UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES
BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT,
NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT

Forschungsbericht 296 55 215
UBA-FB 000283/1-4

Texte
59/03
ISSN
0722-186X

Abschirmung von Schallschutzwänden bei Hochgeschwindigkeitszügen

Bericht 1 - 4

Bericht 1, Arbeitspaket 1, Messserie 1:
Einzelmikrofon-Messungen bei ungeschliffenen Schienen

Bericht 2, Arbeitspaket 1, Messserie 2:
Einzelmikrofon-Messungen bei geschliffenen Schienen

Bericht 3, Arbeitspaket 2:
Array-Messungen

Bericht 4, Arbeitspaket 3:
Modellrechnungen und Vorschläge zur Modifikation der Schall 03

von

Martin Klemenz
Michael W. Hansen (nur Bericht 1 + 2)
Bernd Barsikow

Ingenieurbüro akustik-data, Berlin

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Diese TEXTE-Veröffentlichung kann bezogen werden bei
Vorauszahlung von10,00 Euro
durch Post- bzw. Banküberweisung,
Verrechnungsscheck oder Zahlkarte auf das

Konto Nummer 4327 65 - 104 bei der
Postbank Berlin (BLZ 10010010)
Fa. Werbung und Vertrieb,
Ahornstraße 1-2,
10787 Berlin

Parallel zur Überweisung richten Sie bitte
eine schriftliche Bestellung mit Nennung
der **Texte-Nummer** sowie des **Namens**
und der **Anschrift des Bestellers** an die
Firma Werbung und Vertrieb.

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr
für die Richtigkeit, die Genauigkeit und
Vollständigkeit der Angaben sowie für
die Beachtung privater Rechte Dritter.
Die in der Studie geäußerten Ansichten
und Meinungen müssen nicht mit denen des
Herausgebers übereinstimmen.

Weitere Veröffentlichungen zur Thematik Schienenverkehrsgeräusche in der Reihe Texte:

Texte 58/03: Bestimmung der Einfügungsdämpfung einer Schallschutzwand anhand von Messungen in derselben Messebene

Texte 60/03: Weiterentwicklung der Prognoseverfahren der Verkehrslärmschutzverordnung (16. BImSchV) – Besonders überwachtes Gleis (BüG), Feste Fahrbahnen

Texte 61/03: Geräuschemissionen von Eisenbahnen – Zusammenfassende Präsentation der Messergebnisse des Umweltbundesamtes

Herausgeber: Umweltbundesamt
Postfach 33 00 22
14191 Berlin
Tel.: 030/8903-0
Telex: 183 756
Telefax: 030/8903 2285
Internet: http://www.umweltbundesamt.de

Redaktion: Fachgebiet I 3.4
Dr. Heidemarie Wende

Berlin, September 2003

Hinweis zum Bericht 1:

Der Abstand 7,5 m der Messreihe am Messort Northeim ist von weiteren Betrachtungen auszuschließen, da nach Durchsicht der Daten ein Mess- und Auswertungsfehler bei der 7,5 m-Messung ohne Wand sehr wahrscheinlich ist.

Berichts – Kennblatt

Berichtsnummer 1. UBA-FB 98-296 55 215	2.	3.
4. **Titel des Berichts** Abschirmwirkung von Schallschutzwänden bei Hochgeschwindigkeitszügen; Bericht 1, Arbeitspaket 1, Meßserie 1: Einzelmikrofon-Messungen bei ungeschliffenen Schienen		
5. **Autor(en), Name(n), Vorname(n)** Klemenz, Martin; Hansen, Michael W.; Barsikow, Bernd		8. **Abschlußdatum** 31.08.1998 9. **Veröffentlichungsdatum**
6. **Durchführende Institution (Name, Anschrift)** Ingenieurbüro akustik-data, Dipl.-Ing. B. Barsikow Kirchblick 9, 14129 Berlin		10. **UFOPLAN-Nr.** 296 55 215 11. **Seitenzahl** 111
7. **Fördernde Institution (Name, Anschrift)** Umweltbundesamt Postfach 33 00 22, 14191 Berlin		12. **Literaturangaben** 10 13. **Tabellen / Diagramme** 28 / 87 14. **Abbildungen** 6
15. **Zusätzliche Angaben**		
16. **Kurzfassung** Die Ergebnisse aus Einzelmikrofon-Messungen an einer Schnellfahr- und einer Ausbaustrecke der DB AG offenbaren, daß die Einfügungsdämpfung von Schallschutzwänden (SSW) mittels der Richtlinie "Schall 03" nicht immer ausreichend genau berechnet wird. Der vorliegende Bericht dokumentiert entsprechende Untersuchungen in benachbarten Meßebenen mit und ohne SSW bei ungeschliffenen Schienen an jeweils zwei Meßorten. Es zeigt sich, daß die Wandwirkung stark abhängig ist von der Rauhigkeit der Schienen, der Zugart und der Zuggeschwindigkeit. Solange der Hauptteil der Schallemission im Rad/Schiene-Bereich erzeugt wird, d. h. bei IC-, EC-, IR-, RE- und Güterzügen, besteht zwischen der nach Schall 03 berechneten Einfügungsdämpfung und gemessenen Werten eine weitgehende Übereinstimmung. Bei ICE-Zügen und Geschwindigkeiten oberhalb von ca. 200 km/h überschätzt die Schall 03 hingegen die Einfügungsdämpfung um mehrere dB(A). Dies hängt bei schnellfahrenden Zügen mit deren hochliegenden Schallquellen zusammen, die in der Schall 03 bislang generell nicht berücksichtigt werden.		
17. **Schlagwörter** Schallschutzwände, Einfügungsdämpfung, Hochgeschwindigkeitszüge, ICE 1, ICE 2, Reisezüge, Regionalzüge, Güterzüge, Schienenrauhigkeit, Rauhigkeitskorrektur, Einzelmikrofone, Pegelverläufe, Schalldruckspektren, Richtlinie "Schall 03", hochliegende Schallquellen		
18. **Preis**	19.	20.

UBA-F+E-Berichtsmerkblatt (6.80)

Report - Data Sheet

1. **Report No.** UBA-FB 98-296 55 215	2.	3.
4. **Report Title** Shielding effect of noise barriers during passbys of high-speed trains; report No. 1, work package No. 1, measuring series No. 1: single-microphone measurements for rails in as-is condition		
5. **Author(s), Family Name(s), First Name(s)** Klemenz, Martin; Hansen, Michael W.; Barsikow, Bernd		8. **Report Date** 31 August 1998 9. **Publication Date**
6. **Performing Organisation (Name, Address)** akustik-data Engineering Office, Dipl.-Ing. B. Barsikow Kirchblick 9, 14129 Berlin		10. **UFOPLAN–No.** 296 55 215 11. **No. of Pages** 111
7. **Sponsoring Agency (Name, Address)** Federal Environmental Agency Post box 33 00 22, 14191 Berlin		12. **No. of References** 10 13. **Tables / Diagrams** 28 / 87 14. **Figures** 6
15. **Supplementary Notes**		

16. **Abstract**

The results of single-microphone measurements alongside both a high-speed and an improved DB AG track have clearly shown that the insertion loss of noise barriers, as specified by the "Schall 03" guidelines, is not always calculated correctly. The present report documents investigations carried out for neighbouring measuring planes with and without barriers where the surfaces of the rails were in an as-is condition. Results show that the effect of the barriers is strongly dependent on the rail roughness, type of train, and its speed. As long as the major sound sources lie in the vicinity of the wheels and rails, i.e., for IC, EC, IR, RE, and freight trains, the insertion loss calculated using Schall 03 corresponds closely to the values actually measured. However, for ICE trains travelling at speeds above about 200 km/h, Schall 03 overestimates the insertion loss by several dB(A). The reason for this discrepancy is because the higher-lying sound sources on high-speed trains are, thus far, not accounted for in Schall 03.

17. **Key Words**

Noise barriers, insertion loss, high-speed trains, ICE 1, ICE 2, passenger trains, regional trains, freight trains, rail roughness, roughness correction, single microphones, time histories, sound-pressure spectra, "Schall 03" guidelines, high-lying sound sources

18. **Price**	19.	20.

Abschirmwirkung von Schallschutzwänden bei Hochgeschwindigkeitszügen
Arbeitspaket 1, Meßserie 1:
Einzelmikrofon-Messungen bei ungeschliffenen Schienen

bearbeitet von

Dipl.-Ing. M. Klemenz, Dipl.-Ing. M. W. Hansen und Dipl.-Ing. B. Barsikow

Inhaltsverzeichnis

	Abkürzungen und Formelzeichen	3
1.	Einleitung	5
1.1	Aufgabenstellung im Arbeitspaket 1	5
1.2	Aufgabenstellung im Arbeitspaket 2	5
1.3	Aufgabenstellung im Arbeitspaket 3	6
1.4	Kenntnisstand	6
2.	Auswahl und Beschreibung der Meßorte	7
2.1	Meßort A	9
2.2	Meßort B	11
2.3	Meßort C	11
2.4	Meßort D	14
2.5	Zustand der Schienenoberflächen	14
3.	Durchführung der Messungen	17
3.1	Umgebungs- und Wetterbedingungen	17
3.2	Zugmaterial	18
3.2.1	ICE-Radunrundheiten	18
3.2.2	ICE-Radschallabsorber	19
3.2.3	ICE-Lüftereinstellung	19
3.2.4	Radrauhigkeiten	20
3.3	Meßgeräte	20

4.	Auswertung der Daten	21
4.1	Vorbeifahr-, Ereignis- und Stunden-Mittelungspegel	21
4.2	Ermittlung der Zuggeschwindigkeiten und -längen	23
4.3	Örtlicher spezifischer Grundwert	24
4.4	Berechnung der SSW-Abschirmwirkung	25
4.4.1	Berücksichtigung unterschiedlicher Gleiszustände zwischen zwei Meßorten	25
4.4.2	Berücksichtigung unterschiedlicher Rauhigkeiten zwischen rechter und linker Schiene	26
4.5	Statistische Größen	32
5.	Ergebnisse	34
5.1	Pegelverläufe	35
5.2	Schalldruckspektren	36
5.3	Einzahlwerte	46
5.4	Vergleich mit Schall 03	52
6.	Zusammenfassung	59
7.	Literatur	60
	Anhang	62

Abkürzungen und Formelzeichen

D_{BM}, D_D, $D_{c,k}$, D_{Fb}, D_{Fz}, D_l, D_v	Pegeldifferenzen in [dB(A)] gemäß Schall 03
f	Frequenz in [Hz], auch Funktion
f_a	Anregefrequenz des Rad/Schiene-Systems in [Hz]
i	Kennzeichnung für Mikrofone in einer Meßebene
K	Konstante bei Berechnung des Rollgeräuschs in [dB(A)]
l	Zuglänge in [m]
$L_A(f)$	A-Bewertungskurve in [dB]

$L_A(t)$	A-bewerteter Schalldruckpegel bzw. Pegelverlauf in [dB(A)]
L_{AV}	Approximation der Transferfunktion in [dB(A)] zwischen abgestrahltem Rollgeräusch L_{Roll} und Rad- bzw. Schienenrauhigkeit R
L_e	Ereignispegel in [dB(A)]
L_h	Stunden-Mittelungspegel in [dB(A)]
L_{Max}	Maximalpegel in [dB(A)]
$L_{m,s}$	Örtlicher spezifischer Grundwert in [dB(A)]
$L_{m,s,MS,i}$	Örtlicher spezifischer Grundwert ermittelt mit Mikrofon i in einer Meßebene mit vorhandener SSW in [dB(A)]
$L_{m,s,OS,i}$	Örtlicher spezifischer Grundwert ermittelt mit Mikrofon i in einer Meßebene ohne SSW in [dB(A)]
L_{Roll}	Anhand der Rauhigkeiten von Rad und Schiene prognostiziertes Rollgeräusch in [dB(A)]
L_v	Vorbeifahrpegel in [dB(A)]
M	Empirischer Mittelwert der Meßwerte x_i
MS	Meßebene mit einer einseitigen SSW
N	Anzahl der Meßwerte in einer Datenklasse
OS	Meßebene mit freier Schallausbreitung zu beiden Seiten des Gleises
p	Vertrauensniveau, hier 0,8
R	Gesamtrauhigkeit von Rad und Schiene in [dB]
R_r	Rauhigkeit der Schienenoberfläche in [dB]
R_w	Rauhigkeit der Radlauffläche in [dB]
s	Streuung der Meßwerte x_i
SFS	Schnellfahrstrecke
SO	Schienenoberkante
SSW	Schallschutzwand
t	Meßzeit in [s]
t_1	Zeitpunkt in [s], in dem die Zugspitze die Meßebene passiert
t_2	Zeitpunkt in [s], in dem das Zugende die Meßebene passiert
t_a	Startzeitpunkt in [s] des ausgewerteten Datensatzes

t_e	Endzeitpunkt in [s] des ausgewerteten Datensatzes
t_M	Endzeitpunkt in [s] der ersten Hälfte des ausgewerteten Datensatzes
t_{N-1}	Studentfaktor für N Meßwerte und ein Vertrauensniveau p
υ	Zuggeschwindigkeit in [km/h] bzw. [m/s]
V	Vertrauensbereich in [dB(A)]
$x = \upsilon \cdot t$	Fahrzeugkoordinate in [m], $x = 0$ m für die Zugspitze, $x = l$ für das Zugende
x_i	Meßwert
x_o	Obere Grenze des Vertrauensbereichs in [dB(A)]
x_u	Untere Grenze des Vertrauensbereichs in [dB(A)]
y_i	Meßwert
z_0	Schirmwert nach Schall 03 in [m] für das Teilstück, welches in der Meßebene liegt
Δf	Bandbreite in Schmalbandspektren
ΔL_{Roll}	Korrekturterm in [dB(A)] für unterschiedliche Rauhigkeiten von rechter und linker Schiene
$\Delta L_{Schall\ 03}$	Differenz aus ΔL_{SSW} und $\Delta L_{SSW}'$ in [dB(A)]
ΔL_{SSW}	gemessene Einfügungsdämpfung der SSW in [dB(A)]
$\Delta L_{SSW}'$	nach Schall 03 berechnete Einfügungsdämpfung der SSW in [dB(A)]
λ_r	Wellenlänge der Schienenrauhigkeit in [m]
λ_w	Wellenlänge der Radrauhigkeit in [m]

1. Einleitung

Im Rahmen des Themas "Weiterentwicklung der Prognoseverfahren der Verkehrslärmschutzverordnung (16. BImSchV)" wurde im Auftrag des Umweltbundesamtes die Abschirmwirkung von Schallschutzwänden insbesondere bei Hochgeschwindigkeitszügen untersucht. Im vorliegenden Bericht werden die Ergebnisse der Einzelmikrofon-Messungen aus dem Arbeitspaket 1 bei ungeschliffenen Schienen (Meßserie 1) dokumentiert.

1.1 Aufgabenstellung im Arbeitspaket 1

Das Arbeitspaket 1 umfaßt Messungen mit Einzelmikrofonen in +7,5, +25, +50 und -25 m Entfernung von Gleismitte. Untersucht wurden ICE-, IC-, EC-, IR- und RE-Regelzüge sowie Güterzüge. Die Messungen sollten gleichzeitig mit jeweils vier Mikrofonen in einer Meßebene mit freier Schallausbreitung (Bezeichnung OS) und einer Meßebene mit einer einseitigen SSW (Bezeichnung MS) erfolgen. Zu Vergleichszwecken wurden die Messungen an zwei verschiedenen DB-Strecken (Ort A/B und Ort C/D) durchgeführt (siehe Kapitel 2). Die beiden Orte wurden so ausgewählt, daß die Vorbeifahrten an OS und MS unter möglichst den gleichen topographischen und betrieblichen Bedingungen stattfanden. In der Meßserie 1 sollten die Immissionspegel der Vorbeifahrten der genannten Zugtypen beim vorgefundenen, ungeschliffenen Schienenzustand gemessen werden. In einer zweiten Meßkampagne (Meßserie 2) sollte das Meßprogramm 6 bis 8 Wochen nach dem Schleifen der Schienen wiederholt werden. Ziel der Untersuchungen im Arbeitspaket 1 ist es, die Einfügungsdämpfung der Schallschutzwände in Abhängigkeit von Zugart, Gleiszustand, Zuggeschwindigkeit sowie weiteren Parametern wie z. B. Einsatz verschiedener Radbauarten bzw. Absorberkonfigurationen und Lüfterbetriebszuständen beim ICE zu ermitteln.

1.2 Aufgabenstellung im Arbeitspaket 2

Das Arbeitspaket 2 dient zur Lokalisierung und Analyse der sogenannten "hochliegenden" Schallquellen des ICE 1 und ICE 2 mittels der Array-Technik, um das Gesamtbild der bereits meßtechnisch erfaßten Schallquellen zu vervollständigen. Es wird angestrebt, daß auch solche Quellen von Lokomotiven und IC-Wagen in die Untersuchung miteinbezogen werden. Die Messungen sollen in der Nähe von Meß-

ort A durchgeführt werden. Zum Einsatz kommt ein vertikales Schachtel-Array sowie ein X-förmig angeordnetes Array mit jeweils 29 Mikrofonen. Die Aufstellung erfolgt so, daß sich die Reihe bzw. Ebene der Mikrofone ca. 4,7 m seitlich der Gleismitte und der Array-Mittelpunkt ca. 3,8 m über SO befindet.

1.3 Aufgabenstellung im Arbeitspaket 3

Mit den aus Arbeitspaket 2 gewonnenen Erkenntnissen soll das Prognosemodell AD-PRO 2.0 aktualisiert werden. Sodann ist mit dessen Hilfe die Einfügungsdämpfung von Schallschutzwänden zu berechnen, die in ihren geometrischen Abmessungen denen entsprechen, die in Arbeitspaket 1 untersucht wurden. Die Berechnungen erfolgen in Abhängigkeit von Geschwindigkeit, Gleiszustand, Zugtyp und anderer relevanter Parameter. Das Ergebnis der Modellrechnungen wird dann in Form von Einzahlwerten mit den Meßergebnissen aus Arbeitspaket 1 verglichen. Ferner soll für eine beschränkte Anzahl von Vorbeifahrten der A-bewertete Pegelverlauf bei freier Schallausbreitung und bei vorhandener SSW modelliert und mit den jeweiligen gemessenen Pegelverläufen verglichen werden. Ziel ist es, die Anwendbarkeit der modifizierten Version von AD-PRO bei Variation möglichst vieler Parameter zu testen und gegebenenfalls zu bestätigen. Abschließend wird daraus ein Vorschlag zur aktualisierten Berechnung der Abschirmwirkung einer SSW für die Novellierung der Verkehrslärmschutzverordnung erarbeitet.

1.4 Kenntnisstand

Die Formel für die Pegeldifferenz auf dem Ausbreitungsweg durch eine Schallschutzwand in der aktuell gültigen Richtlinie Schall 03 [1] bedarf möglicherweise einer Überarbeitung, da nach bisher vorliegenden orientierenden Messungen [2] die Wirkung einer SSW insbesondere bei Hochgeschwindigkeitszügen um mehrere dB überschätzt wird. Von akustik-data wurde bereits in [3] die Abschirmung durch eine SSW bei Vorbeifahrt des ICE 1 in vereinfachter Weise modelliert und untersucht. Hierzu wurden im damals benutzten Prognosemodell PRODB, Version 2.1 [4] als Wandwirkung lediglich pauschale Pegelabschläge für die relevanten Schallquellen angesetzt. Es zeigte sich in [3], daß die Pegelminderung durch eine SSW beim ICE 1 aufgrund seiner andersartigen vertikalen Quellenverteilung geringer ist als bei einem Zug, dessen Schallquellen vorwiegend im Rad/Schiene-Bereich liegen. Dies trifft besonders

für hohe Geschwindigkeiten durch den Einfluß der "hochliegenden" Schallquellen (Stromabnehmer, Strömungsablösungen an Triebkopfkontur sowie Lüfter), aber auch für niedrige Geschwindigkeiten allein durch die Geräuschanteile der Lüfter zu.

Für eine exakte Prognose der Abschirmwirkung einer SSW ist neben einer detaillierten Modellbildung auch die Kenntnis des schalltechnischen Zustands von Schienen und Rädern bzw. eine korrekte Angabe des Verhältnisses zwischen Rollgeräusch, Lüftergeräusch und aerodynamischem Geräusch notwendig.

2. Auswahl und Beschreibung der Meßorte

Die Meßorte wurden unter folgenden Gesichtspunkten ausgesucht:

- Die Streckenabschnitte mit und ohne SSW sollten möglichst nah beieinander liegen, um sicherzustellen, daß der vorbeifahrende Zug die Meßorte mit annähernd gleichen Betriebsbedingungen wie Zuggeschwindigkeit und Lüfterleistung passiert und der Zustand der Gleise annähernd gleich ist.
- Ein möglichst großes Geschwindigkeitsspektrum sollte abgedeckt werden.
- Zu Vergleichszwecken sollten auch Güterzüge sowie IC-, EC-, IR- und RE-Züge gemessen werden.
- Es war darauf zu achten, daß die Schallausbreitung nicht durch Hindernisse beeinträchtigt ist und sich möglichst keine Störschallquellen in der Nähe befinden.
- Ferner sollte das Gelände zu beiden Seiten des Gleises eben und ohne größeren Bewuchs sein.
- Der Zugang zum Meßort mußte mit einem Fahrzeug möglich sein, das als Meßzentrale diente.

Ein längerer Auswahlprozeß mit Ortsbesichtigungen an vielen DB-Strecken führte nach Abwägung der Vor- und Nachteile in Abstimmung mit dem Auftraggeber zur Auswahl der nachfolgend beschriebenen Meßstellen. Skizzen dieser Orte, aus denen die Mikrofonpositionen und das Geländerelief hervorgehen, findet man in den Abschnitten 2.1 und 2.3. Die Mikrofonpositionen können außerdem Tabelle 1 entnommen werden. Darin weist ein negativer Abstand von Gleismitte auf die Mikrofonposition auf der gegenüberliegenden Gleisseite mit jeweils freier Schallausbreitung

hin. Aufgrund der örtlichen Nähe der Meßebenen A und B sowie der Ebenen C und D war gewährleistet, daß derselbe Zug mit etwa gleicher Geschwindigkeit und ähnlichen Betriebszuständen der Aggregate an den Orten mit und ohne SSW vorbeifuhr.

Meß-ebene	Mikro-fon Nr.	Fahrt Nr.	Abstand v. Gleismitte [m]	Höhe über SO [m]	Höhe über Gelände [m]
A	1	001-033	7,5	0,0	1,60
A	1	101-121	6,9	0,0	1,60
A	1	201-223	7,5	1,2	2,80
A	2	001-223	25,0	3,5	5,50
A	3	001-223	50,0	5,0	7,00
A	4	001-223	-25,0	3,5	5,50
B	1	001-033	6,9	0,0	1,50
B	1	101-121	6,9	0,0	1,50
B	1	201-223	7,5	1,2	2,70
B	2	001-223	25,0	3,5	5,00
B	3	001-223	50,0	5,0	6,50
B	4	001-223	-25,0	3,5	5,00
C	1	301-426	7,5	1,2	2,10
C	2	301-426	25,0	3,5	3,65
C	3	301-426	50,0	5,0	4,70
C	4	301-426	-30,0	3,5	5,10
D	1	301-426	7,5	1,2	1,95
D	2	301-426	25,0	3,5	3,85
D	3	301-426	50,0	5,0	5,00
D	4	301-426	-30,0	3,5	4,00

Tabelle 1 Mikrofonpositionen in den Meßebenen A, B, C und D

2.1 Meßort A

Meßort A befand sich in der Nähe von Northeim, an der SFS Hannover - Göttingen, Richtungsgleis Göttingen, bei km 81,45. Entlang der gesamten westlichen Gleisseite befindet sich eine SSW mit einer Höhe von 2,0 m über SO und einem Abstand von 4,5 m zwischen Gleismitte und Vorderkante SSW. Dabei handelt es sich um eine Colberg-SSW, Typ DB-C-12, die aus Aluminium-Kassetten mit den Abmessungen 4500 × 500 × 121,5 mm besteht. Die Fotografie in Bild 1 vermittelt einen Eindruck von dieser Schallschutzwand und dem westlich davon liegenden Gelände. Auf der östlichen Seite der Gleise befindet sich keine SSW.

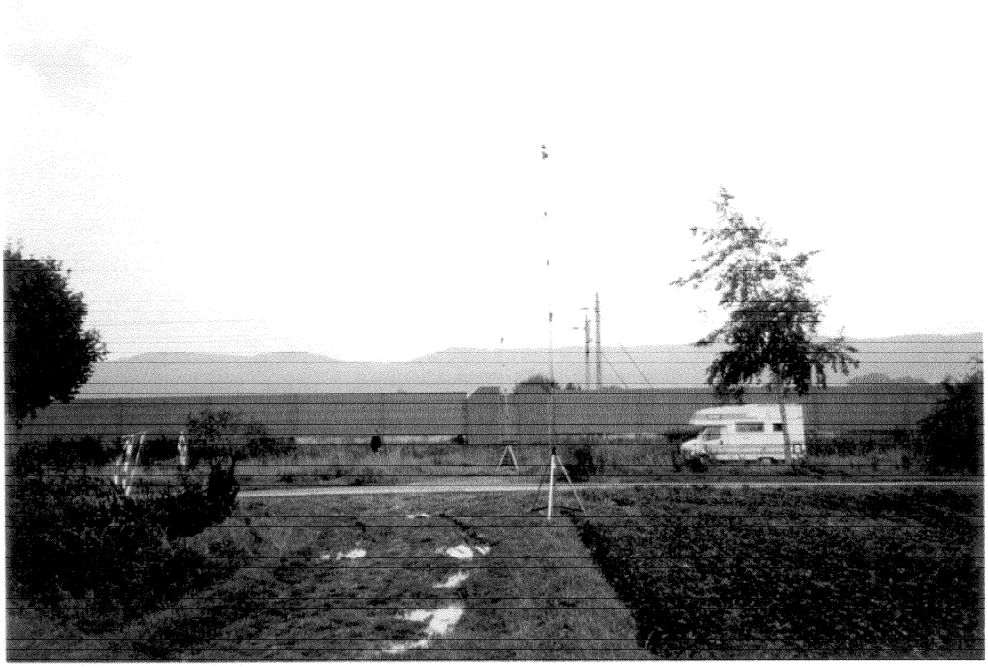


Bild 1 Schallschutzwand und Gelände am Meßort A

Das betrachtete Gleis besaß den bei SFS-Strecken üblichen Aufbau (Schienen UIC 60, elastische Zwischenlage Zw 678a, Betonschwellen in Schotterbettung). Etwa 300 m südlich der Meßebene befand sich eine Eisenbahnüberführung. Das Gelände zu beiden Seiten der Gleise war eben. Die Bodenbeschaffenheiten waren kurzgemähte Wiese an Mikrofon 2, höheres Gras an Mikrofon 1 und 4 sowie ein Rübenacker/Feldweg in der Umgebung von Mikrofon 3. In ca. 40 m Abstand von Gleismitte befanden sich auf der SSW-Seite einige ca. 2 bis 3 m hohe Büsche oder Bäume entlang eines zur Gleisanlage parallel verlaufenden Wirtschaftsweges. Diese Buschreihe war direkt am Meß-

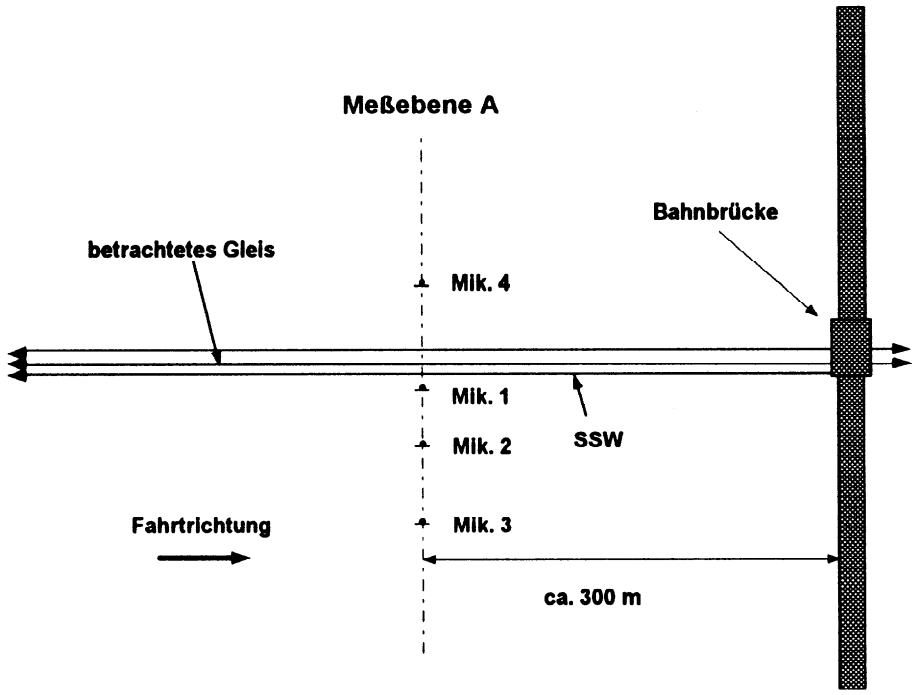


Bild 2 Draufsicht auf die Umgebung der Meßebene A

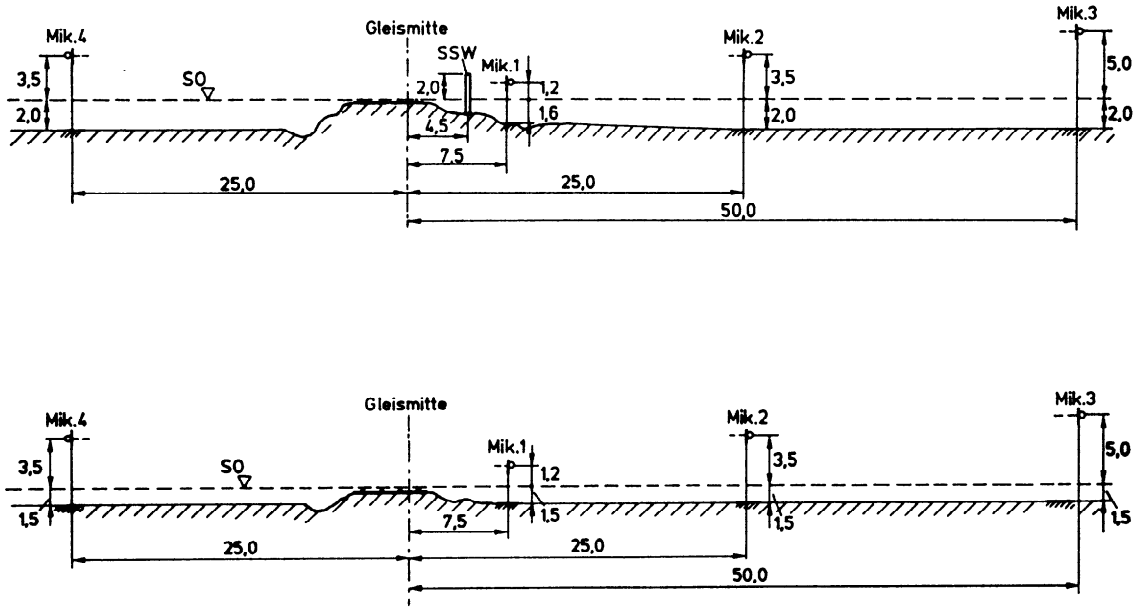


Bild 3 Skizze der Meßebene A (oben) und der Meßebene B (unten)

ort auf einer Länge von ca. 50 m unterbrochen, so daß auch für Mikrofon 3 von einer relativ ungestörten Schallausbreitung ausgegangen werden kann. Bild 2 zeigt eine Draufsicht auf die Umgebung der Meßebene A. Die Mikrofonpositionen (siehe auch Tabelle 1) und das Geländerelief sind der oberen Skizze von Bild 3 zu entnehmen.

2.2 Meßort B

Meßort B lag ebenfalls in der Nähe von Northeim, an der SFS Hannover - Göttingen, Richtungsgleis Göttingen, bei km 82,8, also ca. 1,35 km von Meßebene A entfernt in einer leichten Rechtskurve mit einem Radius größer als 5100 m. Zu beiden Seiten der Strecke befinden sich in relevanter Entfernung keinerlei Hindernisse. Der Bodenbewuchs bestand aus kurzgeschnittener Wiese bzw. Ackerland, so daß von einer freien Schallausbreitung ausgegangen werden kann. Das Gleis bestand wieder aus Schienen UIC 60 mit Betonschwellen im Schotter. Wie erst nach der Messung bekannt wurde [5], sind an dieser Stelle jedoch die konventionellen elastischen Zwischenlagen Zw 678a durch die etwas weicheren Pads Zw 700 ausgetauscht worden. Tabelle 2 führt die Typen der eingebauten Zwischenlagen in der Nähe von Meßort B auf. Die dortigen Mikrofonpositionen sind aus Tabelle 1 und dem unteren Teil von Bild 3 zu entnehmen.

Anfang, km	Ende, km	Zwischenlage	Bemerkung
82,327	82,505	Zw 700	-
82,505	82,555	Zw 900	-
82,555	83,118	Zw 700	Meßort B

Tabelle 2 Typen und Verteilung der elastischen Zwischenlagen im Bereich des Meßorts B

2.3 Meßort C

In Niederrodenbach an der Ausbaustrecke Hanau - Fulda, Richtungsgleis Fulda, befindet sich bei km 31,1 südlich der Gleise eine SSW mit einer Höhe von 2,0 m über SO und einem Abstand von 3,6 m zwischen Gleismitte und Vorderkante SSW. Die

SSW besteht aus Beton-Wandelementen der Firma FCN mit den Abmessungen 3300 × 900 × 220 mm mit einer Vorsatzschale aus schallabsorbierendem haufwerksporigem Beton. Die Meßebene befand sich zwischen einer Straßenüberführung bei ca. km 31,0 und dem Ende der SSW bei ca. km 31,2. In Bild 4 ist eine Fotografie vom Meßort C mit SSW und südlichem Gelände wiedergegeben. Die Skizze in Bild 5 zeigt eine Draufsicht auf die Umgebung der Meßebene C. Die Mikrofonpositionen sind Tabelle 1 zu entnehmen. Der obere Teil von Bild 6 zeigt zusätzlich das Geländerelief in Meßebene C. Das Meßgleis umfaßte die Komponenten wie bei Meßort A, nämlich Schienen UIC 60, Zwischenlage Zw 678a, Betonschwellen und Schotteroberbau.



Bild 4 Schallschutzwand und Gelände am Meßort C

Im Bereich des Meßorts C sind drei Parallelgleise verlegt. Abweichend von den vorgesehenen Mikrofonabständen mußte das Referenzmikrofon (Mikrofon 4) in -30 m statt -25 m aufgestellt werden, um direkt mit dem Referenzmikrofon am Meßort D vergleichbar zu sein. Die Bodenbeschaffenheit in unmittelbarer Nähe der Einzelmikrofone war hohes Gras bzw. Büsche bei Mikrofon 1, gepflügter Ackerboden bei Mikrofon 2 und kurzgemähte Wiese bei den Mikrofonen 3 und 4. Die nächstgelegenen Häuser befanden sich in einem Abstand von ca. 500 m hinter der SSW auf der südlichen Seite der Gleise.

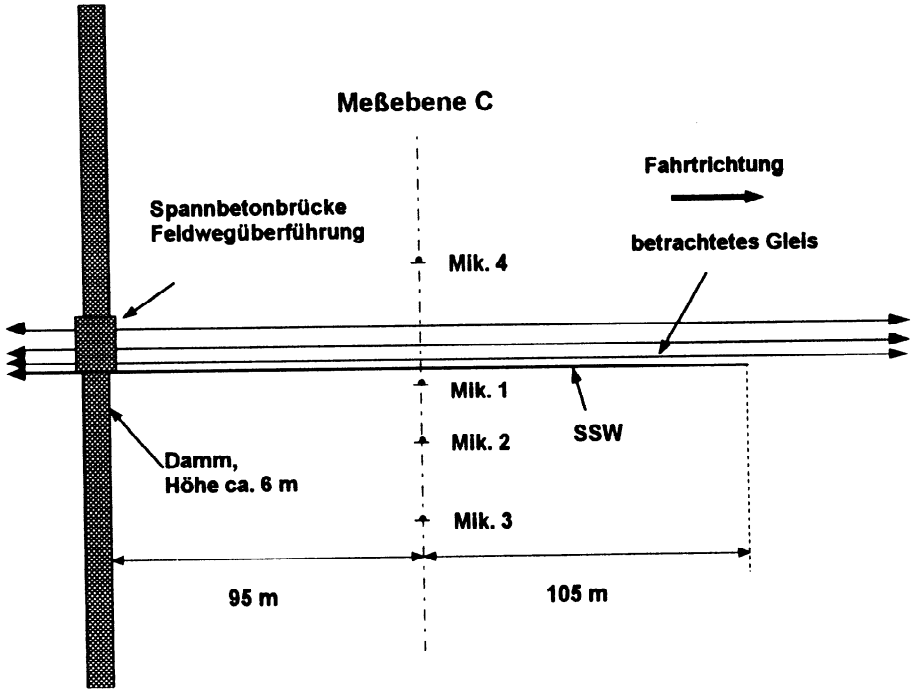


Bild 5 Draufsicht auf die Umgebung der Meßebene C

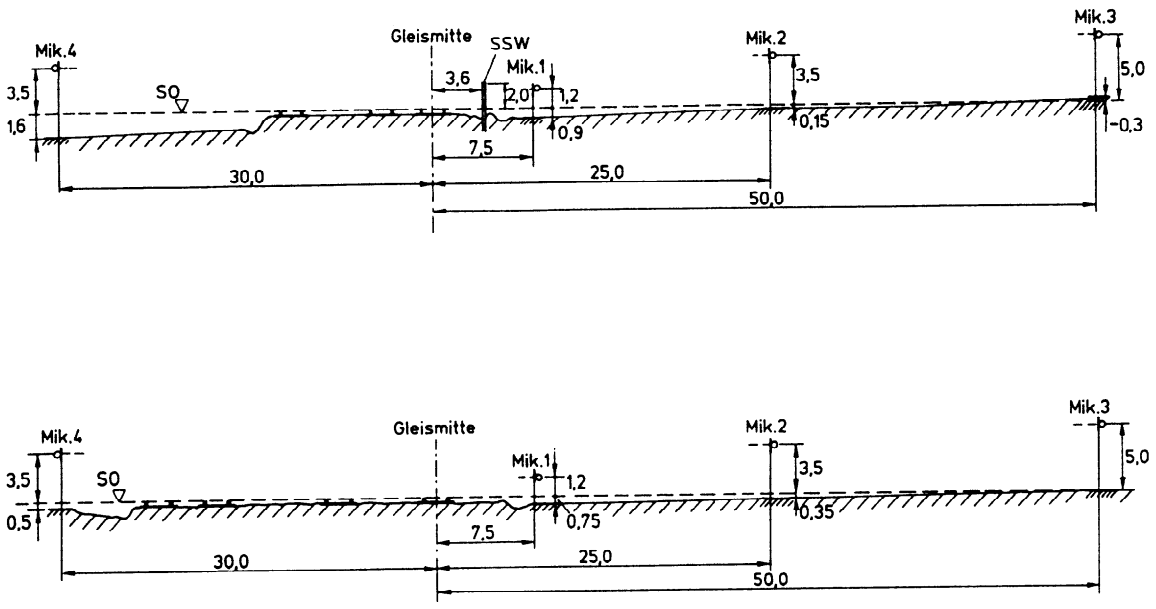


Bild 6 Skizze der Meßebene C (oben) und der Meßebene D (unten)

2.4 Meßort D

Meßort D lag ca. 300 m hinter dem Bahnhof Langenselbold an der Ausbaustrecke Hanau - Fulda, Richtungsgleis Fulda, bei km 34,1 und damit 3,0 km von Ebene C entfernt. Die Gleisbauart war identisch mit derjenigen von Meßort C. Abweichend von den vorgesehenen Mikrofonabständen mußte das Referenzmikrofon in -30 m statt -25 m aufgestellt werden, da es sonst auf dem vierten Parallelgleis gestanden hätte. Die Mikrofone 1, 2 und 4 befanden sich über mittelhohem Gras. Mikrofon 3 mußte ca. 2 m neben einer Straße aufgestellt werden. Dort stand das Mikrofon zwischen ca. 2 bis 5 m hohen Bäumen und Sträuchern. In etwa 70 m Entfernung zu beiden Seiten des Meßgleises begann ein Laubwald mit einer Baumhöhe von ca. 10 bis 15 m. Die Mikrofonpositionen sind Tabelle 1 und dem unteren Teil von Bild 6 zu entnehmen; gleichzeitig zeigt dieses Teilbild das Relief der Meßebene D.

2.5 Zustand der Schienenoberflächen

Als ein wichtiger Parameter zur Beschreibung der akustischen Qualität des Gleises wurde die Oberflächenrauhigkeit der Schienen im Bereich der Meßebenen an jeweils 10 stochastisch verteilten Stellen pro Schiene jeweils über eine Länge von 1,2 m ermittelt. Im Auftrag von akustik-data hat die DB AG, Zentralbereich Basistechnologien, ZBT 4, die Streckenabschnitte bei A und B am 10.09.1996 und die Abschnitte bei C und D am 11.09.1996 vermessen. Aus dem Meßbericht 50760 [6] sind die mittleren Rauhigkeits-Terzspektren der Schienen $R_r(\lambda_r)$ in Bild 7 und 8 wiedergegeben.

Dargestellt wird in diesen Bildern allerdings nur der Wellenlängenbereich von 1,6 bis 10 cm, der sich für das Rollgeräusch als relevant erwiesen hat, während in [6] noch Rauhigkeiten bis hinab zu Wellenlängen von 0,125 cm angegeben werden. Diese Beschränkung ist auch dadurch gerechtfertigt, daß die Rauhigkeitspegel der Schienenoberflächen bei sehr kurzen Wellenlängen klein gegen die Pegel im hier betrachteten Bereich sind, so daß die kurzwellige Rauhigkeit keinen wesentlichen Beitrag zum Summenpegel der Rauhigkeit liefert.

Die gemessenen Rauhigkeitspegel bei den Meßebenen A und B unterscheiden sich in einzelnen Terzen um bis zu 6 dB und im Summenpegel im Wellenlängenbereich von 1,6 bis 10 cm um etwa 3 dB. Bei den Meßebenen C und D ist das Rauhigkeitsniveau

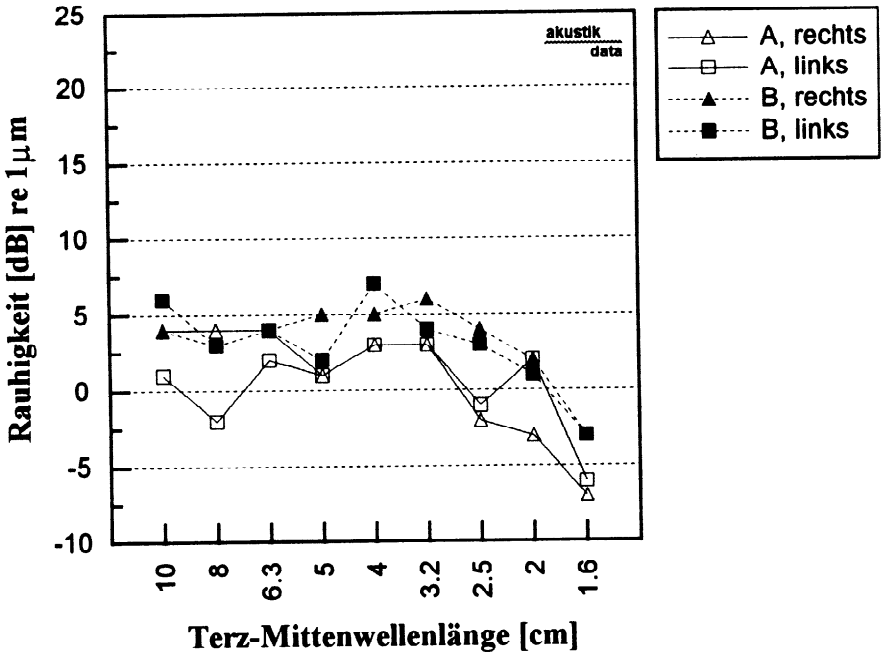


Bild 7 Mittlere Schienenrauhigkeits-Terzspektren $R_r(\lambda_r)$ im Bereich der Meßebenen A und B bei ungeschliffenen Schienen

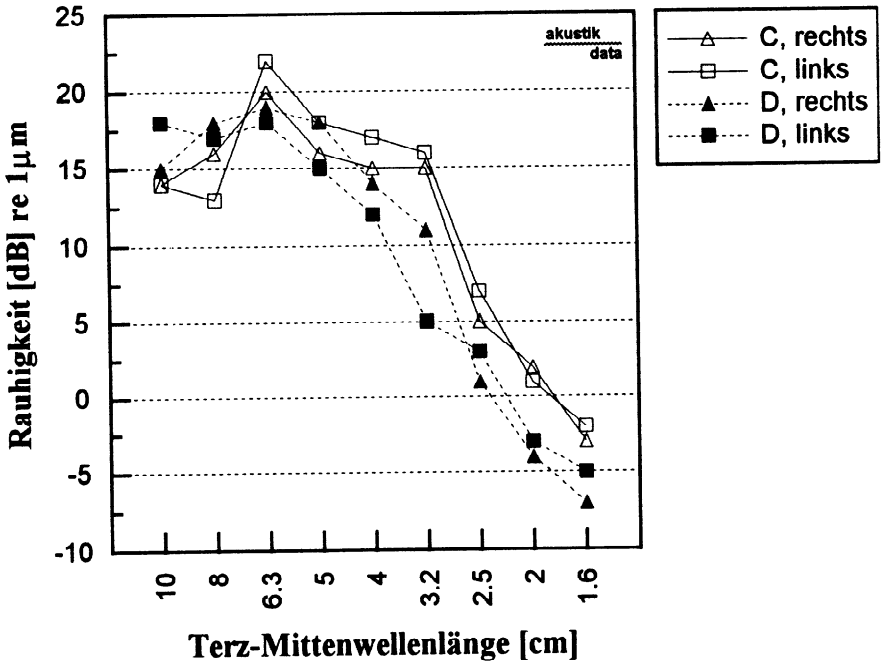


Bild 8 Mittlere Schienenrauhigkeits-Terzspektren $R_r(\lambda_r)$ im Bereich der Meßebenen C und D bei ungeschliffenen Schienen

deutlich höher. Auch die Unterschiede bezüglich der beiden Meßebenen sind für einzelne Terzen größer; so ist beispielsweise die Oberflächenrauhigkeit der linken Schiene am Meßort C in der Terz mit der Mittenwellenlänge 3,15 cm um 11 dB größer als am Meßort D.

Die in Tabelle 3 aufgelisteten Werte sind die Summenpegel der Rauhigkeitsamplituden im akustisch relevanten Wellenlängenbereich von 1,6 bis 10 cm, die sich aus der Mittelung über jeweils zehn Stichprobenabschnitte je Meßort ergaben. Die Schienenseite bezieht sich auf die Fahrtrichtung des Zuges; die rechte Schiene war jeweils diejenige, an deren Seite sich die SSW befand. Erwartungsgemäß sind die Angaben in [6] für die Summenpegel im Wellenlängenbereich von 0,125 bis 10 cm nur unwesentlich größer.

Meßebene, Schienenseite	Schienenrauhigkeit $1{,}6\ \text{cm} \le \lambda_r \le 10\ \text{cm}$ [dB]	Schienenrauhigkeit $1{,}6\ \text{cm} \le \lambda_r \le 10\ \text{cm}$ Mittelwerte [1] [dB]
A, rechte Schiene	11,9	11,2
A, linke Schiene	10,4	
B, rechte Schiene	13,3	13,2
B, linke Schiene	13,1	
C, rechte Schiene	24,4	25,0
C, linke Schiene	25,5	
D, rechte Schiene	24,4	24,0
D, linke Schiene	23,6	

[1] Energetischer Mittelwert der Rauhigkeitspegel von rechter und linker Schiene

Tabelle 3 Summenpegel der Schienenrauhigkeit im Bereich der Meßebenen A, B, C und D bei ungeschliffenen Schienen

Aus Tabelle 3 ist ersichtlich, daß die Schienen an den Meßorten C und D im Mittel etwa 12 dB rauher sind als an den Meßorten A und B. Ein Vergleich der Meßorte OS und MS zeigt, daß auch hier Unterschiede in der Rauhigkeit vorliegen. So ist die Schienenrauhigkeit bei B (ohne SSW) um ca. 2 dB höher als am Meßort A (mit

SSW). Im Vergleich der Meßorte C und D ist dieser Unterschied mit ca. 1 dB weniger ausgeprägt. Hier ist die Schienenrauhigkeit bei C (mit SSW) etwas höher als am dazugehörigen Meßort D (ohne SSW).

3. Durchführung der Messungen

Die Messungen wurden in der Zeit vom 25. bis 28.09.1996 in Northeim und vom 30.09. bis 01.10.1996 in Rodenbach/Langenselbold durchgeführt. Sie fanden bei dem vorgefundenen, in Abschnitt 2.5 dokumentierten Schienenzustand statt.

3.1 Umgebungs- und Wetterbedingungen

Die Messungen an den Orten A und B fanden bei trockenem Wetter und Windgeschwindigkeiten unter 3 m/s aus westlichen bis südwestlichen Richtungen statt. Die Windrichtung lag nicht im Mitwindsektor. Die Messungen bei A wurden gelegentlich durch landwirtschaftliche Fahrzeuge gestört, was sich besonders an dem Mikrofon 3 in 50 m Entfernung bemerkbar machte. In diesen Fällen wurden die Messungen abgebrochen bzw. ein entsprechender Kommentar im Meßprotokoll vermerkt. Bei Zugfahrten auf dem Gegengleis oder der nicht weit entfernt verlaufenden alten Strecke Hannover - Göttingen wurde ebenso verfahren.

Die Messungen bei C und D fanden bei schwachem Wind aus westlicher Richtung statt. Von einer Mitwindsituation kann wegen der geringen Windgeschwindigkeiten aber noch nicht gesprochen werden. Ab 12:30 Uhr am 01.10.1996 (d. h. ab Fahrt Nr. 412) setzte leichter Regen ein, weshalb die Messungen zeitweise unterbrochen werden mußten, um die Mikrofone zwischenzeitlich mit einem Regenschutz abzudecken.

Die Messungen an den Orten C und D waren durch folgende Besonderheiten geprägt: Bei C erstreckte sich die SSW nicht über den gesamten akustisch relevanten Streckenabschnitt, so daß zumindest für das Mikrofon 3 in 50 m von Gleismitte damit gerechnet werden muß, daß zu geringe Einfügungsdämpfungen gemessen werden. Bei D mußte das Mikrofon 3 in unmittelbarer Nähe einer Straße aufgestellt werden, so daß dort mit einer Störwirkung durch vorbeifahrende Fahrzeuge zu rechnen ist.

