Dämpfer

an bestehenden Strecken. Diese Prognosen müssen unterschiedliche Fahrzeug- und Gleiskonstruktionen berücksichtigen. Bisher werden die akustischen Änderungen über die TDR beschrieben, jedoch lassen die TDR-Änderungen aufgrund unterschiedlicher Gleiskonstruktion keine sichere Aussage über allgemein gültige TDR-Änderungen zu. Im Projekt ‘STARDAMP’, welches aktuell bearbeitet wird, soll ein einheitliches Analyseverfahren mittels Laborversuchen erarbeitet werden. Dabei werden auch Versuche an (praktisch oft mit geringerem Aufwand verfügbaren) finiten Gleisstücken betrachtet.

5.4 Schienenprofil

In diversen Projekten ist das Schienenprofil mit akustischen Zielsetzungen geändert worden. Dabei wurden verschiedene konstruktive Ansätze gewählt.

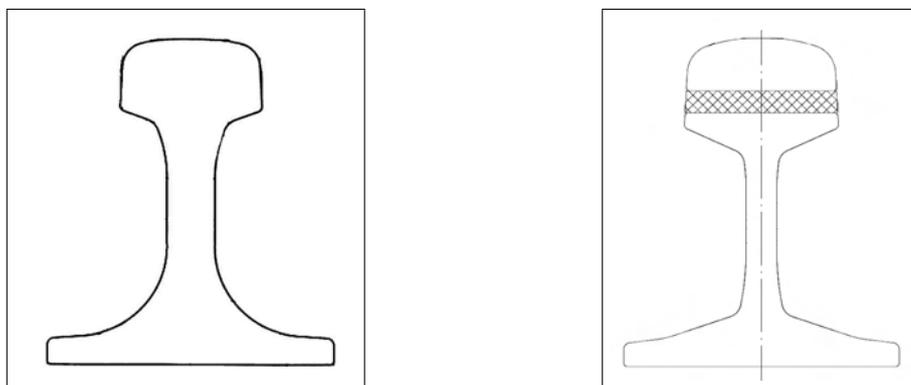


Abb. 5.3: Schienenprofil VA71b [93] **Abb. 5.4:** Schienenprofil ‘Leise Schiene’ [7]

Das Schienenprofil **VA71b** (Fa. Voestalpine, siehe Abbildung 5.3) zeichnet sich durch erhöhte Steg- und Fußdicken und vergrößerte Radien der Ausrundungen zwischen Steg und Fuß aus. So resultieren geringere Flächenelastizitäten und Oberflächenschnellen. Messergebnisse zeigen im Bereich $f \leq 1$ kHz relativ geringe TDR-Werte und Schalldruckpegel-Reduktionen von ca. 1.5 dB (gegenüber dem Schienenprofil 60E2 bei gleicher Zw, abhängig von der Zugart) [7]. Es ist nicht bekannt, ob eine Analyse der Dynamik des gesamten Gleises durchgeführt wurde.

Im Projekt **Leise Schiene** (unter anderem Fa. TSTG Schienen Technik, Stuttgarter Straßenbahnen, TU Berlin, siehe Abbildung 5.4) konnte durch die akustische Entkoppelung mittels einer Elastomerschicht zwischen dem Anregungspunkt (Schienenkopf) und dem Schienensteg und -fuß, bei unveränderter Anregung, die Gesamt-Luftschallemission reduziert werden. Ergebnisse aus Betriebsversuchen stützen diese Theorie [37]. Aktuelle offene Konstruktionspunkte betreffen die dauerhafteste Auslegung des Schienenkopfes und der Elastomerschicht.

Die zwei Schienenprofile **Silent Rail** (Fa. Pougetrail) und **Saddle Profile** (Fa. Acoustic Control, siehe Abbildung 5.5) basieren auf einem elastisch entkoppeltem Schienenkopf, der (unter anderem aus Gründen des kostengünstigen Austausches bei

Verschleiss) als Einzelteil ausgeführt ist. Bei diesen Entwicklungen ist jedoch keine akustisch orientierte Auslegung veröffentlicht. Teilweise werden diese Schienenprofile auch zur Reduktion von Kurvengeräuschen vorgeschlagen [78] [70]. Praktische Anwendungen und Betriebs-Erfahrungen sind nicht bekannt. Darüber hinaus sind weitere, konstruktiv leicht abweichende Profilformen als Patent angemeldet.

Um die flächenhafte Abstrahlcharakteristik des Stegs zu reduzieren, wurde eine **variierende Stegdicke** vorgesehen. Ergebnisse aus Simulationen oder aus praktischen Versuchen sind bisher nicht veröffentlicht.

Weitere Profilformen wurden unter anderem im Projekt ‘Silent Track’ getestet [39]. Die aktuelle praktische Umsetzung ist nicht bekannt.

Aufgrund der sehr hohen Anforderungen (vor allem sicherheitsrelevantes Versagenverhalten bei Verschleiß) setzen sich Änderungen des Schienenprofils relativ langsam durch (siehe z. B. Einführung einer neuen Stahlsorte [27]). Entwicklungen von innovativen Profilformen mit akustischen Vorteilen müssen daher langfristig angelegt werden.

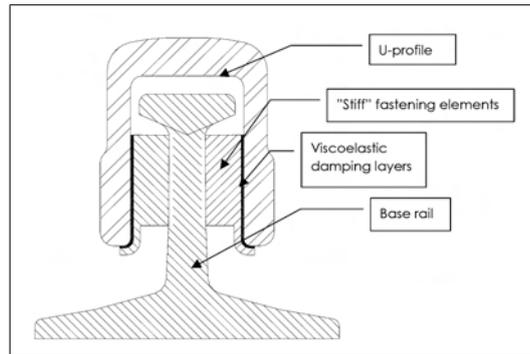


Abb. 5.5: Schienenprofil ‘Silent Rail’ [93]

5.5 Zwischenlage

Zwischenlagen (Zw) müssen einerseits eine Mindest-Elastizität im Gleisrost herstellen, damit bei dynamischen Anregungen aus Fahrzeugüberfahrten keine die Dauerfestigkeit beschränkenden Kräfte resultieren. Andererseits dürfen aufgrund der Materialbelastung und der (tieffrequenten) Laufdynamik die Auslenkungen der Schiene definierte Grenzwerte nicht überschreiten.

Seit einigen Jahren werden Zw auch nach akustischen, daher hochfrequenten Kriterien analysiert. Konstruktive Umsetzungen sind jedoch nicht veröffentlicht. Hier sind Ansätze, die unterschiedliche tief- und hochfrequenten Eigenschaften zeigen, anzustreben.

Da vor allem in der Zw, beeinflusst durch die Vorspannung aus den Spannklemmen, die Stützpunkt-Steifigkeit erzeugt wird, resultiert im Bereich oberhalb der Frequenz f_{c2} (siehe Kapitel 4.1) eine elastische Entkopplung. Diese Resonanzfrequenz steigt mit zunehmender Zw-Steifigkeit, so dass die erhöhte Schallemission erst bei höheren Frequenzen eintritt.

vert. stat. Steifigkeit	Beschreibung
ca. 60 kN/mm	‘elastisch’
60–500 kN/mm	‘mittel’
≥ 500 kN/mm	‘hart’

Tab. 5.2: Gliederung der Zw-Steifigkeiten

Tab. 5.3: Verbreitete Zw-/ Stützpunkt-Bauarten und Steifigkeiten

	Bauart	vertikale statische Steifigkeit (ca.)
Zw / Zwp	Zw609	22.5 kN/mm [109]
	Zw661a	≥ 800 kN/mm [100]
	Zw661-6	900 kN/mm [36]
	Zw664a	800 kN/mm [88]
	Zw686a	400 kN/mm [15]
	Zw687a	400–600 kN/mm [15] [68]
	Zw700, Zw900	60 kN/mm [52] [80]
Zw787a	140 kN/mm [110]	
Stützpunkt	IOARV300	21.9 kN/mm (Zw686a, Zwp609)
	ISOL 87	200 kN/mm [88]
	RST60	285 kN/mm (Zw661-1, Ap25/150)
	ZWS 15/4	360 kN/mm (je Doppelstützpunkt) [24]

Durch steifere Zw erhöht sich jedoch auch die Schwellen-Schwingung und -Schall-emission. Optimale Steifigkeit liegt daher vor, wenn Schwelle und Schiene den gleichen Emissions-Anteil zeigen. Akustisch optimale Zw-Steifigkeiten wurden mittels simulativer Parametervariation ermittelt. Sie fallen jedoch signifikant steifer als aktuell eingesetzte, bereits ‘relativ steife’ Zw aus. Hier muss die ausreichende und dauerhafte Elastizität (siehe oben) noch nachgewiesen werden [107].

Noch keine abschließenden Erkenntnisse liegen zu der wiederholten Beobachtung höherer Schienenrauheiten bei Oberbauformen mit steiferen Zw vor. Theoretische Ansätze gehen von einem Einfluss der (mittels Simulation nachgewiesene [86]) deutlicheren Ausprägung der ‘pinned-pinned’-Resonanz aus. Hier besteht die Gefahr eines konstruktiven Zielkonfliktes, dessen Zusammenhänge (speziell die zeitliche Entwicklung der Schienenrauheit) und Randbedingungen noch weiter analysiert werden müssen.

Die Zw-Steifigkeit steigt grundsätzlich mit zunehmender Frequenz und bei steigender Vorlast². Beide akustisch relevanten Randbedingungen werden aufgrund fehlender bauteilspezifischer Daten bei Analysen oft nicht beachtet.

Der Einfluss der Zw-Steifigkeit zeigt sich auch in der TDR [88], siehe auch Kapitel 4.1.1. Die verschiedenen Auswirkungen und historisch entwickelten Erkenntnisse führen zu wechselnden ‘Philosophien’ und entsprechend breiter Streuung in der praktischen Verbreitung [54].

Die Zw-Steifigkeiten werden üblicherweise wie in Tabelle 5.2 angegeben eingeteilt. Weitere Beispiele sind in [94] aufgeführt. Beispiele für in Deutschland und der Schweiz verbreitete Bauarten sind in Tabelle 5.3 aufgeführt.

²Beispiel: Die statische Steifigkeit der Zw700/Zw900 steigt durch Vorlast von 60 kN/mm auf 160 kN/mm [80]. Wird bei 25 kN Vorlast eine dynamische Belastung aufgebracht, erhöht sich die quasistatische Steifigkeit (1 Hz) von 74 auf 76 (10 Hz), 80 (100 Hz), 116 (1 kHz) bzw. 179 kN/mm (2 kHz) [54].

Bei (akustisch relevanter) hochfrequenter Belastung zeigen sich deutlich höhere Steifigkeiten. So erhöht sich die Steifigkeit der Zw700 und Zw900 bei einer Belastungsfrequenz von bereits $f=10$ Hz auf ca. 100 kN/mm [110]. Weitere Messungen zeigen, dass die hochfrequente Zw-Steifigkeit bis zu einem Faktor 10 größer ausfällt als die statische Steifigkeit [115]. Ebenfalls erhöht sich die Steifigkeit im Allgemeinen bei zunehmender Kraftamplitude, zunehmendem Alter und bei abnehmender Materialtemperatur [42]. Daher können die Gleisfrequenzen und die Resonanzfrequenz $f_{Zw-Rp-Zwp}$ real deutlich höher als analytisch prognostiziert ausfallen.

In lateraler Richtung ist der Einfluss der Zw-Steifigkeit geringer, da hier diese Gleis-schwingungsformen (aufgrund der gegenüber der vertikalen Richtung um den Faktor 4 bis 20 reduzierten Steifigkeiten) weniger deutlich ausgeprägt sind [54].

Die innere Dämpfung der Zw ist erst ab der Gleisfrequenz f_2 relevant, da im tieffrequenteren Bereich Schiene und Schwelle in Phase schwingen [107].

Bei allen Optimierungen müssen die kunststofftechnischen Möglichkeiten beachtet werden, speziell unter den hohen möglichen Schienen- und Schwellen-Temperaturen im eingebauten Zustand.

5.6 Schwellen

Schwellen sind sowohl als schallemittierendes Bauteil als auch als Verbindung zwischen der Anregungsquelle und dem Untergrund (Erschütterungen) akustisch relevant. Zusätzlich stellt ihre äquidistante Anordnung eine wichtige Randbedingung der ‘pinned-pinned’-Eigenform dar.

Einschränkend ist bei Betrachtung verschiedener Schwellenbauformen zu beachten, dass bei einigen Stützpunktkonstruktionen nicht alle Schwellenbauformen zulässig sind. Hier ist eine bauteilspezifische Analyse nicht möglich.

Der Einfluss auf die Schallabstrahlung wird zusammenfassend in [38] vorgestellt.

Besonders im Frequenzbereich zwischen den Gleisfrequenzen f_2 und f_{c2} (siehe Seite 7) ist die Emission hoch, da die Schwellen hier annähernd entkoppelt von der Schiene schwingen.

Für die Gleisfrequenzen f_2 und f_{c1} ist das Schwellengewicht relevant. Für gängige Schwellenarten sind die Gewichte (ohne Bauteile des Stützpunktes) in Tabelle 5.4 dargestellt. Für die Gleisdynamik ist die Schwellenoberfläche ebenso wie die Eigenformen in diesem Frequenzbereich relevant. Nach Analysen in [107] reduziert eine hohe Schwellenmasse die Schallemission.

Alternative Schwellenbauformen, wie beispielsweise die Y- oder Rahmen-Schwelle, müssen daher im Kontext der gesamten Gleiskonstruktion nach den genannten Kriterien analysiert werden.

Die Gleis elastizität kann durch eine elastische Beschichtung der Schwellenunterseite (Schwellenbesohlung) erhöht werden. Es resultieren erhöhte Schwingamplituden der Schwelle, gleichzeitig reduziert sich der Erschütterungs-Eintrag in den Untergrund [68] [102].

Tab. 5.4: Gewichte verbreitet angewandter Schwellen

Bauart	Gewicht
Beton-Bi-Block-Schwellen	ca. 200 kg nach [106]
Beton-Monoblock B70	280 kg [83]
Beton-Monoblock B91	286 kg [83]
Stahl-Trogswelle (Schienenprofil 54E2)	71 kg [106]
Beton-Rahmenschwelle RS70	550 kg [91]
Y-Stahlschwelle (div. Bauformen)	143 kg [101]
Holzschwelle	80 kg [106]

Eine weitere akustische Funktion kommt der Beton-Monoblock-Schwelle der ‘Akustisch Innovativen Festen Fahrbahn’ zu [73]. Hier wird, ergänzend zu den Luftschallabsorptionselementen, der Schwelle eine innere Dämpfung in Form einer viskoelastischen Zwischenschicht aufgeprägt. Laborversuche zeigen einen signifikanten Nutzen, die praktische Anwendung ist nicht veröffentlicht.

5.7 Schotterbett

Durch Schotteroberbau wird, aufgrund der offenen Zwischenräume, der primäre Luftschall in einem breiten Frequenzbereich reduziert [43].

Das Schotterbett beeinflusst im tieffrequenten Bereich vor allem die Erschütterungsemission in den Unterbau. Dabei ist die Schotterbett-Steifigkeit und -Dämpfung relevant, die jedoch auch bei aktuellen Stopfmethoden nicht exakt umgesetzt und so nur ungenau angegeben werden kann.

Beispielhaft zeigen sich verschiedene Schotterbett-Resonanzfrequenzen im Bereich bis zu $f=130$ Hz [55]. Die resultierende Schallemission ist größtenteils für den Gesamtschallpegel irrelevant.

Liegen jedoch Konstellationen vor, bei denen die (fahrgeschwindigkeitsabhängige) Gleisanregung in diesen Frequenzbereich fällt, sollte die Schotterbett-Resonanzfrequenz (Steifigkeitsänderung durch geändertes Stopfen) geändert werden.

Soll die Erschütterungsemission reduziert werden, muss das ‘Fließen’ des Schotterbettes verhindert werden. Hier stehen unterschiedliche Konditioniermethoden, beispielsweise das Produkt DURFLEX® [18] [20], zur Verfügung. Alternativ ist die Lagerung des Schotterbettes in einer Betonwanne (z. B. System GRÖTZ [67]) möglich.

Der Einfluss elastischer Elemente in Form von USM und Schwellenbesohlung auf die Ausbildung der Schienenrauheiten wurde ebenfalls untersucht [88]. Hier zeigen sich, bei sonst gleichem konstruktiven Aufbau, insgesamt geringere Schienenrauheiten. Da jedoch USM und Schwellenbesohlung gleichzeitig geändert wurden, kann nicht zwischen dem Einfluss der Einzelmaßnahmen unterschieden werden.

5.8 Weitere konstruktive Maßnahmen

Neben den oben genannten sind auch die im folgenden aufgeführten Maßnahmen zur akustischen Gleisoptimierung durchgeführt worden. Sie erfordern jedoch teilweise einen sehr umfangreichen Eingriff in den Oberbau.

Diese Maßnahmen sind praktisch (noch) nicht oder nur bei speziellen betrieblichen Situationen umgesetzt.

- **Zweifach elastisch gelagerter Stützpunkt:** Durch die Anordnung Zw-p-Rp-Zw ergibt sich ein zweifach federnd gelagerter Ein-Massen-Resonator (nachgewiesen durch [49]). Die Resonanzfrequenz $f_{Zw-Rp-Zw-p}$ beträgt beispielsweise $f \approx 1.8$ kHz (bei Zw661-6, Ap25/150 und üblicher Rp mit einem Gewicht von 9 kg, siehe MS **F** bis **H**). Dieses Beispiel zeigt den möglichen Frequenzbereich auf, hier sind jedoch noch weiterführende Untersuchungen zur spezifischen Auslegung, speziell zur Berücksichtigung der frequenz- und vorlastabhängigen Steifigkeit und der Anregung aus der Schiene / Schwelle (Phasenlage), notwendig.
- **Lagerung der Schienen am Steg:** Um die relativ hohe Schallemission des Schienenstegs zu reduzieren, wurden Systeme durch die Fa. ORTEC entwickelt, die kontinuierlich oder diskret eine Lagerung der Schienen am Steg umsetzen [76]. Sie bieten eine relativ hohe statische Einsenkung durch die Dimensionierung der Elastomere und damit eine hohe elastische Entkoppelung von der Schwelle. Neben der reduzierten Schienen-Schallemission wird so auch die Erschütterungsemission in den Unterbau reduziert. Vergleichbare TDR-Ergebnisse sind nicht veröffentlicht.³
- **Änderung des Stützpunktabstandes:** Durch eine nichtperiodische Stützpunktanordnung wird eine geringere bzw. keine Ausbildung der ‘pinned-pinned’-Eigenform erwartet. Dies erfordert bei unveränderten Schienenprofilen eine abweichende Schwellenanordnung mit Abständen $l_s \leq 0.6$ m. Alternativ können Schwellenbauformen angewandt werden, die Aufnahmen für nicht-periodische Stützpunktabstände bieten, siehe MS **N**. Jedoch muss der Grenzfall der kontinuierlichen Schienenlagerung beachtet werden [94], bei der sich kein ‘pinned-pinned’-Effekt mehr ausbildet.

Bei einigen neuartigen Schwellenkonstruktionen werden (oft nicht aus akustischen Gründen) die Aufnahmen für zusätzliche Stützpunkte bereits in der Auslegungsphase vorgesehen [19].

- **Lage des Rad-Schiene-Kontaktpunktes:** Durch die Lage des Kontaktpunktes auf der geometrischen Schienenkopfmittle und allein Kontakt-Normalkräften werden bis $f \approx 2$ kHz in der Schiene idealerweise nur vertikale Schwingungsformen angeregt. Durch die höhere vertikale als laterale Gleisimpedanz

³Diese Oberbauform wird überwiegend im Nahverkehr eingesetzt, so dass hier oft eine geringe Erschütterungs- anstelle einer geringen Luftschallemission angestrebt wird.

würde insgesamt weniger Schall emittiert werden [107]. Praktisch wird dieser Zustand jedoch durch unterschiedliche Radprofile (aufgrund des betrieblichen Verschleißes), Kontakt-Lateralkräfte und lauftechnische Anforderungen (Einbauneigung) nicht ermöglicht. Hier sind noch weitere Untersuchungen notwendig, die bei sehr gering abweichenden Radprofilen (z. B. Straßenbahnbetrieben) einen akustischen Nutzen analysieren.

Generell wird ein konstruktiver Aufbau empfohlen, dessen Eigenfrequenzen nicht in den Frequenzbereichen der Anregung, beeinflusst u. a. durch Streckengeschwindigkeit und fahrzeugseitige Abmaße (Radstand, Drehgestellabstand etc.), liegen [68] [80].

Auch die Anwendung aktiver Mechatronik wurde diskutiert [82]. Sie bietet eine hohe Anpassungsmöglichkeit an die realen Schwingfrequenzspektren. Weiterer Entwicklungsbedarf besteht jedoch bei Fragen der Energieversorgung, Dauerfestigkeit, mechanischen Robustheit bei Gleis-Unterhaltungsarbeiten und der preiswerten Steuerelektronik.

5.9 Reduktion der Schienenrauheit

Die Fahrflächenrauheit der Schiene geht, gleich der Radrauheit, in die emissionsrelevante Summenrauheit ein (siehe Gleichung 4.5). Für geringe Gesamtemissionen müssen daher Rad- und Schienenrauheiten reduziert werden.

Bei konventioneller Schleiftechnik, die orthogonal zur Schienenoberfläche drehende Schleifsteine nutzt, resultieren Querriefen auf der Fahrfläche. Diese führen zu einer harmonischen Anregung im Rad-Schiene-Kontakt. Werden die Fahrflächen anschließend mit oszillierenden Schleifsteinen in Längsrichtung bearbeitet ('akustisches Schleifen'), wird die Amplitude dieser Riefen reduziert. Die resultierenden Schienenrauheiten fallen signifikant geringer als typische Radrauheiten aus und zeigen dabei keine dominierenden monofrequenten Anteile [33].

Diese Schleifverfahren sind jedoch weniger leistungsfähig als konventionelle Methoden. Dies führt zu längeren Streckensperrzeiten und höheren Produktionskosten.

Im Netz der Deutschen Bahn wird dieses Schleifverfahren bei dem sog. 'Besonders überwachten Gleis' auf einer Streckenlänge von ca. 350 km [10] angewandt. Durch die tendenziell reduzierten Schallemissionen müssen, entsprechend der aktuellen Gesetzeslage, so keine weiteren Maßnahmen angewandt werden.

Es wurde jedoch nachgewiesen, dass die Emissionsreduktion durch geringere Schienenrauheiten allein bei ebenfalls geringen Radrauheiten wirksam werden [88]. Praktisch bedeutet dies vor allem im Güterverkehr keine signifikante Emissionsreduktion. Der Einfluss der Gleiskonstruktion auf die Ausbildung und die Höhe der Schienenrauheit ist nur durch Langzeitversuche zu ermitteln. Veröffentlichungen bisheriger Versuche zeigen, dass es bisher nicht gelang, allein einen konstruktiven Parameter zu ändern. Daher sind kausale Zusammenhänge bisher nicht geklärt.

Viele Ansätze gehen von einem signifikanten Einfluss der Gleisdynamik aus [45]. Hier wird beispielsweise eine beschleunigte Zunahme der Rauheitsentwicklung bei deutlicher Ausprägung der ‘pinned-pinned’-Frequenz prognostiziert [45] [111]. Da diese Ausprägung durch hohe Zw-Steifigkeiten unterstützt wird, muss die akustische vorteilhafte Aussage aus den TDR-Ergebnissen (siehe z. B. Seite 98) möglicherweise relativiert werden.

Aufbauend auf dem Ansatz des ‘pinned-pinned’-Frequenz-Einflusses auf die Schienenrauheits-Ausbildung wird bei kontinuierlich gebetteter Schiene eine geringere Rauheit erwartet [43]. Dies wurde jedoch nicht durch Messungen geprüft.

5.10 Rückwirkung auf die Emission des Rades

Die Auswirkung gleisseitiger Maßnahmen auf die Schallemission des Rades ist nur selten analysiert worden. Eine Abhängigkeit von der konstruktiven Ausführung der Maßnahme erscheint plausibel.

Der theoretische Ansatz, der vielen Rollgeräusch-Simulationsmodellen zugrunde liegt, berücksichtigt das frequenzabhängige Verhältnis der Admittanzen von Rad und Gleis. Hier wird für Frequenzbereiche, in denen die Gleisadmittanz höhere Beträge zeigt, eine höhere Schallemission des Gleises angenommen und vice versa [94].

Ergebnisse liegen für die Änderung der jeweiligen Emissionen bei Erhöhung der Zw-Steifigkeit vor. Hier ist simulativ keine Änderung der Rad-Abstrahlung ermittelt worden [107]. Da in diesem Bereich die Zw-Steifigkeit für die Gleis- / Schienen-Rezeptanz (und damit Schallemission) irrelevant ist, wird dies mit der spektralen Lage der radseitigen Emission im Bereich [1.5;5 kHz] begründet.

Aktuelle Erfahrungen zeigen, mit inhaltlich gleicher Begründung, bei Anwendung von Schwingungsdämpfern an der Schiene keine Änderung der radseitigen Emission. Im Projekt SIMTool sind Indizien für unterschiedliche Rad-Schwingungsverhalten bei Überfahrt von verschiedenen Oberbauformen im akustisch relevanten Frequenzbereich festgestellt worden [112]. Hier wurden die Gleisbauarten Schotteroberbau, Feste Fahrbahn (FF) mit Asphalttragschicht (ATS), FF mit Beton-Tragschicht und FF mit kontinuierlicher Schienenlagerung betrachtet. Adaptive gleisseitigen Minderungsmaßnahmen standen nicht zur Verfügung. Bei den Ergebnisse muss beachtet werden, dass die Schienenrauheiten nicht bekannt sind.

6 Nutzenquantifizierung - Aktuelles Vorgehen

Der akustische Nutzen einer Oberbauform¹ muss durch die beiden Kriterien

1. Schallabstrahlung (bei definierter mechanischer Anregung) und
2. gleisseitiger Anteil an der mechanischen Anregung

quantifiziert werden. Das zweite Kriterium bedingt vor allem die zeitliche Entwicklung der Schienenrauheit.

Grundsätzlich können diese Kriterien durch Feld-, Laborversuche oder Simulation ermittelt werden. Aufgrund der folgenden Gründe führen allein Feldversuche mit verhältnismäßigem Aufwand zu sicheren Ergebnissen:

- Aus gleisdynamischer Sicht verhalten sich die Schienen ähnlich einem unendlich langen Biegebalken (oft werden Schienenschwingungen auch in einem Abstand $x \geq 60$ m vom Anregungspunkt (AP) gemessen). Damit sich gleiche Schwingformen wie auf freier Strecke einstellen, darf sich im Abstand von mindestens 100 m beidseitig um den AP keine konstruktive Änderung befinden. Gleise mit dieser Länge sind jedoch für Laborversuche aufgrund der Herstellung und des Platzbedarfes ungeeignet.
- Gleisdynamische Simulationsmodelle eignen sich gut, um den Einfluss von konstruktiven Änderungen zu quantifizieren. Aufgrund der komplexen Wechselbeziehungen sollten die Simulationsmodelle validiert sein, so dass der Gesamtaufwand steigt.
- Die sich einstellende Schienenrauheit ist von der Rad-Schiene-Kontaktkraft und der Ausbildung der Kontaktfläche abhängig. Reale Kontaktkraft-Konstellationen lassen sich nur sehr aufwändig synthetisch erzeugen und aufbringen. Daher ist auch hier die reale Betriebsbelastung sinnvoll. Der Einfluss der Betriebsbelastung auf die Schallabstrahlung wird auf Seite 49 diskutiert.

Seit der verbindlichen Einführung 2006 haben sich die Kriterien

- Track Decay Rate (TDR) und
- Schienen- (Fahrflächen-) Rauheit,

vor allem da sie mit vertretbarem Aufwand ermittelt werden können, etabliert.² Entsprechend sind für Gleise, auf denen z. B. im Rahmen von Fahrzeugzulassungen

¹Schallschutzwände zählen nicht zur Oberbauform. Ihr Nutzen wird durch die Änderung des Luftschalls quantifiziert.

²Die TDR ist einer der vier im Projekt NOEMIE empfohlenen Parameter zur vergleichbaren, akustischen Gleis-Charakterisierung bei Fahrzeug-Typtests. Die weiteren Parameter sind Schienen-Impedanz / Akzeleranz (Ermittlung der Zw-Steifigkeit und -Dämpfung), statische Zw-Steifigkeit und Schiene-Schwelle-Isolierfrequenz (entspricht f_{c2} , siehe Seite 7). Hier wird die Mittelung über zehn Hammerimpulse empfohlen [25].

Typtests der Innen- und Außenakustik durchgeführt werden, Grenzwerte dieser zwei Kriterien vorgeschrieben. Aktuell müssen diese bei Vorbeifahrtmessungen nach TSI Noise 2011³ [131] und TSI HS 2008 [129] erfasst und im Gesamtergebnis genannt werden.

Für die messtechnische Ermittlung dieser zwei Kriterien sind die folgenden Standards relevant:

- **EN 15461** *Charakterisierung der dynamischen Eigenschaften von Gleisabschnitten für Schallmessungen von vorbeifahrenden Zügen* [121], erste Version von 10/2008⁴. Dieser Standard legt die erstmals in der TSI CR Noise 2006 [130] vorgeschriebene Messung der TDR⁵ detailliert fest. Es werden unter Anderem Kriterien für die Auswahl des Prüfabschnittes, die Position und Befestigung des Antwortsensors an der Schiene, Anforderungen an die Messgeräte und die Datenverarbeitung genannt. Dieser Standard verweist auf zwei weitere Internationale Standards, die detaillierte Vorgaben für die *experimentelle Erfassung von mechanischer Admittanz bzw. Akzeleranz mittels nicht an der Struktur befestigter Anregung* machen:
 - ISO 7626-1 [132] Experimental determination of mechanical mobility - Basic definitions and transducers
 - ISO 7626-5 [133] Experimental determination of mechanical mobility - Measurements using impact excitation with an exciter which is not attached to the structure
- **EN 15610** *Messung der Schienenrauheit im Hinblick auf die Entstehung von Rollgeräusch* [119], erste Version von 08/2009. Dieser Standard beschreibt die direkte Messung der Schienenrauheit, die erstmals in der EN 3095:2005 [118] und EN 3381:2005 [117] für Fahrzeug-Typprüfungen und / oder periodische Überwachungsprüfungen vorgeschrieben wurde. Es werden unter anderem die AP auf dem Gleis, Anforderungen an die Messstrecke und das Messsystem und die Datenverarbeitung spezifiziert.

Der Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) hat, primär für den Betriebsbereich der BOStrab [128], in der VDV-Schrift 154 [104] die Schienenrauheits-Grenzkurve nach EN 3095 / EN 3381 als Anhaltswert angegeben. Zur Orientierung sind Messergebnisse von ‘spiegelglatten’, ‘mittelglatten’ und ‘rauen’ Schienen angegeben. Diese Ergebnisse haben sich auch in eigenen Messungen bei Nahverkehrsbahnen bestätigt.

³In der TSI Noise 2011 wurde die TDR-Grenzkurve auf den Frequenzbereich [0.25;5 kHz] reduziert.

⁴Aufgrund der weiterentwickelten TSI HS RST [129] und TSI Noise ist in 01/2011 eine aktualisierte Ausgabe der EN 15461 veröffentlicht worden [122]. Sie beinhaltet jedoch keine operativen Änderungen sondern ist um einen inhaltlichen Vergleich der Messanforderungen gegenüber den genannten TSI erweitert worden.

⁵Aufgrund der Laufzeit des Projektes NOEMI wurde die TDR zuerst in der TSI Noise verbindlich gefordert.

Weiterhin besteht die Normenreihe DIN 45673 1-7 [124], in der die Ermittlung von Kennwerten elastischer Gleis-Bauteile definiert ist. Diese Elemente tragen zu einer reduzierten Erschütterungs- und Körperschallemission bei, betreffen also nicht die Primärschallemission des Gleises. Die maximale relevante Frequenz beträgt daher $f \approx 250$ Hz. In DIN 45673-2 wird ebenfalls ein Verfahren zur Bestimmung der Kennwerte im eingebauten Gleis gegeben. Dabei wird, analog der TDR-Messung, ein Kraftimpuls mittels instrumentiertem Hammer auf dem Schienenkopf aufgebracht. Um die tieffrequenten Schwingformen anzuregen, wird auf das Problem des ausreichenden Energieeintrages hingewiesen. Als Optimierung wird der Einsatz von z. B. servohydraulischen Schwingungserregern oder Unwuchterregern genannt. Aufgrund der unterschiedlichen betrachteten Frequenzbereiche und der Betrachtung allein der Erschütterungsemission sind die in dieser Normenreihe definierten Prüfungen für die weitere Untersuchung in dieser Arbeit nicht relevant.

Weitere gültige Vorschriften (z. B. des Welteisenbahnverbandes UIC) zu diesem Themengebiet liegen aktuell nicht vor.

Grundsätzlich kann der akustische Nutzen verschiedener Oberbauformen auch durch reguläre Zugüberfahrten ermittelt werden. Dazu wird der Luftschalldruckpegel ermittelt. Der Vorteil liegt in einem geringen Umfang der Messtechnik. Werden jedoch nur wenige Zugüberfahrten erfasst, zeigt sich durch die unterschiedlichen Fahrzeug-Fahrweg-Wechselwirkungen eine signifikante Streuung. Somit sind keine globalen Aussagen mit ausreichender statistischer Sicherheit möglich [50]. Für objektive Ergebnisse sind daher ‘Langzeit’-Messungen notwendig, so daß im Vergleich die Messung der TDR insgesamt effizienter ist.

Durch die hier vorgestellten Kriterien kann der Nutzen ‘passiver’ Minderungsmaßnahmen (Schallschutzwände, Schieneneinhausungen etc.) nicht quantifiziert werden. Für belastbare Aussagen zu dieser Maßnahme sind Luftschallmessungen bei definierter Beschallung notwendig, die auch im Labor durchgeführt werden können.

In den folgenden Kapiteln 6.1 und 6.2 wird die TDR-Messung⁶ und -Auswertung näher vorgestellt. Da die Rauheitsmessung in der weiteren Arbeit nicht näher untersucht wurde, sind im Kapitel 6.3 Anmerkungen zur praktischen Durchführung zusammengefasst.

6.1 TDR - direktes Messverfahren

Die Messung der direkten TDR nach EN 15461 wird hier zusammenfassend vorgestellt. Verschiedene operative Details werden ab Seite 36 diskutiert.

Vor der eigentlichen Messung muss das zu vermessende Gleis auf seine ‘dynamische Kontinuität’ geprüft werden. Dazu werden an drei potentiellen Positionen des Ant-

⁶Aufgrund der Messung der Übertragungsfunktion zur näherungsweise Ermittlung der TDR lautet die korrekte Bezeichnung ‘Abschätzung der TDR’. Um das experimentelle von dem numerisch-simulativen Vorgehen zu unterscheiden, wird im Folgenden der Begriff ‘Messung’ genutzt. Dabei muss die reduzierte Ergebnis-Genauigkeit einer ‘Abschätzung’ im Vergleich zu einer ‘Messung’ beachtet werden.

wortsensors an der Schiene die Punkteingangs-FRF (Punkteingangs-Akzeleranzen) in vertikaler und lateraler Richtung gemessen. Sind zwei der drei L_{FRF} -Spektren ‘vergleichbar’, können diese Positionen für die weitere Messung genutzt werden.

Für die TDR-Messung wird ein Impuls auf die Schiene gegeben und die Antwort ermittelt. Es wird ein Hammer genutzt, der mit einer Kraftmesseinrichtung ausgerüstet ist, siehe Abbildung 6.1. Die resultierende Strukturantwort wird durch einen Antwortsensor erfasst. Um eine erhöhte statistische Sicherheit zu bekommen, wird diese Messung an jeder AP mindestens vier mal durchgeführt.

Die FRF wird auf einer Schiene des Gleises an 18 AP (‘Nahfeld-AP’) gemessen. An weiteren AP (‘Fernfeld-AP’) sind Messungen notwendig, bis L_{FRF} relativ zu AP₁ in allen Terzfrequenzen um mindestens 10 dB reduziert ist.

Ein gewichtetes Abklingmaß der Schiene im Gleis entsteht, indem der Betrag der n quadrierten Übertragungsfunktionen auf den der quadrierten FRF der AP₁ bezogen wird, dieses Verhältnis dann nach der Gleislänge Δx_n gewichtet wird, die durch jede AP ‘repräsentiert’ wird⁷. Diese Verhältnisse werden anschließend aufsummiert und reziprok mit dem Faktor 4.343 multipliziert. Die Berechnung wird mindestens für die Terzbänder zwischen [0.1;5 kHz] durchgeführt. Im Anhang A auf Seite 121 wird diese Formel auf Basis der gleisseitigen Schalleistung hergeleitet.

Dieses Vorgehen muss entweder auf der zweiten Schiene oder auf der selben Schiene in einem Abstand von mindestens 10 m wiederholt werden.

In Abbildung 6.2 ist das Raster der 29 AP dargestellt. Die Abstände zwischen den AP nehmen mit zunehmender Entfernung von der Position des Antwortsensors exponentiell zu. Diese Verteilung ist in der Forderung nach einer exakten Erfassung der oft kurzwelligen Nahfeld-Amplituden begründet. Dies wird in den L_{FRF} -x-Diagrammen im Anhang E deutlich. Würde hier ein größerer Abstand gewählt, würden die lokalen Minima und Maxima nur ungenau erfasst. Da in der anschließenden Summierung (siehe Gleichung A.11) jede Position nach der Gleislänge, die sie repräsentiert, gewichtet wird, wird L_{FRF} jeder AP entsprechend der akustischen Emission berücksichtigt.

In den folgenden Kapiteln 6.1.1 bis 6.1.5 werden operative Details zur Messung der direkten TDR diskutiert.



Abb. 6.1: Impulsanregung des Gleises

⁷Diese Gleislänge erstreckt sich in dem Bereich zwischen den Streckenhalbierenden zu den benachbarten AP.

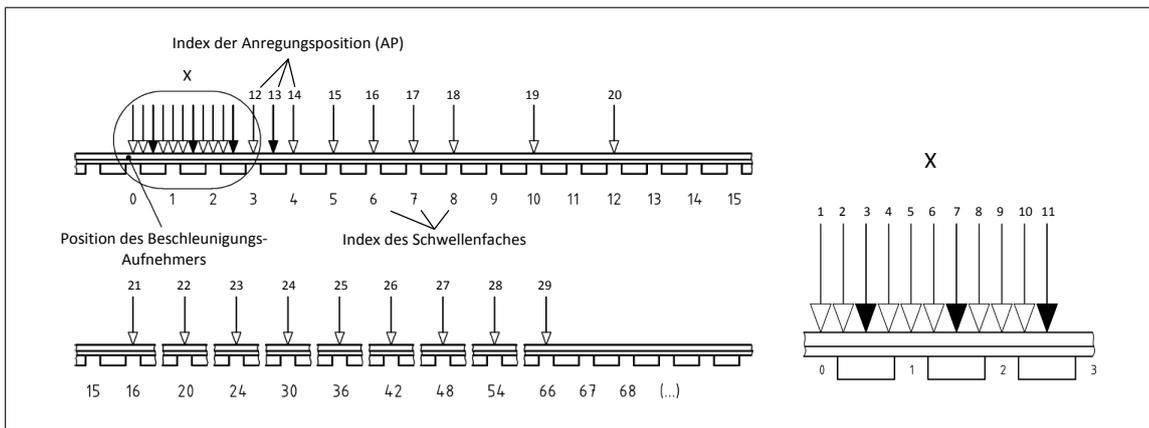


Abb. 6.2: Raster der 29 Anregungspositionen der TDR-Messung. Weißer Pfeil: Anregung im Schwellenfach; schwarzer Pfeil: Anregung auf der Schwelle [121]

6.1.1 Detail: Impulsanregung

Die Impulsanregung zeigt bei strukturdynamischen Analysen **Vorteile**, da sie relativ einfach und kostengünstig durchzuführen ist (z. B. ist keine konstruktive Ankopplung des Anregers notwendig). Da ein lineares Verhalten der Struktur angenommen wird, kann die FRF zu mehreren Antwort-Positionen auch durch wechselnde AP ermittelt werden. So muss der Antwortsensor nicht umgesetzt werden. **Nachteile** ergeben sich durch einen relativ hohen Scheitelfaktor der Anregung (Verhältnis $\frac{\text{Kraft-Spitzenwert}}{\text{Kraft-Effektivwert}}$). Ebenfalls können bei nichtlinearen Systemen für Bereiche außerhalb des angeregten Kraftbereiches keine Aussage gemacht werden. [8]

Der ‘Grad’ der Systemlinearität kann mittels der Kohärenz, der Reproduzierbarkeit, der Reziprozität (Tausch von Anregung und Antwort) oder dem Vergleich mit Ergebnissen von deutlich unterschiedlichen Anregungsamplituden geprüft werden [8]. Bei TDR-Messungen kann allein das erstgenannte Kriterium mit vertretbarem Aufwand ermittelt und geprüft werden. Wird die Kohärenz während der Messung laufend geprüft (siehe Abbildung 6.5), können ggf. einzelne Anregungen verworfen und wiederholt werden.

Praktisch relevante Einflüsse wie Rauschen im Eingangs- oder Ausgangs-Signal (z. B. bei geringen Schwingungs-Amplituden, Antiresonanzfrequenzen oder bei Lage der Schwingungs-Knotenpunkte am Ort der Antwortmessung), Änderung von Anregungsort / -richtung oder verschiedenen Arten von Nichtlinearität reduzieren die Kohärenz [133].

Für nutzbare breitbandige Anregungen müssen die Impulsdauern relativ kurz sein (siehe Kapitel 6.1.3 auf Seite 75).

Im Vorfeld der TDR-Einführung wurde die Impulsanregung an einem Gleis mit einem Sinus-Sweep, der mittels Shaker aufgebracht wurde, validiert. Es zeigt sich im Frequenzbereich [0.1;5 kHz] eine hohe Übereinstimmung [108].

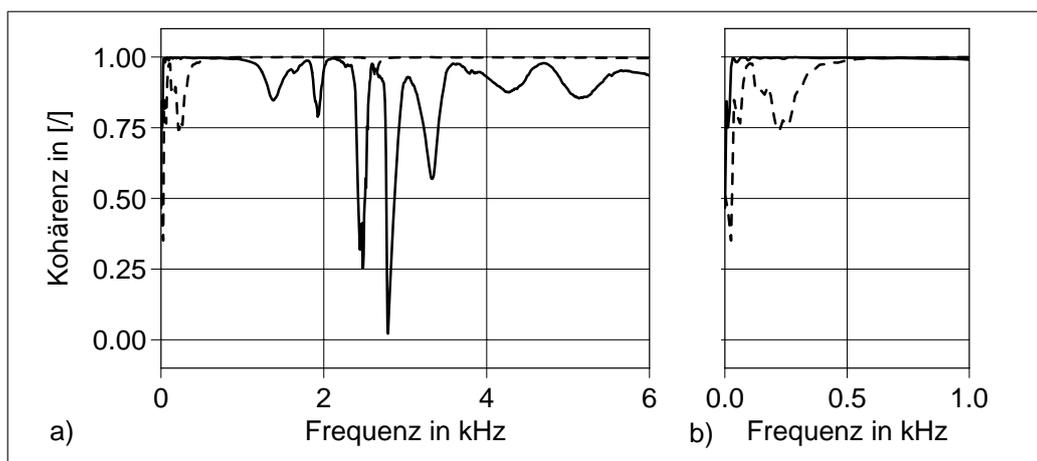


Abb. 6.3: Kohärenzspektrum bei Anregung mit (—) schwerem Hammer mit weicher Schlagkalotte und mit (- -) leichtem Hammer mit harter Schlagkalotte. a) gesamtes Spektrum, b) Detail

6.1.2 Detail: Impulsanregung - Variation der Hammereigenschaften

Die tieffrequenten Schwingungsformen, vor allem die Schwingform des Gleisrostes auf dem Schotter bei f_2 , sind relativ energiereich. Daher ist ein Impuls mit relativ großer Schlagenergie notwendig, um im Antwortsignal ausreichend viele Schwingungsamplituden zu generieren. Dies wird an der tieffrequenten Kohärenzfunktion deutlich, siehe Abbildung 6.3: Das Kohärenzspektrum des leichten Hammers zeigt deutliche Einbrüche im Bereich $f < 0.5$ kHz, während das Spektrum des schweren Hammers hier sehr hohe Werte von annähernd 1 zeigt. Somit ist ein zweiter Impulshammer (schwerer und mit weicherer Schlagkalotte) für eine Aussage im gesamten relevanten Frequenzspektrum notwendig.

6.1.3 Detail: Impulsanregung - Sensitivität der Anregungsrichtung

Das Verfahren mittels handgeführtem Impulshammer und direkt an der Schiene montiertem Antwortsensor birgt grundsätzlich die Unsicherheit der abweichenden Messrichtung, sowohl in globalen Gleis-Koordinaten als auch relativ zwischen Impulshammer und Antwortsensor. Beide Einflüsse werden nachfolgend diskutiert.

Globale Koordinaten Das in EN 15461 beschriebene Verfahren geht von entkoppelten Schwingungsformen in vertikaler und lateraler Richtung aus. Wird das Gleis nicht exakt in einer dieser Richtungen angeregt, teilt sich die eingebrachte Schlagenergie in mehrere Richtungen auf. So werden weitere Schwingungsformen (bei vertikaler Anregung z. B. laterale Biegung, Torsion oder Biegung des Schienensteges) angeregt [49]. In der eigentlich zu messenden Schwingform resultieren geringere Schwingamplituden, die zu höheren TDR-Werten führen. Als Empfehlung für die tolerierbare Abweichungen nennt die ISO 7626-5 maximal 10° orthogonal zur Oberfläche.

Signifikante Abweichungen resultieren oft durch die kreisbogenförmige Bewegung des Unterarmes. Bei Anregung der Schiene in vertikaler Richtung werden diese durch die unterstützende Schwerkraft reduziert⁸, besonders in lateraler Richtung muss diese Vorgabe jedoch kontrolliert werden.⁹

Relativ Hammer/Sensor Da in lateraler Richtung beide Messgrößen an den Schienenkopfflanken ermittelt werden, die nicht parallel zueinander stehen, ergibt sich eine Richtungsdivergenz zwischen dem Kraft- und Antwortvektor. Diese Winkel betragen z. B. bei dem Profil 49E2 7.1° und bei den Profilen 54E2 / 60E1 5.7° [120]. Um diesen Versatz auszugleichen empfiehlt es sich die Antwortsensor auf leicht angeschrägte Keile zu montieren. Der Hammerimpuls sollte, entgegen den allgemeinen Hinweisen zu Impulsprüfungen [133], nicht oberflächenorthogonal sondern in Messrichtung des Antwortsensors aufgebracht werden. Der resultierende Oberflächen-Winkel befindet sich damit deutlich unterhalb der in der ISO 7626-5 genannten Grenze von 10° .

Die Auswirkung von nicht richtungsgenauen Impulsen auf die L_{FRF} wurde an der MS **E2** (siehe Tabelle H.1) untersucht. Dazu sind mit dem leichten Hammer mit harter Schlagkalotte definiert schräge Schläge aufgebracht worden. In Abbildung 6.4 sind die Anregungsrichtungen dargestellt. Die Anregung wurde an AP₁ (Schwellenfach) und AP₃ (auf Schwelle, siehe Abbildung 6.2) aufgebracht. Die Antwort wurde stets an AP₁ gemessen.

Der aufgrund der Kohärenz-Höhe (siehe Seite 34) und des ‘15 dB-Kriteriums’ (siehe Seite 36) ermittelte nutzbare Frequenzbereich beträgt [0.5;6 kHz]. Die gemittelten L_{FRF} über je vier Schläge, siehe Abbildungen B.1 und B.2 im Anhang B, zeigen in weiten Frequenzbereichen um 1–3 dB geringere Beträge bei schräger Anregung. Bei Anregung auf der Schwelle scheint dieser Bereich breitbandiger ausgeprägt. Dies

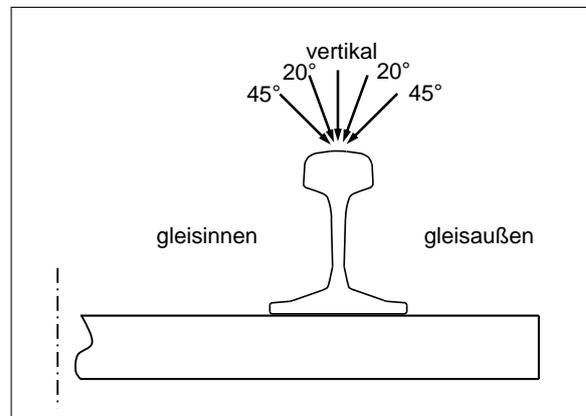


Abb. 6.4: Anordnung schräger Impulsschläge

bedeutet, dass bei Anregung im Schwellenfach die Schiene geringere Sensibilitäten gegenüber schrägen Schlägen zeigt als bei Anregung auf dem Schwellenkopf.

⁸Die Schienen-Einbauneigung von ca. 1.4° kann vernachlässigt werden.

⁹Meist wird der lateral messende Antwortsensor gleisaußen montiert, da er so bei Zugverkehr nicht demontiert werden muss. Somit muss die Schiene gleisinnen angeregt werden. Hier wird die Schienen-Einbauneigung durch die Neigung der Schienenkopfflanke (Profil 49E2: 3.6° ; Profil 54E2 / 60E1: 2.9° [120]) leicht überkompensiert. Es resultiert eine global annähernd vertikale Oberfläche.

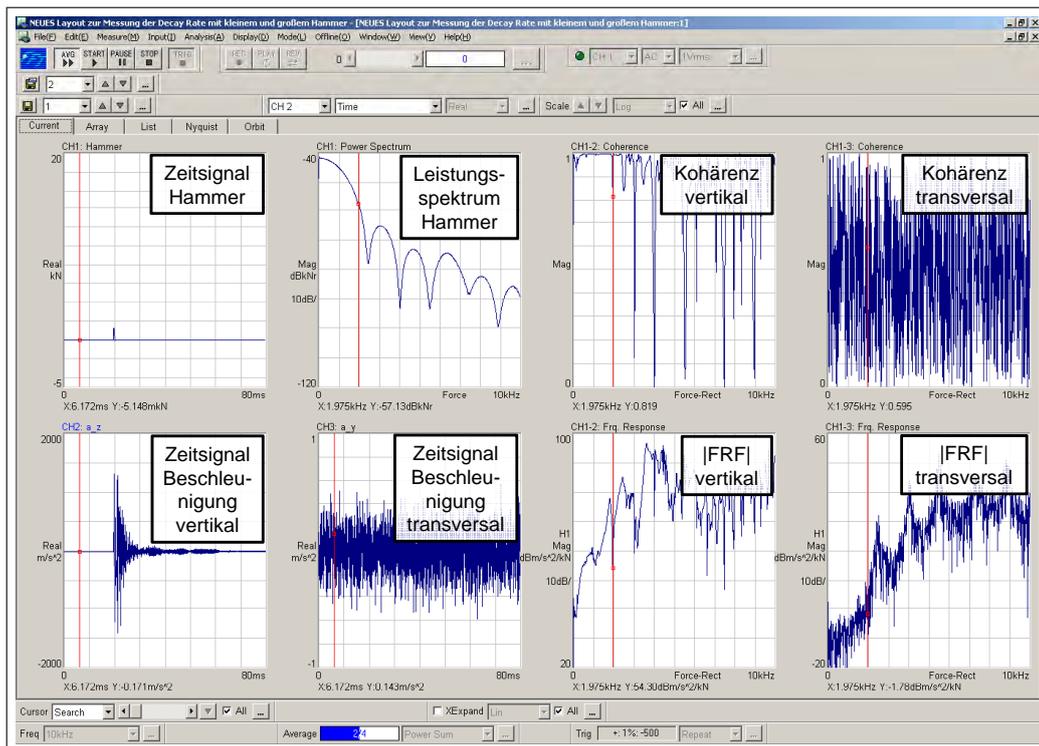


Abb. 6.5: Beispielhafte Messsoftware-Oberfläche (Messung einer Stahlstruktur), Anregungsrichtung ist ‘vertikal’

Zwischen den L_{FRF} von gleisinnen und gleisaußen treten keine signifikanten Differenzen auf.

Diese Untersuchungen zeigen, dass für belastbare TDR-Ergebnisse die vertikale bzw. laterale Richtung exakt eingehalten werden muss. Eine mechanische Vorrichtung, die eine höhere Richtungsgenauigkeit gewährleistet, ist hilfreich, muss jedoch entwickelt werden.

6.1.4 Detail: Messaufbau

Ein beispielhafter TDR-Messaufbau ist in Tabelle C.1 im Anhang C.1 dargestellt. Die Bedienungsfläche, die vor allem der Zeitsignal- und Kohärenz-Kontrolle während der Messung dient, zeigt Abbildung 6.5. Hier ist ebenfalls das Kraft-Leistungsspektrum des Impulshammers dargestellt.

Diese Kraft kann bis zu einer Frequenz, bei der die Kraftamplitude um ca. 15 dB gegenüber dem Maximalwert reduziert ist, genutzt werden (siehe Abbildung 6.6)¹⁰. Für ein breitbandiges Impulssignal ist eine relativ harte Schlagkalotte (SK) notwendig. So resultieren relativ kurze Impulsdauern mit einem breitbandigen Frequenzspektrum. Die sog. ‘Zeit-Frequenz-Beziehung’ führt auf das lokale Kraftminimum¹¹

¹⁰Hier existieren keine verbindlichen Angaben. In ISO 7626-5 wird beispielhaft eine Reduktion um 10 dB gezeigt (Figure 3, jedoch ohne explizite Nennung dieser Differenz), weitere Quellen nennen eine Reduktion um ‘10 bis 20 dB’ [8].

¹¹Es bilden sich noch weitere, höherfrequenzere lokale Kraftminima aus.

bei $F_{Minimum} = 1/T_{Schlag}$, bis zu der das Anregungssignal genutzt werden kann. Der Antwortsensor muss so befestigt werden, dass die hieraus resultierende Kontakt-Resonanz¹² oberhalb des geforderten Frequenzbereiches liegt. Die Ankopplung mittels Permanent-Haftmagnet hat sich aus den folgenden Gründen bewährt:

- Die Schiene muss nur gereinigt, jedoch nicht weiter bearbeitet werden.
- Die Anbindung ist ausreichend steif, um eine sichere Auswertung bis $f=5$ kHz zu gewährleisten (typischer Frequenzverlauf in DIN ISO 5348 [125] mit 3 dB Unsicherheit der Resonanz bei $f \approx 18$ kHz). Für TDR-Messungen wurde die Eignung einer typischen Anbindung nachgewiesen (siehe Anhang C.2).¹³
- Die Kontakt-Resonanz bei $f \approx 10$ kHz führt dazu, dass höherfrequente Anteile stark unterdrückt werden. Dies verhindert eine mögliche Übersteuerung des Messsystems.

Auch die Positionierung der Antwortsensoren zeigt einen Einfluss auf das Ergebnis. So werden Schwingformen, die an dieser Position Schwingungsbäuche zeigen, gegenüber weiteren Formen überbetont. Bei dem Raster der AP zur TDR-Messung nach EN 15461 (siehe Abbildung 6.2) tritt dies vor allem bei der ‘pinned-pinned’-Frequenz und Teilern dieser Wellenlänge auf [49]. Alternativ müssten mehrere Sensorpositionen gleichzeitig genutzt werden, jedoch zeigen plausible Emissionskennwerte (siehe Vergleiche mit Oberbau-Transferfunktionen in Kapitel 7.3) den geringen Einfluss auf das Gesamtergebnis.