3.2 Zugmaterial

Im Rahmen der Meßserie 1 wurden insgesamt an den vier Meßebenen 254 Zugvorbeifahrten aufgezeichnet. Von diesen 127 Zugpaaren an OS und MS mußten 15 wegen offensichtlicher Störungen wie Zugbegegnungen oder ähnlichem gestrichen werden, so daß 112 Zugvorbeifahrten, davon 71 ICE-Regelzüge, ausgewertet werden konnten. Aufgrund von Störungen bei der Messung, die erst bei der Auswertung zu Tage traten, oder Zuggeschwindigkeiten, die keiner Meßklasse zuzuordnen waren, wurden einige Zugvorbeifahrten nicht berücksichtigt, so daß die Ergebnisse von 108 Vorbeifahrten verwendet werden konnten. In Tabelle A1 und A2 im Berichtsanhang sind diese Fahrten mit Nummer, Zugart, Geschwindigkeit sowie Lok- und Wagenbauart zusammengestellt. Außerdem gibt Tabelle 4 einen Überblick über die Anzahl *N* der ausgewerteten Vorbeifahrten für jede Zugart und Geschwindigkeitsklasse.

Zugart	Geschw. [km/h]	Meßebene A/B	Meßebene C/D	Summe Zeilen
ICE 1	200	15	18	33
ICE 1	250	8	0	8
ICE 1	280	21	0	21
ICE 2	200	0	4	4
IC, EC, IR	150-199	1	9	10
RE	113-140	0	4	4
G	87-119	21	7	28
Summe Spalten	-	66	42	**108**

Tabelle 4 Anzahl *N* der ausgewerteten Vorbeifahrten für jede Datenklasse der Meßserie 1 bei ungeschliffenen Schienen

3.2.1 ICE-Radunrundheiten

Die im BW Eidelstedt am 01. und 02.10.1996 von der DB AG gewarteten ICE-Züge wiesen eine Unrundheit der Räder im Bereich von 0,0 bis 0,5 mm auf. Die Unrundheit ist definiert als die Abweichung des Radius der Radlauffläche in der Meß-

kreisebene 70 relativ zur Achsmitte. Aus früheren Untersuchungen [7] ist bekannt, daß bereits geringe Radunrundheiten oberhalb von ca. 0,1 mm signifikante Auswirkungen auf das Rollgeräuschniveau von ICE-Regelzügen haben. Eine genaue Analyse dieses Zusammenhangs ist jedoch im Rahmen des vorliegenden Berichts nicht erfolgt.

3.2.2 ICE-Radschallabsorber

Am Ende der Meßserie 1 wurde außerdem versucht, die aktuelle Rad/Absorber-Konfiguration aller ICE-Regelzüge zu erfassen, die am 01. und 02.10.1996 im BW Eidelstedt gewartet worden sind. Es wurden 30 Züge in Augenschein genommen und folgende Radbauarten bei den Mittelwagen vorgefunden:

- Räder Ba 14 mit VSG-Absorbern, bestehend aus 12 einzelnen Absorberpaketen aus Stahl mit schwingfähigen Zungen unterschiedlicher Dicke und einer dazwischenliegenden Dämpfungsmasse;

- Räder Ba 14 mit GHH-Absorbern, bestehend aus acht Kreissegmentscheiben auf der Radinnenseite am Innenradius des Radkranzes;

- gummigefederte Einringräder Bo 84, hier sind Radkranz und Radscheibe durch Gummielemente getrennt.

Die Räder der ICE-Mittelwagen waren entweder mit gummigefederten Einringrädern oder Rädern mit Absorbern ausgestattet, wobei letztere etwa an 36 % der Achsen angetroffen wurden. 1.-Klasse-Wagen waren überwiegend mit gummigefederten Rädern bestückt. Die Rad/Absorber-Konfiguration der Züge, deren Schallabstrahlung gemessen wurde und bei denen diese Konfigurationen erfaßt werden konnten, sind im Anhang dieses Berichts bei einigen Bildern graphisch mitdargestellt. Auswertungen in bezug auf mögliche Unterschiede bei der Schallemission verschiedener Radbauarten wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt.

3.2.3 ICE-Lüftereinstellung

Um den Einfluß der Lüfter in den ICE-Triebköpfen auf die Schallemission zu untersuchen, wurde mit der DB AG vereinbart, daß am 25.09.1996 sechs ICE-Regelzüge

mit maximaler Leistung der Ölkühler- und Fahrmotorlüfter an den Meßorten A und B vorbeifahren sollten. Andererseits ist es laut Auskunft der DB AG nicht möglich, diese Lüfter im Regelbetrieb vollständig abzuschalten. Darüber, bei welchen Leistungsstufen die übrigen ICE-Regelzüge die Meßebenen passiert haben, liegen uns keine Informationen vor. Von den sechs Zügen mit definierter Lüfterleistung konnten zwei nicht identifiziert und zwei weitere konnten wegen Störungen nicht ausgewertet werden. Bei den beiden brauchbaren Vorbeifahrten wurde am gleisnahen Mikrofon 1 in beiden Meßebenen ein um ca. 0,5 dB(A) (Fahrt 010) bzw. 1 dB(A) (Fahrt 024) höherer Vorbeifahrpegel gegenüber dem mittleren Schalldruckpegel der jeweiligen Klasse gemessen. Aufgrund des kleinen Stichprobenumfangs und der Tatsache, daß die Einstellungen der Lüfter bei den übrigen Vorbeifahrten nicht definiert sind, können keine Aussagen über den Zusammenhang zwischen Lüftergeräusch und Einfügungsdämpfung der SSW gemacht werden.

3.2.4 Radrauhigkeiten

Messungen der Rauhigkeiten $R_w(\lambda_w)$ auf den Radlaufflächen wurden im Rahmen dieser Untersuchung nicht vorgenommen. Erkenntnisse über mittlere Radrauhigkeiten deutscher Personen- und Güterzüge liegen nicht vor, so daß diesbezüglich auf Werte von niederländischem Zugmaterial [8] zurückgegriffen werden mußte. Näheres hierzu findet man in Abschnitt 4.4.2.

3.3 Meßgeräte

Die Signale der vier Einzelmikrofone je Meßebene wurden vor Ort digital auf ein mehrkanaliges Datenerfassungssystem aufgezeichnet. Außerdem wurde an jedem Meßort das Signal einer Lichtschranke abgespeichert, mit dessen Hilfe die Geschwindigkeit der Züge bestimmt und eine Zuordnung von Zugposition und Schalldrucksignal hergestellt wird. Die Lichtschranke war in der jeweiligen Meßebene an der vorderen Schiene montiert. Die aufgezeichneten Signale werden mit Hilfe mehrerer von akustik-data geschriebener Programme ausgewertet und dargestellt.

Mikrofone: acht 1/2"-Freifeldkapseln, B&K Typ 4191 mit Vorverstärker, B&K Typ 2619; zur Unterdrückung des Windgeräuschs wurden die Mikrofone mit Windschirmen, B&K Typ UA 0237

versehen; von den acht verwendeten Mikrofonen wurden jeweils vier in den Meßebenen A und B bzw. C und D eingesetzt;

Verstärker: 32-kanaliger Mikrofonverstärker Fa. L&P (Meßebenen A und C), vier Mikrofonverstärker B&K Typ 2610 bzw. 2636 (Meßebenen B und D);

Datenaufzeichnung: zwei PCs mit 486er Prozessor, jeweils bestückt mit zwei A/D-Wandlerkarten vom Typ RTI 860 der Fa. Analog Devices, Abtastfrequenz 25,0 kHz.

Die gesamten Meßketten von den jeweiligen Mikrofonen bis zur Aufzeichnung wurden zu Beginn und am Ende jedes Meßtages mit einem akustischen Kalibrator, B&K Typ 4230 kalibriert.

4. Auswertung der Daten

Die in Tabelle 4 aufgeführten Zugvorbeifahrten wurden wie folgt analysiert: Zunächst wurden die A-bewerteten Schalldruckpegel $L_A(t)$ über die Meßzeit von t_a bis t_e für die vier Mikrofonpositionen jeder Meßebene ausgewertet. Da die Messungen in den Ebenen OS und MS unabhängig voneinander gestartet und beendet wurden, sind die einzelnen Datensätze unterschiedlich lang. Um jedoch zu eindeutigen Ergebnissen zu kommen, sind für eine Zugvorbeifahrt die Auswertegrenzen t_a und t_e für beide Meßebenen gleich gewählt worden. Ausgehend von solchen Datensätzen wurden Einzahlwerte wie Vorbeifahr-, Ereignis- und Stunden-Mittelungspegel berechnet sowie der Maximalpegel ausgewiesen.

4.1 Vorbeifahr-, Ereignis- und Stunden-Mittelungspegel

Für den **Ereignispegel** L_e wird der Schalldruckpegel $L_A(t)$ über die Meßzeit von t_a bis t_e energetisch gemittelt, wobei die Auswertegrenzen so festgelegt wurden, daß ein möglichst großer Zeitbereich erfaßt wird, aber das Signal an den Grenzen noch mindestens 5 dB über dem Hintergrundgeräusch liegt. An diesen Auswertegrenzen lagen die Pegel in der Regel mindestens 10 dB unterhalb des Maximalpegels.

Den **Stunden-Mittelungspegel** L_h erhält man aus L_e durch eine Normierung der Mittelungszeit auf eine Stunde:

$$L_h = L_e + 10 \lg ((t_e - t_a) / 3600) \quad \text{dB(A)}. \tag{1}$$

Die Mittelungszeit für den **Vorbeifahrpegel** L_v wird durch die Zeitpunkte t_1 und t_2 bestimmt, bei denen die Fahrzeugspitze bzw. das Fahrzeugende die Lotrechte zwischen Gleis und Immissionsort passiert.

Die Zugvorbeifahrten werden nach Zugart, Meßort und Geschwindigkeitsbereich klassifiziert, wobei keine Geschwindigkeitskorrektur der Pegel L_v, L_e und L_h durchgeführt wird. Für jede Datenklasse werden die Mittelwerte der oben definierten Einzahlwerte später in Tabellenform aufgelistet. Außerdem wurden für jede Vorbeifahrt die Pegelverläufe von t_a bis t_e ausgedruckt, wobei die Kurvendarstellung mit der Zeitbewertung "Fast" erfolgte. Im Anhang dieses Berichts werden solche Pegelverläufe beispielhaft gezeigt. Als Abszisse dient dabei die Fahrzeugkoordinate $x = v \cdot t$ mit der Zugspitze als Koordinatenursprung. Die des weiteren im Berichtsanhang dargestellten Spektren sind bei allen Meßorten Mittelwerte über die Zuglänge in den Grenzen von t_1 bis t_2.

Im Falle der Vorbeifahrten am Meßort C mit SSW muß berücksichtigt werden, daß die SSW in einer Entfernung von ca. 105 m nach der Meßebene endet (siehe Bild 5). Gegen Ende einer Zugvorbeifahrt würden die Pegel somit höher ausfallen als bei einer unendlich ausgedehnten SSW. Um diesen Fehler möglichst klein zu halten, wurde in Absprache mit dem Auftraggeber entschieden, die Zeitsignale der Mikrofone 1, 2 und 3 dieser Meßebene bei der Berechnung von Pegeln nur über die erste Hälfte der Zugvorbeifahrt auszuwerten. Die Auswertung endet somit zum Zeitpunkt t_M, an dem die Zugmitte die Meßebene C passiert, während sie weiterhin bei t_a (für L_e und L_h) bzw. t_1 (für L_v) beginnt. Hierdurch nehmen beispielsweise die Stunden-Mittelungspegel bis zu 3 dB(A) geringere Werte an als bei einer Auswertung über die gesamte Zuglänge, was auf die Notwendigkeit dieser Korrektur hinweist. Es ist nicht zu befürchten, daß hierbei wiederum ein Fehler entsteht. Dies wäre der Fall bei einer unsymmetrischen Schallquellenverteilung bezogen auf die Zuglänge. Aufgrund der extrem hohen Schienenrauhigkeit am Meßort C (siehe Abschnitt 2.5) ist die Schallquellenverteilung für alle Zugarten aber weitgehend symmetrisch, da praktisch nur das Rollgeräusch die Gesamtemission bestimmt.

Die mit den Mikrofonen 1 aufgezeichneten ICE 1-Vorbeifahrten mit 200, 250 und 280 km/h an den Meßorten A und B müssen in getrennten Klassen ausgewertet werden, und zwar jeweils für die Fahrten 001 bis 033 bzw. 201 bis 223. Die Ursache liegt in den unterschiedlichen Höhen über SO der Mikrofone 1 (siehe Tabelle 1), da eine Höhe von 1,2 m über SO aus technischen Gründen erst am zweiten Meßtag realisiert werden konnte. Ebenso mußten die Fahrten 001 bis 033 am ersten Meßtag noch mit unterschiedlichen Entfernungen von Gleismitte zwischen den Meßebenen A und B aufgezeichnet werden. Zur Korrektur werden deshalb alle Ergebnisse des Mikrofons 1 der Meßebene B an die Meßebene A angepaßt, d. h. daß alle Pegel um 10 lg (7,5 m/6,9 m) = 0,4 dB(A) verringert werden bei Annahme einer Linienquelle. Bei den Güterzug-Vorbeifahrten 101 bis 121 lagen hingegen einheitliche Mikrofonpositionen vor (siehe Tabelle 1), so daß sie eine geschlossene Klasse bilden.

Waren aus den Kommentaren im Protokoll oder aufgrund der Auswertung relevante Störungen an einem einzelnen Mikrofon zu erkennen, wurde dieses und der dazugehörige Kanal in der anderen Meßebene (MS bzw. OS) nicht in das Meßwertkollektiv aufgenommen, um bei der Berechnung der mittleren Wandwirkung die gleiche Anzahl an Vorbeifahrereignissen an den Orten mit und ohne SSW zu haben. Durch die Herausnahme von einzelnen Mikrofonen einer Vorbeifahrt kann es dazu kommen, daß nicht für alle Mikrofone die mittleren Zuggeschwindigkeiten und Zuglängen einer Datenklasse identisch sind. Ausgeschlossen von der Auswertung wurde Mikrofon 3 bei den Fahrten 016, 402 und 404, sowie Mikrofon 1 bei Fahrt 204.

4.2 Ermittlung der Zuggeschwindigkeiten und -längen

Die in jeder Meßebene montierten Lichtschranken liefern Zeitsignale, bei denen jede Durchfahrt eines Rades durch einen Rechteckimpuls gekennzeichnet ist. Aus der Zeitdifferenz dieser Pulse und dem bekannten Abstand der dazugehörigen Achsen läßt sich die Zuggeschwindigkeit sehr genau bestimmen. Die Zuglänge ergibt sich bei Personenzügen aus der Wagenanzahl und bei Güterzügen aus der Zeitspanne zwischen erster und letzter detektierter Achse zuzüglich einer Länge von 6,0 m, die den Abstand der vorderen und hinteren Puffer zur ersten bzw. letzten Achse berücksichtigt. Bei ICE-, IC-, EC-, IR- und RE-Zügen diente eine bestimmte Anzahl von Wagen und bei Güterzügen die Achsgeometrie der Lokomotive zur Geschwindigkeitsbestimmung. Aus diesem Grunde mußte die Baureihe dieser Lokomotiven bei den Messungen zwei-

felsfrei erkannt werden (siehe Tabelle A1 und A2). Aus diesen Tabellen sind ebenfalls die so bestimmten Zuggeschwindigkeiten in den beiden Meßebenen (MS bzw. OS) für die ausgewerteten Vorbeifahrten ersichtlich. Man erkennt daraus obendrein, daß die Geschwindigkeit desselben Zuges bei Durchfahrt durch die beiden Meßebenen im allg. nur wenig verschieden war, so daß die gemessenen Schalldruckpegel zum Vergleich der Meßebenen A/B bzw. C/D keiner Geschwindigkeitskorrektur bedürfen.

4.3 Örtlicher spezifischer Grundwert

Neben dem Ereignis-, Stunden-Mittelungs- und Vorbeifahrpegel wird hier noch eine weitere Größe eingeführt, nämlich der sogenannte "örtliche spezifische Grundwert" $L_{m,s}$, welcher unabhängig von Zugart, -länge und -geschwindigkeit den schalltechnischen Zustand des Gleises beschreibt und direkt mit dem Grundwert nach Schall 03 verglichen werden kann. Er wird aus dem gemessenen Stunden-Mittelungspegel L_h gebildet und wie folgt normiert:

$$L_{m,s} = L_h - (D_{Fz} + D_D + D_{Fb} + D_v + D_l) \quad \text{dB(A)}, \tag{2}$$

D_{Fz}	=-4 dB(A)	für ICE aufgrund der Radschallabsorber,
	= 0 dB(A)	für alle anderen gemessenen Züge,
D_D	= 0 dB(A)	für ICE (100% scheibengebremst),
	= 1 dB(A)	für IC, EC und IR (Wagen scheibengebremst, Lok klotzgebremst),
	= 7 dB(A)	für G und RE (100% klotzgebremst),
D_{Fb}	= 2 dB(A)	für Betonschwellen (alle Meßorte),
D_v	= 20 lg (v/100 km/h) dB(A)	Geschwindigkeitsnormierung auf v = 100 km/h,
D_l	= 10 lg (l/100 m) dB(A)	Zuglängennormierung auf l = 100 m.

Typische Zahlenwerte für $L_{m,s}$ in 25 m Entfernung von Gleismitte ohne SSW liegen bei Rechnung nach (2) bei ca. 48 dB(A) für einen sehr guten und ca. 51 dB(A) für einen durchschnittlich guten Zustand der Schienenoberflächen. Bei vorhandener SSW reduziert sich dieser Wert durch die Einfügungsdämpfung. Die begriffliche Abgrenzung zum Grundwert der Schall 03 wurde gewählt, weil für alle Mikrofonpositionen spezifische Grundwerte angegeben werden, wohingegen der Grundwert nach Schall 03 lediglich die Immission in 25 m von Gleismitte und 3,5 m Höhe über SO beschreibt.

4.4 Berechnung der SSW-Abschirmwirkung

Zur Berechnung der Wandwirkung werden die Pegel an den Meßorten mit und ohne SSW bei Vorbeifahrt desselben Zuges verglichen. Da dabei an den Referenzmikrofonen 4 unterschiedliche Pegel gemessen wurden, ist offensichtlich, daß nicht lediglich die Pegeldifferenz gleicher Mikrofonpositionen für die Bestimmung der Wandwirkung angesetzt werden kann, sondern diese noch aufgrund des vorhandenen unterschiedlichen Gleiszustands korrigiert werden muß. Hierbei muß gegebenenfalls auch die nicht identische Rauhigkeit der rechten und linken Schiene miteinbezogen werden.

4.4.1 Berücksichtigung unterschiedlicher Gleiszustände zwischen zwei Meßorten

Zur Berechnung der Einfügungsdämpfung ΔL_{SSW} einer Schallschutzwand werden im folgenden die örtlichen spezifischen Grundwerte, d. h. die normierten Stunden-Mittelungspegel herangezogen, die zuvor über alle Vorbeifahrten einer bestimmten Zugart in einem Geschwindigkeitsbereich gemittelt wurden. Die Bezeichnung $L_{m,s}$ wird auch für diese gemittelten Pegel beibehalten.

Zunächst muß nur die Differenz $(L_{m,s,OS,i} - L_{m,s,MS,i})$ gebildet werden. Dabei steht $L_{m,s,MS,i}$ für den Schalldruckpegel des Mikrofons i = 1 bis 3 in einer Meßebene mit SSW und $L_{m,s,OS,i}$ für den entsprechenden Pegel in der gleichen Meßebene, wenn die SSW nicht existieren würde. Da diese Forderung den Abbau der SSW bedingt, wird hilfsweise in einer zweiten Meßebene ohne SSW gemessen und die dort gewonnenen Pegel in Beziehung zur Ebene mit SSW gesetzt. Allerdings führt dabei die obige Pegeldifferenz nur dann zur korrekten Bestimmung von ΔL_{SSW}, wenn die akustischen Randbedingungen in beiden Meßebenen zumindest sehr ähnlich sind, was auch für die Gleiszustände in den Bereichen beider Ebenen gelten muß.

Die erste Forderung kann aufgrund der Auswahl der Meßorte A/B bzw. C/D als erfüllt angesehen werden. Bildet man jedoch die Differenz $(L_{m,s,OS,4} - L_{m,s,MS,4})$ der beiden Referenzmikrofone 4 (siehe Abschnitt 5.3), erhält man Werte deutlich ungleich Null. Daraus folgt, daß unterschiedliche Gleiszustände zwischen den beiden Meßebenen vorliegen, so daß die einfache Berechnung der Einfügungsdämpfung aus der Differenz $(L_{m,s,OS,i} - L_{m,s,MS,i})$ nicht möglich ist. Die Einfügungsdämpfung muß viel-

mehr mit einem Korrekturterm beaufschlagt werden. Angesetzt wird zunächst die Differenz der an den Referenzmikrofonen 4 gemessenen Pegel:

$$\Delta L_{SSW} = (L_{m,s,OS,i} - L_{m,s,MS,i}) - (L_{m,s,OS,4} - L_{m,s,MS,4}) \quad \text{dB(A)}. \qquad (3)$$

Gleichung (3) berechnet die Einfügungsdämpfung korrekt, wenn folgende weitere Voraussetzungen erfüllt sind: (a) Die SSW ist ausreichend absorbierend verkleidet, so daß es zu keiner nennenswerten Pegelerhöhung am Referenzmikrofon aufgrund von Reflexionen zwischen Fahrzeug und SSW kommt. (b) Die Ausbreitungsbedingungen am Meßort ohne SSW sind auf beiden Seiten des Gleises identisch. (c) Die Schallabstrahlung erfolgt symmetrisch zur Gleisachse.

Es wird davon ausgegangen, daß die hier untersuchten Schallschutzwände ausreichend absorbierend verkleidet sind, so daß mögliche Störeffekte durch zusätzliche Reflexion an der SSW nicht berücksichtigt werden müssen. Die Ausbreitungsbedingungen am Ort ohne SSW sind identisch, wenn man von der Existenz des Parallelgleises absieht. Da über die Höhe einer dadurch verursachten Zusatzdämpfung keine gesicherten Erkenntnisse vorliegen und dieser Einfluß in beiden Meßebenen in ähnlicher Weise auftritt und sich demnach bei der Differenzbildung nach Gleichung (3) herausrechnet, ist hierfür keine Korrektur notwendig. Meteorologische Einflüsse sind wegen der geringen Entfernungen und der geringen Windgeschwindigkeiten, die während der Messungen herrschten, zu vernachlässigen. Berücksichtigt werden muß hingegen die Tatsache, daß aufgrund der unterschiedlichen Rauhigkeiten von linker und rechter Schiene die Schallabstrahlung nicht symmetrisch zur Gleisachse ist. Dieser Effekt wird sich später in Abschnitt 5.3 bei einem Vergleich der Pegel von Mikrofonposition 2 und 4 an den Orten ohne SSW deutlich zeigen.

4.4.2 Berücksichtigung unterschiedlicher Rauhigkeiten zwischen rechter und linker Schiene

In Gleichung (3) wurde angenommen, daß der korrigierte Wert $L_{m,s,OS,i}$ - ($L_{m,s,OS,4}$ - $L_{m,s,MS,4}$) die nicht meßbare Schallimmission in der Meßebene MS bei Abwesenheit der SSW repräsentiert. Unterschiede in den Schienenrauhigkeiten sind in der Korrektur zwar enthalten, aber nur zwischen den beiden Meßebenen im allgemeinen, nicht jedoch zwischen den Rauhigkeiten der rechten und linken Schienen an beiden Meß-

orten. So ist eine zweite Korrektur notwendig, wobei auf die gemessenen Rauhigkeiten von Schienen und Rädern zurückgegriffen werden muß.

Seit langem ist der qualitative Zusammenhang zwischen den Oberflächenrauhigkeiten von Schienen und Rädern und dem abgestrahlten Rollgeräusch von Zügen bekannt. Bisherige theoretische Modelle setzen einen linearen Zusammenhang zwischen Rauhigkeit und Schallabstrahlung voraus, wobei die Gültigkeit dieser Annahme Gegenstand von neueren Untersuchungen ist. In [9] konnte diese Annahme bestätigt werden; des weiteren werden in dieser Arbeit Vorschläge zur Bestimmung des A-bewerteten Rollgeräuschs gemacht, wenn die Rauhigkeiten von Schiene und Rad bekannt sind. Als Approximation für die Transferfunktion zwischen abgestrahlter Schalleistung des Rollgeräuschs und der ungefilterten Rauhigkeit von Rad und Schiene wird die Gewichtungsfunktion $L_{AV}(f_a)$ gemäß Gleichung (4) angegeben:

$$L_{AV}(f_a) = L_A(f_a) + 20 \lg (\min [f_a/1000; 2{,}5]) \quad \text{dB(A)}, \tag{4}$$

wobei die Werte $L_A(f_a)$ die Pegel nach der A-Bewertungskurve sind und f_a die Anregefrequenz darstellt. Die Transferfunktion $L_{AV}(f_a)$ wurde in [9] mit dem Rechenprogramm TWINS für einen IC-Zug der Niederländischen Staatsbahn bei einer Geschwindigkeit von 160 km/h auf Schottergleisen berechnet. Ob diese Gewichtungsfunktion für andere Geschwindigkeitsbereiche und Rad/Gleis-Kombinationen anwendbar ist, muß nach [9] noch genauer untersucht werden. Da $L_{AV}(f_a)$ in erster Linie von den Geometrie- und Materialeigenschaften des Rad/Schiene-Systems abhängt, kann in erster Näherung angenommen werden, daß die Transferfunktion geschwindigkeitsunabhängig ist. Zudem interessieren nur die Differenzen der abgestrahlten Pegel zwischen rechter und linker Fahrzeugseite. Da sich die Rauhigkeitsspektren von rechter und linker Schiene im wesentlichen nur in ihrer Amplitude, jedoch nicht in ihrem Verlauf unterscheiden, ist bei der Verwendung von L_{AV} auch für andere Geschwindigkeiten als 160 km/h kein größerer Fehler zu erwarten.

Weil entsprechende Funktionen für ICE-, IC-, EC-, IR- und RE-Züge der DB AG nicht bekannt sind, wird $L_{AV}(f_a)$ nach Gleichung (4) hier auch zur Abschätzung des Rollgeräuschs dieser Zugarten verwendet. Es sei darauf hingewiesen, daß die Prognosesicherheit für die Berechnung des absoluten Rollgeräuschpegels bei bekannter Schienenrauhigkeit und Transferfunktion in [9] mit 2 bis 3 dB(A) angegeben wird.

Als zweite Einflußgröße wird im folgenden die Anregung betrachtet, d. h. die wirksame Rauhigkeit $R(\lambda)$. Nach [9] setzt sie sich zusammen aus Schienenrauhigkeit $R_r(\lambda_r)$ und Radrauhigkeit $R_w(\lambda_w)$, welche energetisch zu addieren sind. Mittlere Radrauhigkeiten von Zügen der DB AG sind nicht bekannt, so daß auf niederländische Ergebnisse zurückgegriffen werden mußte.

In Bild 9 sind die in [8] gemessenen Radrauhigkeitsspektren $R_w(\lambda_w)$ für Güter- und IC-Züge wiedergegeben. Die Rauhigkeiten der klotzgebremsten Güterzugräder sind in den einzelnen Terzen 5 bis 7 dB größer als die der scheibengebremsten Räder. Ein Vergleich mit den Rauhigkeitsspektren der Schienen (Bild 7 und 8) zeigt, daß die Rauhigkeiten von Rad und Schiene in der gleichen Größenordnung liegen und somit beide berücksichtigt werden müssen.

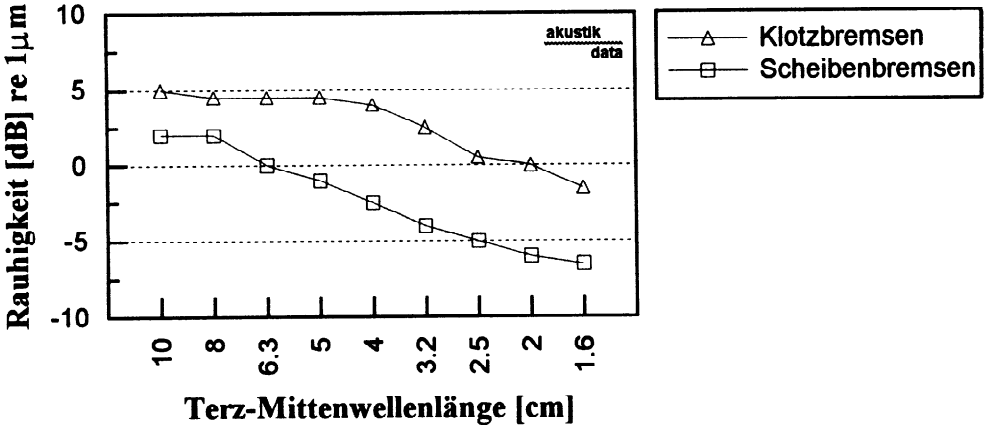


Bild 9 Mittlere Rauhigkeiten auf den Radlaufflächen von Güterzügen mit Klotzbremsen und niederländischen IC-Zügen mit Scheibenbremsen aus [8]

Die Anregespektren $R_r(\lambda_r)$ und $R_w(\lambda_w)$ werden als nächstes über der Frequenzachse aufgetragen. Die Umrechnung in $R_r(f_a, v)$ und $R_w(f_a, v)$ erfolgt gemäß Gleichung (5), wobei eine Geschwindigkeitsabhängigkeit wie folgt hinzukommt:

$$f_a = v / \lambda . \tag{5}$$

Als Beispiel hierfür ist das Anregespektrum $R_r(f_a, v)$, das sich aus der Oberflächenrauhigkeit der rechten Schiene am Meßort B ergibt, für vier Geschwindigkeiten in Bild 10 dargestellt. Die Transferfunktion $L_{AV}(f_a)$ nach (4) ist als dick durchgezogene

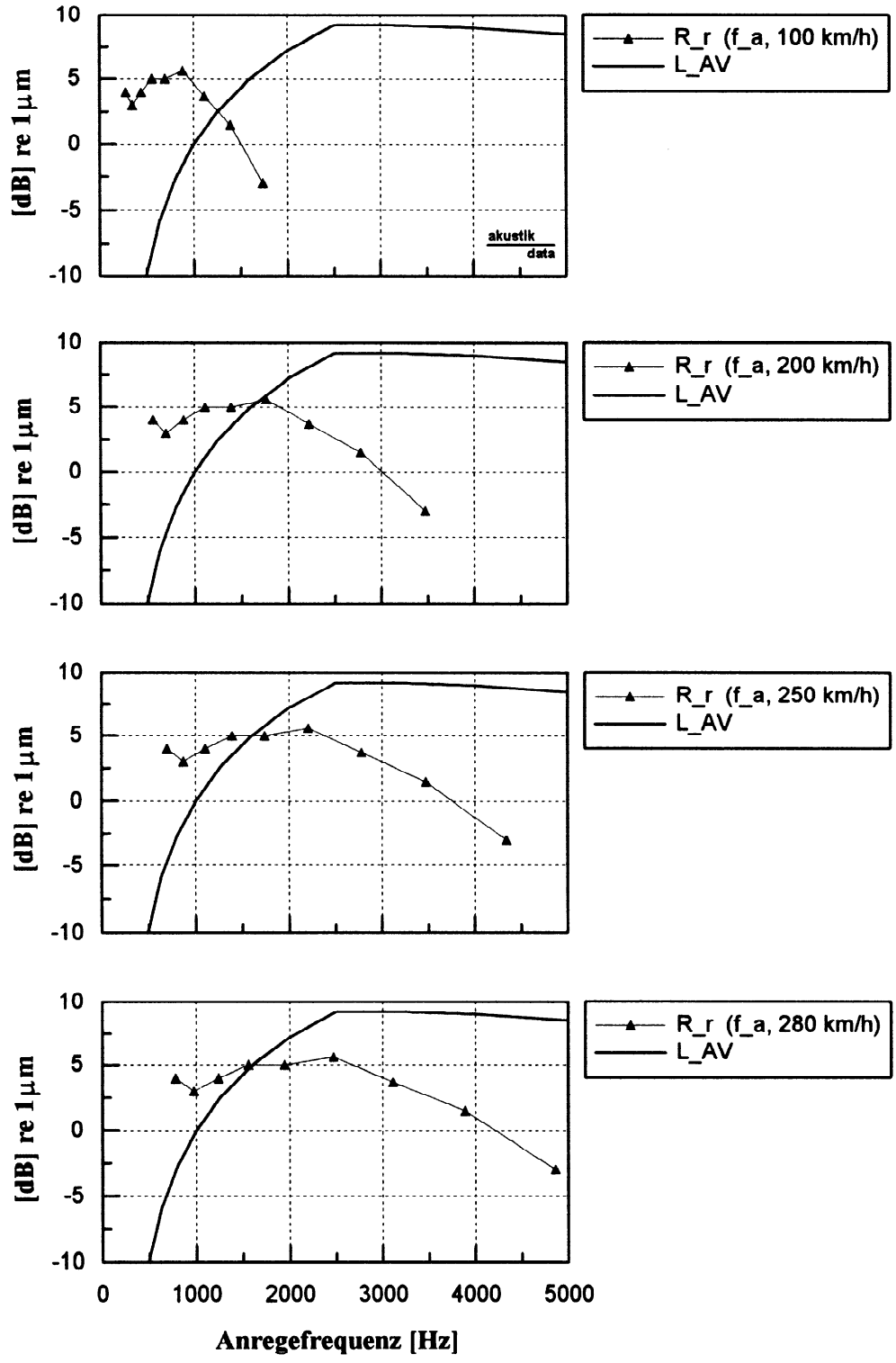


Bild 10 Transferfunktion $L_{AV}(f_a)$ und Anregespektrum $R_r(f_a, \upsilon)$ der ungeschliffenen rechten Schiene im Bereich der Meßebene B in Abhängigkeit von der Zuggeschwindigkeit

Kurve in jedem Teilbild ebenfalls eingezeichnet, um zu zeigen, welche Komponenten im Rauhigkeitsspektrum für die Schallabstrahlung relevant sind. Deutlich zu erkennen ist, daß sich das Maximum des Anregespektrums von etwa 800 Hz bei 100 km/h nach 2500 Hz bei 280 km/h verschiebt und dadurch in einen Bereich kommt, in dem die Transferfunktion ebenfalls ein Maximum hat.

Der resultierende Schalldruckpegel wird nun durch die Hilfsgröße L_{Roll} ausgedrückt, die die vom Rollgeräusch erzeugte Schallemission repräsentiert. Für eine Spektrallinie bzw. ein Terzband berechnet sie sich anhand

$$L_{Roll}(f_a, \upsilon) = 10 \lg (10^{0{,}1 \cdot R_r(f_a,\upsilon)} + 10^{0{,}1 \cdot R_w(f_a,\upsilon)}) + L_{AV}(f_a) + K \quad \text{dB(A)} \qquad (6a)$$

und summiert über alle Frequenzanteile, d. h. im vorliegenden Fall über alle betrachteten Terzbänder

$$L_{Roll}(\upsilon) = (10 \lg \sum_{f_a} 10^{0{,}1 \cdot L_{Roll}'(f_a,\upsilon)}) + K \quad \text{dB(A)} \qquad (6b)$$

mit $$L_{Roll}'(f_a, \upsilon) = 10 \lg (10^{0{,}1 \cdot R_r(f_a,\upsilon)} + 10^{0{,}1 \cdot R_w(f_a,\upsilon)}) + L_{AV}(f_a) \quad \text{dB(A)},$$

wobei L_{Roll}' proportional zum Rollgeräusch ist; Absolutwerte ergeben sich hingegen erst nach Addition der Konstanten K. In dieser Größe sind alle weiteren Einflüsse enthalten, wie z. B. der Abstand zum Mikrofon i und die Pegelzunahme des Rollgeräuschs mit der Geschwindigkeit. Es wird sich aber zeigen, daß im vorliegenden Fall nur relative Größen von Interesse sind und die Bestimmung der Konstanten K nicht notwendig ist.

Gleichung (3) ist nun so zu korrigieren, daß der bisherige Ausdruck $L_{m,s,OS,i}$ - ($L_{m,s,OS,4}$ - $L_{m,s,MS,4}$) die Schallimmission in der Meßebene MS bei nicht vorhandener SSW korrekt wiedergibt. Daher wird eine weitere Pegeldifferenz ΔL_{Roll} hinzugefügt, welche sich für die Mikrofone i = 1 bis 3 nach (7) berechnet:

$$\Delta L_{Roll} = (L_{Roll,OS,i} - L_{Roll,OS,4}) - (L_{Roll,MS,i} - L_{Roll,MS,4}) \quad \text{dB(A)}. \qquad (7)$$

Für die Mikrofone i = 1 bis 3 ist die Rauhigkeit der rechten Schiene am jeweiligen Meßort einzusetzen, für Mikrofon 4 die Rauhigkeit der linken Schiene. Es ist zu

beachten, daß Gleichung (7) eine "Differenz der Differenzen" darstellt. Das heißt, daß sich nur bei unterschiedlichem Verhältnis der Rauhigkeiten zwischen rechter und linker Schiene an den beiden Meßorten ein von Null verschiedener Wert ergibt. Wenn die Summanden in Gleichung (7) wie folgt vertauscht werden,

$$\Delta L_{\mathrm{Roll}} = (L_{\mathrm{Roll,OS},i} - L_{\mathrm{Roll,MS},i}) - (L_{\mathrm{Roll,OS},4} - L_{\mathrm{Roll,MS},4}) \quad \mathrm{dB(A)}, \tag{8}$$

wird deutlich, daß sich die in Gleichung (6b) angesetzte Konstante K in den beiden Differenzen von (8) jeweils aufhebt. Zwischen den Meßebenen OS und MS besteht nämlich am jeweiligen Mikrofon i kein Unterschied bezüglich Mikrofonabstand, Zuggeschwindigkeit usw. ΔL_{Roll} hängt somit nicht von der Mikrofonposition ab und kann pauschal für die Mikrofone i = 1 bis 3 angegeben werden. Die berechneten Korrekturgrößen $\Delta L_{\mathrm{Roll}}(\upsilon)$ sind in Abhängigkeit von der Zugart und Zuggeschwindigkeit in Tabelle 5 für die jeweiligen Meßebenen aufgeführt.

Zugart	Meßebenen	Geschwindigkeit [km/h]	$\Delta L_{\mathrm{Roll}}(\upsilon)$ [dB(A)]
ICE 1	A/B	200	1,2
ICE 1	A/B	250	0,9
ICE 1	A/B	280	0,7
ICE 1, ICE 2	C/D	200	2,8
IC	A/B	200	1,2
IC, EC, IR	C/D	160	2,7
RE	C/D	130	0,0
Güterzüge	A/B/C/D	alle	0,0

Tabelle 5 Korrekturpegel $\Delta L_{\mathrm{Roll}}(\upsilon)$ zur Berücksichtigung unterschiedlicher Rauhigkeiten von rechter und linker Schiene an den Meßorten mit und ohne SSW im ungeschliffenen Zustand

Die korrigierte Version von Gleichung (3) lautet schließlich:

$$\Delta L_{\mathrm{SSW}} = (L_{\mathrm{m,s,OS},i} - L_{\mathrm{m,s,MS},i}) - (L_{\mathrm{m,s,OS},4} - L_{\mathrm{m,s,MS},4}) - \Delta L_{\mathrm{Roll}} \quad \mathrm{dB(A)}. \tag{9}$$

Für Güterzüge ist eine Korrektur bezüglich der unterschiedlichen Rauhigkeit von linker und rechter Schiene nicht notwendig, da ein Vergleich der Schalldruckpegel von Mikrofon 2 und 4 in den Meßebenen ohne SSW zeigen wird, daß für diese Zugart nur eine geringe Unsymmetrie in der Schallabstrahlung nach links und rechts besteht (siehe Abschnitt 5.3). Ursache hierfür ist zum einen, daß bei Güterwagen der Bereich zwischen Wagenböden und Gleis verglichen mit ICE-Wagen (geschlossene Bodenwannen) weitgehend frei von abschirmenden Hindernissen ist. Dadurch ist der Anteil der entfernteren Radreihe am Immissionspegel recht groß, wodurch etwaige Unterschiede in der Rauhigkeit von linker und rechter Schiene nivelliert werden. Ein weiterer Grund besteht darin, daß sich die für das Rollgeräusch maßgebende Rauhigkeit zusammensetzt aus Schienen- und Radrauhigkeit. Da klotzgebremste Räder in der Regel ein wesentlich höheres Rauhigkeitsniveau besitzen, fallen kleine Unterschiede in der Schienenrauhigkeit nicht ins Gewicht.

Da diese Voraussetzungen für RE-Züge in gleicher Weise gelten, entfällt die Korrektur ΔL_{Roll} auch für diese Zugart. Bei IC-, EC- und IR-Zügen muß angemerkt werden, daß sich auch hier nur wenige Hindernisse zwischen Wagenböden und Gleis befinden. Im Gegensatz zu RE-Zügen liegt aber eine geringere Radrauhigkeit vor. Somit erscheint es sinnvoll, die Korrektur ΔL_{Roll} bei letzteren Zugarten durchzuführen.

4.5 Statistische Größen

In Abschnitt 5.3 werden für alle Meßgrößen x_i die zugehörigen Mittelwerte M und Streuungen s wie folgt berechnet:

$$M = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i \qquad \text{bei linearen Größen } x_i \text{ bzw.} \tag{10}$$

$$M = 10\,\lg\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} 10^{0{,}1\cdot x_i} \qquad \text{bei logarithmischen, d. h. Pegelgrößen } x_i, \tag{11}$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(x_i - M)^2} \tag{12}$$

mit N Anzahl der Meßwerte x_i.

Lineare Größen wie die Zuggeschwindigkeit oder die Zuglänge werden nach (10) arithmetisch gemittelt und ihre Streuung nach (12) berechnet. Bei Pegelgrößen (Vorbeifahr-, Ereignis-, Maximal-, Stunden-Mittelungspegel oder örtlichem spezifischen Grundwert) wird der Mittelwert nach (11) energetisch bestimmt; die Streuung wird jedoch in Abstimmung mit dem Auftraggeber abweichend von der Richtlinie VDI 3723 nicht anhand der Schalldruckquadrate $10^{0,1 \cdot x_i}$, sondern mittels der Pegelwerte x_i ebenfalls nach (12) berechnet. Hierdurch ergibt sich ein bezüglich M symmetrischer Vertrauensbereich.

Zur Bestimmung der Aussagesicherheit der gemessenen Mittelwerte wird der Vertrauensbereich berechnet. Es wird ein Vertrauensniveau p von 0,8 gewählt, was bedeutet, daß mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 % der gesuchte Mittelwert der Grundgesamtheit unterhalb der oberen Grenze x_o bzw. oberhalb der unteren Grenze x_u liegt. x_o und x_u ergeben sich unter der Annahme einer Normalverteilung der Meßwerte bei unbekannter Streuung der Grundgesamtheit aus den Gleichungen (13) und (14):

$$x_o = M + \frac{t_{N-1} \cdot s}{\sqrt{N}}, \tag{13}$$

$$x_u = M - \frac{t_{N-1} \cdot s}{\sqrt{N}} \tag{14}$$

mit t_{N-1} Studentfaktor für $p = 0{,}8$.

Daraus ergibt sich der Vertrauensbereich V gemäß Gleichung (15):

$$V = \pm \frac{t_{N-1} \cdot s}{\sqrt{N}} \tag{15}$$

Bei der in Abschnitt 4.4.2 nach (9) berechneten Einfügungsdämpfung ΔL_{ssw} muß berücksichtigt werden, daß diese sich aus mehreren Meßreihen additiv zusammensetzt, nämlich den Pegeln $L_{m,s}$ an jeweils einem Mikrofon $i = 1$ bis 3 und dem Referenzmikrofon 4 in den Meßebenen OS und MS. Nach dem Gaußschen Gesetz der Fehlerfortpflanzung bei zufälligen Fehlergrößen berechnet sich die Gesamt-Streuung s einer Funktion $f(x_i, y_i)$, die von zwei Meßreihen x_i und y_i abhängt, nach Gleichung (16):

$$s^2(f) = \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \cdot s_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \cdot s_y^2 \qquad (16)$$

mit $s(f)$ Gesamt-Streuung der Funktion f,
s_x Streuung der Meßserie x_i,
s_y Streuung der Meßserie y_i.

Gleichung (16) ist auch auf Funktionen anwendbar, deren Anzahl von Variablen größer als zwei ist; es werden in (16) entsprechende Summanden hinzugefügt. Die Gesamt-Streuung der Einfügungsdämpfung ergibt sich folglich aus Gleichung (17):

$$s(\Delta L_{SSW}) = \sqrt{s^2(L_{m,s,OS,i}) + s^2(L_{m,s,MS,i}) + s^2(L_{m,s,OS,4}) + s^2(L_{m,s,MS,4})}\,. \qquad (17)$$

Strenggenommen hängt die Einfügungsdämpfung ΔL_{SSW} auch von der Korrekturgröße ΔL_{Roll} ab, für die ein Vertrauensbereich aber nicht angegeben werden kann. Zum einen fehlen Angaben über die Streuung der Rauhigkeitsmessungen und zweitens ist es nicht möglich, die Prognoseunsicherheit für das Rollgeräusch L_{Roll} anzugeben. Auf eine Berücksichtigung dieser Größe wird daher zunächst verzichtet. Wenn ΔL_{Roll} allerdings größer ausfällt als der meßtechnische Vertrauensbereich V, kann der letztgenannte Wert nicht mehr als aussagekräftig angesehen werden. In diesem Fall muß zur Abschätzung des Vertrauensbereichs der Absolutwert von ΔL_{Roll} als "Unsicherheitsbereich" angesetzt werden. Diese Bezeichnung wurde gewählt, um eine begriffliche Abgrenzung von der statistischen Größe V nach Gleichung (15) zu erreichen.

5. Ergebnisse

Im Berichtsanhang befindet sich eine Auswahl typischer Pegelverläufe und Spektren für alle Meßebenen und Geschwindigkeitsklassen für die Zugarten ICE 1, ICE 2 sowie IC- und Güterzüge. Eine Aufstellung dieser Vorbeifahrten mit den wichtigsten Parametern ist Tabelle A3 zu entnehmen. Es handelt sich um die Fahrten 010, 012, 018, 102, 205, 309, 320, 424 und 426 (siehe auch Tabelle A1 und A2); die zugehörigen Kurvenverläufe sind in den Bildern A1 bis A72 dargestellt. Außerdem werden in den Legenden dieser Bilder als Einzahlwerte die Vorbeifahr-, Ereignis- und Stunden-Mittelungspegel genannt.

Wenn, wie z. B. bei Fahrt 018, Informationen über die Rad/Absorber-Konfiguration des ICE 1 vorliegen, sind diese graphisch in das Diagramm des Pegelverlaufs von Mikrofon 1 eingetragen. Für jede Achse der Mittelwagen ist in dem Kasten dann angegeben, mit welchem Absorbertyp die zugehörigen Räder ausgestattet sind, bzw. ob es sich um gummigefederte Einringräder handelt. Diese Information wurde am 01. und 02.10.1996 im ICE-Betriebswerk Eidelstedt von akustik-data erhoben (siehe Abschnitt 3.2.2).

5.1 Pegelverläufe

Die ersten vier Bilder einer zu einer Vorbeifahrt zugehörigen Bildserie zeigen die Pegelverläufe $L_A(t)$ im gesamten ausgewerteten Zeitbereich t_a bis t_e für alle vier Mikrofone. Zur Darstellung wurden die mit einer Abtastfrequenz von 25 kHz aufgezeichneten Zeitsignale über eine Zeitspanne von 40 ms gemittelt und es wurde alle 40 ms ein Pegelwert geplottet, was in etwa einer Darstellung mit der Zeitkonstanten "Fast" entspricht.

Die Gegenüberstellung der Pegelverläufe für die jeweiligen Mikrofone 1, 2 und 3 in der Meßebene mit und ohne SSW macht die prinzipielle Wirksamkeit der SSW deutlich, und zwar für alle Zugarten, wobei Einzelheiten der späteren Betrachtung der Einzahlwerte vorbehalten sind. Der Vergleich der Referenzmikrofone 4 auf der jeweils gegenüberliegenden Gleisseite, d. h. bei freier Schallausbreitung in beiden Meßebenen, zeigt signifikante Pegeldifferenzen, woraus auf unterschiedliche Schienenrauhigkeiten im Bereich der beiden zu vergleichenden Meßebenen geschlossen werden muß. So sind die Vorbeifahrten am Meßort B um mehrere dB(A) lauter als am Meßort A (siehe Bilder A2, A10, A18 und A34). Dies gilt in nicht so hohem Maße auch für den Pegelunterschied zwischen den Meßebenen C und D (siehe Bilder A42, A50 und A58), wobei nun in Ebene C höhere Pegel als in Ebene D gemessen werden.

Die hiermit zu Tage getretene Ungleichheit des schalltechnischen Zustands der Gleise an den beteiligten Meßorten wurde bereits in den Abschnitten 4.4.1 und 4.4.2 in ihrer Auswirkung auf die Berechnung der Einfügungsdämpfung einer SSW diskutiert. Die Pegelunterschiede zwischen den Referenzmikrofonen werden insbesondere bei Vorbeifahrten des ICE 1 und ICE 2 sowie anderer scheibengebremster Personenzüge sichtbar. Bei Vorbeifahrten von Güterzügen (siehe Bild A26 und A66) sind diese

Pegeldifferenzen weit geringer als bei den genannten Zügen. Dies bestätigt abermals, daß die Schienenrauhigkeit dann einen untergeordneten Einfluß auf die Schallemission ausübt, wenn die Rauhigkeit der Radlaufflächen demgegenüber sehr viel größer ist, was bei klotzgebremsten Güterwagen im allgemeinen der Fall ist. Dies kommt auch im Ansatz zur Bildung einer resultierenden Rauhigkeit von Schienen und Radlaufflächen zum Ausdruck, wo die energetische Summe der Einzelbeiträge gebildet wird (siehe Abschnitt 4.4.2, Gleichung (6a)).

Im übrigen zeigen die dargestellten Pegelverläufe im allgemeinen keine Besonderheiten. Lediglich bei Mikrofon 1, 2 und insbesondere 3 in der Meßebene C ist in den Pegelverläufen eine Unsymmetrie zu beobachten, die mit größerem Mikrofonabstand von Gleismitte immer ausgeprägter wird. Dies ist auf die zu kurze Wandlänge im Bereich der Meßebene C zurückzuführen. Als Folgerung aus dieser Situation wurde vereinbart, die Datenauswertung bei der Bestimmung der SSW-Einfügungsdämpfung nur über die erste Hälfte der Zugvorbeifahrt zu erstrecken (siehe Abschnitt 4.1).

5.2 Schalldruckspektren

Die zu den gemessenen Pegelverläufen gehörenden Schalldruckspektren mit einer Bandbreite von 12,2 Hz sind auf der dritten und vierten Seite der Bildserie der jeweiligen Fahrt im Berichtsanhang dargestellt. Die Berechnung erfolgte ohne Frequenzbewertung mit einem Hanning-Fenster im Zeitbereich. Gemittelt wurde dabei an allen Meßorten über die gesamte Vorbeifahrt des Zuges innerhalb der Zeitgrenzen t_1 und t_2.

Die Verläufe der Schmalbandspektren für die Mikrofonpositionen ohne SSW weisen maximale Spektralwerte in Frequenzbereichen auf, die in erster Linie von der Zuggeschwindigkeit abhängen. Für Personenzüge liegen diese etwa zwischen 1 und 2 kHz; beim ICE 1 bewegt sich das Maximum bei ca. 1 kHz bei 200 km/h zu ca. 2 kHz bei 280 km/h, während sich bei IC-Zügen das spektrale Maximum bei 200 km/h bei ungefähr 1,8 kHz befindet. Bei Güterzügen mit ca. 100 km/h liegen die maximalen Frequenzanteile relativ breitbandig zwischen 600 und 900 Hz. Letztere Aussagen gelten für den Meßort B. In der Meßebene D verhalten sich die spektralen Verteilungen der Schallemission der einzelnen Zugarten ähnlich. Lediglich bei IC-Zügen mit ca. 160 km/h liegt das spektrale Maximum um 800 Hz und damit wesentlich tiefer als bei der gleichen Zugart in Meßebene B.

Sehr wahrscheinlich repräsentieren die genannten maximalen Spektralkomponenten das Rollgeräusch der vermessenen Züge. Damit liegt der Quellort im Bereich von Rad und Schiene, was für die Einfügungsdämpfung der SSW bezogen auf die betrachteten Mikrofonpositionen die maximal erreichbare Wirkung bedeutet. Entsprechend lassen sich aus der Gegenüberstellung der spektralen Verteilungen für die gleiche Mikrofonposition mit und ohne SSW im Bereich der genannten spektralen Maxima die größten Werte für die Einfügungsdämpfung im gesamten Frequenzbereich ablesen. Beim Vergleich der Ebenen A und B treten hierbei Pegeldifferenzen von über 20 dB für einzelne Spektralanteile auf. Beim Vergleich der Ebenen C und D ist die Wirkung der SSW mit Pegelminderungen um bis zu ca. 15 dB deutlich geringer, wobei im Falle der Güterzüge in den Bildern A69, A71 und A72 die Pegeldifferenzen noch kleiner zu sein scheinen. Ausführlicher wird die spektrale Zusammensetzung der gemessenen Vorbeifahrgeräusche nachfolgend anhand von Terzspektren diskutiert.

Die über alle Vorbeifahrten der jeweiligen Zug- bzw. Geschwindigkeitsklassen gemittelten Schalldruck-Terzspektren sind in den Bildern 11 bis 21 dokumentiert. Die für jede ausgewertete Vorbeifahrt vorhandenen Schmalbandspektren wurden dazu innerhalb jeder Klasse energetisch gemittelt, A-bewertet und die Frequenzlinien in den einzelnen Terzen mit den Mittenfrequenzen 50 bis 10000 Hz energetisch aufsummiert. Bild 11 und 12 zeigen exemplarisch die Terzspektren aller Mikrofone für die Klasse der ICE 1-Vorbeifahrten am Meßort B (ohne SSW) und A (mit SSW für die Mikrofone 1 bis 3) bei jeweils einer mittleren Geschwindigkeit von 277 km/h. Im Falle von Mikrofon 1 wurde nur über solche Fahrten gemittelt, bei denen die Höhe über SO 1,2 m betrug. Für alle übrigen Klassen und Meßebenen werden im folgenden nur die Terzspektren der Mikrofonpositionen 2 und 4 gezeigt.

Bei ICE 1-Vorbeifahrten mit einer mittleren Geschwindigkeit von 277 km/h ohne SSW (Bild 11) dominieren die Frequenzkomponenten in der 2,0 und 2,5 kHz-Terz den A-bewerteten Gesamtpegel an allen Mikrofonpositionen. Ursache hierfür sind die Räder, die in diesem Frequenzbereich Eigenfrequenzen mit hohem Abstrahlgrad aufweisen. Demnach hat auch bei der ICE-Höchstgeschwindigkeit das Rollgeräusch offensichtlich noch immer einen großen Anteil am Gesamtgeräusch. Des weiteren erkennt man bei Frequenzkomponenten oberhalb von 250 Hz eine weitgehend frequenzunabhängige Pegelabnahme mit etwa 3 dB pro Entfernungsverdopplung. Es fällt auf, daß die Terzspektren der Mikrofone 2 (B(2)) und 4 (B(4)), die sich beide in einer

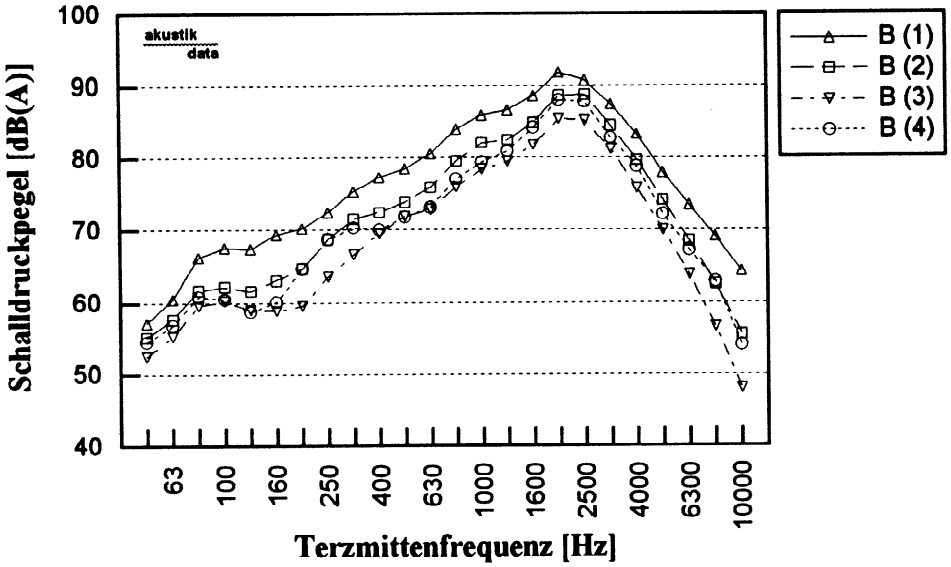


Bild 11 Über 21 (bzw. 9 bei Mikrofon 1) Vorbeifahrten des ICE 1 gemittelte und A-bewertete Terzspektren der Mikrofone 1 bis 4; Messungen in Ebene B ohne SSW bei einer mittleren Geschwindigkeit von 277 km/h

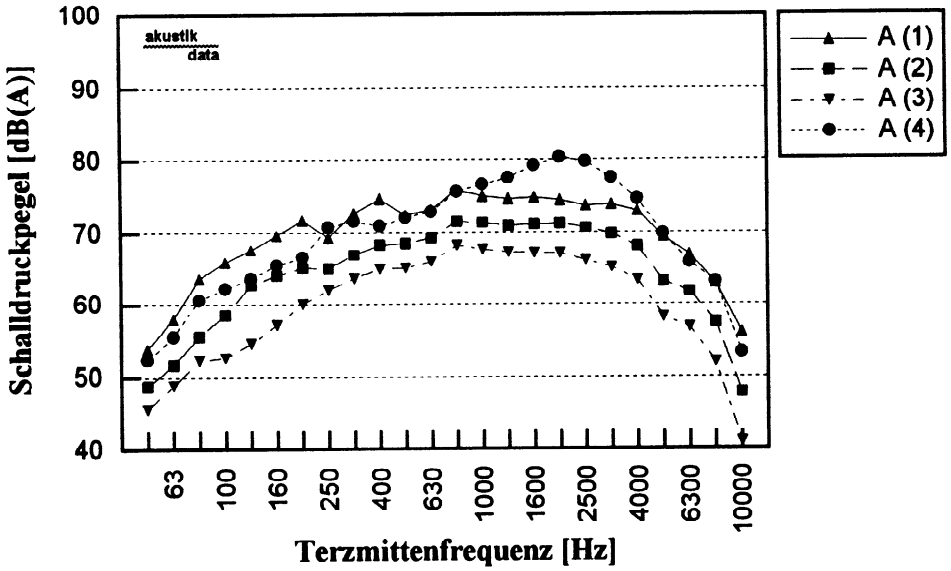


Bild 12 Über 21 (bzw. 9 bei Mikrofon 1) Vorbeifahrten des ICE 1 gemittelte und A-bewertete Terzspektren der Mikrofone 1 bis 4; Messungen in Ebene A bei einer mittleren Geschwindigkeit von 277 km/h; Mikrofone 1, 2 und 3 mit SSW, Mikrofon 4 ohne SSW

Entfernung von 25 m zur Gleismitte auf verschiedenen Seiten der Strecke befinden, nicht exakt übereinanderliegen. Auf dieses Problem wurde bereits in Abschnitt 4.4.2 näher eingegangen.

Bild 12 zeigt die mittleren Terzspektren der gleichen ICE 1-Vorbeifahrten gemessen mit den Mikrofonen in der Ebene A. Gegenüber Bild 11 ist für die Mikrofone 1, 2 und 3 deutlich zu erkennen, daß die Terzpegel erheblich kleiner sind als im Fall ohne SSW und daß die Rademission um 2 kHz gut abgeschirmt wird. Das Referenzmikrofon 4 auf der Seite des Gleises, an der sich keine SSW befindet (A(4)), weist verglichen mit Mikrofon 4 in Ebene B bei 2 kHz einen um etwa 8 dB kleineren Pegel auf, was in Bild 13 allerdings besser zu erkennen ist. Es ist zu vermuten, daß dieser Effekt in Zusammenhang mit der weicheren Zwischenlage steht, die im Bereich der Ebene B eingebaut ist. In [10] wird nämlich ausgeführt, daß es unter dem Gesichtspunkt der Schallabstrahlung eine optimale Steifigkeit für die elastischen Zwischenlagen gibt. Das Rollgeräusch kann sich um 4 bis 5 dB(A) erhöhen, wenn die Steifigkeit der elastischen Zwischenlagen weicher ist als dieses Optimum. Somit erweist sich der geringfügig unterschiedliche Gleisaufbau an den beiden zu vergleichenden Meßorten für die Untersuchung als ungünstig; dieser Umstand wird jedoch bei der Berechnung der SSW-Einfügungsdämpfung berücksichtigt (siehe Abschnitt 4.4.1).

Die Abschirmwirkung der SSW und die unterschiedlichen akustischen Gleiszustände bei den Meßorten A und B werden in Bild 13 bis 15 deutlich. Hier werden die mittleren Terzspektren an der Mikrofonposition 2 hinter der SSW (A(2)) mit dem Referenzmikrofon 4 in der gleichen Meßebene (A(4)) und dem Referenzmikrofon am Ort ohne SSW (B(4)) verglichen. Gemittelt wurde über die ICE 1-Vorbeifahrten für die drei untersuchten Geschwindigkeitsklassen. Die Pegeldifferenz der Mikrofone A(4) - A(2) ist unter der Voraussetzung einer zur Gleisachse symmetrischen Schallabstrahlung als Näherung für die Einfügungsdämpfung der SSW anzusehen. Zu erkennen ist, daß der Unterschied der Terzpegel im mittleren Frequenzbereich bei Vorbeifahrten mit 200 km/h etwas größer ist als bei höheren Geschwindigkeiten. Interessant ist weiterhin eine Betrachtung der Spektren der Referenzmikrofone an den Meßorten mit und ohne SSW. Für alle Geschwindigkeitsklassen zeigt sich dabei, daß die Terzpegel um 2 kHz in der Meßebene B um 8 bis 9 dB größer sind als in der Ebene A. Ursachen hierfür sind eine etwas höhere Schienenrauhigkeit (siehe Tabelle 3) und offensichtlich die weicheren Zwischenlagen im Bereich der Meßebene B.

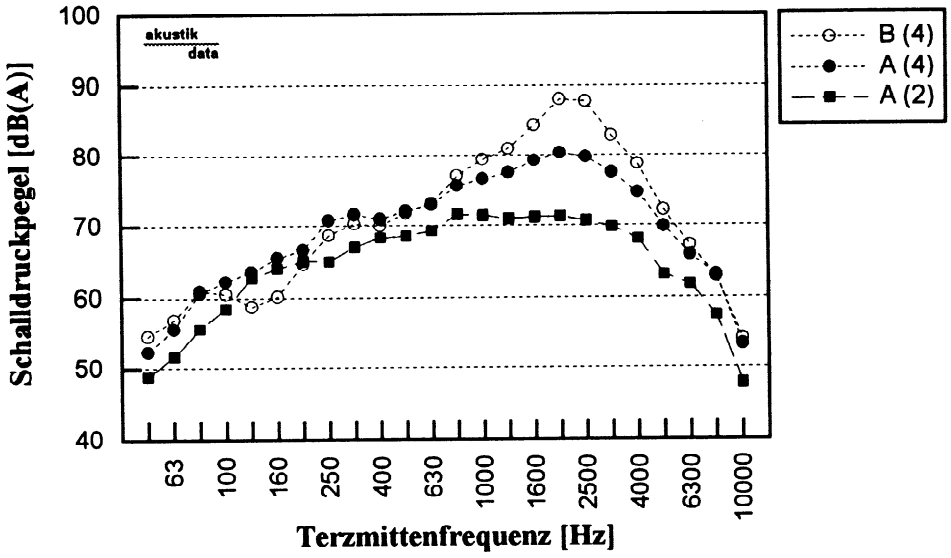


Bild 13 Über 21 Vorbeifahrten des ICE 1 gemittelte und A-bewertete Terzspektren der Mikrofone 2 (mit SSW) und 4 (ohne SSW) in Ebene A und Mikrofon 4 (ohne SSW) in Ebene B bei einer mittleren Geschwindigkeit von 277 km/h

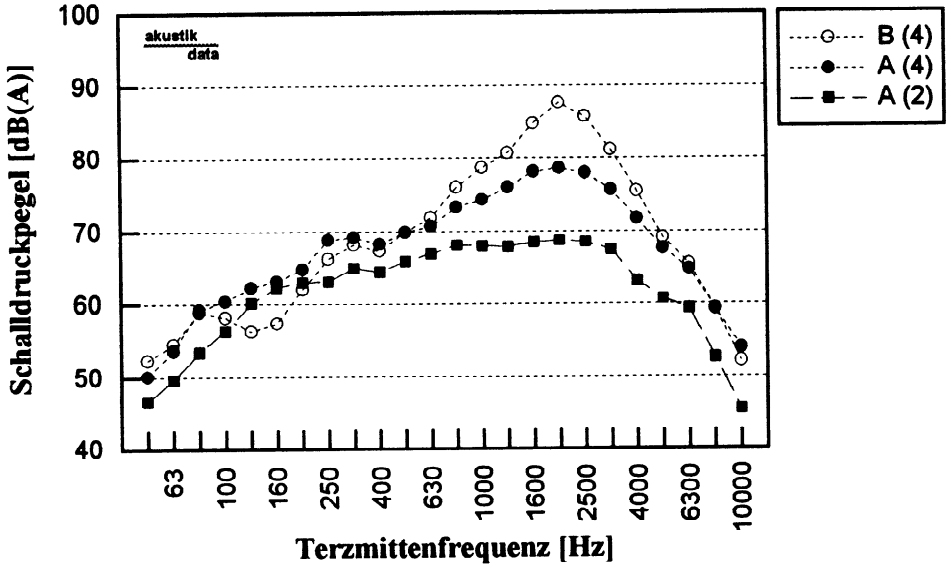


Bild 14 Über 8 Vorbeifahrten des ICE 1 gemittelte und A-bewertete Terzspektren der Mikrofone 2 (mit SSW) und 4 (ohne SSW) in Ebene A und Mikrofon 4 (ohne SSW) in Ebene B bei einer mittleren Geschwindigkeit von 249 km/h

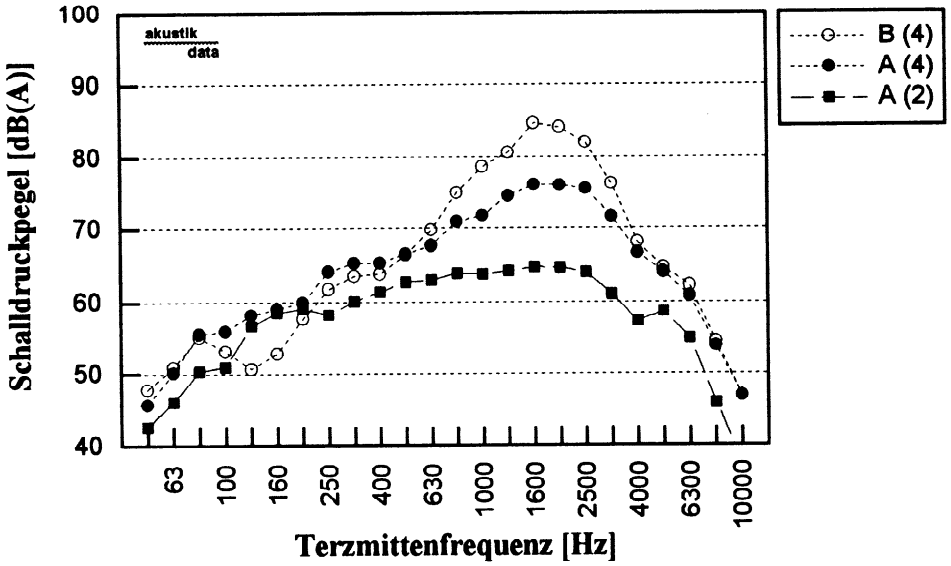


Bild 15 Über 15 Vorbeifahrten des ICE 1 gemittelte und A-bewertete Terzspektren der Mikrofone 2 (mit SSW) und 4 (ohne SSW) in Ebene A und Mikrofon 4 (ohne SSW) in Ebene B bei einer mittleren Geschwindigkeit von 201 km/h

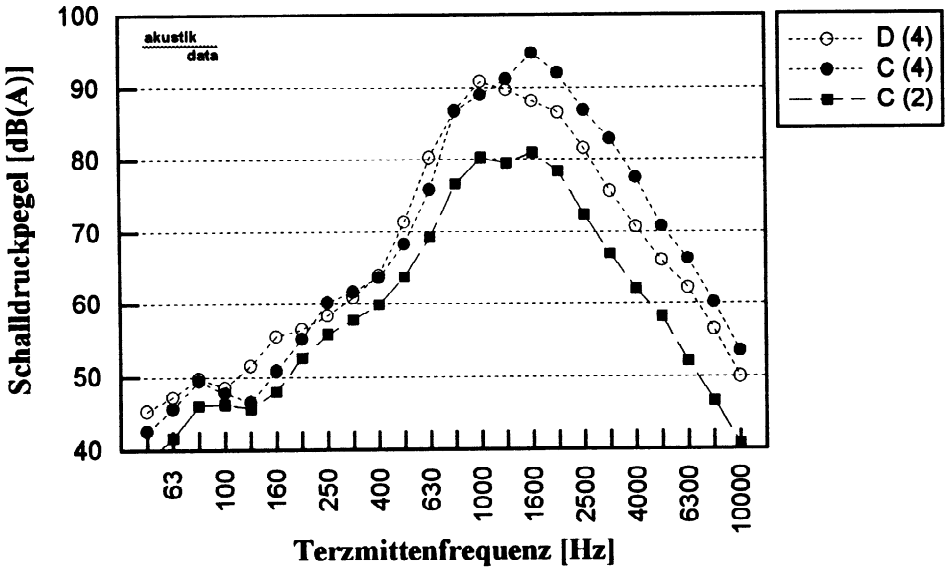


Bild 16 Über 18 Vorbeifahrten des ICE 1 gemittelte und A-bewertete Terzspektren der Mikrofone 2 (mit SSW) und 4 (ohne SSW) in Ebene C und Mikrofon 4 (ohne SSW) in Ebene D bei einer mittleren Geschwindigkeit von 195 km/h

Vergleicht man Bild 15 für die Meßorte A und B mit Bild 16 für die Meßorte C und D, stellt man für die gleiche Zugart (ICE 1) und etwa die gleiche mittlere Geschwindigkeit (ca. 200 km/h) deutliche Abweichungen fest: Zum einen sind die Terzpegel in C/D erheblich größer als in den Meßebenen A/B, zum anderen unterscheiden sich die Terzspektren auch in der Lage der spektralen Maxima. Eine Erklärung hierfür ist der große Rauhigkeitsunterschied der Schienenoberflächen am Meßort C/D verglichen mit A/B (siehe Bilder 7 und 8 sowie Tabelle 3). Bedingt durch die Rauhigkeitsdifferenz von mehr als 10 dB und das damit verbundene höhere Anregespektrum für das Rad/ Schiene-System differieren die Meßorte in ihrem Emissionsniveau in bezug auf ICE-Züge deutlich. Da in den Ebenen C und D der Schwerpunkt der Rauhigkeit gegenüber den Ebenen A und B bei größeren Wellenlängen liegt (vergleiche Bild 7 und 8), ist es verständlich, daß sich bei gleicher Zuggeschwindigkeit der spektrale Gehalt des Rollgeräuschs zu tieferen Frequenzen verschiebt.

Des weiteren fällt beim Vergleich der Bilder 15 und 16 auf, daß für die Schalldrücke der beiden Mikrofone 2 hinter der SSW ganz verschiedene spektrale Zusammensetzungen gemessen werden. In der Meßebene A verläuft das Terzspektrum wegen der Wandwirkung in bezug auf das Rollgeräusch von 400 bis 2500 Hz nahezu flach, während in Ebene C trotz der Wandwirkung noch immer die Rollgeräuschanteile zwischen 1 und 1,6 kHz das Spektrum dominieren. Auch dies ist ein Effekt des starken Unterschieds in der Schienenrauhigkeit zwischen beiden Meßorten. Die Terzspektren von ICE 2- (Bild 17) und ICE 1-Vorbeifahrten (Bild 16) an den Meßorten C und D weisen dagegen im Pegelniveau und spektraler Verteilung eine sehr große Ähnlichkeit auf.

Von Güterzug-Vorbeifahrten sind die mittleren Terzspektren aus Bild 18 für den Meßort A/B und aus Bild 19 für C/D zu ersehen. Verglichen mit den bisher betrachteten ICE-Vorbeifahrten sind die Peaks der Spektren bei Güterzügen zu tieferen Frequenzen hin verschoben, was mit der geringeren Fahrgeschwindigkeit zusammenhängt. Die Einfügungsdämpfung der SSW in der Meßebene A ist für die Rollgeräuschkomponenten um 1,6 kHz besonders hoch und liegt bei diesen Terzen in der Größenordnung von 15 dB. Ein Vergleich der Spektren auf der Gleisseite ohne SSW zeigt zwischen den Orten A und B deutliche Unterschiede. In der Ebene A (A(4)) liegt das spektrale Maximum in der 1,6 kHz-Terz, in Ebene B (B(4)) dagegen bei 1,0 kHz, wobei oberhalb von 1,25 kHz die Terzspektren an beiden Meßorten fast deckungsgleich sind.

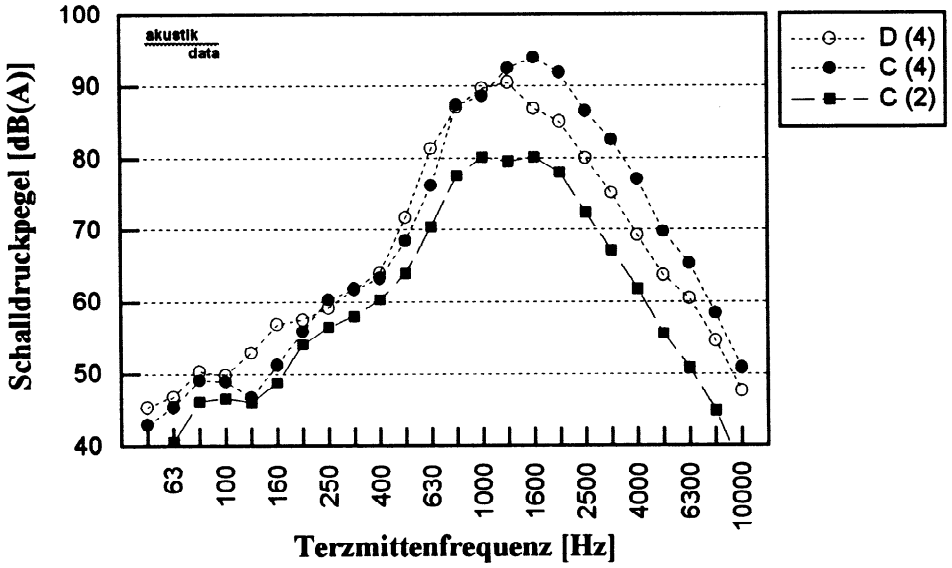


Bild 17 Über 4 Vorbeifahrten des ICE 2 gemittelte und A-bewertete Terzspektren der Mikrofone 2 (mit SSW) und 4 (ohne SSW) in Ebene C und Mikrofon 4 (ohne SSW) in Ebene D bei einer mittleren Geschwindigkeit von 195 km/h

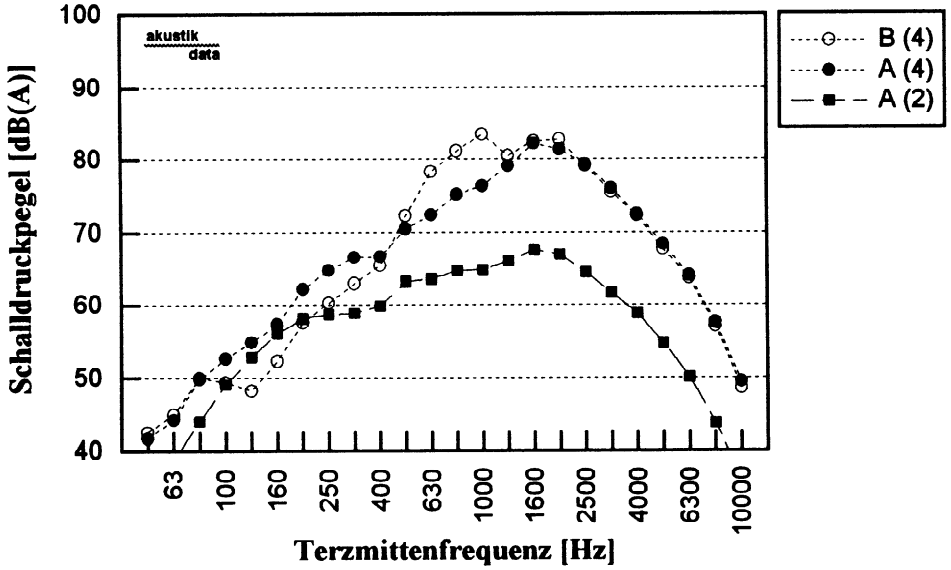


Bild 18 Über 21 Vorbeifahrten von Güterzügen gemittelte und A-bewertete Terzspektren der Mikrofone 2 (mit SSW) und 4 (ohne SSW) in Ebene A und Mikrofon 4 (ohne SSW) in Ebene B bei einer mittleren Geschwindigkeit von 112 km/h

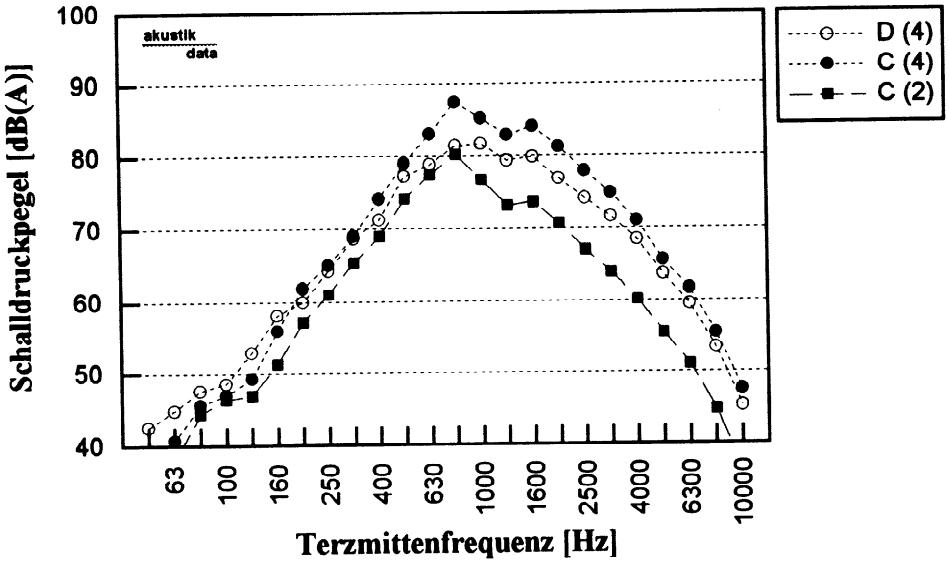


Bild 19 Über 7 Vorbeifahrten von Güterzügen gemittelte und A-bewertete Terzspektren der Mikrofone 2 (mit SSW) und 4 (ohne SSW) in Ebene C und Mikrofon 4 (ohne SSW) in Ebene D bei einer mittleren Geschwindigkeit von 92 km/h

Bezüglich der für Frequenzen unterhalb von 1,25 kHz erkennbaren Pegeldifferenzen wird vermutet, daß die weicheren Zwischenlagen am Meßort B zu einer stärkeren Entkopplung von Schienen und Schwellen und dadurch erhöhten Schienenschwingungen führen, was wiederum eine höhere Schallabstrahlung der Schienen im Frequenzbereich von 630 bis 1000 Hz zur Folge hat.

Die Terzspektren der Güterzug-Vorbeifahrten an den Orten C und D deuten darauf hin, daß die Einfügungsdämpfung der SSW am Ort C gering ist. Eine Erklärung für die nur kleine Pegeldifferenz zwischen den Spektren der Mikrofone C(4) und C(2) kann hier zunächst nicht gefunden werden. Allenfalls ist dies u. a. ein Effekt der in Fahrtrichtung der Züge zu kurzen SSW, so daß bei Mittelung über die gesamte Zugvorbeifahrt (was bei der Berechnung der Spektren der Fall ist) ein großer Teil des Zuges gar keine Abschirmung erfährt und folglich die Schallimmission hinter der SSW verfälscht, d. h. zu hoch gemessen wird. Dies gilt im Prinzip für alle Zugvorbeifahrten am Meßort C, allerdings ist bei sehr langen Zügen, z. B. den Güterzügen, der größte Fehler zu erwarten.

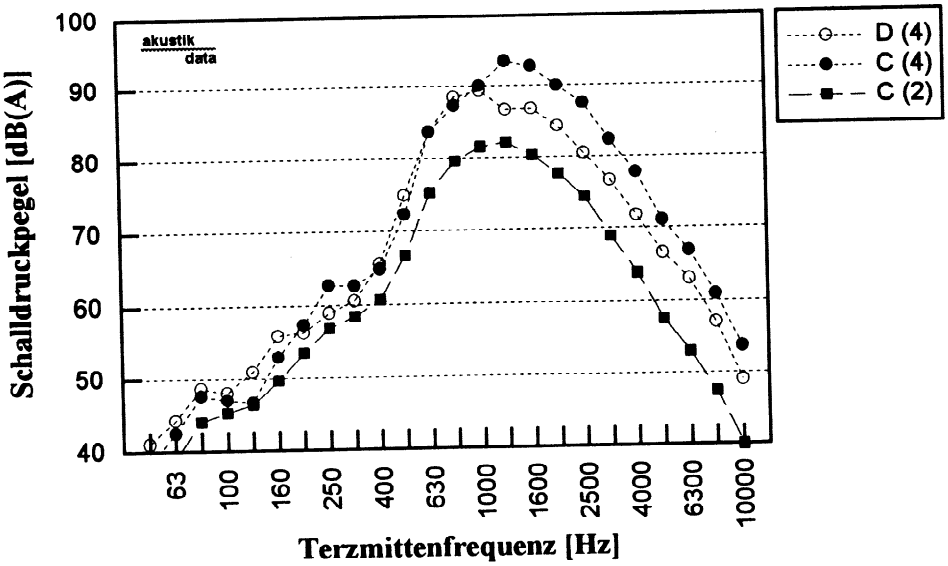


Bild 20 Über 9 Vorbeifahrten von IC-, EC- und IR-Zügen gemittelte und A-bewertete Terzspektren der Mikrofone 2 (mit SSW) und 4 (ohne SSW) in Ebene C und Mikrofon 4 (ohne SSW) in Ebene D bei einer mittleren Geschwindigkeit von 159 km/h

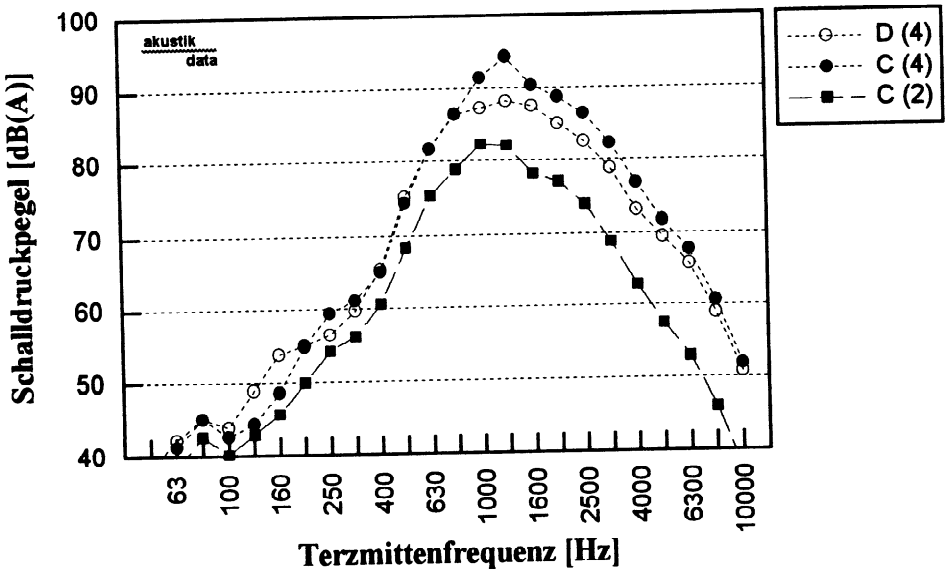


Bild 21 Über 4 Vorbeifahrten von RE-Zügen gemittelte und A-bewertete Terzspektren der Mikrofone 2 (mit SSW) und 4 (ohne SSW) in Ebene C und Mikrofon 4 (ohne SSW) in Ebene D bei einer mittleren Geschwindigkeit von 131 km/h

Bild 20 zeigt die gemittelten Spektren der Vorbeifahrten von scheibengebremsten IC-, EC- und IR-Zügen gemessen an den Orten C und D. Die spektralen Verteilungen haben einen ähnlichen Verlauf wie die der ICE 1- und ICE 2-Vorbeifahrten in diesen Meßebenen. Die entsprechenden Terzspektren für klotzgebremste RE-Züge sind in Bild 21 dokumentiert. Gegenüber den Spektren von Bild 20 sind die Unterschiede relativ gering. Insbesondere fällt auf, daß trotz der klotzgebremsten Räder der RE-Züge die dem Rollgeräusch zuzuordnenden Spektralkomponenten nicht sehr viel höher sind als bei den scheibengebremsten Rädern der IC-, EC- und IR-Züge. Diese Aussage bleibt auch dann im wesentlichen erhalten, wenn man zur exakten Vergleichbarkeit der Spektren wegen des Geschwindigkeitsunterschieds in den Bildern 20 und 21 noch ca. 2,5 dB, nämlich 30 lg (159 km/h / 131 km/h), zu den Pegeln der RE-Züge hinzuaddiert. Offensichtlich ist die Schienenrauhigkeit in den Bereichen der Meßebenen C und D so groß, daß die Rauhigkeit der Radlaufflächen demgegenüber keine große Rolle mehr spielt.

5.3 Einzahlwerte

Die in Abschnitt 4.1 definierten Einzahlwerte L_h, L_e, L_v und L_{Max} sowie die in Abschnitt 4.3 erläuterten örtlichen spezifischen Grundwerte $L_{m,s}$ wurden für jede Vorbeifahrt und jedes Mikrofon in allen Meßebenen berechnet. Am Beispiel der ICE 1-Vorbeifahrten mit ca. 200 km/h an den Meßorten A und B sind diese Pegel für Mikrofon 2 in Tabelle A4 und A5 aufgelistet. Am Ende der Tabellen stehen in den mit "*M*" und "*s*" bezeichneten Datenzeilen jeweils die Mittelwerte und Streuungen der einzelnen Meßgrößen, welche nach Abschnitt 4.5 berechnet wurden.

Eine Auflistung dieser Mittelwerte und Streuungen über jeweils *N* Vorbeifahrten für alle analysierten Klassen und jedes Mikrofon enthalten die Tabellen A6 bis A15. Ergebnisse für die Meßebene ohne (OS) bzw. mit SSW (MS) sind hierin zum direkten Vergleich jeweils übereinander aufgetragen. Die Ergebnisse für die jenseits der Gleise postierten Mikrofone 4 sind mit dem Buchstaben der betreffenden Ebene gekennzeichnet und ebenfalls in zwei aufeinanderfolgenden Zeilen gegenübergestellt.

Die gemittelten Werte L_h, L_e, L_v und L_{Max} haben in den Tabellen nur informativen Charakter, während die gemittelten örtlichen spezifischen Grundwerte $L_{m,s}$ im folgenden einer weitergehenden Auswertung unterzogen werden.

Bevor die eigentliche Wirkung der SSW ermittelt wird, bietet es sich an, alle Meßorte anhand der örtlichen spezifischen Grundwerte auf ihren schalltechnischen Gleiszustand hin zu überprüfen. Diese Werte, entnommen aus den Tabellen A6 bis A15, sind in Tabelle 6 zusammengestellt. Es sind auch die nach Gleichung (15) ermittelten Vertrauensbereiche angegeben, welche für ein Vertrauensniveau von 0,8 berechnet wurden. Zum Vergleich mit dem Grundwert nach Schall 03 werden nur Mikrofone in 25 m Entfernung von Gleismitte betrachtet, und zwar Mikrofon 4 für die Meßebenen mit SSW und Mikrofon 2 für die Meßebenen ohne SSW.

	Meßebene	A	B	Meßebene	C	D
	v [km/h]	$L_{m,s,MS,4}$ [dB(A)]	$L_{m,s,OS,2}$ [dB(A)]	v [km/h]	$L_{m,s,MS,4}$ [dB(A)]	$L_{m,s,OS,2}$ [dB(A)]
ICE 1	201	46,9 ± 0,3	54,2 ± 0,2	196	63,7 ± 0,3	61,1 ± 0,3
	249	46,9 ± 0,2	53,9 ± 0,4	-	-	-
	277	47,5 ± 0,1	53,6 ± 0,1	-	-	-
ICE 2	-	-	-	195	63,4 ± 0,3	61,1 ± 0,4
IC, EC, IR	199	45,2[2)]	51,0[2)]	159	61,1 ± 0,7	58,0 ± 0,5
RE	-	-	-	131	57,6 ± 1,4	54,2 ± 2,0
G	112	47,7 ± 0,2	50,5 ± 0,2	92	56,0 ± 1,0	52,3 ± 0,5

[1)] Pegel enthalten Entfernungskorrektur von +0,8 dB(A)

[2)] Angabe eines Vertrauensbereichs ist nicht möglich, da $N = 1$

Tabelle 6 Örtliche spezifische Grundwerte $L_{m,s}$ und Vertrauensbereiche in dB(A) gemessen in 25 m Entfernung von Gleismitte an den vier Meßorten bei ungeschliffenen Schienen

Da am Meßort C das Mikrofon 4 in 30 m Entfernung zur Gleismitte aufgestellt werden mußte, wurden die Pegel $L_{m,s,MS,4}$ in diesem Fall unter Annahme einer Linienquelle für eine Position in 25 m Entfernung umgerechnet, d. h. sie wurden um 10 lg (30 m/25 m) = 0,8 dB(A) erhöht. Die für Meßebene A ermittelten örtlichen spezifischen Grundwerte zeigen, daß sich das Gleis in einem guten bis sehr guten akustischen Zustand befindet. Die Emission der am Meßort B vorbeifahrenden Züge ist im Vergleich dazu um 2,8 bis 7,3 dB(A) höher. Dies wird einerseits durch die um 2 dB höhere Oberflächenrauhigkeit der Schienen (siehe Abschnitt 2.5) sowie sehr wahrscheinlich durch die weicheren Zwischenlagen am Meßort B verursacht (siehe Abschnitte 2.2 und 5.2).

Aus Tabelle 6 geht weiter hervor, daß die örtlichen spezifischen Grundwerte in den Bereichen der Meßebenen C und D wesentlich höher sind als bei A und B. Dies korrespondiert mit den über 10 dB größeren Schienenoberflächenrauhigkeiten an den Meßorten C und D (siehe Abschnitt 2.5). Den akustischen Gleiszustand bei C und D kann man mit örtlichen spezifischen Grundwerten von teilweise über 60 dB(A) als sehr schlecht bezeichnen. Die Emission der am Meßort C vorbeifahrenden Züge liegt zudem noch um 2,3 bis 3,7 dB(A) über den Werten für Meßebene D, während die entsprechende Differenz bei den Schienenrauhigkeits-Summenpegeln nur ca. 1 dB beträgt (siehe Abschnitt 2.5). Es sei darauf hingewiesen, daß für diese Summenpegel nicht unbedingt eine Proportionalität zwischen Rauhigkeit und abgestrahltem Schall besteht; dies gilt laut Abschnitt 4.4.2 nur für einzelne Frequenzen.

Ein weiteres Ergebnis wird im folgenden vorgestellt, welches auf die Notwendigkeit einer Korrektur hinweist, nämlich unterschiedliche Rauhigkeiten zwischen rechter und linker Schiene bei der Auswertung gemäß Gleichung (7) bzw. (8) zu berücksichtigen. In Tabelle 7 werden die örtlichen spezifischen Grundwerte der Mikrofone 2 und 4 in den Meßebenen ohne SSW miteinander verglichen, um zu klären, ob die Schallabstrahlung symmetrisch zur Gleismitte erfolgt.

Zugart	$v^{1)}$ [km/h]	Meß-ebene	$L_{m,s,OS,2}$ [dB(A)]	$L_{m,s,OS,4}{}^{2)}$ [dB(A)]	$L_{m,s,OS,2} - L_{m,s,OS,4}$ [dB(A)]
ICE 1	199,9	B	54,2	53,4	0,8
ICE 1	249,5	B	53,9	52,8	1,1
ICE 1	276,4	B	53,6	52,4	1,2
G	111,0	B	50,5	50,0	0,5
ICE 1	196,8	D	61,1	60,5	0,6
ICE 2	195,1	D	61,1	60,0	1,1
IC, EC, IR	160,1	D	58,0	57,1	0,9
RE	132,6	D	54,2	53,8	0,4
G	91,3	D	52,3	51,9	0,4

[1)] Mittlere Vorbeifahrgeschwindigkeit an den Meßorten ohne SSW

[2)] Pegel bei Meßebene D enthalten Entfernungskorrektur von +0,8 dB(A)

Tabelle 7 Örtliche spezifische Grundwerte $L_{m,s}$ rechts und links der Gleismitte an den Meßorten ohne SSW (Vergleich Mikrofon 4 mit Mikrofon 2)

Für beide Meßebenen zeigt sich, daß der Pegel am Mikrofon 2 in +25 m Entfernung von Gleismitte größer ist als am Referenzmikrofon 4 auf der gegenüberliegenden Seite (-25 m von Gleismitte). Dieser Effekt ist mit etwa 1 dB(A) bei ICE-Zügen stärker ausgeprägt als mit etwa 0,4 dB(A) bei RE- und Güterzügen. Als mögliche Ursache für die unsymmetrische Schallabstrahlung bzw. -ausbreitung kommt eine Zusatzdämpfung durch das bzw. die Parallelgleise in Frage, die sich auf dem Ausbreitungsweg zum Mikrofon 4 befinden. Ebenso kann die unterschiedliche Emission durch die verschiedenen Oberflächenrauhigkeiten der linken und rechten Schiene verursacht sein.

Gegen eine signifikante Zusatzdämpfung durch die Parallelgleise als Ursache obiger Pegeldifferenzen spricht, daß zwar kleinere Pegel auf der Seite des Gleises gemessen wurden, auf der sich das bzw. die Parallelgleise befinden, daß aber bei den später durchgeführten Messungen bei geschliffenen Schienen der umgekehrte Fall eintrat (siehe Bericht 2 dieses Forschungsvorhabens). Diese Tatsache führte zu der Annahme, daß unterschiedliche Schienenrauhigkeiten zwischen rechter und linker Schiene bei den Messungen vorlagen - was auch für alle Meßorte meßtechnisch nachgewiesen werden konnte (siehe Tabelle 3) -, so daß die Korrektur ΔL_{Roll} in Abschnitt 4.4.2 eingeführt werden mußte. Dies erklärt auch, daß die Pegelunterschiede bei IC-, EC-, RE- und Güterzügen geringer ist als bei ICE-Zügen (siehe Abschnitt 4.4.2). Es sei darauf hingewiesen, daß die Pegeldifferenzen in Tabelle 7 nur die Meßebenen ohne SSW betreffen, während die in Tabelle 5 angesetzten Korrekturwerte aus den Schienenrauhigkeiten an jeweils beiden Meßorten berechnet wurden, so daß sich die beiden Tabellen folglich in ihren Werten unterscheiden.

Schließlich wird die Wirkung der SSW berechnet. Die folgenden Tabellen 8 und 9 enthalten zunächst die Differenz der gemittelten örtlichen spezifischen Grundwerte ($L_{\mathrm{m,s,OS},i}$ - $L_{\mathrm{m,s,MS},i}$) in den Meßebenen mit und ohne SSW für die Mikrofone i = 1 bis 3 für alle analysierten Klassen. Gemäß Abschnitt 4.4 bzw. Gleichung (9) gibt diese Differenz noch nicht die tatsächliche Einfügungsdämpfung der SSW wieder; vielmehr müssen noch zwei Korrekturterme hinzugefügt werden. Zum einen wird die Differenz der an den Referenzmikrofonen 4 gemessenen Pegel ($L_{\mathrm{m,s,OS},4}$ - $L_{\mathrm{m,s,MS},4}$) hiervon abgezogen, zum anderen muß anhand des Korrekturterms ΔL_{Roll} der Rauhigkeitsunterschied zwischen rechter und linker Schiene berücksichtigt werden. Beide Korrekturterme sind in den Tabellen 8 und 9 aufgelistet. Ebenfalls eingetragen sind die nach (15) und (17) berechneten Vertrauensbereiche.

Mikrofon	$L_{m,s,OS,i} - L_{m,s,MS,i}$ [dB(A)]	$L_{m,s,OS,4} - L_{m,s,MS,4}$ [dB(A)]	ΔL_{Roll} [dB(A)]	ΔL_{SSW} [dB(A)]
ICE 1-Vorbeifahrten an den Meßorten A und B mit ca. 200 km/h				
1[1)]	20,3	5,9	1,2	13,2 ± 1,2
1[2)]	15,3	6,8	1,2	7,3 ± 0,5
2	15,3	6,5	1,2	7,6 ± 0,4
3	16,1	6,5	1,2	8,4 ± 0,5
ICE 1-Vorbeifahrten an den Meßorten A und B mit ca. 250 km/h				
1[1)]	18,6	5,9	0,9	11,8 ± 0,7
1[2)]	12,8	5,8	0,9	6,1 ± 6,4
2	13,5	5,9	0,9	6,7 ± 0,6
3	13,9	5,9	0,9	7,1 ± 0,6
ICE 1-Vorbeifahrten an den Meßorten A und B mit ca. 280 km/h				
1[1)]	16,7	4,9	0,7	11,1 ± 0,4
1[2)]	11,2	5,0	0,7	5,5 ± 0,8
2	11,6	5,0	0,7	5,9 ± 0,3
3	12,0	5,0	0,7	6,3 ± 0,3
ICE 1-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 200 km/h				
1	15,4	-3,2	2,8	15,8 ± 0,4
2	10,9	-3,2	2,8	11,3 ± 0,4
3	10,8	-3,2	2,8	11,2 ± 0,4
ICE 2-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 200 km/h				
1	15,4	-3,4	2,8	16,0 ± 0,7
2	11,1	-3,4	2,8	11,7 ± 0,7
3	11,7	-3,4	2,8	12,3 ± 0,8

[1)] Mittelung über Vorbeifahrten 001 bis 033 (Höhe über SO = 0,0 m)

[2)] Mittelung über Vorbeifahrten 201 bis 223 (Höhe über SO = 1,2 m)

Tabelle 8 Gemessene Einfügungsdämpfungen ΔL_{SSW} für alle analysierten Klassen (hier ICE 1- und ICE 2-Züge) bei ungeschliffenen Schienen einschließlich der Korrekturen gemäß Gleichung (9)

Mikrofon	$L_{m,s,OS,i} - L_{m,s,MS,i}$ [dB(A)]	$L_{m,s,OS,4} - L_{m,s,MS,4}$ [dB(A)]	ΔL_{Roll} [dB(A)]	ΔL_{SSW} [dB(A)]
IC-Vorbeifahrt an den Meßorten A und B mit ca. 200 km/h				
1	15,8	5,8	1,2	8,8[1)]
2	15,2	5,8	1,2	8,2[1)]
3	15,9	5,8	1,2	8,9[1)]
IC-, EC- und IR-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 160 km/h				
1	13,8	-4,0	2,7	15,1 ± 1,1
2	8,8	-4,0	2,7	10,1 ± 1,1
3	8,4	-4,0	2,7	9,7 ± 1,2
RE-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 130 km/h				
1	13,7	-3,8	0,0	17,5 ± 3,4
2	8,6	-3,8	0,0	12,4 ± 3,4
3	8,7	-3,8	0,0	12,5 ± 3,4
Güterzug-Vorbeifahrten an den Meßorten A und B mit ca. 110 km/h				
1[2)]	21,6	2,3	0,0	19,3 ± 0,4
2	14,9	2,3	0,0	12,6 ± 0,4
3	14,8	2,3	0,0	12,5 ± 0,4
Güterzug-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 90 km/h				
1	9,7	-4,1	0,0	13,8 ± 2,0
2	5,0	-4,1	0,0	9,1 ± 2,2
3	4,2	-4,1	0,0	8,3 ± 2,5

[1)] Angabe eines Vertrauensbereichs nicht möglich, da $N = 1$

[2)] Abstand von Gleismitte 6,9 m, Höhe über SO = 0,0 m

Tabelle 9 Gemessene Einfügungsdämpfungen ΔL_{SSW} für alle analysierten Klassen (hier IC-, EC-, IR-, RE- und Güterzüge) bei ungeschliffenen Schienen einschließlich der Korrekturen gemäß Gleichung (9)

Eine umfassende Interpretation der Ergebnisse von Tabelle 8 und 9 erfolgt erst im nächsten Abschnitt beim Vergleich mit der nach Schall 03 berechneten Einfügungsdämpfung. Es ist aber im Falle der Meßebenen A und B schon deutlich erkennbar, daß die Wirkung einer SSW bei ICE 1-Vorbeifahrten geringer ausfällt als bei Zügen,

deren Emission größtenteils im Rad/Schiene-Bereich erzeugt wird (d. h. bei Güterzügen). An den Meßorten C und D kehrt sich dieses Ergebnis hingegen um, was mit der hohen Schienenrauhigkeit und der relativ großen Meßunsicherheit zusammenhängt (siehe folgenden Abschnitt). Ferner zeigt sich, daß die Wirkung der SSW bei ICE 1-Vorbeifahrten mit steigender Geschwindigkeit abnimmt, was durch den zunehmenden Einfluß hochliegender aerodynamischer Schallquellen zu begründen ist.