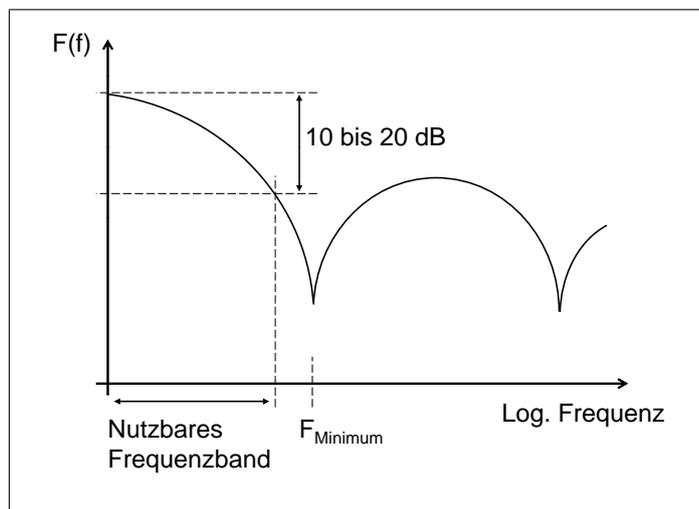


Abb. 6.6: Nutzbarer Frequenzbereich (Skizze)

6.1.5 Detail: Signalverarbeitung

Da die Amplitudenhöhen bei Impulsanregung zeitlich stark variieren wird das Ergebnis durch die Signalverarbeitung beeinflusst [8]. Dies verdeutlichen die nachstehend aufgeführten Zusammenhänge.

- **Fensterung des Eingangs- (Impuls-) Signals:** Da der Impuls nur einen

¹²Die Kontakt-Resonanz ergibt sich aus $f_{Kontakt} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s_{Anbindung}}{m_{Sensor}}}$.

¹³Alternativ kann die Anklebung mittels keramischem Kleber erfolgen. Durch die erhöhte Steifigkeit stehen noch größere Frequenzbänder zur Verfügung. Höhere Kontaktkräfte können durch eine Klemmvorrichtung aufgebracht werden, sie ist jedoch aufgrund des Einflusses auf die Strukturndynamik zu vermeiden [125]. Ebenso müsste diese bei Zugverkehr demontiert werden.

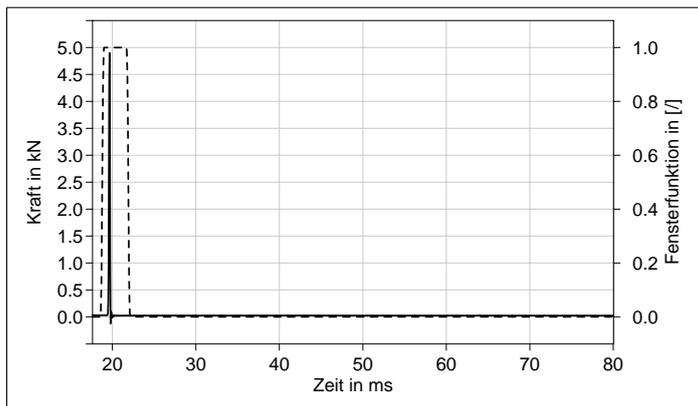


Abb. 6.7: Zeitverläufe eines (—) typischen Hammer-Impulssignals und eines (- -) entsprechenden Forcefensters

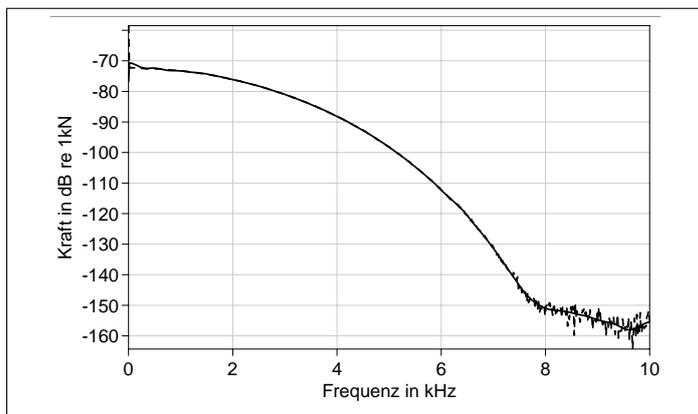


Abb. 6.8: Leistungsspektrum eines (—) typischen Hammer-Impulssignals mit Force- und (- -) Rechteck-Fensterung

kleinen Teil der Messzeit einnimmt¹⁴ wird die Fehleranfälligkeit des Impuls-Autospektrums stark von der Rauschstärke des übrigen Signals beeinflusst. Diese Signalbestandteile können durch ein ‘Forcefenster’ auf exakt ‘Null’ gesetzt werden, so dass ‘glattere’ Impulskraft-Leistungsspektren resultieren. Ein für die TDR-Messung beispielhaftes Fenster ist in Abbildung 6.7 dargestellt.

Ein Vergleich der Kraft-Leistungsspektren bei Rechteck- und Force-Fensterung (entsprechend Abbildung 6.7) ist in Abbildung 6.8 dargestellt. Hier zeigt sich die geringe Amplitude des Rauschsignals und des Gleichspannungs-Anteils.

Trotz der geringen Unterschiede zwischen beiden Leistungsspektren bietet sich bei TDR-Messungen das Forcefenster an, da die Ausprägung des Kraftimpulses (Start- und Endzeitpunkt, Impulsdauer) vor allem von der Schlagkalottensteifigkeit abhängt und daher bei den Impulsschlägen zu annähernd gleichen Zeitpunkten auftritt. So kann das Fenster dicht um den Impuls definiert werden.

- **Fensterung des Ausgangs- (Beschleunigungs-) Signals:** Bei Messungen, in denen die Amplitude des Ausgangssignals nicht innerhalb der Messzeitraums (= Fensterbreite) sicher abgeklungen ist, sollte ein ‘Exponential-Fenster’ genutzt werden. Es reduziert das Messsignal auf einen definierten Zielwert, siehe

¹⁴Bei den hier durchgeführten Messungen mit weicher Schlagkalotte: $\frac{0.11 \text{ ms}}{160 \text{ ms}} \approx 0.7 \text{ ‰}$; mit harter Schlagkalotte: $\frac{0.01 \text{ ms}}{80 \text{ ms}} \approx 0.1 \text{ ‰}$.

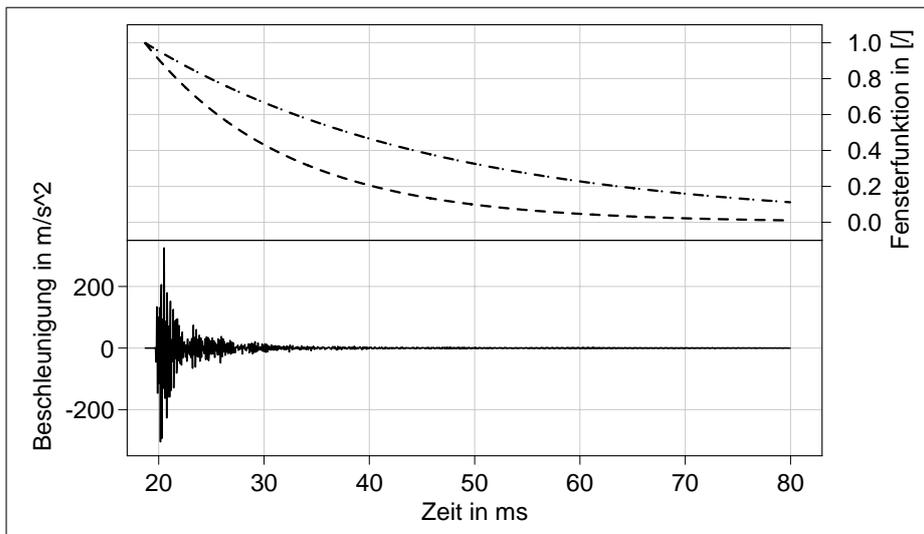


Abb. 6.9: Zeitverläufe eines (—) typischen Beschleunigungs-Antwortsignals und entsprechender Exponential-Fenster: Reduktion auf (---) 10% bzw. (- · -) 1% der Ausgangshöhe

Abbildung 6.9. Dies entspricht einer nachträglichen Dämpfung des Signals. Ist jedoch von vollständigem Abklingen auszugehen, sollte es nicht angewandt werden, da die Amplitudengenauigkeit durch die zusätzliche Dämpfung reduziert wird. Speziell bei TDR-Messungen empfiehlt es sich daher eine ausreichende Messzeit zu wählen und das Rechteckfenster zu nutzen.

Der Einfluss der Fensterung auf TDR-Messungen wurde anhand von drei verschiedenen Konstellationen untersucht. In Abbildung 6.10 sind die L_{FRF} und die Kohärenz aufgetragen. Hier zeigt sich deutlich die Wirkung der zusätzlichen ‘Dämpfung’ durch die Exponential-Fenster auf die L_{FRF} .

- Die **Länge des Messzeitraums** orientiert sich an dem Ausgangssignal. Die

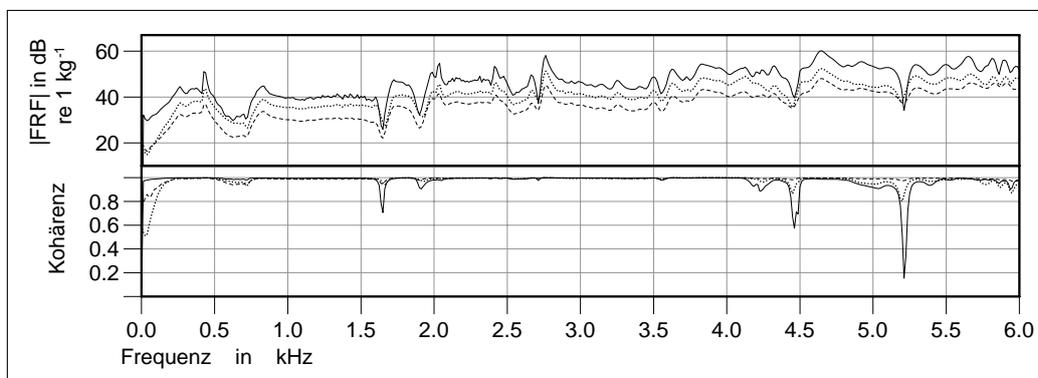


Abb. 6.10: Übertragungsfunktionen und Kohärenzen bei unterschiedlicher Fensterung, MS E2. (—) Rechteckfenster; (· · ·) Exponential-Fenster mit Reduktion auf 10% bzw. (- -) 1% der Ausgangshöhe

Messung sollte beendet werden, wenn das Signal auf ca. 1% der Ausgangshöhe abgeklungen ist [133]. Dies ist ein sinnvoller Kompromiss aus den zwei Anforderungen

- Erfassung des gesamten Nutzsignals, damit der ‘Leakage-Effekt’ ausreichend reduziert auftritt, und
- Minimierung des Zeitanteils des Rauschens und der ambienten Anregung, damit ein hoher Signal-Rausch-Abstand erreicht wird.

Bei der TDR-Messung würde dies bedeuten, dass der Messzeitraum (und damit die Fensterbreite) an jeder AP individuell angepasst wird, da durch den zunehmenden Abstand zur Anregung stets größere Reduktionen und frequenzabhängige¹⁵ Laufzeitunterschiede auftreten. Daher sollte ein sinnvoller Kompromiss aus beiden Randbedingungen gewählt werden.

Auch die tiefste interessierende Terzbandfrequenz ist aufgrund des Zusammenhanges $\Delta f_{FRF} = \frac{1}{T_{Mess}}$ für die Länge des Messzeitraumes relevant. In dem ersten tieffrequent nutzbaren Terzband sollten sich drei FRF-Datenpunkte befinden [121]. Auch hier empfiehlt es sich, zwei verschiedene Hämmer zu nutzen. So kann die Messzeitlänge des leichten Hammers reduziert werden, durch die längere Messzeit des schweren Hammers stehen zugleich L_{FRF} -Spektren mit ausreichend kleiner Frequenzauflösung für die Analyse tieffrequenter Bänder zur Verfügung.

Die Fensterlänge sollte aus einer Punkteanzahl bestehen, die einer 2er-Potenz entspricht (Forderung gängiger FFT-Algorithmen). Aufgrund der Anwendung allein eines Fensters können abweichende Fensterlängen nicht durch angepasste Überlappung neutralisiert werden. Durch eine alternative Nachabtastung würde die Frequenz- und Amplituden-Genauigkeit des Signals reduziert werden [8].

Eine bei TDR-Messungen sinnvolle Messzeitraumlänge wurde anhand des Verhältnisses der maximalen Amplitude des Gesamtsignals zu der gemittelten Amplitude im Endbereich des Messzeitraums untersucht. Dazu wurde ein Messsignal der AP₂₉ von MS I (diese MS mit insgesamt relativ geringen TDR-Werten) herangezogen, siehe Abbildung 6.11. Dies stellt einen ungünstigen Fall dar, da bei Oberbauformen mit höheren TDR-Werten und daher kürzeren Abklingzeiten in diesem Messzeitraum die gesamten Nutzsignale sicher enthalten sein werden.

Die maximale Amplitude wurde in Relation zur mittleren Amplitude der Zeiträume

- ‘Messzeit 80 ms’: [66;90 ms],

¹⁵Die Biegewellen-Ausbreitungsgeschwindigkeit von Stäben steigt mit der Wurzel der Frequenz. Somit treffen in einer festen Entfernung von der Anregungsstelle höhere Frequenzanteile vor tieferen Anteilen ein. Daher ist die spektrale Zusammensetzung an unterschiedlichen Stellen der Schiene verschieden [11].

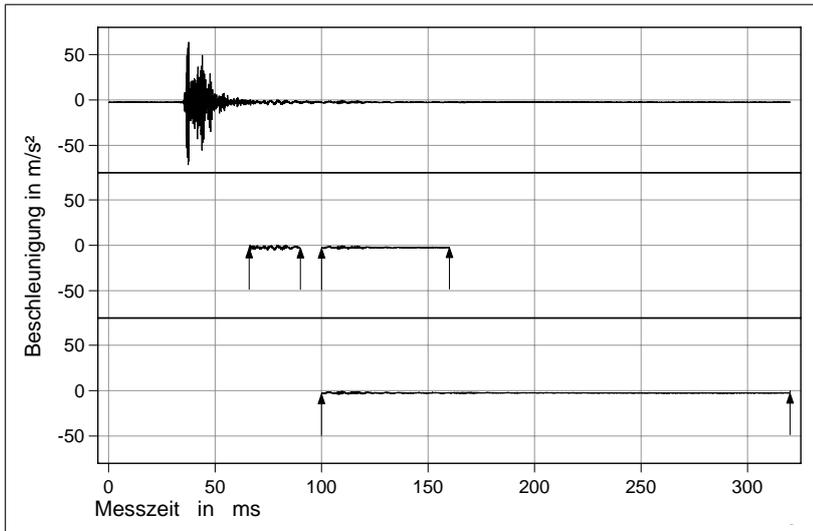


Abb. 6.11: Zeitabschnitte zur Messzeitraum-Analyse (\uparrow — \uparrow). Oben: Gesamtes Signal; Mitte links: ‘Messzeit 80 ms’, rechts: ‘Messzeit 160 ms’, unten: ‘Messzeit 320 ms’

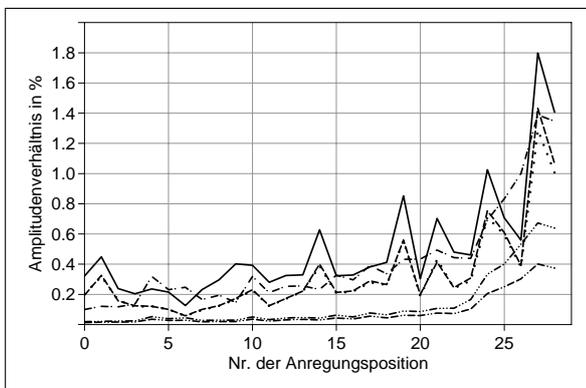


Abb. 6.12: Amplitudenverhältnisse der Messzeitraum-Analyse. Schwingungsrichtung vertikal: (—) 80 ms, (- - -) 160 ms, (· · ·) 320 ms; lateral: (- · - ·) 80 ms, (- · - ·) 160 ms, (- · - ·) 320 ms

- ‘Messzeit 160 ms’: [100;160 ms] und
- ‘Messzeit 320 ms’: [100;320 ms]

gestellt. Das Ergebnis (siehe Abbildung 6.12) zeigt zunehmende Amplituden-Verhältnisse bei abnehmenden Messzeiträumen, ebenso mit zunehmender Entfernung zur AP_1 (aufgrund abnehmender Maximalamplitude). Ein sinnvoller Kompromiss liegt somit bei einer Messzeit von 80 ms: Hier wird das empfohlene Amplitudenverhältnis von 1% in vertikaler und lateraler Richtung annähernd erreicht.

Ebenfalls wurde der Einfluss der ambienten (‘natürlichen’) Anregung im Messsignal untersucht. Sie beinhaltet vor allem Betriebslasten (z. B. Verkehr, benachbarte Erschütterungsquellen) und Umgebungseinflüssen (z. B. Windbewegungen, natürliche Bodenunruhe) [26]. In der Gleisdynamik können hier vor allem Einflüsse von Zugfahrten auf benachbarten Gleisen oder von Straßenverkehr auf anliegenden Bahnübergängen relevant sein.

Das Ergebnis zeigt, aufgrund der geringen anregenden Energie, nur sehr geringe Amplituden. Die ambiente Anregung wird daher für die weitere Arbeit als nicht relevant betrachtet.

6.1.6 Detail: Randbedingung der Feldmessung / Detaillierung der EN 15461

Die im Folgenden genannten Randbedingungen sind in Kapitel 6 der EN 15461 aufgeführt. Haben sich durch diese Arbeit Detaillierungen dieser Randbedingungen ergeben, sind sie in *kursiver Schrift* angegeben.

- Die Prüfung der **dynamischen Kontinuerlichkeit** mittels Vergleich der Punkteingangs-FRF an drei potentiellen AP zeigt stichprobenartig die Eignung des Gleises für die TDR-Messung. Diese Kontinuerlichkeit wird vor allem durch die spektrale Lage der einzelnen Gleisfrequenzen, siehe Seite 7, beschrieben¹⁶. Ebenso ist die Höhe des Betrages der L_{FRF} bei diesen Frequenzen wichtig. Daher ist die Prüfung im Schmalband- und nicht im Terzspektrum sinnvoll. *Hier sollte die Abweichung zwischen den drei Anregungspunkten der spektralen Lage der z. B. drei Gleisfrequenzen mit höchstem Betrag auf z. B. $\pm 5\%$ der Absolutfrequenz begrenzt werden. Ähnlich sollte auch die Höhe der L_{FRF} in diesen Frequenzen begrenzt werden. Hier bietet sich nach den vorliegenden Ergebnissen ein Akzeptanz-Bereich von ± 4 dB an. Falls die Gleisfrequenzen, speziell f_2 , in den L_{FRF} identifiziert werden können, sollten vorrangig diese verglichen werden.*

Beide Kriterien sollten in vertikaler und lateraler Richtung erfüllt werden müssen.

- Nach EN 15461 ergibt sich die **Anzahl der Fernfeld-AP** aus der Forderung, dass eine Reduktion der L_{FRF} um 10 dB gegenüber der Punkteingangs- L_{FRF} (bei AP₁) erreicht sein muss. Obwohl nicht angegeben, sollte dieses Kriterium in vertikaler und lateraler Richtung erfüllt sein.

Diese Prüfung kann auch während der laufenden Messung erfolgen, indem eine Terzbandfilterung der gemittelten L_{FRF} ab AP₁₇ durchgeführt und die Differenz zur Terzband- L_{FRF} der AP₁ ermittelt wird.

Pauschale Vorgaben der Anzahl von AP geben jedoch bei Feldmessungen eine stabile Basis für vergleichbare Ergebnisse, daher sollte eine sinnvolle Anzahl vorgegeben werden. In [38] wurde bereits beispielhaft die Notwendigkeit von 29 AP für den leichten und schweren Hammer nachgewiesen.

In den Ergebnissen dieser Arbeit wird das genannte 10 dB-Differenz-Kriterium innerhalb der 29 AP wie folgt erreicht:

- vertikal, bis $f=200 / 600$ Hz (messstellenspezif.): 29 von 36 Messstellen
- vertikal, bis $f=6$ kHz: 33 von 36 Messstellen
- lateral, bis $f=200 / 600$ Hz (messstellenspezif.): 34 von 36 Messstellen

¹⁶Bei allen in dieser Arbeit untersuchten Oberbauarten zeigen sich in den Punkteingangs-FRF in vertikaler und lateraler Richtung deutlich ausgeprägte Einzelfrequenzen.

– lateral, bis $f=6$ kHz: 7 von 36 Messstellen

Es zeigt sich, dass in vertikaler Richtung die 29 AP bei fast allen Messstellen zur notwendigen Reduktion führen. In lateraler Richtung gilt dies nur für den tieffrequenten Bereich; im Bereich [0.6;5 kHz] sind noch weitere AP notwendig.

Bei sehr geringen FRF-Beträgen sollte das Signal-Rausch-Verhältnis geprüft werden. Im Impulssignal kann, falls die auf Seite 38 empfohlene Signalverarbeitung angewandt wird, kein signifikantes Rauschen auftreten. Somit wird die kritische Situation $\frac{\text{Rauschen}}{\text{Rauschen}}$ vermieden.

Jedoch sollte bei hohen erwarteten TDR-Werten und großen räumlichen Entfernungen das Signal-Rausch-Verhältnis des Antwortsignals geprüft werden. Hier sind oft hohe Kraftamplituden notwendig.

Daher sollten die Vorgaben zu diesem Akzeptanzkriterium detailliert werden, indem in vertikaler Richtung die L_{FRF} an den bisherigen 29 AP, in lateraler Richtung jedoch an (z. B. drei) weiteren AP gemessen wird.

- Die **höchste nutzbare Frequenz** wird bei TDR-Messungen durch das Masse-Schlagkalottensteifigkeits-Verhältnis des Impulshammers bedingt. Die oft genutzte Befestigung des Sensors mittels Haftmagnet führt zu keiner signifikanten Ungenauigkeit (siehe Anhang C.2). Bei fast allen TDR-Messungen mit dem leichten Impulshammer und Stahl-Schlagkalotte (siehe Tabelle C.1) zeigt sich, dass im 5 kHz-Terzband noch ausreichend Kraft eingebracht wurde, um eine ausreichende Anregung zu gewähren (siehe Kapitel 9.1 und Abbildungen J.3 und J.4). *Somit wird das 5 kHz-Terzband bei diesem Hammertyp als sicher angesehen.*
- Bei **Anwendung mehrerer Impulshämmer** zeigen sich teilweise in den spektralen Übergangsbereichen der TDR-Ergebnisse auffällige Unstetigkeiten zwischen den Einzelergebnissen. Sie sind auf das nichtlineare Gleisverhalten zurückzuführen. Für eine vollständige Interpretation sollten daher *in den Ergebnisspektren die Einzelergebnisse beider Impulshämmer bis zu der jeweiligen spezifischen oberen gültigen Grenzfrequenz (siehe Seite 38) angegeben werden.*
- Aufgrund der mathematischen Definition existiert ein **minimaler TDR-Wert in allen Frequenzen** (siehe Gleichung A.12 im Anhang A). *Er sollte auch im TDR-Gesamtergebnis abgetragen werden.*
- Die Qualität und Plausibilität der TDR-Werte kann vor allem durch die **frequenzspezifischen L_{FRF} -x-Diagramme** (siehe Kapitel 8.2.1) geprüft werden. Aktuell ist ihre Erstellung und Veröffentlichung empfohlen, aber nicht zwingend. *Daher sollten sie verpflichtend erstellt und dem Gesamtergebnis angehängt werden.*

Darüber hinaus sollten die folgenden Randbedingungen und Gültigkeitsbeschränkungen in der EN 15461 aufgenommen werden:

- Die Anbindung der Schiene mittels des Stützpunktes an die Schwelle beeinflusst direkt die Höhe und den spektralen Charakter der TDR. Falls die Zw aus einem Elastomer besteht (üblich), ist die **Zw-Steifigkeit temperaturabhängig**. Aktuell muss sie mit dem Gesamtergebnis angegeben werden. Für vergleichbare TDR-Ergebnisse ist daher eine ähnliche Zw-Temperatur bei Luftschall-Vorbeifahrt- und TDR-Messung notwendig.

Die Sensitivität des Antwortsensors ist ebenfalls temperaturabhängig.

Im Rahmen dieser Arbeit konnten beide Einflüsse nicht im Detail untersucht werden. Es zeigen sich jedoch TDR-Differenzen schon bei Temperaturdifferenzen von ca. 10 K. *Daher sollte die TDR-Gültigkeit auf eine maximal zulässige Zw-Temperatur-Differenz von 10 K beschränkt werden.*

- Weitere Anregungen, die nicht durch den Impulshammer verursacht werden, können die Antwort-Signalen beeinflussen. Dies betrifft bei der TDR-Messung vor allem Erschütterungen durch **Zugfahrten auf den benachbarten Gleisen**. Weder die Einflüsse der Anregung (Variation durch Fahrzeugart, Fahrgeschwindigkeit, Radrauheit etc.) noch der Ausbreitung (Bodengüte, Oberbauformen etc.) können quantifiziert werden. *Daher sollten Zug- und Rangierfahrten auf den umliegenden Gleisen bis zu einem Abstand (Gleismitte-Gleismitte) von z. B. 20 m nicht zugelassen werden.*
- Die Höhe der TDR wird auch durch das **Resonanzverhalten einzelner Gleisbauteile** beeinflusst. Bei eingeschränkten Schwingungsbewegungen können sich diese Resonanzen nur reduziert ausbilden. *Für realistische Ergebnisse darf die Bewegung dieser Bauteile nicht durch das Gewicht des Messpersonals eingeschränkt werden. Daher darf das Personal während der Hammer-Anregung nicht auf diesen Bauteilen stehen.*

6.1.7 Detail: TDR-Einzahlwert

Bei Fahrzeug-Abnahmemessungen nach TSI Noise muss die TDR bekannt sein. Hier ist die Einhaltung der Grenzkurve nach TSI statt des spektralen Charakters relevant. Daher liegt es nahe, einen Einzahlwert zu definieren, der diese Erfüllung kennzeichnet. Ebenfalls soll er die Wirkung von gleisseitigen Minderungsmaßnahmen, vor allem von Schienendämpfern, einfacher vergleichbar machen.

Erste Vorschläge sehen ein Verfahren ähnlich demjenigen zur Ermittlung des Schalldämmungs-Einzahlwertes R_w vor. Dies macht Sinn, da sich die grundsätzlichen Verläufe der TDR-Spektren ähneln und ebenfalls eine Verbesserung gegenüber einer Mindestanforderung (TSI-Grenzkurve) quantifiziert werden soll.

Der Bereich $f \leq 160$ Hz sollte nicht beachtet werden, da diese Anteile meist für das Gesamtgeräusch irrelevant sind. Basierend auf Erfahrungswerten sollten die Einzahlwerte beider Richtungen gewichtet und zu einem Gesamtwert vereint werden.

Für detaillierte gleisdynamische Analysen sind jedoch weiterhin TDR-Spektren notwendig.

6.1.8 Detail: Weitere Anwendung der direkten TDR-Messung

Neben der TDR, die durch die Schallabstrahlung des Gleises motiviert ist, kann für einige Fragestellungen auch das Gleisverhalten im tieffrequenten Bereich bis $f \approx 100$ Hz relevant sein. Hier handelt es sich vor allem um die Fahrzeug-Gleis-Dynamik (Grundlagen z. B. in [54], praktische Anwendung in [60]) und Erschütterungsprobleme [94] (siehe auch Kapitel 5). Zur Analyse bietet sich ein dem der TDR-Messung ähnliches Verfahren an.

Aufgrund der tendenziell reduzierten Kohärenzen im tieffrequenten Bereich ist ein Impulshammer mit relativ hohem Gewicht und / oder relativ weicher Schlagkalotte notwendig.

Die Unterschiede wurden an MS **J** und **P1** - **R** anhand von drei verschiedenen Hämmern analysiert. Neben den zwei in Kapitel 6.1.5 genannten wurde ein zusätzlicher Hammer mit auf 5.5 kg vergrößerter Masse und einer Schlagkalotte, deren Steifigkeit etwa der des 1.1 kg-Hammers entspricht (siehe Tabelle C.1), genutzt. Die Abbildungen C.5 und C.6 im Anhang C.3 zeigen vergleichend mehrere repräsentative Kraft-Leistungsspektren der MS **P1**. Das Signal des schweren Hammers zeigt durch die ‘Grenzfrequenz’ (siehe Seite 36) eine mögliche Analysebandbreite bis $f=540$ Hz (vertikal) bzw. 350 Hz (lateral). In diesem Frequenzband ist dabei die Kraftamplitude um bis zu ca. 20 dB (vertikal) bzw. 15 dB (lateral) höher als die des sonst genutzten 1.1 kg-Hammers¹⁷. Die Punkteingangs-FRF aller drei Hämmer zeigen ähnliche Verläufe, siehe Abbildung C.7 und C.8.

Über einen exemplarisch gewählten Abstand von 3.9 m zeigen die L_{FRF} des 1.1 kg- und 5.5 kg-Hammer in dem Bereich bis $f=400$ Hz sehr ähnliche Beträge (Abbildungen C.9 und C.10). Die geringen Unterschiede, vor allem in den sichtbaren Resonanzen / Anti-Resonanzen, können aus den nichtlinearen Systemeigenschaften resultieren. Den größten Einfluss haben hier die Elastomer-Zw, jedoch ist in diesem tieffrequenten Band auch die Schwellen-Dynamik (erste Biegeeigenfrequenz bei Holzschwelle typischerweise zwischen 80 und 500 Hz [60]) relevant. Diese Nichtlinearitäten zeigen die Notwendigkeit der höheren Impulskraft, die somit eher der betrieblichen Belastung entspricht.

Die Gleisdynamik in dem bei dieser Fragestellung relevanten tieffrequenten Bereich konnte so ausreichend beschrieben werden.

¹⁷Durch die fast identischen Kalotten-Steifigkeiten der 1.1 kg- und 5.5 kg-Hämmer resultieren sehr ähnliche Impulsdauern. Diese zeigen sich in der annähernd gleichen spektralen Lage des lokalen Minimums bei ca. 1 kHz.

6.1.9 Detail: Analyse der TDR-Ergebnisse in dieser Arbeit

Die nach EN 15461 ermittelten und in dieser Arbeit verwendeten Ergebnisse der TDR-Messungen sind nicht vollständig nach den in diesem Kapitel empfohlenen Methoden der Signalverarbeitung generiert worden. Für die weitere Analyse ergibt sich daher eine unbefriedigende Datenlage. Aufgrund des Umfangs der Messdatenaufzeichnung ist eine Nachbearbeitung entsprechend der genannten Empfehlungen nicht möglich. Es steht jedoch bei allen Messstellen von den vier Hammerimpulsen je Richtung und AP der jeweils vierte Schlag als Kraft- und Beschleunigungs-Zeitsignal zur Verfügung. Hier ist eine Nachbearbeitung möglich.

Dieses Vorgehen reduziert jedoch die statistische Sicherheit der Aussagen, da jeder der vier Hammerimpulse nicht exakt den drei weiteren entsprechen wird. Um diese Unsicherheit zu quantifizieren, werden Messdaten analysiert, die mit einem weiteren Messsystem ermittelt worden sind. Hier stehen alle vier Hammerimpulse als Zeitsignal zur Verfügung. Die Messung fand an der MS **E1** (siehe Tabelle H.1) statt. Der Hammer war ebenfalls vom Typ 086D05 mit Stahlspitze (siehe Tabelle C.1).

Als Kriterium der Abweichung der vier Schläge bietet sich die Streuung der Grenzfrequenz (siehe Seite 36) an. Dazu wurde an jeder AP über alle vier Impulse der Mittelwert und die mittlere Abweichung ermittelt. Es ergibt sich über alle AP eine mittlere Abweichung von 193 Hz (vertikal) bzw. 188 Hz (lateral). In Relation zu den absoluten Frequenzwerten entspricht dies 3.5 bzw. 3.9 %. Die Verteilung an jeder einzelnen AP ist in den Abbildungen C.11 und C.12 im Anhang C.4 dargestellt.

Diese betragsmäßig geringen Abweichungen der Grenzfrequenz zeigen, dass bei jedem Hammerschlag eine annähernd gleiche Kraftamplitude bei ähnlicher spektraler Verteilung in das Gleis eingebracht wird. Bei konstanten Gleiseigenschaften resultiert eine ebenfalls ähnliche L_{FRF} . Signifikante Einflüsse der Nichtlinearität können aufgrund der ähnlichen Kraftamplituden nicht erwartet werden. Das in diesem Frequenzbereich relevante nichtlineare Bauteil, die Zw, zeigt erst ab einer Änderung der Kraftamplitude von ca. 10 kN deutliche Steifigkeitsänderungen [57].

Somit können, falls nur eine der vier Impuls-Anregungen betrachtet wird, nur geringen Abweichungen gegenüber einer Auswertung aller vier Impulse erwartet werden.

6.1.10 Zusammenfassende Empfehlungen

In Tabelle 6.1 sind die Empfehlungen zur direkten Messung der TDR zusammengefasst.

6.2 TDR - indirektes Messverfahren

Neben der im Kapitel 6.1 beschriebenen direkten Methode zur Ermittlung der TDR wird aktuell eine sog. ‘indirekte Methode’ entwickelt, welche die Gleisanregung aus Überfahrt eines Zuges nutzt. Die Ergebnisse zeigen Ähnlichkeiten mit denen der

Tab. 6.1: Empfehlungen zur direkten TDR-Messung

Parameter	Empfehlung	Details
Fenstertyp - Eingangssignal (Kraft)	Force, dabei Kontrolle der zeitlichen Fensterlage relativ zu dem Impulssignal	Seite 38
Fenstertyp - Antwortsignal (z. B. Beschleunigung)	Rechteck	Seite 39
Offset-Bereinigung in Ein- und Ausgangssignal	Aktiv	Seite 38
Fenster- (Messzeit-)länge	Bis Nutzsignal auf 1% der max. Amplitude abgeklungen ist, Empfehlung 0.08 s (Hammergewicht 0.3 kg); 0.16 s (Hammergewicht 1.1 kg)	Seite 40
Abtastfrequenz	Mindestens 12 kHz. Sinnvoll ist jedoch eine Abtastfrequenz, die sich aus $\frac{\text{Datenpunkte}}{\text{Messzeit}}$ ergibt, wobei <i>Datenpunkte</i> ein Vielfaches von Zwei ist	Seite 40
Anregungsrichtung	Im Koordinatensystem der eingebauten (\rightarrow Einbauneigung) Schiene mit $\pm 10^\circ$ Richtungs-Genauigkeit	Seite 36
Hammereigenschaft	Zwei Schlagkalotten unterschiedlicher Steifigkeiten, sinnvoll: Zusatzgewicht bei weicher Schlagkalotte	Seite 34
Nutzbandbreite der Messungen mit zwei Schlagkalotten	Signal der Messung mit weicher Kalotte bis zu der Frequenz nutzen, bei der das Kraft-Leistungsspektrum 15 dB Reduktion gegenüber dem Maximum zeigt (obere Terzband-Grenz-frequenz beachten), anschließend das Signal der Anregung mit harter Kalotte nutzen	Seite 36
Anbindung des Beschleunigungsaufnehmers	Befestigung mittels Starkmagnet	Seite 37
Kontrolle während der Messung	Kohärenz: Sollwert ist Eins, monofrequente spektrale Reduktionen sind tolerierbar	Seite 33
	Kraft-Leistungsspektrum: Muss eine 'glatte' und 'dünne' Linie darstellen	Seite 38

direkten TDR, jedoch handelt es sich um ein grundlegend unterschiedliches Verfahren. Die Entwicklung ist aktuell noch nicht abgeschlossen. Dieses Kapitel soll einen Überblick über das Verfahren und die offenen Punkte geben.

Zur weiteren Analyse werden in dieser Arbeit die Ergebnisse der direkten TDR-Messung genutzt. Die Vorstellung der indirekten Methode soll eine Alternative aufzeigen, die auch bei Gleisen mit laufendem Betrieb eingesetzt werden kann.

6.2.1 Grundlagen

Eine ausführliche Einleitung in die indirekte TDR-Messung ist in [47] gegeben. Mittels eines an der Schiene befestigten Beschleunigungsaufnehmers¹⁸ (analog der direkten TDR-Messung) werden die Schienenschwingungen erfasst. Sie werden terzbandgefiltert, quadriert und integriert. Anschließend werden die Zeiträume $T_{1,n}$ (für jede der n Achsen) und T_2 gebildet. Diese ergeben sich aus den Längen L_1 ‘direkt vor und nach einer Radüberfahrt’ und L_2 ‘Zug- bzw. Fahrzeuglänge’ und Division durch die Fahrgeschwindigkeit. Die Differenz der quadrierten und integrierten Beschleunigungen zu Beginn und Ende jedes Zeitraumes ergeben die Größen $A_{n,L_1}^2(f)$ und $A_{L_2}^2(f)$. Anschließend werden die n $A_{n,L_1}^2(f)$ aufsummiert. Aus dem Verhältnis

$$R(f) = \frac{\sum A_{n,L_1}^2(f)}{A_{L_2}^2(f)} \quad (6.1)$$

ergibt sich die TDR zu

$$TDR(f) = -\frac{8.686}{L_1} \ln(1 - R(f)) \quad (6.2)$$

Um den Einfluss der Nachbarachsen zu reduzieren, kann anschließend eine iterative Regression durchgeführt werden. Hierzu wird der Schwingungs-Anteil der Nachbarachsen $A_{n-1,L_1}^2(f)$ und $A_{n+1,L_1}^2(f)$ bestimmt und, reduziert durch die resultierenden TDR über dem Achsabstand, von den Größen $A_{n,L_1}^2(f)$ subtrahiert. Dieses Verfahren konvergiert nach typischerweise 3–4 Iterationsschritten gegen einen Grenzwert [49].

Bisherige Ergebnisse zeigen, dass teilweise die direkte TDR-Messung, unabhängig vom Zugtyp, relativ gut nachgebildet werden kann. Abweichungen zeigen sich jedoch zwischen 400 und 800 Hz [38]. Weitere Anwendungen zeigen jedoch auch breitbandig signifikante Unterschiede auf [90].

Der deutliche **Vorteil** dieses Verfahrens liegt in dem stark vereinfachten Messaufbau (allein Beschleunigungsaufnehmer und Achsdetektion, z. B. mittels Lichtschranke) und der vollen Gleisverfügbarkeit für den Betrieb. Ebenfalls wird das Gleis im belasteten Zustand¹⁹ vermessen, der für die Schallabstrahlung im Betrieb relevant

¹⁸Zur Nutzung eines Schnellesensors sind bisher keine Ergebnisse veröffentlicht.

¹⁹Die Belastung bezieht sich jedoch nur auf einen Bereich, der sich typischerweise ± 3 m um den Radaufstandspunkt erstreckt (abhängig von Gleissteifigkeit und Achslast). Die weiter entfernten Gleisabschnitte sind nicht belastet.

ist. Durch diese Vorlast ist eine Erhöhung der TDR zu erwarten [98]. Der absolute Einfluss wird jedoch als gering und allein im Frequenzbereich $[f_{c2}; f_{pp}]$, daher typischerweise $[0.3; 1 \text{ kHz}]$, eingestuft. Hier sind noch weitere Untersuchungen notwendig, da hier allein ein einzelner Radsatz betrachtet wurde.

Jedoch bestehen auch **Nachteile** gegenüber der direkten TDR-Messung:

- Es ist noch nicht abschließend gesichert, ob eine Verifikation mit den Ergebnissen einer direkten Messung zulässig ist. Dazu müssen noch die mechanisch-dynamischen Zusammenhänge, z. B. der Steifigkeits-Änderung der Zw oder des Schotters bei Vorlast, näher untersucht werden.
- Durch die nicht bekannte Lage des Radaufstandspunktes und der Richtung der eingeleiteten Kräfte werden mit hoher Wahrscheinlichkeit Schwingungsformen, die keine reine Ausprägung in vertikaler bzw. lateraler Richtung zeigen, ebenfalls angeregt. So ergeben sich höhere TDR-Werte, die zu abweichenden Resultaten führen [49]. Durch die Relation $\frac{\sum A_{n,L1}^2(f)}{A_{L2}^2(f)}$ scheint dies irrelevant, es kann jedoch nicht von gleichartigen Kontaktkraftvektoren im gesamten Zugverband ausgegangen werden.
- Abhängig von der Radrauheit, Fahrgeschwindigkeit und der Achslast sind unterschiedliche Zeiträume $T_{1,n}$ sinnvoll, um Ergebnisse ähnlich der direkten TDR zu ermitteln [75] [30].
- Ist die reale TDR relativ gering, zeigt sich ein deutlicher Einfluss der Nachbarrachsen. Dadurch ist es nicht möglich, mittels diesem Verfahren TDR-Werte kleiner ca. 5 dB/m sicher zu ermitteln [75].
- Im Frequenzbereich bis $f \approx 300 \text{ Hz}$ zeigen sich relativ große Ungenauigkeiten, deren Ursache noch nicht bekannt ist. Daher sind Aussagen nur in den höherfrequenten Bereichen belastbar [75].
- Die indirekte TDR-Messung kann nur bei Zugbetrieb durchgeführt werden.

6.2.2 Empfehlungen und Weiterentwicklung

Aufgrund der genannten, überwiegend systematischen Nachteile, resultieren Empfehlungen zur Anwendung. Hieraus lässt sich auch der Bedarf zur Weiterentwicklung der indirekten Messmethode ableiten. Diese werden im folgenden genannt.

- Um den Einfluss der benachbarten Achsen zu reduzieren, sind Fahrzeuge mit möglichst großen Achsständen zu empfehlen. Dies reduziert gerade bei geringen TDR-Werten die Abweichung.
- Bei relativ kurzen Auswertezeiten (aufgrund hoher Fahrgeschwindigkeit) und speziell bei tiefen Frequenzen werden nur wenige Schwingungsperioden erfasst.

Werden auf diese zeitlich kurzen Messsignale anschließend Terzbandfilter angewandt, können sich durch die Einschwingvorgänge die Schwingungsamplituden, aus denen die Größen $A_{n,L1}^2(f)$ gebildet werden, reduzieren. Daher müssen zuerst die Messsignale der gesamten Vorbeifahrt terzbandgefiltert werden.

- Die Terzbandergebnisse sollten anhand der Schmalbandergebnisse auf Plausibilität geprüft werden. Es ist möglich, dass durch die dynamischen Gleiseigenschaften fahrgeschwindigkeitsabhängig und monofrequent Ergebnisdifferenzen resultieren, die in Terzbändern nicht mehr genau abgebildet werden. Die Ursache kann allein im Schmalbandspektrum ermittelt werden.

Die Weiterentwicklung der indirekten Messmethode sollte, neben den systematischen Fragen, auch die praktische Relevanz beider Ergebnisse für das Vorbeifahrgeräusch analysieren. Dazu sollte das Verfahren mittels eines Referenzfahrzeuges und der Oberbautransferfunktion genutzt werden, siehe Kapitel 7.2.1.

Ebenso ist in vielen Untersuchungen die vertikale, jedoch nicht die laterale indirekte TDR betrachtet worden. Hier besteht besonderer Forschungsbedarf, da durch die geringere laterale Gleissteifigkeit und das nichtlineare Verhalten größere Ergebnisdifferenzen als in vertikaler Richtung zu erwarten sind.

6.3 Schienenrauheit

Aktuell wird das ‘direkte’ (mittels Wegsensor) oder das ‘indirekte’ (mittels Zugüberfahrt) Verfahren zur Messung der Schienenrauheit genutzt.

Eine ausführliche Beschreibung des direkten Verfahrens findet sich in der EN 15610. Das indirekte Verfahren wird u. a. in [47] und [88] beschrieben.

Ergänzend zu den Vorgaben der EN 15610 wird das Ergebnis oft auch als Einzahlwert $L_{\lambda,CA}$ [1] dargestellt. Er entspricht einer Gewichtung der Rauheit ähnlich der A-Bewertung des Luftschalls. Durch die Umrechnung in den Frequenzbereich ist er abhängig von der Fahrgeschwindigkeit.

6.4 Simulation des Gesamtnutzen

Die Wirkung von akustischen Minderungsmaßnahmen auf die Gesamtemission kann mittels Simulationen abgeschätzt werden. Verschiedene Ansätze mit validierten Ergebnissen sind inzwischen kommerziell verfügbar. Hier sollen zwei beispielhafte Programme kurz vorgestellt werden.

Das Programm **TWINS** [95] [96] basiert auf der energetischen Methode und ermittelt, ausgehend von der dynamischen Anregung aus dem Rad-Schiene-Kontakt, das Verhalten von Gleis und Rad. Dazu müssen die strukturdynamischen Eigenschaften der Gleisbauteile und der Räder bekannt sein. Die resultierende Oberflächenschnelle wird mittels halb-analytischen Ausbreitungsmodellen als Emissionsquelle für die Ausbreitung angesetzt. Es wird ein Gleismodell, bestehend aus unendlich langer

Schiene, elastischem Stützpunkt, elastischen Schwellen und einer dem Schotterbett entsprechenden Steifigkeit auf hartem Untergrund verwendet.

Das Programm **sonRAIL** [88] basiert auf den theoretischen Ansätzen von TWINS. Es führt jedoch keine Emissionsprognosen der strukturdynamischen Bauteileigenschaften durch, sondern basiert auf einer umfangreichen Datenbank, in der Messergebnisse von ca. 30.000 Zugvorbeifahrten mit variierenden Oberbau-Fahrzeug-Konstellationen hinterlegt sind. Durch detaillierte Messungen konnten die relevanten Randbedingungen wie Rad- und Schienenrauheit, TDR, Luftschall-Ausbreitungsdämpfung oder Schalleistung von weiteren fahrzeugseitigen Emissionsquellen quantifiziert werden. Somit sind Variationen ausgewählter Parameter möglich. Diese Datenbasis ist in ein Emissions- und Immissionsmodell integriert, durch deren Kombination die resultierenden Schalldruckpegel an relevanten Immissionspunkten prognostiziert werden können. Als Erweiterung gegenüber dem Programm TWINS ist eine detailliert Immissionsprognose auch in großflächigen Gebieten möglich. Dazu werden geodatenbasiertes Modelle genutzt.

In dieser Arbeit ist der Gesamtnutzen nicht simulativ quantifiziert worden. Einerseits stand das Programm TWINS nicht zur Verfügung, andererseits wird der Einfluss der TDR auf die Gesamtemission im Programm sonRAIL indirekt durch die Oberbau-Transferfunktion (siehe Kapitel 7.2) abgebildet.²⁰ Diese ist neben der TDR auch von weiteren messstellenspezifischen Parametern, vor allem dem Abstrahlgrad, abhängig. Daher führen durch TDR-Änderungen angepasste Oberbau-Transferfunktionen nicht zu belastbaren Änderungen der Gesamt-Emissionspegel.

Die Analysen in dieser Arbeit führen daher allein zu qualitativen Aussagen.

²⁰Für die Anwendung der sonRAIL-Modelle bei großflächigen Immissionsprognosen kann die Kenntnis der TDR der gesamten betrachteten Strecke nicht vorausgesetzt werden. Daher können die TDR von verbreitete Oberbauformen angesetzt werden.

7 Alternative TDR-Analyse

Zur Quantifizierung der akustischen Gleisqualität wird aktuell fast ausschließlich die Messung und Analyse der Track Decay Rate (TDR) eingesetzt, wie sie in EN 15461 beschrieben ist (siehe Kapitel 6). Teilweise zeigen sich jedoch Ergebnisse, die bei einer Prüfung mittels der Übertragungsfunktions-Weg-Diagramme (‘ L_{FRF} - x -Diagramme’ entsprechend der Empfehlung in EN 15461, siehe Kapitel 8.2.1) nicht nachvollziehbar sind. Diese zeigen unterschiedliche Neigungen der aus der TDR-Analyse resultierenden Gerade und dem räumlichen Verlauf der L_{FRF} -Werte von jeder Anregungsposition (AP). Innerhalb einer Messstelle (MS) tritt dies zum Teil auch bei verschiedenen Terzfrequenzen auf, so daß ein systematischer Einfluss naheliegt.

Daher werden in diesem Kapitel alternativen Analyseverfahren, die auf der ‘Linearen Regression’ basieren, eingeführt und angewandt. Anschließend wird geprüft, ob ihre Ergebnisse zu einer höheren Repräsentationsfähigkeit der TDR-Ergebnisse führen. Das Vorgehen ist in Abbildung 7.1 aufgezeigt. Ausgangspunkt bilden die alternati-

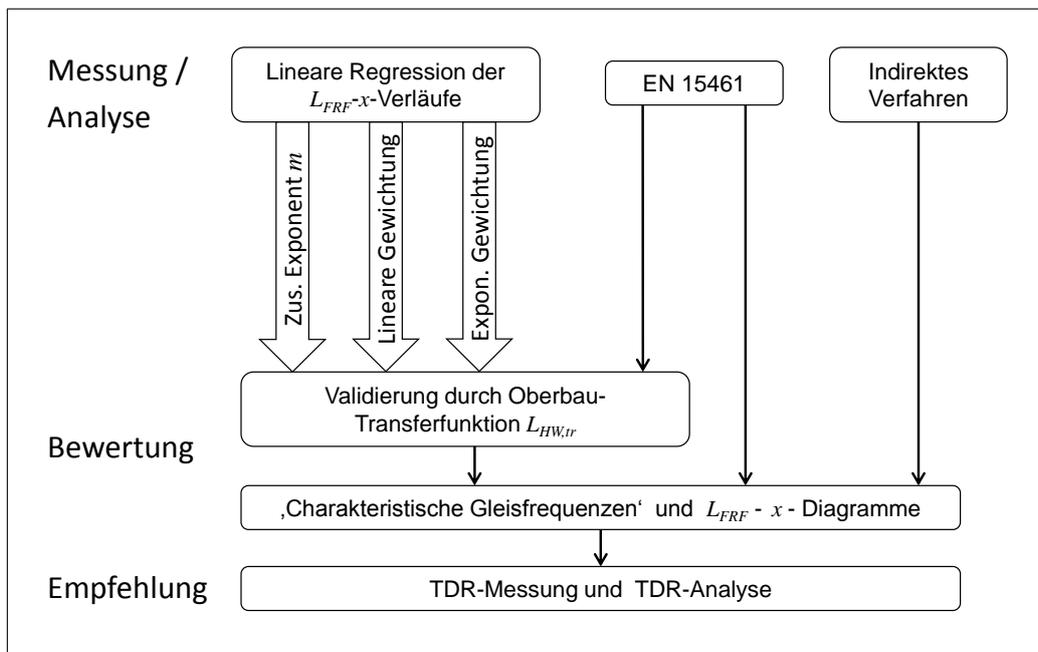


Abb. 7.1: Schema: Vorgehen der alternativen TDR-Analyse

ven TDR-Mess- und Analyseverfahren auf statistischer Basis, nach den Vorgaben der EN 15461 (siehe Kapitel 6.1) und mittels des ‘Indirekten Verfahrens’ (siehe Kapitel 6.2). Die statistischen Verfahren werden im Kapitel 7.1 näher vorgestellt. Ihre Ergebnisse und die des Verfahrens nach EN 15461 werden anschließend an Messstellen des Projektes sonRAIL durch ein Luftschallemissions-Kriterium, der Oberbau-Transferfunktion $L_{HW,tr}$, bewertet. Details sind dazu im Kapitel 7.2 beschrieben. Die Ergebnisse aller statistischen Analysen werden im Kapitel 7.3 vorgestellt und diskutiert.

Mit dem aus dieser Bewertung resultierenden sinnvollsten Vorgehen wird eine weitere Bewertung durchgeführt, indem diese TDR-Ergebnisse mit den messstellen-

spezifischen ‘charakteristischen Gleisfrequenzen’ und L_{FRF} -x-Diagrammen korreliert werden. Falls möglich, werden dazu auch Ergebnisse des indirekten Verfahrens herangezogen. Das Vorgehen und die Ergebnisse dieser Bewertung werden in Kapitel 8 vorgestellt. Mit der hier empfohlenen Art der TDR-Analyse werden schließlich im Kapitel 9 aus TDR-Ergebnissen verschiedener Oberbauformen Empfehlungen zu akustisch optimierten Gleiskonstruktion gegeben.

7.1 Einführung des statistischen Analyse-Verfahrens

Aufgrund des Ansatzes einer exponentiellen räumlichen Schwingungs-Reduktion (siehe Anhang A) ergibt sich im L_{FRF} -x-Diagramm ein linearer Zusammenhang zwischen den Werten L_{FRF} und dem Abstand x . Eine alternative Analyse muss daher eine lineare L_{FRF} -Weg-Funktion (‘Ausgleichsgerade’) definieren, deren Neigung der Höhe der TDR entspricht.

Dies erfolgt durch eine Regressionsanalyse. Hier bietet sich die ‘Methode der kleinsten Quadrate’ (auch ‘KQ-Methode’ oder ‘Fehlerquadratmethode’) [17] [34] [69] an. Der Ansatz sieht vor, die Summe der Abweichungen (Residuen) zwischen den Messpunkten und den äquivalenten Punkten auf der ‘Ausgleichsgerade’ zu minimieren. Durch die allgemeine Geradengleichung

$$L_{FRF}(x) = \alpha + \chi x, \quad (7.1)$$

ergeben sich für jedes terzbandspezifische L_{FRF} -Weg-Diagramm die spezifischen Regressionskoeffizienten α_i und χ_i .

Der theoretische Ansatz der TDR bedingt eine ungleiche Gewichtung der einzelnen L_{FRF} -Werte, die auch in der Regressionsanalyse berücksichtigt werden muss. Wichtige Einflüsse sind

1. die unterschiedliche Gewichtung der AP nach ihrem räumlichen Abstand untereinander (siehe Anhang A), im folgenden *Abstandsgewichtung* p_i genannt, und
2. der Einfluss jedes L_{FRF} -Wertes auf die Gesamt-Schallabstrahlung aufgrund der Reduktion $\Delta L_{FRF,i} = L_{FRF,i} - L_{FRF,0}$, im folgenden ΔL_{FRF} -*Gewichtung* q_i genannt.

Die ΔL_{FRF} -*Gewichtung* beschreibt den Einfluss der L_{FRF} von AP_i in Relation zur AP_1 . Da $\Delta L_{FRF,i}$ in der Regel negativ ist, nimmt q_i mit zunehmender Pegelreduktion ab.^{1,2}

Weitere Einflussfaktoren, vor allem aus den Randbedingungen der Messung (beispielsweise Temperatur), sind nicht auszuschließen. Sie können jedoch erst durch

¹Teilweise zeigt sich $L_{FRF,[1;5]} > L_{FRF,0}$. Diese Werte werden entsprechend höher gewichtet.

²Diese Art der Gewichtung wird z. B. auch bei Regressionsanalysen in der Ökonomie, Biologie oder Medizin angewandt, vor allem, um den Einfluss von Messfehlern (‘Ausreißern’) zu reduzieren [69].

entsprechende Messreihen, bei denen allein der betrachtete Parameter variiert wird, quantifiziert werden. Daher werden sie in dieser Regressionsanalyse nicht berücksichtigt.

Der Einfluss jeder einzelnen Gewichtung auf das Gesamtergebnis hängt vom Verhältnis der Absolutwerte der Gewichtungsfaktoren zueinander ab. In dieser Arbeit sollen beide Gewichtungen gleichen Einfluss auf die Messwerte haben. Daher werden p_i und q_i relativiert, so dass $\sum_{i=1}^n p_i = 1$ und $\sum_{i=1}^n q_i = 1$ gilt.

Beide Gewichtungsfaktoren ergeben sich somit zu

$$p_i = \frac{(x_{i+1} + x_i) - (x_i + x_{i-1})}{2(x_{max} - x_1)} \quad (7.2)$$

$$q_i = \frac{10^{\frac{\Delta L_{FRF,i}}{10}}}{\sum_{j=1}^n 10^{\frac{\Delta L_{FRF,j}}{10}}} \quad (7.3)$$

Beide Gewichtungen werden als ‘Gewichtung nach physikalischen Merkmalen’ zusammengefasst, ihr Produkt wird als

$$r_i = p_i \cdot q_i \quad (7.4)$$

bezeichnet.

Die Prüfung der Güte des KQ-Ergebnisses, z. B. mittels des Bestimmtheitsmaßes [21], ist hier nicht sinnvoll, da durch die Gewichtung bewusst eine Differenz zur größtmöglichen Überdeckung toleriert wird.

Weitere Prüfungen zur Gültigkeit dieser Methode aufgrund der individuellen Messwerte-Verteilung, speziell die ‘Residuenanalyse’ (Analyse von systematisch von Null abweichende Residuen- L_{FRF} -Verläufe), sind bei allgemeinen statistischen Problemen sinnvoll und können die Notwendigkeit alternativer Ansätze [87] und / oder die Existenz weiterer physikalischer Einflussfaktoren aufzeigen. In dieser Arbeit muss aufgrund des theoretischen TDR-Ansatzes jedoch zwingend eine Regressionsgerade ermittelt werden. Dies gilt auch, wenn ihre Repräsentation der Messwerte von geringer Güte ist und / oder weitere physikalische Einflussfaktoren vorliegen (die z. B. eine nicht-lineare Regression nahelegen).