Bei fast allen gemessenen Einfügungsdämpfungen, ausgenommen RE- und Güterzüge, fällt der meßtechnisch ermittelte Vertrauensbereich kleiner aus als die Größe ΔL_{Roll}, welche in Abschnitt 4.5 als "Unsicherheitsbereich" bezeichnet wurde. In solchen Fällen muß in den folgenden Betrachtungen dieser Wert an die Stelle des Vertrauensbereichs treten, um die tatsächlichen Unwägbarkeiten richtig zu beschreiben. Bei der einen IC-Vorbeifahrt an den Meßorten A und B kann überhaupt kein Vertrauensbereich angegeben werden, so daß diese Fahrt im folgenden Abschnitt nicht weiter aufgeführt wird.

5.4 Vergleich mit Schall 03

Als nächster Schritt ist für jede Mikrofonposition die Einfügungsdämpfung der jeweiligen SSW nach Schall 03 [1] zu berechnen. Dies wird anhand eines internen Rechenmodells realisiert, welches die Vorschriften der Schall 03 erfüllt. Für jedes Mikrofon wird hierbei eine Pegeldifferenz $\Delta L_{SSW}'$ berechnet, wobei die Immissionspegel ohne bzw. mit vorhandener SSW subtrahiert werden. Diese Pegel werden nach dem Teilstückverfahren berechnet und enthalten im Falle der SSW für jedes Teilstück die Pegeldifferenz $D_{c,k}$ eines Schallschirms (Gleichung (12) in [1]). Die Mikrofonposition und die Lage der jeweiligen SSW (Abstand von Gleismitte, Höhe über SO) werden hierbei berücksichtigt, und die SSW wird jeweils als unendlich lang angenommen. Alle emissionsseitigen Parameter (Zugart, -länge, -geschwindigkeit sowie Fahrbahnart) entfallen bei der Differenzbildung und sind daher nicht relevant.

In den folgenden Tabellen 10 und 11 sind diese berechneten Einfügungsdämpfungen $\Delta L_{SSW}'$ zusammen mit den gemessenen Werten (ΔL_{SSW}, siehe Abschnitt 5.3) aufgelistet. Zur Orientierung sind auch die Schirmwerte z_0 [1] in den Tabellen genannt, welche sich jeweils auf das Teilstück beziehen, welches genau in der Meßebene liegt. Die Differenz zwischen gemessenen und berechneten Einfügungsdämpfungen wird als

Mikrofon	Schirmwert z_0 [m]	ΔL_{SSW} (gemessen) [dB(A)]	$\Delta L_{SSW}'$ (nach Schall 03) [dB(A)]	$\Delta L_{Schall\ 03}$ (Differenz) [dB(A)]
ICE 1-Vorbeifahrten an den Meßorten A und B mit ca. 200 km/h				
1[1)]	1,030	13,2 ± 1,2	16,0	-2,8 ± 1,2
1[2)]	0,434	7,3 ± 1,2	12,9	-5,6 ± 1,2
2	0,235	7,6 ± 1,2	10,5	-2,9 ± 1,2
3	0,274	8,4 ± 1,2	9,2	-0,8 ± 1,2
ICE 1-Vorbeifahrten an den Meßorten A und B mit ca. 250 km/h				
1[1)]	1,030	11,8 ± 0,9	16,0	-4,2 ± 0,9
1[2)]	0,434	6,1 ± 6,4	12,9	-6,8 ± 6,4
2	0,235	6,7 ± 0,9	10,5	-3,8 ± 0,9
3	0,274	7,1 ± 0,9	9,2	-2,1 ± 0,9
ICE 1-Vorbeifahrten an den Meßorten A und B mit ca. 280 km/h				
1[1)]	1,030	11,1 ± 0,7	16,0	-4,9 ± 0,7
1[2)]	0,434	5,5 ± 0,8	12,9	-7,4 ± 0,8
2	0,235	5,9 ± 0,7	10,5	-4,6 ± 0,7
3	0,274	6,3 ± 0,7	9,2	-2,9 ± 0,7
ICE 1-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 200 km/h				
1	0,504	15,8 ± 2,8	13,5	+2,3 ± 2,8
2	0,327	11,3 ± 2,8	11,1	+0,2 ± 2,8
3	0,366	11,2 ± 2,8	9,4	+1,8 ± 2,8
ICE 2-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 200 km/h				
1	0,504	16,0 ± 2,8	13,5	+2,5 ± 2,8
2	0,327	11,7 ± 2,8	11,1	+0,6 ± 2,8
3	0,366	12,3 ± 2,8	9,4	+2,9 ± 2,8

[1)] Mittelung über Vorbeifahrten 001 bis 033 (Höhe über SO = 0,0 m)

[2)] Mittelung über Vorbeifahrten 201 bis 223 (Höhe über SO = 1,2 m)

Tabelle 10 Schirmwerte z_0, gemessene und nach Schall 03 berechnete Einfügungsdämpfungen der untersuchten SSW für alle analysierten Klassen (hier ICE 1- und ICE 2-Züge) bei ungeschliffenen Schienen und Abweichungen zwischen Messung und Rechnung

Mikrofon	Schirmwert z_0 [m]	ΔL_{SSW} (gemessen) [dB(A)]	$\Delta L_{SSW}'$ (nach Schall 03) [dB(A)]	$\Delta L_{Schall\ 03}$ (Differenz) [dB(A)]
IC-, EC- und IR-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 160 km/h				
1	0,504	15,1 ± 2,7	13,5	+1,6 ± 2,7
2	0,327	10,1 ± 2,7	11,1	-1,0 ± 2,7
3	0,366	9,7 ± 2,7	9,4	+0,3 ± 2,7
RE-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 130 km/h				
1	0,504	17,5 ± 3,4	13,5	+4,0 ± 3,4
2	0,327	12,4 ± 3,4	11,1	+1,3 ± 3,4
3	0,366	12,5 ± 3,4	9,4	+3,1 ± 3,4
Güterzug-Vorbeifahrten an den Meßorten A und B mit ca. 110 km/h				
1[1)]	1,149	19,3 ± 0,4	16,5	+2,8 ± 0,4
2	0,235	12,6 ± 0,4	10,5	+2,1 ± 0,4
3	0,274	12,5 ± 0,4	9,2	+3,3 ± 0,4
Güterzug-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 90 km/h				
1	0,504	13,8 ± 2,0	13,5	+0,3 ± 2,0
2	0,327	9,1 ± 2,2	11,1	-2,0 ± 2,2
3	0,366	8,3 ± 2,5	9,4	-1,1 ± 2,5

[1)] Abstand von Gleismitte 6,9 m, Höhe über SO = 0,0 m

Tabelle 11 Schirmwerte z_0, gemessene und nach Schall 03 berechnete Einfügungsdämpfungen der untersuchten SSW für alle analysierten Klassen (hier IC-, EC-, IR-, RE- und Güterzüge) bei ungeschliffenen Schienen und Abweichungen zwischen Messung und Rechnung

$\Delta L_{Schall\ 03}$ bezeichnet und stellt das endgültige Ergebnis der Untersuchung dar. Negative Werte für $\Delta L_{Schall\ 03}$ bedeuten, daß die gemessene Einfügungsdämpfung geringer ist als nach Schall 03 berechnet. Die in den Tabellen 10 und 11 gezeigten Ergebnisse werden in Tabelle 12 und 13 nochmals vorgestellt, wobei diesmal bei der Berechnung nach Schall 03 die derzeit umstrittene Korrektur zur Berücksichtigung der Boden- und Meteorologiedämpfung D_{BM} in Absprache mit dem Auftraggeber nicht angewandt wurde.

Mikrofon	Schirmwert z_0 [m]	ΔL_{SSW} (gemessen) [dB(A)]	$\Delta L_{SSW}'$ (nach Schall 03) [dB(A)]	$\Delta L_{Schall\ 03}$ (Differenz) [dB(A)]
ICE 1-Vorbeifahrten an den Meßorten A und B mit ca. 200 km/h				
1[1)]	1,030	13,2 ± 1,2	16,2	-3,1 ± 1,2
1[2)]	0,434	7,3 ± 1,2	13,1	-5,8 ± 1,2
2	0,235	7,6 ± 1,2	10,9	-3,3 ± 1,2
3	0,274	8,4 ± 1,2	11,2	-2,8 ± 1,2
ICE 1-Vorbeifahrten an den Meßorten A und B mit ca. 250 km/h				
1[1)]	1,030	11,8 ± 0,9	16,2	-4,4 ± 0,9
1[2)]	0,434	6,1 ± 6,4	13,1	-7,0 ± 6,4
2	0,235	6,7 ± 0,9	10,9	-4,2 ± 0,9
3	0,274	7,1 ± 0,9	11,2	-4,1 ± 0,9
ICE 1-Vorbeifahrten an den Meßorten A und B mit ca. 280 km/h				
1[1)]	1,030	11,1 ± 0,7	16,2	-5,1 ± 0,7
1[2)]	0,434	5,5 ± 0,8	13,1	-7,6 ± 0,8
2	0,235	5,9 ± 0,7	10,9	-5,0 ± 0,7
3	0,274	6,3 ± 0,7	11,2	-4,9 ± 0,7
ICE 1-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 200 km/h				
1	0,504	15,8 ± 2,8	13,6	+2,2 ± 2,8
2	0,327	11,3 ± 2,8	12,0	-0,7 ± 2,8
3	0,366	11,2 ± 2,8	12,2	-1,0 ± 2,8
ICE 2-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 200 km/h				
1	0,504	16,0 ± 2,8	13,6	+2,4 ± 2,8
2	0,327	11,7 ± 2,8	12,0	-0,3 ± 2,8
3	0,366	12,3 ± 2,8	12,2	+0,1 ± 2,8

[1)] Mittelung über Vorbeifahrten 001 bis 033 (Höhe über SO = 0,0 m)

[2)] Mittelung über Vorbeifahrten 201 bis 223 (Höhe über SO = 1,2 m)

Tabelle 12 Schirmwerte z_0, gemessene und nach Schall 03 **ohne Korrekturwert** D_{BM} berechnete Einfügungsdämpfungen der untersuchten SSW für alle analysierten Klassen (hier ICE 1- und ICE 2-Züge) bei ungeschliffenen Schienen und Abweichungen zwischen Messung und Rechnung

Mikrofon	Schirmwert z_0 [m]	ΔL_{SSW} (gemessen) [dB(A)]	$\Delta L_{SSW}'$ (nach Schall 03) [dB(A)]	$\Delta L_{Schall\ 03}$ (Differenz) [dB(A)]
IC-, EC- und IR-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 160 km/h				
1	0,504	15,1 ± 2,7	13,6	+1,5 ± 2,7
2	0,327	10,1 ± 2,7	12,0	-1,9 ± 2,7
3	0,366	9,7 ± 2,7	12,2	-2,5 ± 2,7
RE-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 130 km/h				
1	0,504	17,5 ± 3,4	13,6	+3,9 ± 3,4
2	0,327	12,4 ± 3,4	12,0	+0,4 ± 3,4
3	0,366	12,5 ± 3,4	12,2	+0,3 ± 3,4
Güterzug-Vorbeifahrten an den Meßorten A und B mit ca. 110 km/h				
1[1)]	1,149	19,3 ± 0,4	16,7	+2,6 ± 0,4
2	0,235	12,6 ± 0,4	10,9	+1,7 ± 0,4
3	0,274	12,5 ± 0,4	11,2	+1,3 ± 0,4
Güterzug-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 90 km/h				
1	0,504	13,8 ± 2,0	13,6	+0,2 ± 2,0
2	0,327	9,1 ± 2,2	12,0	-2,9 ± 2,2
3	0,366	8,3 ± 2,5	12,2	-3,9 ± 2,5

[1)] Abstand von Gleismitte 6,9 m, Höhe über SO = 0,0 m

Tabelle 13 Schirmwerte z_0, gemessene und nach Schall 03 **ohne Korrekturwert** D_{BM} berechnete Einfügungsdämpfungen der untersuchten SSW für alle analysierten Klassen (hier IC-, EC-, IR-, RE- und Güterzüge) bei ungeschliffenen Schienen und Abweichungen zwischen Messung und Rechnung

Als aussagekräftigste Ergebnisse sind die jeweils für das Mikrofon 2 berechneten Werte $\Delta L_{Schall\ 03}$ anzusehen, also für den Immissionsort in 25 m Entfernung von Gleismitte. In 50 m Entfernung, also am Mikrofon 3, sind diese Pegeldifferenzen nur dann als realistisch einzustufen, wenn auch der starke Einfluß der Boden- und Meteorologiedämpfung D_{BM} richtig formuliert ist. Wird diese Größe nämlich nicht berücksichtigt, fallen die Abweichungen zur Schall 03 zwischen 2 und 2,8 dB(A) höher aus.

Die für Mikrofon 1 ermittelten Werte $\Delta L_{\text{Schall 03}}$ weichen in allen Fällen von den entsprechenden Werten für Mikrofon 2 oft um mehrere dB(A) ab, und zwar teils nach oben, teils nach unten. An dieser Mikrofonposition wirken sich kleinste Abweichungen zwischen Realität und Modell offenbar stark aus, so daß diese Werte im folgenden nicht weiter interpretiert werden. Wegen seiner geringen Entfernung von 7,5 m zur Gleismitte kommt dieser Immissionsort in der praktischen Schallschutzplanung ohnehin so gut wie nicht vor.

- ICE 1- und ICE 2-Vorbeifahrten

Wie bereits aus anderen Messungen und Prognoserechnungen bekannt ist [2, 3], wird die Wirkung einer SSW durch die Schall 03 beim ICE meist überschätzt. Diese Überschätzung wächst mit der Geschwindigkeit, da sich die relevanten Schallquellen des ICE in ihrer mittleren vertikalen Position mit zunehmender Geschwindigkeit vom Rad/Schiene-Bereich nach oben hin verlagern, was eine geringere Einfügungsdämpfung der SSW zur Folge hat [3]. Im vorliegenden Fall zeigt sich dies insbesondere bei Vorbeifahrten des ICE 1 auf einem akustisch guten Gleis (Meßebene A). Die Diskrepanz beträgt z. B. für Mikrofon 2 2,9 dB(A) bei ca. 200 km/h, 3,8 dB(A) bei ca. 250 km/h und 4,6 dB(A) bei ca. 280 km/h gemäß Tabelle 10.

Für Mikrofon 3 ergeben sich geringere Werte $\Delta L_{\text{Schall 03}}$; gegenüber Mikrofon 2 haben sich ihre Beträge um 1,7 bis 2,1 dB(A) verringert. Dies muß nicht unbedingt bedeuten, daß die Schall 03 die Einfügungsdämpfung einer SSW bei einem Mikrofonabstand von 50 m besser beschreibt als bei 25 m; vielmehr kommt es durch die ebenfalls umstrittene Größe D_{BM} offenbar zu einer teilweisen Kompensation zweier gegenläufiger Fehlereinflüsse. Dies ist daran zu erkennen, daß durch das Fehlen der Korrektur D_{BM} in den Ergebnissen der Tabellen 12 und 13 relativ ähnliche Werte $\Delta L_{\text{Schall 03}}$ für die Mikrofonpositionen 2 und 3 zu verzeichnen sind. Bei einer Aktualisierung der Schall 03 hinsichtlich der Wirkung einer SSW ist daher darauf zu achten, ob die Größe D_{BM} in ihrer jetzigen Form erhalten bleiben kann.

Bei einem akustisch schlechten Gleis (Meßebene C) tritt der Fall ein, daß die nach Schall 03 berechneten Einfügungsdämpfungen für ICE 1- und ICE 2-Züge am Mikrofon 2 etwa den gemessenen Werten entsprechen. Aufgrund der hohen Schienenrauhigkeit ist das Rollgeräusch hier als Hauptschallquelle anzusehen; hochliegende Schall-

quellen fallen hingegen kaum ins Gewicht. Da der Berechnung nach Schall 03 die Annahme einer Schallquelle in Höhe der SO zugrunde liegt, stimmen Rechnung und Messung in diesem Fall recht gut überein. Durch die Unterschiede zwischen den Rauhigkeiten von rechter und linker Schiene sind diese Werte allerdings mit Unsicherheiten von ca. ±3 dB(A) behaftet.

Die bei ICE 1- und ICE 2-Vorbeifahrten erhobenen Daten können insgesamt als in sich stimmig bzw. nachvollziehbar bezeichnet werden. Dies gilt leider nicht in gleichem Maße für die anderen betrachteten Zugarten. Die im folgenden auftretenden Unstimmigkeiten dürften in erster Linie mit der großen Meßunsicherheit zusammenhängen, die sich in den angegebenen Vertrauens- bzw. Unsicherheitsbereichen äußern.

- IC-, EC- und IR-Vorbeifahrten

Hochliegende Schallquellen sind bei diesen Zugarten weniger ausgeprägt als beim ICE 1 oder ICE 2, so daß die gemessene Einfügungsdämpfung entsprechend höher ausfallen müßte. Bei Meßebene C wird am Mikrofon 2 hingegen eine um mehr als 1 dB(A) niedrigere Einfügungsdämpfung beobachtet als beim ICE 1 oder ICE 2. Dies kann dadurch verursacht sein, daß die Korrektur ΔL_{Roll} für diese Zugarten nicht richtig angewandt wurde, da der Anteil der hinteren Radreihe an der Gesamtemission doch größer ist als vermutet.

- RE- und Güterzug-Vorbeifahrten

Bei Zügen, deren Schallemission fast ausschließlich vom Rollgeräusch dominiert wird, ist eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Schall 03 zu erwarten. Bei RE-Vorbeifahrten an Meßebene C und bei Güterzug-Vorbeifahrten an Meßebene A liegt die gemessene Einfügungsdämpfung im Falle des Mikrofons 2 sogar um 1 bis 2 dB(A) über den nach Schall 03 berechneten Werten und befindet sich damit auf der "sicheren Seite".

Bei Güterzug-Vorbeifahrten an der Meßebene C wird hingegen eine Differenz $\Delta L_{Schall\ 03}$ von -2 dB(A) für Mikrofon 2 festgestellt. Eine Erklärung hierfür ist möglicherweise die ungenügende Berücksichtigung der Tatsache, daß die SSW am Meßort C lediglich eine Ausdehnung von 105 m in Fahrtrichtung der betrachteten

Züge hatte (siehe Bild 5). Wie bereits erwähnt, wurde aus diesem Grund nur die erste Hälfte der Zugvorbeifahrt zur Berechnung der Einfügungsdämpfung herangezogen; möglicherweise reicht aber auch diese Korrektur nicht aus, da bei langen Güterzügen zum Zeitpunkt der halben Zugvorbeifahrt bereits ein Teil des Zuges den nicht abgeschirmten Streckenteil erreicht hat. Weitere Einflüsse betreffen die SSW an sich; so sollte z. B. ihr Absorptionsgrad auf der dem Zug zugewandten Seite überprüft werden. Neben diesen möglichen Fehlerquellen sei auch daran erinnert, daß die bei Güterzug-Vorbeifahrten an der Meßebene C festgestellte Pegeldifferenz einer Unsicherheit von ± 2 dB(A) unterliegt und ohnehin nur beschränkt aussagefähig ist.

6. Zusammenfassung

Die vorliegenden Ergebnisse aus Messungen an einer Schnellfahr- bzw. einer Ausbaustrecke der DB AG zeigen, daß mit der Schall 03 in der Fassung von 1990 die Einfügungsdämpfung einer Schallschutzwand nicht immer exakt berechnet wird. Im Falle von Zügen, bei denen der Hauptanteil der Schallemission im Rad/Schiene-Bereich erzeugt wird, liefert die Schall 03 eine ausreichende Genauigkeit. Bei Vorbeifahrten des ICE 1 bzw. ICE 2 wird hingegen die Wirkung der SSW nach Schall 03 meist um mehrere dB(A) überschätzt, da die hochliegenden Schallquellen dieser Züge durch die SSW keine Abschirmwirkung erfahren. Nur bei einer sehr hohen Schienenrauhigkeit, d. h. im vorliegenden Fall bei Grundwerten von ca. 60 dB(A), stimmen Messung und Rechnung auch bei ICE-Vorbeifahrten in etwa überein, wobei dies aber nicht auf den "durchschnittlichen" Gleiszustand gemäß Schall 03 übertragen werden kann.

Bei ICE-Vorbeifahrten ist die genannte Überschätzung der Schall 03 zudem geschwindigkeitsabhängig. Bei einem guten Schienenzustand ergaben sich für eine Schallschutzwand mit einer Höhe von 2 m über SO und einem Abstand von 4,5 m von Gleismitte Einfügungsdämpfungen für eine Mikrofonposition in 25 m Entfernung von Gleismitte, die bei 200 km/h ca. 3 dB(A) und bei 280 km/h ca. 5 dB(A) geringer ausfielen als nach Schall 03 berechnet.

Die Wirkung einer Schallschutzwand ist stark abhängig von Gleisgüte, Zugart und Zuggeschwindigkeit, so daß diese Parameter in geeigneter Weise in eine zukünftige

Berechnungsvorschrift in der Schall 03 einfließen sollten. Eine genauere Formulierung dieser Abhängigkeiten kann erst anhand einer Parameterstudie erfolgen, wobei die Schallimmission bei einer ICE-Vorbeifahrt unter Einbeziehung einer Schallschutzwand durch das Rechenmodell AD-PRO 2.0 nachzubilden ist. Hierzu sei auf die Ergebnisse des Arbeitspakets 3 dieses Forschungsvorhabens verwiesen.

7. Literatur

[1] Information Akustik 03, Richtlinie zur Berechnung der Schallimmissionen von Schienenwegen - Schall 03.
Deutsche Bundesbahn, Bundesbahn-Zentralamt München, Ausgabe 1990

[2] L. Willenbrink et al.
Luftschallmessungen zur Bestimmung des Boden- und Meteorologie-Dämpfungsmaßes D_{BM}: Erste Zusatzauswertung, Auflistung sämtlicher Daten.
Deutsche Bundesbahn, Bericht 256 014, München, 1992

[3] B. Barsikow
Schallimmissionspegel während Vorbeifahrten des ICE bei freier Schallausbreitung und beim Vorhandensein einer Schallschutzwand.
Ingenieurbüro akustik-data, Bericht Nr. 93/3, 1993

[4] B. Barsikow
PRODB - ein Rechenmodell zur Prognose der Schallimmission von IC- und ICE-Zügen der Deutschen Bundesbahn.
Ingenieurbüro akustik-data, Bericht Nr. 92/3, 1992

[5] Telefonische Auskunft von Herrn Meier, DB AG, Baubezirksleiter Bahnmeisterei Göttingen am 21.11.1996

[6] D. Schwarz et al.
Messungen mit dem RM 1200E bei Northeim, Niederrodenbach und Langenselbold vor dem Schleifen, Schnellfahrstrecke und Ausbaustrecke.
DB AG, Zentralbereich Basistechnologien, ZBT 4, Bericht 50760, 1996

[7] B. Müller und B. Barsikow
Schallemission von Rädern mit und ohne gegen Fahrzeugvibrationen wirkenden Absorbern und von gummigefederten Einringrädern Bo 84.
Ingenieurbüro akustik-data, Bericht Nr. 92/6, 1992

[8] M. G. Dittrich, F. J. W. Biegstraaten, P. C. G. J. Dings und D. J. Thompson
Wheel roughness and railway rolling noise: The influence of braking systems and mileage.
Proc. Transport Noise, St. Petersburg, 143-146, 1994

[9] D. J. Thompson
On the relationship between wheel and rail surface roughness and rolling noise.
Journal of Sound and Vibration, 193(1), 149-160, 1996

[10] B. Hemsworth
Noise research for British Railways.
Proc. International Workshop "Noise Abatement of Railway Vehicles", 109-125, Berlin, 1996

Anhang zu Bericht 1

Inhaltsverzeichnis

- Auflistung aller ausgewerteten Zugvorbeifahrten bei ungeschliffenen Schienen

Tabelle A1: Meßort A bzw. B
Tabelle A2: Meßort C bzw. D

- Zusammenstellung von Bildern mit Pegelverläufen und Spektren von repräsentativen Zugvorbeifahrten

Tabelle A3: Parameterliste für die Bilder A1 bis A72

- Geschwindigkeiten, Zuglängen und Schalldruckpegel sowie Mittelwerte und Streuungen für eine ausgewählte Datenklasse (ICE 1-Vorbeifahrten mit ca. 200 km/h gemessen mit Mikrofon 2 bei ungeschliffenen Schienen)

Tabelle A4: Meßebene B, ohne SSW
Tabelle A5: Meßebene A, mit SSW

- Mittelwerte und Streuungen bei allen Zugvorbeifahrten jeweils einer Datenklasse

Tabelle A6: ICE 1-Vorbeifahrten an den Meßorten A und B mit ca. 200 km/h
Tabelle A7: ICE 1-Vorbeifahrten an den Meßorten A und B mit ca. 250 km/h
Tabelle A8: ICE 1-Vorbeifahrten an den Meßorten A und B mit ca. 280 km/h

Tabelle A9: ICE 1-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 200 km/h
Tabelle A10: ICE 2-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 200 km/h

Tabelle A11: IC-Vorbeifahrt an den Meßorten A und B mit ca. 200 km/h

Tabelle A12: IC-, EC- und IR-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 160 km/h

Tabelle A13: RE-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 130 km/h

Tabelle A14: Güterzug-Vorbeifahrten an den Meßorten A und B mit ca. 110 km/h

Tabelle A15: Güterzug-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 90 km/h

- Bilder mit Pegelverläufen und Spektren von repräsentativen Zugvorbeifahrten

Bild A1 bis Bild A72: Auflistung der Bilder siehe Tabelle A3

Fahrt Nr.	Datum	Zugart	υ_{OS} [1] [km/h]	υ_{MS} [2] [km/h]	*Tz-Nr/* Lok [3]	Wagenbauart und Reihung [4]	Absorber bekannt [5]	Beispiel Bilder
006	25.09.96	ICE 1	209,5	222,8	*173*	12 Mw	nein	-
007	25.09.96	ICE 1	275,5	277,5	*179*	10 Mw	nein	-
009	25.09.96	ICE 1	276,5	278,5	*174*	12 Mw	nein	-
010	25.09.96	ICE 1	196,0	197,8	*169*	12 Mw	ja	A1 - A8
011	25.09.96	ICE 1	255,1	250,0	*188*	10 Mw	ja	-
012	25.09.96	ICE 1	277,6	275,9	*153*	12 Mw	nein	A9 - A16
013	25.09.96	ICE 1	201,4	201,1	*178*	12 Mw	nein	-
014	25.09.96	ICE 1	255,8	257,5	-	12 Mw	nein	-
015	25.09.96	ICE 1	273,3	272,4	*185*	10 Mw	ja	-
016	25.09.96	ICE 1	249,5	250,3	*158*	12 Mw	nein	-
018	25.09.96	ICE 1	245,7	244,9	*181*	10 Mw	ja	A17 - A24
019	25.09.96	ICE 1	248,3	248,4	*171*	12 Mw	ja	-
022	25.09.96	ICE 1	246,8	246,5	*166*	12 Mw	nein	-
023	25.09.96	ICE 1	203,7	202,0	*161*	12 Mw	ja	-
024	25.09.96	ICE 1	276,1	271,3	*182*	10 Mw	nein	-
025	25.09.96	ICE 1	278,1	275,4	*167*	12 Mw	nein	-
026	25.09.96	ICE 1	201,3	200,8	*168*	12 Mw	ja	-
027	25.09.96	ICE 1	272,4	276,2	*186*	10 Mw	ja	-
028	25.09.96	ICE 1	276,6	274,3	*111*	12 Mw	nein	-
030	25.09.96	ICE 1	276,6	279,8	*189*	10 Mw	ja	-
032	25.09.96	ICE 1	276,2	276,9	*118*	12 Mw	nein	-
033	25.09.96	ICE 1	278,8	279,2	*154*	12 Mw	nein	-
201	28.09.96	ICE 1	273,8	274,3	*115*	12 Mw	nein	-
202	28.09.96	ICE 1	198,7	200,0	*169*	12 Mw	ja	-
203	28.09.96	ICE 1	248,2	248,9	*177*	12 Mw	nein	-
204	28.09.96	ICE 1	278,9	279,9	*189*	10 Mw	ja	-
206	28.09.96	ICE 1	273,0	278,9	*170*	12 Mw	ja	-
207	28.09.96	ICE 1	197,1	197,4	*112*	12 Mw	ja	-
208	28.09.96	ICE 1	277,8	278,8	*176*	12 Mw	nein	-
209	28.09.96	ICE 1	278,7	279,5	*164*	12 Mw	nein	-
210	28.09.96	ICE 1	198,0	197,9	*156*	12 Mw	ja	-
211	28.09.96	ICE 1	277,7	279,0	*183*	10 Mw	ja	-
212	28.09.96	ICE 1	276,9	278,7	*157*	12 Mw	nein	-
213	28.09.96	ICE 1	199,4	200,0	*166*	12 Mw	nein	-
214	28.09.96	ICE 1	198,9	200,2	*184*	10 Mw	ja	-
215	28.09.96	ICE 1	200,8	201,7	*154*	12 Mw	nein	-
216	28.09.96	ICE 1	202,2	203,1	*117*	12 Mw	ja	-
217	28.09.96	ICE 1	192,8	190,2	*185*	10 Mw	ja	-

218	28.09.96	ICE 1	246,4	247,4	*161*	12 Mw	ja	-
219	28.09.96	ICE 1	201,1	202,2	-	12 Mw	nein	-
220	28.09.96	ICE 1	274,5	279,7	*186*	10 Mw	ja	-
221	28.09.96	ICE 1	277,8	279,0	*109*	12 Mw	ja	-
222	28.09.96	ICE 1	198,0	202,9	*114*	12 Mw	ja	-
223	28.09.96	ICE 1	276,9	277,6	*179*	10 Mw	ja	-
205	28.09.96	IC	198,8	199,3	120	13 Wagen	-	A33 - A40
101	25.09.96	G	99,2	103,4	151	Lg, Hbi, Ha, Sg	-	-
102	25.09.96	G	105,1	107,8	151	Sg, Ha, Sgo	-	A25 - A32
103	25.09.96	G	105,6	106,7	151	Sgo, Sg	-	-
104	25.09.96	G	113,3	117,7	151	Sg, Hbi	-	-
105	25.09.96	G	117,6	112,5	151	Sgo, Sg, Lg, Hbs	-	-
106	25.09.96	G	107,3	99,2	151	Sg, Ib, Uc	-	-
107	25.09.96	G	113,1	99,5	120	Sgo, Sg	-	-
108	25.09.96	G	114,2	118,2	151	Sgo, Hbi	-	-
109	25.09.96	G	118,6	118,6	151	Sgo, Sg, Hbi, Shi	-	-
110	25.09.96	G	116,8	121,8	151	Sg, Hbi, Ha	-	-
111	25.09.96	G	111,0	116,8	151	Hbi, Sg	-	-
112	25.09.96	G	113,2	109,0	151	Hbi, Autotr., Sgo, Hbi	-	-
113	25.09.96	G	92,8	93,9	151	Hbi, Sg, Hbi, Sg	-	-
114	25.09.96	G	94,2	100,4	151	Sg	-	-
115	26.09.96	G	117,7	117,3	120	Sgo	-	-
116	26.09.96	G	115,4	119,4	151	Sg, Ha, Hb, Sg	-	-
117	26.09.96	G	115,7	114,8	151	Sgo, Sg	-	-
118	26.09.96	G	117,3	125,8	151	Sg, Ha, Hbi	-	-
119	26.09.96	G	116,6	115,5	151	Sg	-	-
120	26.09.96	G	118,2	122,4	151	Sgo, Sg	-	-
121	26.09.96	G	109,0	118,6	151	Sg, G	-	-

[1] Geschwindigkeitsangabe bezieht sich auf den Meßort ohne Schallschutzwand (OS)

[2] Geschwindigkeitsangabe bezieht sich auf den Meßort mit Schallschutzwand (MS)

[3] Lokomotiv-Baureihe; im Falle des ICE 1 (BR 401) Angabe der Tz-Nr. (kursiv)

[4] Mw = Mittelwagen des ICE 1

[5] Angabe der Rad/Absorber-Konfiguration der betreffenden ICE 1

Tabelle A1 Auflistung aller ausgewerteten Zugvorbeifahrten am Meßort A bzw. B bei ungeschliffenen Schienen

Fahrt Nr.	Datum	Zugart	v_{OS} [1] [km/h]	v_{MS} [2] [km/h]	*Tz-Nr/* Lok [3]	Wagenbauart und Reihung [4]	Absorber bekannt [5]	Beispiel Bilder
303	30.09.96	ICE 1	190,0	198,5	*116*	12 Mw	nein	-
306	30.09.96	ICE 1	194,5	192,8	*111*	12 Mw	nein	-
307	30.09.96	ICE 1	196,3	177,5	*119*	12 Mw	nein	-
309	30.09.96	ICE 1	199,0	199,0	*188*	10 Mw	ja	A41 - A48
310	30.09.96	ICE 1	197,8	197,8	*173*	12 Mw	nein	-
311	30.09.96	ICE 1	193,6	193,6	*169*	12 Mw	ja	-
313	30.09.96	ICE 1	198,7	198,7	*187*	10 Mw	ja	-
315	30.09.96	ICE 1	198,5	198,5	*115*	12 Mw	nein	-
318	30.09.96	ICE 1	199,0	199,0	*190*	10 Mw	ja	-
319	30.09.96	ICE 1	199,4	197,4	*178*	12 Mw	nein	-
324	30.09.96	ICE 1	199,5	198,5	-	12 Mw	nein	-
406	01.10.96	ICE 1	197,7	197,3	-	12 Mw	nein	-
409	01.10.96	ICE 1	199,2	198,7	*184*	12 Mw	ja	-
410	01.10.96	ICE 1	199,6	192,8	-	12 Mw	nein	-
413	01.10.96	ICE 1	199,0	198,7	-	10 Mw	nein	-
414	01.10.96	ICE 1	197,5	187,2	-	12 Mw	nein	-
418	01.10.96	ICE 1	186,4	178,5	*154*	12 Mw	nein	-
422	01.10.96	ICE 1	196,5	194,7	*104*	12 Mw	nein	-
320	30.09.96	ICE 2	200,5	199,8	-	9 Mw	-	A49 - A56
407	01.10.96	ICE 2	199,9	200,1	-	9 Mw	-	-
412	01.10.96	ICE 2	200,1	202,9	-	9 Mw	-	-
423	01.10.96	ICE 2	179,9	177,6	-	9 Mw	-	-
304	30.09.96	IR	157,6	157,1	112	8 Wagen	-	-
312	30.09.96	IR	160,6	159,9	112	8 Wagen	-	-
317	30.09.96	EC	179,5	175,1	103	10 Wagen	-	-
325	30.09.96	IC	157,5	145,6	111	8 Wagen	-	-
404	01.10.96	IC	157,4	157,4	111	8 Wagen	-	-
408	01.10.96	IR	160,8	160,1	112	8 Wagen	-	-
411	01.10.96	IR	156,8	153,9	112	8 Wagen	-	-
419	01.10.96	EC	158,6	154,7	112	9 Wagen	-	-
424	01.10.96	IC	152,4	152,8	111	7 Wagen	-	A57 - A64
316	30.09.96	RE	112,4	114,0	110	5 Wagen (klotzgebremst)	-	-
415	01.10.96	(RE)	141,5	137,6	110	7 IC-Wagen, Autoreisezug	-	-
416	01.10.96	RE	138,2	137,1	110	7 Wagen (klotzgebremst)	-	-
420	01.10.96	RE	138,1	127,5	112	10 Wagen (klotzgebremst)	-	-

305	30.09.96	G	86,4	98,4	151	Sg	-	-
326	30.09.96	G	88,1	85,6	151	Fc	-	-
402	01.10.96	G	88,3	87,5	155	Autotr., Za, gemischt	-	-
405	01.10.96	G	92,1	91,2	155	gemischt, G	-	-
417	01.10.96	G	103,8	103,3	150	Ha	-	-
425	01.10.96	G	87,6	89,9	140	Fc	-	-
426	01.10.96	G	92,6	90,0	151	gemischt, Schüttgut	-	A65 - A72

[1] Geschwindigkeitsangabe bezieht sich auf den Meßort ohne Schallschutzwand (OS)

[2] Geschwindigkeitsangabe bezieht sich auf den Meßort mit Schallschutzwand (MS)

[3] Lokomotiv-Baureihe; im Falle des ICE 1 (BR 401) bzw. des ICE 2 (BR 402) Angabe der Tz-Nr. (kursiv)

[4] Mw = Mittelwagen des ICE 1 bzw. des ICE 2

[5] Angabe der Rad/Absorber-Konfiguration der betreffenden ICE 1

Tabelle A2 Auflistung aller ausgewerteten Zugvorbeifahrten am Meßort C bzw. D bei ungeschliffenen Schienen

Fahrt Nr.	Zugart	v [1] [km/h]	Meßort	L_h [2] [dB(A)]	L_v [2] [dB(A)]	Bilder
010	ICE 1	196,9	A/B	62,9	90,0	A1 - A8
012	ICE 1	276,8	A/B	64,6	93,1	A9 - A16
018	ICE 1	245,3	A/B	63,1	91,7	A17 - A24
102	G	106,5	A/B	66,4	88,8	A25 - A32
205	IC, EC	199,1	A/B	65,5	92,5	A33 - A40
309	ICE 1	199,0	C/D	68,6	96,4	A41 - A48
320	ICE 2	200,2	C/D	68,4	96,6	A49 - A56
424	IC, EC	152,6	C/D	64,6	92,9	A57 - A64
426	G	91,3	C/D	62,0	87,0	A65 - A72

[1] Mittelwert aus den Vorbeifahrgeschwindigkeiten in den Meßebenen OS und MS

[2] Schalldruckpegel von Mikrofon 4 am Meßort ohne SSW

Tabelle A3 Zusammenstellung von Bildern mit Pegelverläufen und Spektren von repräsentativen Zugvorbeifahrten

SSW	Fahrt	v [km/h]	l [m]	Mikro	L_A [dB(A)]	L_e [dB(A)]	L_v [dB(A)]	L_{Max} [dB(A)]	$L_{m,e}$ [dB(A)]
OS	006	209,5	357,9	2	62,66	88,36	89,95	92,16	52,70
OS	010	196,0	357,9	2	64,16	90,22	91,26	96,24	54,78
OS	013	201,4	357,9	2	64,11	89,95	91,28	95,38	54,49
OS	023	203,7	357,9	2	64,00	89,61	91,22	93,63	54,28
OS	026	201,3	357,9	2	63,77	89,59	90,93	94,27	54,16
OS	202	198,7	357,9	2	64,22	90,52	91,39	96,04	54,72
OS	207	197,1	357,9	2	63,57	89,53	90,65	94,59	54,14
OS	210	198,0	357,9	2	63,94	89,92	91,04	94,03	54,47
OS	213	199,4	357,9	2	63,22	88,71	90,21	92,46	53,69
OS	214	198,9	305,1	2	63,45	89,43	91,14	92,96	54,63
OS	215	200,8	357,9	2	63,72	89,49	90,82	93,63	54,13
OS	216	202,2	357,9	2	63,69	89,40	90,83	93,28	54,04
OS	217	192,8	305,1	2	62,65	88,67	90,20	93,00	54,10
OS	219	201,1	357,9	2	64,22	90,07	91,33	94,07	54,61
OS	222	198,0	357,9	2	63,57	89,27	90,65	92,51	54,10
OS	*M*	199,9	350,9	2	63,69	89,55	90,88	94,06	54,23
OS	*s*	3,8	18,6	2	0,50	0,60	0,45	1,26	0,51

Tabelle A4 Geschwindigkeiten, Zuglängen und Schalldruckpegel sowie Mittelwerte und Streuungen für alle ICE 1-Vorbeifahrten mit ca. 200 km/h gemessen mit Mikrofon 2 in Meßebene B bei ungeschliffenen Schienen

SSW	Fahrt	v [km/h]	l [m]	Mikro	L_A [dB(A)]	L_e [dB(A)]	L_v [dB(A)]	L_{Max} [dB(A)]	$L_{m,e}$ [dB(A)]
MS	006	222,8	357,9	2	49,41	74,79	75,73	83,38	38,91
MS	010	197,8	357,9	2	49,05	73,68	75,21	81,57	39,59
MS	013	201,1	357,9	2	48,70	73,56	74,84	81,92	39,09
MS	023	202,0	357,9	2	48,82	73,84	74,90	83,17	39,18
MS	026	200,8	357,9	2	48,11	72,72	74,15	80,49	38,52
MS	202	200,0	357,9	2	49,11	73,61	75,31	82,10	39,55
MS	207	197,4	357,9	2	47,50	72,24	73,71	79,71	38,06
MS	210	197,9	357,9	2	47,84	73,25	74,13	81,04	38,37
MS	213	200,0	357,9	2	48,67	73,59	74,85	80,88	39,11
MS	214	200,2	305,1	2	48,42	73,70	75,15	80,68	39,55
MS	215	201,7	357,9	2	48,26	72,80	74,47	80,50	38,63
MS	216	203,1	357,9	2	47,66	72,62	73,92	79,15	37,97
MS	217	190,2	305,1	2	47,57	72,62	74,08	79,31	39,14
MS	219	202,2	357,9	2	48,75	73,64	74,96	80,80	39,10
MS	222	202,9	357,9	2	48,28	73,50	74,40	80,14	38,60
MS	*M*	201,3	350,9	2	48,45	73,39	74,69	81,17	38,92
MS	*s*	6,7	18,6	2	0,59	0,65	0,58	1,26	0,52

Tabelle A5 Geschwindigkeiten, Zuglängen und Schalldruckpegel sowie Mittelwerte und Streuungen für alle ICE 1-Vorbeifahrten mit ca. 200 km/h gemessen mit Mikrofon 2 in Meßebene A bei ungeschliffenen Schienen

SSW (Ebene)		v [km/h]	l [m]	Mikro	L_h [dB(A)]	L_c [dB(A)]	L_v [dB(A)]	L_{Max} [dB(A)]	$L_{m,s}$ [dB(A)]
OS	*M*	202,4	357,9	1[1)]	68,69	95,41	96,09	100,56	58,70
MS	*M*	204,9	357,9	1[1)]	48,16	74,28	74,67	83,24	38,39
OS	*s*	4,9	0,0	1[1)]	0,77	0,81	0,70	2,13	0,97
MS	*s*	10,1	0,0	1[1)]	0,56	0,94	0,63	1,22	0,42
OS	*M*	198,7	347,4	1[2)]	66,08	92,68	93,50	97,06	56,71
MS	*M*	199,6	347,4	1[2)]	50,79	77,21	77,87	86,31	41,38
OS	*s*	2,6	22,3	1[2)]	0,79	0,74	0,79	0,93	0,76
MS	*s*	3,8	22,3	1[2)]	0,58	0,54	0,52	0,78	0,47
OS	*M*	199,9	350,9	2	63,69	89,55	90,88	94,06	54,23
MS	*M*	201,3	350,9	2	48,45	73,39	74,69	81,17	38,92
OS	*s*	3,8	18,6	2	0,50	0,60	0,45	1,26	0,51
MS	*s*	6,7	18,6	2	0,59	0,65	0,58	1,26	0,52
OS	*M*	199,9	350,9	3	60,91	86,01	87,89	90,61	51,45
MS	*M*	201,3	350,9	3	44,91	68,89	70,75	75,42	35,38
OS	*s*	3,8	18,6	3	0,62	0,65	0,60	0,98	0,61
MS	*s*	6,7	18,6	3	0,72	0,77	0,65	1,22	0,64
B	*M*	199,9	350,9	4	62,82	88,81	90,06	93,38	53,35
A	*M*	201,3	350,9	4	56,40	81,70	83,41	86,77	46,88
B	*s*	3,8	18,6	4	0,51	0,46	0,43	0,53	0,49
A	*s*	6,7	18,6	4	0,93	1,13	0,96	1,37	0,94

[1)] Mittelung über Vorbeifahrten 001 bis 033 (Höhe über SO = 0,0 m), $N = 5$

[2)] Mittelung über Vorbeifahrten 201 bis 223 (Höhe über SO = 1,2 m), $N = 10$

Tabelle A6 Mittelwerte und Streuungen bei allen ICE 1-Vorbeifahrten an den Meßorten A und B mit ca. 200 km/h, $N = 15$

SSW (Ebene)		υ [km/h]	l [m]	Mikro	L_h [dB(A)]	L_e [dB(A)]	L_v [dB(A)]	L_{Max} [dB(A)]	$L_{m,s}$ [dB(A)]
OS	*M*	250,2	340,3	1[1)]	70,44	98,30	98,94	104,41	58,77
MS	*M*	249,6	340,3	1[1)]	51,47	78,95	78,98	88,84	40,22
OS	*s*	4,3	27,3	1[1)]	1,00	1,01	0,85	2,73	0,83
MS	*s*	4,4	27,3	1[1)]	0,33	0,44	0,39	0,72	0,36
OS	*M*	247,3	357,9	1[2)]	67,54	95,01	95,77	99,24	56,15
MS	*M*	248,1	357,9	1[2)]	54,84	82,28	82,77	91,97	43,40
OS	*s*	1,3	0,0	1[2)]	2,64	2,52	2,60	1,91	2,69
MS	*s*	1,1	0,0	1[2)]	0,02	0,08	0,04	0,26	0,02
OS	*M*	249,5	344,7	2	65,25	91,91	93,45	96,04	53,93
MS	*M*	249,2	344,7	2	51,75	77,69	78,83	85,34	40,47
OS	*s*	3,9	24,4	2	0,95	0,99	0,88	1,19	0,83
MS	*s*	3,8	24,5	2	0,30	0,46	0,43	0,54	0,46
OS	*M*	249,5	342,8	3	62,36	88,26	90,32	92,62	51,05
MS	*M*	249,1	342,8	3	48,36	73,37	74,93	79,71	37,11
OS	*s*	4,2	25,8	3	1,04	1,23	0,98	1,38	0,91
MS	*s*	4,1	25,8	3	0,20	0,38	0,34	0,46	0,43
B	*M*	249,5	344,7	4	64,09	90,92	92,28	95,67	52,76
A	*M*	249,2	344,7	4	58,20	84,32	86,07	89,65	46,87
B	*s*	3,9	24,4	4	0,85	0,76	0,72	0,87	0,67
A	*s*	3,8	24,5	4	0,66	0,73	0,56	1,27	0,39

[1)] Mittelung über Vorbeifahrten 001 bis 033 (Höhe über SO = 0,0 m), $N = 6$

[2)] Mittelung über Vorbeifahrten 201 bis 223 (Höhe über SO = 1,2 m), $N = 2$

Tabelle A7 Mittelwerte und Streuungen bei allen ICE 1-Vorbeifahrten an den Meßorten A und B mit ca. 250 km/h, $N = 8$ (Mikrofon 3: $N = 7$)

SSW (Ebene)		v [km/h]	l [m]	Mikro	L_h [dB(A)]	L_c [dB(A)]	L_v [dB(A)]	L_{Max} [dB(A)]	$L_{m,s}$ [dB(A)]
OS	*M*	276,2	333,9	1[1)]	70,67	98,97	99,70	103,70	58,25
MS	*M*	276,1	333,9	1[1)]	53,60	81,25	81,45	91,33	41,58
OS	*s*	1,9	27,6	1[1)]	0,56	0,54	0,48	1,47	0,46
MS	*s*	2,7	27,6	1[1)]	0,32	0,76	0,58	0,98	0,57
OS	*M*	276,3	340,3	1[2)]	68,52	96,73	97,48	101,13	56,40
MS	*M*	278,4	340,3	1[2)]	57,35	85,56	85,96	95,45	45,17
OS	*s*	2,0	26,4	1[2)]	1,34	1,45	1,48	1,70	1,43
MS	*s*	1,6	26,4	1[2)]	0,21	0,39	0,48	0,44	0,43
OS	*M*	276,4	335,3	2	65,69	92,72	94,40	96,99	53,61
MS	*M*	277,3	335,3	2	54,14	80,58	81,64	88,04	42,06
OS	*s*	2,0	26,8	2	0,53	0,62	0,48	0,60	0,44
MS	*s*	2,5	26,8	2	0,35	0,59	0,60	0,68	0,55
OS	*M*	276,4	335,3	3	62,63	88,70	91,06	93,22	50,54
MS	*M*	277,3	335,3	3	50,60	76,17	77,67	82,57	38,53
OS	*s*	2,0	26,8	3	0,53	0,58	0,46	0,68	0,42
MS	*s*	2,5	26,8	3	0,33	0,46	0,52	0,72	0,61
B	*M*	276,4	335,3	4	64,53	91,68	93,25	96,28	52,44
A	*M*	277,3	335,3	4	59,57	86,03	87,95	91,24	47,48
B	*s*	2,0	26,8	4	0,59	0,65	0,50	0,64	0,44
A	*s*	2,5	26,8	4	0,39	0,49	0,52	0,83	0,49

[1)] Mittelung über Vorbeifahrten 001 bis 033 (Höhe über SO = 0,0 m), $N = 11$

[2)] Mittelung über Vorbeifahrten 201 bis 223 (Höhe über SO = 1,2 m), $N = 9$

Tabelle A8 Mittelwerte und Streuungen bei allen ICE 1-Vorbeifahrten an den Meßorten A und B mit ca. 280 km/h, $N = 21$ (Mikrofon 1: $N = 20$)

SSW (Ebene)		υ [km/h]	l [m]	Mikro	L_h [dB(A)]	L_e [dB(A)]	L_v [dB(A)]	L_{Max} [dB(A)]	$L_{m,s}$ [dB(A)]
OS	*M*	196,8	343,3	1	76,48	103,39	103,95	107,33	67,25
MS	*M*	194,4	343,3	1	60,94	87,51	88,30	91,46	51,81
OS	*s*	3,6	24,3	1	0,73	0,71	0,73	0,75	0,67
MS	*s*	6,7	24,3	1	0,78	0,92	0,96	0,93	0,71
OS	*M*	196,8	343,3	2	70,33	96,61	97,67	100,47	61,10
MS	*M*	194,4	343,3	2	59,31	84,76	86,50	89,14	50,18
OS	*s*	3,6	24,3	2	0,71	0,66	0,69	0,84	0,66
MS	*s*	6,7	24,3	2	0,80	1,05	1,00	0,87	0,71
OS	*M*	196,8	343,3	3	66,70	92,37	93,88	96,88	57,47
MS	*M*	194,4	343,3	3	55,84	81,00	82,84	87,14	46,70
OS	*s*	3,6	24,3	3	0,69	0,72	0,71	0,83	0,62
MS	*s*	6,7	24,3	3	0,86	1,11	0,97	1,26	0,72
D	*M*	196,8	343,3	4	68,93	95,06	96,22	98,49	59,70
C	*M*	194,4	343,3	4	72,01	98,13	99,16	101,58	62,88
D	*s*	3,6	24,3	4	0,63	0,61	0,62	0,66	0,59
C	*s*	6,7	24,3	4	0,81	1,02	1,02	0,89	0,74

Tabelle A9 Mittelwerte und Streuungen bei allen ICE 1-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 200 km/h, $N = 18$