Die *Abstandsgewichtung* p_i und die ΔL_{FRF} -Gewichtung q_i werden im folgenden Kapitel 7.1.1 näher vorgestellt. Es zeigt sich, dass auch weitere Gewichtungen sinnvoll sein können, diese werden im Kapitel 7.1.2 vorgestellt.

7.1.1 Gewichtung nach physikalischen Merkmalen

Die Höhe der gleisseitigen Luftschallemission zeigt im Allgemeinen eine negative Korrelation mit der zugehörigen TDR [94]: In den Frequenzbereichen mit hohen TDR-Werten zeigt sich eine geringe Luftschallemission. Daher ist die Analyse der allgemeinen Zusammenhänge mittels einer luftschallbasierten Zielgröße sinnvoll. Hier

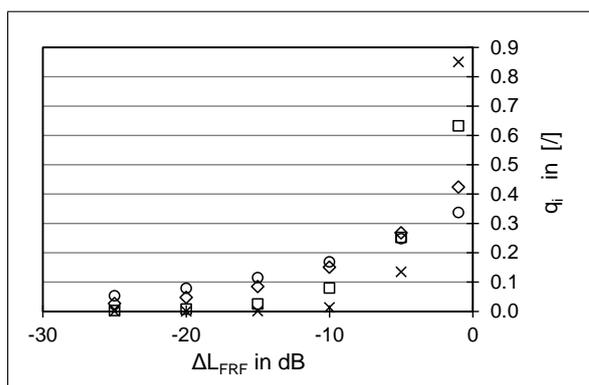


Abb. 7.2: Skizze der Gewichtung q_i in Abhängigkeit der Reduktion ΔL_{FRF} bei variierendem Exponent m . (\times) $m = 0.5$, (\square) $m = 1.0$, (\diamond) $m = 2.0$, (\circ) $m = 3.0$

bieten sich die Oberbau-Transferfunktionen $L_{HW,tr}$ (siehe Kapitel 7.2), die im Rahmen des Projektes sonRAIL (siehe Kapitel 9) ermittelt worden sind, an. Sie liegen für alle in Projekt sonRAIL betriebenen Messstellen vor.

Grundsätzlich wird der Einfluss der quadrierten Oberflächenschnelle v^2 auf die Schallleistung W_{Wave} (siehe Gleichung 4.6) vorausgesetzt.³ Beispielsweise kann durch einen zusätzlichen Exponent die frequenzabhängige Oberflächenschnelle-Luftschall-Transformation näherungsweise beschreiben werden. Er bietet sich hier an, da durch eine relativ einfache Variation eine stark unterschiedliche Gewichtung erzielt wird.

Eine Variation der *Abstandsgewichtung* ist nicht sinnvoll, da die Gewichtung durch das Raster der 29 AP nach EN 15461 festgelegt und plausibel ist.

Die Arbeitsthese lautet daher:

Die Körperschall-Luftschall-Transformation kann über einen weiteren Exponenten m der Oberflächenschnelle v beschrieben werden.

Der zusätzliche Exponent m geht durch

$$q_i(m) = \frac{10^{\frac{\Delta L_{FRF,i}}{m \cdot 10}}}{\sum_{i=1}^n 10^{\frac{\Delta L_{FRF,i}}{m \cdot 10}}} \quad (7.5)$$

in die Gewichtung q_i ein.

Für vier beispielhafte Exponenten m ist die Gewichtung $q_i(m)$ in Abbildung 7.2 aufgezeigt. Hier wird deutlich, dass die Summe aller Gewichtungsfaktoren stets ‘Eins’ ergibt.

In Abbildung 7.3 ist, für eine Frequenz, die resultierende räumliche Verteilung der gesamten Gewichtung r_i bei variierendem Exponent m abgetragen.

Es wird deutlich, dass das Verhältnis zwischen den Nahfeld- (AP₁ bis AP_{≈12}) und Fernfeld-Gewichtungen (AP_{≈13} bis AP₂₉) direkt von dem Exponent m abhängt.

Weitere beispielhafte räumliche Verteilungen der Gesamtgewichtung r_i bei einem Exponenten m von 0.5 sind im Anhang D abgebildet. Hier sind verschieden ausgeprägte Verläufe erkennbar: Oft werden im Bereich $f \leq 2$ kHz hohe Gewichtungen bei den ersten AP sichtbar. Im höherfrequenten Bereich zeigen sich dagegen in einem Abstand von ca. 3 m oder ca. 8 m die stärksten Gewichtungen.

³Daher wird die FRF weiterhin in quadratischer Potenz in den L_{FRF} -x-Diagrammen abgetragen.

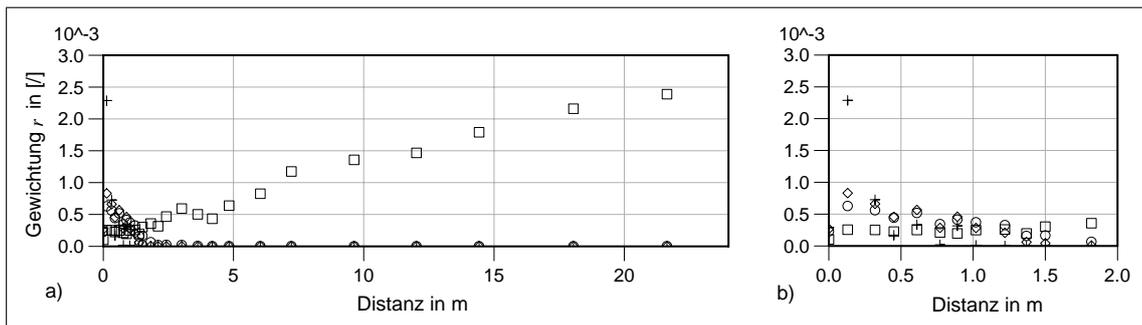


Abb. 7.3: Beispielhafte L_{FRF} -Gewichtung r der AP bei variierendem Exponent m (MS **A**, 80 Hz, vertikal). (+) $m = 0.1$, (◇) $m = 0.5$, (○) $m = 1$, (□) $m = 10$. a) gesamte Länge, b) Detail

Gewichtungen, die diesen Verlauf nicht zeigen, treten beispielhaft in Abbildung D.1 oder D.2 auf. Hier zeigen sich auch bei Frequenzen von $f=80$ Hz starke Gewichtungen der Fernfeld-AP. Diese Gewichtungen sind in den genannten physikalischen Parametern der Gewichtung r_i begründet.

In den vorliegenden L_{FRF} -x-Diagrammen (siehe Anhang E) wird, mit zunehmender Entfernung von der Krafeinleitung, ein unterschiedliches (typischerweise zweistufiges) Abklingverhalten (Nah- und Fernfeld, siehe Kapitel 4.1.1) deutlich. Dies lässt eine separate Regression für das Fernfeld notwendig erscheinen. Beide räumlich getrennten L_{FRF} -x-Verläufe könnten dann mit jeweils höherer Güte nachgebildet werden. Es zeigen sich jedoch vorwiegend im Nahfeld höhere TDR-Werte als im Fernfeld (z. B. MS **A** im Bereich bis $f=250$ Hz, siehe Abbildung E.1). Dabei beträgt die absolute Reduktion im Nahfeld typischerweise >10 dB, so dass der Einfluss der L_{FRF} -Werte weiterer AP im Vergleich zum L_{FRF} -Wert der AP₁ stark reduziert wird. Daher ist kein signifikanter Einfluss auf die Schallabstrahlung zu erwarten und eine räumlich getrennte Regression nicht notwendig.

Die Durchführung der Variation wird im Kapitel 7.2 näher beschrieben.

7.1.2 Alternative Gewichtungen

Eine stärkere Gewichtung der Nahfeld-AP scheint aufgrund der hier vorliegenden höheren Schallemission grundsätzlich sinnvoll.

Neben der aus physikalisch begründeten Ansätzen abgeleitete Gewichtung der L_{FRF} (siehe Kapitel 7.1.1) werden daher die zwei alternativen Gewichtungen

1. mit über den Abstand *linear* abnehmenden Faktoren t_{lin} und
2. mit über den Abstand *exponentiell* abnehmenden t_{exp} Faktoren

genutzt.

Der relevante Unterschied besteht in einer ‘konstanten’ Gewichtung der L_{FRF} ohne Unterscheidung nach Messstelle oder Frequenz. Auch die Effekte, die in der *Abstands-* und ΔL_{FRF} -Gewichtung erfasst werden, werden nicht berücksichtigt.

Der Einfluss auf das TDR-Ergebnis wird mittels beispielhaft gewählten Gewichtungsfunktionen vorgestellt und diskutiert.

7.2 Durchführung der statistischen Analyse

Die in den zwei vorangegangenen Kapiteln vorgestellten Gewichtungen werden auf die TDR-Ergebnisse der Messstellen des Projektes sonRAIL (MS C1 bis D5) angewandt.

7.2.1 Gewichtung nach physikalischen Merkmalen

In diesem Kapitel werden die mittels der gewichteten linearen Regressionen ermittelten TDR-Ergebnisse mit den jeweiligen Oberbau-Transferfunktionen verglichen.⁴ Der Vergleich erfolgt anhand der

- TDR-Absolutbeträge und
- den charakteristischen Verläufen. Dies sind spektrale Ereignisse, die durch konstruktive Eigenschaften (z. B. Resonanzfrequenzen) plausibel erscheinen.

Für die Vergleiche wird die ΔL_{FRF} -Gewichtung mittels des Exponenten m (siehe Gleichung 7.5) variiert.

Die Oberbau-Transferfunktionen des sonRAIL-Projektes wurden mittels Vorbeifahrten von ‘Referenz-Zügen’ mit konstruktiv bedingten geringen Rollgeräuschanteilen (d. h. kleinen Raddurchmessern, entkoppelten Fahrzeugaufbauten) und geringen weiteren Emissionsquellen (Traktion, Klimaanlage, aerodynamische Geräusche) ermittelt. Dies sind bei den MS C1 bis C4 und D1 bis D5 Elektrotriebwagen der Bauart RABe 525 ‘NINA’ (Raddurchmesser 630 mm), Betreiber BLS, und bei den MS C5 bis MS C9 Flachwagen der ‘Rollenden Landstraße’ (‘RoLa’, z. B. Bauart Saadkmms, Raddurchmesser 400 mm) [88]. Aufgrund der relativ kleinen Raddurchmesser resultieren ebenso kleine Kontaktflächen-Abmaße. Durch diese bildet sich ein Kontaktfilter (siehe Kapitel 4.2) mit relativ großer Durchlass-Bandbreite und einer entsprechend breitbandigen Anregung aus. Es kann angenommen werden, dass der aufgezeichnete Schalldruckpegel vom Oberbauanteil dominiert wird [88].

Im Projekt sonRAIL wurden die theoretischen Ansätze (nach [47]) der weitgehenden Unabhängigkeit von Fahrzeugtyp, Radrauheit und Fahrgeschwindigkeit überwiegend bestätigt [88]. So zeigen die messstellenspezifischen Gesamt-Transferfunktionen $L_{HW,tot}$, generiert aus Vorbeifahrten verschiedener Zugarten, im Frequenzbereich $f \leq 1.6$ kHz annähernd gleiche Werte. Dies kann auf die ähnliche Oberbau-Schallemission zurückgeführt werden.

⁴An den MS D2 und D3 liegt trotz mehrerer Überfahrten nur je eine gemessene $L_{HW,tr}$ für die Überfahrten der NINA-Züge vor. Daher ist in den entsprechenden Diagrammen keine Standardabweichung abgetragen.

Zusätzlich wurde an jeder Messstelle die Luftschall-Ausbreitungsdämpfung D_{Ground} ermittelt, so dass vom gemessenen Schalldruck auf die Schalleistung geschlossen werden kann. Anschließend wird für die Oberbau-Transferfunktion $L_{HW,tr}$ die effektive Summenrauheit $L_{r,tot}(f)$ (siehe Gleichung 4.5) der mikrofonzugewandten Schiene als Bezugswert angenommen. Die Zusammenhänge werden durch die Gleichungen 7.6 bis 7.9 hergestellt.

Weitere Einflussparameter sind der Mikrofon-Gleis-Abstand d , der Aspektwinkel $\Phi = 2 \arctan\left(\frac{l_{veh}}{2d}\right)$, die Schalleistung der Sekundärschallquellen $L_{W,sek}$ (ermittelt aus Vorbeifahrtmessungen an vertikalen Mikrofonarrays, bei den beiden genannten Referenzfahrzeugtypen deutlich geringer als die Schalleistung des Rollgeräusches) und die fahrzeugspezifische Anzahl der Achsen N_{ac} . Die Zusammenhänge [88] ergeben sich zu

$$L_{HW,tr}(f) = L_{HW,tot}(f) \quad (7.6)$$

$$L_{HW,tot}(f) = L_{W,roll}(f) - L_{r,tot}(f) - 10 \lg N_{ac} \quad (7.7)$$

$$L_{W,roll}(f) = L_{W,tot}(f) \ominus L_{W,sek} \quad (7.8)$$

$$L_{W,tot}(f) = L_p(f) + 10 \lg(4\pi d) - 10 \lg \frac{\Phi}{l_{veh}} - D_{Ground}(f) \quad (7.9)$$

Aufgrund der großen Anzahl von Vorbeifahrten weisen diese Messungen eine hohe statistische Sicherheit auf.

7.2.2 Alternative Gewichtungen

Die Durchführung der Analyse mit den Gewichtungen $t(i)$ erfolgt ähnlich der Durchführung mit physikalisch motivierten Gewichtungen. Da jedoch nur ein Ausblick auf den Einfluss dieser Gewichtungsfunktionen gegeben werden soll, werden zwei Ergebnisse vorgestellt, die repräsentativ ausgewählt wurden. Beide Gewichtungen $t(i)$ mit über den Abstand *linear* und *exponentiell* abnehmenden Faktoren sind in Abbildung 7.4 dargestellt. Sie entsprechen den Funktionen

$$t_{lin}(i) = -5 \cdot x + C_{lin} \quad (7.10)$$

$$t_{exp}(i) = 1 \cdot e^{-5x} + C_{exp} \quad (7.11)$$

mit x dem Abstand zur AP₁ (siehe Abbildung 6.2). Beide Funktionen werden anschließend durch Addition bzw. Subtraktion der Konstanten C_{lin} bzw. C_{exp} so ergänzt, dass $t(i_{max}) = 0$ erfüllt ist. So wird erreicht, dass allein die Gewichtungsfunktions-Beträge zwischen den AP die Gewichtung beeinflussen, nicht jedoch die Absolutbeträge. Auch diese Ergebnisse werden den $L_{HW,tr}$ -Ergebnissen der im Kapitel 7.2.1 genannten Messstellen des Projektes sonRAIL gegenübergestellt.

7.3 Ergebnisse der statistischen Analyse

Im Anhang F ab Seite 147 sind die TDR-Ergebnisse der sonRAIL-Messstellen, ermittelt nach EN 15461 und durch Lineare Regression, ebenso wie die entsprechenden

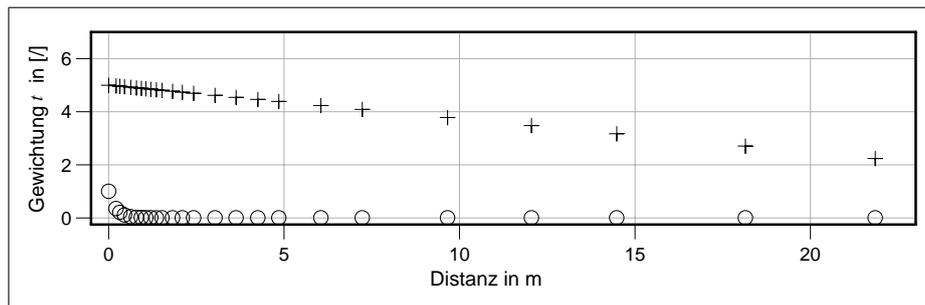


Abb. 7.4: Beispielhafte L_{FRF} -Gewichtung t der AP. (+) linear, (o) exponentiell abnehmende Faktoren (MS **A**), vertikal)

$L_{HW,tr}$ abgebildet. Ebenfalls sind L_{FRF} -x-Diagramme, exemplarisch von MS **I**, im Anhang E, Abbildungen E.10 und E.11, abgebildet.

Die Variationsbreite des Exponenten m wurde mit 0.1, 0.5 und 1.0 so gewählt, dass sich eine Gewichtung ergibt, bei der entweder die Nah- oder Fernfeld- L_{FRF} (AP der Bereiche ca. [0;5 m] oder ca. [5;40 m]) dominieren, siehe auch Abbildung 7.3.

Die lineare und exponentielle Gewichtung ist beispielhaft nach der in Kapitel 7.2.2 genannten Formel ausgeführt.

Zur Objektivierung der Korrelation können (z. B. statistische) Kennwerte genutzt werden. Bei den hier durchgeführten Vergleichen sind jedoch nicht zwingend lineare Abhängigkeiten anzunehmen (hier könnte beispielsweise der ‘Korrelationskoeffizient’ genutzt werden). Es müssen aber Absolutbeträge und charakteristische lokale Ähnlichkeiten bewertet werden, was durch die gängigen Korrelationsanalysen nicht erfüllt werden kann. Daher ist ein individueller qualitativer Vergleich der Ergebnisse zweckmäßig.

Im folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse des Vergleiches zwischen den verschiedenen TDR-Ergebnissen und den $L_{HW,tr}$ aufgeführt. Grundsätzlich wird aufgrund des theoretischen Ansatzes (siehe Kapitel 4.3) für beide Zielgrößen eine negative Korrelation zwischen TDR und $L_{HW,tr}$ erwartet.

In den folgenden Kapiteln 7.3.1 bis 7.3.4 werden die Ergebnisse stichprobenartig vorgestellt.

7.3.1 TDR-Absolutbeträge - Vertikale Richtung

Gesamtspektrum

- Geringe Differenzen der $L_{HW,tr}$ -Ergebnisse aller MS im Vergleich zu TDR-Ergebnissen (große Ursachen (TDR) bei relativ kleinen Wirkungen ($L_{HW,tr}$)).
- Mittels exponentieller Gewichtung meist hohe TDR-Werte, mittels linearer Gewichtung meist geringe TDR-Werte.
- Tendenziell reduzierte TDR-Werte bei zunehmendem Exponenten m .
- TDR-Absolutbeträge mittels exponentieller Gewichtung nehmen meist bei zunehmender Frequenz ab (negative Korrelation sichtbar).

- TDR-Absolutbeträge mittels linearer Gewichtung zeigen meist geringe Unterschiede im Gesamtspektrum (keine Korrelation sichtbar).

Bis $f=1$ kHz

- Einige MS: Bei hohem Exponenten m geringere TDR-Werte als im Bereich $f \geq 1$ kHz. Durch den ansteigenden $L_{HW,tr}$ -Verlauf ergibt sich so keine negative Korrelation.
- Bei hohem Exponenten m keine negative Korrelation mit $L_{HW,tr}$ -Verläufen.
- Ergebnisse mit verschiedenen Exponenten m überwiegend geringer als nach EN 15461. Ausnahme: Mit Exponent m von 0.1 annähernd gleich, teilweise leicht höher als nach EN 15461.
- Bei niedrigen TDR-Werten meist höhere $L_{HW,tr}$ -Werte (negative Korrelation).
- Höhere $L_{HW,tr}$ -Werte des Stahl-Trogswellen-Oberbaus (MS **D1** und **D3**) im Bereich [315;1000 Hz] (negative Korrelation).

Oberhalb $f=1$ kHz

- Abnehmende TDR-Werte bei zunehmenden Exponenten m im Bereich der 'blocked-zone' um $f=1.25$ kHz.
- Geringe TDR-Unterschiede meist bei verschiedenen Exponenten m im Bereich [2;4 kHz].

Insgesamt meist negative Korrelation bei Exponent m (deutlich bei 0.5) oder exponentieller Gewichtung. Im Vergleich mit Ergebnissen nach EN 15461 oder mittels linearer Gewichtung nur schwach negative Korrelation.

7.3.2 TDR-Absolutbeträge - Laterale Richtung

Gesamtspektrum

- Insgesamt nur beschränkt relevant für die Ausbildung der $L_{HW,tr}$.
- Geringe Differenzen der $L_{HW,tr}$ -Ergebnisse im Vergleich zu TDR-Ergebnissen (gleich der vertikalen Richtung).
- Mittels exponentieller Gewichtung meist hohe TDR-Werte, mittels linearer Gewichtung meist geringe TDR-Werte (gleich der vertikalen Richtung).
- Keine eindeutige Korrelation mit Ergebnissen mittels Exponent m und mittels EN 15461. Allein im Bereich [0.2;1.25 kHz] negative Korrelation.
- Tendenziell geringere TDR-Werte bei zunehmenden Exponenten m , dabei geringere Differenz als in vertikaler Richtung.
- Ergebnisse mittels linearer Gewichtung ähnlich den Ergebnissen mittels Exponenten m von 1.0.

Bis $f \approx 400$ Hz

- Große Unterschiede bei verschiedenen Exponenten m bei meist negativer Korrelation, bei Exponent m von 0.5 nur leicht negative Korrelation.
- Keine einheitliche Korrelation bei exponentieller Gewichtung.

Bereich [0.4;1.25 kHz]

- Lage des globalen TDR-Minimum bei einem Exponenten m von 0.5 oder 1.0 oder bei linearer Gewichtung stets bei $f=1.25$ Hz mit annähernd gleichen Werten von ca. 0.1 dB/m.
- Negative Korrelation bei linearer Gewichtung.
- Bei exponentieller Gewichtung nur geringe Differenzen (keine Korrelation)

Oberhalb $f \approx 1.25$ kHz

- Meist negative Korrelation, am deutlichsten bei einem Exponent m von 0.5 ausgeprägt.

Insgesamt besteht nach allen gewählten Analysemethoden in lateraler Richtung nur selten eine negative Korrelation. Falls doch, ist sie bei einem Exponent m von 0.5 am deutlichsten ausgeprägt. Ebenso besteht keine einheitliche Korrelation zwischen den $L_{HW,tr}$ -Werten und einer Kombination aus *vertikaler* und *lateraler* TDR.

7.3.3 Charakteristische lokale Verläufe - Vertikale Richtung

Gesamtspektrum

- Ausgeprägte lokale Extrempunkte bei TDR-Ergebnisse mittels eines Exponenten m von 0.1. Sie finden sich jedoch nicht in den $L_{HW,tr}$ -Ergebnissen wieder. Analyse nach EN 15461 zeigt nur gering ausgeprägte Extrempunkte.
- TDR-Ergebnisse mittels exponentieller Gewichtung zeigen nur teilweise negative Korrelationen.
- TDR-Ergebnisse mittels linearer Gewichtung zeigen die $L_{HW,tr}$ -Extrempunkte meist nicht in den TDR-Ergebnissen. Wenige Ausnahmen im Bereich um $f \approx 1$ kHz.

Bis $f \approx 1$ kHz

- Negative Korrelation zwischen lokalen $L_{HW,tr}$ -Extrempunkten und TDR-Ergebnissen nach EN 15461 und mittels eines Exponenten m von 0.5.
- Weitere negative Korrelationen ergeben sich durch einen spektralen Toleranzbereich (in dem die Extrempunkte korrelierend gewertet werden), der jeweils ein benachbartes Terzband umfasst.⁵

⁵Falls schmalbandige Effekte in dem Bereich der Terzbandgrenzen auftreten, können die Auswirkungen (teilweise abgeschwächt) in beiden Terzbändern erscheinen.

Bereich $f \approx 1$ kHz

- Negative Korrelation bei lokalen $L_{HW,tr}$ -Extrempunkte durch ‘pinned-pinned’-Effekte, schwächer bei zunehmendem Exponent m .
- Die Ergebnisse mittels eines Exponent m von 0.1 führen teilweise zu spektralen Verschiebungen der Extrempunkte in das benachbarte Terzband.

Oberhalb $f \approx 1.6$ kHz

- Bei den meisten MS entsprechende TDR-Minimum, deutlich bei Exponent m von 0.5 ausgeprägt. Negative Korrelation, da Bereich der globalen $L_{HW,tr}$ -Maxima.
- Negative Korrelation bei den meisten MS im Bereich $f \approx 5$ kHz.

Insgesamt zeigen sich negative Korrelationen oft mit TDR-Ergebnissen nach EN 15461 oder mittels Exponent m von 0.5.

7.3.4 Charakteristische lokale Verläufe - Laterale Richtung

Insgesamt zeigen sich, unabhängig von der Regressionsmethode, nur wenige eindeutige Korrelationen.

7.3.5 Zusammenfassung

Somit wird die bei den untersuchten Exponenten die höchste negative Korrelation zwischen $L_{HW,tr}$ und TDR in vertikaler und lateraler Richtung bei Anwendung des Exponenten m_{opt} von 0.5 erreicht. Die lineare und exponentielle Gewichtung zeigt insgesamt geringere negative Korrelation.

Die TDR-Ergebnisse nach EN 15461 zeigen oft einen ‘glatteren’ Verlauf, der ebenfalls zu relativ hohen negativen Korrelationen führt.

Im direkten Vergleich zeigt sich eine höhere negative Korrelation bei Linearer Regression mittels des Exponenten m von 0.5 als nach EN 15461, die vor allem durch die Ausprägung lokaler Extrempunkte hervorgerufen wird. Dies kann als Indiz gewertet werden, dass so die akustisch relevante Luftschallemission des Gleises tendenziell in einem höheren Maße beschrieben wird als durch das Vorgehen in EN 15461.

Insgesamt finden sich jedoch nicht alle Eigenschaften der TDR-Ergebnisse in den $L_{HW,tr}$ -Verläufen wieder, so dass von weiteren signifikanten Einflussfaktoren auszugehen ist. Diese betreffen vor allem die Körperschall-Luftschall-Transformation. Die Höhe der negativen Korrelation wird in dieser Analyse aus den oben genannten Gründen nicht quantifiziert, so dass kein objektiv-quantitativer Vergleich zwischen den TDR-Ergebnissen mittels der fünf Exponenten möglich ist. Der gefundene ‘optimale’ Exponent m_{opt} führt jedoch auf TDR-Ergebnisse, deren Charakteristik zu einem hohen Anteil in den $L_{HW,tr}$ -Ergebnissen zu finden ist.

Für einen Abgleich mit den TDR-Ergebnissen nach EN 15461 und nach dem indirekten Messverfahren werden diese Ergebnisse im folgenden Kapitel 8 vergleichend dargestellt.

8 Vergleich der TDR-Ergebnisse nach Lin. Regression mit Ergebnissen nach EN 15461 und mittels indirekter Messung

Um die praktische Eignung der in den Kapiteln 6.1 und 7.1 vorgestellten TDR-Analysemethode bewerten zu können, werden die Ergebnisse untereinander und mit Simulationsergebnissen nach [49] und [94] verglichen. Dazu werden die in Tabelle H.1 vorgestellten Messstrecken genutzt.

Im folgenden Kapitel 8.1 erfolgt der Vergleich anhand der TDR-Frequenzspektren. Nach Hinweisen zu den Übertragungsfunktions-Weg-Diagrammen (L_{FRF} -x-Diagramme, Kapitel 8.2.1) werden diese anschließend für einen detaillierten Vergleich in den Kapiteln 8.2.2 bis 8.2.4 genutzt.

Exemplarische L_{FRF} -x-Diagramme sind im Anhang E dargestellt.

8.1 Vergleich mittels TDR-Spektren

In diesem Kapitel stehen die Differenzen anhand der unterschiedlichen Auswertemethoden im Fokus, Auswirkungen der Gleiskonstruktion werden im Kapitel 9.2 diskutiert.

In vertikaler Richtung zeigen sich nur geringe Änderungen der Absoluthöhen zwischen beiden Analysemethoden. Die Erwartung des TDR-Verlaufes nach den Simulationsergebnissen für Beton-Monoblock-Oberbau (siehe Kapitel 4.1) werden durch die Ergebnisse nach EN 15461 deutlicher erfüllt als nach Linearer Regression. Lokale Extrema ('cut-on'-Frequenzen, 'pinned-pinned'-Frequenzen) treten bei beiden Analysemethoden an gleicher Position auf. In den Ergebnissen nach EN 15461 zeigt sich häufiger die erwartete spektrale Lage der Extrema als in den Ergebnissen nach Linearer Regression.

In lateraler Richtung zeigen sich die Differenzen zwischen den Ergebnissen in ähnlicher Größenordnung wie in vertikaler Richtung. Die charakteristischen Verläufe unterscheiden sich nur geringfügig. Ein Vergleich mit Simulationsergebnissen ist aufgrund fehlender Veröffentlichungen nicht möglich.

Somit zeigen sich insgesamt geringe Unterschiede zwischen den Ergebnissen beider Analysemethoden. Die aus Simulationsrechnungen erwarteten TDR-Verläufe werden durch die Analyse nach EN 15461 im größeren Umfang abgebildet als nach Linearer Regression.

8.2 Vergleich mittels L_{FRF} -x-Diagramme

Die Ergebnisse des Kapitels 8.1 werden, nach Vorbemerkungen im Kapitel 8.2.1, anhand der L_{FRF} -x-Diagramme detaillierter analysiert.

8.2.1 Vorbemerkung L_{FRF} -x-Diagramme

Die L_{FRF} -x-Diagramme geben den räumlichen Verlauf der L_{FRF} wieder.¹ Sie werden in EN 15461 zum ‘Vergleich’ mit dem theoretischen Verlauf der TDR-Funktion, der sich aus $TDR(x) = L_{FRF}(AP_1) - TDR \cdot x$ ergibt, empfohlen [121].

Beispielhafte L_{FRF} -x-Diagramme werden auch in [49] aufgeführt.

Die folgenden Aspekte, die in EN 15461 nicht näher spezifiziert sind, sollten beachtet werden:

- Es sollte kein FRF -x-, sondern ein L_{FRF} -x-Diagramm erstellt werden. Durch diese logarithmische Ordinate wird der $FRF(x)$ -Verlauf als Gerade dargestellt, deren Neigung dem TDR-Wert entspricht.
- Die FRF sollten quadriert werden. So kann der Einfluss auf die Schalleistung und die weitere TDR-Kalkulation leichter abgeschätzt werden.
- Die L_{FRF} der AP_1 sollte nicht von den weiteren L_{FRF} subtrahiert werden, da so die Information der Punkteingangs- L_{FRF} verloren gehen würde (siehe Einschränkung auf Seite 103). Diese ist für weitergehende Analysen und Vergleiche mit Simulationsergebnissen wichtig.

Um die unterschiedlichen (und oft für das Ergebnis relevanten) Effekte der AP im Bereich bis zu ca. 2 m genauer beurteilen zu können, empfiehlt es sich, die dargestellte Länge der Messstrecke auf ca. 15 m zu begrenzen.

Relevante Merkmale der L_{FRF} -Verläufe sind nachfolgend aufgeführt.

- Das Dämpfungsverhalten des Nahfeldes ist in den tieffrequenten Bereichen deutlich sichtbar (z. B. MS **A**) vertikal im Bereich $f \leq 315$ Hz). So zeigen sich hier bis zu einem Abstand von rund 2 m sehr starke und darüber hinaus geringe bzw. keine Reduktionen. Da im Bereich unterhalb der ‘cut-on’-Frequenzen f_{c1} und f_{c2} keine Wellenausbreitung vorliegt (siehe Kapitel 4.1), sollte geprüft werden, ob die L_{FRF} -Werte der Fernfeld-AP ein verrauschtes Ausgangssignal beinhalten und daher zu verwerfen sind.
- Im Nahfeld zeigt sich teilweise, vor allem im tieffrequenten Bereich, ein unsteiger (‘alternierender’) Verlauf der L_{FRF} . Typische Bereiche sind
 - vertikal: bei $f=80$ Hz bis zu einem Abstand von ca. 5 m (z. B. MS **C5**, **C9**, **N**),
 - lateral: im Bereich [200;800 Hz] bis zu einem Abstand von ca. 6 m (z. B. MS **C7**).
- Die Eigenschaften der ‘pinned-pinned’-Frequenz werden typischerweise bei $f = 1$ kHz oder 1.25 kHz (vertikal) bzw. $f = 0.5$ kHz oder 0.63 kHz (lateral) deutlich. Hier zeigen die L_{FRF} der AP auf den Schwellen typischerweise 5–10 dB

¹In der weiteren Arbeit wird von der FRF allein der Betrag und nicht die Phase genutzt. Daher wird auf eine Kennzeichnung verzichtet.

geringere Werte als die L_{FRF} der AP im Schwellenfach (z. B. MS **A** oder **C9**).

Auffällig ist, dass bei den Bogenstrecken die L_{FRF} -Differenzen Schwellenfach / auf Schwelle in beiden Anregungs-Richtungen geringer als bei gerader Strecke sind. Die Ursache kann in den unterschiedlichen Stützpunktabstände der bogeninneren / -äußeren Schiene gesehen werden, siehe auch Seite 89.

- Mittels der L_{FRF} -x-Diagramme kann die Notwendigkeit des Umfangs und der Positionierung der AP bewertet werden.

Es zeigt sich, dass bei fehlender Wellenausbreitung (Frequenzbereich kleiner der 'cut-on'-Frequenz, hier nur 'Nahfeld') alle AP für die Ausbildung der TDR relevant sind, da hier an einigen AP keine konstante Reduktion der L_{FRF} -Werte gegeben ist.

Tritt auch eine Wellenausbreitung auf (Frequenzbereich größer der 'cut-on'-Frequenz, 'Fernfeld'), treten teilweise leichte wechselnde Reduktionen der L_{FRF} -Werte auf. Daher sollten auch hier alle AP erfasst werden.

In lateraler Richtung zeigt sich der Effekt des Nahfeld-Fernfeld-Unterschiedes, aufgrund der tieffrequenteren Lage der 'cut-on'-Frequenz, seltener.

Daher kann insgesamt keine Reduktion der AP-Anzahl abgeleitet werden. Gleichzeitig wird die Notwendigkeit geringerer Abstände der Nahfeld-AP bestätigt.

8.2.2 Lin. Regression mit Exponent m von 0.5

Vertikale Richtung

- Geringere TDR-Werte bei Analyse nach Linearer Regression als nach EN 15461.
- Wenn L_{FRF} -Werte annähernd linear um mindestens ca. 20 dB abnehmen, deckt sich das TDR-Ergebnis nach EN 15461 mit dem L_{FRF} -x-Verlauf (z. B. MS **A** bei $f=250$ Hz, MS **B1** bei $f=400$ und 500 Hz).
- Zeigt das L_{FRF} -Nahfeld keinen eindeutigen Verlauf, nimmt das TDR-Ergebnis nach EN 15461 oft den L_{FRF} -x-Verlauf des Fernfeldes an. Das Ergebnis nach Linearer Regression folgt hier meist dem Nahfeld-Verlauf (z. B. MS **D2** bei $f=500$ Hz).
- Die TDR nach Linearer Regression repräsentiert überwiegend L_{FRF} -x-Gesamtverläufe, die TDR nach EN 15461 oft L_{FRF} -x-Verläufe **bis zu einer Reduktion** von ca. 10 dB (z. B. MS **J** bei $f=400$ Hz).

Laterale Richtung

- Insgesamt ähnliche Relationen wie in vertikaler Richtung, dabei geringere TDR-Werte als bei Linearer Regression.

- Aufgrund der stetigeren L_{FRF} -x-Verläufe resultieren geringere Differenzen zwischen den TDR-Ergebnissen beider Analysemethoden als in vertikaler Richtung (z. B. MS **A**).
- Die TDR nach Linearer Regression repräsentiert überwiegend L_{FRF} -x-**Gesamt**verläufe (auch im Bereich von ca. [15;50 m] höhere Überdeckungen mit den L_{FRF} -x-Verläufe), die TDR nach EN 15461 oft L_{FRF} -x-Verläufe **bis zu einer Reduktion** von ca. 10 dB.

8.2.3 Lin. Regression mit linearer Gewichtung

Anmerkung: Im Gegensatz zu den L_{FRF} -x-Verläufen nach EN 15461 ist der Wert der TDR-Geraden nach Linearer Regression bei AP_1 nicht auf den Wert von $L_{FRF}(AP_1)$ gesetzt worden. So bleibt der sich aus der Linearen Regression ergebende Anfangswert sichtbar.

Vertikale Richtung

- Die Nahfeld-AP beeinflussen die TDR nach Linearer Regression nur gering. Oft Ausbildung diese TDR entsprechend der Fernfeld- L_{FRF} -x-Verläufe (z. B. MS **C9** bei $f \approx 160$ -250 Hz) oder der L_{FRF} -Reduktion über alle AP (z. B. MS **C7** bei $f \approx 80$ -125 Hz). Daher vor allem im Bereich $f \leq 2$ kHz geringere resultierende TDR als nach EN 15461.
- Bei un stetigen L_{FRF} -x-Verläufen im Nahfeld zeigt die TDR nach Linearer Gewichtung relativ geringe Änderungen.
- L_{FRF} -x-Verhalten im Bereich der ‘pinned-pinned’-Frequenz (siehe Seite 67) mit höherer Plausibilität bei Analyse nach EN 15461 als mittels Linearer Gewichtung

Laterale Richtung

- Aufgrund der stetigeren L_{FRF} -x-Verläufe resultieren geringere Differenzen zwischen den TDR-Ergebnissen beider Analysemethoden als in vertikaler Richtung (Beispiel MS **A**).
- TDR nach Linearer Gewichtung zeigt bei un stetigen L_{FRF} -x-Verläufen im Gesamtverlauf eine höhere Plausibilität.
- Insgesamt ähnliche Relationen zwischen den Ergebnissen beider Analysemethoden (ähnlich der vertikalen Richtung). Auch hier überwiegend geringere Werte der TDR mittels Linearer Regression im gesamten Frequenzspektrum.
- Höhere Fernfeld-Gewichtung meist immer im Bereich $f \leq 250$ Hz und teilweise auch im Gesamtspektrum.

Insgesamt liegt ein höherer Einfluss der Fernfeld- L_{FRF} als bei Linearer Regression mittels m von 0.5 vor. Dabei wirken sich unterschiedliche TDR-Werte des Nah- und Fernfeldes entsprechend aus.

8.2.4 Lin. Regression mit exponentieller Gewichtung

Anmerkung: Auch hier wurde der Wert der TDR-Geraden nach Linearer Regression bei AP_1 nicht auf den Wert von $L_{FRF}(AP_1)$ gesetzt.

Vertikale Richtung

- Höhere TDR-Werte bei Analyse nach Linearer Regression als nach EN 15461 aufgrund hoher Nahfeld-Gewichtung.
- Nehmen die L_{FRF} -Werte im direkten Nahfeldes zu, resultiert eine ansteigende TDR-Gerade (d. h. negative TDR-Werte, z. B. MS **A** bei 80, **B1** bei 80 und 100).
- Zeigt das L_{FRF} -Nahfeld keinen eindeutigen Verlauf, nimmt das TDR-Ergebnis nach EN 15461 oft den L_{FRF} -x-Verlauf des Fernfeldes an. Das Ergebnis nach Linearer Regression folgt hier meist dem Nahfeld-Verlauf (z. B. MS **C1** bei $f=1$ kHz).
- Bei annähernd linear um mindestens ca. 30 dB abnehmenden L_{FRF} -Werten resultieren ähnliche TDR (z. B. MS **C4** im Bereich $f \leq 800$ Hz).
- Zeigen sich ‘pinned-pinned’-Frequenz-Effekte, wird die TDR bei Linearer Regression (aufgrund der hoher Nahfeld-Gewichtung) oft durch die AP auf der Schwelle erhöht (z. B. MS **C4** bei $f=1$ kHz).

Laterale Richtung

- Höhere TDR-Werte bei Analyse nach Linearer Regression als nach EN 15461 aufgrund hoher Nahfeld-Gewichtung.
- Ansteigende TDR-Gerade (siehe vertikale Richtung) selten (z. B. MS **C3** bei 250 und 315 oder **C8** bei $f=200$ Hz).
- Bei annähernd linear um mindestens ca. 30 dB abnehmenden L_{FRF} -Werten resultieren ähnliche TDR (z. B. MS **C9** im Bereich $f \leq 160$ Hz).

Insgesamt zeigt sich auch hier eine höhere Gewichtung der Nahfeld- L_{FRF} als bei linearer Gewichtung, so dass oft höhere TDR-Werte als nach EN 15461 resultieren. Um den Einfluss der drei Gewichtungs-Arten zu veranschaulichen, sind vergleichend im Anhang E die Ergebnisse der MS **A** nach den verschiedenen Gewichtungen abgebildet.

Zusammenfassung

Die aus Simulationsergebnissen erwartete TDR wird am deutlichsten durch die Analyse nach EN 15461 erfüllt.

Aus der Linearen Regression mittels m_{opt} und mittels linearer Gewichtung resultieren, im Vergleich zu der Analyse nach EN 15461, tendenziell geringere TDR-Werte. Die Lineare Regression mittels exponentieller Gewichtung führt tendenziell zu höheren TDR-Werten.

Die Lineare Regression mit konstanter linearer Gewichtung betont die Fernfeld- L_{FRF} , die exponentielle Gewichtung die Nahfeld- L_{FRF} . Dies führt teilweise zu unrealistisch negativen TDR-Werten.

Tab. 8.1: Betriebliche Differenzen der Vergleichs-Messstellen indirekter TDR

Parameter	MS G	MS J
Zugtyp	ICE, IC, RE, Güterzüge	DMU GTW 2/6
Anzahl der Vorbeifahrten	20	4
Achslast	bis 22.5 t	ca. 10 t
Fahrgeschwindigkeit	90-200 km/h	70-80 km/h

Diese Aussagen gelten für beide Schwingungsrichtungen. Da sich jedoch häufiger in lateraler als in vertikaler Richtung stetige L_{FRF} -Verläufe zeigen, resultieren in lateraler Richtung geringere Unterschiede zwischen den verschiedenen Analysemethoden. Im Bereich >15 m treten keine Änderungen des L_{FRF} -x-Verlaufes auf, die das Gesamtergebnis beeinflussen. Daher besteht, allein aus der Analyse der L_{FRF} -x-Diagramme, die Möglichkeit, die weit entfernten AP auszulassen. Dies wurde jedoch schon in Kapitel 6.1 als nicht möglich bewertet.

8.3 Vergleich mit TDR nach indirektem Messverfahren

Das im Kapitel 6.2 beschriebene Verfahren der ‘indirekten TDR-Abschätzung’ kann durch veränderte betriebliche Randbedingungen (u. a. quasistatische Gleis-Belastung durch die Achslasten, Fahrgeschwindigkeit, Radrauheit, Achsabstände) zu abweichenden Gleiseigenschaften und TDR-Ergebnissen führen. Für objektive Vergleiche müssen auch die weiteren Analyseparameter (vor allem Zeitabschnitt L_1 , Fahrzeugüberhänge (Abstand des letzten Radsatzes zur Pufferebene mit Einfluss auf L_2) oder die Anzahl der Iterationsschritte zur Reduktion des Nachbarachsen-Einflusses) konstant gehalten werden.

Für die betrachteten Messstellen liegen allein für die MS **G** und **J** bedingt vergleichbare Ergebnisse in vertikaler Richtung vor [30]. Bei beiden Messstellen wurden gleiche Analyseparameter genutzt.

Diese Ergebnisse sind ebenfalls in den Abbildungen G.13 und G.15 abgetragen. Die betrieblichen Eigenschaften beider Messstellen sind in Tabelle 8.1 aufgeführt.

Hier zeigen sich die Belastungen durch relativ unterschiedliche Zugarten. Der Vergleich kann daher allein grundsätzliche Tendenzen aufzeigen.

Es zeigen sich bei MS **G** ähnliche Tendenzen (Lage des Maximums, Ausbildung des Bereiches der ‘pinned-pinned’-Frequenz) zwischen der indirekten TDR- und den TDR-Ergebnissen nach EN 15461. Jedoch zeigen sich im Bereich $f \leq 500$ Hz deutliche Differenzen.

Auch an MS **J** zeigen sich größere Differenzen zwischen den TDR-Ergebnissen nach Linearer Regression und den indirekt ermittelten Ergebnissen. Jedoch liegt auch im Vergleich der indirekten mit den TDR-Ergebnissen nach EN 15462 nur eine geringe Ähnlichkeit vor. Die Differenzen nehmen, vor allem im Bereich [250;500 Hz], im

Vergleich mit dem Ergebnis nach Linearer Regression noch zu.

Somit ist bei den zwei betrachteten Messstellen keine erhöhte Ähnlichkeit der Ergebnisse durch die Analyse mittels Linearer Regression gegenüber der Analyse nach EN 15461 gegeben. Es ist jedoch möglich, dass weiter angepasste Parameter der indirekten Analyse zu höheren Überdeckungen führen werden. Ebenso kann die betriebliche Fahrzeugkonstellation die indirekte TDR beeinflussen.

Zusammenfassung

Aufgrund zahlreicher variabler Analyseparameter liegen allein zwei vergleichbare indirekt gemessene TDR-Ergebnisse vor.

Hier zeigen sich nur geringe Ähnlichkeiten mit den TDR-Ergebnissen nach Linearer Regression mittels m_{opt} und den Ergebnissen nach EN 15461.

Bei geänderten betrieblichen Parametern (Fahrzeugarten) sind jedoch abweichende TDR-Ergebnisse zu erwarten, die möglicherweise zu größerer Übereinstimmung der Ergebnisse führen.

8.4 TDR-Vergleich - Zusammenfassung

Aus den TDR-Vergleichen der Kapitel 8.1 bis 8.3 leiten sich die folgenden Aussagen ab:

1. Die Interpretationen der TDR-Ergebnisse kann überwiegend nicht exakt, sondern allein abschätzend erfolgen. Dies resultiert aus der TDR-Kalkulation, die auf den gemessenen L_{FRF} basieren. Hier besteht, speziell im Nahfeld um die AP, eine hohe Sensibilität gegenüber geringen Änderungen der Durchführung und strukturdynamischer Eigenschaften des Gleises.
2. Die Analyse mittels Linearer Regression bei einem Exponenten $m = 0.5$ führt auf TDR-Ergebnisse, die oft eine relativ hohe (physikalisch sinnvolle) negative Korrelation mit der Oberbautransferfunktion $L_{HW,tr}$ zeigen. Dabei zeigen sich jedoch nur wenige Merkmale, die aus der Gleisdynamik-Simulationen erwarten werden.
3. Die Analyse mittels Linearer Regression bei einem Exponenten $m = 0.5$ führt zu TDR-Ergebnissen, die eher den L_{FRF} -x-Gesamtverlauf wiedergeben. Mittels Analyse nach EN 15461 ergibt sich hingegen ein Ergebnis, das eher den L_{FRF} -x-Verlauf im Nahfeld um die AP repräsentiert.
4. Die TDR-Werte mittels Linearer Regression bei 'konstanter' exponentieller Gewichtung repräsentieren die L_{FRF} -x-Verläufe tendenziell in einem höheren Umfang. Treten jedoch im Nahfeld ansteigende L_{FRF} -Werte auf, resultieren unrealistische TDR-Werte.
5. Die TDR-Ergebnisse mittels Linearer Regression zeigen geringere Ähnlichkeiten mit indirekt ermittelten TDR-Ergebnissen als mit TDR-Ergebnissen nach

EN 15461. Diese Aussage kann jedoch aufgrund von allein zwei zur Verfügung stehenden Messergebnissen bei abweichenden betrieblichen Parametern nur einen ersten Ausblick geben.

6. Einige L_{FRF} - x -Diagramme zeigen auf, dass die für die Luftschallemissions relevante TDR nicht zwangsläufig nach dem Verlauf im Nahfeld um den AP gebildet werden muss.
7. Somit zeigt sich, dass die TDR-Ergebnisse nach EN 15461 die L_{FRF} - x -Verläufen nicht notwendigerweise subjektiv gut repräsentieren müssen, aber sich hier trotzdem die Merkmale der $L_{HW,tr}$ im großen Umfang wiederfinden.

Fazit:

Aufgrund dieser Ergebnisse und der genannten höheren Unempfindlichkeit gegenüber ansteigenden Nahfeld- L_{FRF} -Werten empfiehlt es sich die Analyse nicht mittels Linearer Regression, sondern nach dem Vorgehen der EN 15461 durchzuführen.

9 TDR-Analyse verschiedener Oberbauformen

Die folgenden Kapitel stellen die konstruktiven Merkmale der untersuchten Oberbauformen (Kapitel 9.1) und die daraus resultierenden TDR (Kapitel 9.2) vor. Dabei werden, entsprechend der Empfehlung aus Kapitel 8.4, die Ergebnisse der Analyse nach EN 15461 herangezogen. Die Erkenntnisse aus diesen TDR-Analysen werden im Kapitel 9.3 vorgestellt.

9.1 Konstruktive Merkmale

Die in dieser Arbeit genutzten Messstellen (MS) müssen grundsätzlich nach ihrer Lage im geraden Gleis / Bogen und nach zusätzlichen Fahr- und Stromschienen differenziert werden. Durch sie werden veränderte dynamische Gleis-Eigenschaften erwartet.

Die folgende Übersicht stellt kurz die wichtigsten Unterschiede vor, weitere technischen Details und die relevanten Randbedingungen der TDR-Messung sind in Tabelle H.1 im Anhang H aufgeführt. Ansichten der Messstellen sind im Anhang I dargestellt.

Die MS **C1** bis **D5** wurden im Rahmen des Projektes sonRAIL betrieben.

Die MS **A** bis **K** befinden sich im geraden Gleis oder einem Bogen mit Radius von $R \geq 450$ m und weisen allein zwei Fahrschienen auf.

- | | |
|--|---|
| A Beton-Querschwellen-Oberbau | C9 Gleicher Aufbau wie MS C5 , Zwischenlage geändert (Standard für Hauptstrecken) |
| B1 MS A mit härterer Zwischenlage (Standard für Hauptstrecken) | D1 Stahl-Trogswellen-Oberbau |
| B2 zu MS B1 um 10 m versetzt | D2 Beton-Bi-Block-Swellen-Oberbau |
| C1 Beton-Querschwellen-Oberbau | D3 Stahl-Trogswellen-Oberbau |
| C2 Gleicher Aufbau wie MS C1 | D4 Holz-Querschwellen-Oberbau |
| C3 Gleicher Aufbau wie MS C1 | D5 Holz-Querschwellen-Oberbau |
| C4 Gleicher Aufbau wie MS C1 | E1 Beton-Querschwellen-Oberbau (Standard für Nebenstrecken) |
| C5 Beton-Querschwellen-Oberbau, Unterbau Asphalt-Tragschicht (ATS) | E2 zu MS E1 um 10 m versetzt |
| C6 Gleicher Aufbau wie MS C5 | F Beton-Querschwellen-Oberbau mit relativ schwerer Schwelle |
| C7 Gleicher Aufbau wie MS C5 | G wie F , jedoch mit verschäumten Schotterbett und Unterschottermatte (USM) |
| C8 Gleicher Aufbau wie MS C5 | |

- H** wie **F**, jedoch mit verschäumten Schotterbett
- I** Feste Fahrbahn Typ ‘Rheda Stadtbahn Berlin’
- J** Y-Stahlschwellen-Oberbau
- K** Holz-Querschwellen-Oberbau mit Verbindungsstoß im Abstand von ca. 6 m

Die beiden folgenden MS wurden an Gleisen betrieben, an denen weitere Schienen (Stromschiene, Fangschiene und / oder dritte Fahrschiene) installiert sind.

- L** Holzschwellen-Oberbau mit seitlicher Stromschiene
- M** wie **L**, Tunnellage (Betonsohle)

Die zwei im folgenden aufgeführten Messstellen befinden sich in Bogenlagen mit Radien $R \leq 200$ m.

- N** Beton-Rahmenswellen-Oberbau (zwei Querschwellen und Längsverbinder)
- O** Beton-Tragrahmen-Oberbau

An den im folgenden aufgeführten Messstellen sind weitere Schienen installiert, zusätzlich befinden sie sich in Bogenlage mit Radien $R \leq 200$ m.

- P1** Holz-Querschwellen-Oberbau, dritte Fahrschiene, Tunnellage (Betonsohle)
- P2** wie MS **P1**
- Q** MS **P1** mit Schienendämpfer, $f_{Nutz} \approx [500;2000 \text{ Hz}]$
- R** MS **P2** mit Schienendämpfer, $f_{Nutz} \approx [50;200 \text{ Hz}]$
- S** Holz-Querschwellen-Oberbau, dritte Fahrschiene, Oberflächenstrecke
- T** Holz-Querschwellen-Oberbau, dritte Fahrschiene, Fangschiene, Tunnellage (Betonsohle)
- U** ähnlich **T**

Die spezifischen Grenzfrequenzen, bis zu denen der schwere Hammer mit weicher Schlagkalotte genutzt werden kann (siehe Seite 36), sind ebenfalls in Tabelle H.1 und zur weiteren Analyse in den Abbildungen J.1 und J.2 im Anhang J dargestellt. Hier muss beachtet werden, dass der schwere Hammer mit Schlagkalotten unterschiedlicher Steifigkeit genutzt wurde. Diese Steifigkeiten sind jedoch deutlich geringer als die der Schlagkalotte des leichten Hammers.

Es zeigen sich teilweise stark streuende Grenzfrequenzen, die, wie auf Seite 33 beschrieben, mit der Steifigkeit der verwendeten Schlagkalotte positiv korrelieren. Bei der geringsten verwendeten Steifigkeit resultieren sehr niedrige Grenzfrequenzen von $f \approx 160$ Hz (MS **I**). Bei größerer Steifigkeit steigt diese Grenzfrequenz auf bis zu f

=1.2 kHz. Dabei verbleibt jedoch noch eine Streuung um mehrere hundert Hertz. Der Abgleich mit den Messstellen-Temperaturen in Tabelle H.1, die direkt die Steifigkeit beeinflussen, zeigt jedoch keine eindeutige Korrelation. Daher scheinen diese Differenzen in der Erfahrung und Konzentration des Messpersonals begründet.

Ebenfalls konnte durch dieses Verfahren die maximal nutzbare Frequenz des leichten Hammers mit harter Schlagkalotte geprüft werden. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen J.3 und J.4 dargestellt. Obwohl hier verschiedene Kalotten gleicher Nennsteifigkeit verwendet wurden zeigt sich auch hier eine starke Streuung über mehrere hundert Hertz. Die temperaturbedingte Steifigkeitsänderung kann eine Streuung in diesem Umfang nicht begründen, da die Kalotte aus Stahl besteht, dessen Steifigkeit durch diese Temperaturdifferenzen nicht signifikant geändert wird.

Um unsichere Aussagen zu vermeiden wird daher die obere nutzbare TDR-Frequenz generell auf das 5 kHz-Terzband begrenzt.

An den Ergebnissen ist deutlich die Notwendigkeit erkennbar, dass durch das Messpersonal zeitlich sehr kurze Impulse erzeugt werden müssen.¹

Darüber hinaus ist die Tendenz zu höheren Grenzfrequenzen bei vertikaler Anregung als bei lateraler Anregung zu erkennen. Die gemittelte Grenzfrequenz zeigt eine Differenz von 72 Hz (schwerer Hammer) bzw. 174 Hz (leichter Hammer). Dies ist wahrscheinlich in der größeren Schienenelastizität in lateraler als in vertikaler Richtung (siehe Kapitel 4.1.3) begründet. Aus dieser Differenz können in lateraler Richtung geringfügig längere Impulsdauern resultieren, die zu den reduzierten Grenzfrequenzen führen.

Weiterhin ist in Tabelle H.1 die erste Anregungsposition (AP) angegeben, bei der in allen Terzbändern ein ΔL_{FRF} -Wert von mindestens 10 dB gegenüber $L_{FRF,0}$ erreicht ist. Der Eintrag \nearrow zeigt an, dass dieses Kriterium innerhalb der jeweils 29 Anregungspunkte nicht erreicht wurde. Da dieses Kriterium erst im Fernfeld, d. h. ab AP₁₉ geprüft werden soll [121], tritt diese AP relativ oft auf. Der Eintrag \nearrow kann somit auch eine Erfüllung des Kriteriums im Nahfeld beinhalten.

Die Gleisfrequenzen f_2 , f_{c1} und f_{c2} jeder Messstelle sind in Tabelle H.2 aufgeführt. Da nicht für alle MS die notwendigen Konstruktionsdaten vorliegen, wurden Annahmen getroffen, die entsprechend angegeben sind. Die lateralen Steifigkeitswerte der Zw und des Schotters sind, basierend auf dem Mittelwert der Verhältnisse ‘vertikaler’ zu ‘lateraler Steifigkeit’ aus den Simulationsdaten der Arbeiten [60] (Modell 1 und 2), [86] und [99] zu 9 (Zw) und 5 (Schotter) abgeschätzt worden²

¹Bei vielen Messstellen zeigt sich eine abnehmende Grenzfrequenz während der Messung. Dies kann auf die nachlassende Aufmerksamkeit des Messpersonals zurückgeführt werden, die eine Zunahme der Impulsdauer und eine Reduktion der Grenzfrequenz bewirkt.

²Dabei muss auf die grundsätzlich unscharfe (lokal variierend, frequenz- und vorlastabhängige) Annahme der Schottersteifigkeit beachtet werden.

9.2 Ergebnisse der TDR-Analyse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der TDR-Analyse nach EN 15461 für jede MS vorgestellt. Ebenfalls sind mögliche Ursachen, die sich aus den gleisdynamischen Zusammenhängen (siehe Kapitel 4) ergeben, aufgeführt.

Dabei handelt es sich um Zusammenhänge, die zu dem TDR-Ergebnis führen *können*. Allein durch die hier analysierten Messungen sind diese jedoch nicht vollständig zu belegen, dies kann nur durch Parametervariation in Simulationen erfolgen.

Alle TDR-Spektren sind im Anhang G dargestellt. Die hier ebenfalls abgebildeten TDR-Ergebnisse der Linearen Regression sind im Kapitel 8 diskutiert worden.

Für die weitere Interpretation werden auch die Übertragungsfunktions-Weg-Diagramme (L_{FRF} -x-Diagramme) herangezogen. Falls sie das Verständnis unterstützen, sind sie im Anhang E abgebildet.

Da die Differenzen der TDR-Werte stets in Relation zum Absolutbetrag gesehen werden müssen, wird die Differenz der TDR-Pegel $L_{TDR} = 10 \log(TDR)$ verwendet.

MS **A** bis MS **B2** - Vertikale Richtung, Abbildung G.1

Merkmal / Bemerkung	Ursache
$f \leq 200$ Hz: relativ geringe TDR-Werte	Schwellenart, aus Vergleich mit konstruktiv ähnlichen MS C1 bis C4 und aufgrund der spektralen Lage ³
Nahfeld-Fernfeld-Unterschied bis zu den jeweiligen f_{c2} (siehe Tabelle H.2) deutlich in den L_{FRF} -x-Diagrammen sichtbar	Unbekannt
Lokales TDR-Minimum der MS A bei $f=315$ Hz	Nichtlineares Verhalten bei unterschiedlicher Kraftamplituden (Hammerwechsel nach $f \leq 300$ Hz)
L_{FRF} -x-Diagramm bei $f=315$ Hz: auffällige L_{FRF} -Verläufe mit höherer TDR im direkten Nahfeld	Räumlich beschränkte diskontinuierliche Gleiseigenschaften (z. B. Stützpunkt- oder Schottersteifigkeiten)
MS A : Reduktion der TDR-Werte bei $f \approx 400$ Hz	Tieffrequenterer Lage von f_{c2} (relativ zu MS B1 und B2) durch geringere Zw-Steifigkeit
MS B1 und MS B2 : Schwach ausgeprägter 'pinned-pinned'-Effekt	Härtere Zw als bei MS A lässt gegenteiliges Verhalten erwartet, Lage von f_{c2} führt zu einem breitbandigeren Bereich hoher TDR-Werten bis $f \approx 700$ Hz, so Reduktion des 'pinned-pinned'-Einflusses

³Die unterschiedlichen Schienenprofile rufen nur im höherfrequenten Bereich TDR-Unterschiede in dieser Größenordnung hervor (siehe Kapitel 4.1.1).

MS **A** bis **B2** - Laterale Richtung, Abbildung G.2

Merkmal / Bemerkung	Ursache
Reduktion der TDR-Werte bei MS A bereits bei $f \geq 80$ Hz, dagegen bei MS B1 und B2 erst bei $f = 160$ Hz	Höherfrequenterer Lage von f_2 und f_{c2} bei MS B1 und B2 gegenüber A aufgrund der höheren Zw-Steifigkeit
‘Pinned-pinned’-Effekt bei $f = 400$ bzw. 500 Hz (lokale Minima der TDR-Spektren)	‘Pinned-pinned’-Frequenz zu hoch prognostiziert
MS B1 und B2 : Höhere TDR-Werten im Bereich $f \geq 1.6$ kHz als bei MS A	Erwartung aufgrund höherer Zw-Steifigkeit, trifft jedoch im TDR-Spektrum nicht zu.

MS **C1** bis **C4** - Vertikale Richtung, Abbildung G.3

Merkmal / Bemerkung	Ursache
Ähnliche TDR-Verläufe, MS C3 : Lokales Minimum bei $f = 500$ Hz, im L_{FRF} -x-Diagramm Verlauf mit höherer TDR im direkten Nahfeld	Unbekannt
Hohe TDR-Werte im tieffrequenten Bereich, TDR-Reduktion bei $f \approx 400$ Hz (d. h. relativ tieffrequent, siehe auch L_{FRF} -x-Diagramme)	Lage von f_{c2} , Zw-Steifigkeiten sind daher zu hoch angenommenen. Durch diese geringeren Steifigkeiten auch Lage von f_2 bei $f \approx 200$ Hz.
Unterschiede der TDR-Werte im Bereich $f \leq 0.8$ kHz	Keine Korrelation zur unterschiedlichen Zw-Steifigkeit durch Materialtemperatur
Bei geringeren Temperaturen: Höhere TDR-Werte im Bereich $f \geq 2$ kHz	Höhere Zw-Steifigkeit
Ausgeprägtes lokales TDR-Minimum bei $f = 1$ kHz	‘Pinned-pinned’-Effekt. Erwartung: Durch höhere Zw-Steifigkeiten hier stärker ausgeprägter ‘pinned-pinned’-Effekt als bei MS C5 bis C8
Prognostizierte ‘pinned-pinned’-Frequenz zu hoch, L_{FRF} -x-Diagramme zeigen bei $f = 1$ kHz im Nahfeld reduzierte L_{FRF} -Werte der AP auf den Schwellen.	Schienenverschleiß, somit geringere Schienen-Biegesteifigkeit mit tieffrequenterer Lage der ‘pinned-pinned’-Frequenz.

MS **C1** bis **C4** - Laterale Richtung, Abbildung G.4

Merkmal / Bemerkung	Ursache
Gleiche TDR-Ergebnisse sind aufgrund des gleichen konstruktiven Aufbaues zu erwarten, es zeigen sich jedoch Differenzen	Unterschiedliche Zw-Steifigkeit durch Temperatur-Differenzen
MS C1 : Tieffrequente Reduktion der TDR-Werte, ca. 3 dB geringere Ausprägung der 'blocked-zone' im Bereich $f \geq 400$ Hz	Reduzierte Zw-Steifigkeit aufgrund hoher Temperatur

MS **C5** bis **C8** - Vertikale Richtung, Abbildung G.5

Merkmal / Bemerkung	Ursache
Bereich hoher TDR-Werte ist schmal ausgeprägt	Tieffrequente Lage der 'cut-on'-Frequenz f_{c2} bei $f \approx 350$ Hz
Reduzierte L_{FRF} -Werte bei AP auf der Schwelle bei $f=1$ kHz	Indiz für 'pinned-pinned'-Effekt, auch hier Differenz zur prognostizierten 'pinned-pinned'-Frequenz.
Ähnlich ausgeprägte Extrempunkte im Bereich der 'pinned-pinned'-Frequenz	Schwächer ausgeprägter 'pinned-pinned'-Effekt wird aufgrund geringerer Zw-Steifigkeit (relativ zu MS C1 bis C4) erwartet
TDR-Verlauf ähnlich wie bei MS C9	Ähnliche Konstruktion
Hohe TDR-Werte bei $f=4$ und 5 kHz bei allen MS mit Schienenprofil 60E1	Erhöhter dämpfender Einfluss der Zw (siehe auch Kapitel 4.1.3) aufgrund des verbreiterten Schienenfußes ⁴

MS **C5** bis **C8** - Laterale Richtung, Abbildung G.6

Merkmal / Bemerkung	Ursache
Geringe Differenzen der TDR-Ergebnisse	Ähnlicher konstruktiver Aufbau, ähnliche Temperaturen während der Messung
Tieffrequenten TDR-Werte nicht reduziert	Kein Einfluss der ATS (i. G. zu vertikaler Richtung); da sehr tieffrequent, ist nicht der komplette Frequenzbereich dargestellt

⁴Aufgrund ähnlicher Schienen-Werkstoffe bei den hier verglichenen MS wird die auf Seite 10 genannte Vermutung, daß die innere Dämpfung nicht ursächlich ist, gestützt.

Geringe TDR-Werte im Bereich [100;800 Hz]	Tieffrequente Lage von f_2 und f_{c2} , entsprechende Erhöhung der Gesamtschallemission wird durch hohe TDR-Werte in vertikaler Richtung reduziert
Lokales TDR-Maximum bei $f = 3.15$ kHz	Breiter Schienenfuß (Effekt des ‘foot-flapping’ und ‘cross coupling’, siehe Seite 10). Ähnliche Ergebnisse bei weiteren MS mit gleichem Schienenprofil.
MS C9 bis D3 - Vertikale Richtung, Abbildung G.7	
Merkmal / Bemerkung	Ursache
MS D3 : Im tieffrequenten Bereich geringste TDR-Werte aller untersuchten MS ⁵ . L_{FRF} -Diagramme zeigen, bei Anregung mit schweren Hammer, ansteigende Werten zwischen 0.5 und 1 m	Lokale Diskontinuität des Gleises (z. B. abweichende Stützpunkt- oder Schottersteifigkeit)
MS C9 : Geringe TDR-Werte zeigen sich auch bei MS C5 bis C8	Ähnliche Konstruktion
Hochfrequenter Lage von f_2 und f_{c1} und tieffrequente Lage von f_{c2}	Geringes Schwellengewicht (Stahl-Trogswelle) und ‘mittelharte’ Zw führen zu tieffrequenter Lage von f_{c2} . Leichte Schwelle führt auch zu reduzierter Energieaufnahme des Tilgereffektes bei f_2
L_{FRF} -x-Diagramme: Kein Nahfeld-Fernfeld-Unterschied, auch bis zu einem Abstand von 50 m	Reduziertes Schwellengewicht
MS C9 : ‘Pinned-pinned’-Effekt ist geringer als bei MS C5 bis C8 ausgeprägt, leicht erhöhte TDR-Werte im akustisch relevanten Bereich	Hochfrequente Lage der ‘cut-on’-Frequenz f_{c2} bei $f \approx 570$ Hz

⁵Bei MS **D2** sind die TDR-Werte im Bereich $f \leq 200$ Hz nur eingeschränkt aussagefähig und tendenziell betragsmäßig zu hoch, da hier die L_{FRF} an nur 16 statt 29 AP ermittelt wurde (aufgrund der Gleichung A.11 erhöhen weniger L_{FRF} -Ergebnisse in der Nenner-Summe die TDR-Werte).

MS D2 : Hohe TDR-Werte im Bereich [0.8;2 kHz], kein lokaler TDR-Einbruch durch den ‘pinned-pinned’-Effekt	Geringes Schwellengewicht (strukturendynamisch relevant ist nur ein Betonblock) führt zu hochfrequenter Lage von f_2 und f_{c1} . Elastische Verbindung beider Blöcke stellt eine reduzierten Lager-, speziell Drehsteifigkeit um die y-Achse dar
L_{FRF} -x-Diagrammen: Bei $f=0.8, 1.25$ und 1.6 kHz um ca. 5 dB reduzierte Werte der AP auf der Schwelle. MS D2 : Bei $f=200$ und 250 Hz bis zur letzten AP	Unbekannt. Tritt bei Monoblock-Schwellen-Oberbau typischerweise nur bei einer Terzfrequenz auf
MS C9 : Bei $f=1.6$ kHz Reduktion der L_{FRF} -Werte in einem Abstand von ca. 2 m zum AP ₁	Konstruktive Gleis-Diskontinuität
MS C9 bis D3 - Laterale Richtung, Abbildung G.8	
Merkmal / Bemerkung	Ursache
MS C9 : Im Bereich $f \leq 1.6$ kHz ähnlicher TDR-Verlauf wie bei MS B1 und B2	Ähnliche Konstruktion, Differenzen im höherfrequenten Bereich aus verschleissbedingten Eigenfrequenz-Änderungen der Schiene resultieren (siehe Seite 103)
MS D3 : Im Bereich $f \leq 160$ Hz unplausible Verläufe in den L_{FRF} -x-Diagrammen bis zu einem Abstand von ca. 4 m	Unklar. Daher wird in diesem Frequenzbereich allein das Ergebnis der MS D1 (gleiche Konstruktion) analysiert.
MS D1 : Im Bereich [100;125 Hz] mit globalem Maximum ähnlicher TDR-Verlauf wie MS C9	Ähnliche Konstruktion
MS D2 : Breitbandig hohe TDR-Werte, annähernd gleichen TDR-Werte der MS C9 , D1 und D3	Höherfrequente Lage von f_{c2} im Bereich $f \geq 1.25$ kHz durch höhere Schottersteifigkeit aufgrund verdoppelter Schwellen-Stirnfläche und geringem relevanten Schwellengewicht (ein Schwellenblock)

MS **D4** und **D5** - Vertikale Richtung, Abbildung G.9

Merkmal / Bemerkung	Ursache
MS D4 : Gering ausgeprägter 'pinned-pinned'-Effekt, L_{FRF} -Diagramme zeigen in den erwarteten Frequenzen keine reduzierten Werte der AP auf der Schwelle.	Hohe Stützpunktsteifigkeit bei fehlender Zw (daher allein aufgrund der Klemmplatten-Elastizität und Vorlast durch Spannklemme) lässt deutlichen 'pinned-pinned'-Effekt erwarten. Große Auflagerfläche der Schiene auf Rippenplatte beschränkt jedoch die Ausbildung der 'pinned-pinned'-Eigenform.
MS D5 (mit Zw): Typische Merkmale der 'pinned-pinned'-Frequenz	
MS D5 : Gering ausgeprägtes lokales Minimum im Bereich $f=1$ kHz	Hochfrequente Lage der f_{c2} bei $f=1070$ Hz, anschließende 'blocked-zone' und große Schienenfußbreite in Kombination mit harter Zw

MS **D4** und **D5** - Laterale Richtung, Abbildung G.10

Merkmal / Bemerkung	Ursache
MS D4 : Im Bereich $f \geq 125$ Hz geringe TDR-Werte	Reduzierte Stützpunkt-Elastizität ⁶ , fehlender Tilgereffekt bei f_2 , deutlich ausgebildete 'blocked-zone' durch hohe Stützpunktsteifigkeit (siehe Vergleich mit MS D5). Lokales TDR-Minimum aufgrund des 'pinned-pinned'-Effektes (typische Merkmale in L_{FRF} -Diagrammen) schwach ausgeprägt.
Hohe TDR-Werte im Bereich $f \geq 1.6$ kHz	Hohe Bedämpfung der Schienenfußauslenkung (fehlende Zw bei MS D4 bzw. relativ harte Zw bei MS D5), unterstützt durch große Schienenfußbreite (Profil 60E1, gleicher Effekt bei MS C5 bis C8)

⁶In lateraler Richtung kann durch den Wegfall der Zw, aufgrund des weiter bestehenden Formschlusses des Schienenfußes in der Rippenplatte, von einer geringeren Steifigkeitszunahme als in vertikaler Richtung ausgegangen werden.

MS **E1** und **E2** - Vertikale Richtung, Abbildung G.11

Merkmal / Bemerkung	Ursache
Breitbandig hohe TDR-Werte	Großer spektraler Abstand von f_2 und f_{c2} durch leichte Schiene, hohe Zw-Steifigkeit und (da erneuerter Oberbau und geringe Streckenbelastung) geringe Schottersteifigkeit
Sehr hohe TDR-Werte von bis zu 20 dB/m	Unbekannt
Quantitative Unterschiede bei ähnlichem qualitativen Spektrum der TDR-Ergebnisse im Vergleich beider MS, MS E1 im Bereich $f \geq 500$ Hz um bis zu 5 dB höhere TDR-Werte	Unbekannt
‘Pinned-pinned’-Effekt nicht im TDR-Spektrum, jedoch in den L_{FRF} -x-Diagrammen (reduzierte Werte bei AP auf den Schwellen bei $f=0.8, 1.25$ und 1.6 kHz) sichtbar	Hohe Zw-Steifigkeit lässt diesen Effekt erwarteten. Das Auftreten in mehreren Frequenzen kann nicht mit der ‘pinned-pinned’-Theorie (siehe Kapitel 4.1.2) begründet werden.

MS **E1** und **E2** - Laterale Richtung, Abbildung G.12

Merkmal / Bemerkung	Ursache
Hohe TDR-Werte bis $f \approx 200$ Hz	Hochfrequente Lage von f_2 und f_{c2} , daher hohe TDR-Werte
Lokales TDR-Maximum bei $f \approx 500$ Hz	Hochfrequente Lage der ‘cut-on’-Frequenz führt nur zu schmalbandig geringeren TDR-Werten
Geringe TDR-Werte im Bereich [1.25;2 kHz]	Geringere Dämpfung der Schiene durch die Zw aufgrund des kleineren Schienenfußes

MS **F** bis **H** - Vertikale Richtung - Abbildung G.13

Merkmal / Bemerkung	Ursache
---------------------	---------

MS G und H : Tieffrequent geringe TDR-Werte	Versteifung des Schotterbettes bei dynamischer Belastung im akustischen Frequenzbereich durch die Verschäumung, TDR-Ergebnisse ähnlich denen der MS mit ATS (MS C5 bis C9). MS G : Weitere TDR-Reduktion durch die USM (dynamische Entkopplung zum Unterbau)
MS G : Im Bereich [125;200 Hz] hohe TDR-Werte	Schotterverschäumung, daher Erschütterungs- (mittels USM) und Luftschall-Reduktion (aufgrund TDR-Ergebnis)
Hochfrequente Lage des lokalen TDR-Maximums bei $f=315$ Hz	Hochfrequente Lage von f_2 durch Schotterbettversteifung aufgrund der Verschäumung
MS F : Lokales TDR-Minimum bei $f=315$ Hz	Sichtbar im L_{FRF} -x-Diagramm: Ab einem Abstand von ca. 1.5 m ansteigende L_{FRF} -Werte, daher insgesamt geringere TDR-Werte
TDR-Unterschiede bei $f \approx 1.6$ und 2 kHz	Unbekannt, da in diesem Bereich keine relevanten konstruktiven Differenzen
Hohe TDR-Werte im Bereich $f \geq 4$ kHz	Tilger-Effekt durch zweiseitig eingespannte Rippenplatte (siehe Kapitel 5.8). Analytisch ermittelte Resonanzfrequenz $f_{Zw-Rp-Zwp}$ (Basis: statische Steifigkeiten, daher real höherfrequent) bei $f \approx 1.8$ kHz. Zusätzliche Dämpfung aufgrund des großen Schienenprofils (siehe MS C5 bis C8)
MS F bis H - Laterale Richtung - Abbildung G.14	
Merkmal / Bemerkung	Ursache
Gleiche TDR-Werte der drei MS	Keine höhere Schottersteifigkeit, da Verschäumung (im Gegensatz zur vertikalen Richtung) allein im Lastabtragungsbereich <i>unterhalb</i> der Schwellen (siehe Tabelle H.1) vorhanden

L_{FRF} -x-Diagramme: ‘pinned-pinned’-
Frequenz bei $f=500$ Hz, bestätigt
durch lokales Minimum im TDR-
Spektrum

Hohe TDR-Werte im Bereich f
 ≥ 2 kHz im Vergleich zu MS mit
gleichem Schienenprofil

Tilger-Effekt, der sich durch die
zweiseitig eingespannte Rippenplatte
ergibt (siehe Kapitel 5.8 und ähnliche
TDR-Werte der MS I, hier jedoch
weichere Zw)

MS I - Vertikale Richtung, Abbildung G.15

Merkmal / Bemerkung	Ursache
Tieffrequente TDR-Werte von ca. 10 dB/m	Typisch für einen einfach elastisch gelagerten Balken [94]
‘cut-on’-Frequenz f_{c2} bei $f \approx 130$ Hz	Weicher Stützpunkt ⁷ , Bestätigung durch fehlenden Nahfeld-Fernfeld-Unterschied in den höherfrequenten L_{FRF} -x-Diagrammen, auch bei ähnlichem Oberbau [46]
Keine Resonanzen bei f_2 und f_{c1}	Schwellen starr in der Betonfüllung gelagert
L_{FRF} -x-Diagramm: ‘Pinned-pinned’-Effekt bei $f=0.8$ kHz	Erwartung: f_{pp} bei $f \approx 1.06$ kHz, daher weiterer Einfluss (evtl. Schienenverschleiß); schwache Ausprägung durch weiche Stützpunkte
Hohe TDR-Werte im Bereich $f \geq 2$ kHz im Vergleich mit MS mit gleichem Schienenprofil	Tilger-Effekt, der sich durch die zweiseitig eingespannte Rippenplatte ergibt (siehe Kapitel 5.8 und ähnliche TDR-Werte der MS I, dort jedoch weichere Zw)

MS I - Laterale Richtung, Abbildung G.16

Merkmal / Bemerkung	Ursache
Geringste TDR-Werte aller betrachteten MS	Lage von f_{c2} bei $f \approx 40$ Hz, daher tieffrequent freie Wellenausbreitung in der Schiene
L_{FRF} -x-Diagramme: Im Bereich $f \leq 125$ Hz ‘gerade’ L_{FRF} -x-Verläufe, höherfrequent globales Minimum bei ca. 1.5 m, im Bereich [200;630 Hz] auch bei ca. 5 m	Unbekannt, keine sichtbaren Diskontinuitäten. Höhere Vorspannkräfte durch die Spannklemme ⁸ würden auch in vertikaler Richtung sichtbar sein, das ist hier nicht der Fall. Daher weitere, unbekannte Einflussfaktoren.
Hohe TDR-Werte im Bereich [0.4;1 kHz]	‘Blocked-zone’ aufgrund der Lage der ‘pinned-pinned’-Frequenz

⁷Doppelt elastische Stützpunktstruktur mit Zw und Zwp, daher ist die Steifigkeit der Feder-Reihenschaltung relevant. Durch die relativ hohe Material-Temperatur während der Messung kann von reduzierter Zw- und Zwp-Steifigkeit ausgegangen werden.

⁸Aufgrund der spektralen Lage können allein Änderungen an der Schiene für dieses Ergebnis relevant sein.

Geringe TDR-Werte im Bereich $f \geq 1$ kHz	Reduzierte Dämpfung der Schienenfußschwingungen durch weichen Stützpunkt
MS J - Vertikale Richtung, Abbildung G.15	
Merkmal / Bemerkung	Ursache
Tieffrequent geringe TDR von ca. 2 dB/m	Reduzierter Resonanzeffekt bei f_2 durch reduzierte Schwellen-Mobilität aufgrund der Anbindung der Schwelle <i>unter</i> dem Rad-Aufstandspunkt an die Schienenbereiche <i>vor / nach</i> dem Rad-Aufstandspunkt
Hohe TDR-Werte bei $f=400$ Hz	Lage von f_2
Lokales TDR-Maximum im Bereich [0.63;1 kHz]	‘Blocked-zone’, Reduzierte Ausprägung durch tieffrequente Lage der ‘cut-on’-Frequenz f_{c2}
L_{FRF} -x-Diagramm: Bei $f=500$ Hz reduzierte Werte der AP auf der Schwelle	Geringe Ausprägung durch breite Schienenauflagerflächen und weichen Stützpunkt (Gesamtsteifigkeit des Doppelstützpunkt ca. 360 kN/mm [24])
Geringfügig höhere TDR-Werte im Bereich $f \geq 2$ kHz	Bedämpfte Schienenfußschwingung durch breite Schienen-Auflagerfläche
MS J - Laterale Richtung, Abbildung G.16	
Merkmal / Bemerkung	Ursache
Lokales Maximum bei $f=250$ Hz, hohe TDR-Werte im Bereich $f \leq 1$ kHz	Lage von f_2 , in höherfrequenter Lage als prognostiziert, da durch vergrößerte Schwellen-Stirnfläche höhere Schottersteifigkeit. Verstärkt durch hohe laterale Steifigkeit des Gleisrostes
Lokales Minimum bei $f=500$ Hz, hohe TDR-Werte im Bereich [500;800 Hz], im Abstand $x > 15$ m bei $f=400$ und 500 Hz reduzierte Werte der AP auf der Schwelle	‘Pinned-pinned’-Effekt
Lokale Minima im Bereich [0.8;3.15 kHz] und ‘gerader Verlauf’ in L_{FRF} -x-Diagrammen	Freie Schienenschwingungen, da Bereich $\geq f_{c2}$

Ansteigende TDR-Werte im Bereich $f \geq 2.5$ kHz	Dämpfung der Schienenfußschwingungen durch Zw, aufgrund großer Auflagerfläche (je zwei Zw pro Stützpunkt) deutlich ausgeprägt
---	---

MS K - Vertikale Richtung, Abbildung G.15

Merkmal / Bemerkung	Ursache
Hohe TDR-Werte im Bereich $f \geq 700$ Hz	Schienenstoß, aufgrund des Abstandes von 6 m nur im Bereich oberhalb der 'cut-on'-Frequenz f_{c2} möglich; Wirkung durch Impedanzsprung (Sperrmasse) bei balkenförmigen Elementen ⁹
Reduzierte 'pinned-pinned'-Eigenformen	Nicht-periodische Schwellenabstände unter und in ca. 2 m Abstand hinter dem Stoß
Hohe TDR-Werte im Bereich $f \geq 2.5$ kHz	Kontaktflächen-Reibungsdämpfung innerhalb der Laschenverbindung

MS K - Laterale Richtung, Abbildung G.16

Merkmal / Bemerkung	Ursache
TDR-Werte im Bereich $f \leq 250$ Hz geringfügig reduziert	Reduzierten Schwellenmobilität
L_{FRF} -x-Diagramme bei Frequenzen $f \geq 315$ Hz und Abständen ≥ 6 m um ca. 20 dB geringere Werte, erhöhte TDR-Werte im Bereich $[0.4; 1$ kHz] ¹⁰	Schienenlasche

Anmerkung Stromschiene / Fangschiene / dritte Fahrschiene An den folgenden MS ist eine seitliche Stromschiene zur Fahrstromversorgung, neben einer Fahrschiene eine Fangschiene und / oder innenliegend neben einer (Normalspur-) Fahrschiene eine Meterspur-Fahrschiene angebracht.

Der Einfluss auf das strukturdynamische Gleisverhalten ist aufgrund fehlender Untersuchungen unbekannt.

Möglicherweise werden diese Schienen, ähnlich der (zweiten) nicht angeregten Fahrschienen bei TDR-Messungen, durch die Schwellen (und daher vor allem niederfrequent) angeregt. Möglich ist auch eine zusätzliche Dämpfung durch sich einstellende

⁹Die gesamte Biegesteifigkeit der Schiene ist zwar durch die Lücke reduziert, jedoch ergibt sich durch die formschlüssig montierten Laschen eine signifikant höhere Steifigkeit.

¹⁰Aufgrund der spektralen Lage wird dies nicht durch die Schwellenlagerung (Kies/Sand) verursacht.

Resonanzeffekte, eine Reduktion der Schwellenschwingung durch die zusätzliche Lagerung oder eine zusätzliche Energieweiterleitung mittels dieser Schienen. Hier müssen die oft unterschiedlichen Schienenprofile und -Trägheitsmomente, bei dritten Fahrschienen oft aufgrund abweichender Verschleißzustände, beachtet werden.

Würden zwei konstruktiv gleiche MS vorliegen, die sich allein durch eine zusätzliche Schiene unterscheiden, wäre ein objektiver Vergleich möglich. Bei den konstruktiv ähnlichen MS **D5** (ohne Stromschiene) und **L** (mit Stromschiene) bestehen jedoch weitere Differenzen bei Schienenprofil, Bauart der Zw und Schwellenabstand. Im Vergleich zeigt MS **L** in vertikaler Richtung vor allem im Bereich $f \leq 125$ Hz um ca. 2 dB höhere TDR-Werte. In lateraler Richtung zeigen sich hier im Bereich [0.125;1.6 kHz] mit bis zu ca. 8 dB signifikant höhere TDR-Werte. Aufgrund der unterschiedlichen spektralen Lage kann kein Effekt ohne weitere Analyse direkt auf die Stromschiene zurückgeführt werden.

Somit kann keine eindeutige Aussage zu dem Einfluss gemacht werden.

MS **L und **M****, Vertikale Richtung - Abbildung G.17

Merkmal / Bemerkung	Ursache
MS M : Geringe TDR-Werte bei $f = 80$ Hz, ähnlich MS C5 und C8	Hohe Impedanz der Tunnelsohle, vergleichbar der ATS
MS L : Prognostizierte 'pinned-pinned'-Frequenz zu hoch, L_{FRF-x} -Diagramme: Reduzierte Werte der AP auf den Schwellen bei $f = 500$ Hz	Unbekannt
MS L : Lokales TDR-Maximum bei $f = 800$ Hz	Großer Schwellenabstand, daher geringes längenspezifisches Gewicht und hochfrequente Lage von f_2 und f_{c2} , jedoch reduzierte Energieaufnahme des Tilgers bei f_2

MS **L und **M****, Laterale Richtung - Abbildung G.18

Merkmal / Bemerkung	Ursache
Hohe TDR-Werte im gesamten Spektrum	Hochfrequente Lage von f_2 und f_{c2} durch hohe Zw-Steifigkeit und geringes Schienengewicht. Freie Wellenausbreitung dominiert erst im Bereich $f \geq 630$ Hz
L_{FRF-x} -Diagrammen bei $f = 400$ und 500 Hz: Reduzierte Werte der AP auf den Schwellen, jedoch kein lokales Minimum im TDR-Spektrum	Hochfrequente Lage von f_{c2}
MS L : Hohe TDR-Werte im Bereich [250;630 Hz]	'Blocked-zone' aus der 'pinned-pinned'-Frequenz resultierend, tieffrequenter Lage als bei MS M

Anmerkung Bogenlage Die folgenden MS befinden sich in Gleisbögen mit Radien ≤ 200 m. Aufgrund fehlender belastbarer Aussagen zum Einfluss des Gleisbogens auf das Dämpfungsverhalten bzw. die TDR bietet sich für allgemeine Aussagen der TDR-Vergleich zwischen konstruktiv identischen MS an. Im Rahmen dieser Arbeit sind jedoch keine MS mit dem erforderlichen exakt identischen Aufbau vermessen worden. Ähnliche Konstruktionen weisen allein die MS **D4** und **S** auf, relevante Unterschiede bestehen jedoch durch das Schienenprofil und die dritte Fahrschiene (Meterspur).

Der Vergleich zwischen den TDR-Ergebnissen zeigt bei MS **S** die folgenden Merkmale.

Vertikale Richtung - Abbildungen G.9 und G.23: Signifikant geringere Werte im Bereich $f \approx 250$ Hz (ähnlich den MS **C5** bis **C8**), Grund sind ähnliche Unterbausteifigkeiten durch Frost-Temperaturen während der Messung)

Signifikant höhere Werte im Bereich $f \geq 500$ Hz.

Laterale Richtung - Abbildungen G.10 und G.24: Signifikant höhere Werte im Bereich $f \leq 630$ Hz, Grund: Gleisfrequenz f_2 bei $f \approx 240$ Hz. Durch eine mögliche höhere laterale Steifigkeit der Schiene aufgrund der Bogenkrümmung wird diese Frequenz, ebenso wie 'cut-on'-Frequenz f_{c2} , im höherfrequenten Bereich erwartet.

Im Bereich [0.8;3.15 kHz] zeigen beide MS ähnliche Werte.

Bei $f \approx 4$ und 5 kHz geringere Werte (Einfluss des größeren Schienenprofils, siehe Ergebnisse auf Seite 78).

Im Vergleich zu konstruktiv ähnlichen MS dieser Arbeit ist auffällig, dass im Bereich $f \geq 4$ kHz alle MS in Bogenlage relativ hohe TDR-Werte zeigen.

Grundsätzlich wird auch ein Einfluss durch die bei Bogenlage oft unterschiedlichen Verschleißzustände und damit differenzierenden Schienen-Eigenfrequenzen erwartet. Mit abnehmenden Bogenradius erhöht sich die Differenz zwischen bogeninnerem und -äußerem Stützpunktstand, der mit zweiter Potenz in die 'pinned-pinned'-Frequenz eingeht. Durch beide Einflüsse wird der gleichförmige Aufbau des Gleises gestört und eine höhere TDR erwartet.

Somit ergibt sich keine eindeutige und belastbare Aussage, jedoch finden sich Indizien für höhere TDR-Werte bei Gleisen in Bogenlage in beiden Schwingungsrichtungen.

MS **N** und **O** - Vertikale Richtung, Abbildung G.19

Merkmal / Bemerkung

Ursache

Tieffrequent geringe TDR-Werte

MS **N**: Tieffrequente Lage von f_2 aufgrund des hohen Schwellengewichtes.
MS **O**: Fehlende Schwelle, daher kein Tilgereffekt bei f_2

MS N : L_{FRF} -Werte im Bereich [1;1.6 kHz] bei AP ₃ , AP ₈ , AP ₁₄ und AP ₁₈ auf der Schwelle um ca. 10 dB geringer als bei den benachbarten AP, auch im weiteren Fernfeld.	Unbekannt, da ‘pinned-pinned’-Effekt bei $f=2$ kHz erwartet wird
MS N : Zweiter ‘pinned-pinned’-Effekte aufgrund des (relativ geringen) Stützpunktabstandes bei $f \approx 9$ kHz	Kann nicht nachgewiesen werden, da Hammerkraft nur bis $f=5$ kHz nutzbar (siehe Abbildung J.3).
MS N : ‘pinned-pinned’-Frequenz bei $f=1.6$ kHz	Ähnlich der Prognose
MS O : Kein ‘pinned-pinned’-Effekt bei den erwarteten Frequenzen, TDR-Maximum im Bereich [0.5;1.25 kHz]	Verstärkung durch ‘blocked-zone’-Effekt
MS O : Hohe TDR-Werte im Bereich [0.5;1.25 kHz] im Vergleich mit MS I	Bogeneinfluss, Erwartung: Ähnliches Verhalten, da ähnliche Konstruktion
Reduzierte TDR-Werte im Bereich [0.6;1.6 kHz]	Tieffrequente Lage der ‘cut-on’-Frequenz
MS O : L_{FRF} -x-Diagramme mit reduzierten Werte im Bereich $f \geq 1.25$ kHz, entsprechend höhere TDR-Werte	‘Sperrmassen’-Effekt durch Schaltkasten der Leit- und Sicherungstechnik, im Abstand von ca. 3.5 m zum AP ₁ am Schienenfuß installiert.
MS N und O - Laterale Richtung, Abbildung G.20	
Merkmal / Bemerkung	Ursache
MS N : Hohe TDR-Werte im Bereich $f \leq 160$ Hz	Freie Schienenschwingungen durch tieffrequente Lage von f_{c2} .
MS O : Lokales Minimum im Bereich [160;250 Hz], höhere TDR-Werte im Bereich [400;630 Hz]	‘Blocked-zone’ aus der ‘pinned-pinned’-Frequenz resultierend
MS N : Globales Minimum bei $f = 250$ Hz	Nichtlinearitäten des Gleises (Hammerwechsel bei $f=200$ Hz), höhere L_{FRF} -Werte als bei AP ₁ bei $f=200$ und 250 Hz bis zu einem Abstand von ca. 1.5 m

MS N : Lokales Maximum bei $f=0.4$ und 2 kHz	Doppelter Stützpunktabstand, jedoch tieffrequenter als prognostiziert, ebenfalls kein ‘pinned-pinned’-Effekt in den L_{FRF} -x-Diagrammen
MS N : Keine erhöhten TDR-Werte im Bereich $f \geq 2$ kHz	Bogenlage, Erwartung erhöhter TDR-Werte aufgrund der Schienenfußbedämpfung bei großem Schienenprofil
MS N : Reduzierte Ausbildung des Tilgereffektes bei f_2	Rahmenkonstruktion der Schwelle und räumliche Kopplung an die Bereiche <i>vor</i> bzw. <i>nach</i> dem Radaufstandspunkt
MS N : Kein ausgebildeter ‘pinned-pinned’-Effekt in den L_{FRF} -x-Diagrammen (im Gegensatz zur vertikalen Richtung)	Unbekannt
MS O , L_{FRF} -x-Diagramme: ‘Pinned-pinned’-Effekt im Bereich [400;630 Hz]	Geringfügig höherfrequent als analytisch prognostiziert

MS **P1** bis **R** Aufgrund der geringen Bogenradien und der durch die Dämpfer veränderten Schienen-Kennwerte sind die ‘pinned-pinned’-Frequenzen für die MS **P1** bis **R** in den Tabellen 9.25 und 9.27 aufgeführt.

Tab. 9.25: MS **P1** bis **R** - vertikale ‘pinned-pinned’-Frequenzen

		MS P1 / MS Q		MS P2 / MS R	
Bogen-		-aussen	-innen	-aussen	-innen
Ohne Dämpfer	exakt	705 Hz	735 Hz	695 Hz	728 Hz
	Terzband	630 Hz [†]	800 Hz	630 Hz [§]	800 Hz
Mit Dämpfer	exakt	579 Hz	604 Hz	539 Hz	564 Hz
	Terzband	630 Hz	630 Hz	500 Hz	630 Hz [‡]

[†] Abstand zum 800 Hz-Terzband beträgt 3 Hz.

[§] Abstand zum 800 Hz-Terzband beträgt 13 Hz.

[‡] Abstand zum 500 Hz-Terzband beträgt 2 Hz.

Dabei wurden folgenden Randbedingungen berücksichtigt:

- Differenzen der Stützpunkt-Abstände der bogeninneren zur -äußeren Schiene, resultierenden aus den relativ geringen Bogenradien,
- Erhöhung der ‘Schienen’-Masse und -Trägheitsmomente durch die Schienendämpfer.

Vertikale Richtung, Abbildung G.21

Es ergeben sich die in Tabelle 9.25 genannten ‘pinned-pinned’-Frequenzen.

Merkmal / Bemerkung	Ursache
MS P1 und P2 : TDR-Differenzen im Bereich [2.5;4 kHz]	Unterschiedliche Verschleißzustände der bogeninneren und -äußeren Schiene
Der Unterschied durch die Installation der Schienendämpfer fällt unterschiedlich aus: <ul style="list-style-type: none"> MS P1 zu Q: Erhöhung der TDR in den Bereichen [200;250 Hz] und [1.6;2 kHz] MS P2 zu R: Erhöhung der TDR in den Bereichen [630;800 Hz] und [1.25;2 kHz], Reduktion im Bereich [315;400 Hz]. 	Erwartung: Höhere TDR-Werte durch Dämpfer, bereits bei Dämpferbauart der MS Q im geraden Gleis nachgewiesen [5] [89]. Plausibel: Einfluss der Bogenlage und / oder dritte Fahrschiene. Dritte Fahrschiene mit geringerer Impedanz (aufgrund der fehlenden Dämpfer) leitet einen Teil der eingebrachten Schwingungsenergie weiter
TDR-Spektrum mit reduzierten (MS Q) bzw. keinem lokales Minimum (MS R)	Einfluss der Schienendämpfer auf den ‘pinned-pinned’-Effekt
Keine Anzeichen der Gleisfrequenzen f_2 , f_{c1} und f_{c2}	Einfluss der Bogenlage, Erwartung: Hochfrequentes TDR-Maximum durch hochfrequente Lage von f_2 und f_{c2}

Laterale Richtung, Abbildung G.22

Es ergeben sich die in Tabelle 9.27 genannten ‘pinned-pinned’-Frequenzen.

Tab. 9.27: MS **P1** bis **R** - laterale ‘pinned-pinned’-Frequenzen

	Bogen-	MS P1 / MS Q		MS P2 / MS R	
		-aussen	-innen	-aussen	-innen
Ohne Dämpfer	exakt	297 Hz	310 Hz	293 Hz	306 Hz
	Terzband	315 Hz	315 Hz	315 Hz	315 Hz
Mit Dämpfer	exakt	244 Hz	254 Hz	227 Hz	238 Hz
	Terzband	250 Hz	250 Hz	250 Hz †	350 Hz

† Abstand zum 200 Hz-Terzband beträgt 2 Hz.

Merkmal / Bemerkung	Ursache
MS P1 und P2 : Ähnliche TDR-Werte, geringfügig höhere Werte der MS P2 allein bei $f=125, 250, 630$ Hz und im Bereich [1.25;2.5 kHz]	Ähnliche Konstruktion
Keine Anzeichen der Gleisfrequenzen f_2, f_{c1} und f_{c2}	Einfluss der Bogenlage, 'blocked-zone', nach der 'pinned-pinned'-Frequenz im Bereich [400;800 Hz] (siehe Tabelle 9.27)
L_{FRF} -x-Diagramme im Bereich [315;630 Hz] im Abstand ≥ 15 m: Anstieg der L_{FRF} -Werte	Unbekannt, Gleis zeigt optisch kontinuierlichen Zustand
MS Q : Bis ca. 3 dB, MS R : Bis ca. 13 dB höhere TDR-Werte, jeweils im Bereich $f \geq 200$ Hz	Schienenendämpfer, stimmt bei MS R mit den Hersteller-Angaben des Nutzfrequenzbereiches überein
MS Q und R : Im Bereich [1;4 kHz] höhere TDR-Werte	Unbekannt, Erwartung: Dämpfereinfluss allein im tieferfrequenten Bereich
MS S bis U - Vertikale Richtung, Abbildung G.23	
Merkmal / Bemerkung	Ursache
MS S : Geringe TDR-Werte im Bereich $f \leq 125$ Hz	Hohe Unterbau-Impedanz, ähnlich der ATS, aufgrund des gefrorenen Schotterbettes
MS T und U : Geringe, jedoch unterschiedliche TDR-Werte	Tunnellage und Gleiskonstruktion, tieffrequente Unterschiede durch lokal unterschiedliche Schotterbettdicken
MS S : Hohe TDR-Werte im Bereich $f \geq 315$ Hz	Hochfrequente Lage der 'cut-on'-Frequenz bei f_{c2} durch hohe Zw-Steifigkeit (aufgrund geringer Temperatur)
MS S : Kein lokales Minimum bei 'pinned-pinned'-Frequenz, L_{FRF} -x-Diagramme: Reduzierte Werte der AP auf der Schwelle	Bogenlage (unterschiedliche Stützpunktabstände bogeninnen / bogenaußen) und dritte Fahrchiene, hohe TDR-Werte der Nachbarfrequenzen, Erwartung: Verstärkter Effekt durch hohe Zw-Steifigkeit (aufgrund geringer Temperatur)

Ausgehend von den bekannten Konstruktionsdaten sind bei MS T und U ähnliche TDR-Verläufe zu erwarten. MS T : Lokales Minimum im Bereich [315;500 Hz]	Relativ schwere dritte Fahrschiene (konstruktiv mit Fangschiene verbunden), nichtlineares Verhalten (z. B. Reibflächendämpfung) bei unterschiedlichen Kraftamplituden (durch den Hammerwechsel zwischen $f=250$ und 315 Hz), ebenfalls diskontinuierlicher L_{FRF} -x-Verlauf
MS U : Annähernd konstante TDR-Werte im gesamten Spektrum	Unbekannt, auffälliges lokale Maximum bei $f=2$ kHz (auch bei MS T)
L_{FRF} -x-Diagramme bei MS T bei $f=0.8$ kHz, MS U bei $f=0.8$ und 1 kHz: Reduzierte Werte der AP auf der Schwelle, in TDR-Spektren nicht sichtbar	Bogeneinfluss
MS S bis U - Laterale Richtung, Abbildung G.24	
Merkmal / Bemerkung	Ursache
MS S : Hohe TDR-Werte im Bereich $f \leq 200$ Hz	Zusätzliche Dämpfung durch gefrorenes Schotterbett (i. G. zur vertikalen Richtung, kein TDR-Reduktion)
MS S : Hohe TDR-Werte im Bereich $f \geq 250$ Hz	Hochfrequente Lage von f_{c2} durch hohe Zw-Steifigkeit (aufgrund geringer Temperatur)
MS T : Ähnliche TDR-Werte wie MS S	Ähnliche Konstruktion
MS U : Unterschiedliche TDR-Werte wie MS S in den Bereichen $f \leq 500$ Hz und [2.5;3.15 kHz]	Unbekannt, Platzierung der Fangschiene (an dritter Fahrschiene bzw. bogeninnerer Fahrschiene) ist unplausibel, da diese konstruktive Differenzen auch zwischen MS S und T vorliegen und trotzdem ähnliche Ergebnisse resultieren.
L_{FRF} -x-Diagramme: Typische Anzeichen des ‘pinned-pinned’-Effektes bei $f=400$ und 500 Hz	Erwartung: Lokale Minima bei gleicher Frequenz, tritt jedoch (ebenso wie in vertikaler Richtung) nicht auf

9.3 Ergebnisse der TDR-Analyse - Zusammenfassung

Die Erkenntnisse aus den TDR-Analysen des Kapitels 9.2 werden im Folgenden zusammenfassend vorgestellt.

- TDR-Ergebnisse sind von zahlreichen Randbedingungen abhängig. Bei einigen Messstellen und Frequenzen zeigt sich: Temperatur +15 K → TDR ca. -5 dB; Hammergewicht -60% und Schlagkalotte Stahl statt Gummi → TDR ca. -8 dB. Daher ist die Vergleichbarkeit bei unbekanntem Randbedingungen beschränkt.
- In den meisten TDR-Ergebnissen können die aus Simulationsergebnissen bekannten konstruktiven Einflüsse anhand der Gleisfrequenzen (siehe Seite 7) plausibel nachvollzogen werden. Je größer die konstruktiven Differenzen zwischen Messgleis und simuliertem Gleis, desto stärker weichen diese Frequenzen ab.
- In den L_{FRF} -x-Diagrammen wird im Bereich kleiner der ‘cut-on’-Frequenz f_{c2} deutlich, dass keine Wellenausbreitung vorliegt. Die unterschiedliche Neigung der L_{FRF} -x-Verläufe zeigt den Abstand auf, ab dem durch die starke Reduktion keine nutzbaren Signale mehr übertragen werden. In lateraler Richtung ist der Effekt geringer als in vertikaler Richtung ausgeprägt.
- In den L_{FRF} -x-Diagramme wird der ‘pinned-pinned’-Effekt deutlich. Es zeigen sich bei den AP *auf Schwelle* um typischerweise 5–10 dB geringere L_{FRF} -Werte als bei den AP *im Schwellenfach*.
- Die ‘pinned-pinned’-Frequenzen zeigen sich in den Ergebnissen (L_{FRF} -x-Diagramme und TDR-Spektren) oft bei tieferen Frequenzen als durch Gleichung 4.3 prognostiziert. Differenzen in diesem Umfang können nicht durch einen möglichen Schienenverschleiß begründet werden.
- Bei Stützpunkten mit erhöhter Steifigkeit zeigen sich, im Gegensatz zu Simulationsergebnissen, nicht immer stärker ausgeprägte ‘pinned-pinned’-Effekte.
- Die TDR in lateraler Richtung zeigt (im Vergleich mit TDR in vertikaler Richtung) die folgenden Eigenschaften:
 1. Die Lage der Gleisfrequenzen wurde mit 90% (Zw) bzw. 80% (Schotter) geringerer Steifigkeit als in vertikaler Richtung prognostiziert. Für diese Frequenzen zeigen sich entsprechende Indizien in den TDR-Ergebnissen und bestätigen so diese Annahme. Im Gegensatz zur vertikalen Richtung ist eine sichere Verifikation jedoch aufgrund weiterer spektral angrenzender Effekte nicht möglich.
 2. Der ‘pinned-pinned’-Effekt ist, in Form des schmalbandigen lokalen Minimums und der folgenden ‘blocked-zone’, weniger deutlich als in vertikaler Richtung ausgeprägt. Die Ursachen sind auf Seite 9 aufgeführt.
 3. Bei den meisten Messstellen zeigen sich geringe TDR-Werte im Bereich [0.4;1.6 kHz]. Da hier das menschliche Gehör die höchste Sensibilität aufweist, liegt es nahe, daß die laterale Schwingungsrichtung einen für die

Gesamtemission relevanten Anteil darstellt. Da dieser Bereich meist höherfrequent der ‘cut-on’-Frequenz f_{c2} liegt, stellt hier die Schiene die Hauptschallquelle dar.

4. Der Einfluss geringerer Zw-Steifigkeiten aufgrund steigender Materialtemperatur scheint breitbandiger als in vertikaler Richtung ausgeprägt.
- Schienen mit größerer Fußbreite zeigen in beiden Schwingungsrichtungen im Bereich $f \geq 3$ kHz um bis zu ca. 10 dB höhere TDR-Werte. Dies ist auf die Dämpfung der vertikalen Schienenfußschwingungen durch die Zw zurückzuführen (siehe Seite 10).
 - Oft treten bei den Gleisen in Bogenlage Differenzen zwischen den prognostizierten Gleisfrequenzen und deren Anzeichen in den TDR-Spektren, vor allem im Bereich $\geq f_{c2}$, auf. So liegt ein Einfluss der Bogenlage auf die TDR nahe.
 - Der Einfluss von Strom-, Fang- oder dritter Fahrschiene kann nicht beurteilt werden. Hier liegen für einen objektiven Vergleich keine konstruktiv gleichen Messstellen vor.
 - Bei einigen Messstellen zeigen sich un stetige TDR-Verläufe im Bereich der Hammer-Grenzfrequenz (siehe Seite 36). Sie treten nichtsystematisch auf, daher kann die Ursache in strukturdynamischen Nichtlinearitäten und unterschiedlichen Anregungsenergien gesehen werden.
 - Die Messstellen mit Schienendämpfern zeigen in vertikaler Richtung keine signifikanten Unterschiede. Da sich diese MS in Bogenlage befinden, der Nutzen auf geradem Gleis bereits nachgewiesen wurde und sich auch in lateraler Richtung um bis 13 dB höhere TDR-Werte zeigen, liegt ein Einfluss der Bogenlage nahe.

Der Einfluss einzelner Bauteile (Schienenprofil, Zw, Schwelle, Unterbau) kann nur durch Simulationsergebnisse sicher bewertet werden. Dabei muss von den konstruktiven Unterschieden auf die Gleisdynamik geschlossen werden. Durch Vergleiche der hier vorliegenden TDR-Messergebnisse kann eine erste Abschätzung erfolgen. Die Ergebnisse werden im folgenden Kapitel 10.2 ausgeführt.

Die geringste Schallemission aller analysierten Messstellen kann bei MS E1 erwartet werden. Sie zeichnen sich, vor allem in vertikaler Richtung, durch breitbandig sehr hohe TDR-Werte im Bereich hoher menschlicher Gehörsensibilität aus. Die MS S zeigt ebenfalls in diesem Frequenzbereich ähnliche TDR-Werte. Es lagen jedoch bei der Messung relativ niedrige Temperaturen (daher hohe Steifigkeiten) vor, zusätzlich liegt diese MS in einem Gleisbogen und es ist eine dritte Fahrschiene vorhanden. Somit ist das Gesamtergebnis nicht direkt vergleichbar.

Die höchste Schallemission kann bei MS I erwartet werden. Hier liegen in beiden Richtungen breitbandig sehr geringe TDR-Werte vor. Viele Messstellen zeigen auch schmalbandig sehr geringe TDR-Werte (beispielsweise MS C5 bis C8), die bei entsprechender Anregung ebenfalls zu hohen Emissionen führen.

10 Diskussion der TDR-Ergebnisse

In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse der in Kapitel 9 durchgeführten TDR-Analysen diskutiert. Anschließend werden mittels dieser Analyse die Einflüsse von konstruktiven (Kapitel 10.2) und betrieblichen Änderungen (Kapitel 10.3) abgeschätzt.

10.1 Abgrenzung der Anwendung der TDR

Die Anwendung der TDR zur Quantifizierung der akustischen Gleisgüte kann, basierend auf den Ergebnissen des Kapitel 9.2, bei folgenden Konstellationen nicht empfohlen werden.

- Bei Gleisen in Bogenlage mit relativ geringen Radien (z. B. im Nahverkehr) zeigen sich nicht die aus geraden Abschnitten bekannten Einflüsse einzelner Bauteile. Es kann jedoch grundsätzliche von ähnlichen Bauteil-Effekten ausgegangen werden (z. B. bei Änderung der Zwischenlagen- (Zw-)Steifigkeit). Der Grund wird hier in weiteren Effekten durch die bogeninnen/-außen unterschiedliche Schwellenabstände, die Krümmung der Schiene und die Überhöhung gesehen.

Darüber hinaus geht der theoretische Ansatz der TDR-Abschätzung von einem geraden Gleis aus.

Somit kann auch die Anwendung der TDR bei Kurvengeräuschen (Kurvengeräuschen, Zischeln), die überwiegend bei Bogenradien $R \leq 100$ m auftreten [105], nicht abschließend bewertet werden.

- Bei Gleisen mit weiteren Fahr-, Führungs- oder Stromschienen zeigen sich ebenfalls Indizien für eine vom Standard-Oberbau abweichende Gleisdynamik. Auch hier ist die Korrelation zur Schallemission unbekannt, so dass auch hier weitere Untersuchungen notwendig sind.

Durch gezielte Analyse einer möglichen negativen Korrelation zwischen Luftschallpegel und TDR-Werten sollten diese Zusammenhänge weiter untersucht werden.

10.2 Konstruktive Änderungen

In diesem Kapitel werden die Funktionen der einzelnen Bauteile im Bezug auf die TDR, die sich aus der Analyse der verschiedenen Oberbauformen in Kapitel 9.2 ergeben, diskutiert und so die Auswirkungen von konstruktiven Änderungen abgeschätzt.

Das Kapitel 9.2 zeigt, dass TDR-Änderungen auf die spektrale Lage der Gleisfrequenzen (siehe Seite 7) zurückgeführt werden können. Konstruktive Änderungen müssen daher im Hinblick auf die absolute als auch die relative spektrale Lage dieser Frequenzen bewertet werden.

Vorbemerkung Bei typischen Bauteileigenschaften sind vor allem die Gleisfrequenz f_2 und die ‘cut-on’-Frequenz f_{c2} für die Schallemission in vertikaler Richtung relevant. Grundsätzlich zeigen sich im Bereich von f_2 hohe, im Bereich $\geq f_{c2}$ geringe TDR-Werte. Für breitbandig hohe TDR-Werte sollten sich daher diese beiden Frequenzen in einem möglichst großen spektralen Abstand zueinander befinden. Dieser Effekt zeigt sich deutlich bei den MS C9 , E1 , E2 und S .

In lateraler Richtung zeigen sich beide Frequenzen typischerweise im Bereich $f \leq 300$ Hz und sind daher nur bedingt für die Gesamtemission relevant. Durch eine höherfrequente Lage können sie jedoch auch für die Gesamtemission relevante hohe TDR-Werte ausbilden.

Schiene Da durch die praktisch einsetzbaren Stahlsorten kein akustischer Einfluss erwartet wird, ist allein das Schienenprofil relevant.

Hier zeigen Profile mit *geringer Querschnittsfläche* (geringer Masse / Länge) Vorteile durch die um bis $f \approx 100$ Hz höherfrequente Lage der ‘cut-on’-Frequenz f_{c2} .

In lateraler Richtung ist ein vergrößertes Verhältnis $\frac{EI_r}{m'_r}$ anzustreben, da sich so die ‘pinned-pinned’-Frequenz dem typischerweise emissionsrelevanten Bereich nähert. Entsprechend resultieren hier durch die ‘blocked-zone’ relativ hohe TDR-Werte.¹

Im Bereich $f \geq 3$ (vertikal) bzw. 1.6 kHz (lateral) zeigt die TDR-Analyse bei *größerer Schienenfußbreite* um bis zu ca. 10 dB (vertikal) bzw. 5 dB (lateral) höhere TDR-Werte in vertikaler und lateraler Richtung. Diese können auf die erhöhte Dämpfung durch die vergrößerte Auflagefläche auf der Zw zurückgeführt werden.