SSW (Ebene)		υ [km/h]	l [m]	Mikro	L_h [dB(A)]	L_e [dB(A)]	L_v [dB(A)]	L_{Max} [dB(A)]	$L_{m,s}$ [dB(A)]
OS	*M*	195,1	278,7	1	75,19	102,85	103,53	106,41	66,93
MS	*M*	195,1	278,7	1	59,79	87,09	88,08	91,03	51,50
OS	*s*	10,1	0,0	1	0,62	0,77	0,78	0,59	0,42
MS	*s*	11,7	0,0	1	0,90	1,17	1,13	1,12	0,48
OS	*M*	195,1	278,7	2	69,35	96,31	97,55	99,96	61,08
MS	*M*	195,1	278,7	2	58,25	84,24	86,32	88,73	49,96
OS	*s*	10,1	0,0	2	0,73	0,85	0,91	0,43	0,47
MS	*s*	11,7	0,0	2	0,83	0,79	1,07	0,90	0,33
OS	*M*	195,1	278,7	3	66,01	92,01	94,02	96,54	57,73
MS	*M*	195,1	278,7	3	54,34	79,90	82,20	86,29	46,05
OS	*s*	10,1	0,0	3	0,94	1,51	1,09	1,10	0,71
MS	*s*	11,7	0,0	3	0,90	1,15	1,12	1,33	0,45
D	*M*	195,1	278,7	4	67,49	94,36	95,64	98,27	59,21
C	*M*	195,1	278,7	4	70,85	97,55	98,88	100,85	62,56
D	*s*	10,1	0,0	4	0,84	1,07	1,03	1,36	0,51
C	*s*	11,7	0,0	4	0,81	1,02	1,06	0,95	0,32

Tabelle A10 Mittelwerte und Streuungen bei allen ICE 2-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 200 km/h, $N = 4$

SSW (Ebene)		v [km/h]	l [m]	Mikro	L_h [dB(A)]	L_e [dB(A)]	L_v [dB(A)]	L_{Max} [dB(A)]	$L_{m,s}$ [dB(A)]
OS	*M*	198,8	363,6	1	67,93	94,62	95,13	100,83	53,35
MS	*M*	199,3	363,6	1	52,19	78,77	78,72	89,47	37,59
OS	*M*	198,8	363,6	2	65,60	91,19	92,57	95,17	51,02
MS	*M*	199,3	363,6	2	50,44	75,79	75,73	85,23	35,84
OS	*M*	198,8	363,6	3	63,07	88,14	89,81	92,43	48,49
MS	*M*	199,3	363,6	3	47,21	71,77	72,13	80,37	32,61
B	*M*	198,8	363,6	4	65,54	91,71	92,53	98,03	50,96
A	*M*	199,3	363,6	4	59,79	85,57	86,42	91,95	45,19

Tabelle A11 Mittelwerte bei einer IC-Vorbeifahrt an den Meßorten A und B mit ca. 200 km/h, $N = 1$

SSW (Ebene)		v [km/h]	l [m]	Mikro	L_h [dB(A)]	L_e [dB(A)]	L_v [dB(A)]	L_{Max} [dB(A)]	$L_{m,s}$ [dB(A)]
OS	*M*	160,1	234,8	1	74,36	101,68	102,53	105,75	63,55
MS	*M*	157,4	234,8	1	60,45	87,47	88,57	91,23	49,80
OS	*s*	7,7	23,2	1	1,29	1,21	1,28	1,06	1,08
MS	*s*	8,0	23,2	1	1,13	1,19	1,14	1,33	1,01
OS	*M*	160,1	234,8	2	68,84	95,54	96,85	99,87	58,02
MS	*M*	157,4	234,8	2	59,87	86,04	87,87	90,22	49,23
OS	*s*	7,7	23,2	2	1,33	1,36	1,32	1,27	1,10
MS	*s*	8,0	23,2	2	1,37	1,59	1,47	1,41	1,29
OS	*M*	160,5	235,5	3	64,94	91,01	92,75	95,69	54,10
MS	*M*	157,4	235,5	3	56,37	81,99	84,18	87,85	45,69
OS	*s*	8,1	24,7	3	1,33	1,90	1,40	1,54	1,14
MS	*s*	8,5	24,7	3	1,59	1,90	1,71	1,96	1,43
D	*M*	160,1	234,8	4	67,15	93,58	95,08	97,48	56,31
C	*M*	157,4	234,8	4	70,94	97,39	98,83	101,45	60,31
D	*s*	7,7	23,2	4	1,32	1,46	1,32	1,23	1,03
C	*s*	8,0	23,2	4	1,44	1,64	1,59	1,99	1,40

Tabelle A12 Mittelwerte und Streuungen bei allen IC-, EC- und IR-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 160 km/h, $N = 9$ (Mikrofon 3: $N = 8$)

SSW (Ebene)		υ [km/h]	l [m]	Mikro	L_h [dB(A)]	L_e [dB(A)]	L_v [dB(A)]	L_{Max} [dB(A)]	$L_{m,s}$ [dB(A)]
OS	*M*	132,6	255,2	1	74,33	100,86	101,76	105,35	59,76
MS	*M*	129,1	255,2	1	60,85	86,96	87,99	91,29	46,07
OS	*s*	13,5	123,0	1	0,95	0,85	1,16	0,76	2,43
MS	*s*	11,1	123,0	1	1,45	0,41	0,57	0,62	1,66
OS	*M*	132,6	255,2	2	68,77	94,44	96,01	98,72	54,24
MS	*M*	129,1	255,2	2	60,47	85,71	87,50	90,92	45,66
OS	*s*	13,5	123,0	2	0,92	0,62	1,08	0,73	2,46
MS	*s*	11,1	123,0	2	1,48	0,62	0,47	1,16	1,57
OS	*M*	132,6	255,2	3	65,22	89,51	92,18	94,87	50,64
MS	*M*	129,1	255,2	3	56,65	81,24	83,52	88,14	41,95
OS	*s*	13,5	123,0	3	1,01	0,89	1,00	0,44	2,40
MS	*s*	11,1	123,0	3	1,35	0,79	0,56	1,36	1,83
D	*M*	132,6	255,2	4	67,67	93,08	94,79	97,54	53,04
C	*M*	129,1	255,2	4	71,56	97,21	98,58	101,96	56,81
D	*s*	13,5	123,0	4	1,07	0,73	1,07	0,75	2,35
C	*s*	11,1	123,0	4	1,36	1,16	0,97	1,08	1,73

Tabelle A13 Mittelwerte und Streuungen bei allen RE-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 130 km/h, $N = 4$

SSW (Ebene)		υ [km/h]	l [m]	Mikro	L_h [dB(A)]	L_e [dB(A)]	L_v [dB(A)]	L_{Max} [dB(A)]	$L_{m,s}$ [dB(A)]
OS	*M*	111,0	382,3	1	72,50	96,51	97,12	101,81	56,80
MS	*M*	112,3	382,3	1	51,04	73,23	74,88	79,67	35,22
OS	*s*	7,8	120,0	1	1,65	1,23	1,23	1,17	0,67
MS	*s*	8,9	120,0	1	1,73	1,23	0,91	1,65	0,67
OS	*M*	111,0	382,3	2	66,16	89,17	90,58	93,99	50,46
MS	*M*	112,3	382,3	2	51,33	73,25	75,38	78,69	35,57
OS	*s*	7,8	120,0	2	1,65	1,16	1,13	1,08	0,60
MS	*s*	8,9	120,0	2	1,69	1,21	1,08	1,53	0,88
OS	*M*	111,0	382,3	3	62,87	85,05	87,07	90,05	47,19
MS	*M*	112,3	382,3	3	48,13	69,82	71,83	74,38	32,40
OS	*s*	7,8	120,0	3	1,57	1,10	1,08	1,20	0,55
MS	*s*	8,9	120,0	3	1,79	1,29	1,08	1,30	1,09
B	*M*	111,0	382,3	4	65,69	88,90	90,15	93,42	50,00
A	*M*	112,3	382,3	4	63,52	86,89	88,05	91,72	47,74
B	*s*	7,8	120,0	4	1,62	1,21	1,16	1,04	0,60
A	*s*	8,9	120,0	4	1,64	1,23	1,20	1,23	0,71

Tabelle A14 Mittelwerte und Streuungen bei allen Güterzug-Vorbeifahrten an den Meßorten A und B mit ca. 110 km/h, $N = 21$

SSW (Ebene)		v [km/h]	l [m]	Mikro	L_h [dB(A)]	L_e [dB(A)]	L_v [dB(A)]	L_{Max} [dB(A)]	$L_{m,e}$ [dB(A)]
OS	*M*	91,3	395,6	1	72,07	94,90	95,59	99,41	57,94
MS	*M*	92,3	395,6	1	62,89	85,33	85,78	89,71	48,23
OS	*s*	6,0	160,7	1	2,49	1,09	0,87	1,07	0,92
MS	*s*	6,3	160,7	1	4,55	2,58	2,30	1,76	2,82
OS	*M*	91,3	395,6	2	66,47	88,72	89,84	93,07	52,33
MS	*M*	92,3	395,6	2	62,05	83,93	84,80	88,51	47,37
OS	*s*	6,0	160,7	2	2,52	1,21	0,91	1,22	0,98
MS	*s*	6,3	160,7	2	4,88	3,57	2,73	3,00	3,23
OS	*M*	91,8	390,8	3	62,80	83,95	86,01	88,71	48,75
MS	*M*	93,1	390,8	3	59,38	80,48	81,91	85,66	44,55
OS	*s*	6,4	175,5	3	2,41	1,28	0,97	1,23	0,86
MS	*s*	6,5	175,5	3	5,74	4,43	3,55	3,51	3,86
D	*M*	91,3	395,6	4	65,27	87,35	88,56	91,65	51,11
C	*M*	92,3	395,6	4	69,74	91,85	92,73	96,06	55,16
D	*s*	6,0	160,7	4	2,63	1,28	0,94	0,83	1,07
C	*s*	6,3	160,7	4	3,82	2,36	1,61	2,04	1,89

Tabelle A15 Mittelwerte und Streuungen bei allen Güterzug-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 90 km/h, $N = 7$ (Mikrofon 3: $N = 6$)

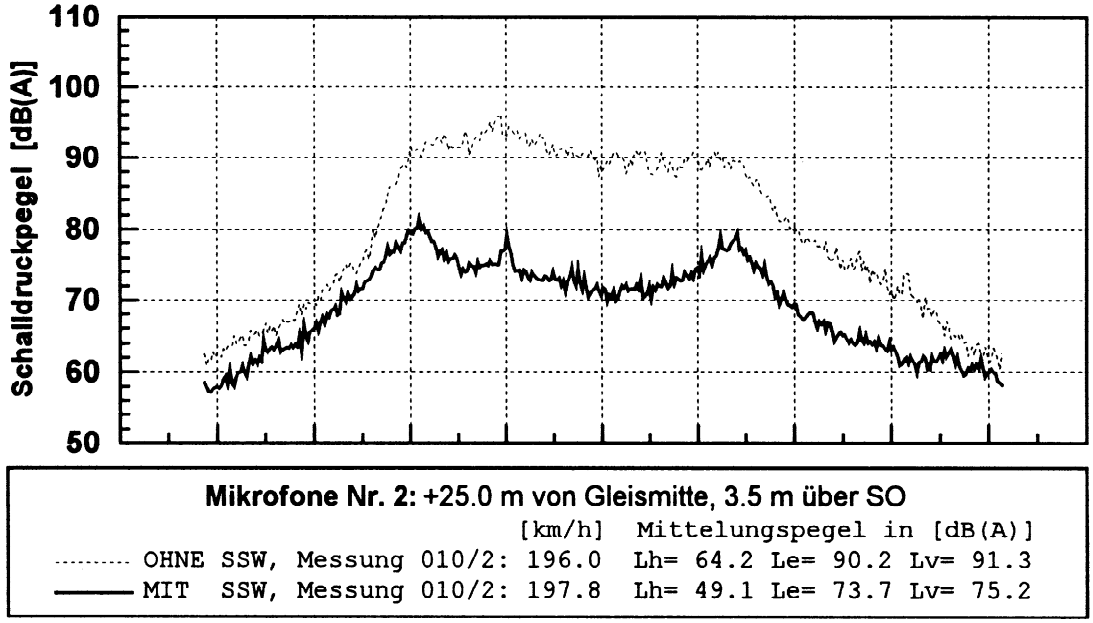


Bild A1 ICE 1, Fahrt 010, Mikrofone 2 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Pegelverläufe bei ungeschliffenen Schienen

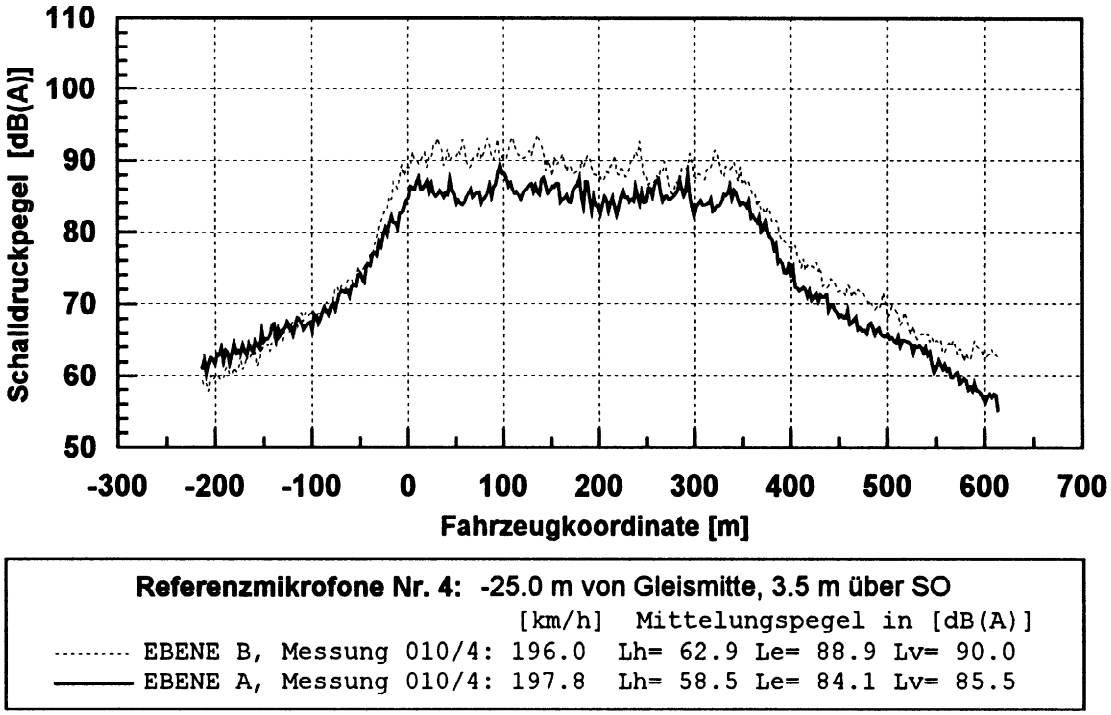


Bild A2 ICE 1, Fahrt 010, Mikrofone 4 auf jenseitiger Gleisseite ohne SSW in beiden Meßebenen, Pegelverläufe bei ungeschliffenen Schienen

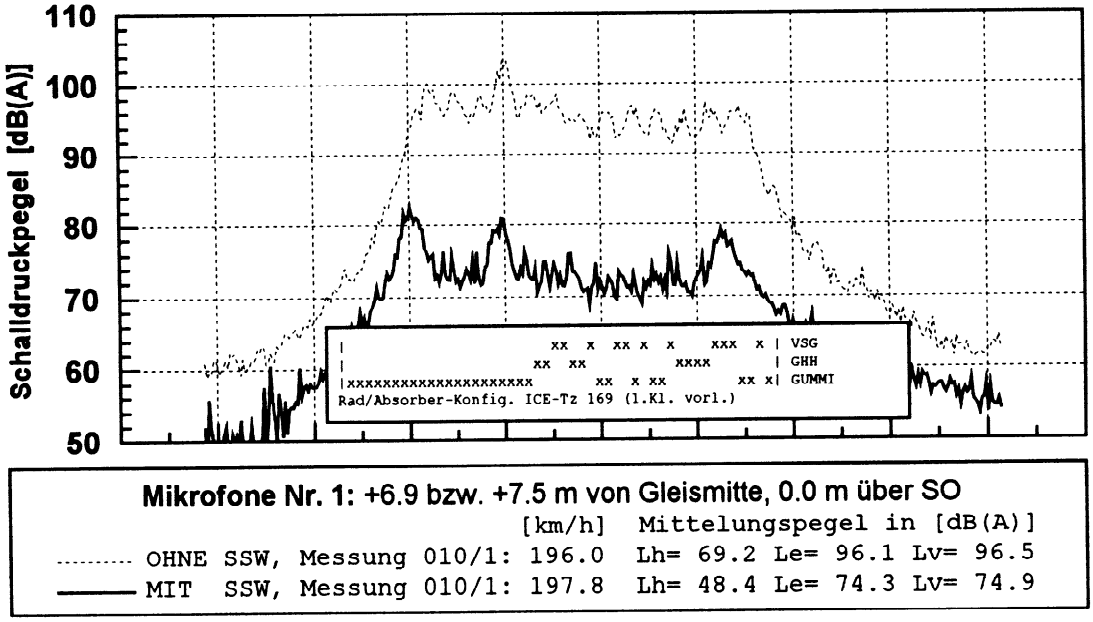


Bild A3 ICE 1, Fahrt 010, Mikrofone 1 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Pegelverläufe bei ungeschliffenen Schienen

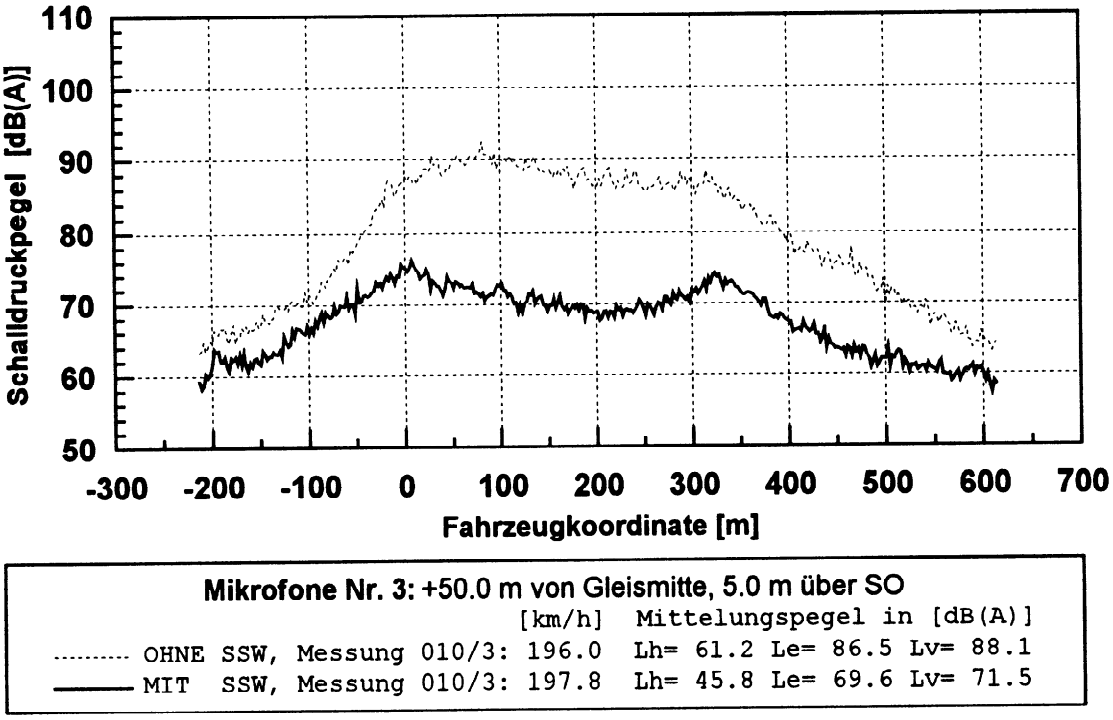


Bild A4 ICE 1, Fahrt 010, Mikrofone 3 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Pegelverläufe bei ungeschliffenen Schienen

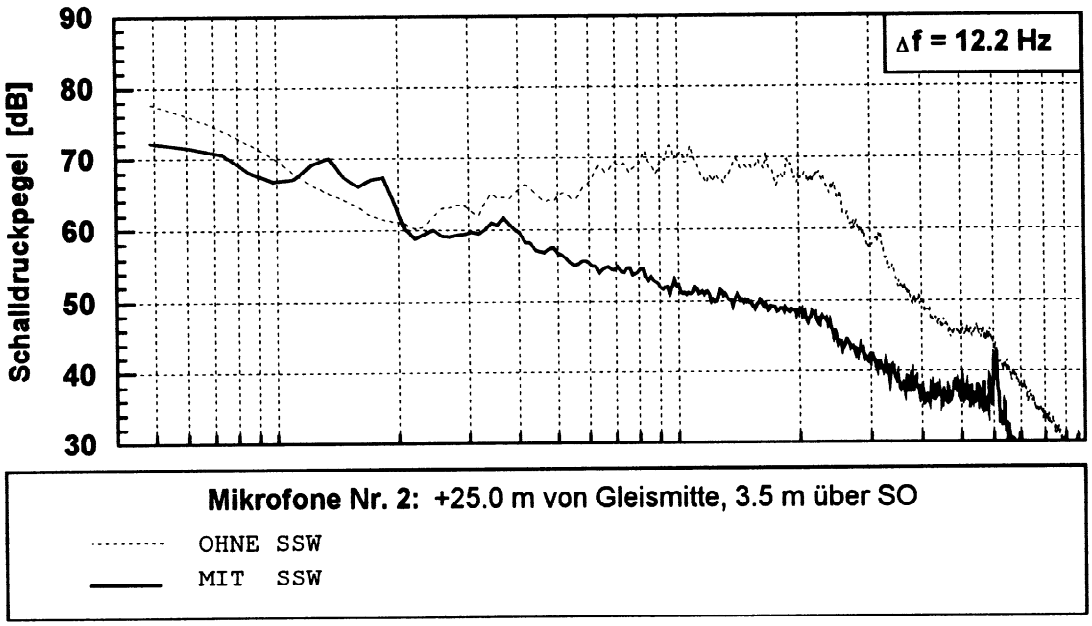


Bild A5 ICE 1, Fahrt 010, Mikrofone 2 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Schmalbandspektren bei ungeschliffenen Schienen

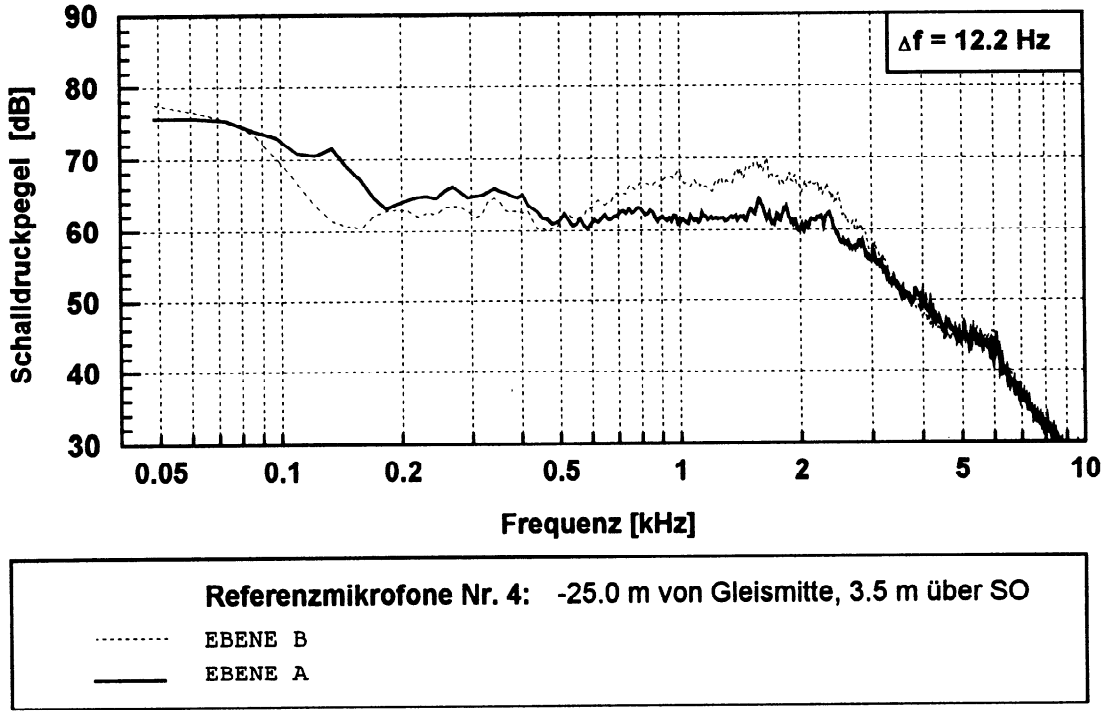


Bild A6 ICE 1, Fahrt 010, Mikrofone 4 auf jenseitiger Gleisseite ohne SSW in beiden Meßebenen, Schmalbandspektren bei ungeschliffenen Schienen

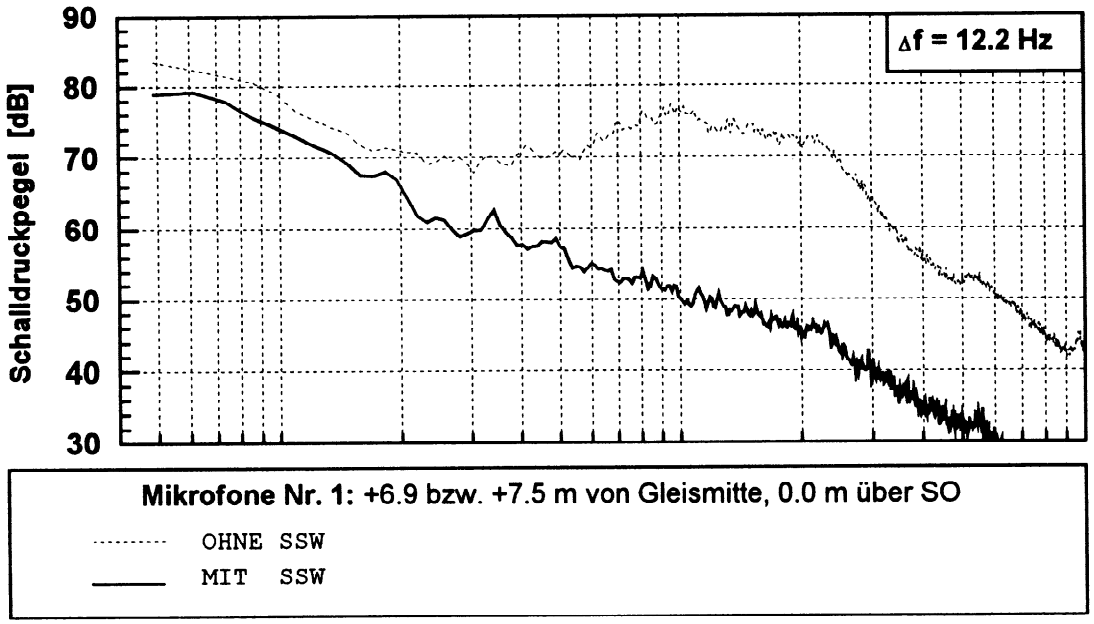


Bild A7 ICE 1, Fahrt 010, Mikrofone 1 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Schmalbandspektren bei ungeschliffenen Schienen

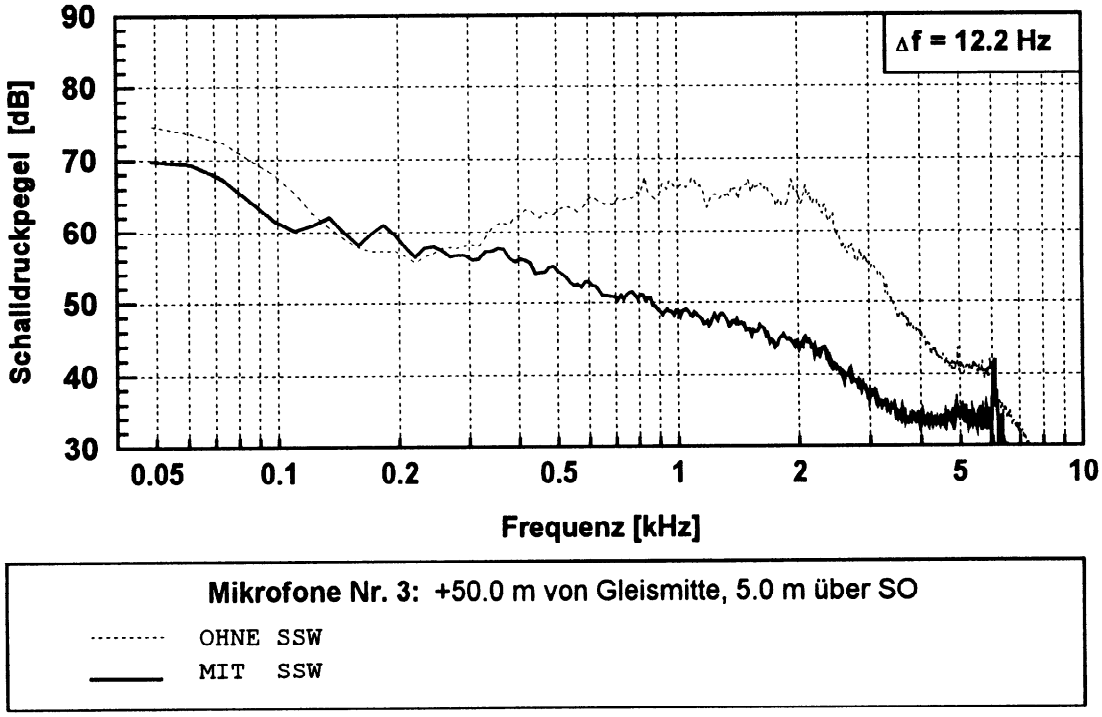


Bild A8 ICE 1, Fahrt 010, Mikrofone 3 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Schmalbandspektren bei ungeschliffenen Schienen

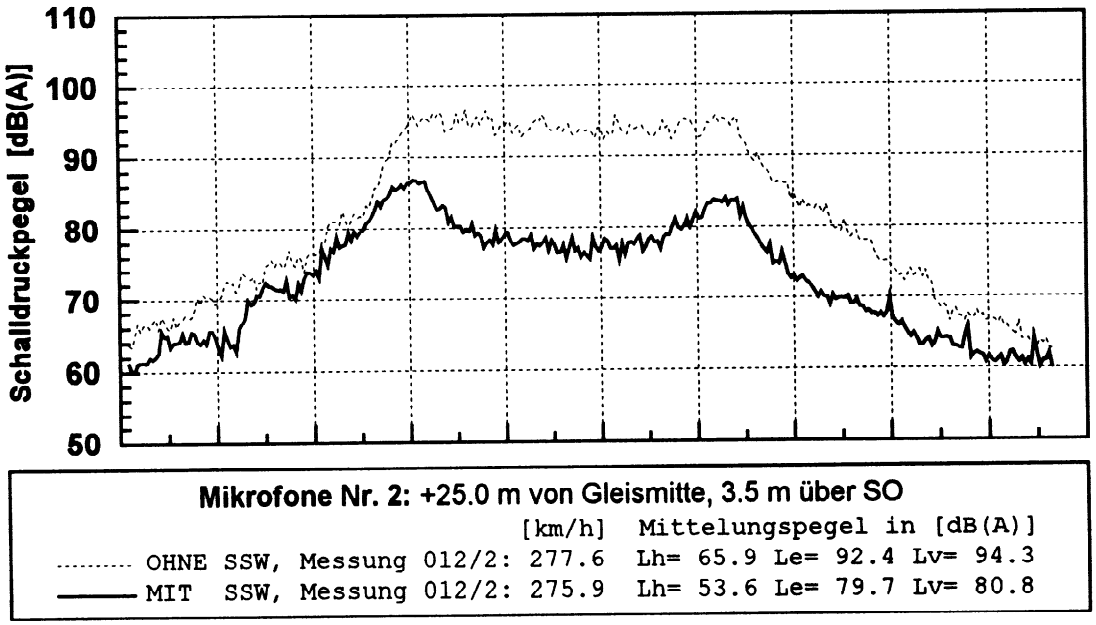


Bild A9 ICE 1, Fahrt 012, Mikrofone 2 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Pegelverläufe bei ungeschliffenen Schienen

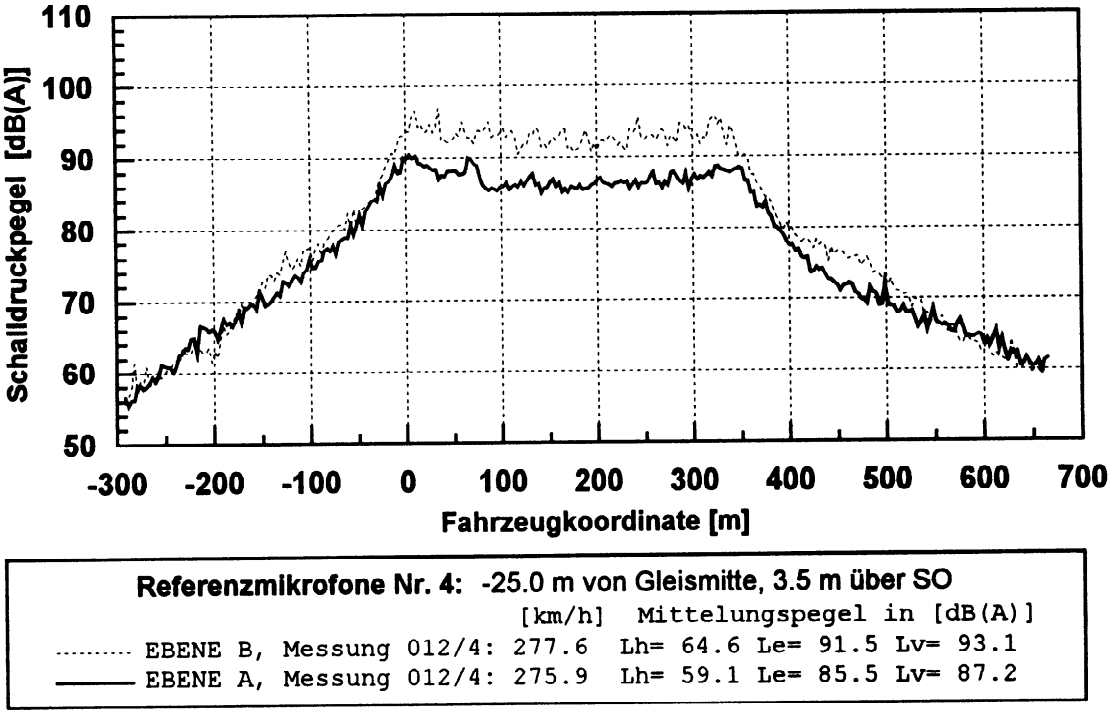


Bild A10 ICE 1, Fahrt 012, Mikrofone 4 auf jenseitiger Gleisseite ohne SSW in beiden Meßebenen, Pegelverläufe bei ungeschliffenen Schienen

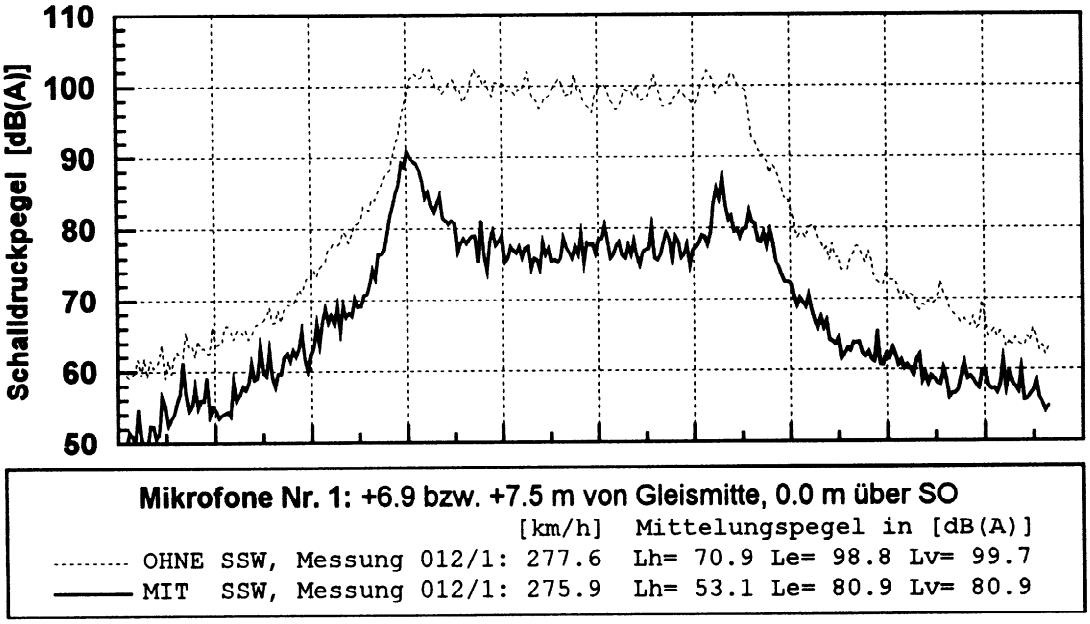


Bild A11 ICE 1, Fahrt 012, Mikrofone 1 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Pegelverläufe bei ungeschliffenen Schienen

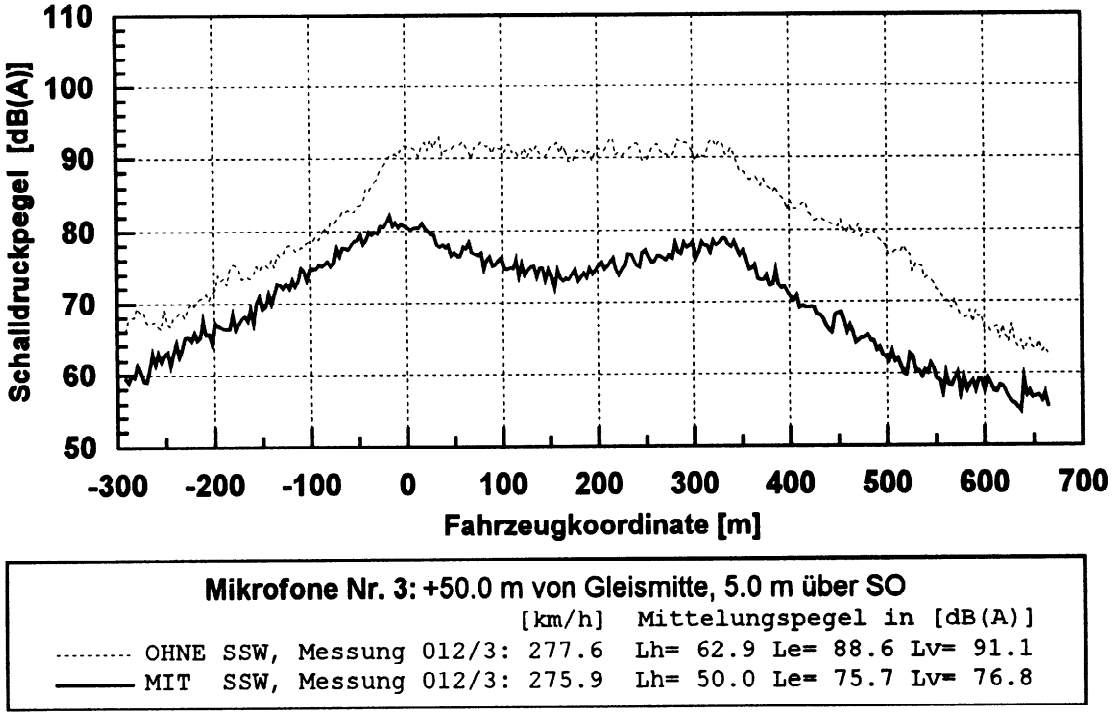


Bild A12 ICE 1, Fahrt 012, Mikrofone 3 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Pegelverläufe bei ungeschliffenen Schienen

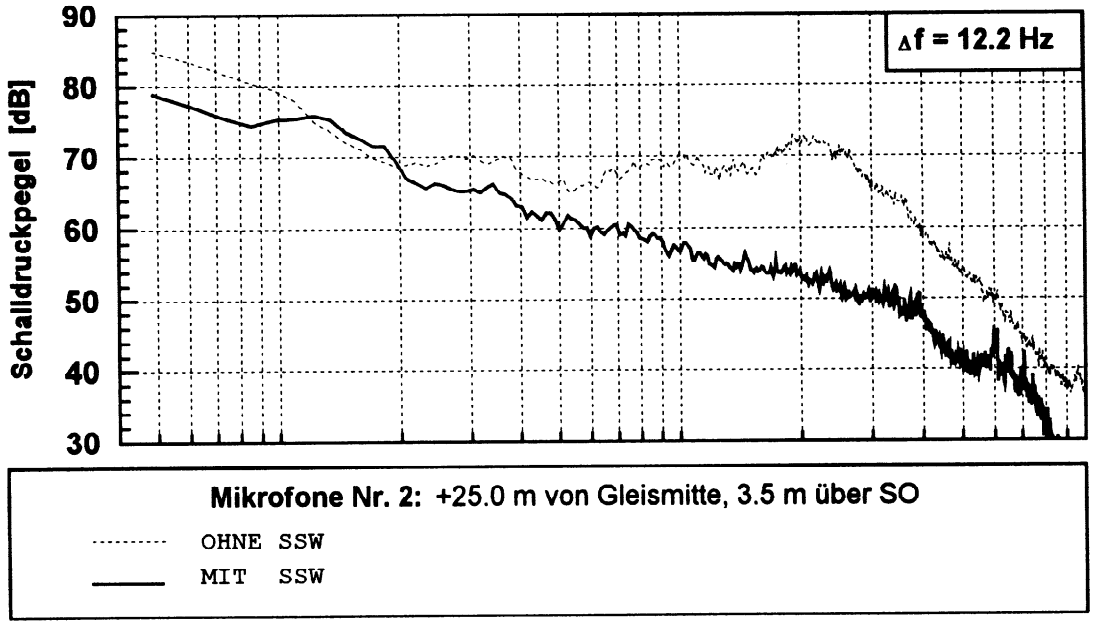


Bild A13 ICE 1, Fahrt 012, Mikrofone 2 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Schmalbandspektren bei ungeschliffenen Schienen

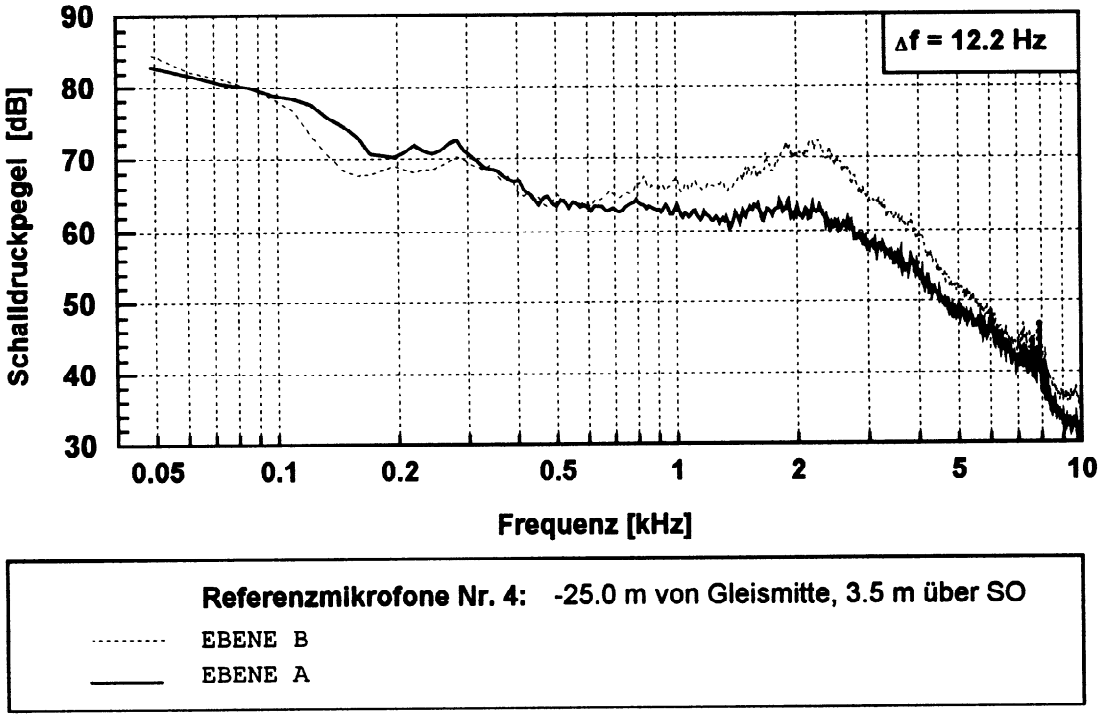


Bild A14 ICE 1, Fahrt 012, Mikrofone 4 auf jenseitiger Gleisseite ohne SSW in beiden Meßebenen, Schmalbandspektren bei ungeschliffenen Schienen

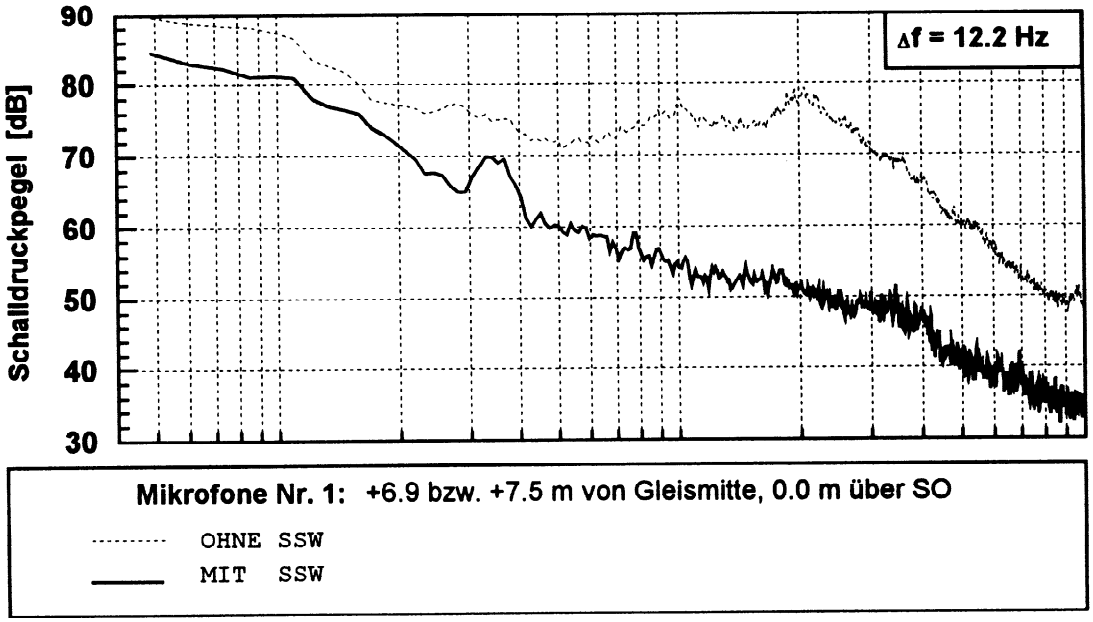


Bild A15 ICE 1, Fahrt 012, Mikrofone 1 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Schmalbandspektren bei ungeschliffenen Schienen

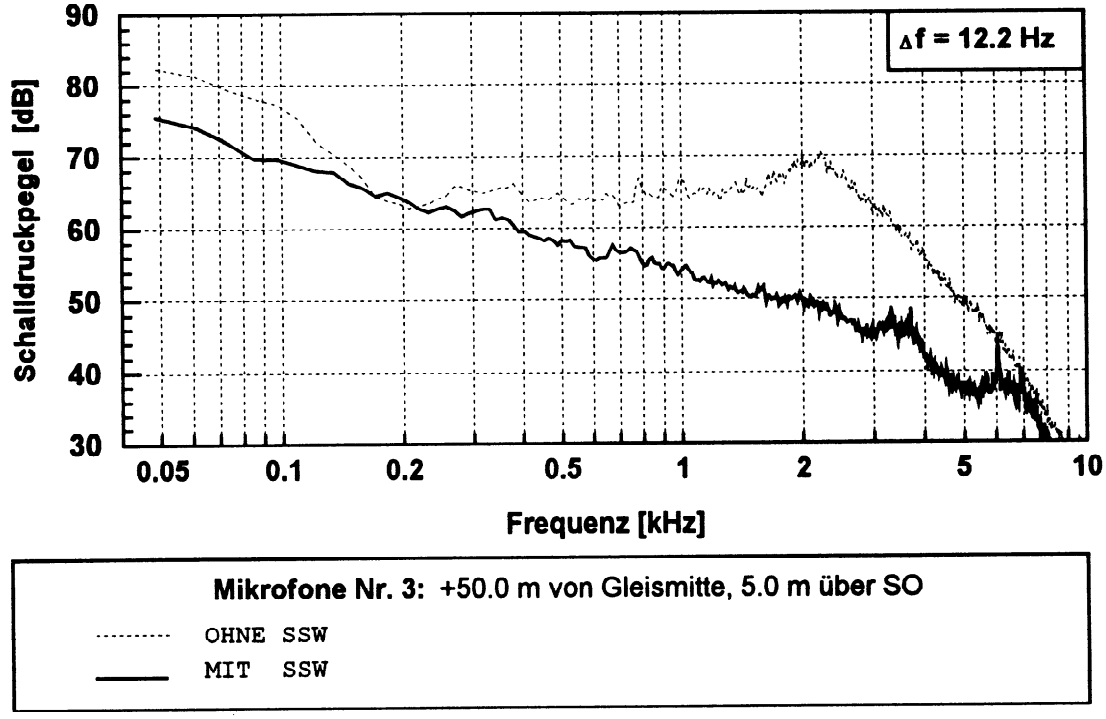


Bild A16 ICE 1, Fahrt 012, Mikrofone 3 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Schmalbandspektren bei ungeschliffenen Schienen

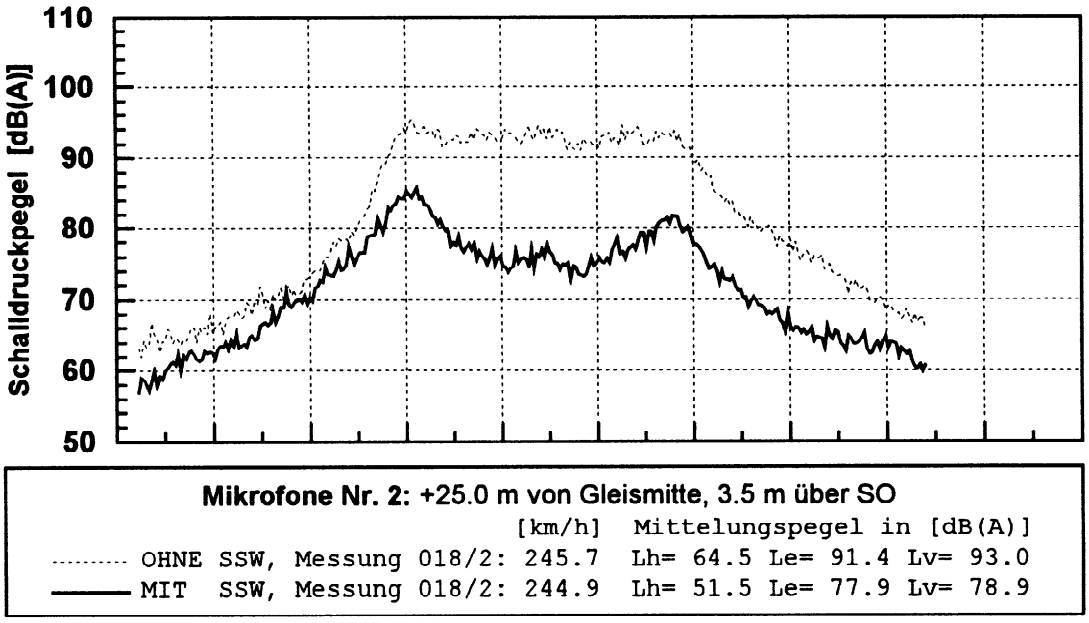


Bild A17 ICE 1, Fahrt 018, Mikrofone 2 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Pegelverläufe bei ungeschliffenen Schienen