Bei beiden Änderungen muss jedoch beachtet werden, dass größere Flächen grundsätzlich zu höherer Schallemission führen.

Ebenso zeigen Unstetigkeiten an der Schiene (Laschen, Anbauteile) um ca. 5 dB erhöhte TDR-Werte. Obwohl der grundsätzliche TDR-Ansatz (kontinuierliches Gleis) nicht mehr gültig ist, zeigen sich geringere Werte der Übertragungsfunktion (L_{FRF}). Reflektionseffekte, die zwischen Anregung und Unstetigkeit höhere Schwingamplituden verursachen, zeigen sich in den L_{FRF} -x-Diagrammen nicht.

Stützpunkt - Zw Bei den gängigen einfach elastischen Stützpunkten (Elastizität allein durch Zw) führen höhere Zw-Steifigkeiten zu einer höherfrequenten Lage der ‘cut-on’-Frequenz f_{c2} und damit breitbandig höheren TDR-Werten. So tritt auch die TDR-erhöhende Resonanz bei f_2 höherfrequent auf. Falls notwendig, kann dies durch ein erhöhtes Schwellengewicht kompensiert werden.

Auch die TDR-erhöhende Wirkung großer Schienenfußbreiten wird durch hohe Zw-Steifigkeiten unterstützt.

Einschränkend muss beachtet werden, dass mehrere theoretische Ansätze einen schnelleren Anstieg der Schienenrauheit durch hohe Zw-Steifigkeiten prognostizieren.

¹Möglicherweise zeigen die TDR-Ergebnisse des Schienenprofils VA71b im Bereich $f \geq 1.25$ kHz (siehe Seite 20) keinen signifikanten Nutzen [7], da dieses Verhältnis deutlich reduziert ist.

Stützpunkt - Gesamtaufbau Vor allem in lateraler Richtung sind grundsätzlich höhere Stützpunktsteifigkeiten anzustreben. So nähert sich der Bereich hoher TDR-Werte, resultierend aus der Lage der Gleisfrequenzen, dem emissionsrelevanten Bereich. Die Ergebnisse der MS **I** zeigen deutlich den Effekt sehr weicher Stützpunkte: Die ‘cut-on’-Frequenz befindet sich bereits bei $f=130$ (vertikal) bzw. 40 Hz (lateral), so dass allein die ‘blocked-zone’ nach der ‘pinned-pinned’-Frequenz zu signifikant erhöhten TDR-Werten im akustisch relevanten Frequenzbereich führt.

Bei zweifach-elastischen Stützpunkten führen höhere Z_w - und Z_{wp} -Steifigkeiten durch die erhöhte Schienenfußbedämpfung zu höheren TDR-Werten in vertikaler und lateraler Schwingungsrichtung.

Ebenfalls kann bei zweifach-elastischen Stützpunkten durch die dynamische Abstimmung der Bauteile Z_w , R_p und Z_{wp} ein Resonanzeffekt gebildet werden, der zu erhöhten TDR-Werten führt. Aufgrund der relativ geringen Energieaufnahme (durch geringe Massen) wird jedoch ein beschränkter Einfluss erwartet.

Schwelle Die Schwelle ist für die Ausbildung verschiedener Schwingungsresonanzen notwendig. Nur bei relativ hoher Elastizität des Unterbaus, die praktisch durch das Schotterbett möglich ist, kann sich ein akustisch sinnvoller Schienenstützpunkt mit hoher Steifigkeit (s. o.) ausbilden.

Die Schallabstrahlung der Schwelle kann in dieser Arbeit nicht bewertet werden, so dass allein Aussagen zur Schwellenmasse möglich sind.

Es zeigen sich Vorteile durch hohe Schwellengewichte. So wird die mögliche Energieaufnahme des Tilgers bei f_2 erhöht, es resultieren höhere TDR-Werte (siehe gegenteiliger Effekt durch leichte Schwellen bei MS **D1** und **D3**). Ebenso ergibt sich eine um bis zu $f \approx 200$ Hz tieffrequenterer Lage der Frequenz f_2 , so dass sich der Bereich hoher TDR-Werte verbreitert.

Die Bi-Block-Schwelle zeigt ebenfalls hohe TDR-Werte im relevanten Frequenzbereich. Die elastische Schwellenverformung kann als Ursache angesehen werden, da sich die ‘pinned-pinned’-Frequenz mit dem TDR-Minimum nur im geringeren Umfang ausbildet.

Auch zeigen sich Indizien für eine um ca. 100 Hz höherfrequente Lage der Gleisfrequenz bei f_2 in lateraler Richtung aufgrund zusätzlicher Versteifung des Gleisrostes (siehe MS **J**). Eine real um ca. 150 Hz erhöhte Lage dieser Gleisfrequenz zeigt sich auch bei vergrößerter Schwellen-Stirnfläche (siehe Bi-Block-Schwelle bei MS **D2**). Beides führt im relevanten Frequenzbereich zu hohen TDR-Werten.

Mehrere Gründen motivieren eine Reduktion des Schwellenabstandes:

- Durch höheres Schwellengewicht / Gleislänge ergibt sich eine tieffrequenterer Lage der Frequenz f_2 .
- Der Resonanzeffekt bei f_2 tritt pro Gleislänge häufiger auf und führt zu insgesamt höherer Dämpfung.

- Die spektrale Lage der ‘pinned-pinned’-Frequenz erhöht sich, so dass sich die folgende ‘blocked-zone’ dem emissionsrelevanten Frequenzbereich nähert. Dies ist aufgrund geringerer Absolutfrequenzen vor allem in lateraler Richtung wichtig.
- Durch den üblichen Schwellenabstand von 0.6 m befinden sich die Radaufstandspunkte bei im Güterverkehr üblichen Radsatzabständen von 1.8 m stets *auf der Schwelle* oder *im Schwellenfach*. Die Primäreinsenkung² der Schiene führt so zu harmonisch angeregten Tauchschwingungen des Fahrzeuges mit Frequenzen bis $f \approx 40$ Hz. Wird der Schwellenabstand auf 0.51 m reduziert, wird diese Anregung vermieden [35].

In dieser Arbeit konnte keine elastische Schwellenbesohlung analysiert werden. Es wird jedoch ein Einfluss auf die TDR ähnlich der USM erwartet.

Schotterbett Im Rahmen dieser Arbeit kann der Einfluss der Steifigkeit des Schotterbettes beurteilt werden. Bei hoher Steifigkeit zeigt sich eine um ca. 100 Hz (vertikal) höherfrequente Lage der Gleisfrequenz f_2 . Jedoch ist aufgrund der Absolutfrequenz der Einfluss auf die Gesamtemission gering.

Unterbau Der Unterbau ist oft aufgrund der geringen Steifigkeiten für die Primärschall-Emission nicht relevant.

Sehr hohe (Asphalt-Tragschicht) oder geringe (USM) Steifigkeiten führen im tieffrequenten Bereich zu sehr geringen TDR-Werten (bis 0.2 dB/m). Diese sind in dem Impedanzunterschied bzw. der elastischen Entkoppelung begründet. In diversen Untersuchungen ist die reduzierte Erschütterungsimmission und Sekundärschallemission nachgewiesen.

In lateraler Richtung scheinen diese Parameter für die Schallemission nicht relevant. Ebenso ist ihr Einfluss auf die zeitliche Entwicklung der Schienenrauheit noch nicht bekannt.

10.3 Betriebliche Änderungen

Durch betriebliche Änderungen variiert die dynamische Anregung des Gleises. Wichtige Parameter sind die spektrale Aufteilung und Richtung der Einwirkung. Bei Gleiskonstruktionen mit entsprechend hohen TDR-Werten in diesen Frequenzbereichen bzw. dieser Schwingrichtung kann daher eine geringe Gesamtschallemission erwartet werden.

Fahrzeugart

Generell führt eine geringere Schallemission des Gleises bei geringer fahrzeugseitiger Emission zu einem größeren Nutzen als bei hoher fahrzeugseitiger Emission (‘Leises Fahrzeug auf leisem Gleis’).

²Elastische Einsenkung im Schwellenfach.

Die Parameter **Radrauheit** und die **Wechselwirkung zwischen Rad und Gleis** werden unmittelbar durch die Fahrzeugart beeinflusst.

- Die **Radrauheit** wird durch die Art der Bremsanlage (Krafteintrag über Radlauf­fläche oder Bremsscheibe) beeinflusst. Bei Bremsscheiben ergeben sich geringere Radrauheiten.

Da laufflächengebremste Fahrzeuge im Personenverkehr nur noch selten eingesetzt werden, kann die Abschätzung der Radrauheit nach der Betriebsart (Güter- oder Personenverkehr) differenziert werden.

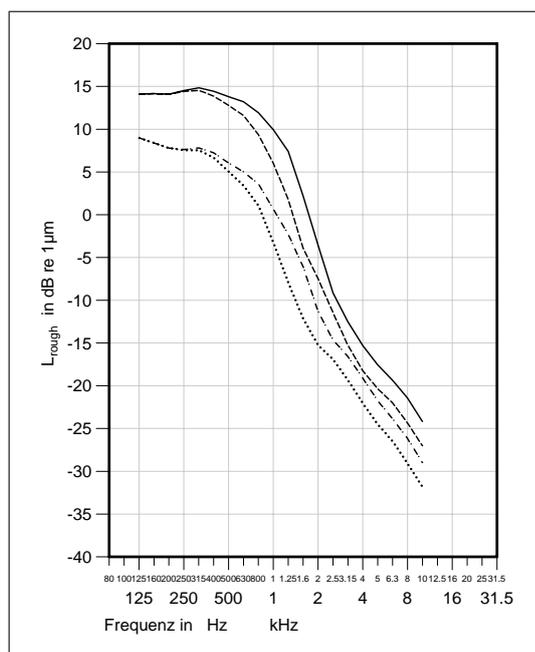


Abb. 10.1: Anregungsspektren Güterverkehr (80 km/h, Raddurchmesser 920 mm). (—) GG-Bremssklötze leer (Radaufstandskraft 25 kN), (- -) beladen (100 kN); (- - -) K-Bremssklötze leer (25 kN), (· · ·) beladen (100 kN)

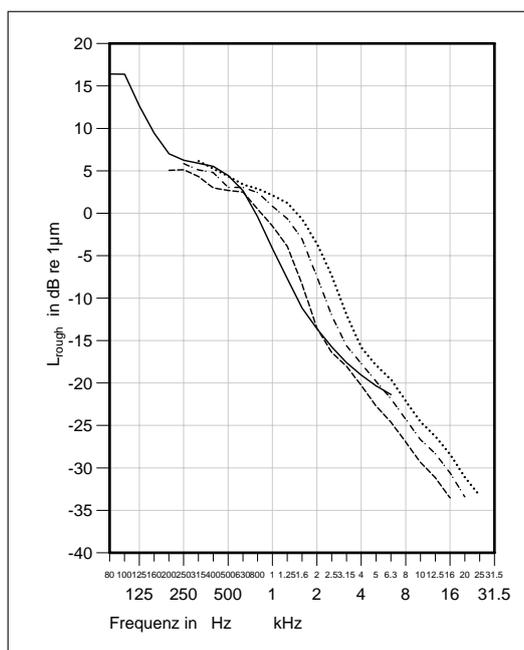


Abb. 10.2: Anregungsspektren Personenverkehr. (—) Nahverkehr (50 km/h, Raddurchmesser 860 mm, Radaufstandskraft 50 kN); Vollbahn (920 mm, 100 kN): (- -) 120 km/h, (- - -) 160 km/h, (· · ·) 200 km/h

Um den Einfluss auf die Gleisdynamik zu bewerten, muss ebenso die Fahrgeschwindigkeit, der Raddurchmesser und die Radaufstandskraft berücksichtigt werden. Die Fahrgeschwindigkeit bedingt die Transformation der Rauheitsamplitude vom Wellenlängen- in den Frequenzbereich. Der Raddurchmesser und die Radaufstandskraft beeinflussen das Kontaktfilter $CF(\lambda)$ (Reduktion des Einflusses der Wellenlängen kleiner der Rad-Schiene-Kontaktfläche). Für diese Werte können betriebsartspezifische Annahmen getroffen werden.

Die resultierende Anregung des Gleises am Rad-Aufstandspunkt ergibt sich daher aus der Summenrauheit (siehe Gleichung 4.5) und Addition des Kontaktfilters $L_{r,rail,abs}(\lambda) = L_{r,tot}(\lambda) + CF(\lambda)$.

Die Transformation vom Wellenlängen- in den Frequenzbereich erfolgt nach einer energieerhaltenden Methode (Beschreibung siehe [75]). Eingangsparmeter der folgenden Analyse sind im Anhang K aufgeführt.

- **Güterverkehr** Siehe Abbildung 10.1.

Fahrzeuge mit GG-Bremssohlen weisen breitbandig eine um ca. 8 dB höhere Anregung als Fahrzeuge mit K-Bremssohlen auf³. Wird eine höhere Radlast angesetzt (100 statt 25 kN, daher ‘beladen’ statt ‘leer’), setzt bei beiden Bremssohlenarten die Reduktion der Rauheitsamplitude bereits bei tieferen Frequenzen ein.

Eine Optimierung der Gleiskonstruktion allein für ‘leere’ oder ‘beladene’ Fahrzeuge ist jedoch im Güterverkehr betrieblich nicht sinnvoll, da real eine große Varianz der Radlasten vorliegt.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Gleiskonstruktion für den Güterverkehr im Bereich [0.2;1.25 kHz] hohe TDR-Werte aufweisen muss. Durch die ähnliche Charakteristik der Anregungsspektren ergeben sich gleiche Anforderungen bei GG- und K-gebremsten Wagen. Dabei ist, aufgrund der menschlichen Gehörsensibilität, vor allem der höherfrequente Bereich für das wahrgenommene Gesamtgeräusch relevant.

- **Personenverkehr** Siehe Abbildung 10.2.

Die Anregung der Nahverkehrs-Konstellation ähnelt, trotz um 60 km/h geringerer Fahrgeschwindigkeit, derjenigen des Vollbahnfahrzeuges bei 120 km/h. Jedoch sind im Nahverkehr, aufgrund der geringeren Fahrgeschwindigkeit und der häufigen Rad-Polygonisierung, auch tieferfrequente Anregungsanteile relevant.

Da sich im betrachteten Frequenzbereich kein globales Maximum zeigt, muss der Einfluss aufgrund der Fahrgeschwindigkeit und der menschlichen Gehörsensibilität bewertet werden. Hohe TDR-Werte sind bei zunehmender Fahrgeschwindigkeit in höherfrequenten Frequenzbereichen sinnvoll. Anhaltswerte sind hier obere Grenzfrequenzen von $f \approx 1.6$ kHz bei Fahrgeschwindigkeiten von 120 km/h und $f \approx 2.5$ kHz bei 200 km/h.

In Nahverkehrs-Anwendungen sind ebenfalls hohe TDR-Werte bis in den Bereich von $f \approx 1.6$ kHz sinnvoll. Hier sind, aufgrund der oft netzspezifisch einheitlichen Fahrzeugbauarten und somit nur geringen Radlast- und Raddurchmesserschwan- kungen, Optimierungen der Gleise nach spezifischen Fahrzeugen möglich. Dazu müssen die Rad- und Schienenrauheit und das Kontaktfilter bekannt sein, die mit geringem Aufwand erfasst werden können.

- Die **Wechselwirkung zwischen Rad und Gleis** wird durch das Verhältnis der Gleis- und Rad-Admittanzen beeinflusst (siehe Kapitel 5.10). Bei den in dieser Arbeit untersuchten Oberbauformen sind im Rahmen der TDR-Messungen die für

³Ähnliche Differenz zeigen sich auch in den Vorbeifahrt-Luftschallpegeln falls das Rollgeräusch dominiert.

einen Vergleich mit bestehenden Daten notwendigen Punkteingangs-Admittanzen nicht ermittelt worden. In beiden Schwingungsrichtungen befand sich der Antwortsensor zwar in der Achse der Anregung, jedoch nicht direkt an dem Ort der Anregung, sondern an der abgewandten (unteren / hinteren) Fläche der Schiene. Entsprechende Aussagen sind unsicher, da in dem relevanten Frequenzbereich [0.5;2 kHz] auch ein Einfluss aus der Elastizität der Schiene vorhanden ist.

Allgemeine Aussagen sind nicht möglich, da die Ausprägung lokaler Admittanz-Extrema stark durch die spektrale Lage der Gleisfrequenzen beeinflusst wird. Diese Ausprägung muss dann zusammen mit dem individuellen Admittanz-Spektrum des Rades analysiert werden.

Hier können Empfehlungen für die Gleiskonstruktion nur erstellt werden, wenn entsprechend detaillierte Daten vorliegen.

Fahrgeschwindigkeit

Der Einfluss der Fahrgeschwindigkeit wird beispielhaft in der Analyse der Personenverkehrs-Fahrzeuge deutlich (siehe Erläuterungen oben und Abbildung 10.2): Der für Gleisanregung relevante Frequenzbereich wächst bei zunehmender Fahrgeschwindigkeit in den höherfrequenten Bereich.

Somit müssen bei höheren Fahrgeschwindigkeiten für geringe gleisseitige Emissionen grundsätzlich in einem breitbandigeren Frequenzbereich hohe TDR-Werte vorliegen.

Für verschiedene Streckengeschwindigkeiten bzw. Fahrzustände (Halte-, Beschleunigungs- / Verzögerungs-, Beharrungsfahrt-Streckenabschnitte) können so akustisch optimierte Gleiskonstruktionen definiert werden. Die Grenzen des zu optimierenden Frequenzbereiches sind jedoch unscharf, so dass Gleiskonstruktionen für bestimmte Geschwindigkeitsklassen sinnvoll erscheinen.

Ein Beispiel unbefriedigender Abstimmung zeigt MS **I**. Die tieffrequent in beiden Schwingungsrichtungen geringen TDR-Werte führen, zusammen mit der hier ebenfalls geringen Streckengeschwindigkeit, zu einer erhöhten Schallemission im Bereich [200;400 Hz]. Das Verbesserungspotential ist offensichtlich.

Verschleiss

Durch die Abnutzung (Verschleiß durch Fahrzeugüberfahrten und bei Schleifarbeiten im Rahmen der Instandhaltung) wird vor allem die Höhe des Schienenkopfes reduziert. Der akustische Einfluss zeigt sich in der ‘pinned-pinned’- (reduzierte Biege-Widerstandsmomente), Resonanz- und ‘cut-on’-Frequenz (reduzierte Schienenmasse).

Wird an MS **E1** eine stark verschlissene Schiene angenommen, zeigt die Abschätzung in vertikaler Richtung eine Erhöhung der ‘cut-on’-Frequenz f_{c2} um ca. 90 Hz (+12%) und eine Reduktion der ‘pinned-pinned’-Frequenz um ca. 120 Hz (-14%). In lateraler Richtung erhöhen sich diese Frequenzen um ca. 40 (+16%) bzw. ca. 20 Hz (+6%).

Somit können durch Schienenverschleiß in vertikaler Richtung hohe TDR bis in einen leicht höherfrequenten Bereich erwartet werden. Durch die tieferfrequente Lage der ‘pinned-pinned’-Frequenz wird das lokale Minimum weniger stark ausgeprägt, wie weitere Messstellen zeigen. In lateraler Richtung werden ebenfalls hohe TDR-Werte bis in einen höherfrequenten Bereich erwartet, die Differenzen sind jedoch relativ gering.

Da hier ein relativ hoher Verschleiss angenommen wurde und nur geringe spektrale Differenzen resultieren, werden real keine unterschiedlichen Emissionen erwartet.

Betriebliche Belastung

Durch die betriebliche Belastung zeigt sich in etwa eine Verdoppelung der Zw-Steifigkeit [94] und damit eine um den Faktor 1.4 höherfrequente Lage der Gleisfrequenzen f_2 und f_{c2} . Diese Vorlast wirkt jedoch nur im Bereich von ca. 2 m um den Radaufstandspunkt. Die Auswirkung des somit inkonstanten Gleisverhaltens ist noch nicht sicher ermittelt, Ansätze finden sich in [98].

Durch die in dieser Arbeit vorliegenden TDR-Messungen kann der Einfluss nicht bewertet werden.

Schienenschleifen

Durch oszillierende Schleifverfahren (‘akustisches Schleifen’) können Fahrflächenrauheiten erzeugt werden, die signifikant geringer als typische Radrauheiten ausfallen und dabei keine dominierenden monofrequenten Anteile zeigen [33]. Die Rauheitsamplitude in den Bereichen großer Wellenlänge werden dabei stärker reduziert als in den Bereichen kleiner Wellenlänge. Daher ist nach diesen Schleifverfahren von einem erhöhten Einfluss höherfrequenter Anteile der Anregung auszugehen. Wird dieses Schleifverfahren als betriebliche Maßnahme dauerhaft vorgesehen, sollte die Gleiskonstruktion entsprechend in den höherfrequenten Bereichen hohe TDR-Werte aufweisen.

Kontaktpunktlage

Die TDR-Ergebnisse zeigen bei annähernd allen Messstellen in einem breiten Frequenzbereich geringere TDR-Werte in lateraler als in vertikaler Schwingungsrichtung. Dies bedeutet, dass überwiegend auch die lateralen Biegeschwingungen angeregt werden.⁴ Bei Bogenlage des Gleises zeigt sich tendenziell eine Zunahme des Kontaktpunkt-Lateralversatzes und, aus dem Fahrzeug-Bogenlauf, zunehmende Querkräfte.

Daher sind bei Oberbauformen, die nicht ausschließlich in geraden Abschnitten oder mit relativ großen Bogenradien eingesetzt werden, hohe TDR-Werte auch in lateraler Richtung für eine geringe Schallemission wichtig.

⁴Darüber hinaus ist auch von dynamischen lateralen Schlupfkraften im Kontaktpunkt auszugehen.

11 Empfehlungen

Der quantitative Einfluss einzelner Maßnahmen auf den Gesamt-Schalldruckpegel konnte in dieser Arbeit nicht ermittelt werden. Dazu sind Feldmessungen notwendig, bei denen unter akkurat gleichen Randbedingungen allein einzelne Detailkonstruktionen geändert werden. Diese Messungen wurden bisher nur selten durchgeführt. Gleisdynamische Simulationsmodelle sollten für Konstruktionsempfehlungen und die Analyse der Wechselbeziehungen zur fahrzeugseitigen Emission genutzt werden. Auch die dauerfeste Ausführung der Baugruppen sollte so entwickelt werden. Praktisch werden sich diese Innovationen nur bei verbindlichen Vorgaben zur Schallimmission umgesetzt. Diese müssen durch die Politik vorgegeben werden.

11.1 Empfehlungen zur Nutzenermittlung

Die TDR-Messung und -Analyse führt bei Gleisen in **Bogenlage** und / oder mit **zusätzlichen Fahr-, Leit- oder Stromschienen** zu Ergebnissen, deren Qualität aktuell nicht geprüft werden kann. Daher sollte die TDR nur an geraden Strecken oder bei großen Bogenradien (ca. >2000 m) ermittelt werden.

Die TDR-Ergebnisse sind stark **temperaturabhängig**. Daher sollten Luftschall-Vorbeifahrtmessungen nur bei um max. 10 K abweichenden Temperaturen durchgeführt werden.

Die **Kontinuität der Gleisdynamik** sollte anhand der spektralen Lage von Maxima der Übertragungsfunktion L_{FRF} (meist durch Gleisfrequenzen hervorgerufen) im Schmalbandspektrum geprüft werden.

Die aktuell genutzten **29 Anregungspositionen** (AP) stellen einen **sinnvollen Kompromiss** dar: Das Nahfeld um die AP wird genau beschrieben und das Impulssignal ist meist ausreichend reduziert. Praktisch sollte die Anzahl der AP jedoch so gewählt werden, dass sich (in jedem Terzband) eine Reduktion von mind. 10 und max. 15 dB ergibt.

Die **Signalverarbeitung** sollte durch Fensterung des Kraftsignals mittels Force- und des Beschleunigungssignal mittels Rechteckfenster erfolgen. Der Messzeitraum sollte so lang gewählt werden, bis das Beschleunigungssignal auf höchstens 1% der max. Amplitude abgeklungen ist.

Die **Befestigung des Antwortsensors** mittels eines Starkmagneten ist für den geforderten Frequenzbereich geeignet. Die geeignete Oberfläche der Schiene (Flankenneigung und Einbauneigung) sollte durch einen Keil kompensiert werden.

Zwei **unterschiedliche Hämmer** (Gewicht, Schlagkalotte) sollten genutzt werden, um im gesamten relevanten Frequenzbereich hohe Kohärenzen zu erhalten.

Die **Richtung des Impulses** muss mit $\pm 10^\circ$ genau eingehalten werden. Gerade in lateraler Richtung (keine Unterstützung durch die Schwerkraft) muss diese Vorgabe durchgehend geprüft werden.

Zur **Plausibilitätskontrolle** sollten die L_{FRF} -x-Diagramme für jede Frequenz mit im Gesamtergebnis aufgeführt werden.

Die Analyse sollte nach den **Vorgaben der EN 15461** durchgeführt werden.

Alternative Analysemethoden zeigen leicht höhere Überdeckung mit gleisseitigen Luftschall-Transferfunktionen, führen jedoch bei nicht kontinuierlich reduzierten L_{FRF} -Werten zu unrealistischen Ergebnissen.

Die **indirekte Messung** der TDR (mittels Zugvorbeifahrten) ist aktuell noch nicht ausreichend untersucht (vor allem Einfluss von Fahrzeugart und Fahrgeschwindigkeit), um vergleichbare Ergebnisse zu generieren. Daher sollte sie noch nicht als alleinige Methode genutzt werden.

11.2 Empfehlungen zur Gleiskonstruktion

Zahlreiche Details führen zu emissionsarmen Gleiskonstruktionen. Der Nutzen wird vor allem durch die **spektrale Lage der Gleisfrequenzen** (Resonanz-, ‘cut-on’- und ‘pinned-pinned’-Frequenz) erbracht. Sie sollten auf die streckenspezifischen Fahrgeschwindigkeiten und Fahrzeugarten abgestimmt werden, dabei müssen die erhöhten Steifigkeiten durch Vorlast und dynamische Belastung beachtet werden. Allgemeingültige Empfehlungen sind nachfolgend aufgeführt.

Die **Schiene** sollte ein möglichst großes Verhältnis aus Biegesteifigkeit zu Masse haben. Im Bereich der Stützpunkte sollte die Schienenfußbreite maximiert werden. In Fahrtrichtung variierende Profildicken und Unstetigkeiten reduzieren die Schwingungsausbreitung.

Hohe **Stützpunkt- (Zwischenlagen-) Steifigkeiten** führen zu breitbandig hohen TDR-Werten und sind daher sinnvoll. Auch die Dämpfung der Schienenfußschwingungen wird verstärkt. Speziell in lateraler Richtung ist ein großer Nutzen zu erwarten. Jedoch sind Ansätze, die eine schnellere Ausbildung hoher Schienenrauheiten bei harten Stützpunkten prognostizieren, noch nicht abschließend geklärt.

Zweifach elastische Stützpunkte sollten als Tilger (Zw-Rippenplatte-Zwp) abgestimmt werden.

Die **Schwelle** sollte möglichst elastisch und schwer ausgeführt werden. In lateraler Richtung sind zusätzliche Kontaktflächen mit dem Schotter sinnvoll.

Der **Schwellenabstand** sollte reduziert werden, um die Schwellenmasse / Gleislänge zu erhöhen, den Tilgereffekt (Schwelle als Tilgermasse) öfter auszubilden, die Lage der ‘pinned-pinned’-Frequenz zu erhöhen und die Anregung des Fahrzeuges durch den Stützpunktabstand zu verhindern. Ein sinnvoller Schwellenabstand beträgt daher 0.51 m.

Das **Schotterbett** zeigt keinen Einfluss auf die akustisch relevante Gleisdynamik.

Unterschottermatten führen zu geringen TDR-Werten, dies deutet auf einen reduzierten Erschütterungseintrag in den Unterbau hin. Aufgrund der tieffrequenten Lage resultiert keine Änderung des Primärschalls.

Zusätzliche Dämpfungselemente, vor allem an der Schiene, verkürzen die schwingenden Bereiche. Sie sollten anhand der TDR-Ergebnisse des ungedämpften Gleises ausgelegt werden. Durch die variierenden Summenrauheiten resultieren unterschiedliche Anregungen, daher sollten sie grundsätzlich breitbandig abgestimmt sein.

12 Abkürzungen und Symbole

Die folgenden Abkürzungen wurden in dieser Arbeit verwendet.

AP	-	Anregungsposition
ATS	-	Asphalt-Tragschicht
BüG	-	Besonders überwachtes Gleis
FF	-	Feste Fahrbahn
FRF	-	Übertragungs-Funktion (Frequency Response Function)
MS	-	Messstelle(n)
TDR	-	Track Decay Rate (Gleis-Abklingrate)
SK	-	Schlagkalotte (Hammerspitze)
USM	-	Unterschottermatte
Zw	-	Zwischenlage
Zwp	-	Zwischenplatte

Griechische Symbole und ihre Einheiten

α_i	Lin. Regression: Regressionskoeffizient des Terzband i	/
β	Abklingkonstante der Gleisschwingung	/
χ_i	Lin. Regression: Regressionskoeffizient des Terzband i	/
Φ	Mikrofon-Aspektwinkel	rad
$\rho_0 c_0$	akustische Freifeldimpedanz	kg/m ² /s
σ_r	Schallabstrahlungsgrad der Schiene	/

Spezielle Mathematische Operatoren

- ⊕ Energetische Addition
- ⊖ Energetische Subtraktion

Lateinische Symbole und ihre Einheiten

CF	Kontaktfilter	dB
c_0	Schallgeschwindigkeit in Luft	m/s
D_{Ground}	Luftschall-Ausbreitungsdämpfung	dB
EI_r	Biegesteifigkeit der Schiene	Nm ²
f_1	Gleisfrequenz: Erste Tilgerfrequenz	Hz
f_2	Gleisfrequenz: Zweite Tilgerfrequenz	Hz
f_{c1}	Gleisfrequenz: Erste 'cut-on'-Frequenz	Hz
f_{c2}	Gleisfrequenz: Zweite 'cut-on'-Frequenz	Hz
f_{pp}	Gleisfrequenz: 'pinned-pinned'-Frequenz	Hz
f_T	Zwei-Massen-Schwinger: Tilgerfrequenz	Hz
$f_{ZMS,1}$	Zwei-Massen-Schwinger: Erste Eigenfrequenz	Hz
$f_{ZMS,2}$	Zwei-Massen-Schwinger: Zweite Eigenfrequenz	Hz
$f_{Zw-Rp-Zwp}$	Ein-Massen-Schw. aus Zw, Rp und Zwp: Eigenfreq.	Hz
h_r	Höhe der Schiene	m
L_F	Kraftpegel	dB
L_h	Körperschallmaß	dB
l_r	Äquivalente Länge der schwingenden Schiene	m
$L_{HW,tot}$	Gesamt-Transferfunktionen	dB
$L_{HW,tr}$	Oberbau-Transferfunktionen	dB
L_{FRF}	Übertragungsfunktionspegel	dB
$L_{r,tot}$	Rad-Schienen-Summenrauheit	dB
$L_{r,rail}$	Schienenrauheit	dB
$L_{r,rail,abs}$	Wirksame Rad-Schiene-Summenrauheit	dB
$L_{r,wheel}$	Radrauheit	dB
L_W	Schallleistung	dB
$L_{W,sek}$	Schallleistung der Fahrzeug-Sekundärschallquellen	dB
$L_{\lambda,CA}$	Gewichteter Rauheits-Einzahlwert	dB
L_σ	Abstrahlmaß	dB
l_s	Schwellenabstand	m
m	Lin. Regression: Exponent der ΔL_{FRF} -Gewichtung	/
m_{opt}	Lin. Regression: 'Optimaler' Exp. der ΔL_{FRF} -Gew.	/
m'	Masse pro Längeneinheit	kg/m
m'_r	Masse der Schiene pro Längeneinheit	kg/m
m'_s	Masse der Schwelle pro Längeneinheit (Halbschwelle)	kg/m
N_{ac}	Anzahl der Fahrzeugachsen	/
p	Lin. Regression: Gewichtungsfaktor (Abstandsgew.)	/
q	Lin. Regression: Gewichtungsfaktor (ΔL_{FRF} -Gew.)	/
r	Lin. Regression: Produkt beider Gewichtungsfaktoren	/
s'	Steifigkeit pro Längeneinheit	kN/mm/m
s'_b	Steifigkeit des Schotters pro Längeneinheit	kN/mm/m
s'_p	Steifigkeit der Zwischenlage pro Längeneinheit	kN/mm/m
t_{exp}	Lin. Regression: Expon. Gewichtungsfaktor	/
t_{lin}	Lin. Regression: Linearer Gewichtungsfaktor	/
v	Oberflächenschnelle	m/s ²
W_{Wave}	Schallleistung einer Linienschallquelle	dB

Literaturverzeichnis

- [1] Fa. AEA Technology Rail: „Harmonised Accurate and Reliable Methods for the EU Directive on the Assessment and Management Of Environmental Noise - DEFINITION OF TRACK INFLUENCE: ROUGHNESS IN ROLLING NOISE“ (Deliverable 12 part 1 of the HARMONOISE project), Utrecht 2003
- [2] AHMAD, N.; THOMPSON, D.; JONES, C.; MUHR, A.: „Predicting the Effect of Temperature on the Performance of Elastomer-Based Rail Damping Devices“, in SCHULTE-WERNING, B.; THOMPSON, D.; GAUTIER, P.-E.; HANSON, C.; HEMSWORTH, B.; NELSON, J.; MAEDA, T.; VOS, P. de (Hrsg.): „Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems“, Springer Verlag Berlin, 2008
- [3] ALLIANZ PRO SCHIENE: „Erster Umweltvergleich Schienenverkehr“, Abschlussbericht, Berlin 2005
- [4] ANNESER, C.: „Wir fühlen uns wie im Gefängnis“, Nürnberger Nachrichten, 28.12.2011
- [5] ASMUSSEN, B.; STIEBEL, D.; KITSON, P.; FARRINGTON, D.; BENTON, D.: „Reducing the Noise Emission by Increasing the Damping of the Rail: Results of a Field Test“, in SCHULTE-WERNING, B.; THOMPSON, D.; GAUTIER, P.-E.; HANSON, C.; HEMSWORTH, B.; NELSON, J.; MAEDA, T.; VOS, P. de (Hrsg.): „Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems“, Springer Verlag Berlin, 2008
- [6] BONGINI, E.; GRASSIE, S.; SAXON, M.: „ ‘Acoustic mapping’ of a railway network: validation and use of a system based on measurements of axlebox vibration“, in MAEDA, T.; GAUTIER, P.-E.; HANSON, C.; HEMSWORTH, B.; NELSON, J.; SCHULTE-WERNING, B.; THOMPSON, D.; VOS, P. de (Hrsg.): „Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems“, Springer Verlag Berlin, 2012
- [7] BRANTNER, H.; STOCK, R.; PERNER, R.: „Performance report of applied measures – Malmö – Part 3: In-field measurements of the influence of voestalpine VA71b rail on railway noise“, Projekt QCITY, deliverable D5.9, 2009
- [8] Fa. Brüel & Kjær: „Strukturen prüfen“, Teil 1: Mechanische Beweglichkeitsmessungen, Erstaussgabe, Nærum 1989
- [9] BUND Deutschland (Hrsg.): „Hinweise zum Schutz gegen Schienenlärm“, Berlin 2002
- [10] Bundesregierung Deutschland: Antwort der Bundesregierung auf Kleine Anfrage, Drucksache 16/6673, 2007

- [11] CREMER, L.; MÖSER, M.: „Technische Akustik“, 5. Auflage, Springer Verlag Berlin, 2003
- [12] CZOLBE, C.; THRON, T.: „Schienenrauheiten auf dem Schweizer Bahnnetz: Erfassung, Resultate, Abhängigkeiten“, Vortrag DAGA, 2010
- [13] DANNESKIOLD-SAMSØE, U.; KRÜGER, F.; KALIVODA, M.; BARSIKOW, B.: „A Study of European Priorities and Strategies for Railway Noise Abatement, Annex II: Retrieval of System Cases“, Report 01.979 der Fa. Ødegaard Danneskiold & Samsøe, Kopenhagen 2001
- [14] Deutsche Bahn AG: „Schallschutz – eine Investition in die Zukunft der Bahn“, 2009
- [15] Deutsche Bahn AG, Systemverbund Bahn: „Kompatibilität von Zwischenlagen aus EVA Material mit der TSI HGV Infrastruktur“, Gutachten, Dokument 08-VTZ42-902-0, 2008 (nicht öffentlich)
- [16] DUMPLER, H.: „Gleisseitige Schwingungsdämpfung und Lärm-Absorption durch den Lärmabsorber STRAILastic_A“, in Proceedings zur RAIL-noise 2011, Schriftenreihe des IFV Bahntechnik, 2011
- [17] FAHRMEIR, L.; KÜNSTLER, R.; PIGEOT, I.; TUTZ, G.: „Statistik“, 6. Auflage, Springer Verlag Berlin, 2007
- [18] FRENZEL, J.; FRENZEL, J.: „Neues Gleisoberbausystem Durflex“, EI - Der Eisenbahningenieur Heft 03, Seite 13-17, 2008
- [19] FRENZEL, J.; MAYERHÖFER, J.; FRENZEL, J.: „Neuartige Flügelschwelle in Bi-Block-Ausführung“, EI - Der Eisenbahningenieur Heft 07, Seite 32-35, 2010
- [20] FRENZEL, J.; PUPPE, M.; HECHT, M.; GRAMOWSKI, C.: „Verschäumter Schotteroberbau - Erfahrungen aus der Praxiserprobung“, EI - Der Eisenbahningenieur Heft 03, Seite 42-48, 2010
- [21] ELPELT, B., HARTUNG, J.: „Grundkurs Statistik: Lehr- und Übungsbuch der angewandten Statistik“, 2. Auflage, Oldenbourg Verlag München, 1992
- [22] EU - Ausschuss der Regionen ‘Einheitlicher europäischer Eisenbahnraum’, Stellungnahme, Aktenzeichen 2011/C 104/12
- [23] Europäische Kommission: Weissbuch „Fahrplan zu einem einheitlichen europäischen Verkehrsraum – Hin zu einem wettbewerbsorientierten und ressourcenschonenden Verkehrssystem“, Aktenzeichen KOM(2011) 144, 2011
- [24] Fa. FASYS-PLANUNG GmbH, mündliche Mitteilung, 2009

- [25] FODIMAN, P.: Projekt NOEMIE - „Final Report“, 2005
- [26] GEIER, R.: „Brückendynamik: Schwingungsuntersuchungen von Schrägseilen“, Verlag *Books-On-Demand* Norderstedt, 2004
- [27] GIRSCH, G.; ALBERT, J.; SCHOECH, W.: „Managing rail life to match performance and cut costs“, *Railway Gazette International*, Heft 08, Seite 45-48, 2010
- [28] GRASSIE, S.: „Controlling irregularities in rail to reduce noise“, *International Railway Journal* 04/2010, Seite 38-42
- [29] GRASSIE, S.: „Models of Railway Track and Vehicle/Track Interaction at High Frequencies: Results of Benchmark Test“, *Vehicle System Dynamics* 25, Seite 243—262, 1996
- [30] GROHE, L.: „Indirekte Bestimmung der Track Decay Rate und weiterführende Stabilitätsanalyse“, Bachelorarbeit, TU Berlin - FG Schienenfahrzeuge, 2011
- [31] GROTE, K.; FELDHUSEN, J.: „DUBBEL - Taschenbuch für den Maschinenbau“, 23. Auflage, Springer Verlag Berlin, 2011
- [32] van HAAREN, E.; van KEULEN, G.: „New raildampers at the railway link Roosendaal-Vlissingen, tested within the Dutch Innovation Program“, in SCHULTE-WERNING, B.; THOMPSON, D.; GAUTIER, P.-E.; HANSON, C.; HEMSWORTH, B.; NELSON, J.; MAEDA, T.; VOS, P. de (Hrsg.): „Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems“, Springer Verlag Berlin, 2008
- [33] HARTLEBEN, D.: „Schienenschleifen als Maßnahme zur ‘Lärmreduzierung an der Quelle’“, in *Proceedings zur RAIL-noise 2011*, Schriftenreihe des IFV Bahntechnik, 2011
- [34] HARTUNG, J.: „Statistik“, 14. Auflage, Oldenbourg Verlag München, 2005
- [35] HECHT, M.: „Geräuschminderung bei Güterwagen (LEILA-DG)“, in *Proceedings zur RAIL-noise 2007*, Schriftenreihe des IFV Bahntechnik, 2007
- [36] HECHT, M.; GRAMOWSKI, C.: „Messung der Track Decay Rate eines Gleises mit DURFLEX Schaum“, Bericht 40/2009 des FG Schienenfahrzeuge der TU Berlin, 2010 (nicht öffentlich)
- [37] HECHT, M.; LÖFFLER, M.; GRAMOWSKI, C.: „Rollgeräuschreduktion durch innovative Schienenkonstruktion“, *EI - Der Eisenbahningenieur*, Heft 8, Seite 6-10, 2008
- [38] HECHT, M.; THRON, T.: „Oberbau, Rollgeräusch, Lärm - in der Praxis umsetzbare Akustik - Teil 2“, *EI - Der Eisenbahningenieur*, Heft 2, Seite 26-31, 2010

- [39] HEMSOWRTH, B.; GAUTIER, P.-E.; JONES, R.: „Silent Freight and Silent Track projects“, Proceedings of Internoise 2000, Nizza, 2000
- [40] HERRMANN, T.: „Akustisch optimierte Oberbausysteme - Kosten-Nutzen-Analyse anhand von Messergebnissen“, Studienarbeit 05/2010 an der TU Berlin / FG Schienenfahrzeuge, Berlin 2010
- [41] HO, W.; WONG, B.; ENGLAND, D.: „Tuned Mass Damper for Rail Noise Control“, in MAEDA, T.; GAUTIER, P.-E.; HANSON, C.; HEMSWORTH, B.; NELSON, J.; SCHULTE-WERNING, B.; THOMPSON, D.; VOS, P. de (Hrsg.): „Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems“, Springer Verlag Berlin, 2012
- [42] HOHNECKER, E.: „Diskret gelagerte oder kontinuierliche eingebettete Schienenfahrssysteme?“, EI - Der Eisenbahningenieur, Nr. 11/2002, Seite 45-49
- [43] HOHNECKER, E.: „Schienenfahrwege für das 21. Jahrhundert. Teil I: Lärmreduktion beim Fahren auf kontinuierlich gelagerter Schiene System INFUNDO“, Abschlussbericht, Karlsruhe 2004
- [44] HOLZFEIND, J.; HUMMITZSCH, R.: „Zur Prognostizierbarkeit des Qualitätsverhaltens von Gleisen“, EI - Der Eisenbahningenieur, Nr. 8/2010, Seite 32-40
- [45] ILIAS, H.: „The Influence of Railpad Stiffness on Wheelset/Track Interaction and Corrugation Growth“, Journal of Sound and Vibration 227, Seite 935-948, 1999
- [46] JANSEN, H.; DITTRICH, M.: „Separation of rolling noise and aerodynamic noise by in-service measurement of combined roughness and transfer function on a high speed slab track“, in MAEDA, T.; GAUTIER, P.-E.; HANSON, C.; HEMSWORTH, B.; NELSON, J.; SCHULTE-WERNING, B.; THOMPSON, D.; VOS, P. de (Hrsg.): „Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems“, Springer Verlag Berlin, 2012
- [47] JANSSENS, M.; DITTRICH, M.; de BEER, F.; JONES, C.: „Railway noise measurement method for pass-by noise, total effective roughness, transfer functions and track spatial decay“, Journal of Sound and Vibration 293, Seite 1007-1028, 2006
- [48] JONES, C.; FODIMAN, P.; LÉTOURNEAUX, F.; CROFT, B.: „Testing the new acoustic rail roughness measurement standard“, in SCHULTE-WERNING, B.; THOMPSON, D.; GAUTIER, P.-E.; HANSON, C.; HEMSWORTH, B.; NELSON, J.; MAEDA, T.; VOS, P. de (Hrsg.): „Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems“, Springer Verlag Berlin, 2008

- [49] JONES, C.; THOMPSON, D.; DIEHL, R.: „The use of decay rates to analyse the performance of railway track in rolling noise generation“, *Journal of Sound and Vibration* 293, Seite 485-495, 2006
- [50] KALIVODA, M.: „Beurteilung von Bahninfrastrukturkomponenten hinsichtlich Geräuschemission“, in *Proceedings zur RAIL-noise 2009*, Schriftenreihe des IFV Bahntechnik, 2009
- [51] KALIVODA, M.; ROSENKRANZ, P.: „Praxisversuch Calmmoon-Rail - Untersuchungsbericht“, Bericht DN 2008-39-005 der psiA-Consult, Wien 2009 (nicht öffentlich)
- [52] KLEINERT, U., KRÜGER, M., RIPKE, B.: „Applications and Benefits of Elastic Elements in Ballasted Track“, Vortrag UIC-Workshop „Applications and Benefits of Elastic Elements in Ballasted Tracks“, Paris 2006
- [53] KNOTHE, K.: mündliche Mitteilung, 2011
- [54] KNOTHE, K.: „Gleisdynamik“, Verlag Ernst & Sohn Berlin, 2001
- [55] KNOTHE, K.; GRASSIE, S.: „Modelling of Railway Track and Vehicle/Track Interaction at High Frequencies“, *Vehicle System Dynamics* 22, Seite 209-262, 1993
- [56] KNOTHE, K.; STRZYZAKOWSKI, Z.; WILLNER, K.: „Rail vibrations in the high frequency range“, *Journal of Sound and Vibration* 169, Seite 111-123, 1994
- [57] KNOTHE, K.; YU, M.: „Statische und dynamische Eigenschaften von Gummi-Zwischenlagen für Eisenbahnschienen“, *Forschung im Ingenieurwesen* 22, Seite 247-259, 2001
- [58] KOCH, B.; ZWANZIGER, F.: „Schallschutz an Schienenwegen - eine Bestandsaufnahme“, *ETR - Eisenbahntechnische Rundschau*, 10/2011, S. 694-703, 2011
- [59] KOLLER, G.: „'Lärmschutzwand' direkt an der Schiene“, *EI - Der Eisenbahningenieur* 06/2010, Seite 26-30
- [60] KURZECK, B.: „Methoden zur Minderung mittelfrequenter Schwingungen bei Bogenfahrt im Schienennahverkehr“, Dissertation, TU Berlin, 2007
- [61] KRÜGER, F.: „Schall- und Erschütterungsschutz im Schienenverkehr“, 2. Auflage, expert-Verlag Renningen-Malmsheim, 2006
- [62] MAINKA, T.: „Kosten/Nutzen-Analyse für Lärmschutzmaßnahmen an Schienenwegen: Einsparungsoptionen bei Einsatz von Schienenstegdämpfern“, in *Proceedings zur RAIL-noise 2011*, Schriftenreihe des IFV Bahntechnik, 2011

- [63] de MAN, A.: „Pin-pin resonance as a reference in determining ballasted railway track vibration behaviour“, HERON Vol. 45 (TU Delft), 2000
- [64] MEAD, D.: „Wave propagation and natural modes in periodic systems: II. Multi-coupled systems, with and without damping“, Journal of Sound and Vibration 40, Seite 19-39, 1975
- [65] Fa. MMF: „Applikationsschrift Piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer - Ankopplung von Beschleunigungsaufnehmern“, Radebeul 2005
- [66] MÜLLER, G.; MÖSER, M.: „Taschenbuch der Technischen Akustik“, 3. Auflage, Springer Verlag Berlin, 2004
- [67] MÜLLER-BORUTTAU, F.: „Erschütterungsschutz bei Vollbahnen in der freien Strecke-SYSTEME GRÖTZ BSO/MK mit Unterschottermatten von CLOUTH“, Inning-Buch, o. J.
- [68] MÜLLER-BORUTTAU, F.; BREITSAMTER, N.: „Elastische Elemente verringern die Fahrwegbeanspruchung“, ETR - Eisenbahntechnische Rundschau, 09/2000, S. 587-596, 2000
- [69] NETER, J.; WASSERMANN, W.; KUTNER, M.: „Applied Linear Statistical Models“, 2. Auflage, IRWIN Homewood/Illinois, 1985
- [70] NILSSON, N.; MALKER, H.: „The Saddle Profile Rail - a squeal free design“, Proceedings of Internoise 2001, Den Haag 2001
- [71] N. N.: „Bahnausbau: Igeler lehnen Lärmschutzwand ab“, Volksfreund.de, Nachrichten/Region/Trier Land, 12.03.2012
- [72] N. N.: „Neues Image für „soziale Stadt“, Nordsee-Zeitung Bremerhaven, 2009
- [73] NOWACK, R.; HÖLZL, G.; DIEHL, R.; BACHMANN, H.; MOHR, W.: „Die Akustisch Innovative Feste Fahrbahn“, ETR - Eisenbahntechnische Rundschau, 09/1999, S. 571-582, 1999
- [74] OERTLIE, J.; ELBERS, F.; van der STAP, P.: „The STAIRRS project: A cost-benefit analysis of different measures to reduce railway noise on a European scale“, proceedings of Internoise 2001, Den Haag 2001
- [75] OPPEL, M.: „Indirect Determination of the Track Decay Rate and the Wheel/Rail Roughness from Train Pass-by Rail Accelerations“, Diplomarbeit, TU Berlin - FG Schienenfahrzeuge, 2011
- [76] Fa. ORTEC, Technische Informationen unter www.ortec-gmbh.de
- [77] OSTERMANN, N.; PRESLE, G.: „Systematische Beurteilung von Schallschutzmaßnahmen“, ETR - Eisenbahntechnische Rundschau, 03/2012, S. 64-70, 2012

- [78] Pougetrail, Patentschriften FR 2890988 und FR 2814477, Informationen unter http://pougetrail.com/en/-machines-de-travaux-de-voies?page=shop.product_details&flypage=flypage.tpl&product_id=199&category_id=4
- [79] PAHNKE, U.: „Dynamische Bemessung des Schotteroberbaus“, ETR - Eisenbahntechnische Rundschau, 12/2011, S. 40-48, 2011
- [80] PAHNKE, U.; MÜLLER-BORUTTAU, F.; BREITSAMTER, N.: „Frequenzspektren des Schotteroberbaus“, ETR - Eisenbahntechnische Rundschau, 07+08/2010, S. 473-483, 2010
- [81] „Quiet City Transport - PROJECT SUMMARY BROCHURE“ oder unter www.qcity.org
- [82] QUANTE, F.: „Maßnahmen zur Lärminderung – Visionen aus der anwendungsorientierten Forschung“, Vortrag VDEI Symposium Lärmschutz, Berlin 2010
- [83] Fa. RAIL.ONE: „Concrete Sleepers“, 2011
- [84] REICHART, U.; WEINANDY, R.: „TSI Noise - große Revision. Trends und aktuelle Entwicklungen“, Vortrag DAGA, 2012
- [85] RIPKE, B.: „Lateral- und Vertikalschwingungen einer auf diskreten Schwellen gelagerten Schiene unter harmonisch veränderlicher Einzellast“, Bericht aus dem Institut für Luft- und Raumfahrt (ILR) der Technischen Universität Berlin, ILR-Mitteilung 190, 1987
- [86] RIPKE, B.; KNOTHE, K.: „Die unendlich lange Schiene auf diskreten Schwellen bei harmonischer Einzellasterregung“, Fortschrittsberichte des VDI, Reihe 11 Nr 155, VDI-Verlag Düsseldorf 1991
- [87] SCHLITTGEN, R.: „Einführung in die Statistik“, 4. Auflage, Oldenbourg Verlag München, 1993
- [88] Schweizer Eidgenossenschaft, Bundesamt für Umwelt BAFU (Hrsg.): sonRAIL - Projektdokumentation, Verlag des IfV Bahntechnik, Berlin 2010
- [89] SIEGLITZ, R.; CZOLBE, C.: „Schienenabsorber in der Praxis - Untersuchung der Wirksamkeit bei Einsatz verschiedener Fahrzeugtypen“, ZEVrail-Glaser Annalen 135(11-12), Seite 426-435, 2011
- [90] SIEGLITZ, R.; CZOLBE, C.: „Wirksamkeit von Schienenabsorber“, Vortrag DAGA, 2012
- [91] Fa. Stahlbetonschwellenwerk Linz: Zeichnung Rahmenschwelle RS70, Zeichnungs-Nr. RS 70 d, 2000 (nicht öffentlich)

- [92] SWETS, E.: „On the extensive use of close-track noise barriers in a Norwegian railroad project“, Vortrag EURONOISE, 2009
- [93] THIJSSSEN, D. et al: „Report on mitigation measures for rails: conceptual designs“, Projekt QCITY, deliverable D3.9, 2006
- [94] THOMPSON, D.: „Railway noise and vibration: mechanism, modelling and means“, Elsevier Oxford / Amsterdam, 2009
- [95] THOMPSON, D., FODIMAN, P., MAHÉ, H.: „Experimental validation of the Twins prediction program for rolling noise, part 2: results“, Journal of Sound and Vibration 193, Seite 137-147, 1996
- [96] THOMPSON, D.; HEMSWORT, B.; VINCENT, N.: „Experimental validation of the TWINS prediction of rolling noise, part 1: description of the model and method“, Journal of Sound and Vibration 193, Seite 123-135, 1996
- [97] THOMPSON, D.; JONES, C.; WATERS, T. P.; FARRINGTON, D.: „A tuned damping device for reducing noise from railway track“, Applied Acoustics 68, Seite 43-57, 2007
- [98] THOMPSON, D.; JONES, C.; WU, T. X.; de FRANCE, G.: „The influence of the non-linear stiffness behaviour of rail pads on the track component of rolling noise“, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F 213, Seite 233-241, 1999
- [99] THOMPSON, D.; VINCENT, N.: „Track Dynamic Behaviour at High Frequencies. Part 1: Theoretical Models and Laboratory Measurements“, Vehicle Systems Dynamic Supplements 24, Seite 86-99, 1995
- [100] Fa. ThyssenKrupp GfT Gleistechnik: „Oberbauhandbuch“, Onlineausgabe
- [101] Fa. ThyssenKrupp GfT Gleistechnik: „Oberbau Y - St 98 Y mit S 15“, 2006
- [102] UIC Project Under Sleeper Pads – Semelles sous traverses – Schwellenbesohlungen, Summarising Report, 4th Edition, 2009
- [103] VENGHAUS, H.: „Vibration absorbers fitted to rails to reduce the noise of passing trains“, RTR - European Rail Technology Review, Heft 3, Seite 6-11, 2009
- [104] Verband Deutscher Verkehrsunternehmen - Schrift 154: „Geräusche von Nahverkehrs-Schienenfahrzeugen nach BOStrab“, Köln 2011
- [105] Verband Deutscher Verkehrsunternehmen - Schrift 611: „Geräusche in Gleisbögen des schienengebundenen ÖPNV“, Köln 2011
- [106] Verband öffentlicher Verkehr (CH): „Fahrbahnpraxis Normalspur“, Handbuch (Entwurf), 2007

- [107] VINCENT, N.; BOUVET, P.; THOMPSON, D.; GAUTIER, P.: „Theoretical optimization of track components to reduce rolling noise“, *Journal of Sound and Vibration* 193(1), Seite 161-171, 1996
- [108] VINCENT, N.; THOMPSON, D.: „Track Dynamic Behaviour at High Frequencies. Part 2: Experimental Results and Comparisons with Theory“, *Vehicle System Dynamics Supplement* 24, Seiten 100-114, 1995
- [109] Fa. Vossloh Fastening Systems GmbH, mündliche Mitteilung, 2010
- [110] Fa. WIRTHWEIN AG: Produktkatalog „WIRTHWEIN und die Bahn“, Creglingen 2010
- [111] WU, T. X.: „Effects on rail corrugation growth of rail vibration absorber/damper“, State key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China. *Proceedings of the 8th Int. Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems 2009*, S. 491
- [112] ZIMMER, H. (Hrsg.): „Entwicklung Simulationstool Rollgeräusch für Schienenfahrzeuge und Fahrwege und seine messtechnische Validierung (SIMTool Rollgeräusch)“, Gesamt Abschlussbericht, Berlin 2004 (nicht öffentlich)

Ungeprüfte Literatur

- [113] THOMPSON, D.; JONES, C.: „The assessment of various vehicles for possible use as a quiet vehicle in order to measure track noise“ (STAIRRS Report) ISVR Contract Report 01/20, 2001 (nicht öffentlich, Verweis aus [47])
- [114] THOMPSON, D.; JONES, C.: „Study on the sensitivity of the indirect roughness method to variations in track and wheel parameters“ (STAIRRS Report) ISVR Contract Report 01/21, 2001 (nicht öffentlich, Verweis aus [47])
- [115] THOMPSON, D.; van VLIET, W.; VERHEIJ, J.: „Developments of the indirect method for measuring the high frequency dynamic stiffness of resilient elements“, *Journal of Sound and Vibration* 213, Seite 169-188, 1998 (Verweis aus [94])

Normen und Richtlinien

- [116] Erschütterungen im Bauwesen (DIN 4150), Teile 1 - 3
- [117] Bahnanwendungen - Akustik - Geräuschmessungen in spurgebundenen Fahrzeugen (ISO 3381:2005); Deutsche Fassung EN ISO 3381:2005
- [118] Bahnanwendungen - Akustik - Messung der Geräuschemission von spurgebundenen Fahrzeugen (ISO 3095:2005); Deutsche Fassung EN ISO 3095:2005
- [119] Bahnanwendungen - Geräuschemission - Messung der Schienenrauheit im Hinblick auf die Entstehung von Rollgeräusch (DIN EN 15610:2009); Deutsche Fassung EN 15610:2009
- [120] Bahnanwendungen – Oberbau – Schienen - Teil 1: Vignolschienen ab 46 kg/m (DIN EN 13674-1:2003); Deutsche Fassung EN 13674-1:2003
- [121] Bahnanwendungen – Schallemission – Charakterisierung der dynamischen Eigenschaften von Gleisabschnitten für Schallmessungen von vorbeifahrenden Zügen (DIN EN 15461:2008); Deutsche Fassung EN 15461:2008
- [122] Bahnanwendungen – Schallemission – Charakterisierung der dynamischen Eigenschaften von Gleisabschnitten für Schallmessungen von vorbeifahrenden Zügen (DIN EN 15461:2011); Deutsche Fassung EN 15461:2008+A1:2010
- [123] Schwingungsmessung in der Umgebung von Schienenverkehrswegen (DIN 45672), Teile 1 und 2
- [124] Mechanische Schwingungen – Elastische Elemente des Oberbaus von Schienenfahrwegen, Teile 1 - 7 (DIN 4567 1-7), teilweise Vornorm
- [125] Mechanische Schwingungen und Stöße - Mechanische Ankopplung - von Beschleunigungsaufnehmern (ISO 5348:1998); Deutsche Fassung DIN ISO 5348:1999
- [126] Richtlinie des Europäischen Parlamentes und des Rates über die Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm, Aktenzeichen 2002/49/EG, 2002
- [127] Richtlinie zur Berechnung der Schallimmissionen von Eisenbahnen und Straßenbahnen, Schall 03, Ausgabe 2006
- [128] ‘Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung’ vom 11. Dezember 1987 (BGBl. I S. 2648), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 8. November 2007 (BGBl. I S. 2569) geändert worden ist

- [129] Technische Spezifikation für die Interoperabilität (TSI) zum Teilsystem „Fahrzeuge“ des transeuropäischen Hochgeschwindigkeitsbahnsystems; Aktenzeichen K(2008) 648, Amtsblatt der Europäischen Union 2008/232/EG
- [130] Technische Spezifikation für die Interoperabilität (TSI) zum Teilsystem „Fahrzeuge – Lärm“ des konventionellen transeuropäischen Bahnsystems; Aktenzeichen K(2005) 5666, Amtsblatt der Europäischen Union 2006/66/EU (‘TSI Noise 2006’)
- [131] Technische Spezifikation für die Interoperabilität (TSI) zum Teilsystem „Fahrzeuge – Lärm“ des konventionellen transeuropäischen Bahnsystems; Aktenzeichen K(2011) 658, Amtsblatt der Europäischen Union 2011/229/EU (‘TSI Noise 2011’)
- [132] Vibration and shock - Experimental determination of mechanical mobility - Part 1: Basic definitions and transducers (ISO 7626-1:1986)
- [133] Vibration and shock - Experimental determination of mechanical mobility - Part 5: Measurements using impact excitation with an exciter which is not attend to the structure (ISO 7626-5:1994)

Veröffentlichungen im Rahmen dieser Arbeit

- GRAMOWSKI, C.; HECHT, M.: „Lärmarme Gleisbauformen“, ZEVrail-Glaser Annalen 136(05), Seite 174-179, 2012
- GRAMOWSKI, C.: „Neue Entwicklungen zur gleisseitigen Schallminderung“, in Proceedings zur RAIL-noise 2011, Schriftenreihe des IFV Bahntechnik, 2011
- GRAMOWSKI, C.: „Effiziente Anwendung gleisseitiger Schallminderungsmaßnahmen“, Vortrag auf der „Lärmschutz 2010“, Dortmund, 2010
- FRENZEL, J.; PUPPE, M.; HECHT, M.; GRAMOWSKI, C.: „Verschäumter Schotteroberbau - Erfahrungen aus der Praxiserprobung“, EI - Der Eisenbahningenieur Heft 03, Seite 42-48, 2010
- HECHT, M.; LÖFFLER, M.; GRAMOWSKI, C.: „Rollgeräuschreduktion durch innovative Schienenkonstruktion“, EI - Der Eisenbahningenieur, Heft 8, Seite 6-10, 2008

Anhang A Herleitung der TDR

Nach [49]

Für alle Wellenformen wird eine exponentielle Reduktion zu beiden Seiten x der Anregungsposition (AP), beschrieben durch die Abklingkonstante β , angenommen.