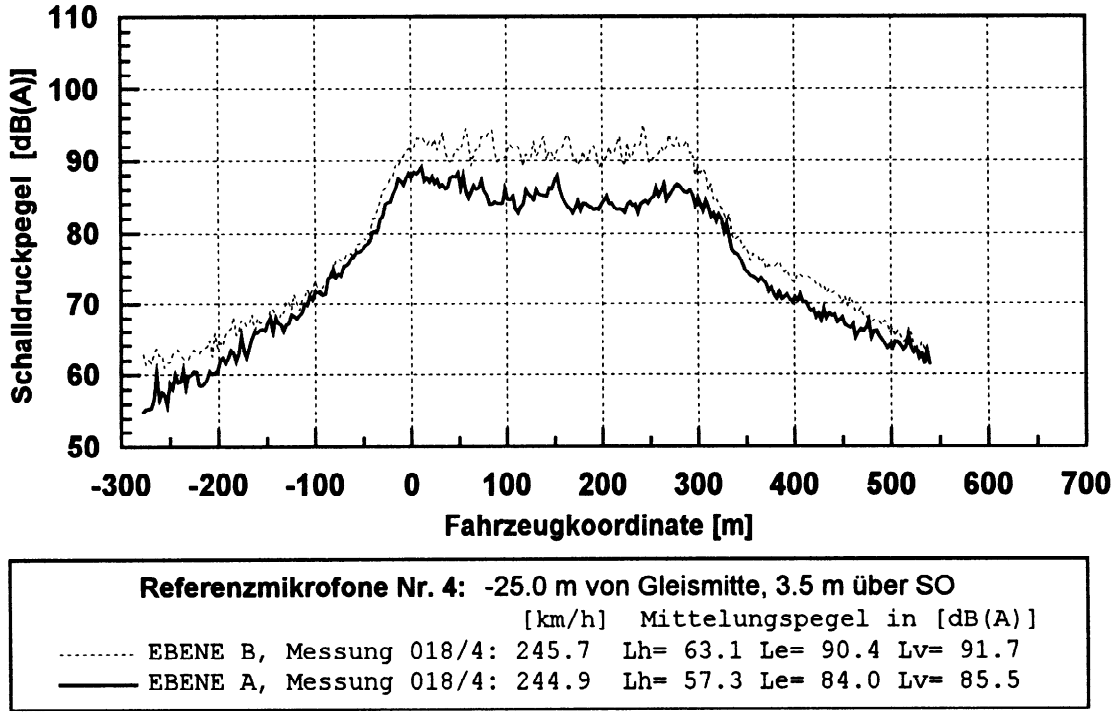


Bild A18 ICE 1, Fahrt 018, Mikrofone 4 auf jenseitiger Gleisseite ohne SSW in beiden Meßebenen, Pegelverläufe bei ungeschliffenen Schienen

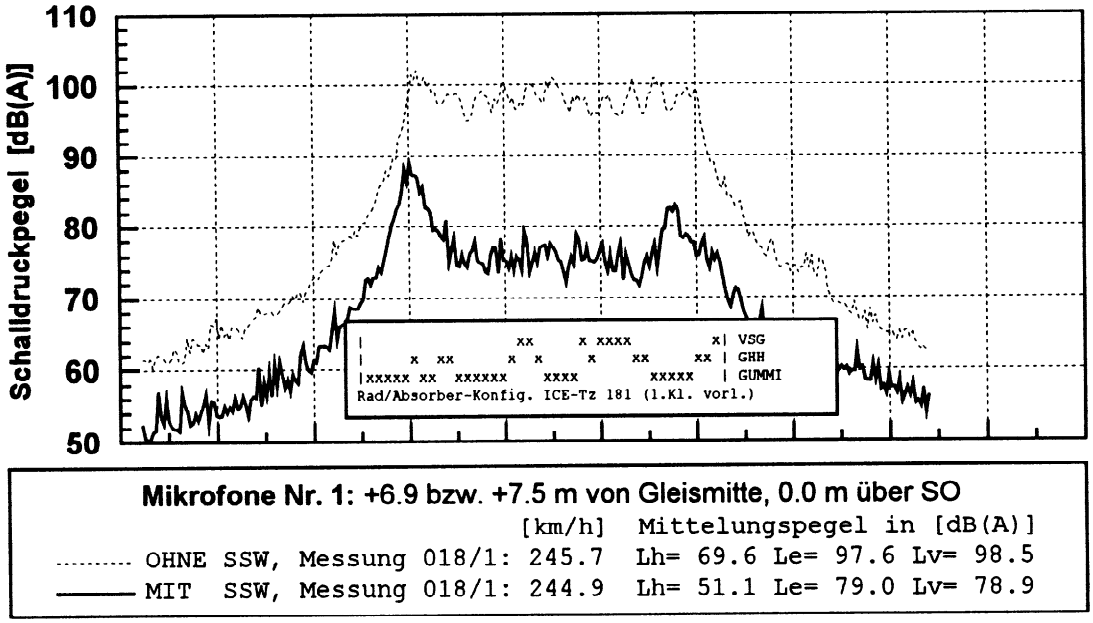


Bild A19 ICE 1, Fahrt 018, Mikrofone 1 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Pegelverläufe bei ungeschliffenen Schienen

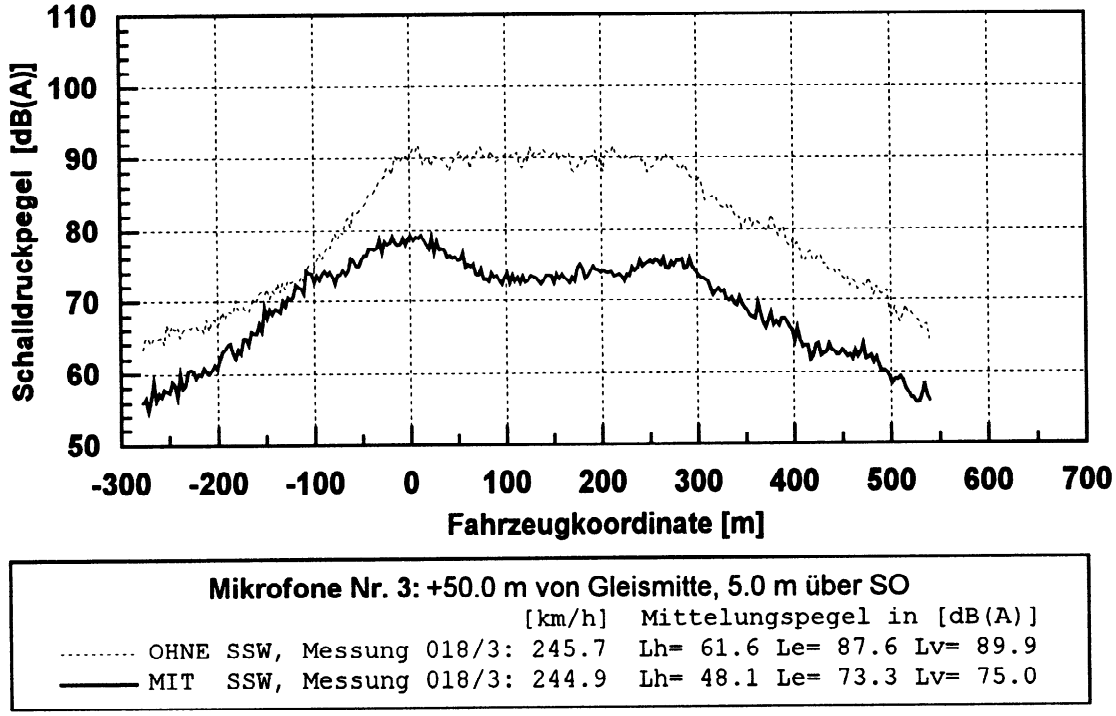


Bild A20 ICE 1, Fahrt 018, Mikrofone 3 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Pegelverläufe bei ungeschliffenen Schienen

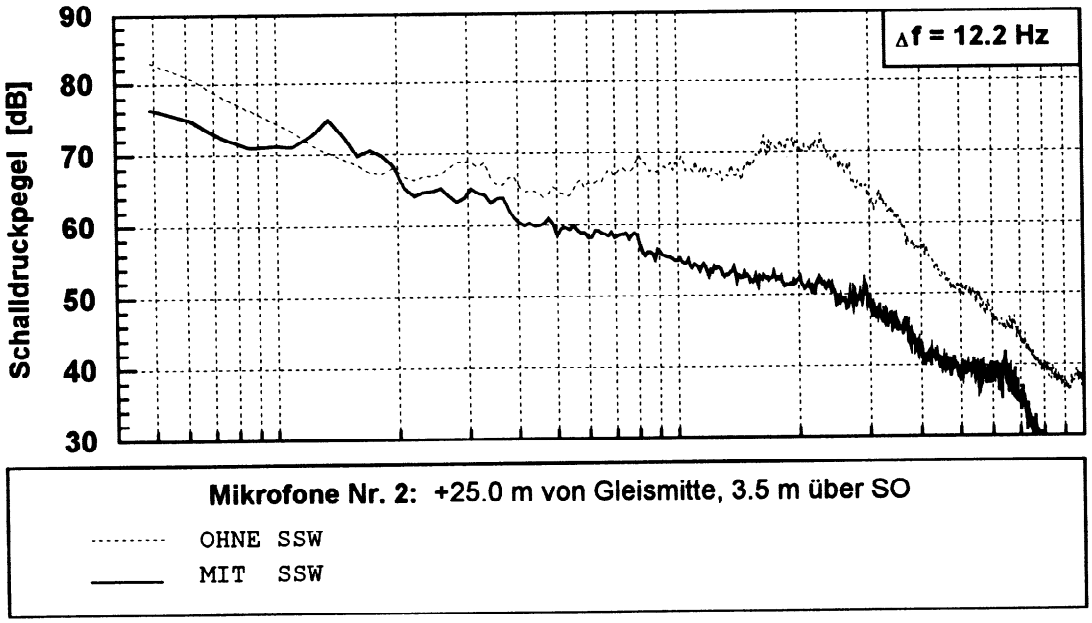


Bild A21 ICE 1, Fahrt 018, Mikrofone 2 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Schmalbandspektren bei ungeschliffenen Schienen

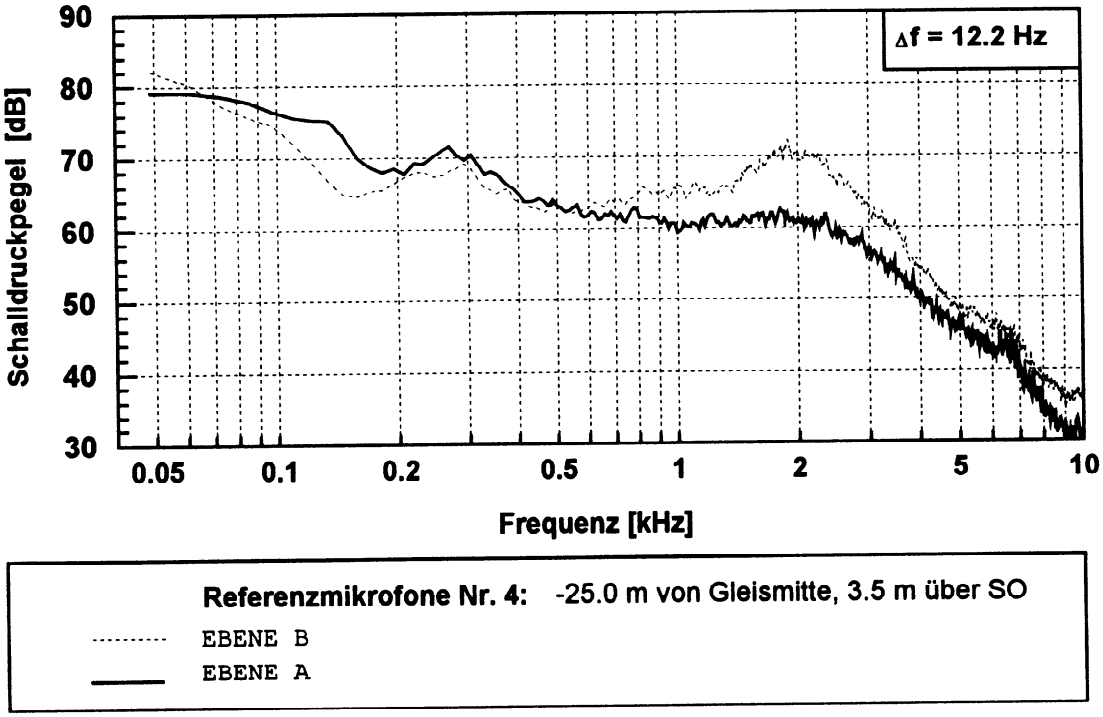


Bild A22 ICE 1, Fahrt 018, Mikrofone 4 auf jenseitiger Gleisseite ohne SSW in beiden Meßebenen, Schmalbandspektren bei ungeschliffenen Schienen

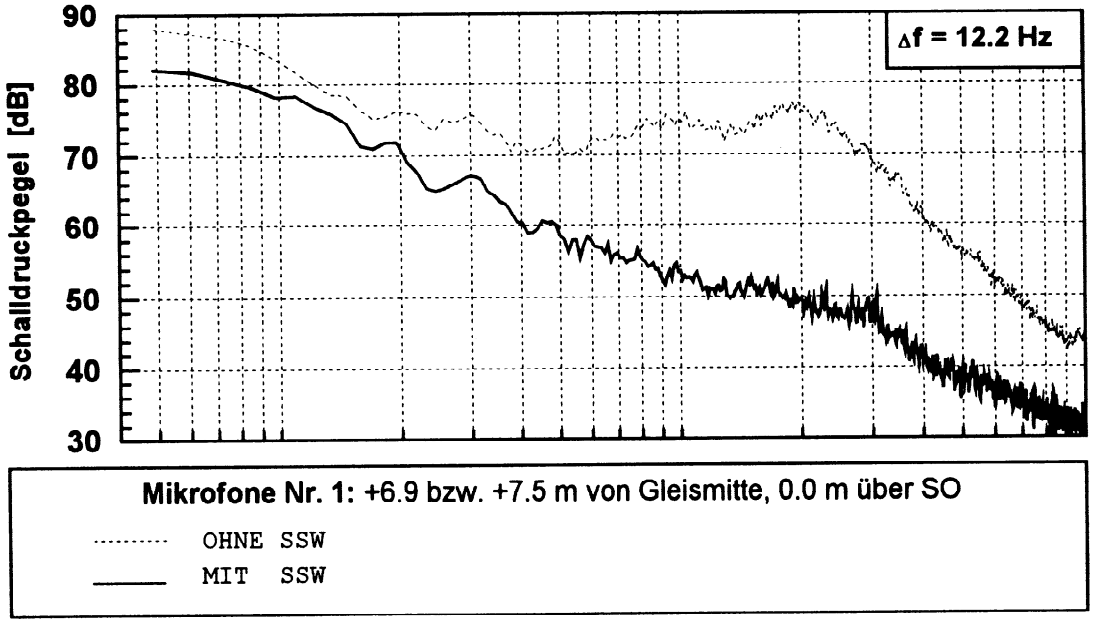


Bild A23 ICE 1, Fahrt 018, Mikrofone 1 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Schmalbandspektren bei ungeschliffenen Schienen

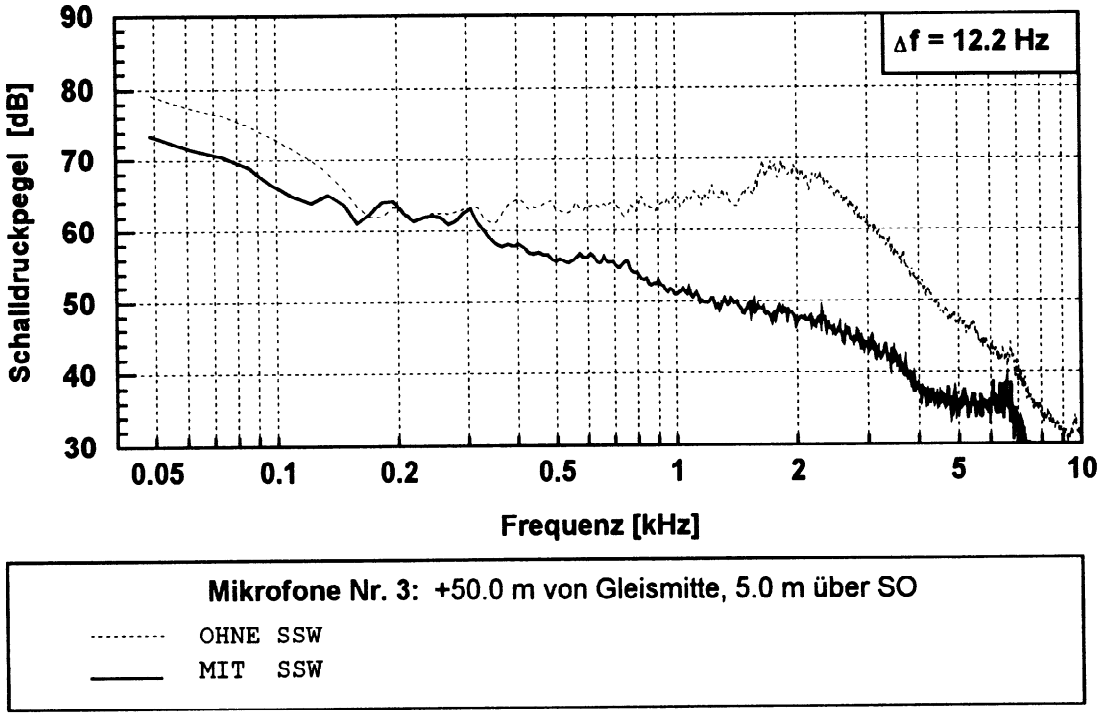


Bild A24 ICE 1, Fahrt 018, Mikrofone 3 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Schmalbandspektren bei ungeschliffenen Schienen

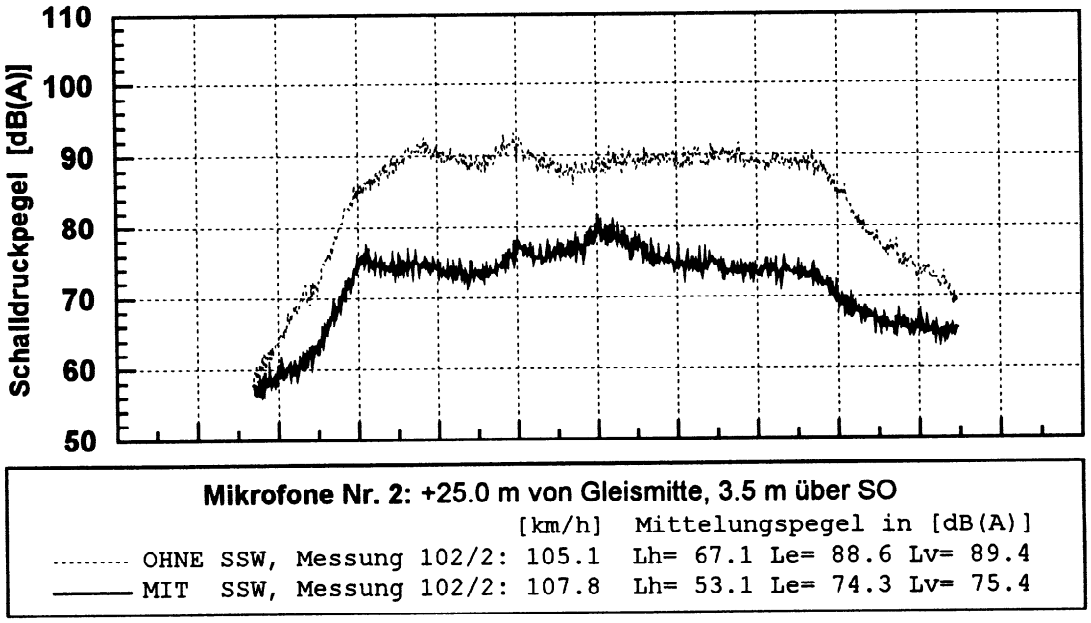


Bild A25 Güterzug, Fahrt 102, Mikrofone 2 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Pegelverläufe bei ungeschliffenen Schienen

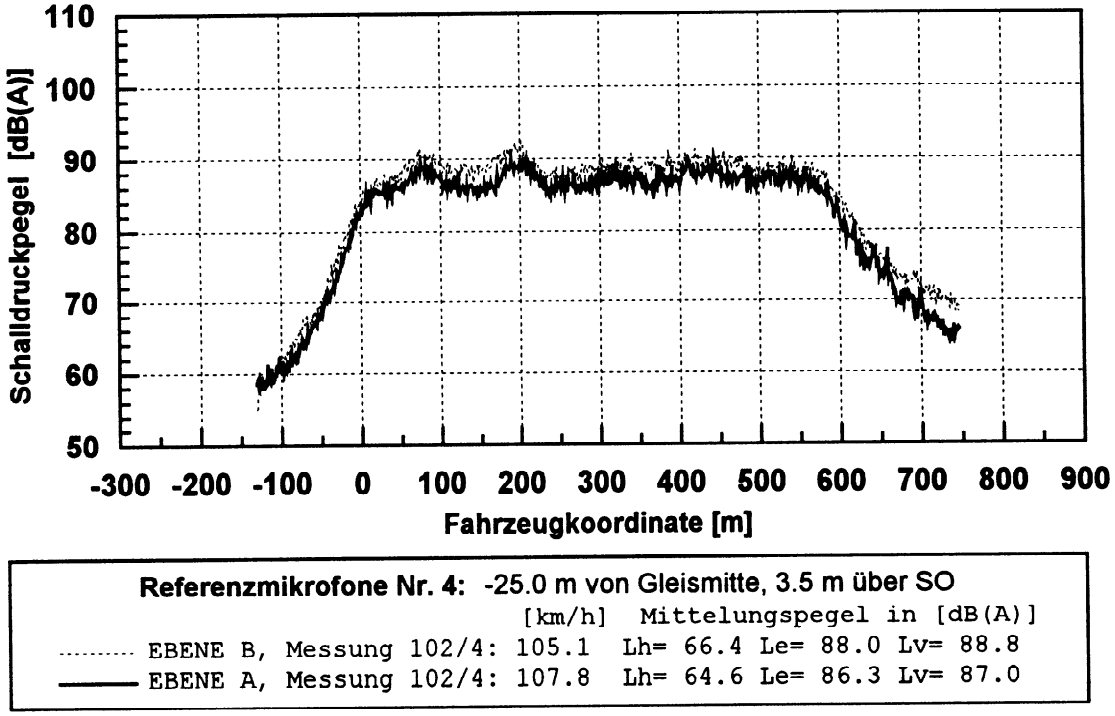


Bild A26 Güterzug, Fahrt 102, Mikrofone 4 auf jenseitiger Gleisseite ohne SSW in beiden Meßebenen, Pegelverläufe bei ungeschliffenen Schienen

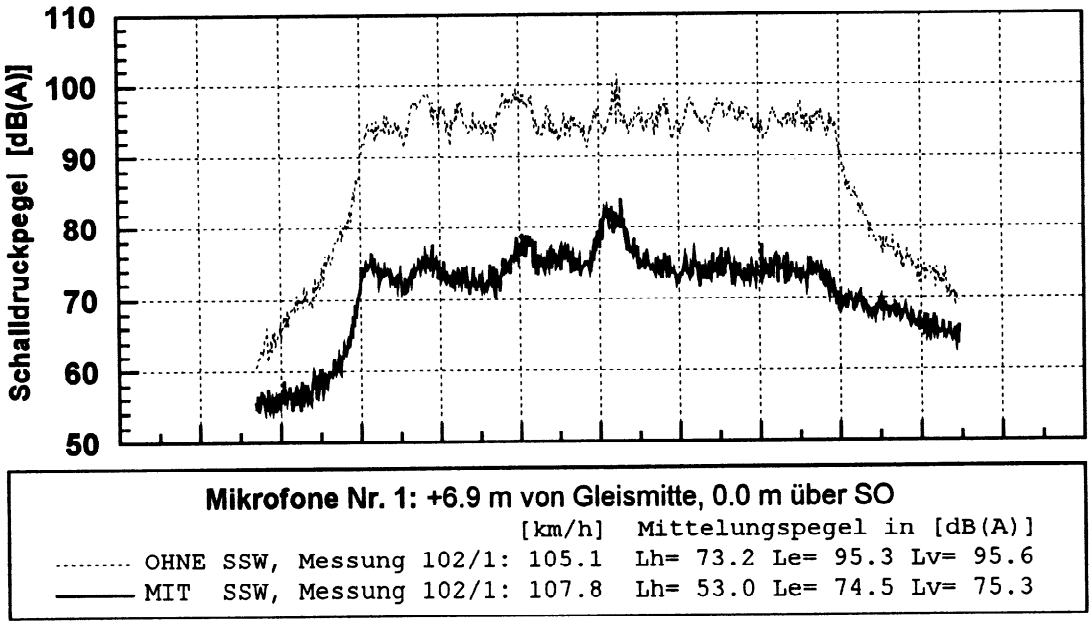


Bild A27 Güterzug, Fahrt 102, Mikrofone 1 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Pegelverläufe bei ungeschliffenen Schienen

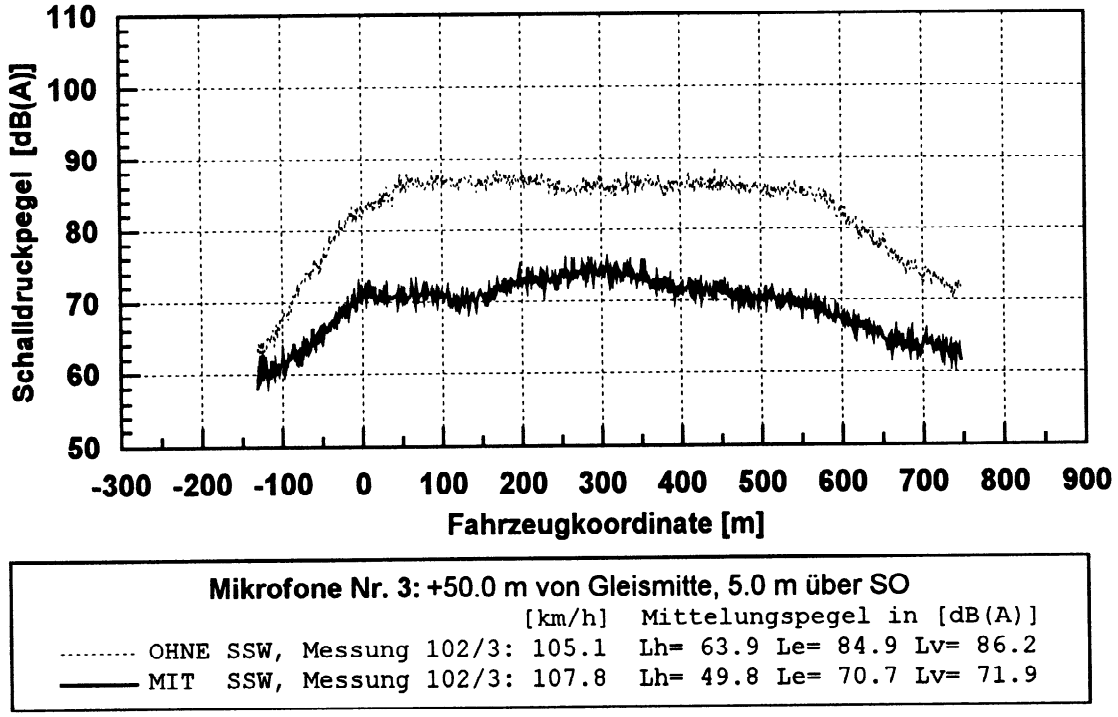


Bild A28 Güterzug, Fahrt 102, Mikrofone 3 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Pegelverläufe bei ungeschliffenen Schienen

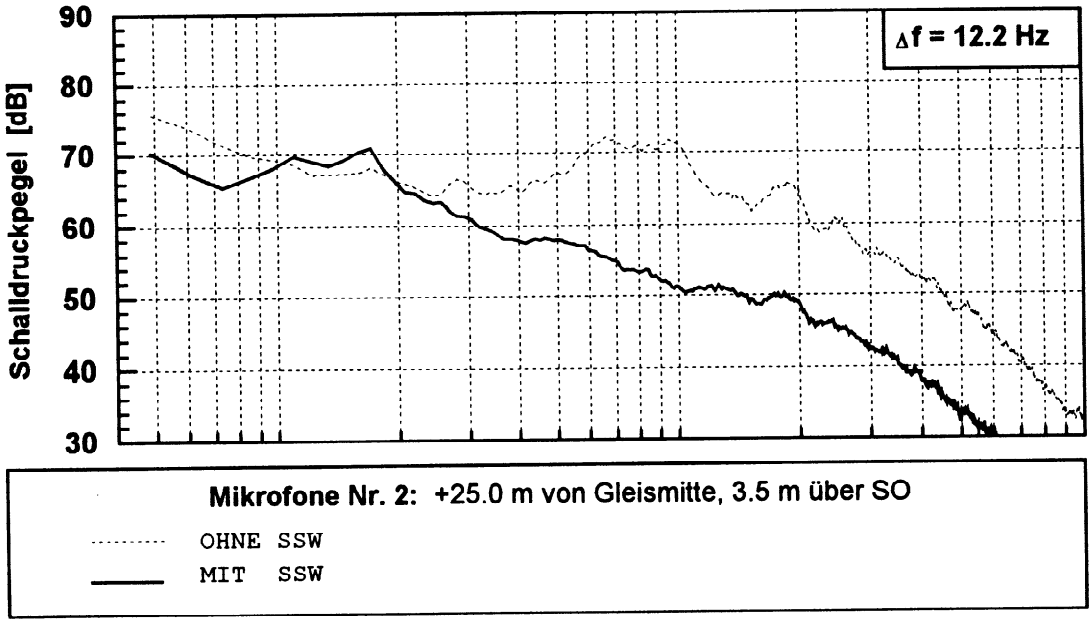


Bild A29 Güterzug, Fahrt 102, Mikrofone 2 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Schmalbandspektren bei ungeschliffenen Schienen

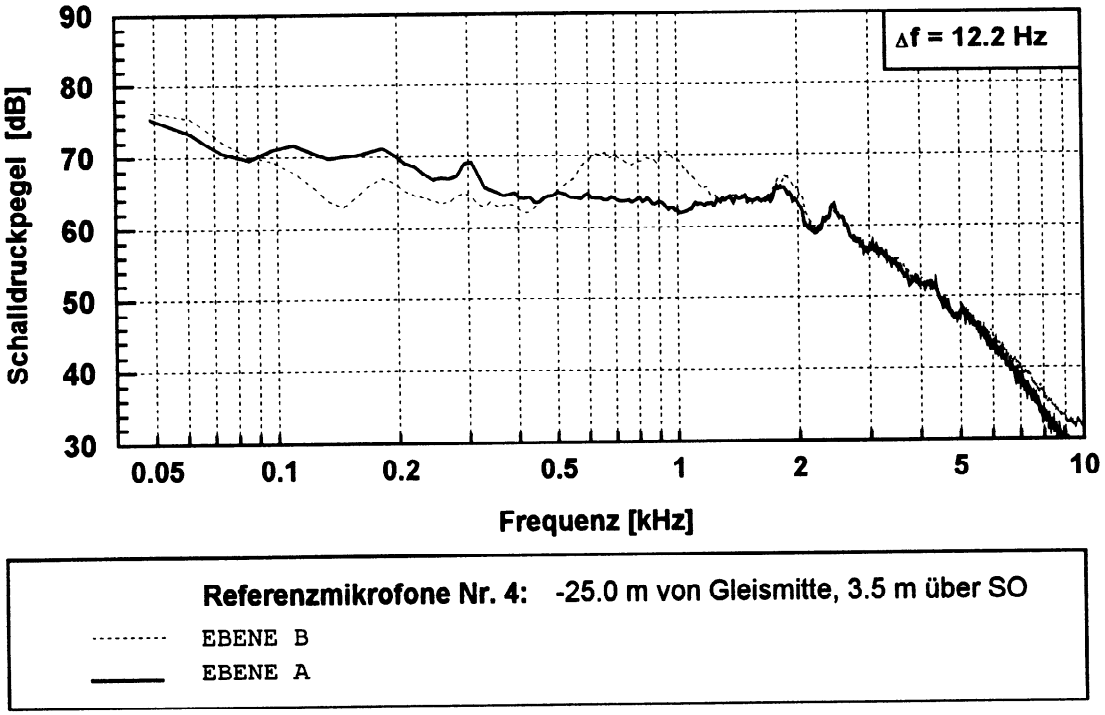


Bild A30 Güterzug, Fahrt 102, Mikrofone 4 auf jenseitiger Gleisseite ohne SSW in beiden Meßebenen, Schmalbandspektren bei ungeschliffenen Schienen

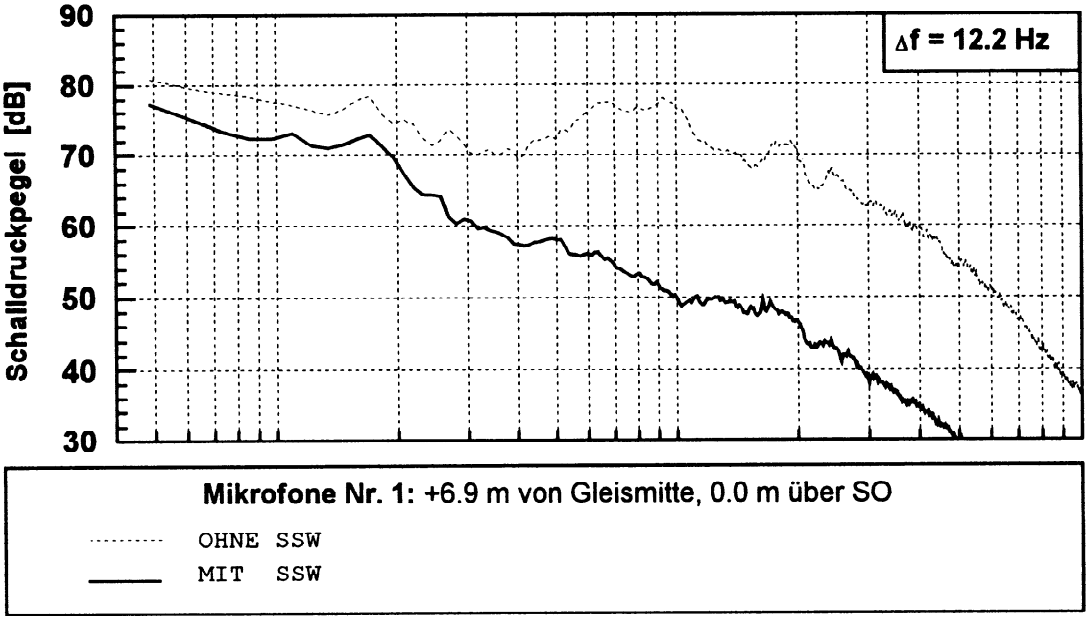


Bild A31 Güterzug, Fahrt 102, Mikrofone 1 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Schmalbandspektren bei ungeschliffenen Schienen

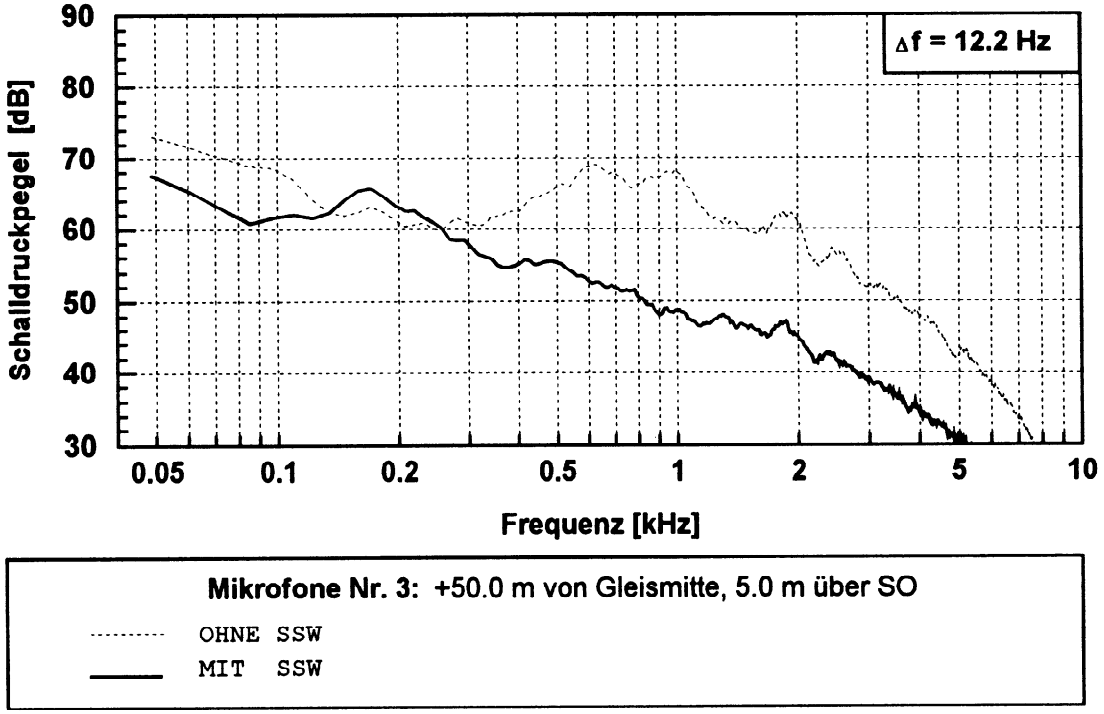


Bild A32 Güterzug, Fahrt 102, Mikrofone 3 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Schmalbandspektren bei ungeschliffenen Schienen

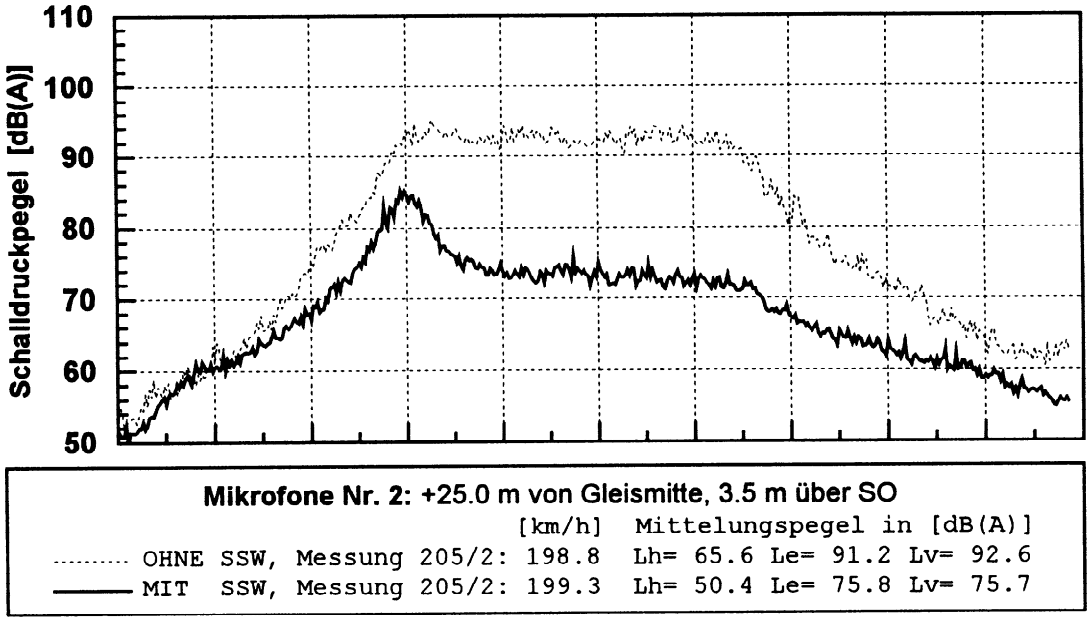


Bild A33 IC-Zug, Fahrt 205, Mikrofone 2 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Pegelverläufe bei ungeschliffenen Schienen

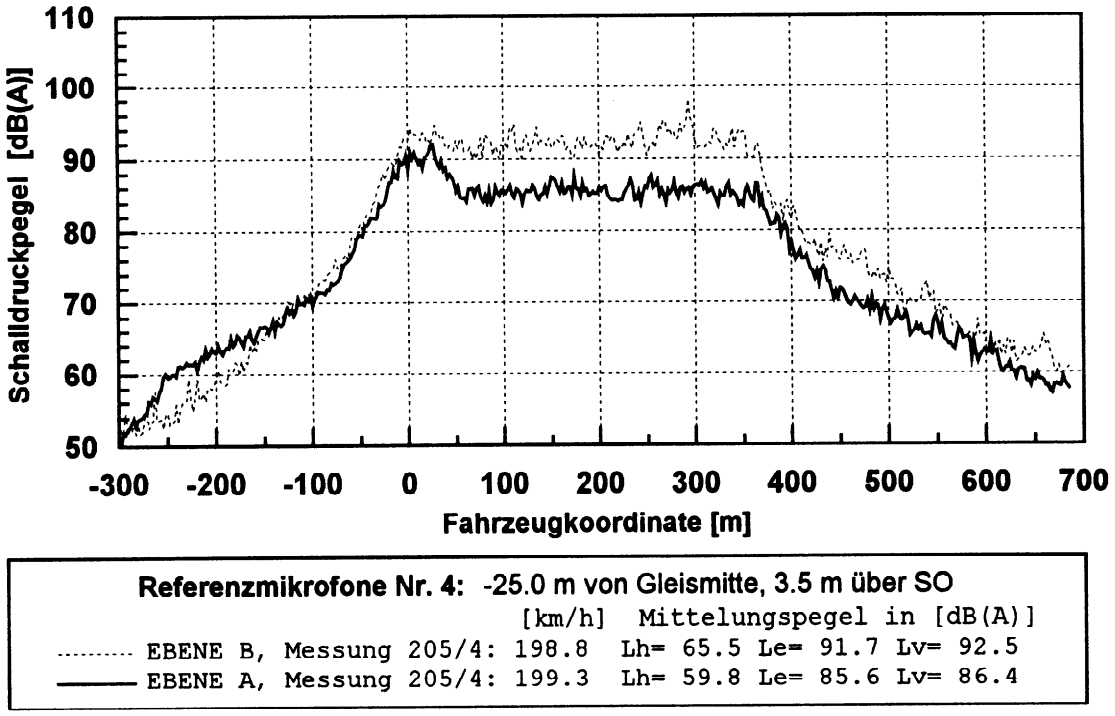


Bild A34 IC-Zug, Fahrt 205, Mikrofone 4 auf jenseitiger Gleisseite ohne SSW in beiden Meßebenen, Pegelverläufe bei ungeschliffenen Schienen

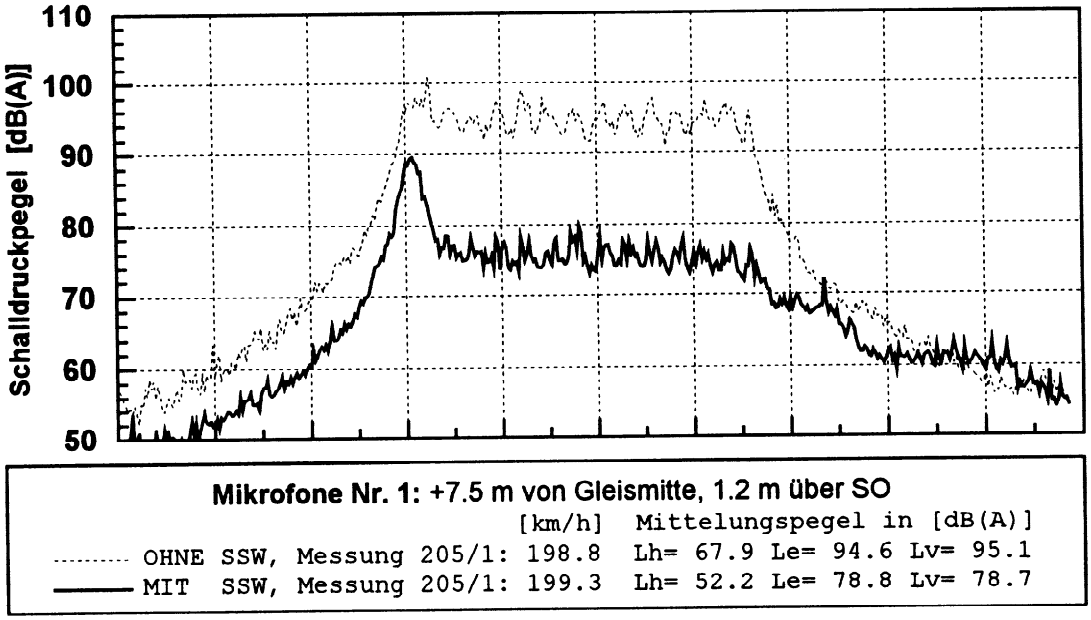


Bild A35 IC-Zug, Fahrt 205, Mikrofone 1 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Pegelverläufe bei ungeschliffenen Schienen

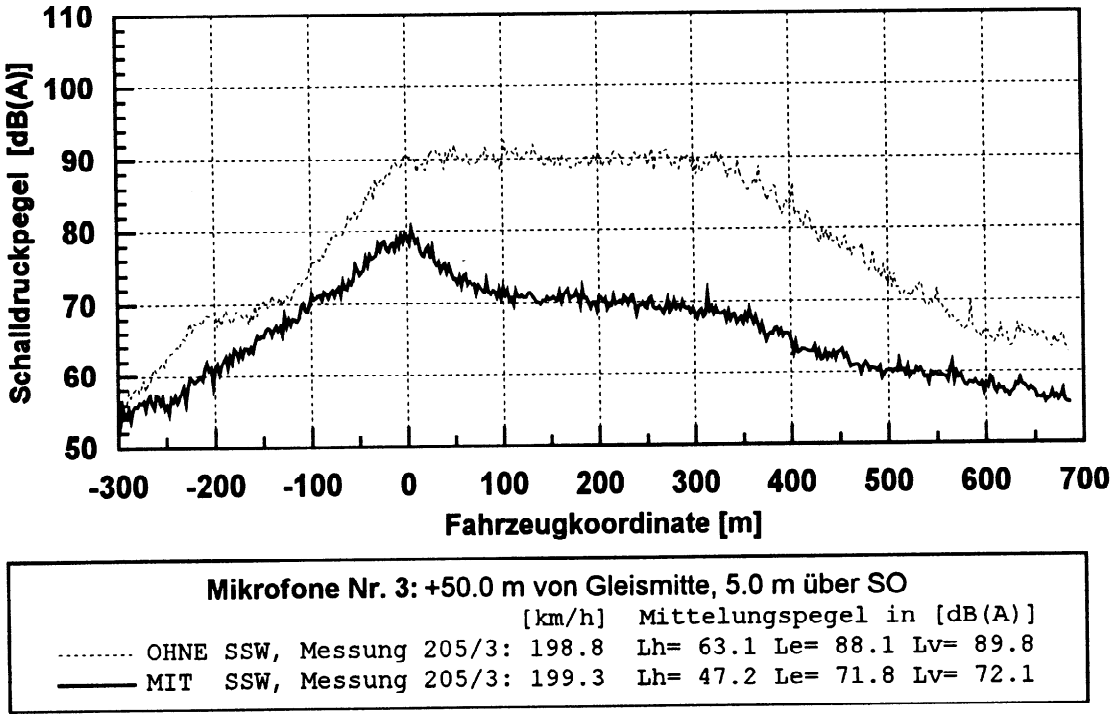


Bild A36 IC-Zug, Fahrt 205, Mikrofone 3 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Pegelverläufe bei ungeschliffenen Schienen

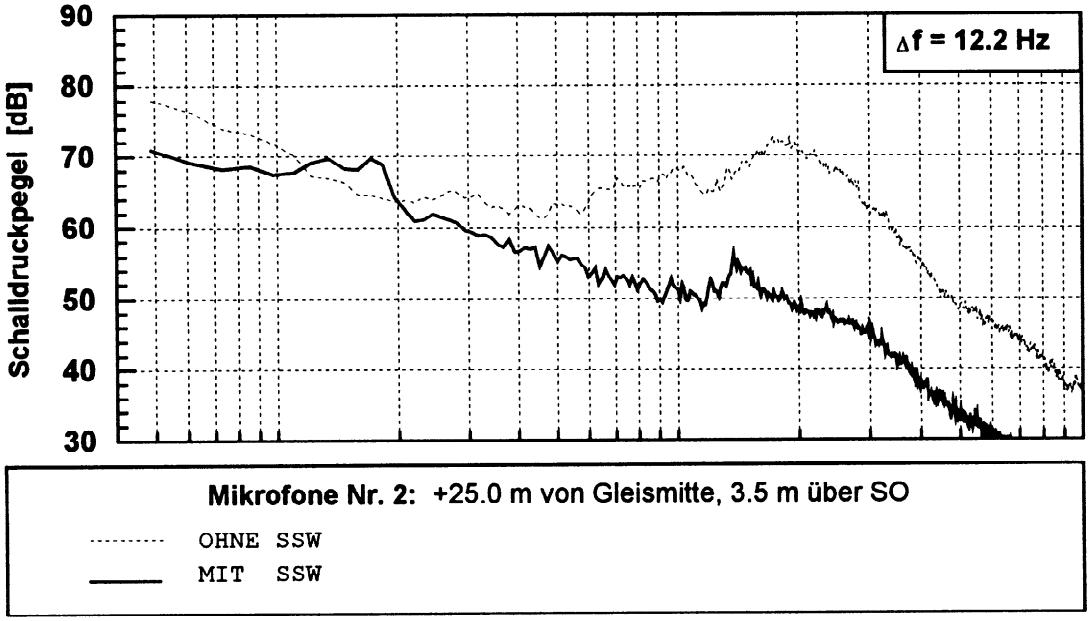


Bild A37 IC-Zug, Fahrt 205, Mikrofone 2 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Schmalbandspektren bei ungeschliffenen Schienen