Mit $\tilde{W}_{Wave} \approx l_r h_r \sigma_r \rho_0 c_0$ ergibt sich Gleichung 4.6 (siehe Seite 12) zu

$$W_{Wave} = \tilde{W}_{Wave} \int_{-\infty}^{\infty} |v(x)|^2 dx \quad (\text{A.1})$$

$$= \tilde{W}_{Wave} \int_{-\infty}^{\infty} v^2(0) e^{-2\beta|x|} dx \quad (\text{A.2})$$

$$= 2\tilde{W}_{Wave} v^2(0) \int_0^{\infty} e^{-2\beta|x|} dx \quad (\text{A.3})$$

$$= 2\tilde{W}_{Wave} v^2(0) \frac{1}{2\beta} . \quad (\text{A.4})$$

Aus den Gleichungen A.3 und A.4 ergibt sich

$$\int_0^{\infty} e^{-2\beta|x|} dx = \frac{1}{2\beta} \quad (\text{A.5})$$

Die Oberflächenschnelle v kann bei Zugüberfahrt nicht an der gesamten Oberfläche ermittelt werden. Alternativ kann das Abklingverhalten auch über das Verhältnis von Übertragungsfunktionen (FRF, hier: Admittanz oder Akzeleranz) in bekannten räumlichen Abständen gebildet werden. Aus Gleichung A.5 ergibt sich

$$\frac{1}{2\beta} = \int_0^{\infty} \frac{|FRF(x)|^2}{|FRF(0)|^2} dx . \quad (\text{A.6})$$

Stehen allein FRF an i singulären Punkten, bis zu einer maximalen Entfernung x_{max} vom Anregungspunkt, zur Verfügung, führt die Approximation

$$\frac{1}{2\beta} \approx \sum_{x_i=0}^{x_{max}} \frac{|FRF(x_i)|^2}{|FRF(0)|^2} \Delta x . \quad (\text{A.7})$$

zu ähnlichen Ergebnissen. Die Abklingkonstante β ergibt sich daher zu

$$\beta \approx \left(2 \sum \frac{|FRF(x_i)|^2}{|FRF(0)|^2} \cdot \Delta x \right)^{-1} . \quad (\text{A.8})$$

Die Abklingkonstante β wird verpegelt und als Gleis-Abklingrate ('Track Decay Rate', TDR) bezeichnet. Die Einheit ist dB/m .

$$TDR = 20 \log_{10} (e^\beta) \text{ dB/m} \quad (\text{A.9})$$

$$= 8.868\beta \text{ dB/m} \quad (\text{A.10})$$

Wird die Approximation aus Gleichung A.8 eingesetzt, führt dies zu

$$TDR \approx \frac{8.686}{2 \sum \frac{|FRF(x_i)|^2}{|FRF(0)|^2} \cdot \Delta x} = \frac{4.343}{\sum \frac{|FRF(x_i)|^2}{|FRF(0)|^2} \cdot \Delta x} \text{ dB/m} \quad (\text{A.11})$$

Liegt kein Abklingen vor, daher $|FRF(x_i)| = |FRF(0)|$, so ergibt sich ein minimaler TDR-Wert

$$TDR_{min} \approx \frac{4.343}{x_{max}} . \quad (\text{A.12})$$

Anhang B Auswirkung definiert schräger Impulse

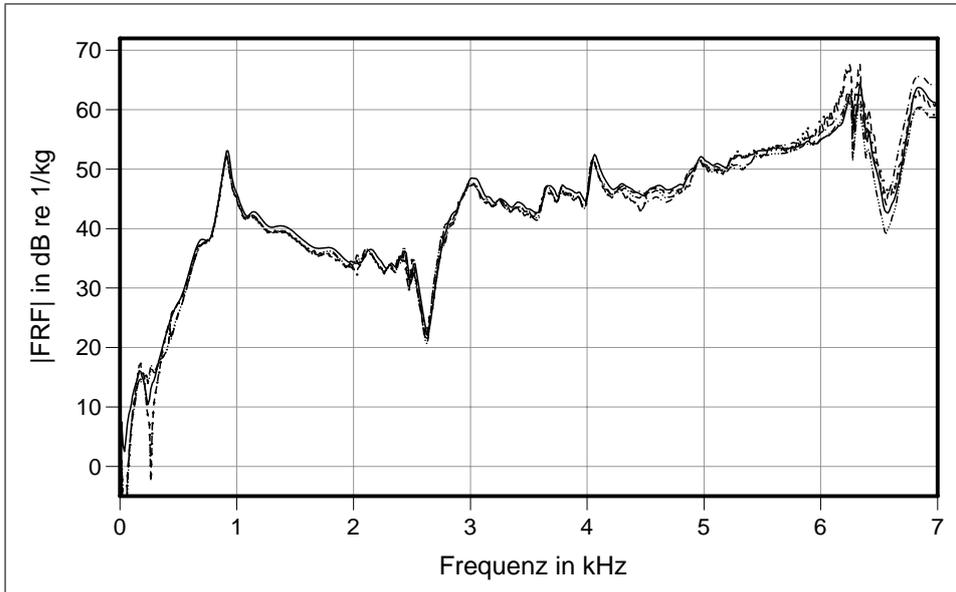


Abb. B.1: L_{FRF} von definiert schrägen Schläge im Schwellenfach. (—) vertikal; (- -) Richtung gleisinnen 45°, (···) 20°; (-· -·) Richtung gleisaußen 45°, (-· · ·) 20°

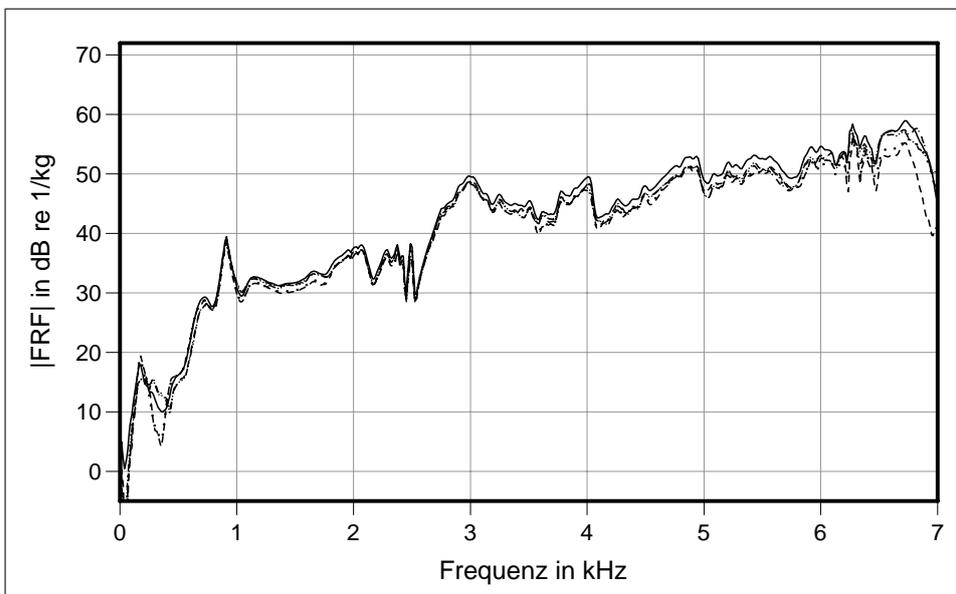


Abb. B.2: L_{FRF} von definiert schrägen Schläge auf der Schwelle. (—) vertikal; (- -) Richtung gleisinnen 45°, (···) 20°; (-· -·) Richtung gleisaußen 45°, (-· · ·) 20°

Anhang C Messtechnik

C.1 Übersicht

In dieser Arbeit wurde die in Tabelle C.1 aufgeführte Messtechnik genutzt.

Tab. C.1: Geräteliste Track Decay Rate

Anzahl	Gerät	Hersteller	Serien-Nr.
1	DS-2000 Datenaufzeichnung mit DS-0264A <i>signal input unit</i> (Modell-Nr. DS-0271.A)	Onosokki	47502225
1	Beschleunigungssensor Typ 4507B-001	Brüel & Kjær	30115
1	Beschleunigungssensor Typ 4507B-001	Brüel & Kjær	30117
1	Hammer 086D05 mit Kraftmessdose 0.3 kg, Stahlspitze	PCB	19453
1	Hammer 086D20 mit Kraftmessdose 1.1 kg, versch. Hartgummispitzen	PCB	25814
3	Verbindungskabel	Brüel & Kjær	/
1	7-Leiter Verbindungskabel	Eigenbau	/
3	Verbindungskabel	Eigenbau	/

Für die Vergleiche des Frequenzbereiches [1;100 Hz] in Kapitel 6.1.8 ist folgender Hammer genutzt worden:

1	Hammer 086D50 mit Kraftmessdose 5.5 kg, Hartgummispitze	PCB	/
---	---	-----	---

C.2 Validierung der magnetischen Sensor-Befestigung

Durch eine experimentelle Verifikation wird ermittelt, ob sich bei TDR-Messungen mittels magnetischer Sensor-Befestigung eine Einschränkung der spektralen Aussagefähigkeit ergibt. Der Vergleich erfolgt mit der Befestigung durch Klebung, die bis zu einer Frequenz von $f \approx 15$ kHz gültig ist (3 dB Unsicherheit im Resonanzfrequenzgang) [65].

Der Haftmagnet vom Typ FD6N (Durchmesser 20 mm, Kraft 140 N) der Fa. IBS Magnet wird mit einem pastösen, kalt härtenden Klebstoff (Methyl-Methacrylat, Typ X60, Fa. HBM Deutschland) verglichen. Beide Sensoren werden an einer Schiene (Profil 60E1, Länge 6 m, gelagert auf zwei Holzstreifen, siehe Abbildung C.1), verglichen. Da diese Lagerung im Vergleich mit dem konventionellen Gleisoberbau weniger Lagerpunkte bietet, resultieren höhere Schwingungsamplituden, so dass die Unterschiede deutlicher werden. Die Anregung erfolgte mit dem in Tabelle C.1 aufgeführten Impulshammer vom Typ 086D05.

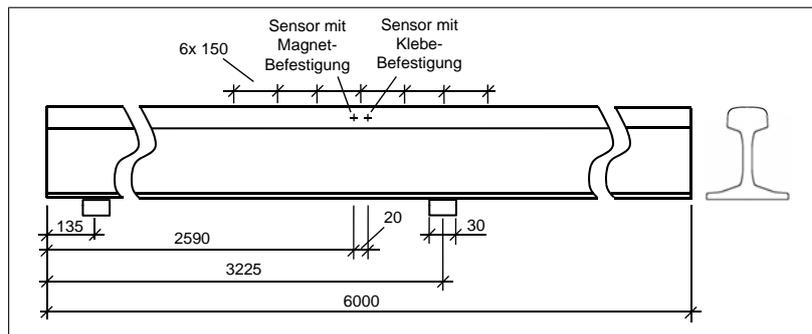


Abb. C.1: Skizze der Versuchsanordnung für Sensor-Befestigungs-Messungen

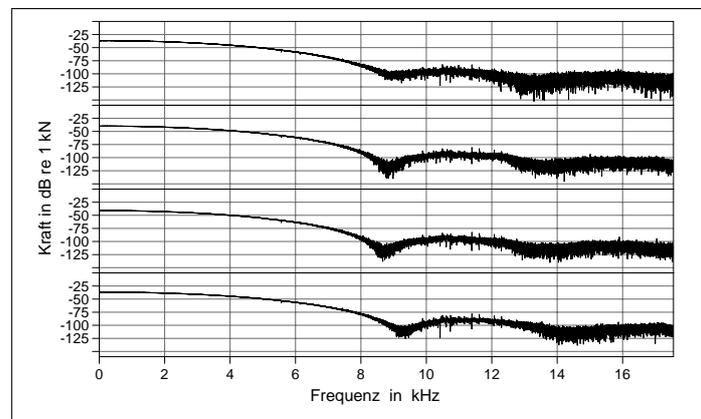


Abb. C.2: Sensor-Befestigungsversuche - exemplarische Kraft-Leistungsspektren

Hier muss, ebenso wie bei TDR-Messungen, die spektrale Gültigkeit der Hammer-Impulskraft (obere gültige Frequenz bei Kraftreduktion um ca. 15 dB gegenüber dem Maximum bei $f \approx 0$ Hz) beachtet werden. Ist diese obere Frequenz geringer als die Frequenz, bei der signifikante Unterschiede durch die Befestigung erkennbar sind, sind beide Befestigungsarten als gültig zu betrachten.

In Abbildung C.2 sind vier repräsentative Kraft-Leistungsspektren dieser Messreihe abgebildet. Das erste lokale Minimum zeigt sich stets im Bereich [8;9.5kHz]. Durch die annähernd ungedämpfte Struktur ohne relevante Nichtlinearitäten kann eine Kraftreduktion um 35 dB gegenüber dem Kraft-Maximum akzeptiert werden. Es zeigen sich meist obere Grenzfrequenzen zwischen $f=6.8$ und 7.8 kHz, siehe Abbildung C.3. Daher kann das 6.3 kHz-Terzband (obere Eckfrequenz 7.079 kHz) in dieser Versuchsreihe sicher ermittelt werden. Die Eignung der Befestigung wird mittels der FRF zwischen Kraft und der Beschleunigung ermittelt. In Abbildung C.4 sind die Differenzen repräsentativer L_{FRF} im Terzspektren abgebildet. Sie zeigen insgesamt relativ geringe Differenzen mit Maxima von 0.8 dB bei $f=10$ kHz. Damit ist die Befestigungsart im gesamten abgebildeten Spektrum gültig. Im Vergleich mit den Frequenzen, die sich durch die 35 dB-Reduktion der Kraft ergeben, zeigen sich tieffrequenterer Lagen dieser 'Grenzfrequenzen'. Die höherfrequenten L_{FRF} -Anteile

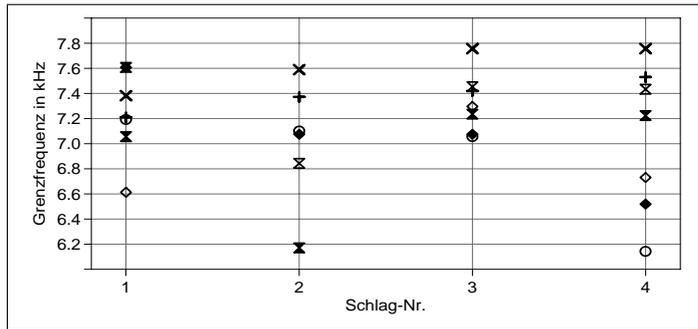


Abb. C.3: Sensor-Befestigungsversuche - Frequenzen der 35 dB-Reduktion

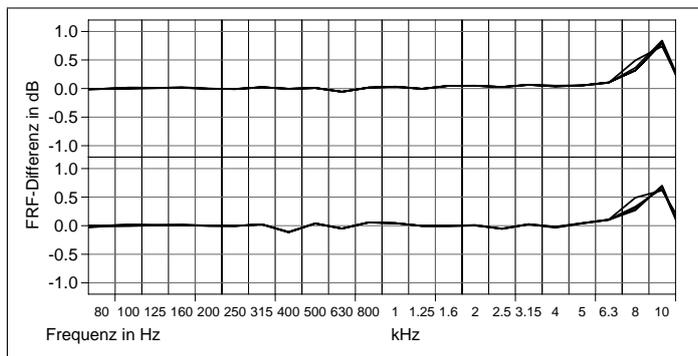


Abb. C.4: Sensor-Befestigungsversuche - exemplarische Terzspektren der L_{FRF} -Differenzen

basieren somit auf unsicheren Eingangssignalen.

Somit ergibt sich allein aus der Hammer-Konstruktion (Verhältnis der Hammermasse zur Schlagkalottensteifigkeit) eine spektrale Begrenzung. Die Sensorbefestigung mittels Magnet zeigt in diesem Frequenzbereich keine signifikante Änderung gegenüber einer Befestigung mittels Hartkleber.

C.3 Vergleich verschiedener Hammertypen

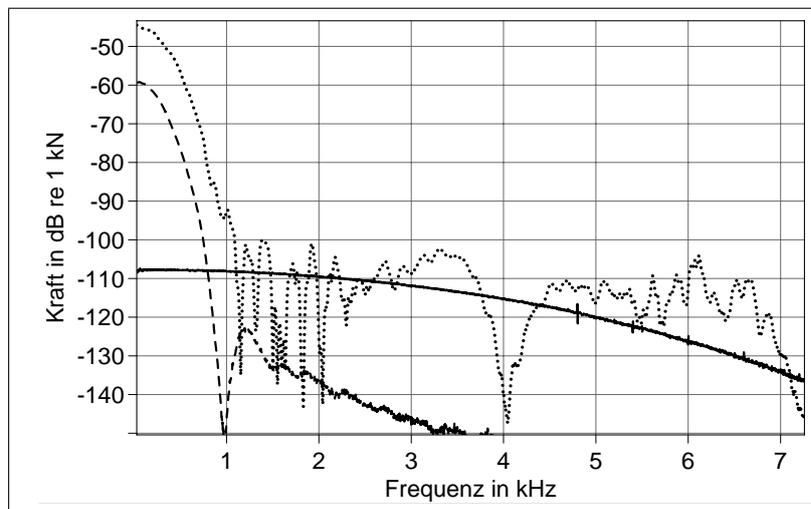


Abb. C.5: Leistungsspektrum typischer Hammerimpulse, vertikale Anregung. Hammer-Bauarten: (—) Gewicht 0.3 kg, harte Kalotte; (- -) Gewicht 1.1 kg, weiche Kalotte; (· · ·) Gewicht 5.5 kg, weiche Kalotte

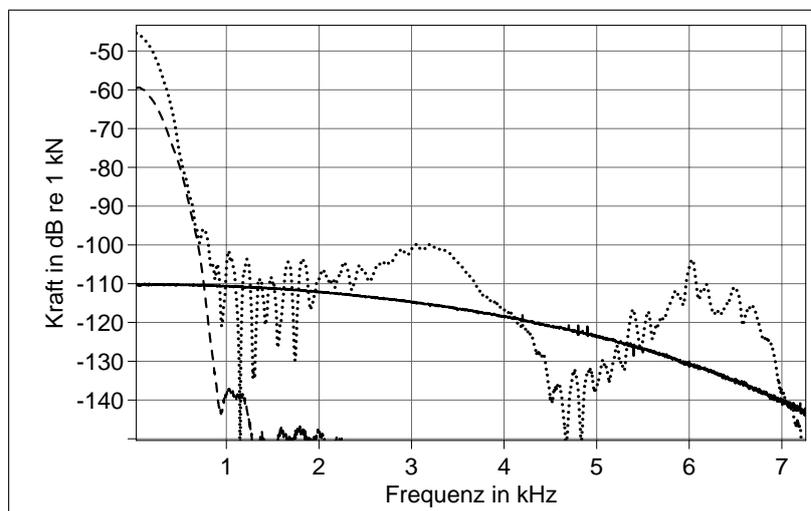


Abb. C.6: Leistungsspektrum typischer Hammerimpulse, laterale Anregung. Hammer-Bauarten: (—) Gewicht 0.3 kg, Harte Kalotte; (- -) Gewicht 1.1 kg, weiche Kalotte; (· · ·) Gewicht 5.5 kg, weiche Kalotte

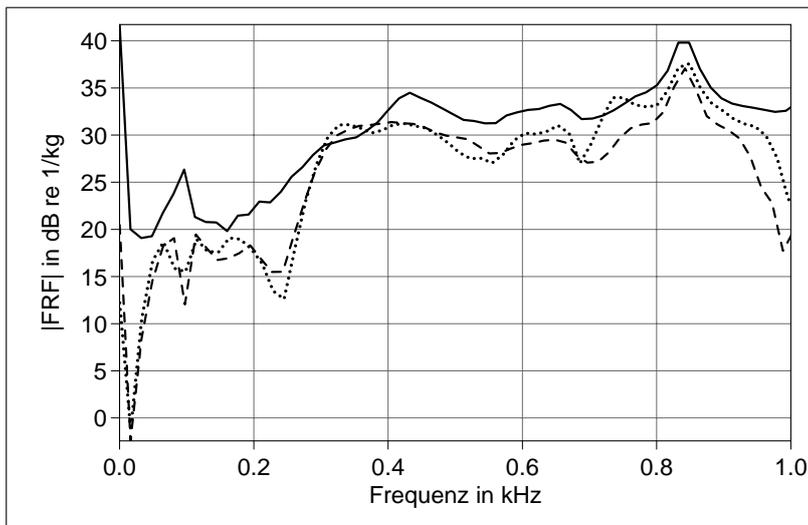


Abb. C.7: Punkteingangs- L_{FRF} , vertikale Anregung. Hammer-Bauarten: (—) Gewicht 0.3 kg, Harte Kalotte; (- -) Gewicht 1.1 kg, weiche Kalotte; (\cdots) Gewicht 5.5 kg, weiche Kalotte

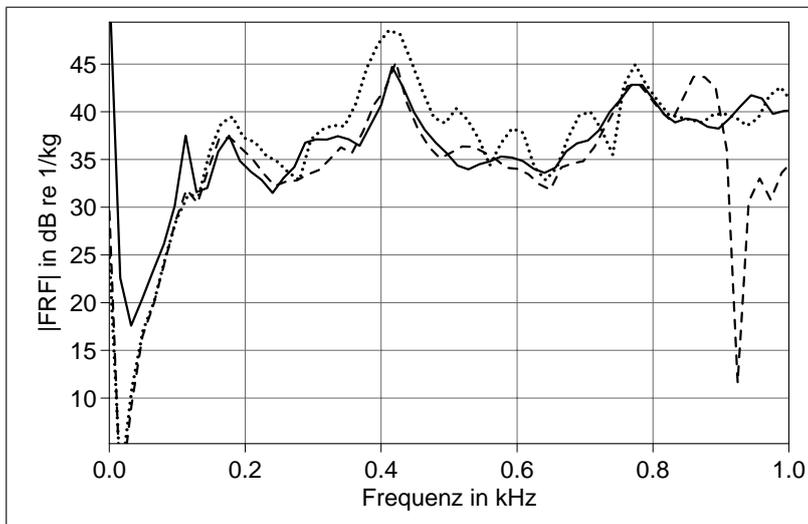


Abb. C.8: Punkteingangs- L_{FRF} , laterale Anregung. Hammer-Bauarten: (—) Gewicht 0.3 kg, Harte Kalotte; (- -) Gewicht 1.1 kg, weiche Kalotte; (\cdots) Gewicht 5.5 kg, weiche Kalotte

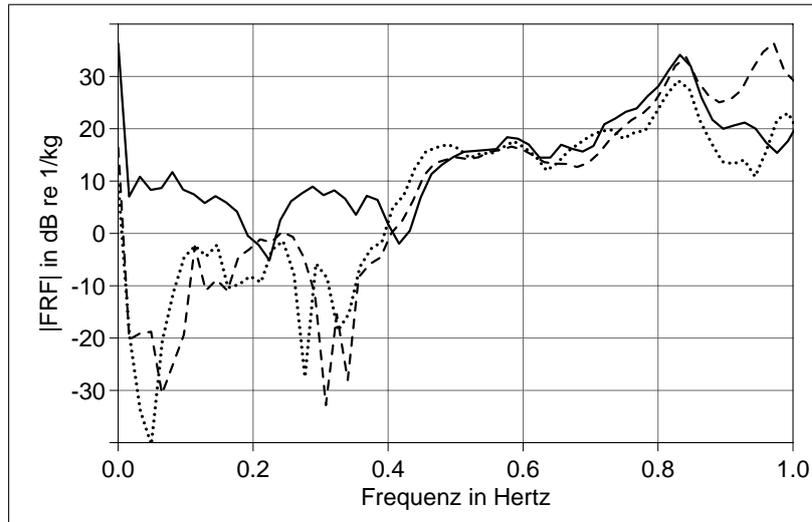


Abb. C.9: L_{FRF} bei Position 19, vertikale Anregung. Hammer-Bauarten: (—) Gewicht 0.3 kg, Harte Kalotte; (- -) Gewicht 1.1 kg, weiche Kalotte; (\cdots) Gewicht 5.5 kg, weiche Kalotte

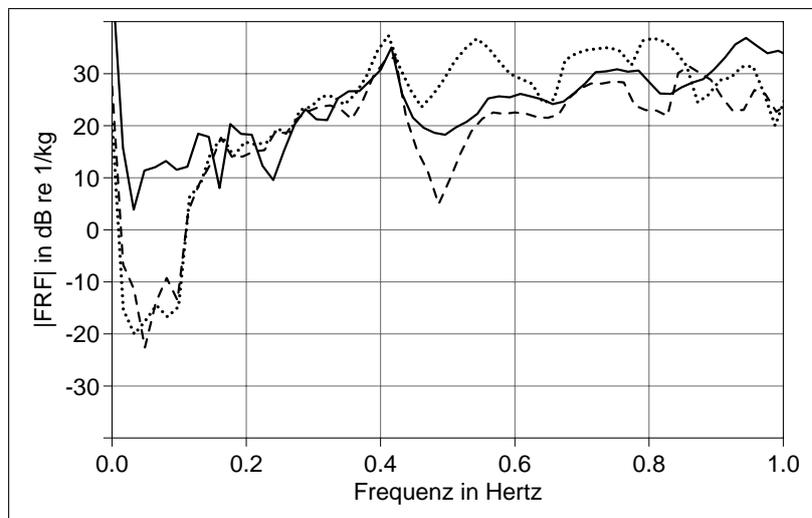


Abb. C.10: L_{FRF} bei Position 19, laterale Anregung. Hammer-Bauarten: (—) Gewicht 0.3 kg, Harte Kalotte; (- -) Gewicht 1.1 kg, weiche Kalotte; (\cdots) Gewicht 5.5 kg, weiche Kalotte

C.4 Variation der Grenzfrequenzen

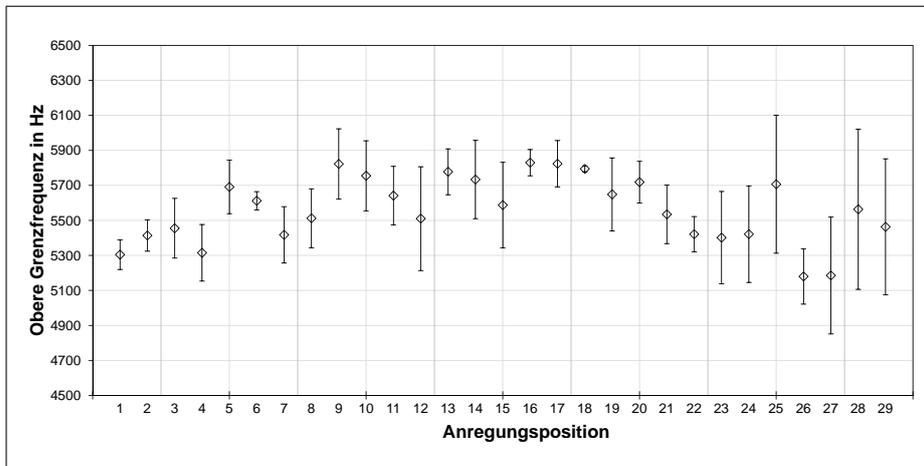


Abb. C.11: Obere nutzbare Grenzfrequenz bei 29 Anregungspositionen, leichter Hammer, vertikale Anregung. (\diamond) Mittelwert; (I) Mittelwert \pm mittlere Abweichung

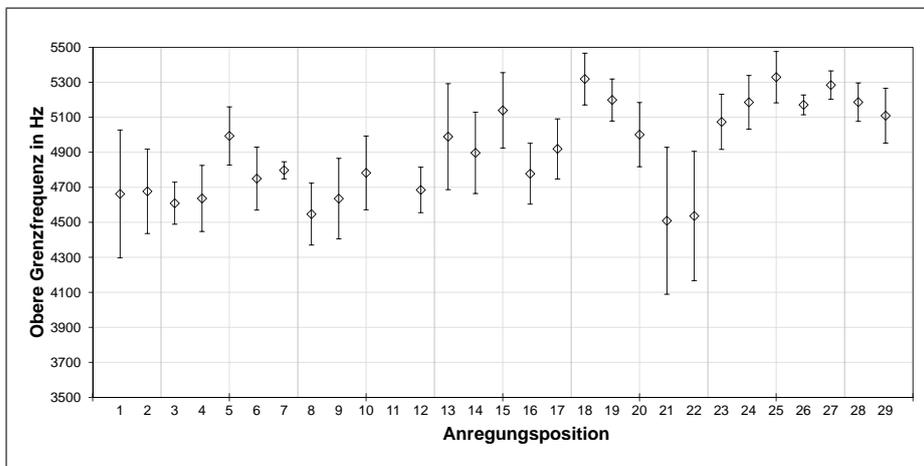


Abb. C.12: Obere nutzbare Grenzfrequenz bei 29 Anregungspositionen, leichter Hammer, lateral Anregung. (\diamond) Mittelwert; (I) Mittelwert \pm mittlere Abweichung

Anhang D r_i -x-Diagramme

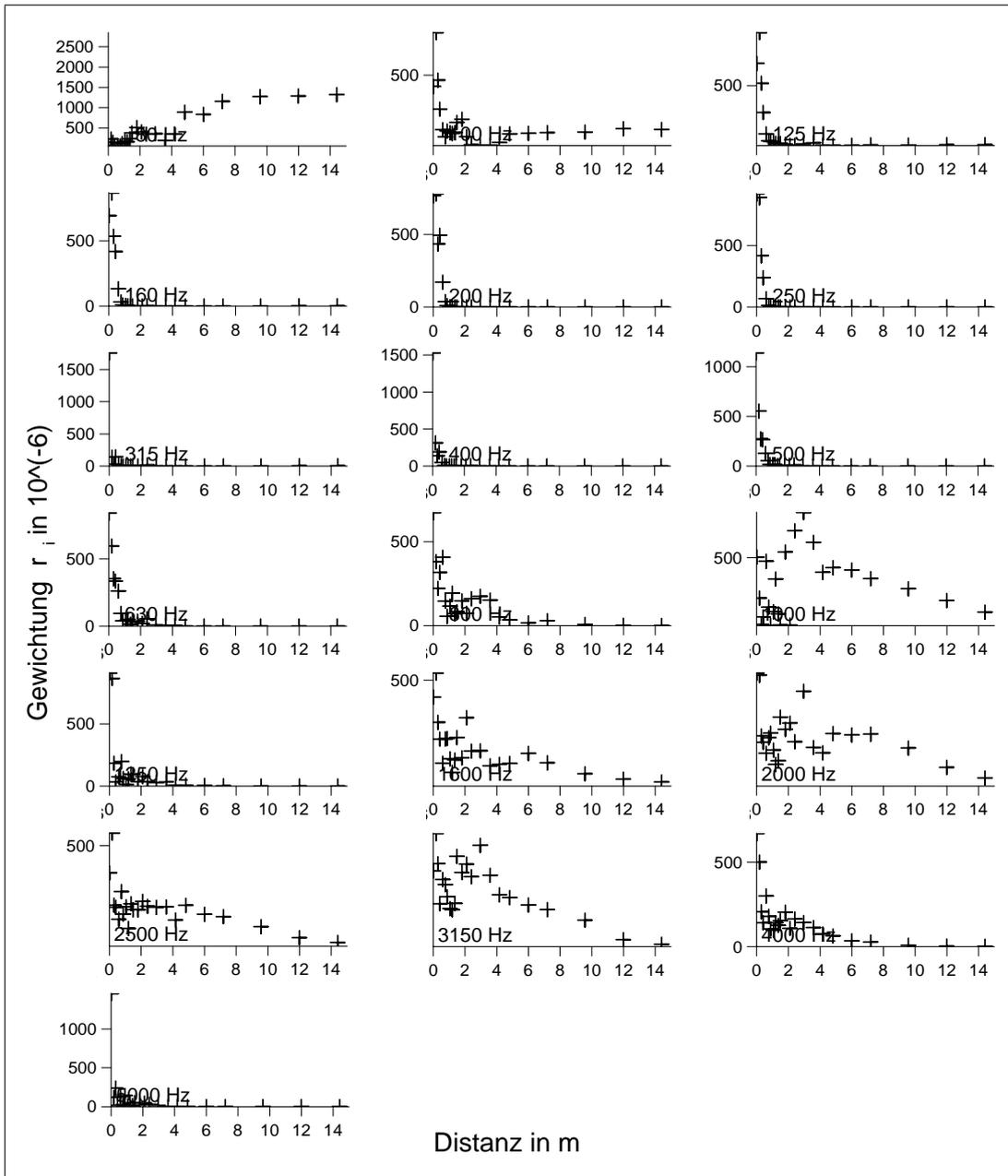


Abb. D.1: r_i -x-Verläufe, MS C5, vert. Anregung. Lin. Reg. mit Exponent m_{opt}

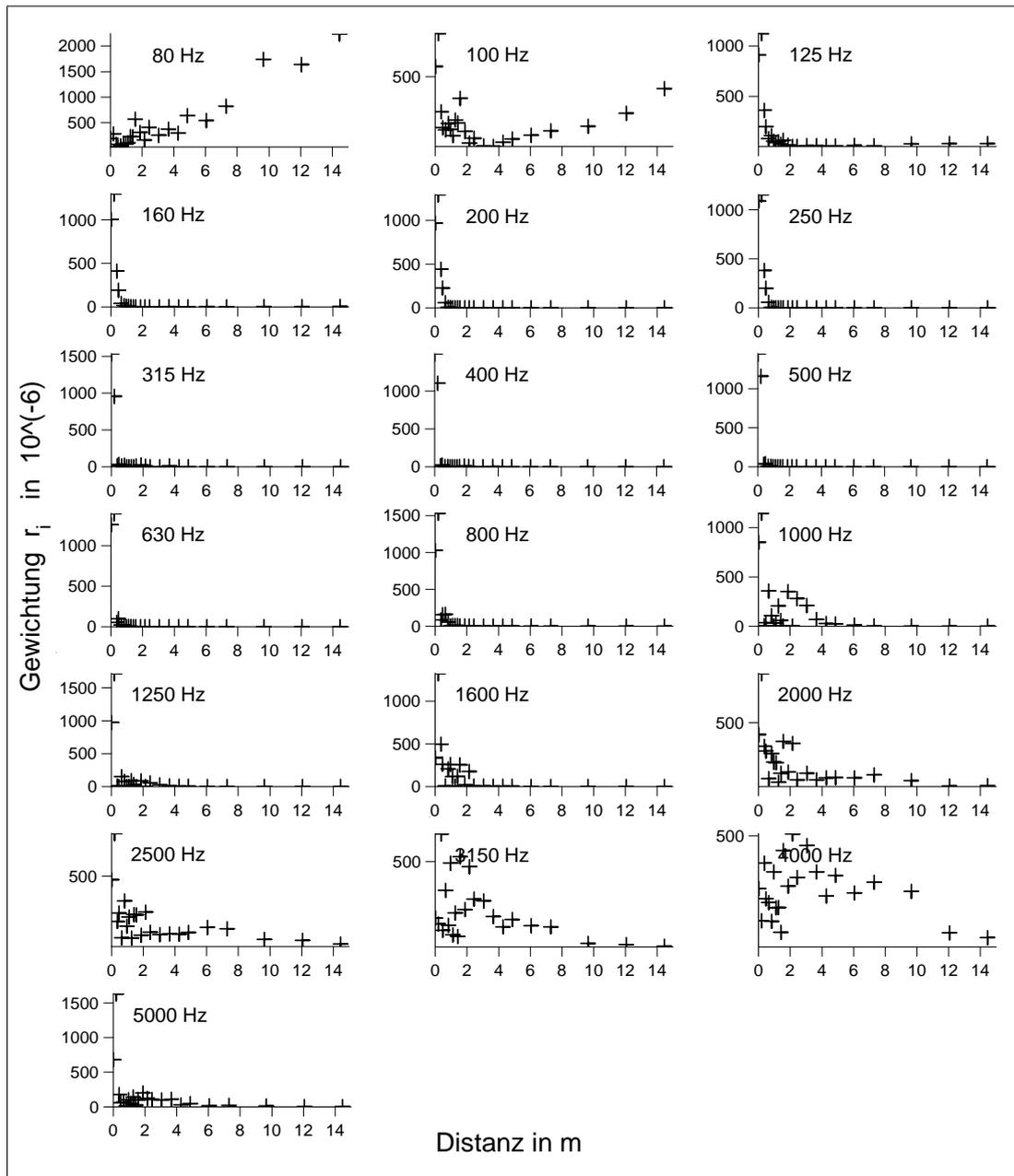


Abb. D.2: r_i -x-Verläufe, MS C9, vert. Anregung. Lin. Reg. mit Exponent m_{opt}

Anhang E L_{FRF} -x-Diagramme

Legende für alle Abbildungen in diesem Kapitel

- (—) Theoretischer TDR-Verlauf nach Linearer Regression
- (- - - -) Theoretischer TDR-Verlauf nach EN 15461
- (+) Gemessene L_{FRF^2} der Anregungspunkte

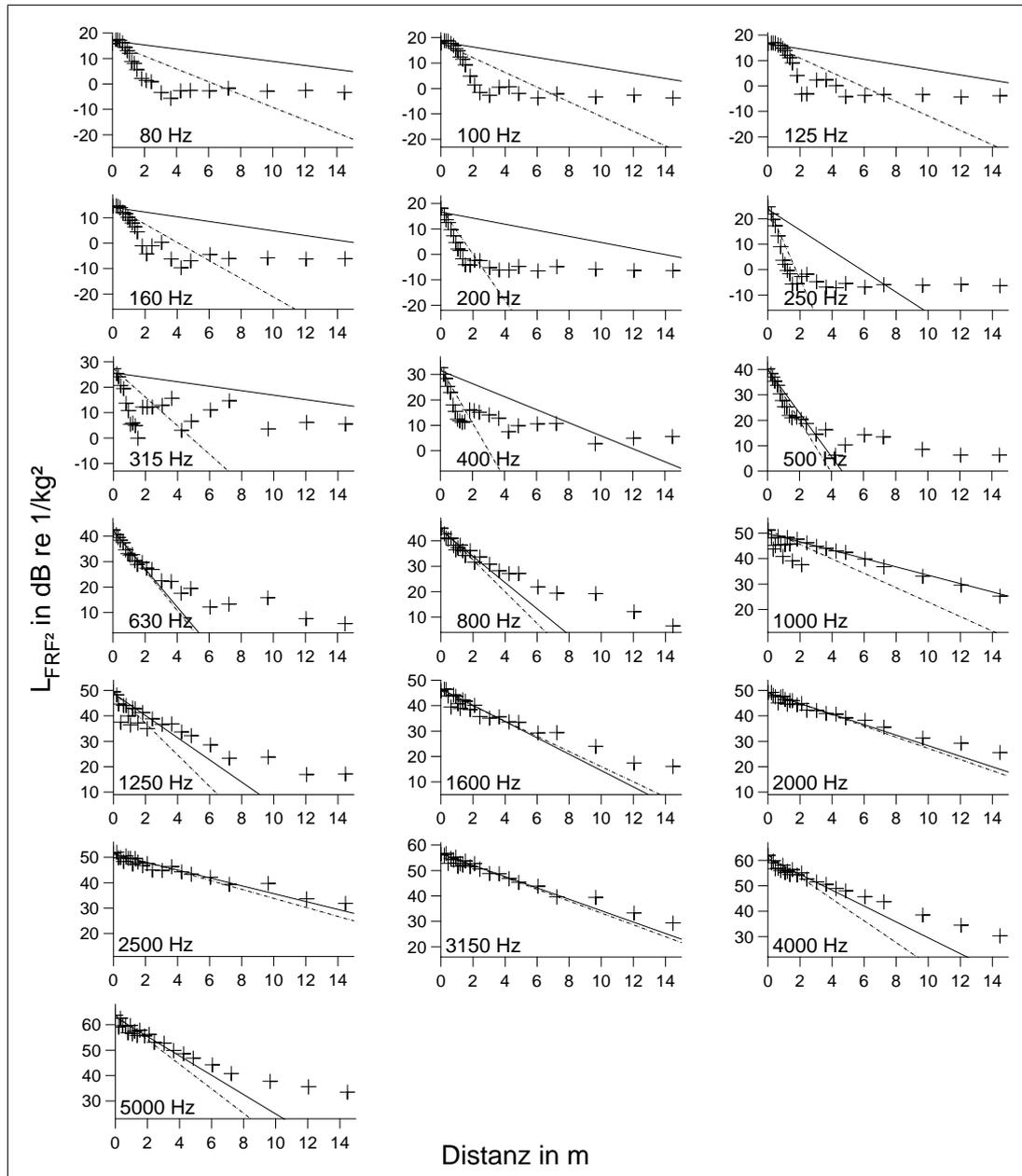


Abb. E.1: L_{FRF} -x-Verläufe, MS **A**, vert. Anregung. Lin. Reg. mit Exponent m_{opt}

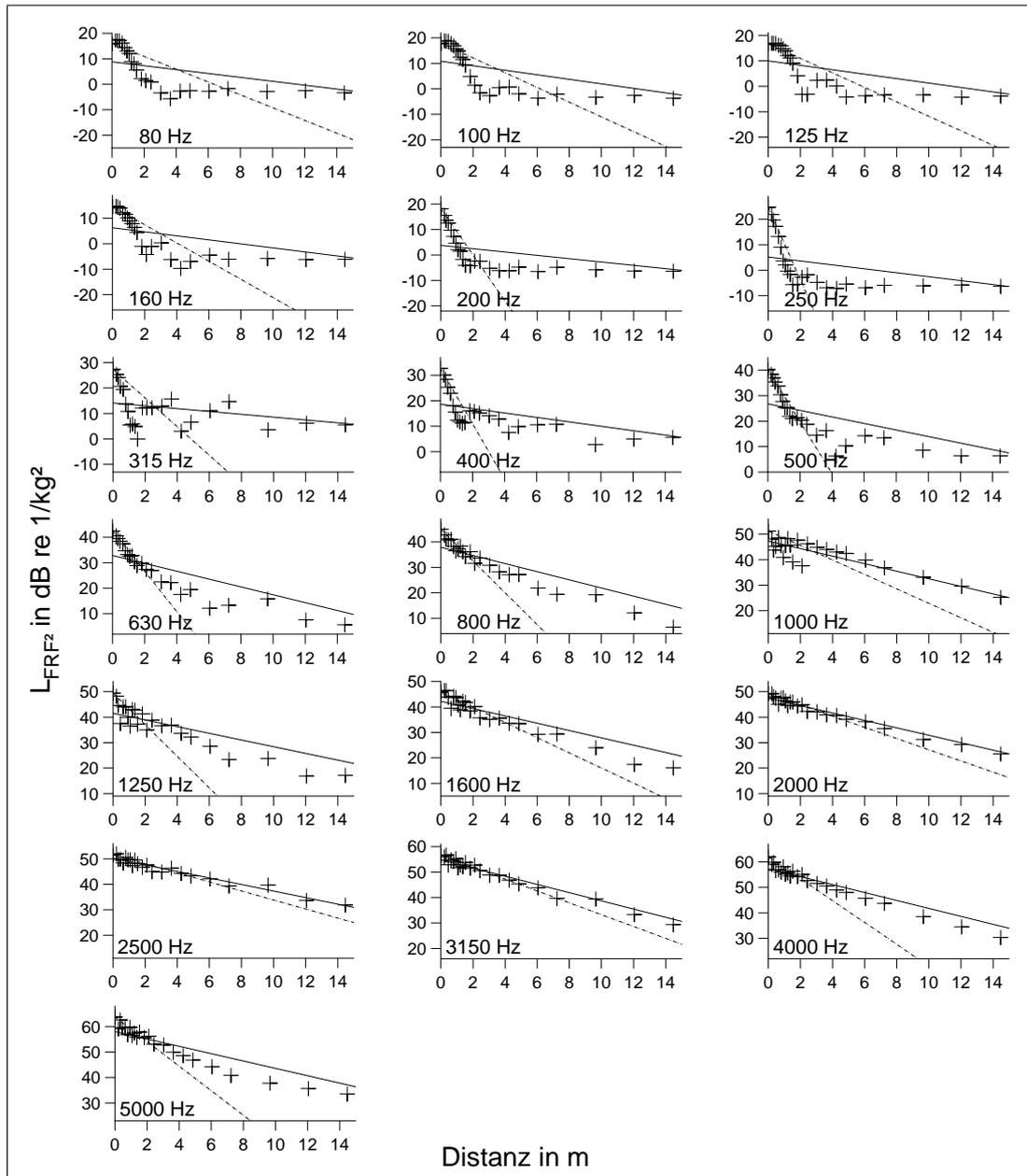


Abb. E.2: L_{FRF} -X-Verläufe, MS **A**, vert. Anregung. Lin. Reg. mit lin. Gewichtung

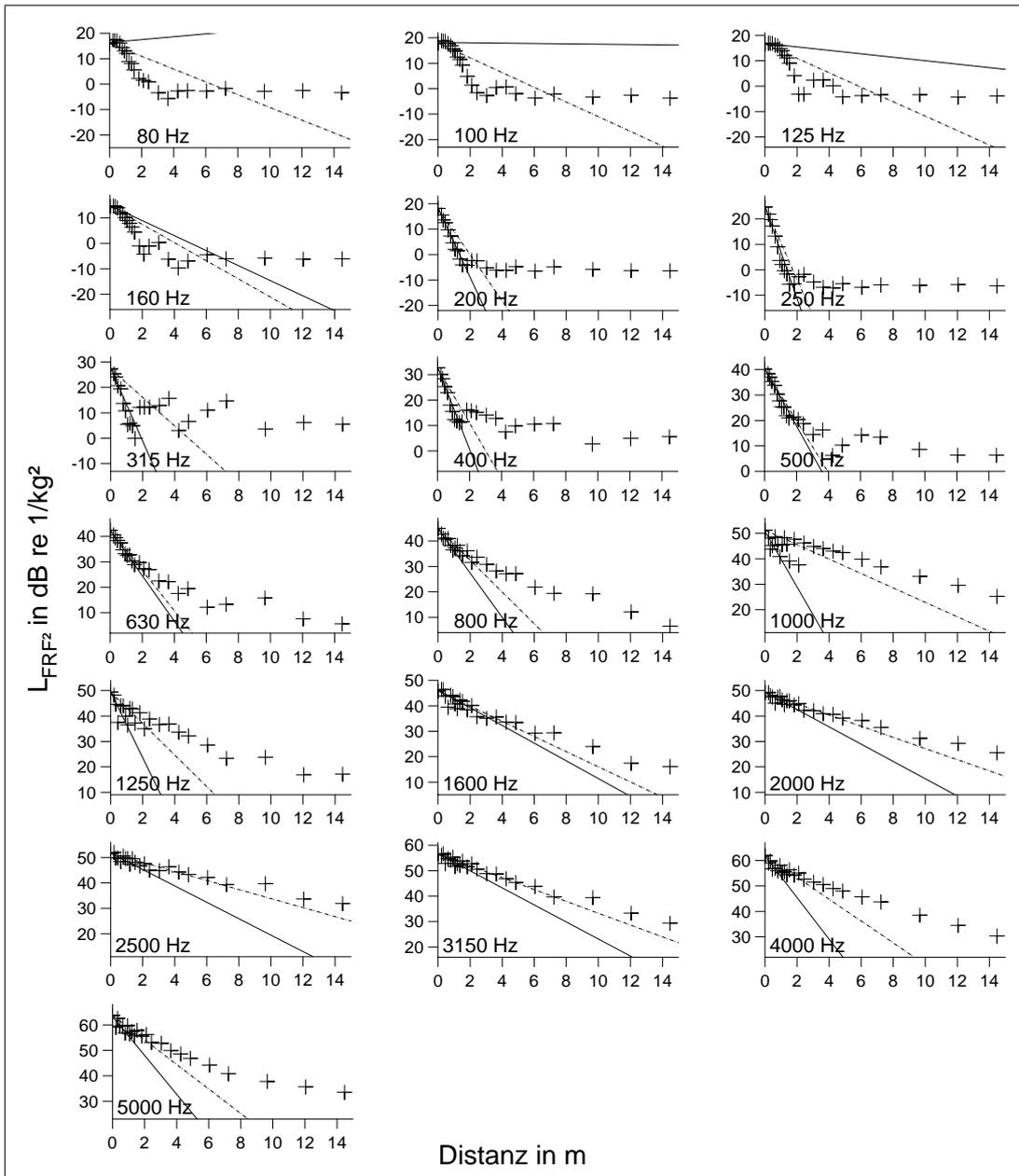


Abb. E.3: L_{FRF} -X-Verläufe, MS A, vert. Anregung. Lin. Reg. mit exp. Gewichtung

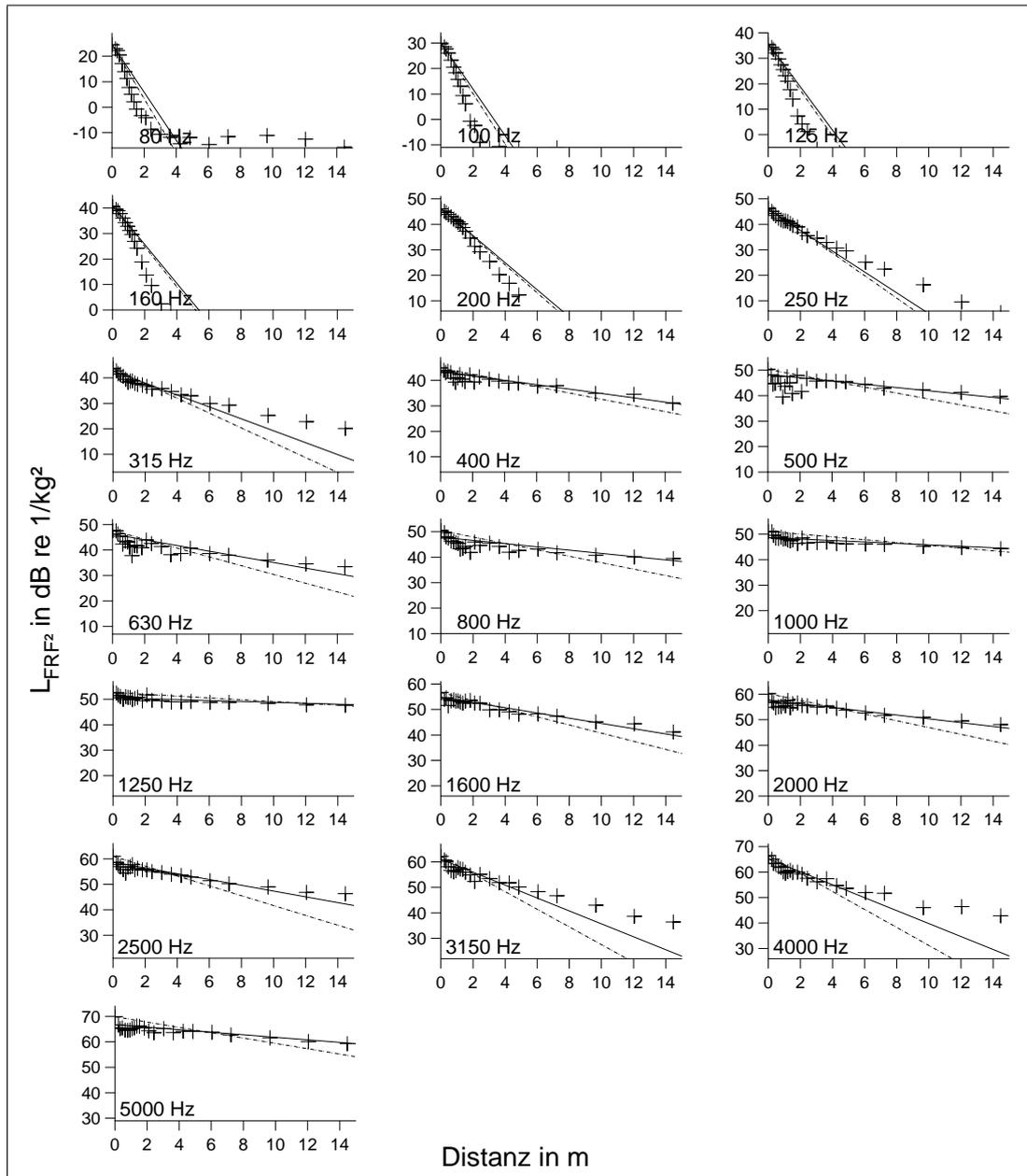


Abb. E.4: L_{FRF} -X-Verläufe, MS A, lat. Anregung. Lin. Reg. mit Exponent m_{opt}