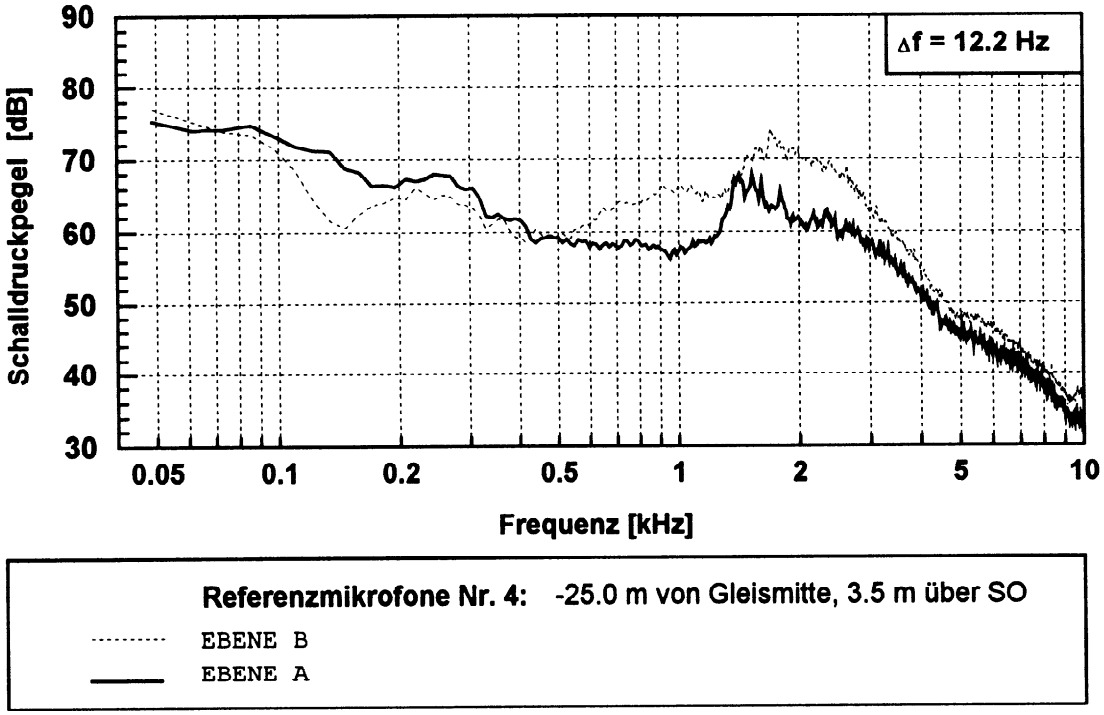


Bild A38 IC-Zug, Fahrt 205, Mikrofone 4 auf jenseitiger Gleisseite ohne SSW in beiden Meßebenen, Schmalbandspektren bei ungeschliffenen Schienen

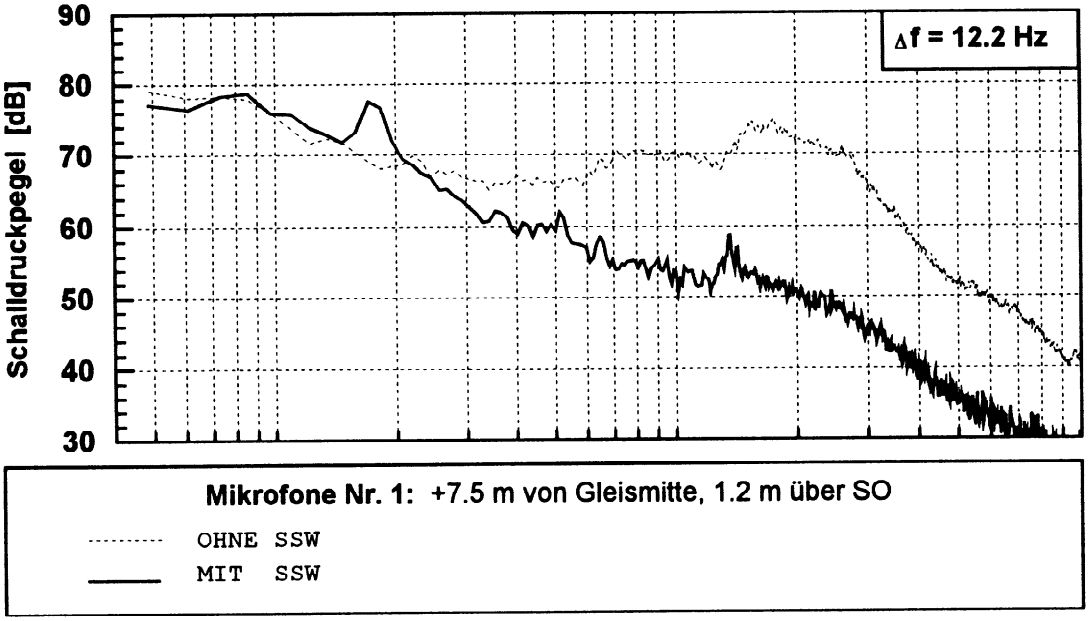


Bild A39 IC-Zug, Fahrt 205, Mikrofone 1 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Schmalbandspektren bei ungeschliffenen Schienen

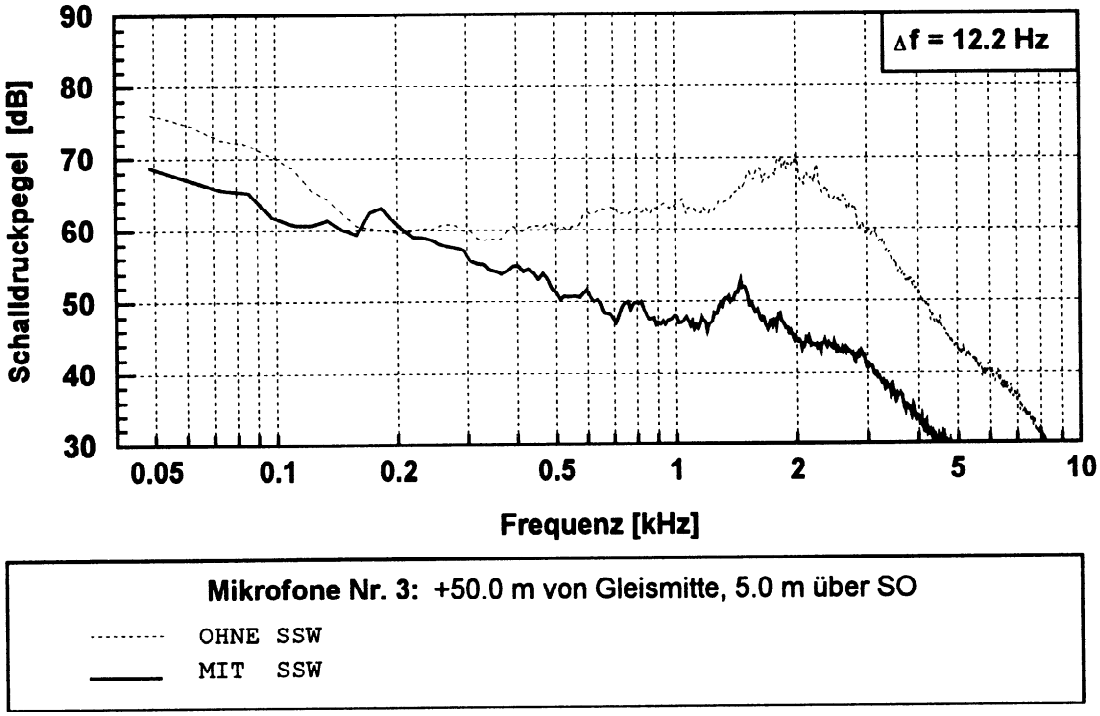


Bild A40 IC-Zug, Fahrt 205, Mikrofone 3 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Schmalbandspektren bei ungeschliffenen Schienen

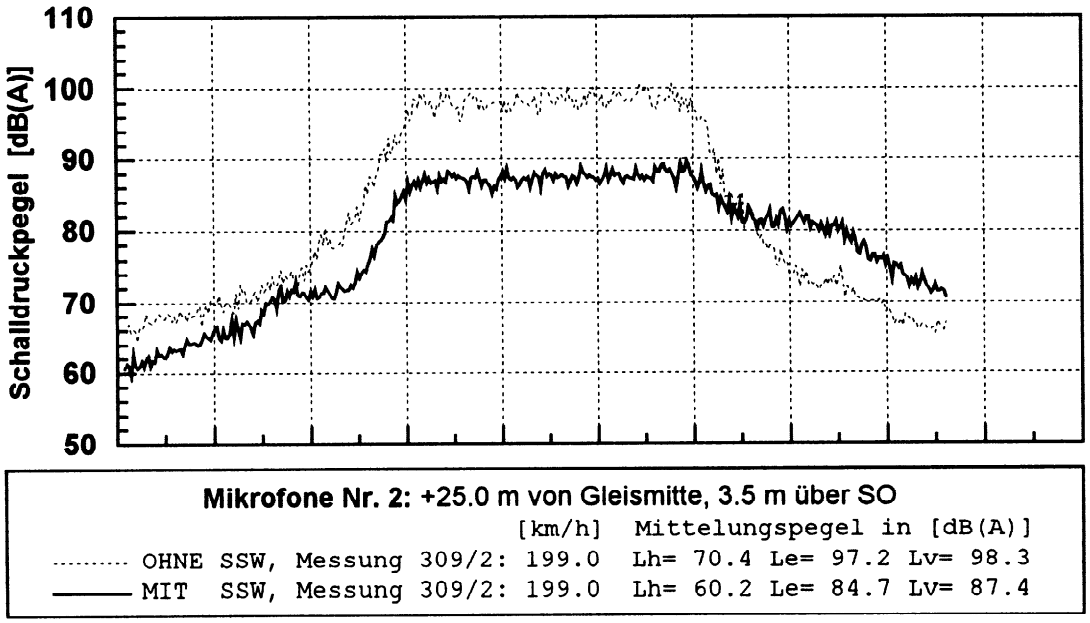


Bild A41 ICE 1, Fahrt 309, Mikrofone 2 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Pegelverläufe bei ungeschliffenen Schienen

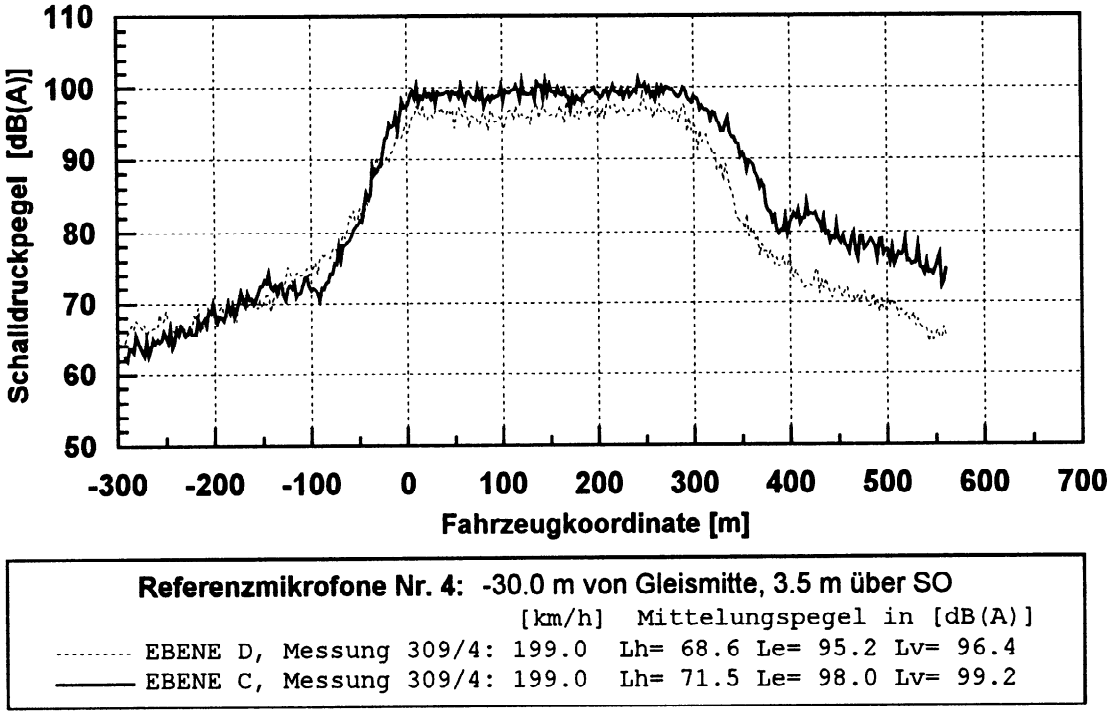


Bild A42 ICE 1, Fahrt 309, Mikrofone 4 auf jenseitiger Gleisseite ohne SSW in beiden Meßebenen, Pegelverläufe bei ungeschliffenen Schienen

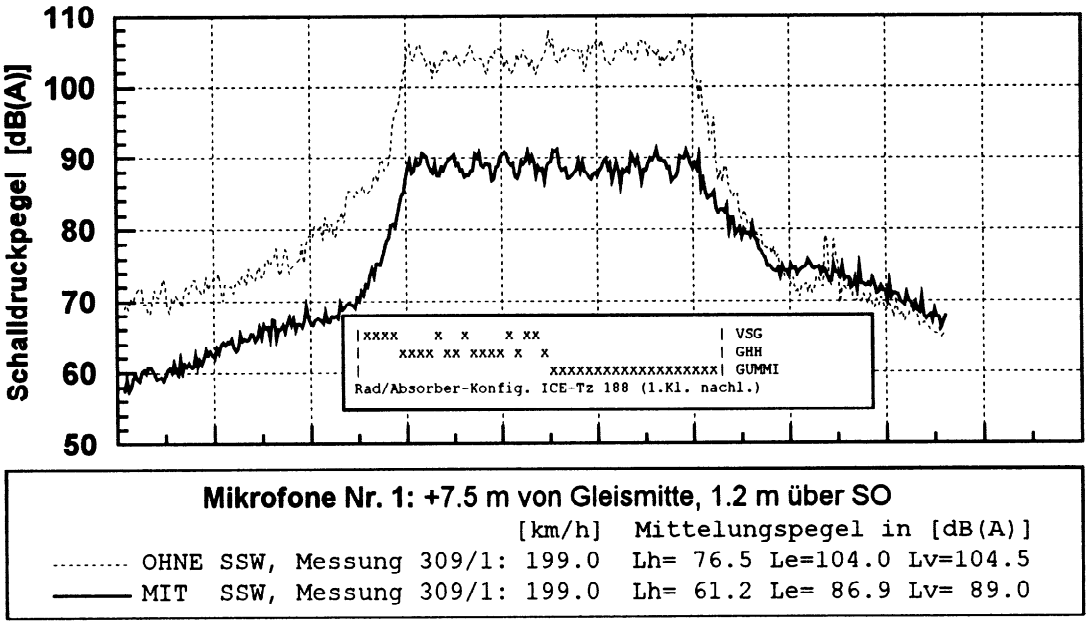


Bild A43 ICE 1, Fahrt 309, Mikrofone 1 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Pegelverläufe bei ungeschliffenen Schienen

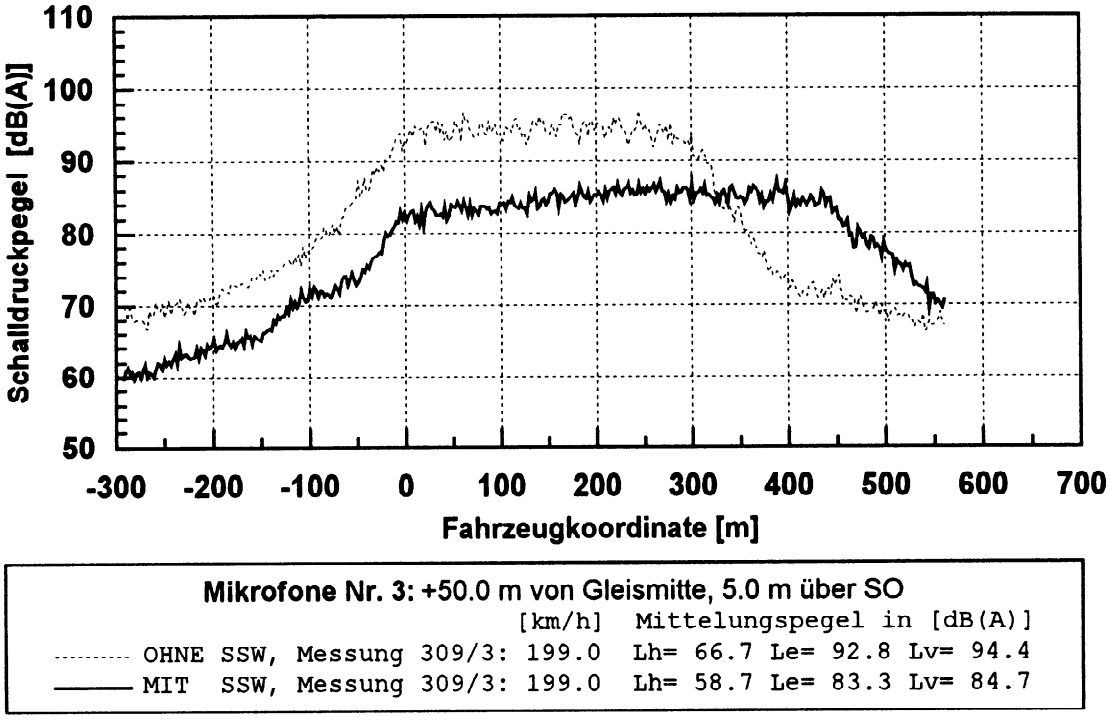


Bild A44 ICE 1, Fahrt 309, Mikrofone 3 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Pegelverläufe bei ungeschliffenen Schienen

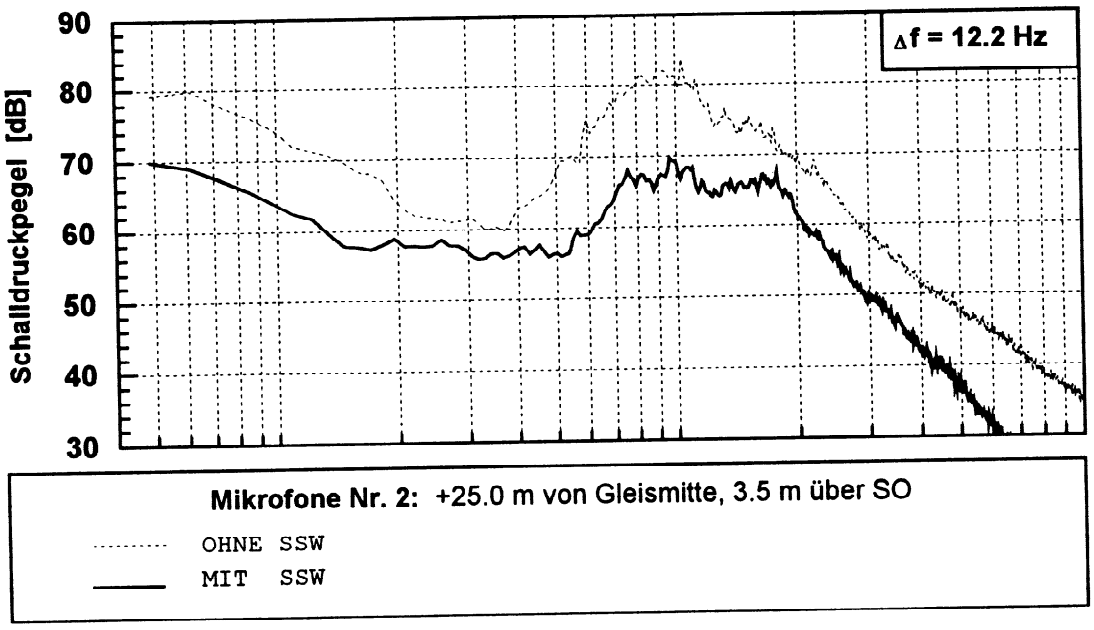


Bild A45 ICE 1, Fahrt 309, Mikrofone 2 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Schmalbandspektren bei ungeschliffenen Schienen

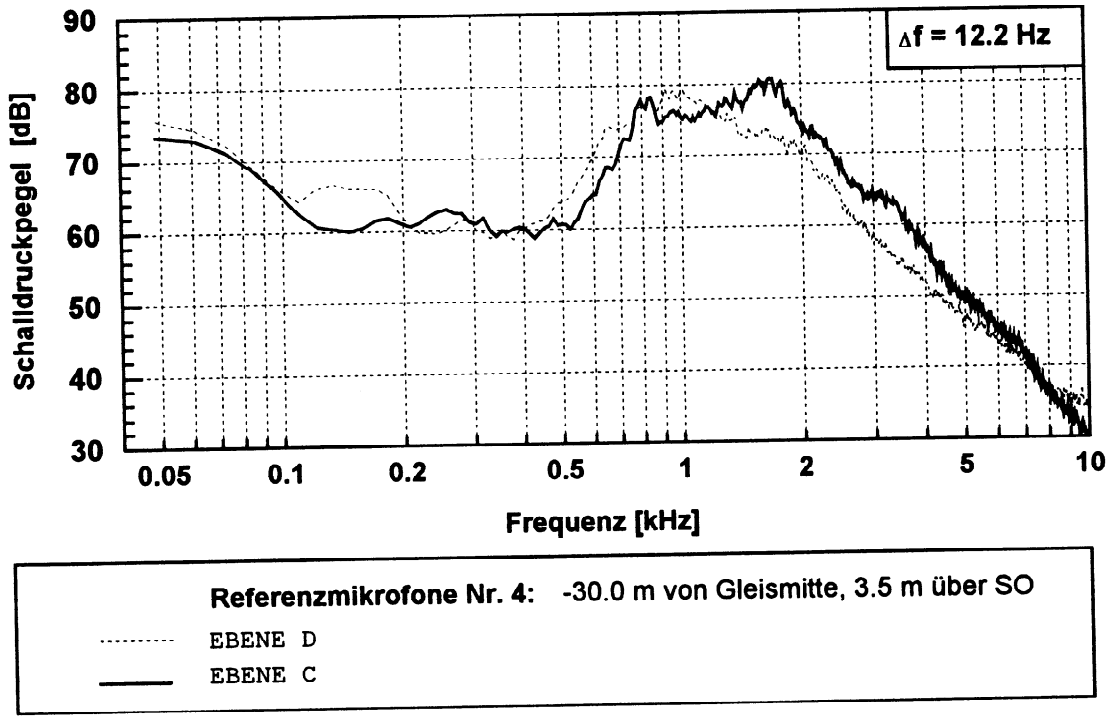


Bild A46 ICE 1, Fahrt 309, Mikrofone 4 auf jenseitiger Gleisseite ohne SSW in beiden Meßebenen, Schmalbandspektren bei ungeschliffenen Schienen

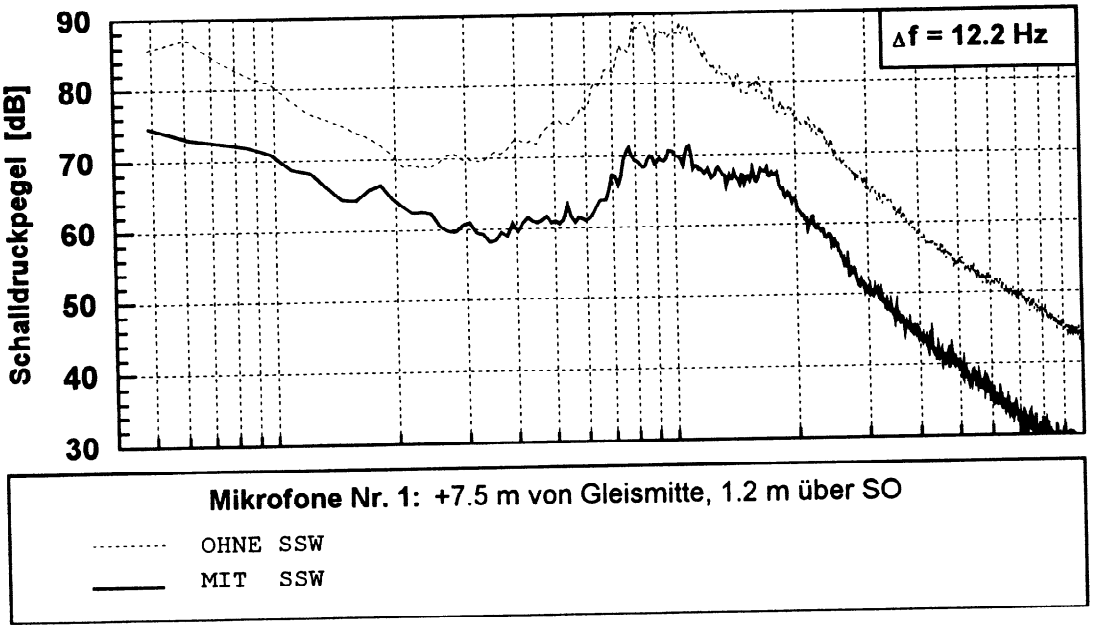


Bild A47 ICE 1, Fahrt 309, Mikrofone 1 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Schmalbandspektren bei ungeschliffenen Schienen

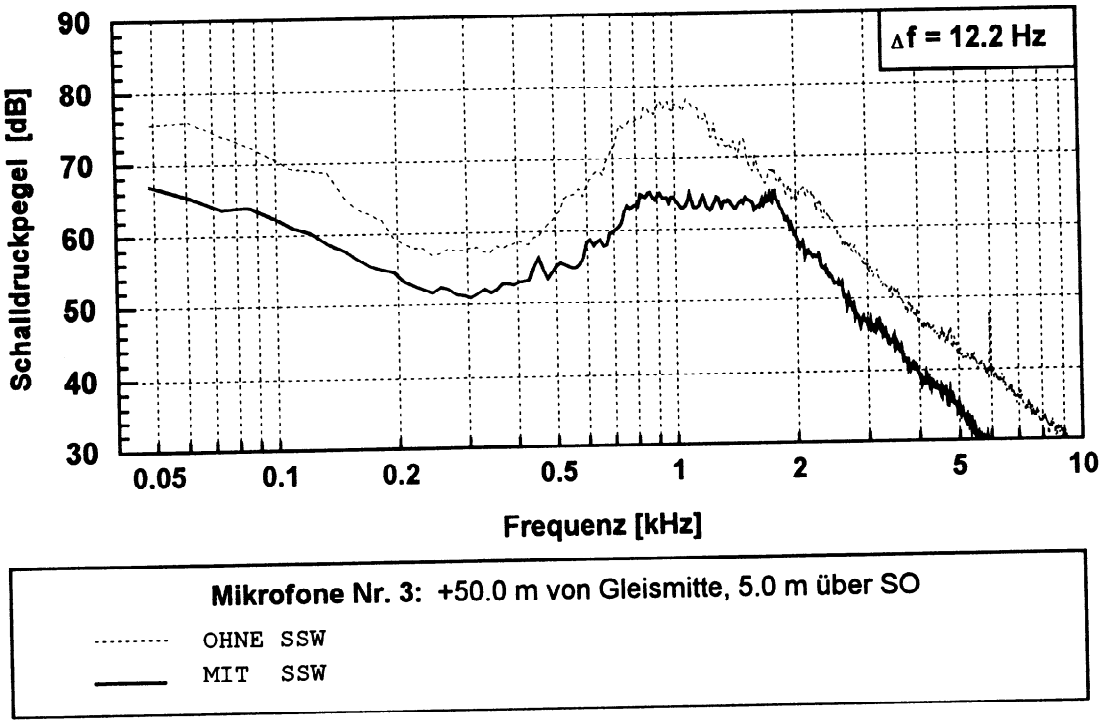


Bild A48 ICE 1, Fahrt 309, Mikrofone 3 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Schmalbandspektren bei ungeschliffenen Schienen

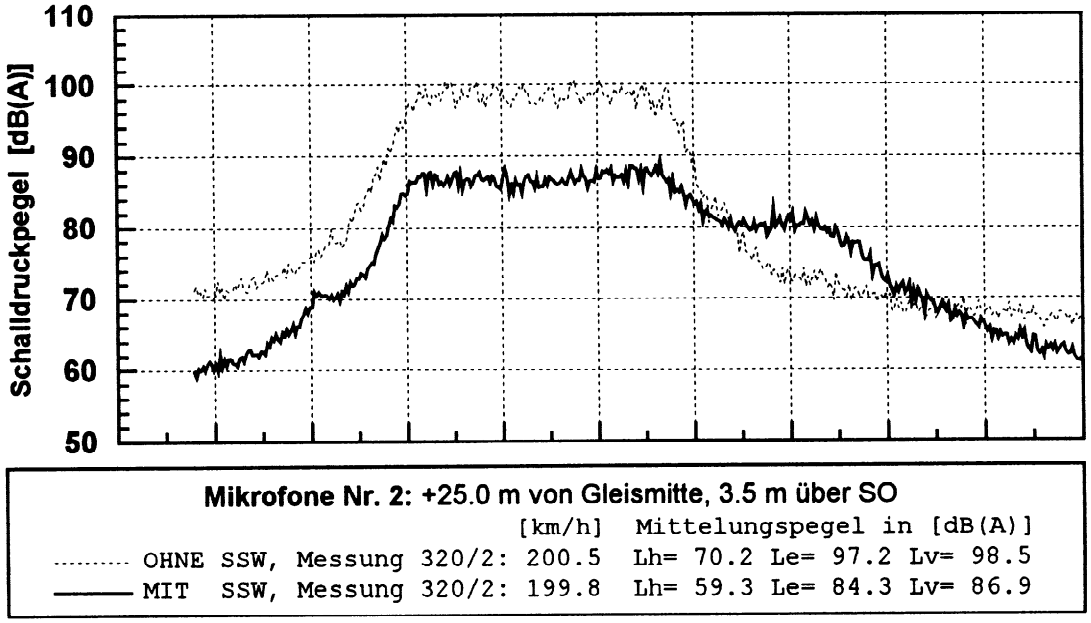


Bild A49 ICE 2, Fahrt 320, Mikrofone 2 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Pegelverläufe bei ungeschliffenen Schienen

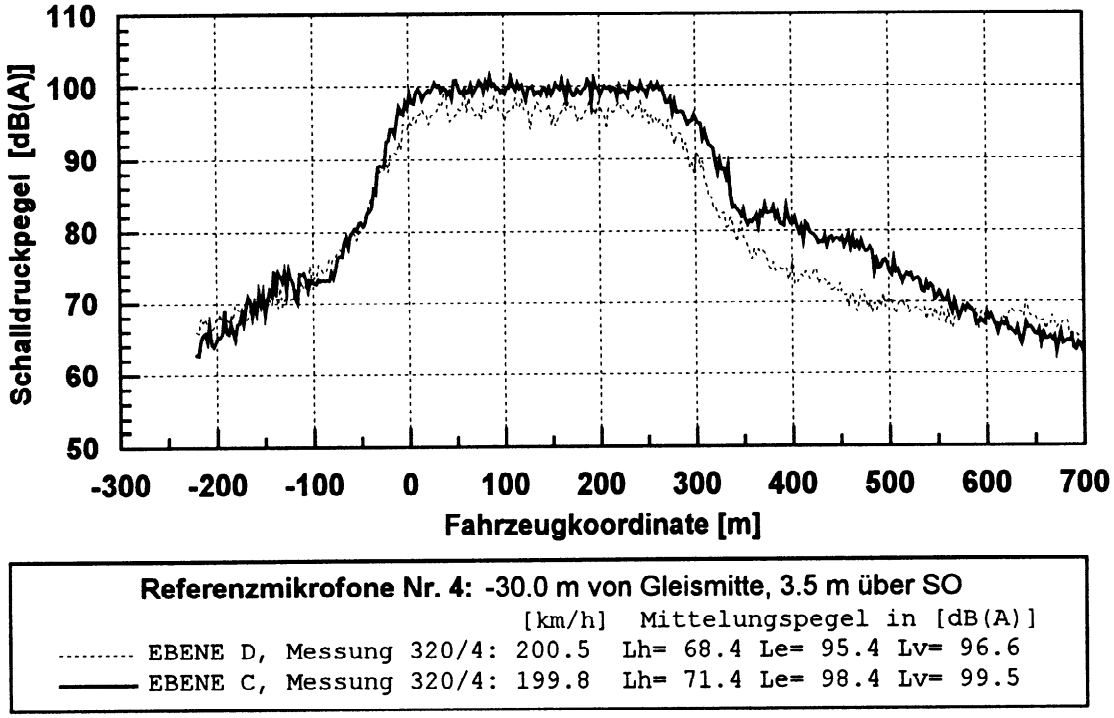


Bild A50 ICE 2, Fahrt 320, Mikrofone 4 auf jenseitiger Gleisseite ohne SSW in beiden Meßebenen, Pegelverläufe bei ungeschliffenen Schienen

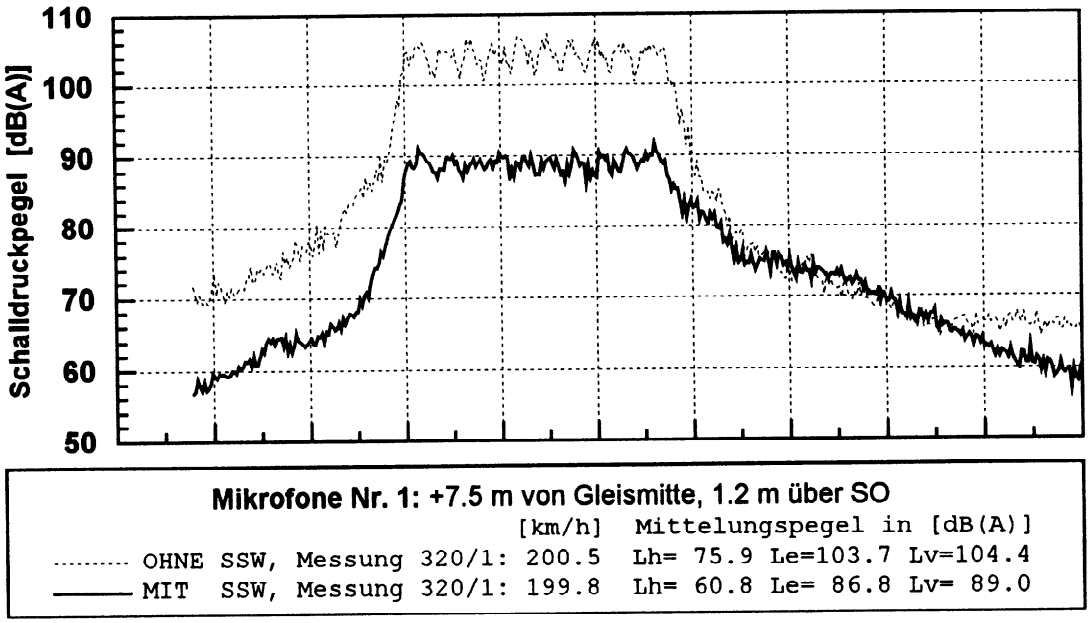


Bild A51 ICE 2, Fahrt 320, Mikrofone 1 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Pegelverläufe bei ungeschliffenen Schienen

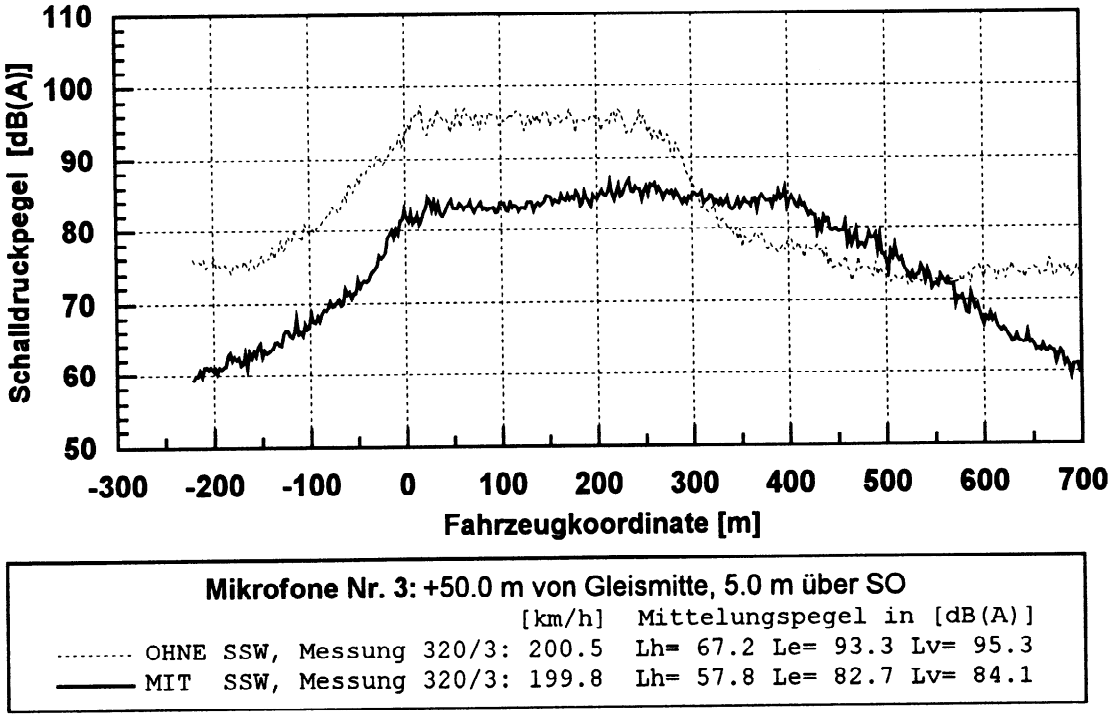


Bild A52 ICE 2, Fahrt 320, Mikrofone 3 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Pegelverläufe bei ungeschliffenen Schienen

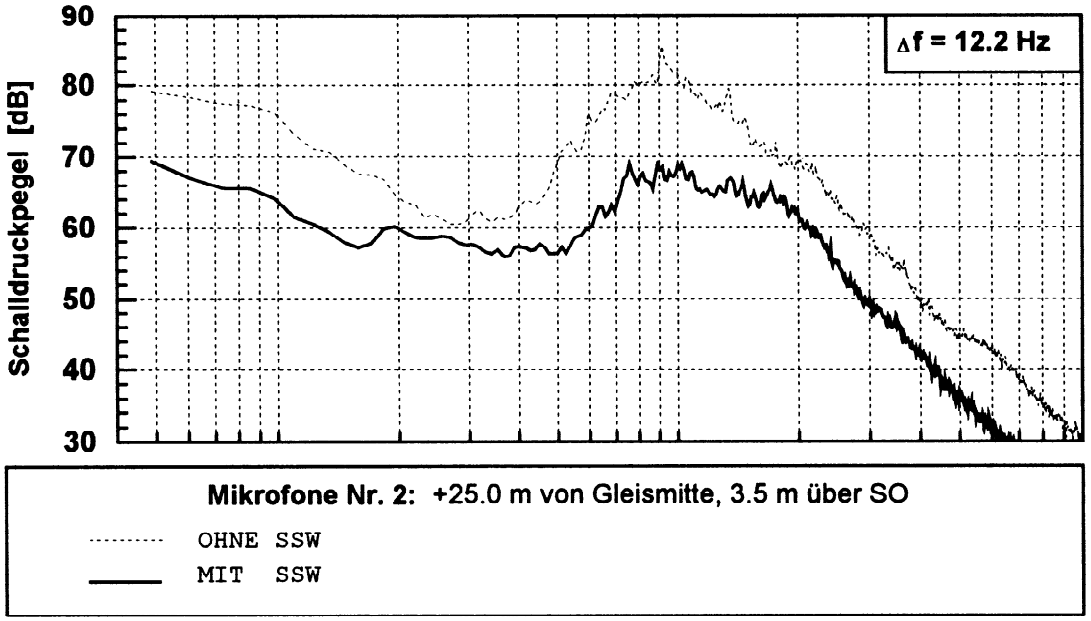


Bild A53 ICE 2, Fahrt 320, Mikrofone 2 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Schmalbandspektren bei ungeschliffenen Schienen

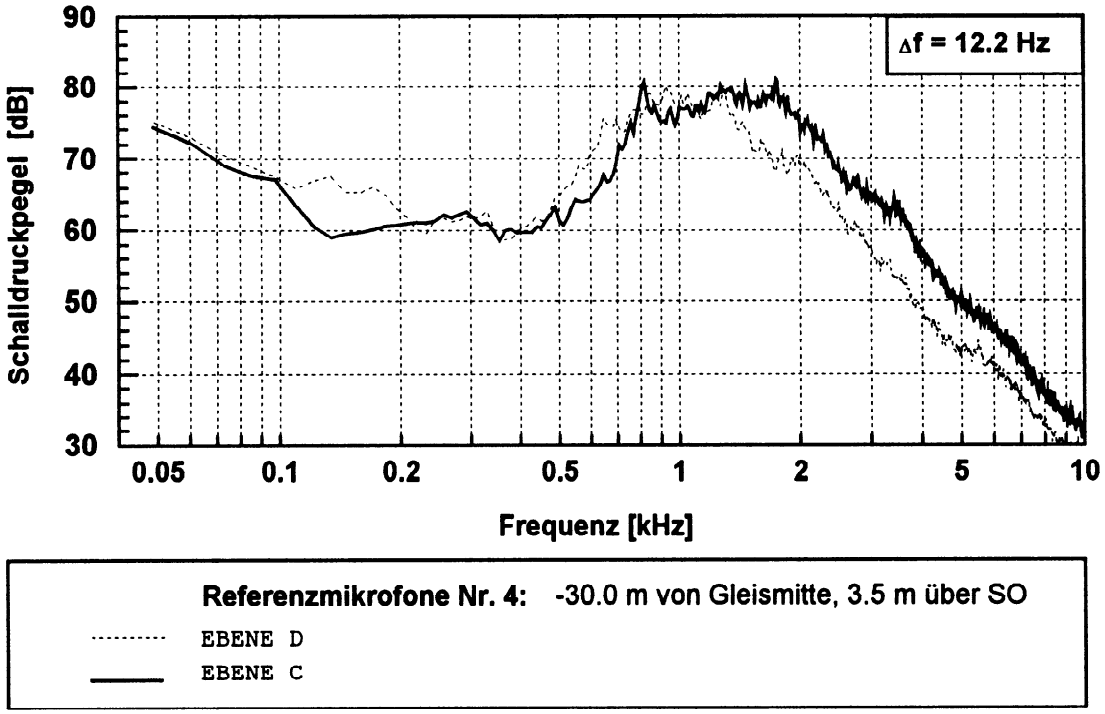


Bild A54 ICE 2, Fahrt 320, Mikrofone 4 auf jenseitiger Gleisseite ohne SSW in beiden Meßebenen, Schmalbandspektren bei ungeschliffenen Schienen

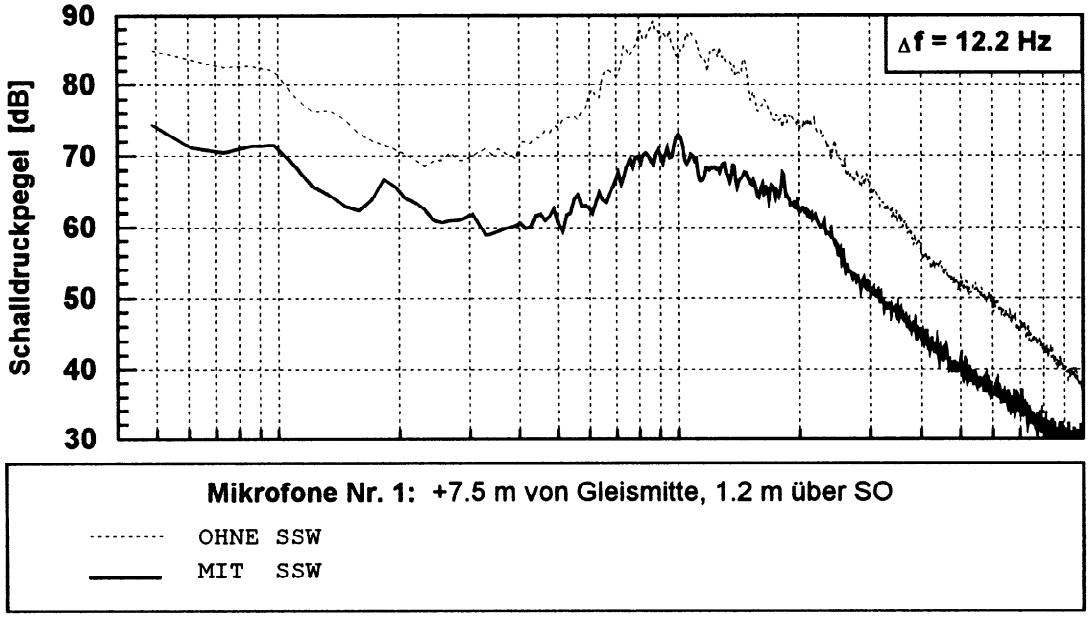


Bild A55 ICE 2, Fahrt 320, Mikrofone 1 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Schmalbandspektren bei ungeschliffenen Schienen

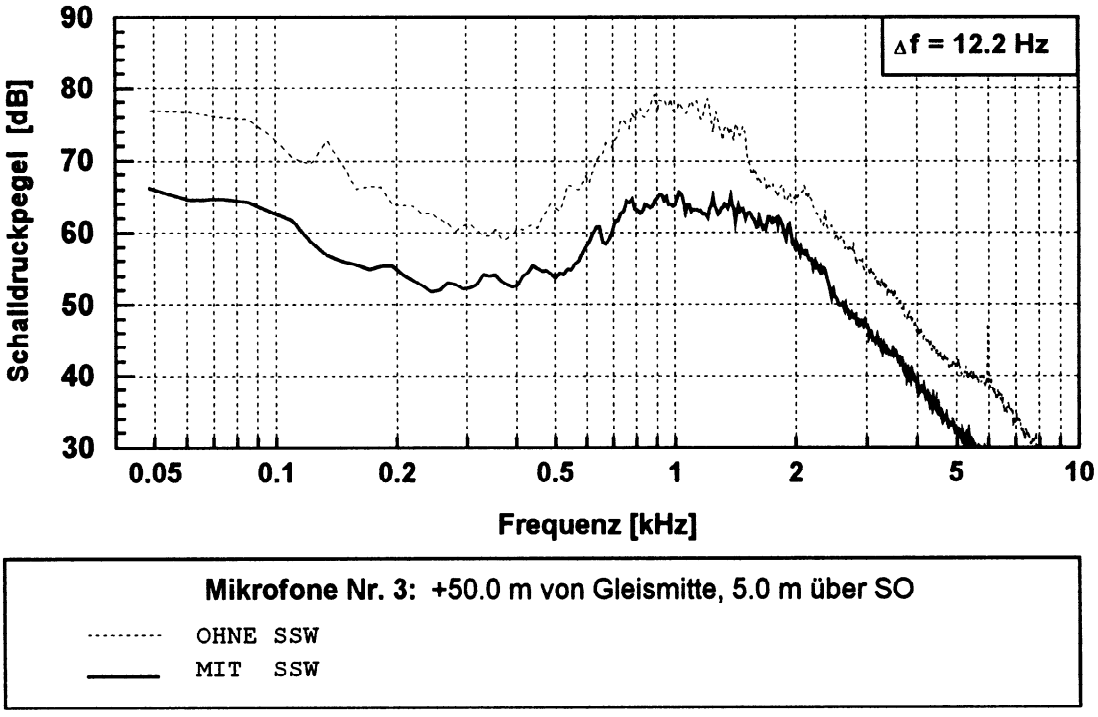


Bild A56 ICE 2, Fahrt 320, Mikrofone 3 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Schmalbandspektren bei ungeschliffenen Schienen

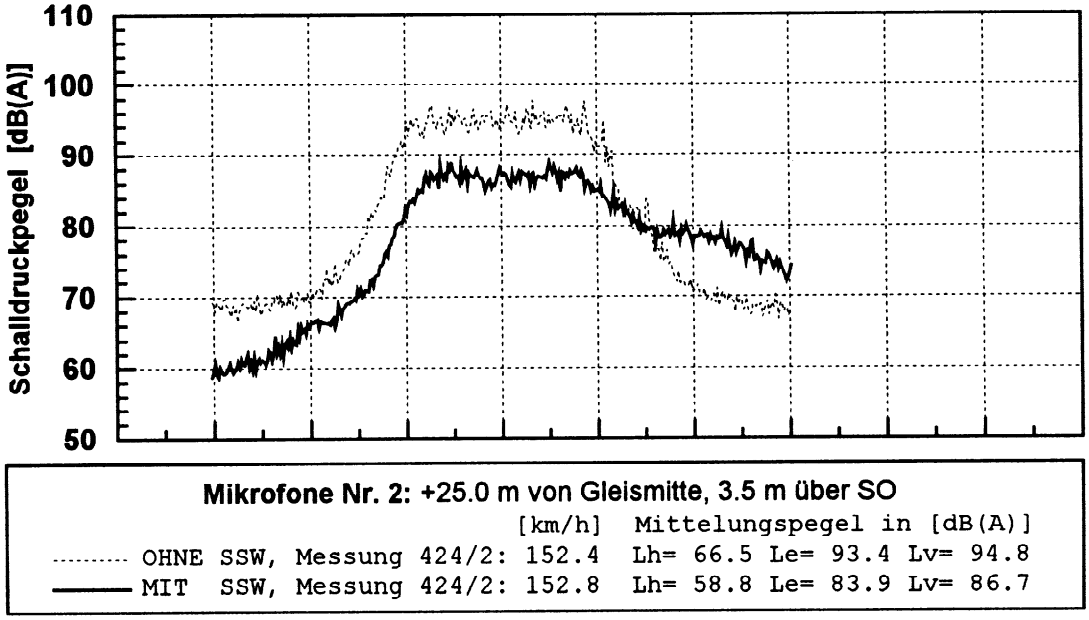


Bild A57 IC-Zug, Fahrt 424, Mikrofone 2 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Pegelverläufe bei ungeschliffenen Schienen

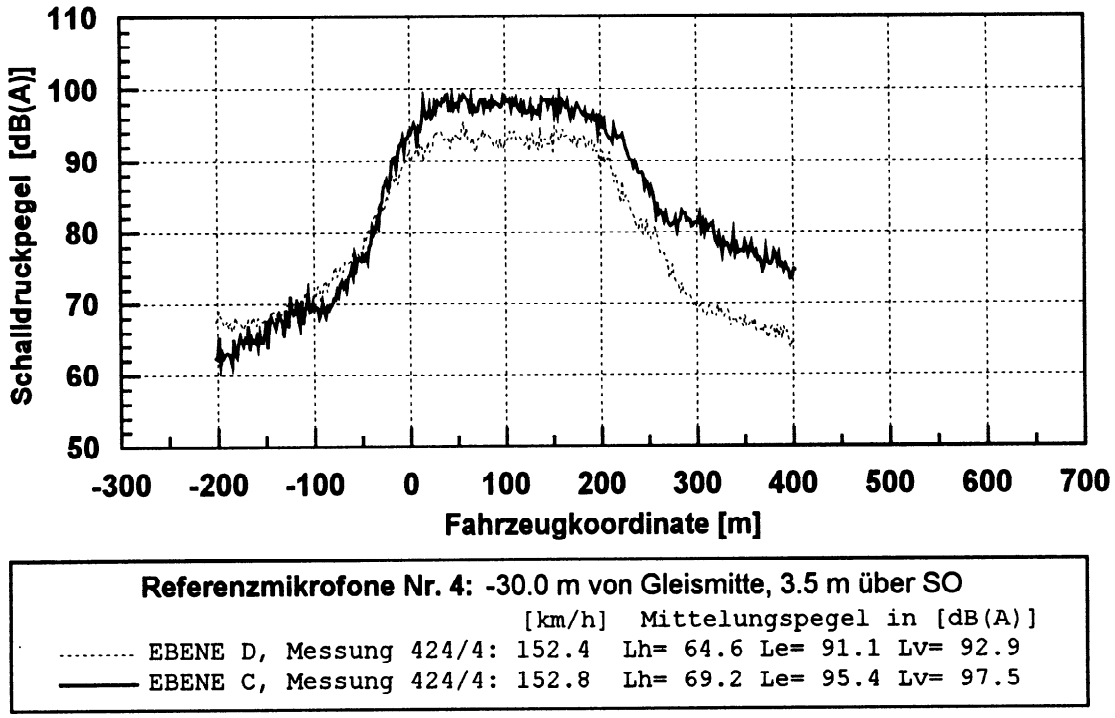


Bild A58 IC-Zug, Fahrt 424, Mikrofone 4 auf jenseitiger Gleisseite ohne SSW in beiden Meßebenen, Pegelverläufe bei ungeschliffenen Schienen