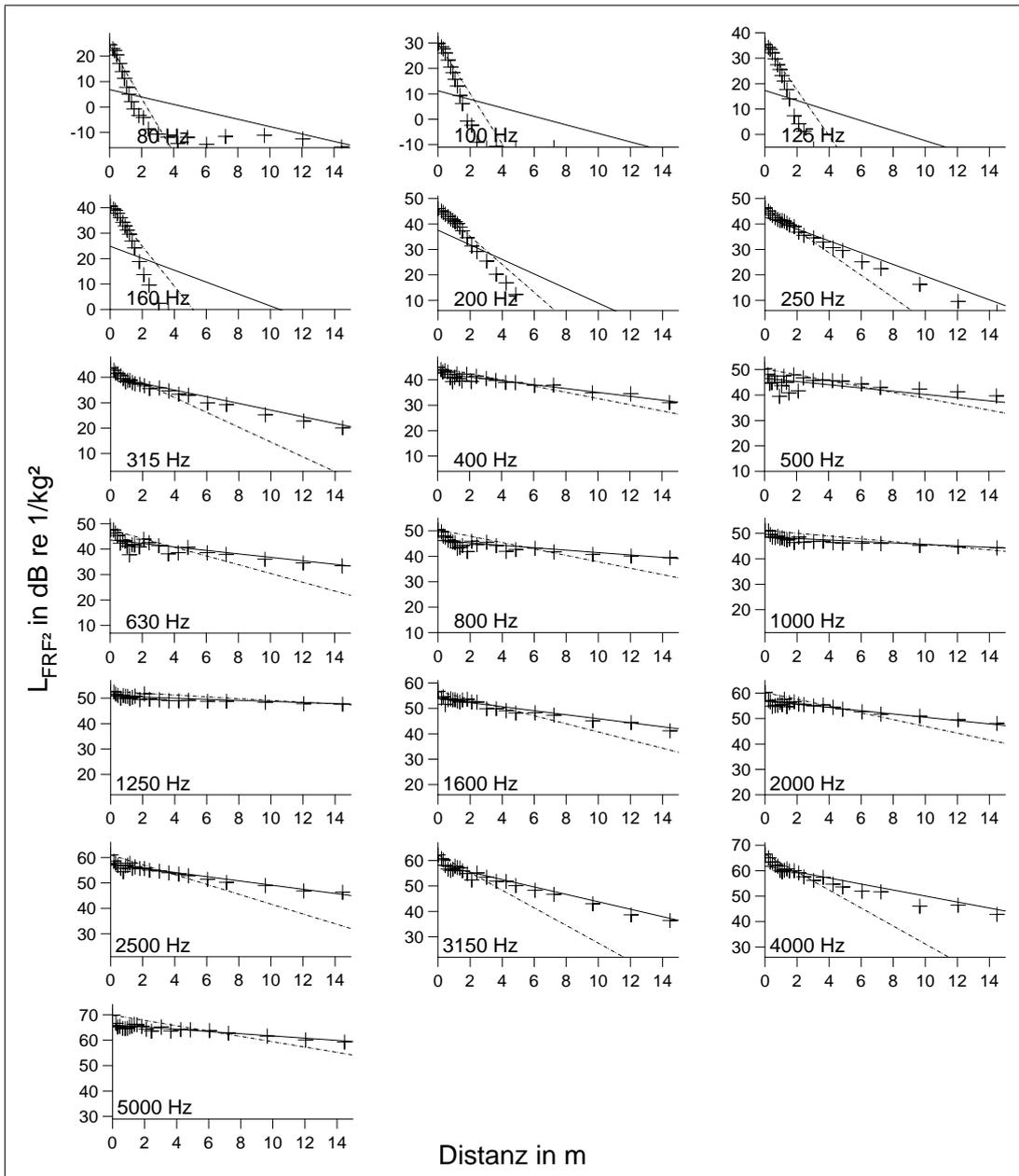


Abb. E.5: L_{FRF} -x-Verläufe, MS **A**, lat. Anregung. Lin. Reg. mit lin. Gewichtung

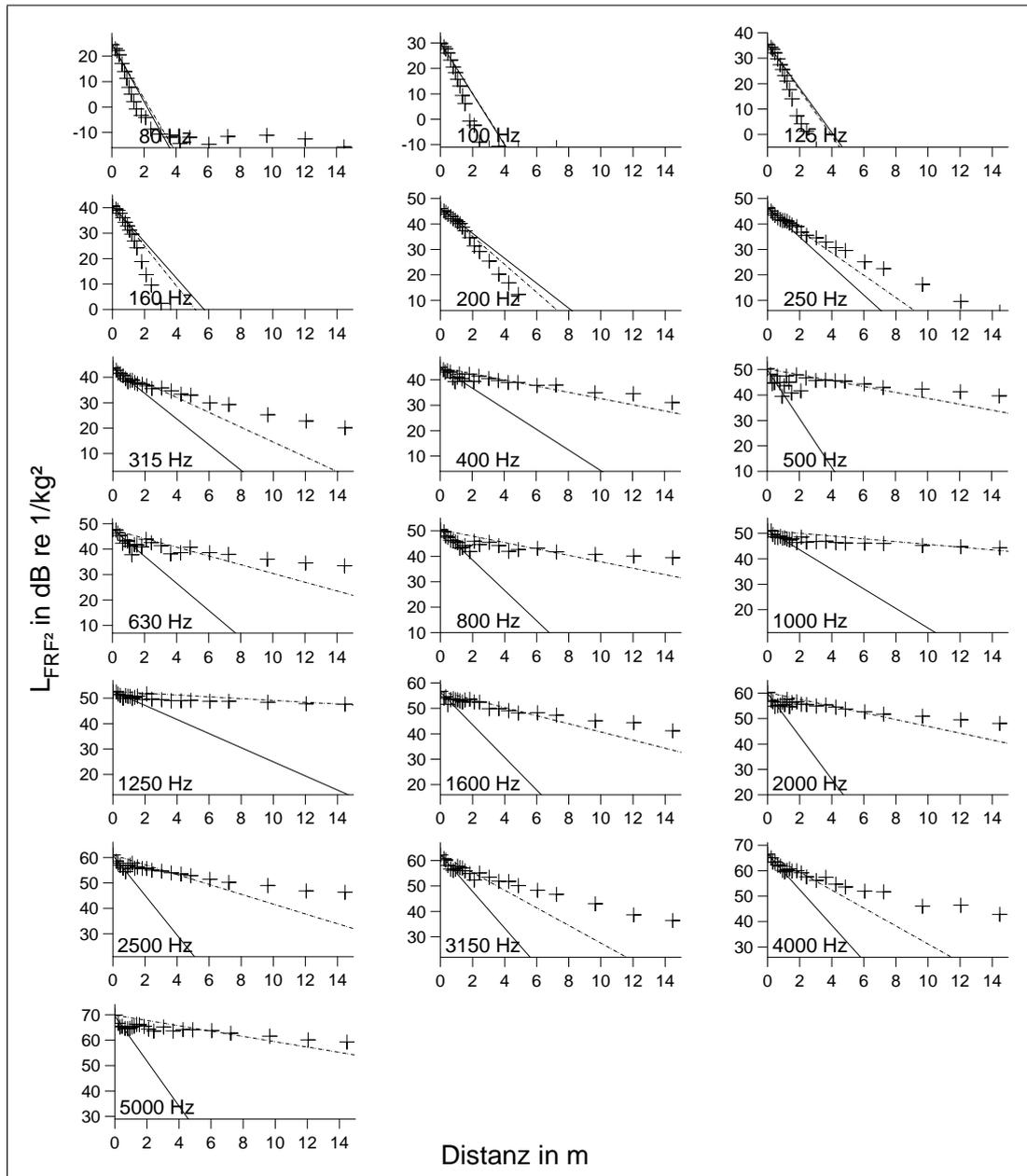


Abb. E.6: L_{FRF} -X-Verläufe, MS A, lat. Anregung. Lin. Reg. mit exp. Gewichtung

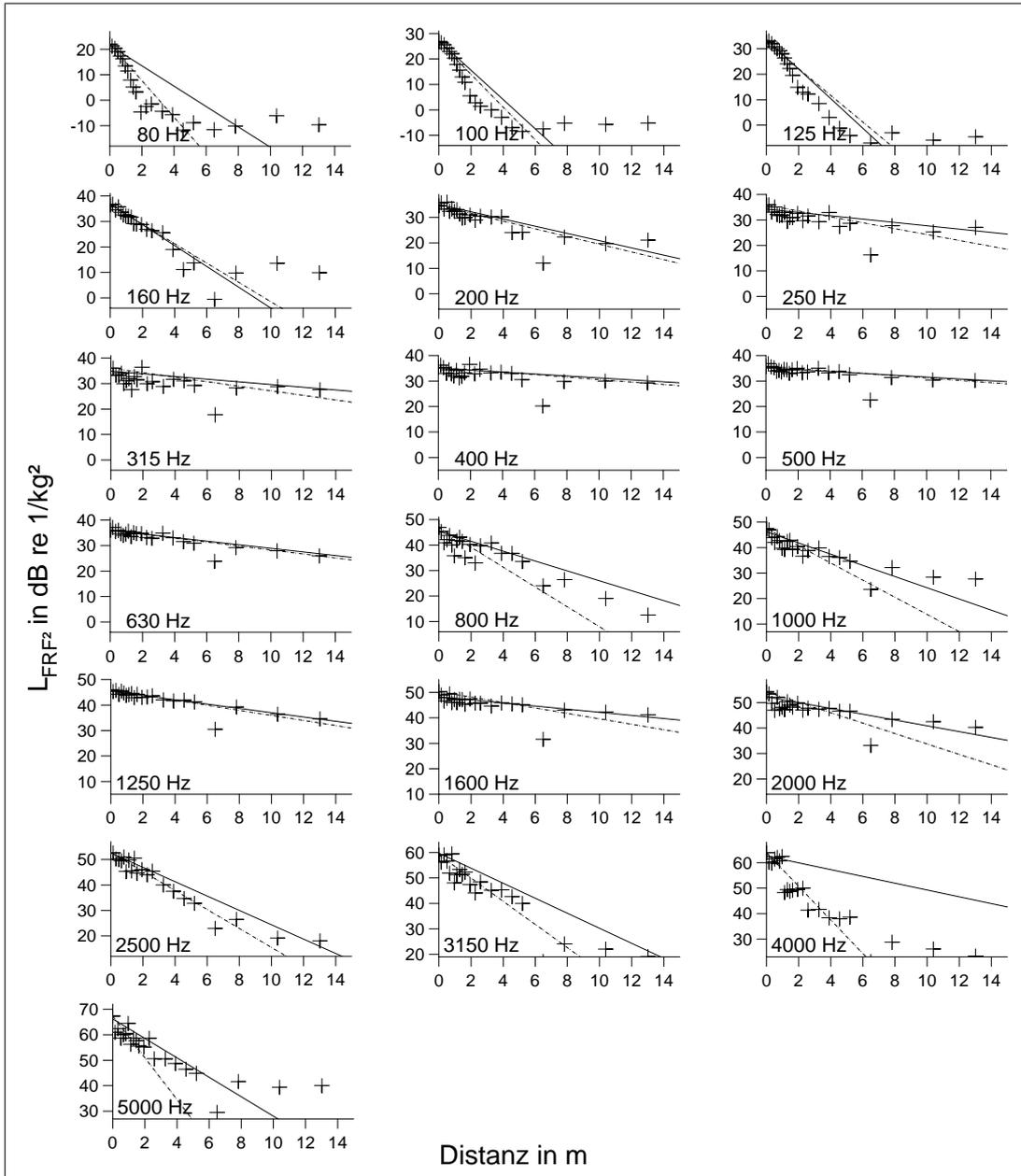


Abb. E.7: L_{FRF-x} -Verläufe, MS \square , vert. Anregung. Lin. Reg. mit Exponent m_{opt}

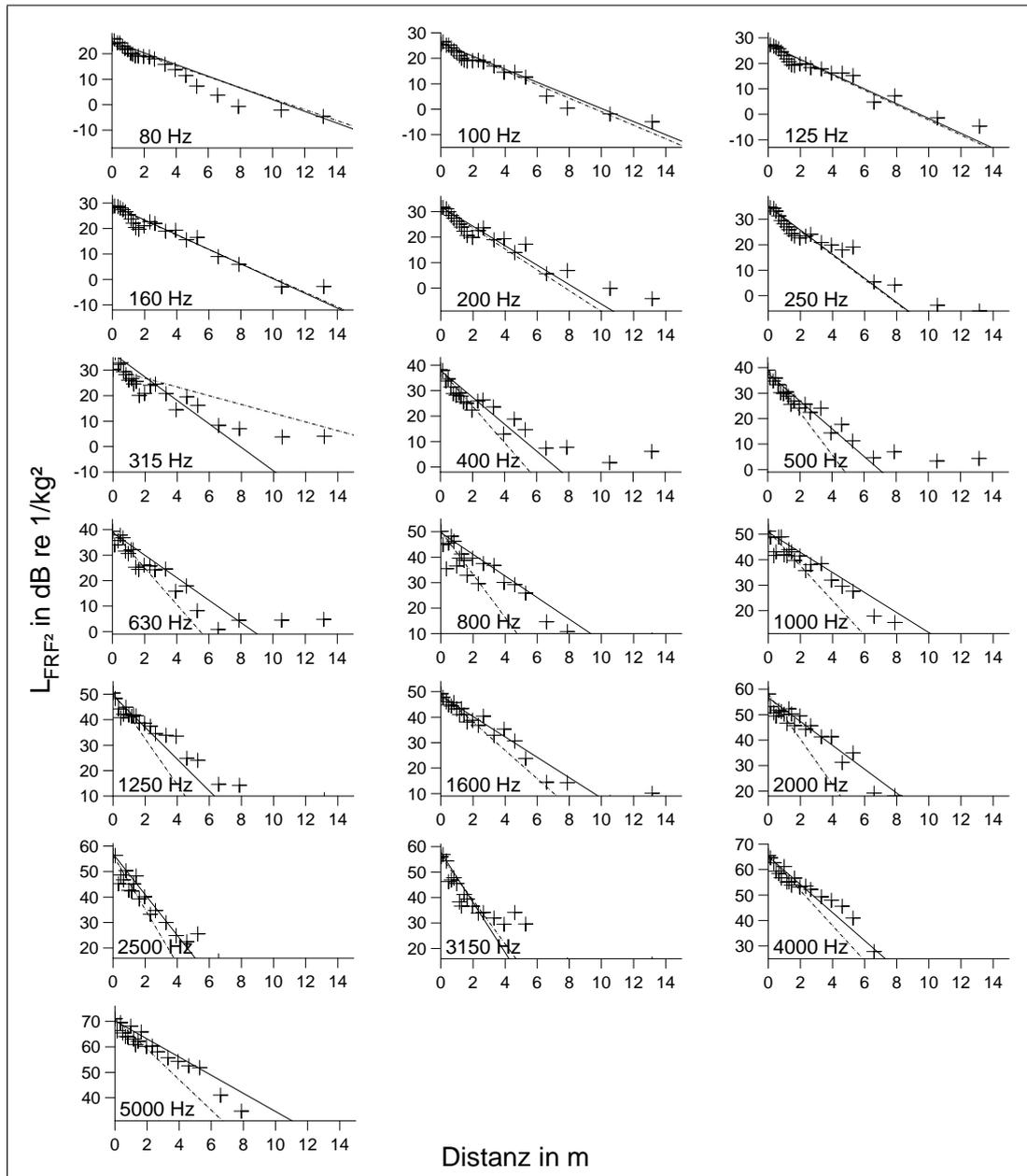


Abb. E.8: L_{FRF} -X-Verläufe, MS \boxed{K} , vert. Anregung. Lin. Reg. mit Exponent m_{opt}

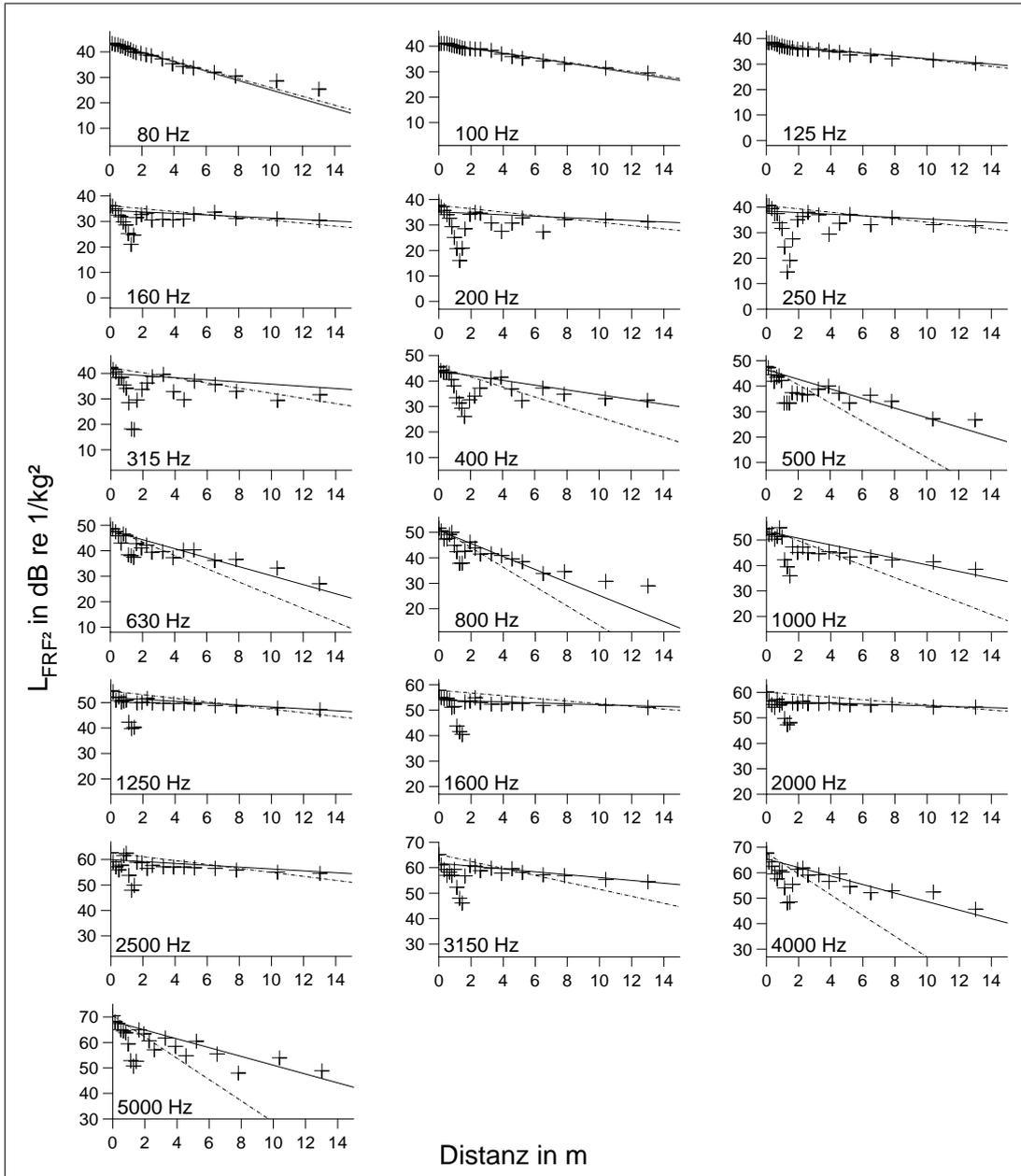


Abb. E.9: L_{FRFz} -x-Verläufe, MS \boxed{I} , lat. Anregung. Lin. Reg. mit Exponent m_{opt}

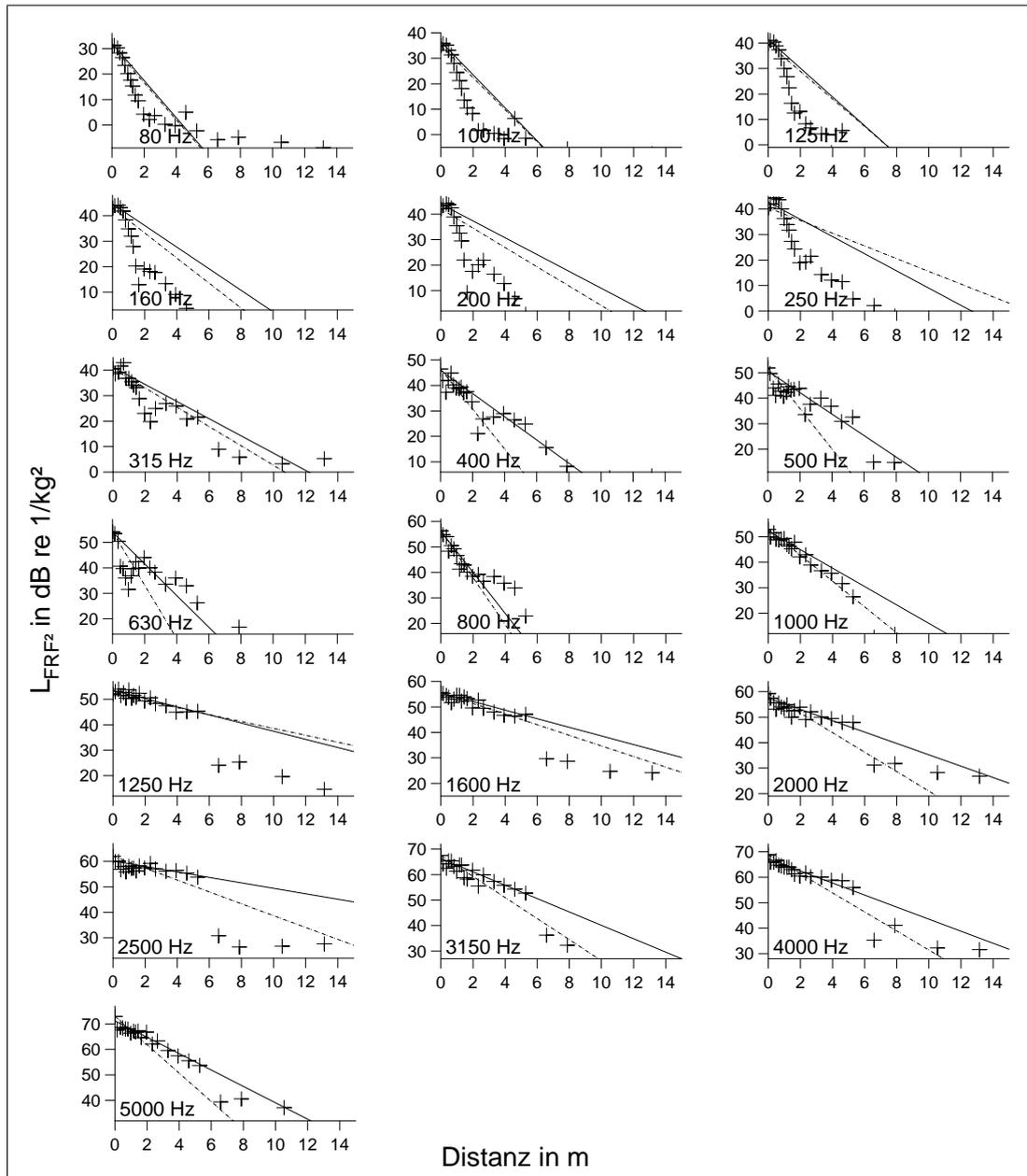


Abb. E.10: L_{FRF} -X-Verläufe, MS \boxed{K} , lat. Anregung. Lin. Reg. mit Exponent m_{opt}

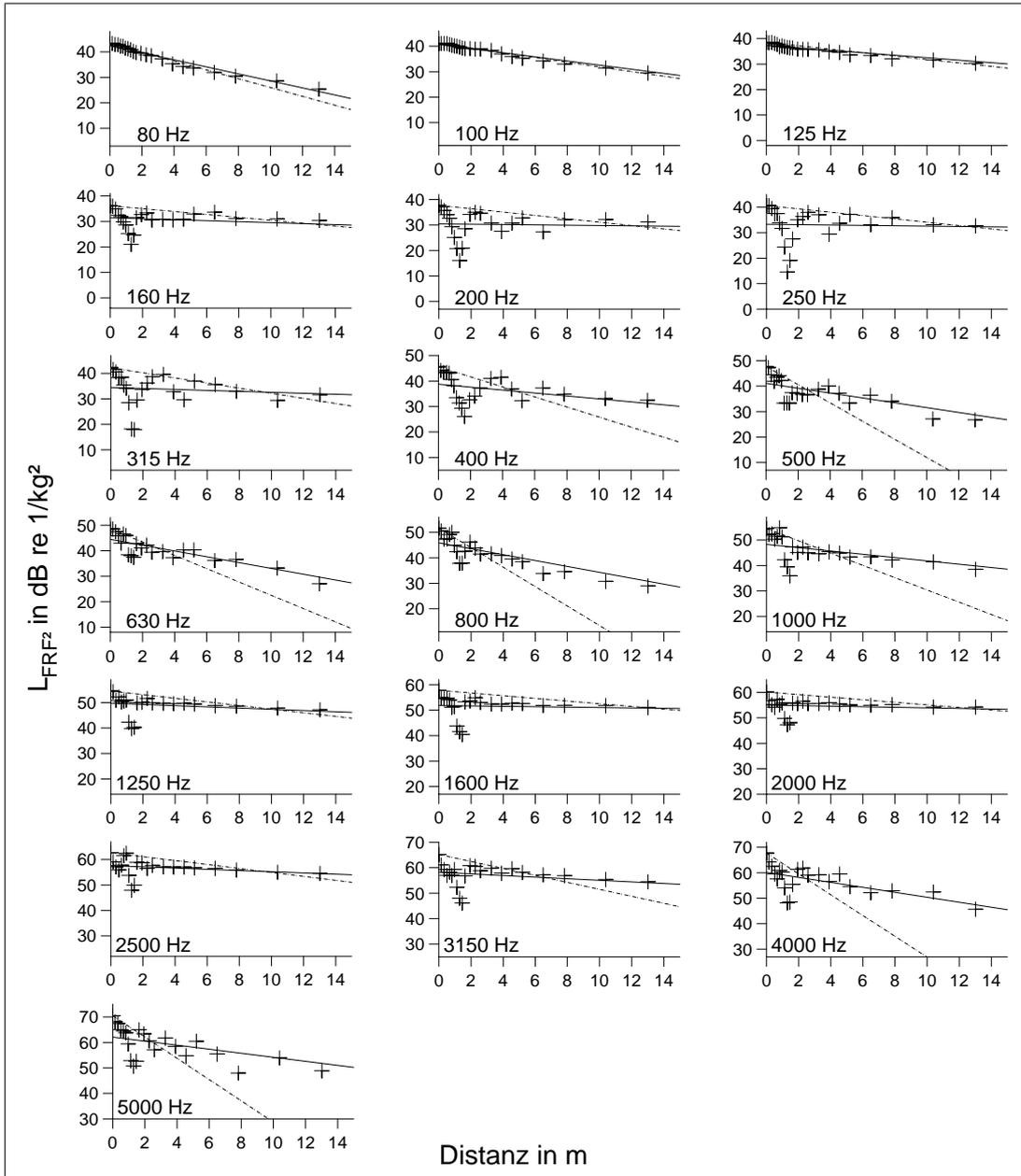


Abb. E.11: L_{FRFz} -x-Verläufe, MS \square , lat. Anregung. Lin. Reg. mit lin. Gewichtung

Anhang F $L_{HW,tr}$ -Spektren und TDR-Ergebnisse nach EN 15461 und Linearer Regression

Für alle Abbildungen dieses Kapitels

$L_{HW,tr}$ -Spektren

- (—) Mittelwert
- (···) Mittelwert \pm eine Standardabweichung

TDR-Spektren

- (—) nach EN 15461
- (- - - -) Exponent $m = 0.1$
- (· · · · ·) Exponent $m = 0.5$
- (- · - · -) Exponent $m = 1.0$
- (- · - · -) exponentielle Gewichtung
- (- · - · -) lineare Gewichtung
- (—) Grenzkurve nach TSI 2006

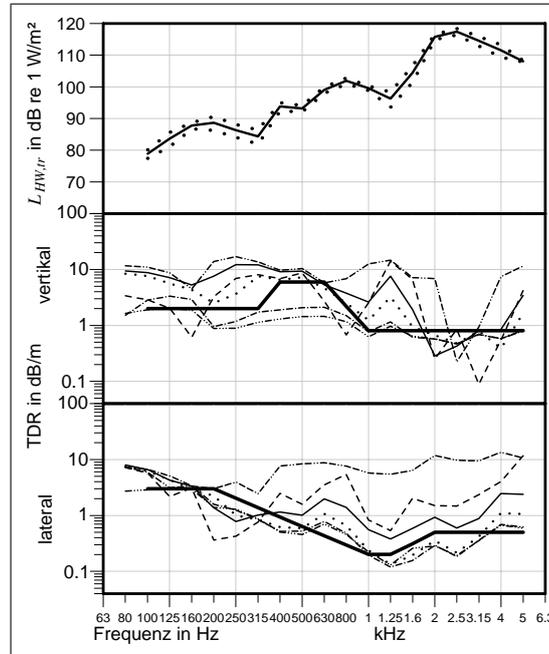


Abb. F.1: $L_{HW,tr}$ - und TDR-Spektren (Variation) MS **C1**

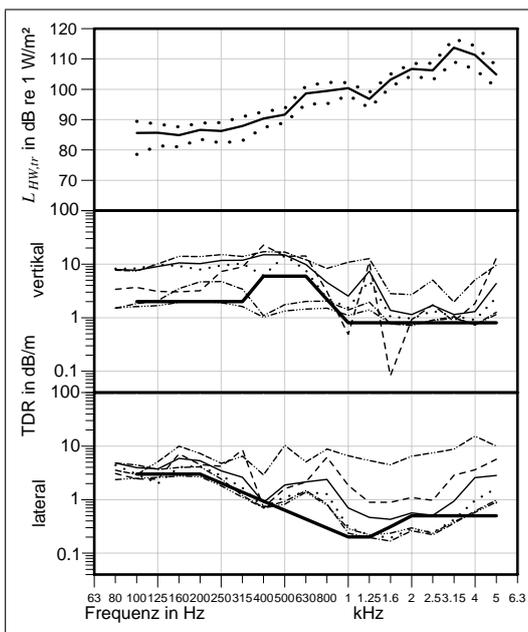


Abb. F.2: $L_{HW,tr}$ - und TDR-Spektren (Variation) MS **C2**

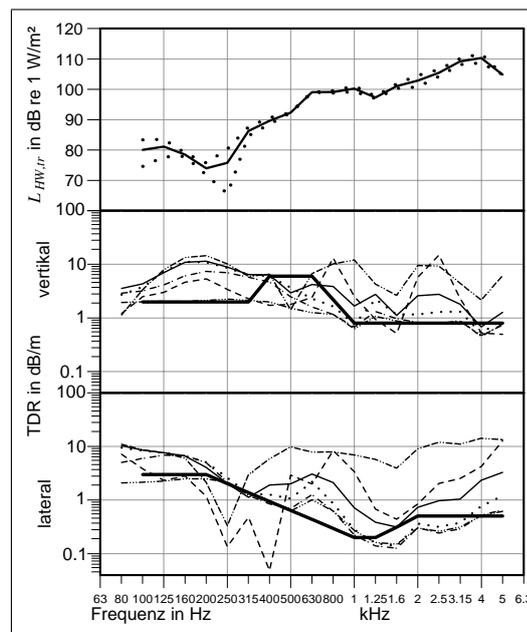


Abb. F.3: $L_{HW,tr}$ - und TDR-Spektren (Variation) MS **C3**

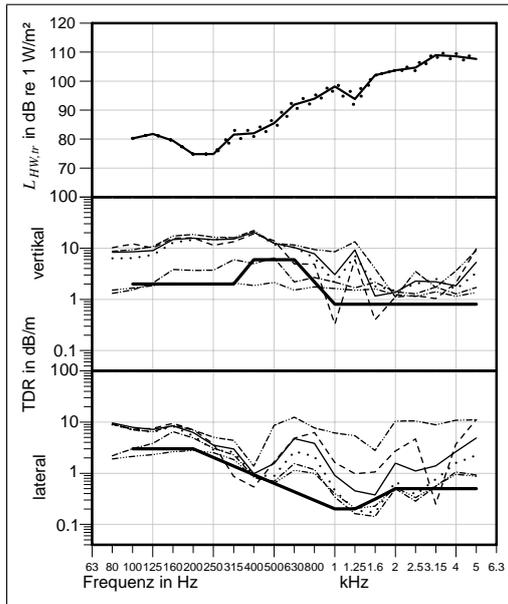


Abb. F.4: $L_{HW,tr}$ - und TDR-Spektren (Variation) MS C4

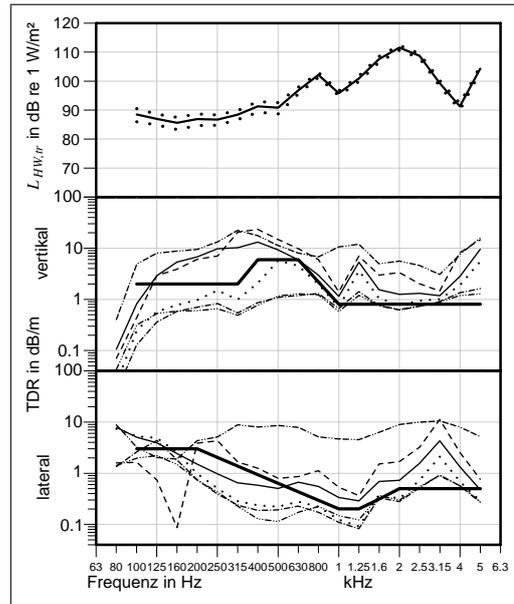


Abb. F.5: $L_{HW,tr}$ - und TDR-Spektren (Variation) MS C5

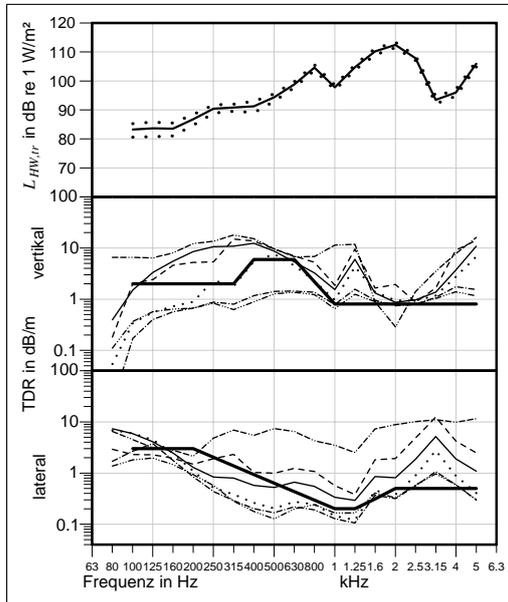


Abb. F.6: $L_{HW,tr}$ - und TDR-Spektren (Variation) MS C6

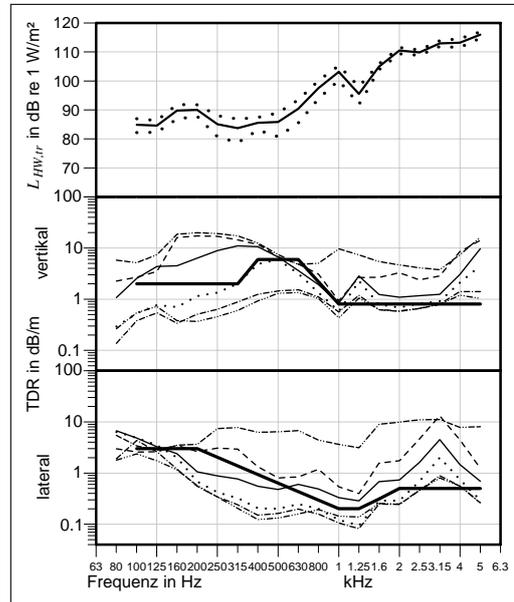


Abb. F.7: $L_{HW,tr}$ - und TDR-Spektren (Variation) MS C7

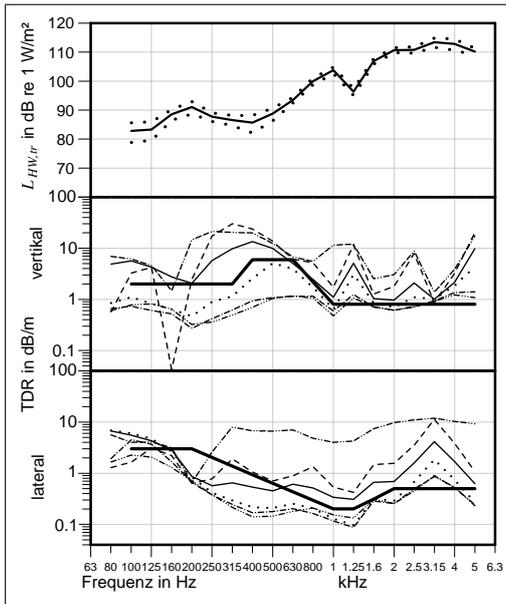


Abb. F.8: L_{HW,tr^-} und TDR-Spektren (Variation) MS **C8**

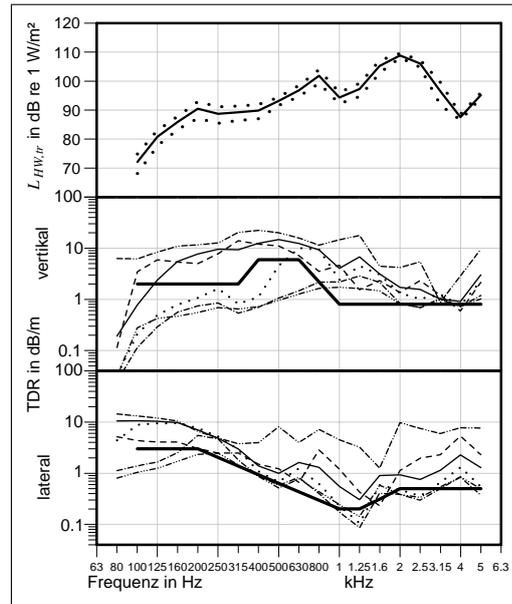


Abb. F.9: L_{HW,tr^-} und TDR-Spektren (Variation) MS **C9**

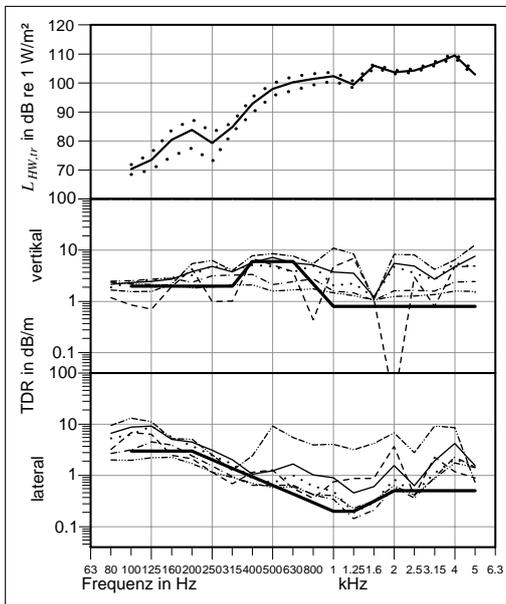


Abb. F.10: L_{HW,tr^-} und TDR-Spektren (Variation) MS **D1**

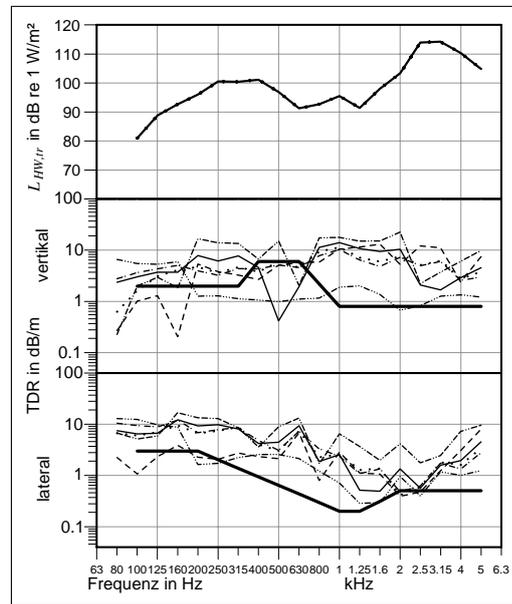


Abb. F.11: L_{HW,tr^-} und TDR-Spektren (Variation) MS **D2**

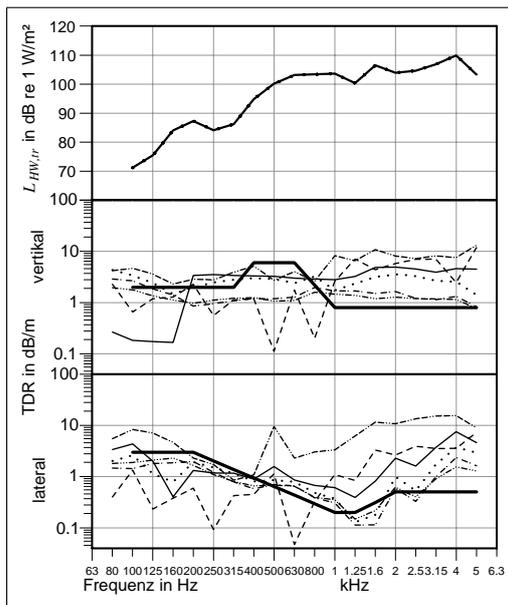


Abb. F.12: $L_{HW,tr}$ - und TDR-Spektren (Variation) MS D3

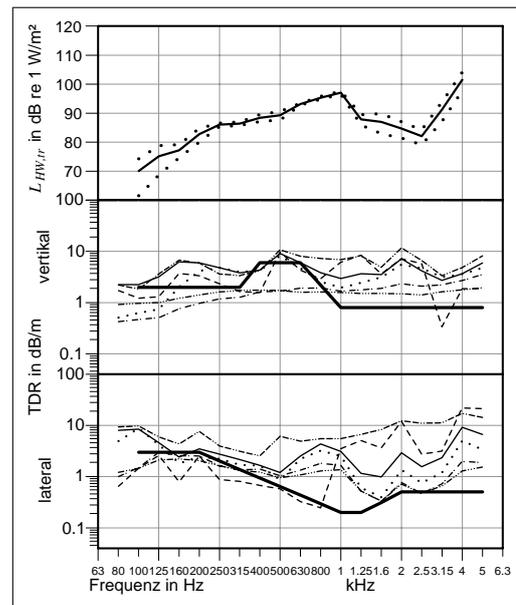


Abb. F.13: $L_{HW,tr}$ - und TDR-Spektren (Variation) MS D4

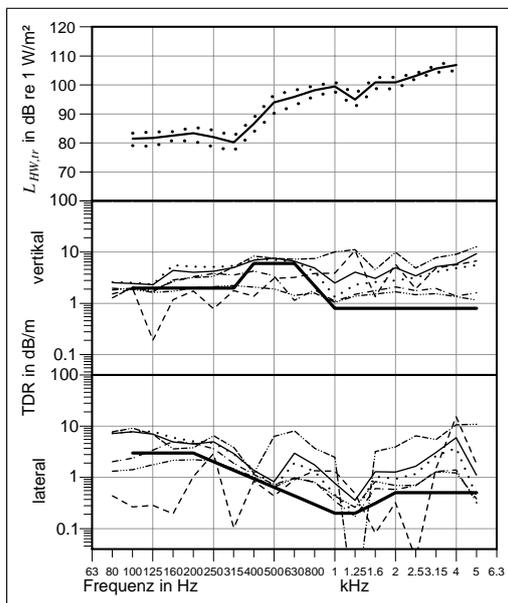


Abb. F.14: $L_{HW,tr}$ - und TDR-Spektren (Variation) MS D5

Anhang G TDR-Spektren nach EN 15461 und Lin. Regression mit m_{opt}

Die linke Bildhälfte zeigt das Ergebnis nach EN 15461, die rechte das Ergebnis nach Linearer Regression mittels des Exponenten m_{opt} .
In allen Abbildungen stellt (—) die Grenzkurve nach TSI 2006 dar.

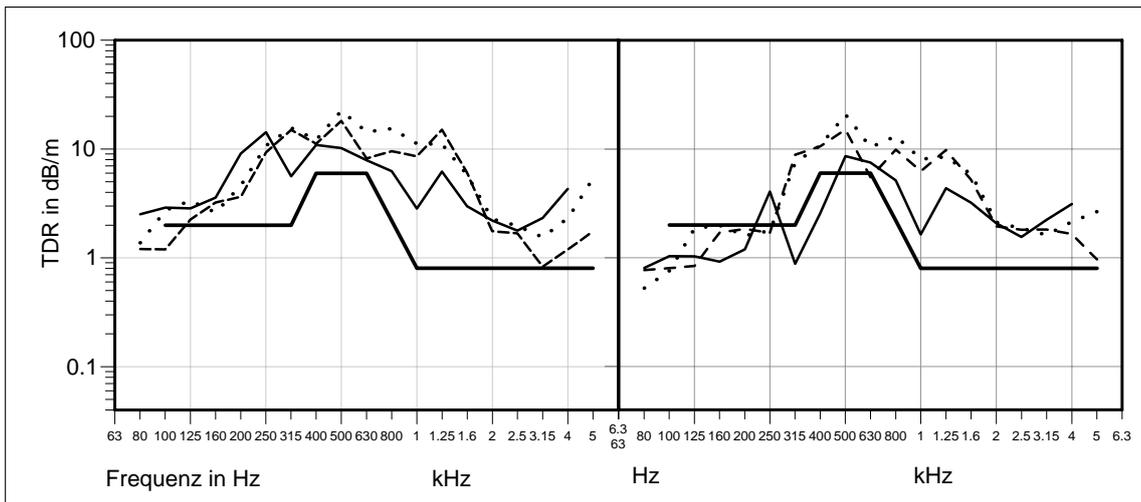


Abb. G.1: TDR-Spektrum (li. nach EN 15461, re. nach Lin. Regression), vertikale Anregung. (—) MS **A**; (- -) MS **B1**; (···) MS **B2**

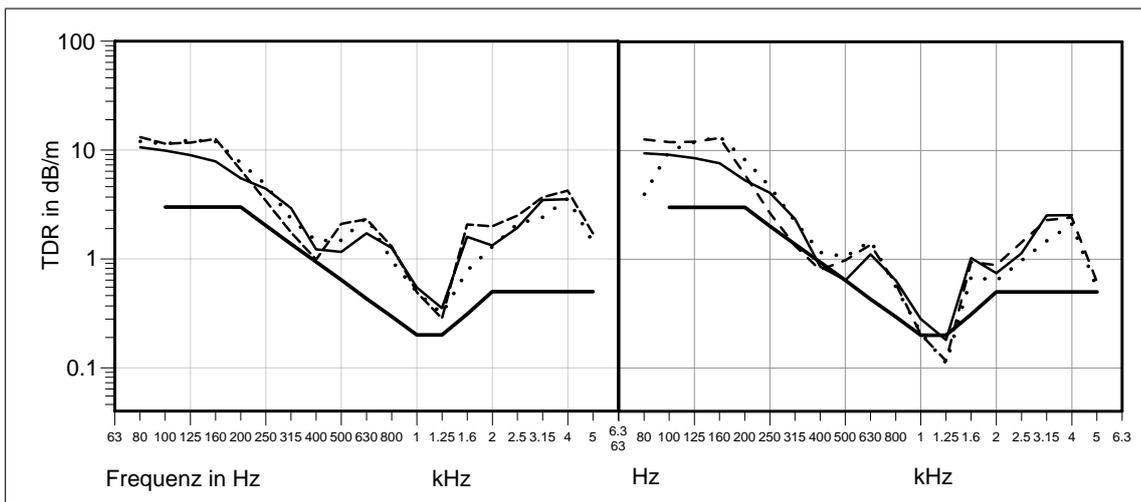


Abb. G.2: TDR-Spektrum (li. nach EN 15461, re. nach Lin. Regression), laterale Anregung. (—) MS **A**; (- -) MS **B1**; (···) MS **B2**

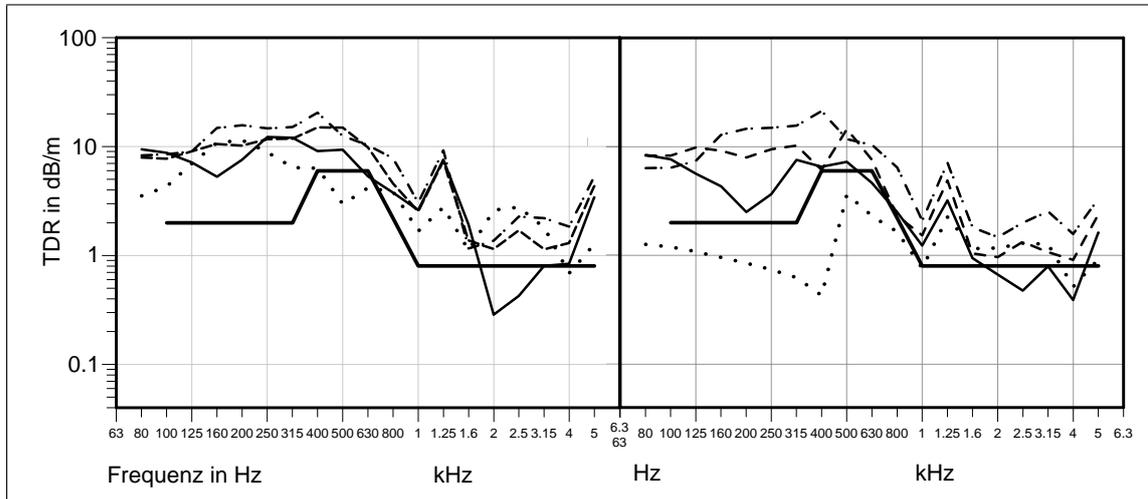


Abb. G.3: TDR-Spektrum (li. nach EN 15461, re. nach Lin. Regression), vertikale Anregung. (—) MS **C1**; (- -) MS **C2**; (· · ·) MS **C3**; (- · -) MS **C4**

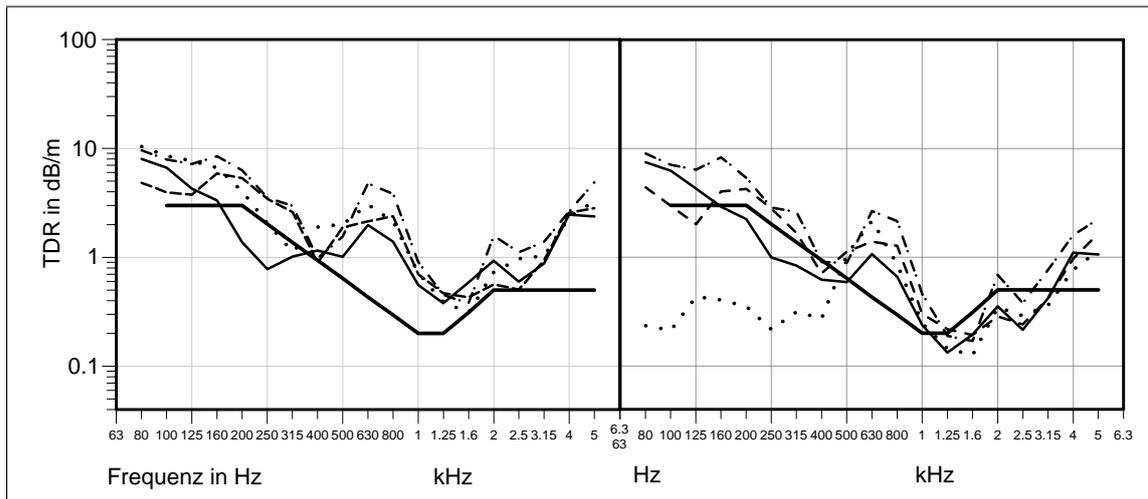


Abb. G.4: TDR-Spektrum (li. nach EN 15461, re. nach Lin. Regression), laterale Anregung. (—) MS **C1**; (- -) MS **C2**; (· · ·) MS **C3**; (- · -) MS **C4**

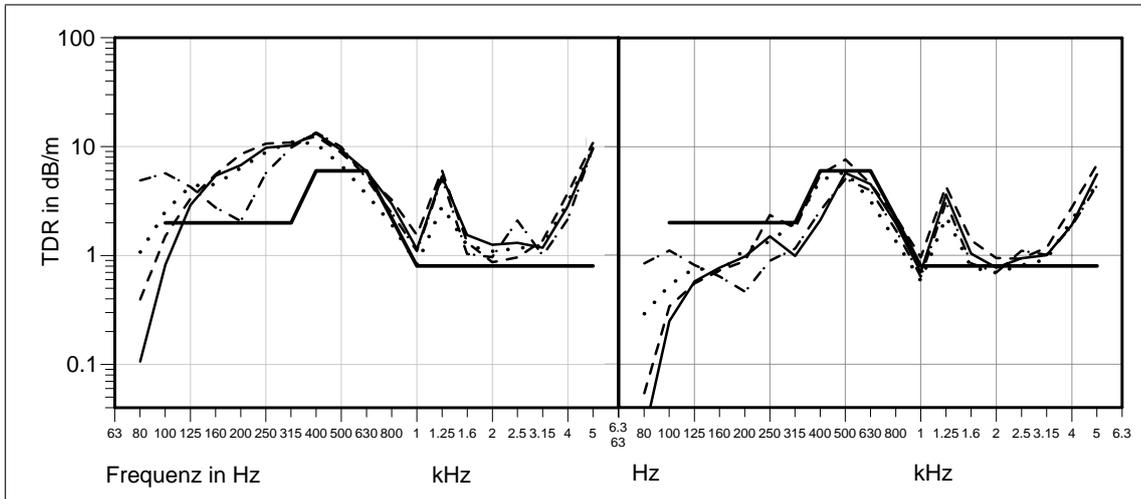


Abb. G.5: TDR-Spektrum (li. nach EN 15461, re. nach Lin. Regression), vertikale Anregung. (—) MS **C5**; (- -) MS **C6**; (· · ·) MS **C7**; (- · -) MS **C8**

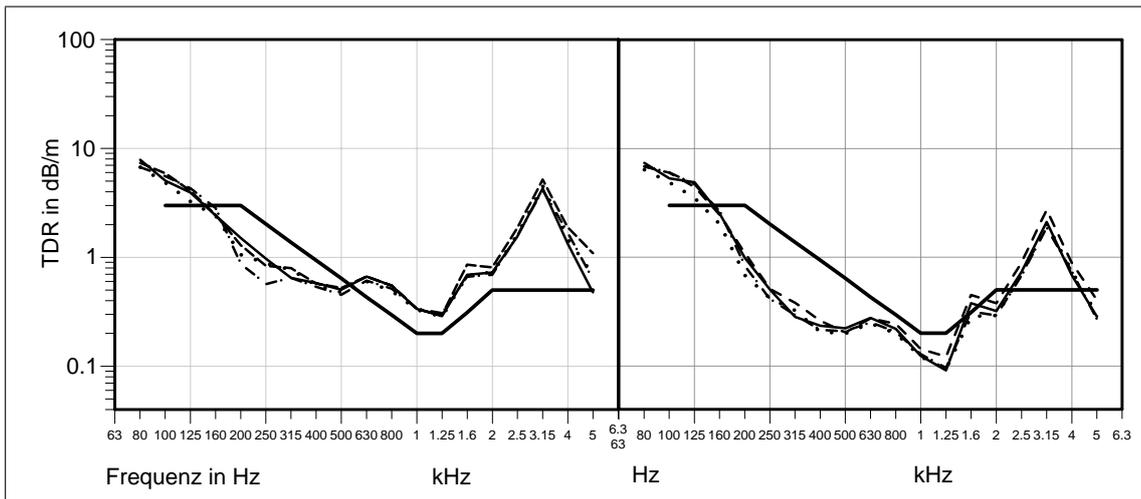


Abb. G.6: TDR-Spektrum (li. nach EN 15461, re. nach Lin. Regression), laterale Anregung. (—) MS **C5**; (- -) MS **C6**; (· · ·) MS **C7**; (- · -) MS **C8**

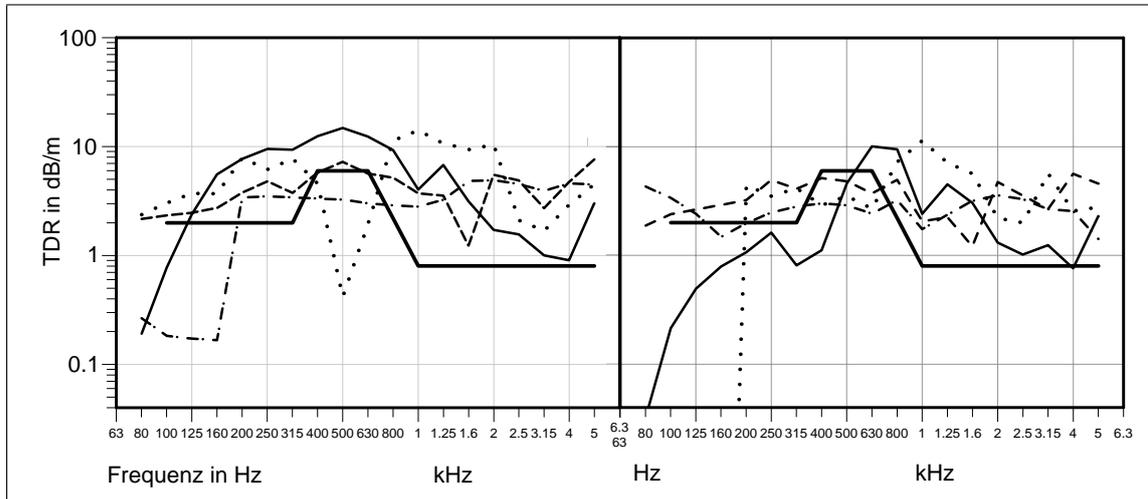


Abb. G.7: TDR-Spektrum (li. nach EN 15461, re. nach Lin. Regression), vertikale Anregung. (—) MS **C9**; (- -) MS **D1**; (· · ·) MS **D2**; (- · -) MS **D3**

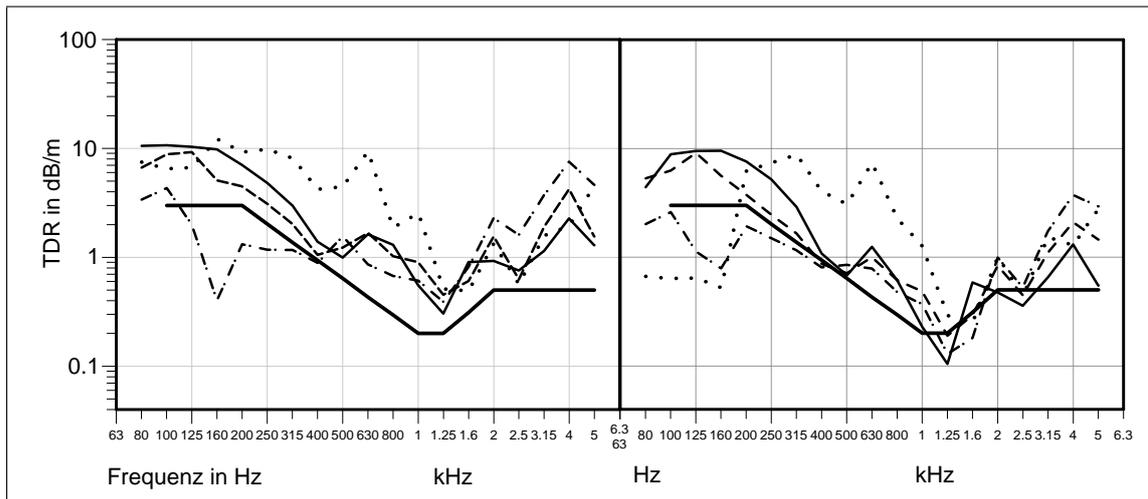


Abb. G.8: TDR-Spektrum (li. nach EN 15461, re. nach Lin. Regression), laterale Anregung. (—) MS **C9**; (- -) MS **D1**; (· · ·) MS **D2**; (- · -) MS **D3**

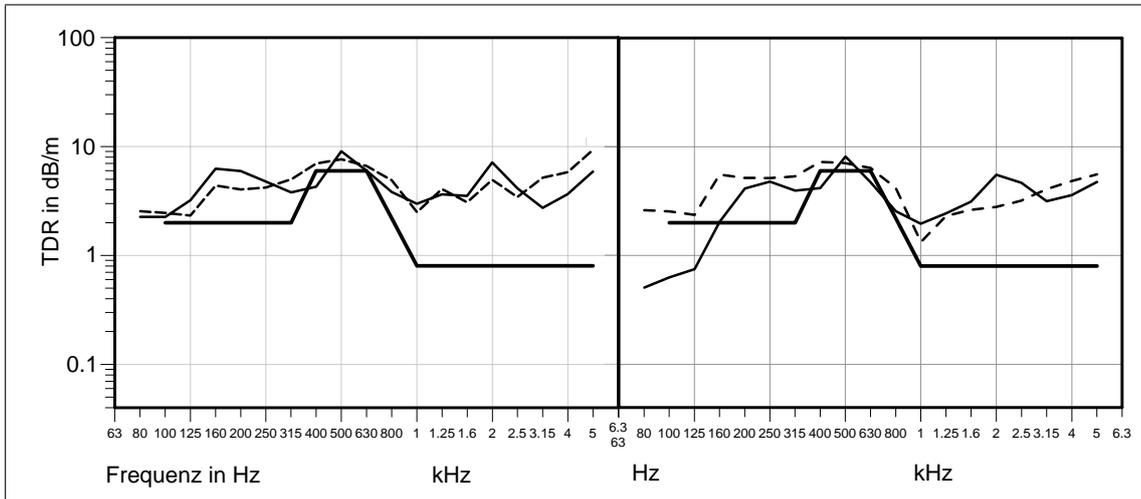


Abb. G.9: TDR-Spektrum (li. nach EN 15461, re. nach Lin. Regression), vertikale Anregung. (—) MS D4; (- -) MS D5

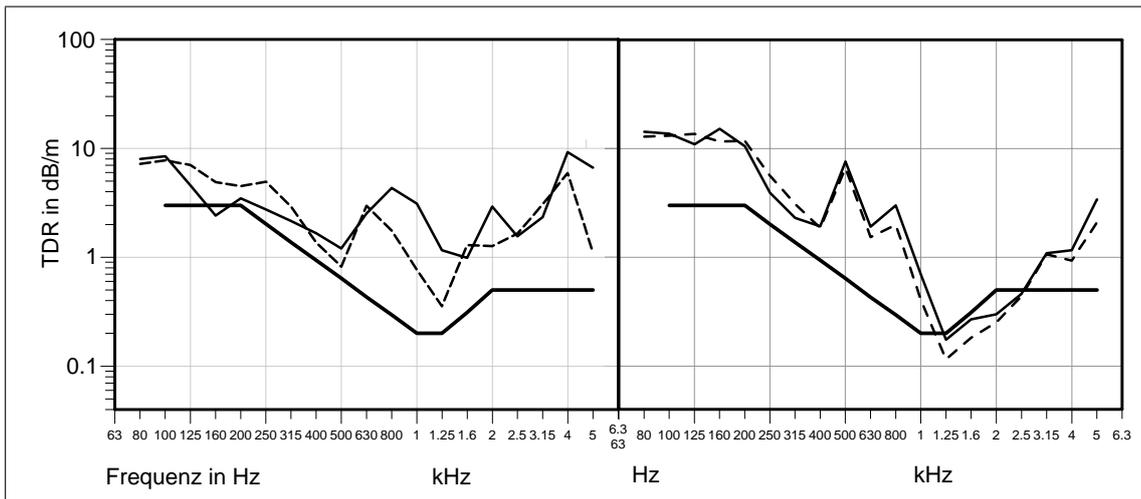


Abb. G.10: TDR-Spektrum (li. nach EN 15461, re. nach Lin. Regression), laterale Anregung. (—) MS D4; (- -) MS D5

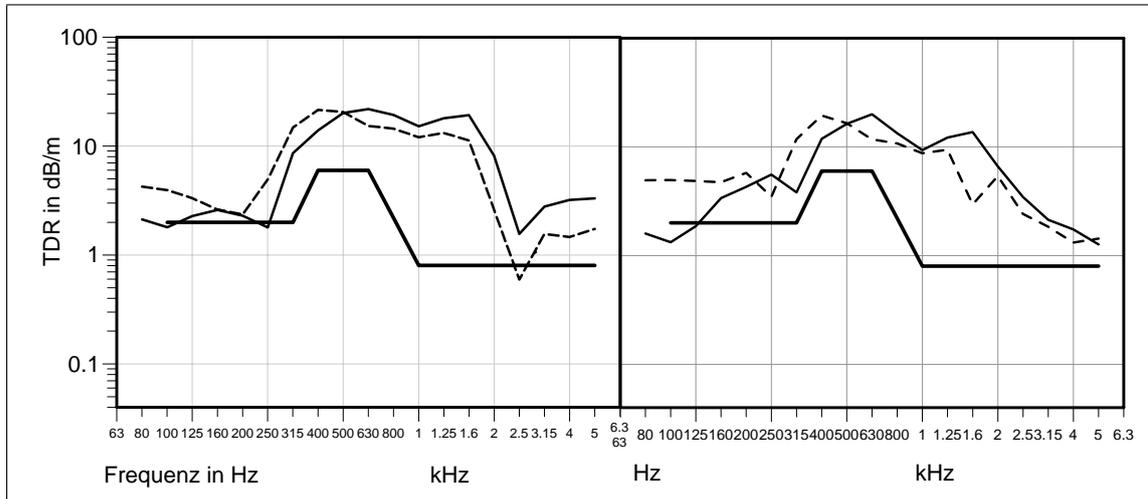


Abb. G.11: TDR-Spektrum (li. nach EN 15461, re. nach Lin. Regression), vertikale Anregung. (—) MS E1; (- -) MS E2

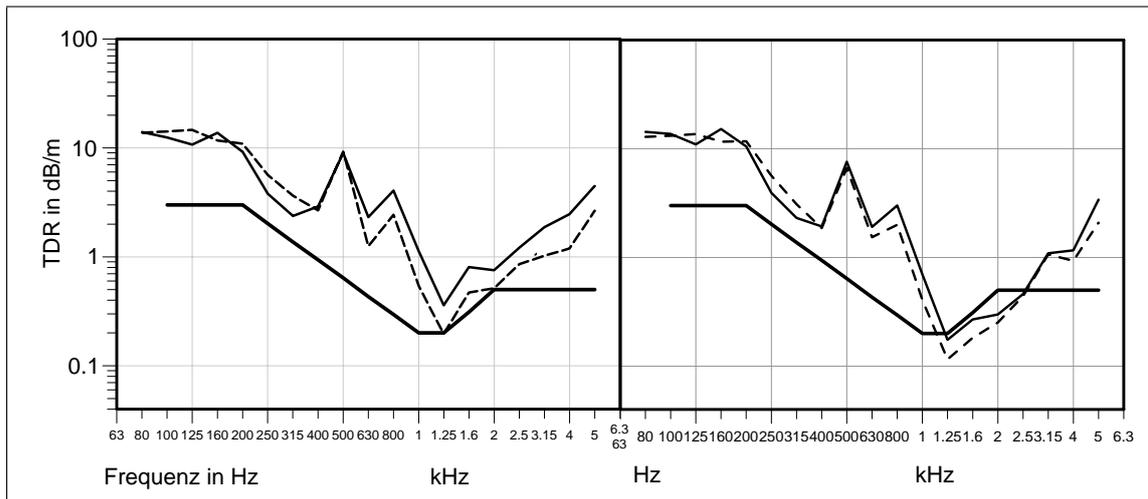


Abb. G.12: TDR-Spektrum (li. nach EN 15461, re. nach Lin. Regression), laterale Anregung. (—) MS E1; (- -) MS E2

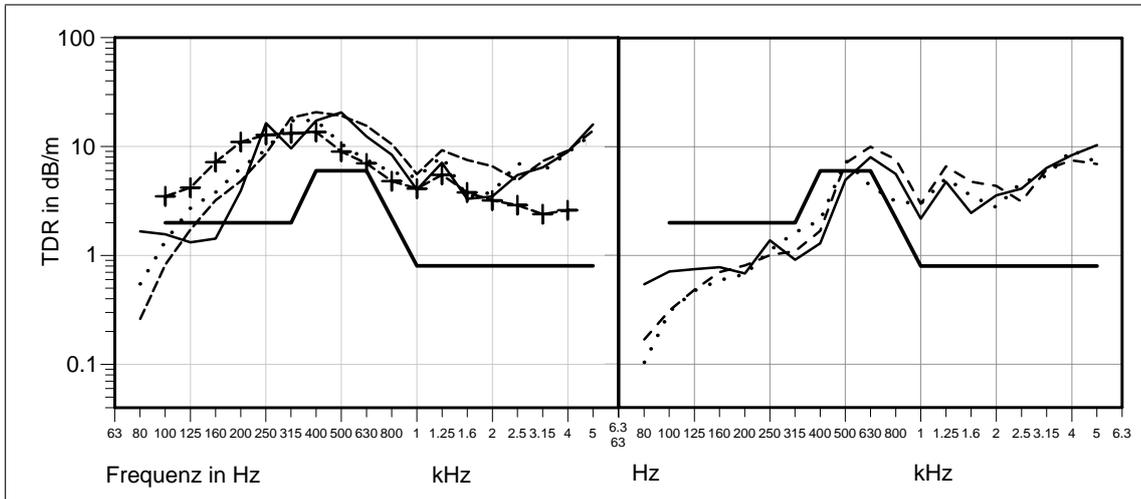


Abb. G.13: TDR-Spektrum (li. nach EN 15461, re. nach Lin. Regression), vertikale Anregung. (—) MS **F**; (- -) MS **G**; (-+-) MS **G** indirekt; (· · ·) MS **H**

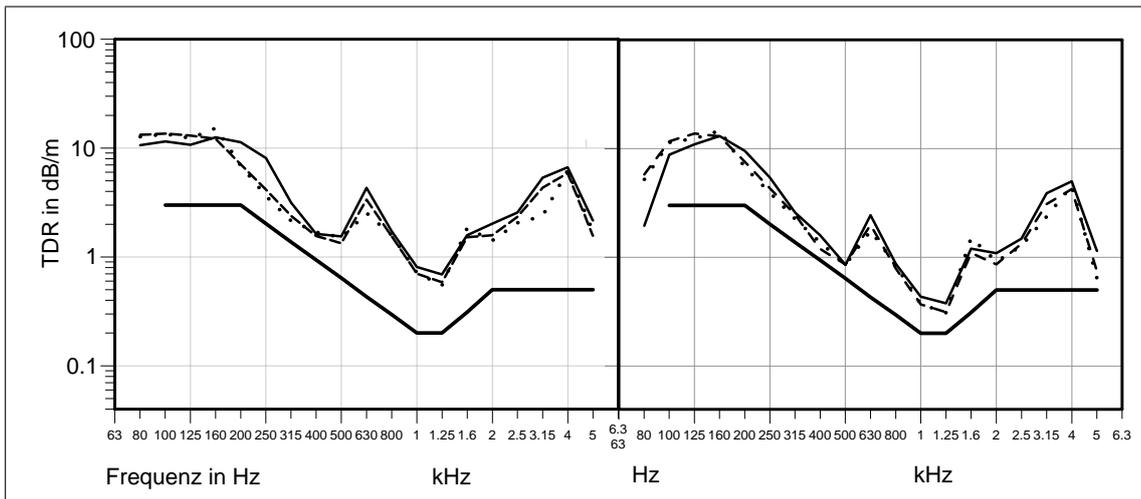


Abb. G.14: TDR-Spektrum (li. nach EN 15461, re. nach Lin. Regression), laterale Anregung. (—) MS **F**; (- -) MS **G**; (· · ·) MS **H**

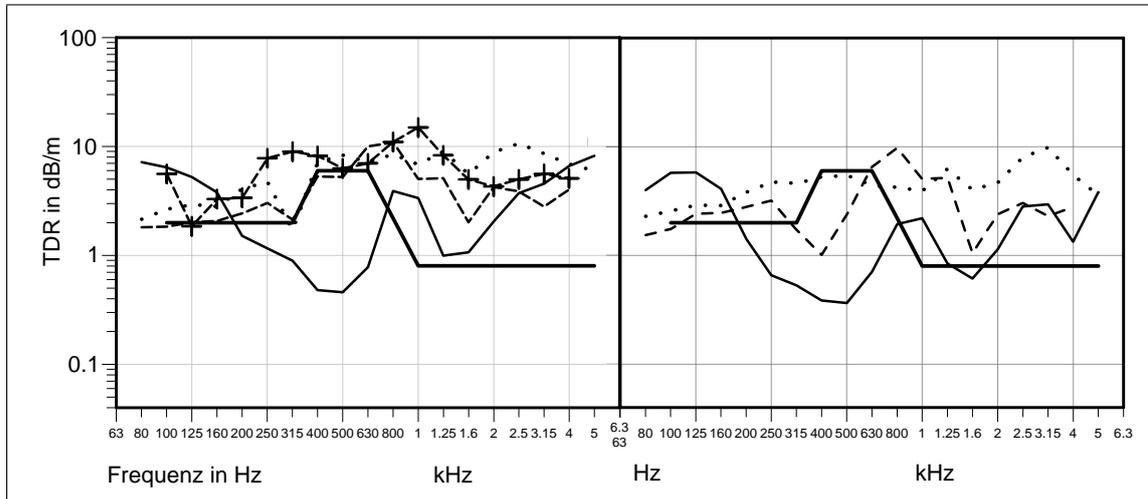


Abb. G.15: TDR-Spektrum (li. nach EN 15461, re. nach Lin. Regression), vertikale Anregung. (—) MS **I**; (- -) MS **J**; (-+ -) MS **J** indirekt; (· · ·) MS **K**

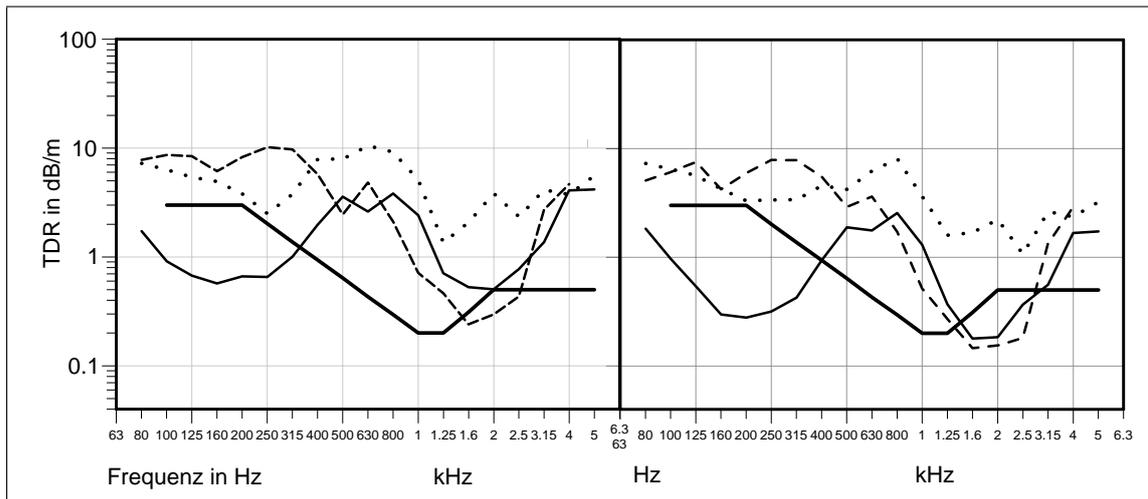


Abb. G.16: TDR-Spektrum (li. nach EN 15461, re. nach Lin. Regression), laterale Anregung. (—) MS **I**; (- -) MS **J**; (· · ·) MS **K**

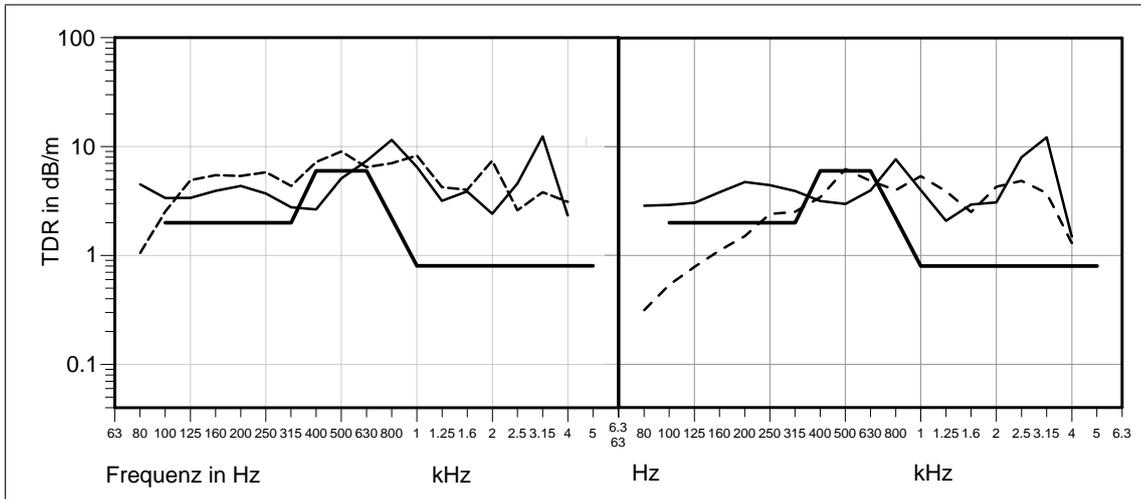


Abb. G.17: TDR-Spektrum (li. nach EN 15461, re. nach Lin. Regression), vertikale Anregung. (—) MS **L**; (- -) MS **M**

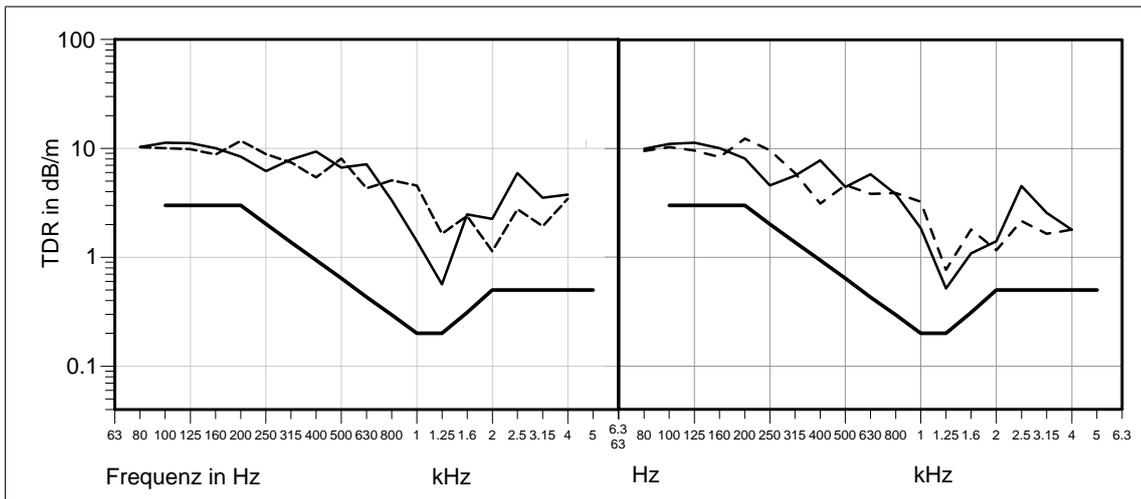


Abb. G.18: TDR-Spektrum (li. nach EN 15461, re. nach Lin. Regression), laterale Anregung. (—) MS **L**; (- -) MS **M**

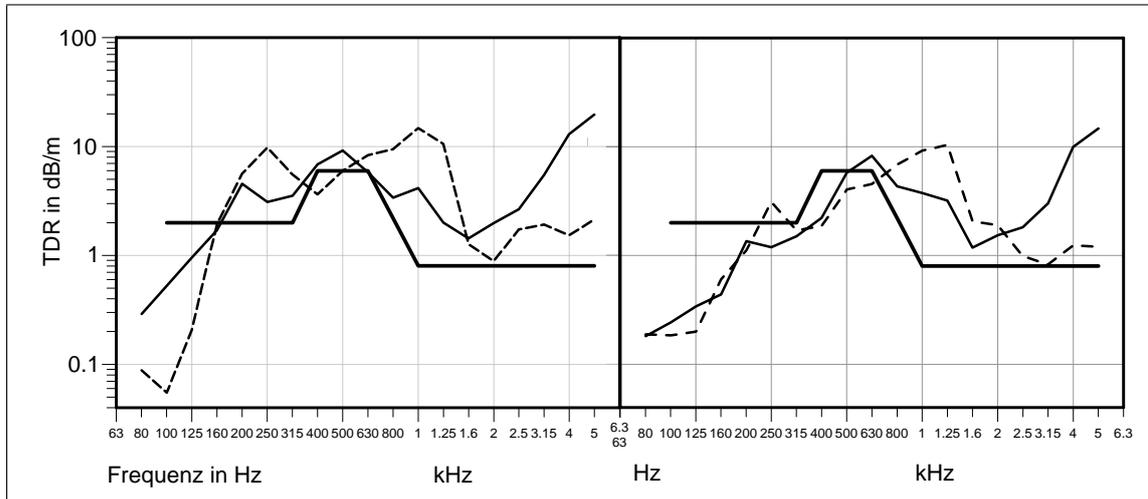


Abb. G.19: TDR-Spektrum (li. nach EN 15461, re. nach Lin. Regression), vertikale Anregung. (—) MS **N**; (- -) MS **O**

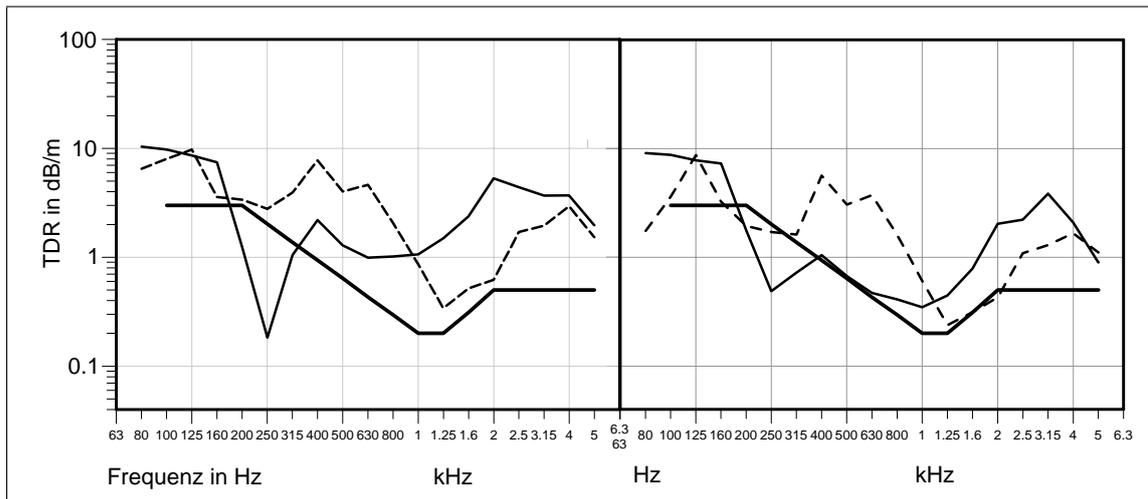


Abb. G.20: TDR-Spektrum (li. nach EN 15461, re. nach Lin. Regression), laterale Anregung. (—) MS **N**; (- -) MS **O**

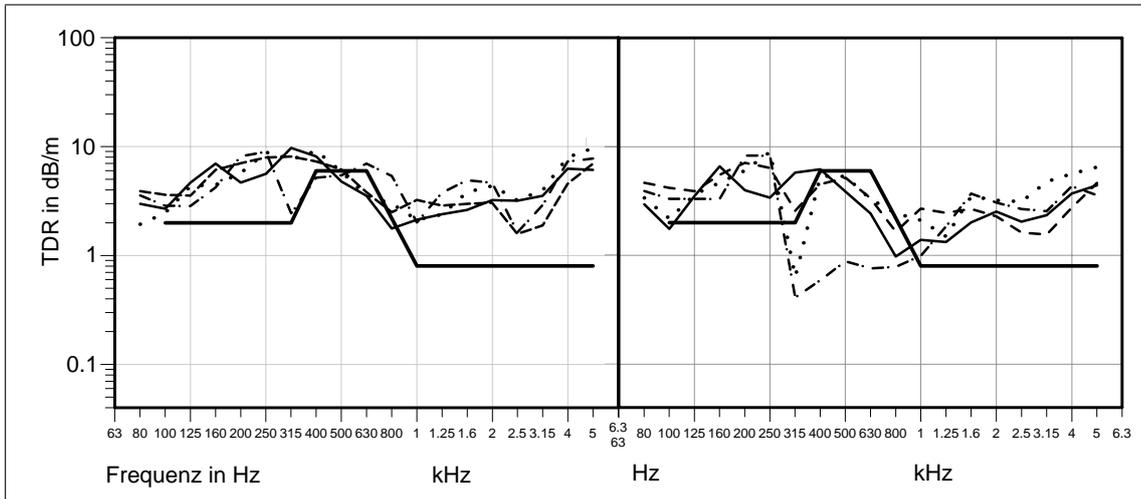


Abb. G.21: TDR-Spektrum (li. nach EN 15461, re. nach Lin. Regression), vertikale Anregung. (—) MS **P1**; (- -) MS **P2**; (· · ·) MS **Q**; (- · -) MS **R**

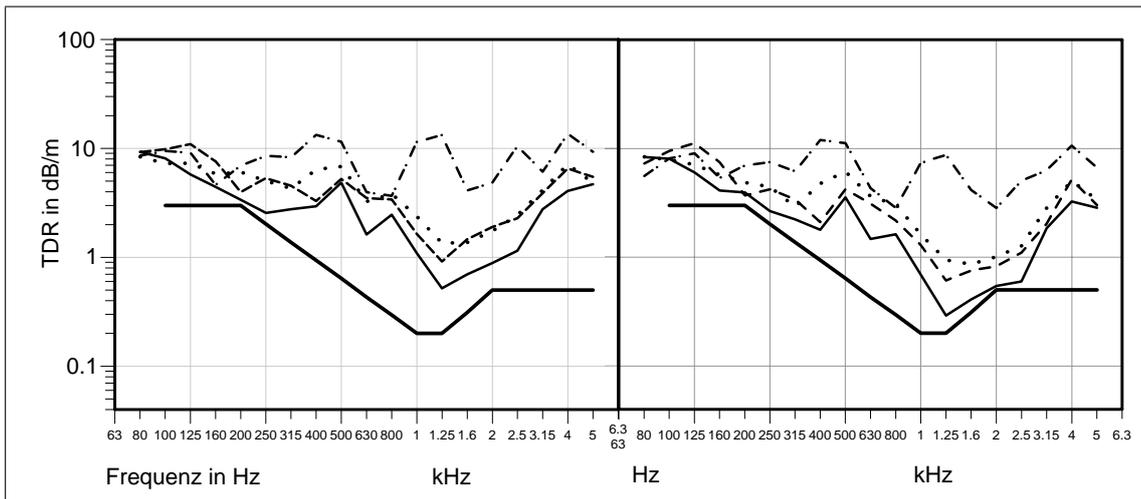


Abb. G.22: TDR-Spektrum (li. nach EN 15461, re. nach Lin. Regression), laterale Anregung. (—) MS **P1**; (- -) MS **P2**; (· · ·) MS **Q**; (- · -) MS **R**

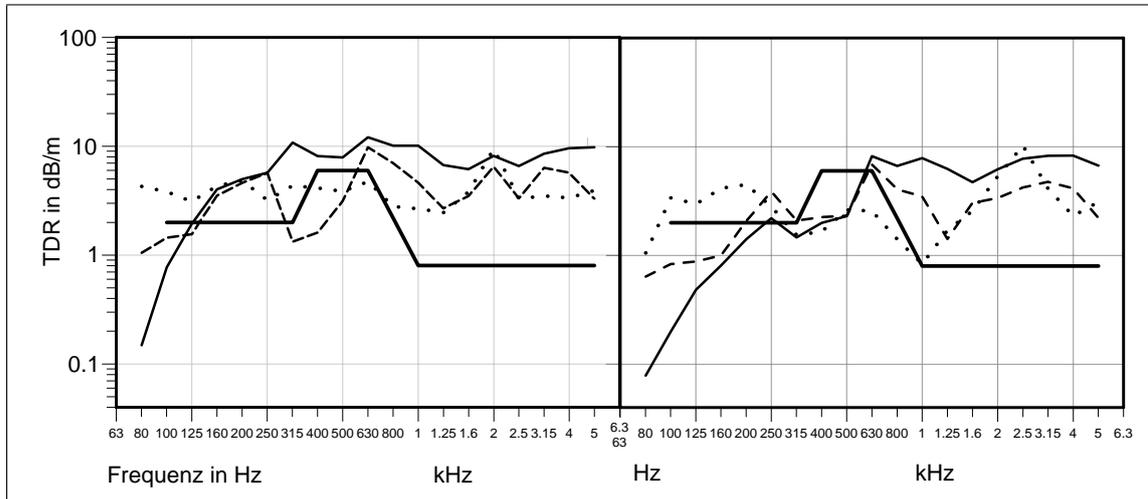


Abb. G.23: TDR-Spektrum (li. nach EN 15461, re. nach Lin. Regression), vertikale Anregung. (—) MS **S**; (- -) MS **T**; (···) MS **U**

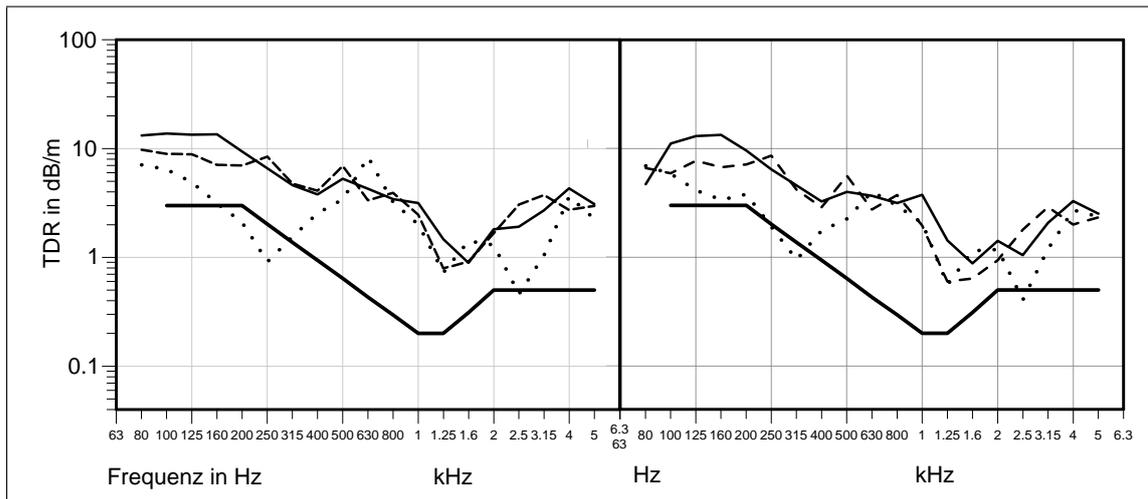


Abb. G.24: TDR-Spektrum (li. nach EN 15461, re. nach Lin. Regression), laterale Anregung. (—) MS **S**; (- -) MS **T**; (···) MS **U**

Anhang H Details der Messstellen

Tab. H.1: Aufbau Messstellen, Randbedingungen während der Messung

MS	Oberbau			Schwellen- Abstand in cm	Zw-Tem- peratur	Grenz- frequenz in Hz	Erfüllung des 10 dB- Kriteriums bei AP		Anmerkung
	Schwelle	Bauart	Stützpunkt				vertikal, SK weich	lateral, SK weich	
A	B91S	W Zw787a †	mittel	61	13°C	300	20	19	TDR gültig bei $f \leq 4$ kHz
B1	B91S	W Zw687a †	hart	61	20°C	600	28	26	/
B2	B91S	W Zw687a †	hart	60	20°C	600	20	25	/
C1	B70	W Zw664a	hart	61	29°C	200	19	19	/
C2	B70	W Zw664a	hart	60	33°C	400	19	24	/
C3	B70	W Zw664a	hart	61	19°C	500	19	24	28 AP
C4	B70	W Zw664a	hart	59	16°C	600	19	27	/
C5	B91	Ws Zw787a †	mittel	60	14°C	300	28	27	ATS
C6	B91	Ws Zw787a †	mittel	61	14°C	300	26	28	ATS
C7	B91	Ws Zw787a †	mittel	62	20°C	160	27	20	ATS
C8	B91	Ws Zw787a †	mittel	60	20°C	200	19	22	ATS
C9	B91	W Zw687a	hart	62	18°C	300	27	19	ATS
D1	SBB1	Aek ISOL 87	mittel	59	33°C	500	21	28	Stahl-Trogswelle
D2	SL73	Bi N.N. ©	hart	61	30°C	200	27	16	Bi-Block-Schwelle, 16 AP in verti- kaler Richtung bei weicher SK
D3	SBB1	Aek ISOL 87	mittel	60	30°C	200	26	21	Stahl-Trogswelle
D4	Holz	K ohne Zw	hart	61	20°C	600	21	24	/
D5	Holz	Ke Zw661a	hart	60	20°C	600	21	27	/
E1	B70	W Zw686a †	hart	65	24°C	600	19	21	/
E2	B70	W Zw686a †	hart	64	27°C	600	19	22	gleich MS E1, um 10 m versetzt
F	B320.1	RST60	mittel	61	7°C	300	21	19	zweifach elastischer Stützpunkt
G	B320.1	RST60	mittel	60	7°C	300	20	19	verschäumtes Schotterbett [§] , zwei- fach elastischer Stützpunkt, USM
H	B320.1	RST60	mittel	61	7°C	300	20	19	verschäumtes Schotterbett [§] , zwei- fach elastischer Stützpunkt

§ Verschäumung allein im Lastabtragungsbereich unterhalb der Schwellen (vergleiche Abbildung I.9).

† Die schräggestellten Angaben beruhen auf folgenden Annahmen

‡ Hinweis des Netzbetreibers.

© Abschätzung aufgrund des Mittelwertes diverser Bi-Block-Oberbau-Stützpunktsteifigkeiten [108] zu $s_p = 750$ kN/mm.

‡ Entsprechend einer Standard-Oberbauart [100] mit s_{zw686a} ca. 800 kN/mm.

Fortsetzung nächste Seite

MS	Oberbau			Schwellen- Abstand in cm	Zw-Tem- peratur	Grenz- frequenz in Hz	Erfüllung des 10 dB- Kriteriums bei AP		Anmerkung
	Schwelle	Bauart	Stützpunkt				vertikal, SK	lateral, SK	
I	B355TTS [∠]	IOARV 300	weich	54E3	28°C	160	19	29	Feste Fahrbahn
J	ST98Y	ZWS 15/4	weich	54E2	10°C	300	22	19	Y-Stahlschwellen, TDR gültig bei $f \leq 4$ kHz
K	Holz	K Zw664a †	hart	54E2	15°C	300	21	19	Schienen-Verbindungsstoß bei ca. 6 m, Bettung der Schwellen in Kies/Sand
L	Holz	K Zw664a [~]	hart	S41	27°C	600	19	19	Stromschiene an gegenüberl. Gleisseite, Halterung alle 7 Schwellen, TDR gültig $f \leq 4$ kHz
M	Holz	K Zw664a	hart	49E1	20°C	300	↗	19	Stromschiene an gegenüberl. Gleisseite, Halterung alle 7 Schwellen, Tunnel, TDR gültig bei $f \geq 4$ kHz
N	RS70	W Zw700	weich	60E1	7°C	200	↗	19	Beton-Rahmenschwelle mit Elastomer-Besohlung
O	/	W	weich ∅	49E1	3°C	300	↗	19	Beton-Tragrahmen-Gleis Bauart 'Bremer Rasengleis'
P1	Holz	K Zw664a	hart	49E1	20°C	300	20	21	Dritte Fahrschiene (Meterspur) an gegenüberliegender Gleisseite, Tunnel
P2	Holz	K Zw664a	hart	49E1	20°C	300	19	22	Dritte Fahrschiene (Meterspur) an gleicher Gleisseite, Tunnel
Q	Holz	K Zw664a	hart	49E1	20°C	300	19	19	MS P1, Schienen-Schwingungsdämpfer mit f_{Nutz} ca. [500;2000 Hz]
R	Holz	K Zw664a	hart	49E1	20°C	300	20	19	MS P2, Schienen-Schwingungsdämpfer mit f_{Nutz} ca. [50;200 Hz]
S	Holz	K Zw664a [~]	hart	49E1	0°C	300	↗	19	Dritte Fahrschiene (Meterspur) an gegenüberliegender Gleisseite
T	Holz	K Zw664a	hart	49E1	10°C	300	21	19	Dritte Fahrschiene (Meterspur) mit Fangschiene an gegenüberl. Gleisseite, Tunnel
U	Holz	K Zw664a	hart	49E1	16°C	300	20	20	Dritte Fahrschiene (Meterspur) an gegenüberl. Gleisseite, Fangschiene an gleicher Gleisseite, Tunnel

[∠] System „Rheda-Berlin Stadtbahn“ (Betontragplatte, Schutzbetonschicht, Betonrog mit Füllbeton und Bi-Blockschwelle B355TS), Unterbau Ziegelstein-Viadukt.

[∕] Fiktiver Abstand nach EN 15461.

Die schräggestellten Angaben beruhen auf folgenden Annahmen

† Entsprechend einer Standard-Oberbauart [100].

[~] Abgleich mit weiteren MS im selben Netz.

∅ Abschätzung aufgrund des Beton-Tragrahmens entsprechend MS I.

Tab. H.2: Abschätzung der Gleisfrequenzen aller MS in Hz

MS	vertikal				lateral			
	f_2	f_{c1}	f_{c2}	f_{pp}	f_2	f_{c1}	f_{c2}	f_{pp}
A	190	90	350	1370	70	40	120	560
B1	350	90	750	1370	120	40	250	560
B2	350	90	760	1420	120	40	250	580
C1	390	90	870	1270	140	40	290	490
C2	390	90	880	1310	140	40	290	500
C3	390	90	870	1270	140	40	290	490
C4	390	90	890	1350	130	40	300	520
C5	190	90	350	1420	70	40	120	580
C6	190	90	350	1370	70	40	120	560
C7	190	90	350	1330	70	40	120	550
C8	190	90	350	1420	70	40	120	580
C9	360	90	750	1330	120	40	250	550
D1	430	140	570	1350	160	60	200	520
D2	450 \neq	110 \neq	880 \neq	1270	160 \neq	50 \neq	290 \neq	490
D3	430	140	570	1310	160	60	190	500
D4	§	§	§	1270	§	§	§	490
D5	740	140	1070	1420	250	60	360	580
E1	400	90	760	850	140	40	250	360
E2	400	90	760	880	140	40	250	370
F	230	90	490	1370	80	40	170	560
G	230	90	500	1420	80	40	170	580
H	230	90	490	1370	80	40	170	560
I	§	§	130 §	1120	§	§	40 §	430
J	400	130	580	610	140	60	200	230
K	660	140	1000	1120	230	60	330	430
L	670	150	1030	700	230	70	350	310
M	660	140	1020	1030	230	60	340	430
N	110	70	230	2100/9100 [†]	§	30	80	840/3740 [†]
O	§	§	210 §	780	§	§	70 §	330
P1	660	140	1020	siehe Tabelle 9.25	230	60	340	siehe Tabelle 9.27
P2	660	140	1020		230	60	340	
Q	660	130	920		230	60	310	
R	660	130	900		230	60	300	
S	660	140	1020		1000	230	60	
T	660	140	1020	970	230	60	340	410
U	660	140	1030	1070	230	60	340	450

Anmerkungen siehe folgende Seite

Alle Frequenzen auf volle Zehnerstellen gerundet

Schotterbett-Steifigkeit: Generell 100 kN/mm/m je Schiene [94]

Holzschwelle: 90 kg/Stk (Anhaltswert nach [106]), Bi-Block-Schwelle: 200 kg/Stk

MS **Q** und **R**: Erhöhung der ‘Schienen’-Masse und -Trägheitsmomente durch die Schienendämpfer

§ Keine Schwelle oder Zw vorhanden, f_{c2} ermittelt durch Näherung [94] (siehe Kapitel 4.1.1).

† Das Rahmenschwellen-Gleis bilden zwei unterschiedliche Stützpunktabstände aus. Annahme: Die zusätzliche ‘Mittlere Zw’ (platziert mittig auf den Beton-Längsverbindern) bildet aufgrund der relativ geringen Zw-Steifigkeit und fehlender Vorspannung keinen gleisdynamisch relevanten Stützpunkt aus.

Anhang I Ansicht der Messstellen



Abb. I.1: Ansicht der MS **A**,
baugleich mit **B1** und **B2**



Abb. I.2: Ansicht der
MS **C2**, baugleich mit
C1, **C3** und **C4**



Abb. I.3: Ansicht der
MS **C5**, baugleich mit
C6 bis **C8**



Abb. I.4: Ansichten der MS D1 , baugleich mit D3



Abb. I.5: Ansichten der MS D2



Abb. I.6: Ansicht
der MS D4



Abb. I.7: Ansicht der MS **D5** (Detail)

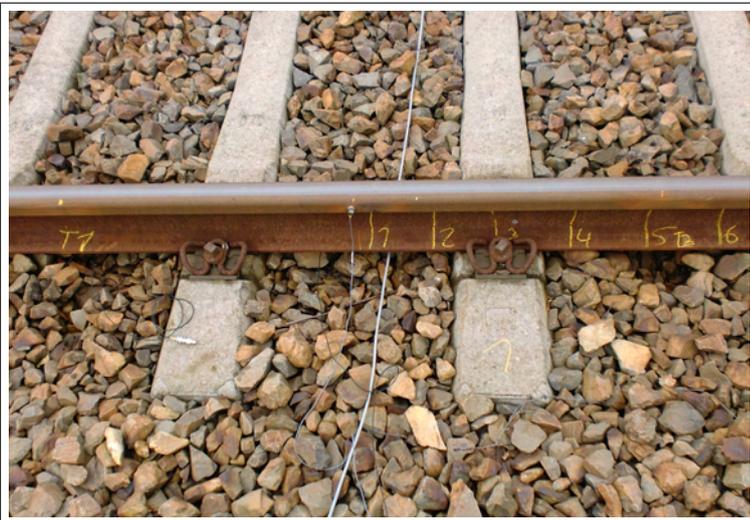


Abb. I.8: Ansicht der MS **E1** , baugleich mit **E2**



Abb. I.9: Ansicht der MS **F**. Die Schotter-Verschäumung an den (darüber hinaus baugleichen) MS **G** und **H** ist nicht sichtbar.



Abb. I.10: Ansicht
der MS **I**



Abb. I.11: Ansichten der MS **J**



Abb. I.12: Ansicht
der MS **K**



Abb. I.13: Ansicht
der MS **L**



Abb. I.14: Ansicht eines
Gleises ähnlich der MS **M**



Abb. I.15: Ansicht
der MS **N**



Abb. I.16: Ansicht der MS O



Abb. I.17: Ansichten der MS Q, auch P1, jedoch ohne Dämpfer

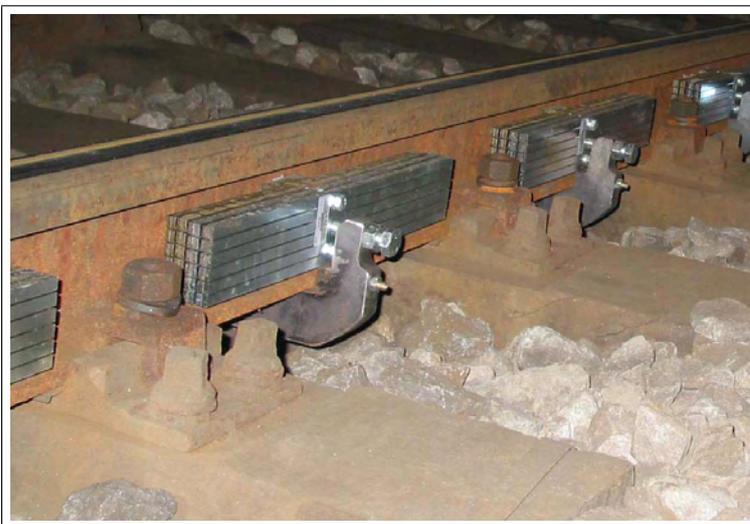


Abb. I.18: Ansichten der MS R, auch P2, jedoch ohne Dämpfer



Abb. I.19: Ansicht
der MS **S**

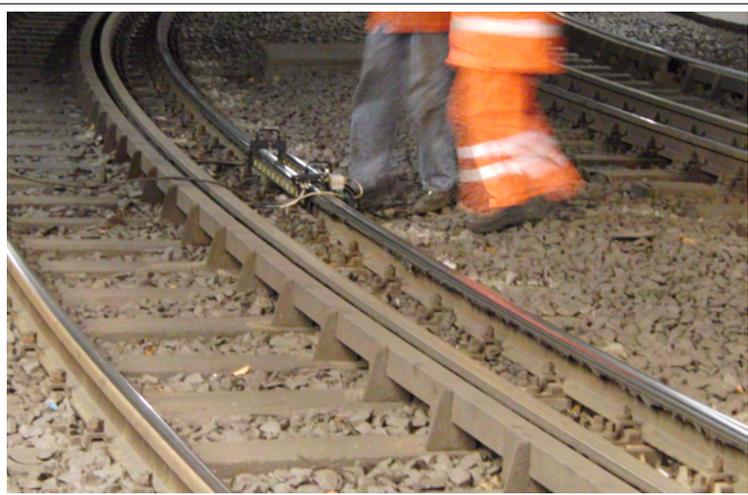


Abb. I.20: Ansicht
der MS **T**

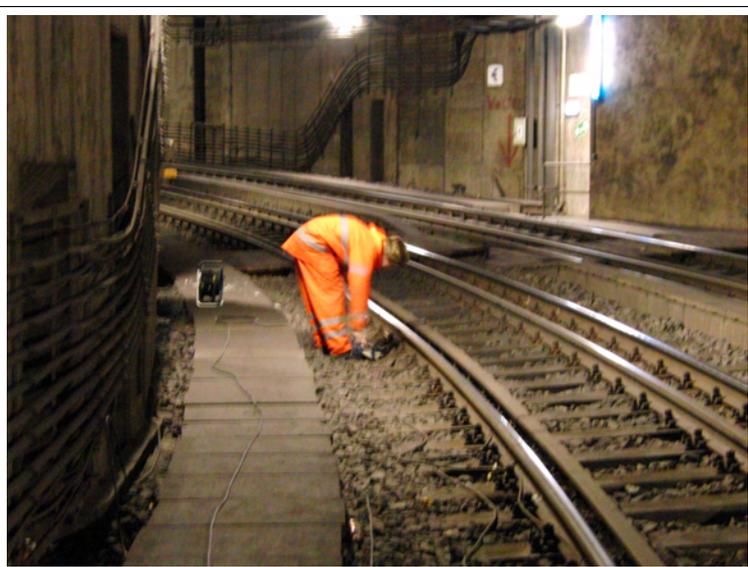


Abb. I.21: Ansicht
der MS **U**

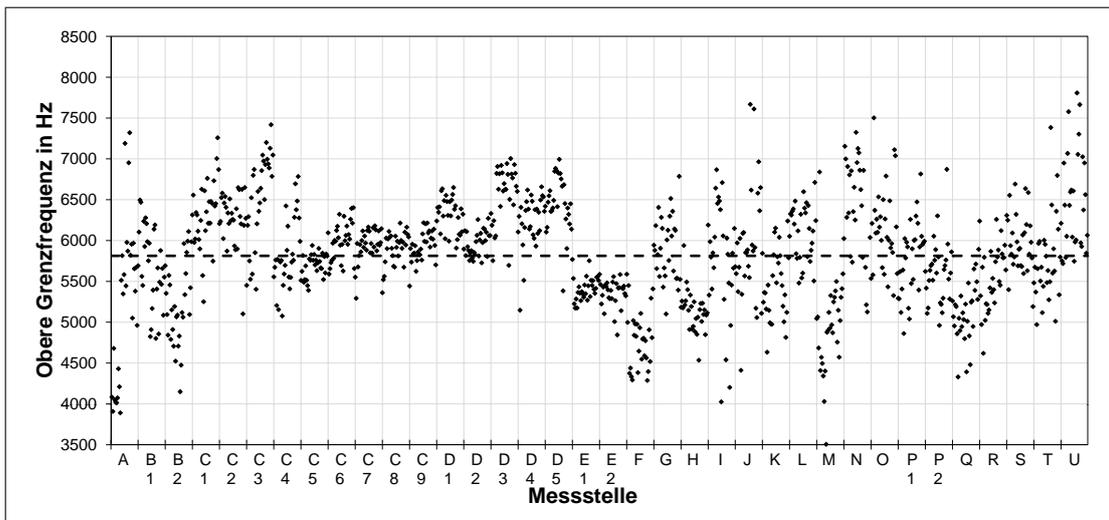


Abb. J.3: Obere nutzbare Grenzfrequenz - leichter Hammer, vertikale Anregung.
 (- -) Mittelwert über alle Werte

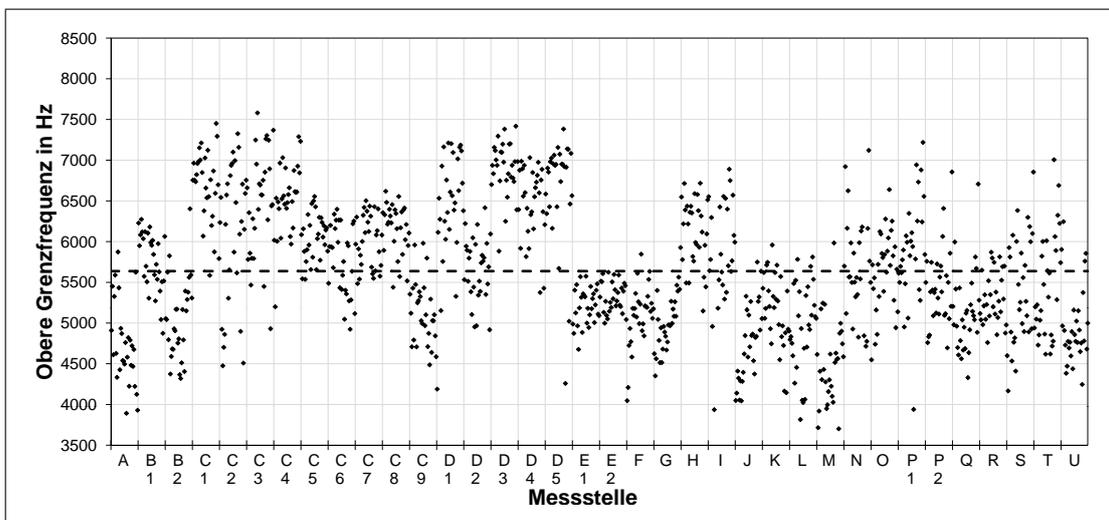


Abb. J.4: Obere nutzbare Grenzfrequenz - leichter Hammer, laterale Anregung.
 (- -) Mittelwert über alle Werte