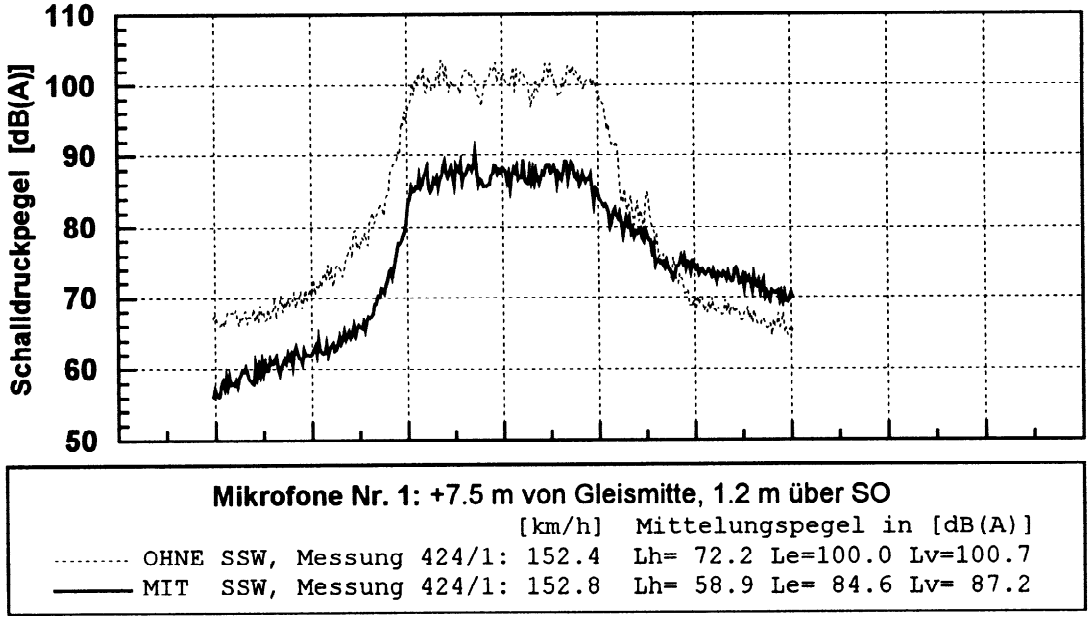


Bild A59 IC-Zug, Fahrt 424, Mikrofone 1 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Pegelverläufe bei ungeschliffenen Schienen

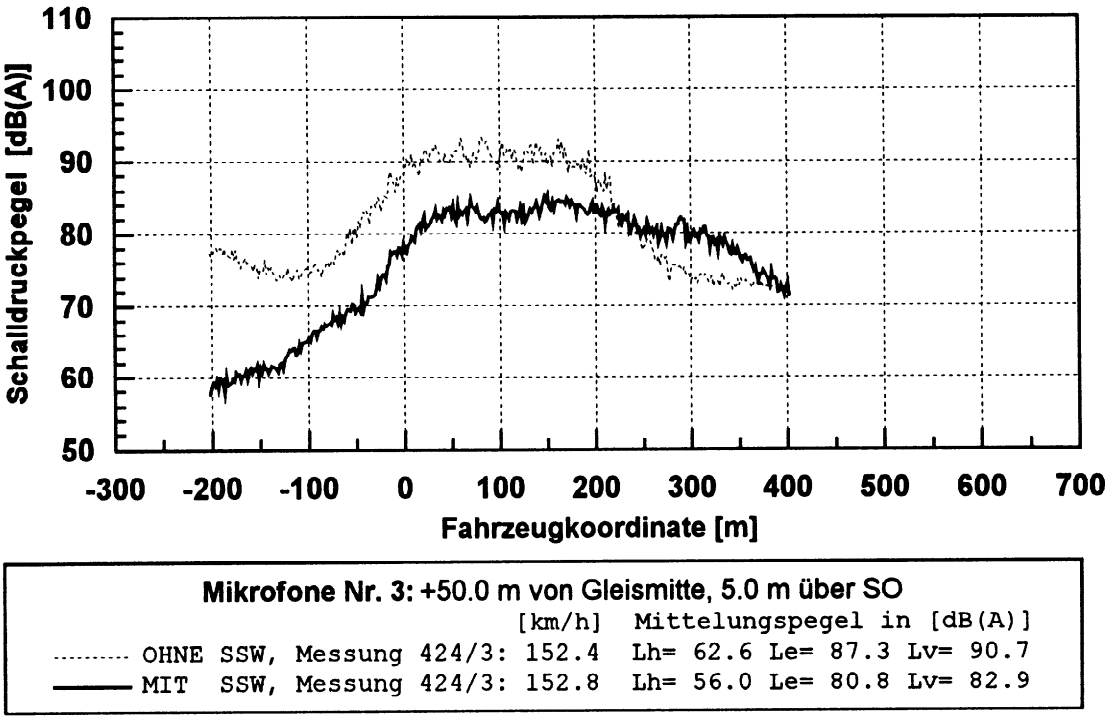


Bild A60 IC-Zug, Fahrt 424, Mikrofone 3 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Pegelverläufe bei ungeschliffenen Schienen

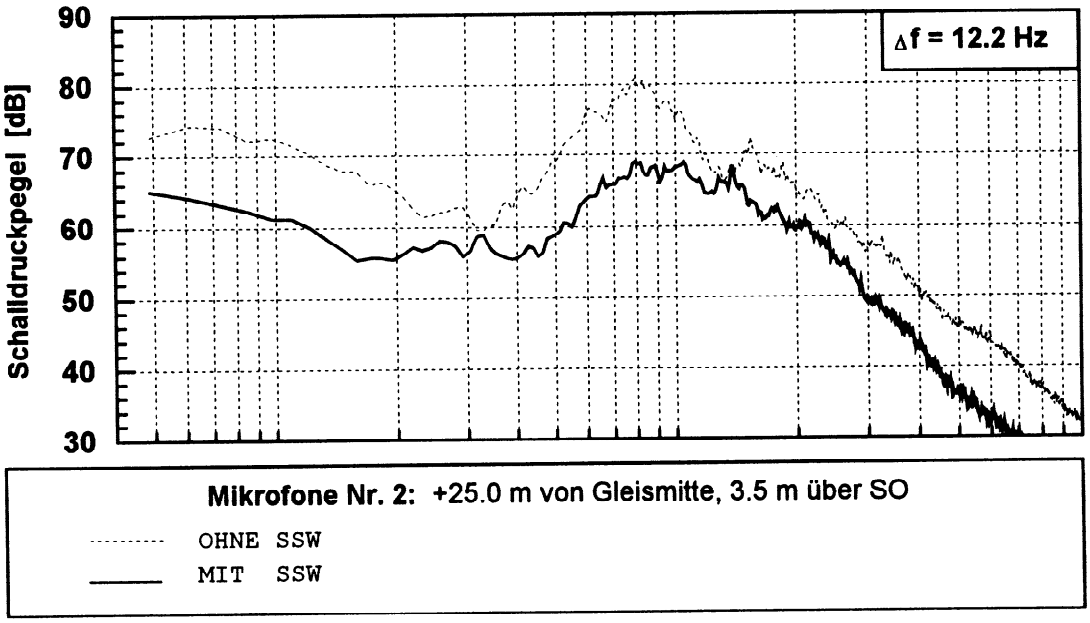


Bild A61 IC-Zug, Fahrt 424, Mikrofone 2 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Schmalbandspektren bei ungeschliffenen Schienen

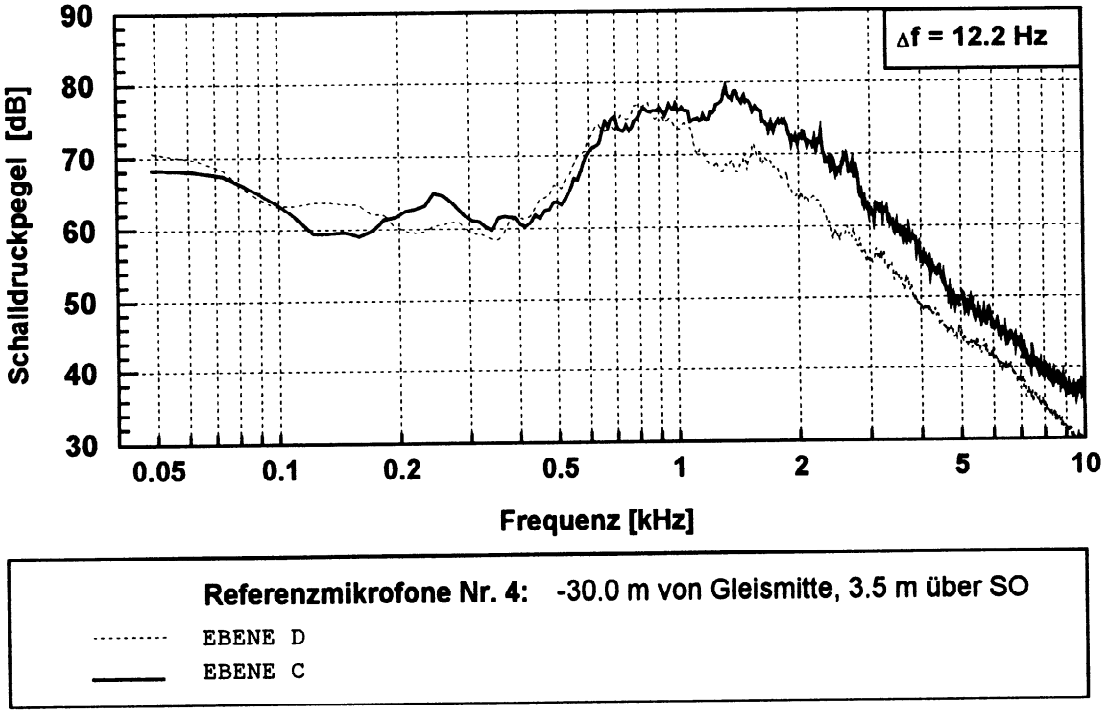


Bild A62 IC-Zug, Fahrt 424, Mikrofone 4 auf jenseitiger Gleisseite ohne SSW in beiden Meßebenen, Schmalbandspektren bei ungeschliffenen Schienen

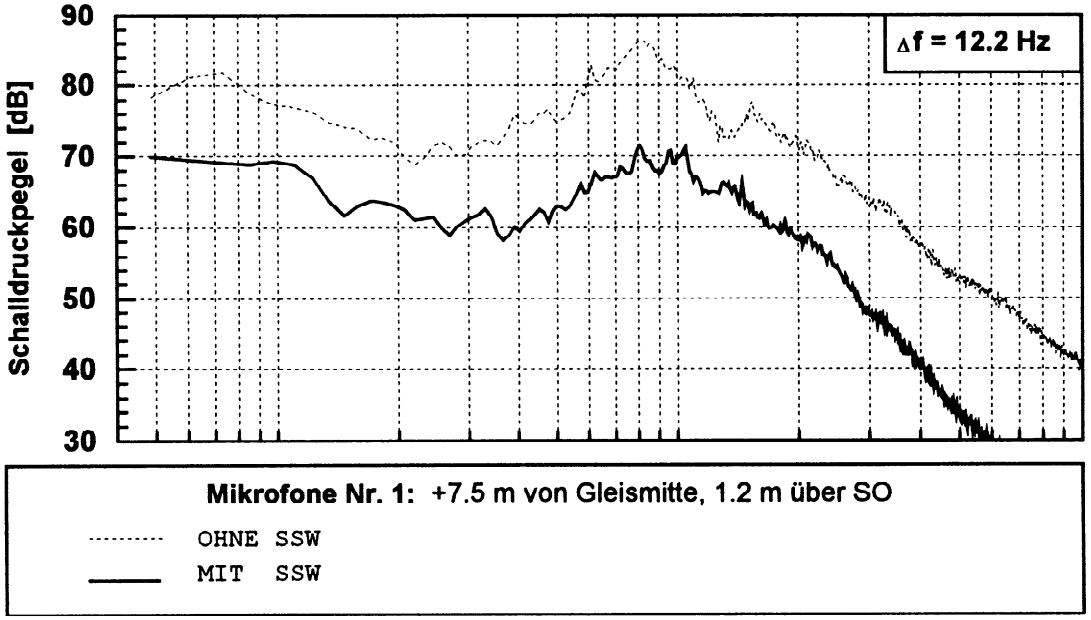


Bild A63 IC-Zug, Fahrt 424, Mikrofone 1 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Schmalbandspektren bei ungeschliffenen Schienen

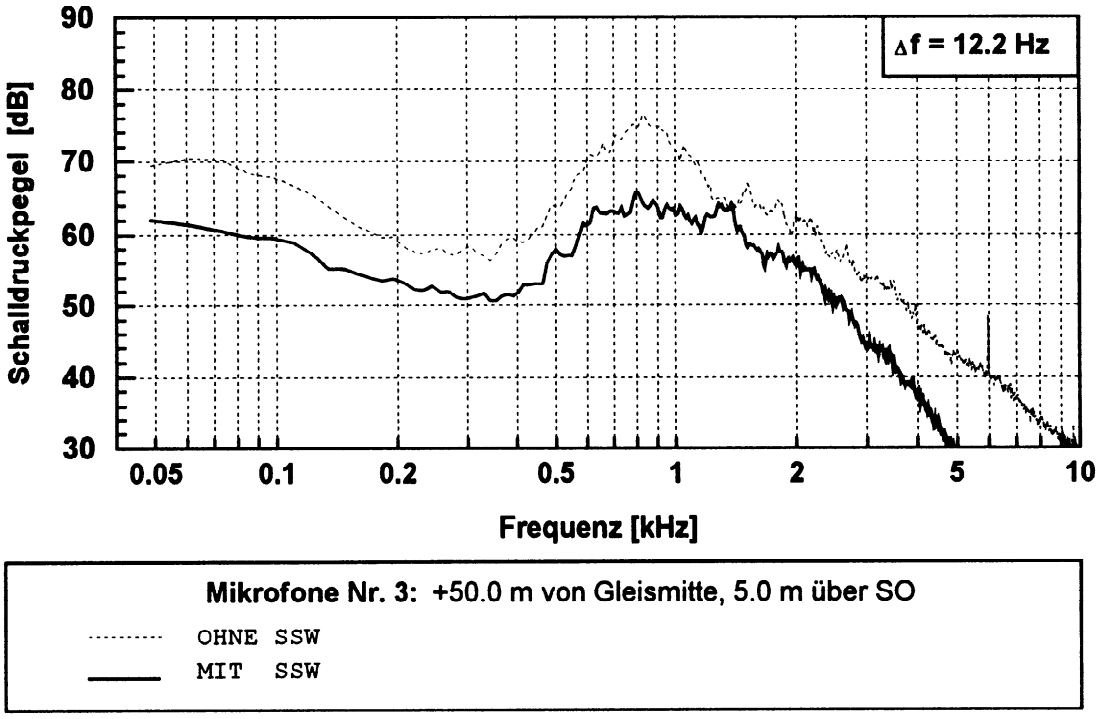


Bild A64 IC-Zug, Fahrt 424, Mikrofone 3 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Schmalbandspektren bei ungeschliffenen Schienen

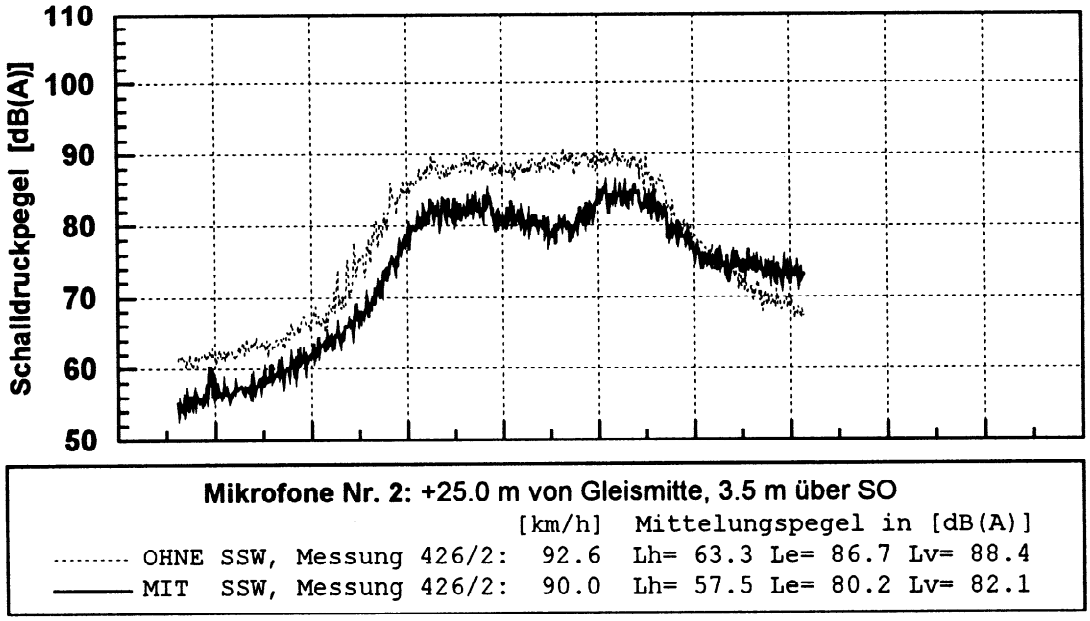


Bild A65 Güterzug, Fahrt 426, Mikrofone 2 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Pegelverläufe bei ungeschliffenen Schienen

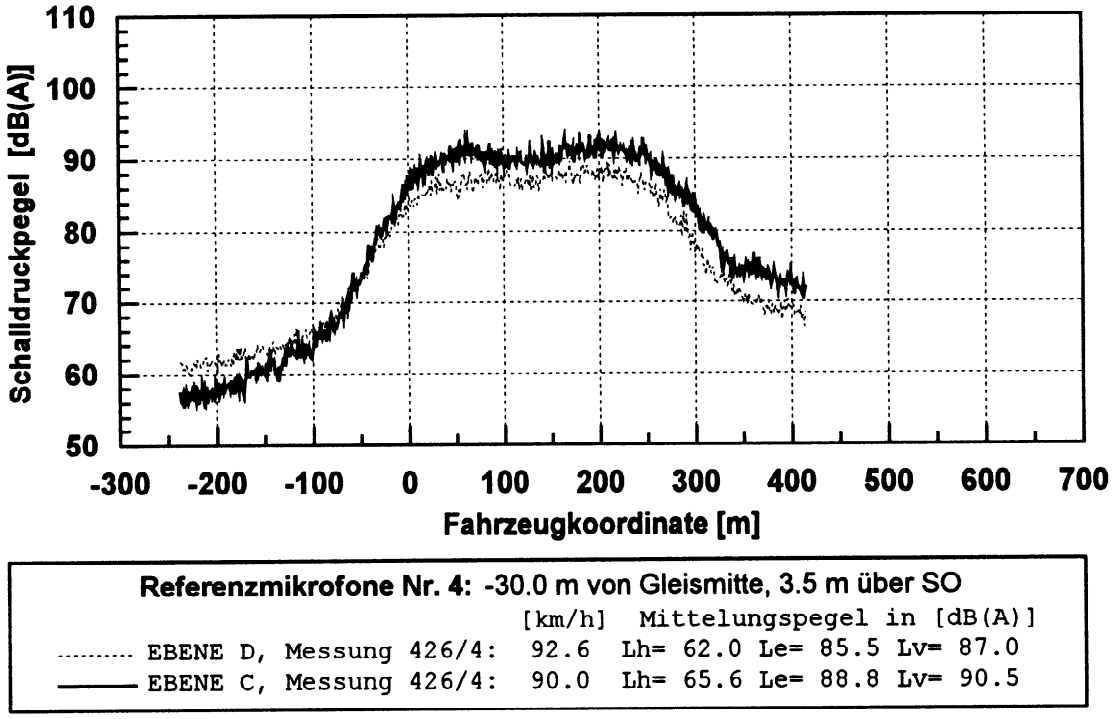


Bild A66 Güterzug, Fahrt 426, Mikrofone 4 auf jenseitiger Gleisseite ohne SSW in beiden Meßebenen, Pegelverläufe bei ungeschliffenen Schienen

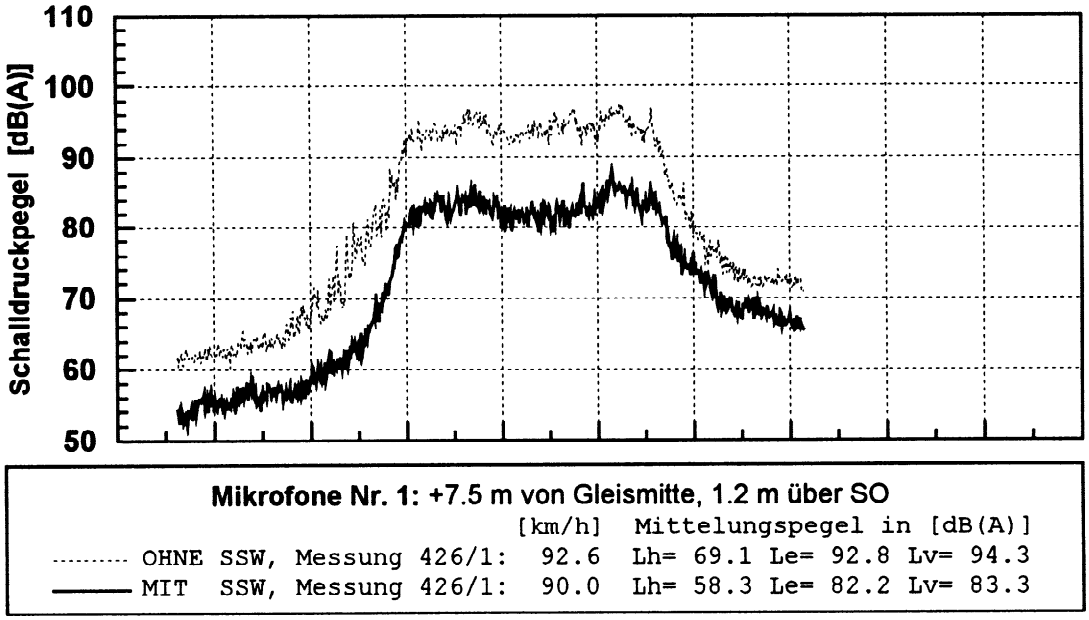


Bild A67 Güterzug, Fahrt 426, Mikrofone 1 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Pegelverläufe bei ungeschliffenen Schienen

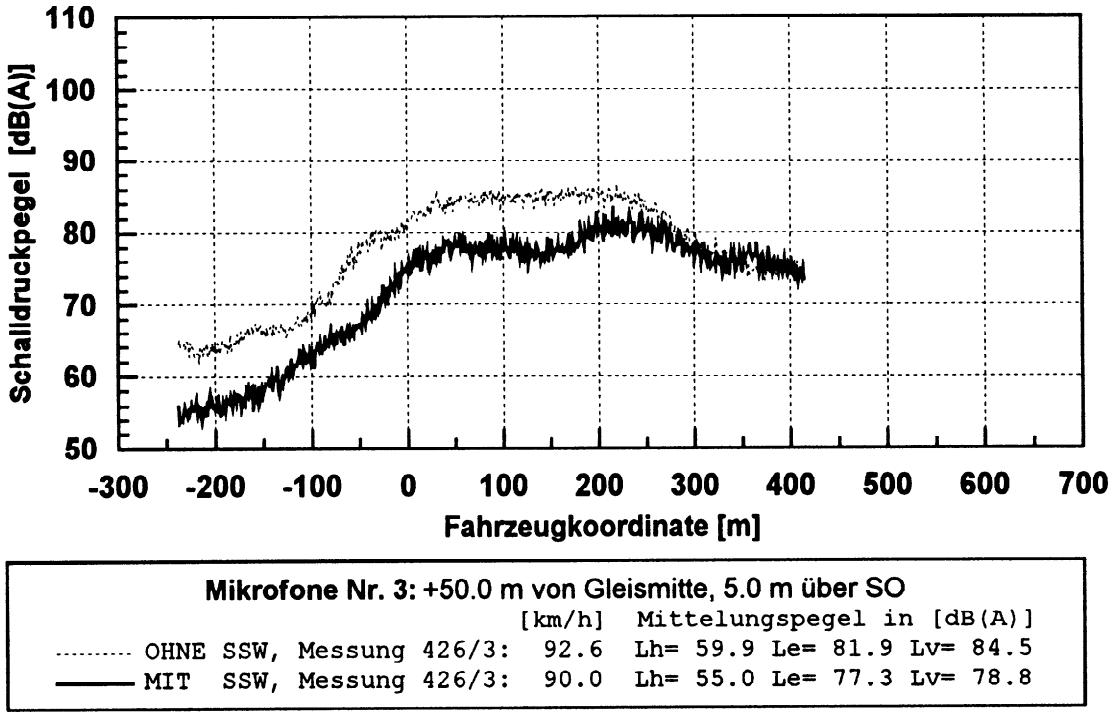


Bild A68 Güterzug, Fahrt 426, Mikrofone 3 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Pegelverläufe bei ungeschliffenen Schienen

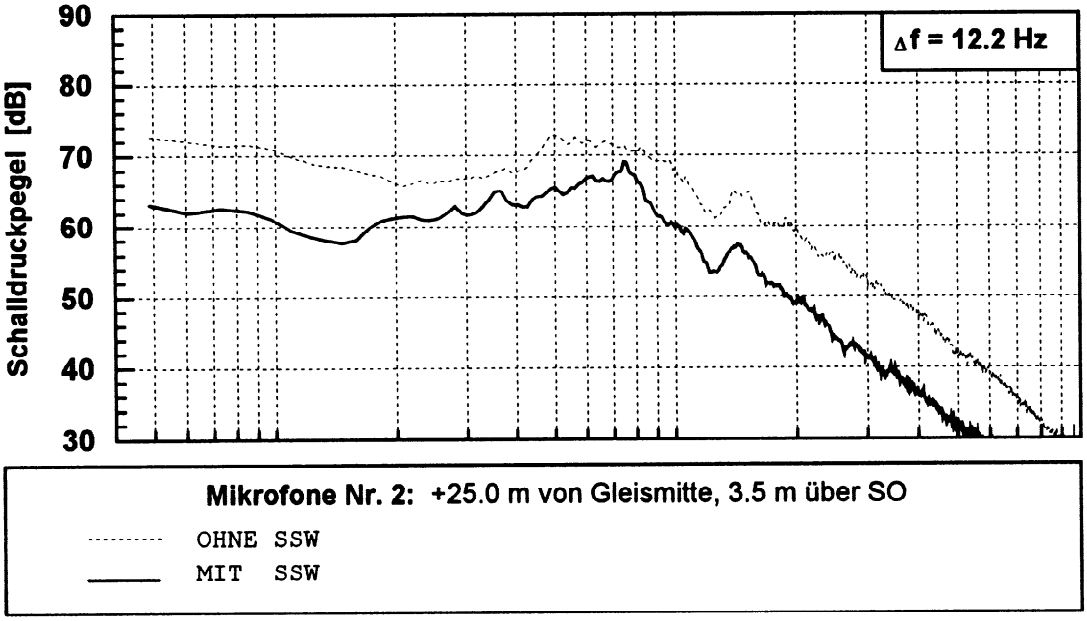


Bild A69 Güterzug, Fahrt 426, Mikrofone 2 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Schmalbandspektren bei ungeschliffenen Schienen

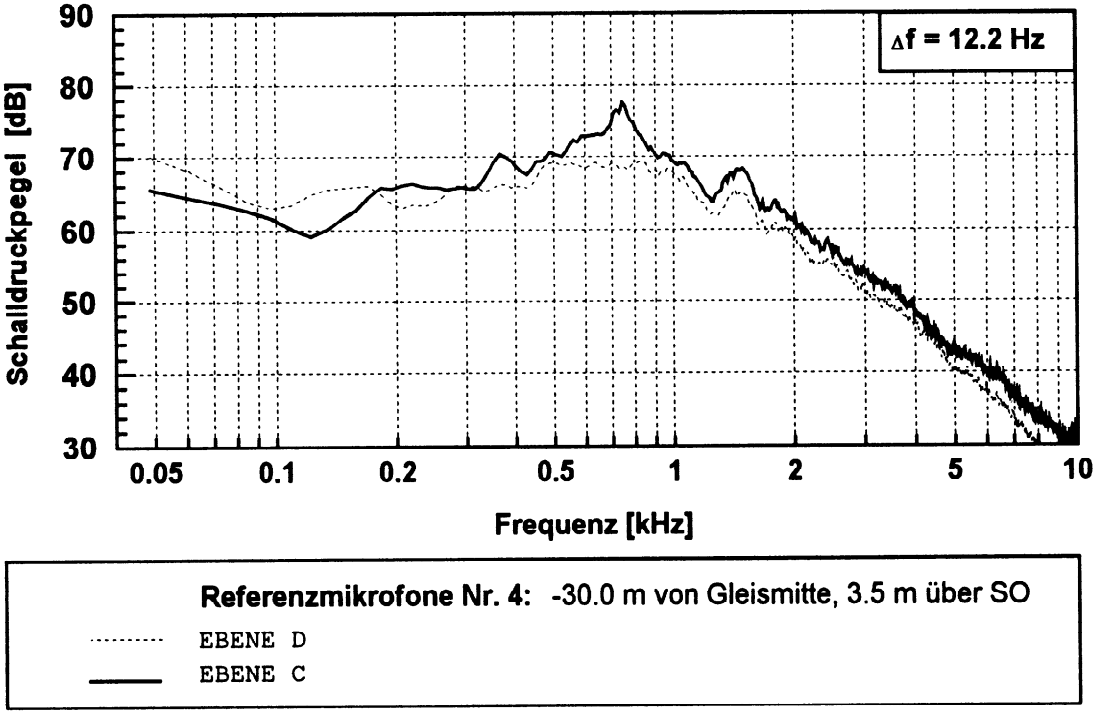


Bild A70 Güterzug, Fahrt 426, Mikrofone 4 auf jenseitiger Gleisseite ohne SSW in beiden Meßebenen, Schmalbandspektren bei ungeschliffenen Schienen

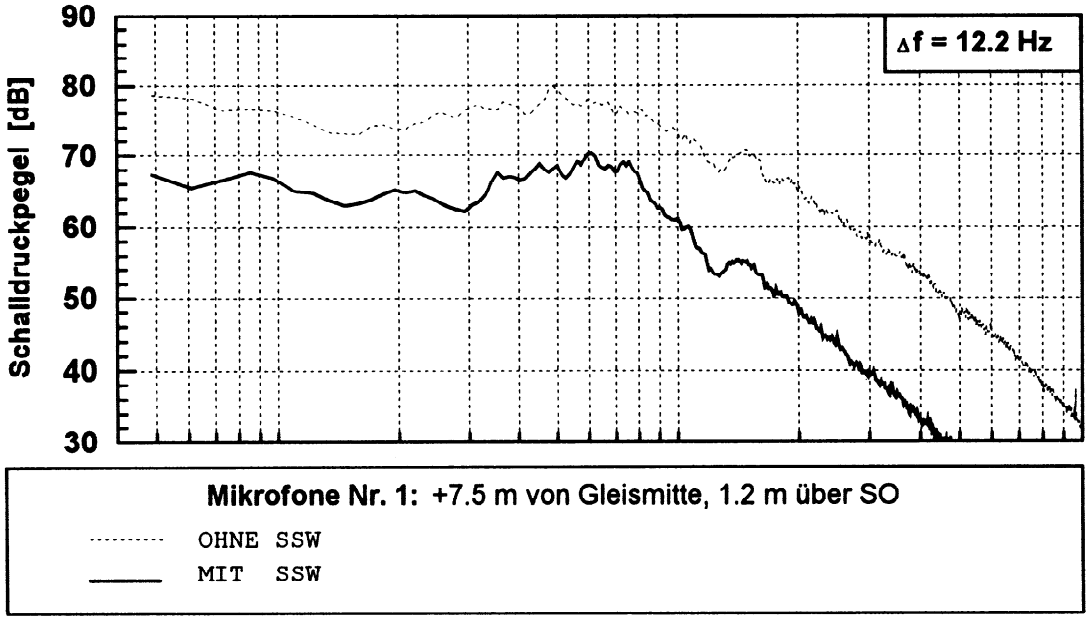


Bild A71 Güterzug, Fahrt 426, Mikrofone 1 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Schmalbandspektren bei ungeschliffenen Schienen

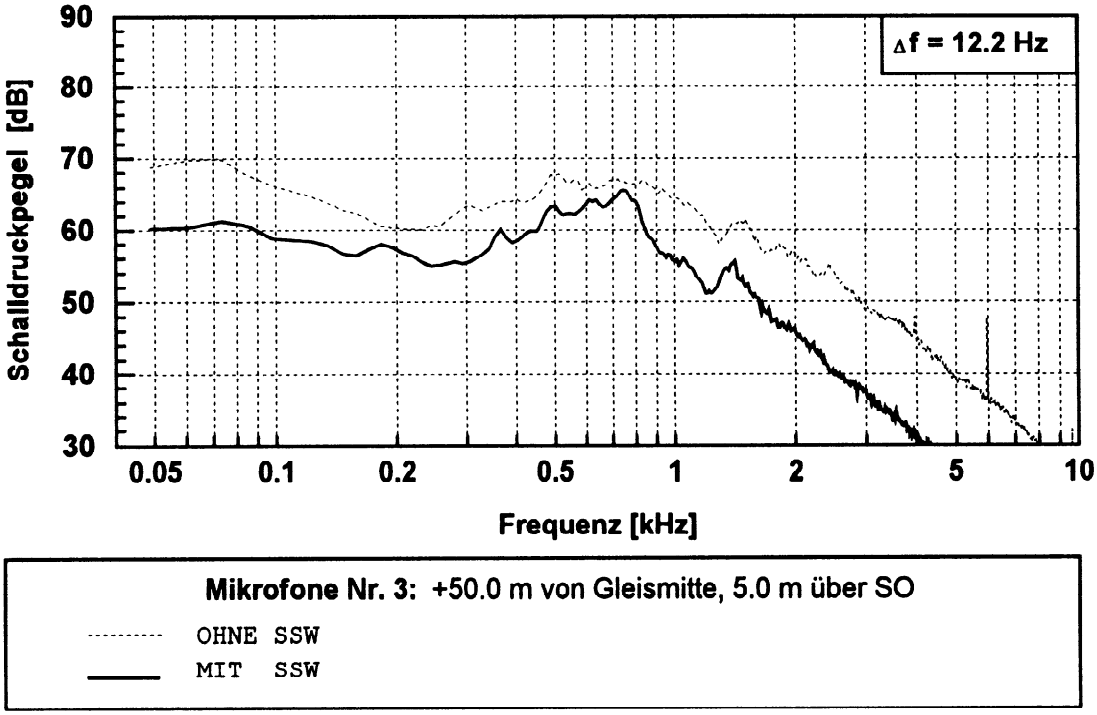


Bild A72 Güterzug, Fahrt 426, Mikrofone 3 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Schmalbandspektren bei ungeschliffenen Schienen

Umweltforschungsplan
des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

Lärmbekämpfung

Forschungsvorhaben 296 55 215

Abschirmwirkung von Schallschutzwänden bei Hochgeschwindigkeitszügen

Bericht 2

Arbeitspaket 1, Meßserie 2:

Einzelmikrofon-Messungen
bei geschliffenen Schienen

von

Martin Klemenz
Michael W. Hansen
Bernd Barsikow

Ingenieurbüro akustik-data, Dipl.-Ing. B. Barsikow
Kirchblick 9, 14129 Berlin

im Auftrag
des Umweltbundesamtes
August 1998

Berichts – Kennblatt

Berichtsnummer 1. UBA-FB 98-296 55 215	2.	3.
4. **Titel des Berichts** Abschirmwirkung von Schallschutzwänden bei Hochgeschwindigkeitszügen; Bericht 2, Arbeitspaket 1, Meßserie 2: Einzelmikrofon-Messungen bei geschliffenen Schienen		
5. **Autor(en), Name(n), Vorname(n)** Klemenz, Martin; Hansen, Michael W.; Barsikow, Bernd		8. **Abschlußdatum** 31.08.1998 9. **Veröffentlichungsdatum**
6. **Durchführende Institution (Name, Anschrift)** Ingenieurbüro akustik-data, Dipl.-Ing. B. Barsikow Kirchblick 9, 14129 Berlin		10. **UFOPLAN-Nr.** 296 55 215 11. **Seitenzahl** 100
7. **Fördernde Institution (Name, Anschrift)** Umweltbundesamt Postfach 33 00 22, 14191 Berlin		12. **Literaturangaben** 7 13. **Tabellen / Diagramme** 29 / 111 14. **Abbildungen** 0
15. **Zusätzliche Angaben**		
16. **Kurzfassung** Im vorliegenden Bericht wird die Fortsetzung der Messungen mittels Einzelmikrofonen an einer Schnellfahr- und einer Ausbaustrecke der DB AG zur Bestimmung der Einfügungsdämpfung von Schallschutzwänden (SSW) geschildert. Die Untersuchung fand an denselben Meßorten und Meßebenen statt wie in Bericht 1 dieses Forschungsvorhabens beschrieben, allerdings diesmal bei geschliffenen Schienen. Wiederum zeigt sich, daß bei ICE-Zügen und höheren Geschwindigkeiten die gemessene Wandwirkung deutlich geringer ist als sie von der Schall 03 berechnet wird. Dieser Unterschied beträgt bei 200 km/h ca. 3 bis 4 dB(A) und erhöht sich mit zunehmender Geschwindigkeit bis 280 km/h um ein weiteres dB(A). Infolge des Schienenschleifens wurde im Bereich der Meßebenen für alle Zugarten im Mittel ein Grundwert von 48 dB(A) bestimmt. Insofern sind die hier ermittelten Werte für die Einfügungsdämpfung einer 2,0 m hohen SSW repräsentativ für den Fall eines "besonders überwachten" Gleises, wenn dieses mit obigem Grundwert in eine spätere Ausgabe der Schall 03 eingeführt werden sollte.		
17. **Schlagwörter** Schallschutzwände, Einfügungsdämpfung, Hochgeschwindigkeitszüge, ICE 1, ICE 2, Reisezüge, Regionalzüge, Güterzüge, Schienenrauhigkeit, Rauhigkeitskorrektur, Einzelmikrofone, Pegelverläufe, Schalldruckspektren, Richtlinie "Schall 03", hochliegende Schallquellen		
18. **Preis**	19.	20.

UBA-F+E-Berichtsmerkblatt (6.80)

Report - Data Sheet

1. **Report No.** UBA-FB 98-296 55 215	2.	3.
4. **Report Title** Shielding effect of noise barriers during passbys of high-speed trains; report No. 2, work package No. 1, measuring series No. 2: single-microphone measurements for rails in ground condition		
5. **Author(s), Family Name(s), First Name(s)** Klemenz, Martin; Hansen, Michael W.; Barsikow, Bernd		8. **Report Date** 31 August 1998 9. **Publication Date**
6. **Performing Organisation (Name, Address)** akustik-data Engineering Office, Dipl.-Ing. B. Barsikow Kirchblick 9, 14129 Berlin		10. **UFOPLAN–No.** 296 55 215 11. **No. of Pages** 100
7. **Sponsoring Agency (Name, Address)** Federal Environmental Agency Post box 33 00 22, 14191 Berlin		12. **No. of References** 7 13. **Tables / Diagrams** 29 / 111 14. **Figures** 0
15. **Supplementary Notes**		

16. **Abstract**
The present report describes a further series of single-microphone measurements alongside both a high-speed and an improved DB AG track to determine the insertion loss of noise barriers. These investigations were carried out at the same measuring sites and with the same measuring planes as those used for the studies outlined in report No. 1 for this research project. For this second report, however, the rail surfaces had been recently ground. As before, the effect of the noise barriers on sound generated by ICE trains at higher speeds was significantly less than that calculated using the "Schall 03" guidelines. At 200 km/h, this difference is about 3 to 4 dB(A), and increases with increasing train speed, reaching a value of roughly one dB(A) more at 280 km/h. As a result of the rails being ground, an average base value of 48 dB(A) was determined for all types of trains in the vicinity of the measuring planes. Thus, the measured values of insertion loss for a 2.0 m-high noise barrier are representative of those for a "well supervised" track if the above base value is reflected in the next version of Schall 03.

17. **Key Words**
Noise barriers, insertion loss, high-speed trains, ICE 1, ICE 2, passenger trains, regional trains, freight trains, rail roughness, roughness correction, single microphones, time histories, sound-pressure spectra, "Schall 03" guidelines, high-lying sound sources

18. **Price**	19.	20.

Umweltforschungsplan
des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

Lärmbekämpfung

Forschungsvorhaben 296 55 215

Abschirmwirkung von Schallschutzwänden bei Hochgeschwindigkeitszügen

Bericht 2

Arbeitspaket 1, Meßserie 2:

Einzelmikrofon-Messungen
bei geschliffenen Schienen

von

Martin Klemenz
Michael W. Hansen
Bernd Barsikow

Ingenieurbüro akustik-data, Dipl.-Ing. B. Barsikow
Kirchblick 9, 14129 Berlin

im Auftrag
des Umweltbundesamtes
August 1998

Abschirmwirkung von Schallschutzwänden bei Hochgeschwindigkeitszügen
Arbeitspaket 1, Meßserie 2:
Einzelmikrofon-Messungen bei geschliffenen Schienen

bearbeitet von

Dipl.-Ing. M. Klemenz, Dipl.-Ing. M. W. Hansen und Dipl.-Ing. B. Barsikow

Inhaltsverzeichnis

	Abkürzungen und Formelzeichen	2
1.	Einleitung	4
2.	Meßorte	5
2.1	Mikrofonpositionen	5
2.2	Zustand der Schienenoberflächen	6
3.	Durchführung der Messungen	8
3.1	Wetterbedingungen	9
3.2	Zugmaterial	9
3.2.1	ICE-Radschallabsorber	10
3.2.2	Weitere fahrzeugseitige Parameter	10
3.3	Meßgeräte	10
4.	Auswertung der Daten	11
5.	Ergebnisse	12
5.1	Pegelverläufe	12
5.2	Schalldruckspektren	14
5.3	Einzahlwerte	24
5.4	Vergleich mit Schall 03	30

6.	Zusammenfassung	37
7.	Literatur	38
	Anhang	40

Abkürzungen und Formelzeichen

D_{BM}, $D_{e,k}$	Pegeldifferenzen in [dB(A)] gemäß Schall 03
f	Frequenz in [Hz]
i	Kennzeichnung für Mikrofone in einer Meßebene
l	Zuglänge in [m]
$L_A(t)$	A-bewerteter Schalldruckpegel bzw. Pegelverlauf in [dB(A)]
L_e	Ereignispegel in [dB(A)]
L_h	Stunden-Mittelungspegel in [dB(A)]
L_{Max}	Maximalpegel in [dB(A)]
$L_{m,s}$	Örtlicher spezifischer Grundwert in [dB(A)]
$L_{m,s,MS,i}$	Örtlicher spezifischer Grundwert ermittelt mit Mikrofon i in einer Meßebene mit vorhandener SSW in [dB(A)]
$L_{m,s,OS,i}$	Örtlicher spezifischer Grundwert ermittelt mit Mikrofon i in einer Meßebene ohne SSW in [dB(A)]
L_v	Vorbeifahrpegel in [dB(A)]
M	Empirischer Mittelwert der Meßwerte x_i
MS	Meßebene mit einer einseitigen SSW
N	Anzahl der Meßwerte in einer Datenklasse
OS	Meßebene mit freier Schallausbreitung zu beiden Seiten des Gleises
p	Vertrauensniveau, hier 0,8
R_r	Rauhigkeit der Schienenoberfläche in [dB]
s	Streuung der Meßwerte x_i
SFS	Schnellfahrstrecke
SO	Schienenoberkante
SSW	Schallschutzwand

t	Meßzeit in [s]
t_a	Startzeitpunkt in [s] des ausgewerteten Datensatzes
t_e	Endzeitpunkt in [s] des ausgewerteten Datensatzes
υ	Zuggeschwindigkeit in [km/h] bzw. [m/s]
x_i	Meßwert
z_0	Schirmwert nach Schall 03 in [m] für das Teilstück, welches in der Meßebene liegt
Δf	Bandbreite in Schmalbandspektren
ΔL_{Roll}	Korrekturterm in [dB(A)] für unterschiedliche Rauhigkeiten von rechter und linker Schiene
$\Delta L_{Schall\ 03}$	Differenz aus ΔL_{SSW} und $\Delta L_{SSW}'$ in [dB(A)]
ΔL_{SSW}	gemessene Einfügungsdämpfung der SSW in [dB(A)]
$\Delta L_{SSW}'$	nach Schall 03 berechnete Einfügungsdämpfung der SSW in [dB(A)]
λ_r	Wellenlänge der Schienenrauhigkeit in [m]

1. Einleitung

Im Rahmen des Themas "Weiterentwicklung der Prognoseverfahren der Verkehrslärmschutzverordnung (16. BImSchV)" wird im Auftrag des Umweltbundesamtes die Abschirmwirkung von Schallschutzwänden (SSW) insbesondere bei Hochgeschwindigkeitszügen untersucht. Im vorliegenden Bericht werden die Ergebnisse der Einzelmikrofon-Messungen aus dem Arbeitspaket 1 bei geschliffenen Schienen (Meßserie 2) dokumentiert, welche vom 12.05. bis zum 14.05.1997 sowie vom 29.10. bis zum 31.10.1997 durchgeführt wurden.

Das Arbeitspaket 1 umfaßt Messungen mit Einzelmikrofonen in +7,5, +25, +50 und -25 m Entfernung von Gleismitte. Untersucht wurden ICE-, IC-, EC-, IR- und RE-Regelzüge sowie Güterzüge. Die Messungen sollten gleichzeitig mit jeweils vier Mikrofonen in einer Meßebene mit freier Schallausbreitung (Bezeichnung OS) und einer Meßebene mit einer einseitigen SSW (Bezeichnung MS) erfolgen. Zu Vergleichszwecken wurden die Messungen an zwei verschiedenen DB-Strecken (Ort A/B und Ort C/D) durchgeführt. Die beiden Orte wurden so ausgewählt, daß die Vorbeifahrten an OS und MS unter möglichst den gleichen topographischen und betrieblichen Bedingungen stattfanden.

In der Meßserie 2 sollten die Immissionspegel der Vorbeifahrten der genannten Zugtypen etwa fünf bis sieben Wochen nach dem Schleifen der Schienen gemessen werden. Ziel der Untersuchungen im Arbeitspaket 1 ist es, die Einfügungsdämpfung der Schallschutzwände in Abhängigkeit von Zugart, Gleiszustand, Zuggeschwindigkeit sowie weiteren Parametern wie z. B. Einsatz verschiedener Radbauarten bzw. Absorberkonfigurationen und Lüfterbetriebszuständen beim ICE zu ermitteln.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde bereits ein Bericht erstellt, der die Meßserie 1 im Arbeitspaket 1, d. h. Einzelmikrofon-Messungen bei ungeschliffenen Schienen dokumentiert, welche vom 25.09. bis zum 01.10.1996 stattfanden [1]. In beiden Meßserien sind die Aufgabenstellung, die ausgewählten Meßorte, die eingesetzten Meßgeräte sowie die Vorgehensweise bei der Datenauswertung jeweils identisch. Angaben hierzu werden deshalb im vorliegenden Bericht **nur dann explizit erwähnt, wenn diese von [1] abweichen.**

2. Meßorte

Ausführliche Angaben zur Auswahl der vier Meßorte sowie der zugehörigen akustischen Randbedingungen sind in [1] enthalten.

2.1 Mikrofonpositionen

Aus Tabelle 1 ist zu entnehmen, daß sich die Positionen der Mikrofone 2, 3 und 4 im Vergleich mit [1] nicht geändert haben, daß aber im Falle von Mikrofon 1 die Positionen im Gegensatz zu [1] vereinheitlicht wurden. Ein negativer Abstand von Gleismitte weist auf die Mikrofonposition auf der gegenüberliegenden Gleisseite mit jeweils freier Schallausbreitung hin.

Meß-ebene	Mikro-fon Nr.	Fahrt Nr.	Abstand v. Gleismitte [m]	Höhe über SO [m]	Höhe über Gelände [m]
A	1	501 - 719	7,5	1,2	2,80
A	2	501 - 719	25,0	3,5	5,50
A	3	501 - 719	50,0	5,0	7,00
A	4	501 - 719	-25,0	3,5	5,50
B	1	501 - 719	7,5	1,2	2,70
B	2	501 - 719	25,0	3,5	5,00
B	3	501 - 719	50,0	5,0	6,50
B	4	501 - 719	-25,0	3,5	5,00
C	1	801 - 960	7,5	1,2	2,10
C	2	801 - 960	25,0	3,5	3,65
C	3	801 - 960	50,0	5,0	4,70
C	4	801 - 960	-30,0	3,5	5,10
D	1	801 - 960	7,5	1,2	1,95
D	2	801 - 960	25,0	3,5	3,85
D	3	801 - 960	50,0	5,0	5,00
D	4	801 - 960	-30,0	3,5	4,00

Tabelle 1 Mikrofonpositionen in den Meßebenen A, B, C und D

2.2 Zustand der Schienenoberflächen

Die Messungen der Meßserie 2 sollten an denselben Meßorten wie in [1] durchgeführt werden, wobei im Gegensatz zur ersten Meßserie ein guter Schienenzustand angestrebt wurde. Die Schienen im Bereich der Meßorte A und B wurden daher in der Nacht vom 22. zum 23.03.1997 geschliffen; bei den Meßorten C und D lag der entsprechende Termin in der Nacht vom 25. zum 26.09.1997. An den Meßorten A und B erfolgten die akustischen Messungen nach etwa sieben Wochen; im Fall der Meßorte C und D fanden die Messungen etwa fünf Wochen nach dem Schleiftermin statt (siehe Kapitel 3). Wie schon in [1] wurde die Oberflächenrauhigkeit der Schienen im Bereich der Meßebenen an jeweils zehn stochastisch verteilten Stellen pro Schiene jeweils über eine Länge von 1,2 m ermittelt. Alle vier Streckenabschnitte wurden von der DB AG, Forschungs- und Technologiezentrum, BT 4 vermessen, und zwar in den Abschnitten bei A und B im Rahmen von ICE 2-Abnahmemessungen am 28.04.1997 [2, 3] und in den Abschnitten bei C und D im Auftrag von akustik-data am 05.11.1997 [4, 5]. Aus den Meßberichten sind die mittleren Rauhigkeits-Terzspektren der Schienen $R_r(\lambda_r)$ in Bild 1 und 2 wiedergegeben.

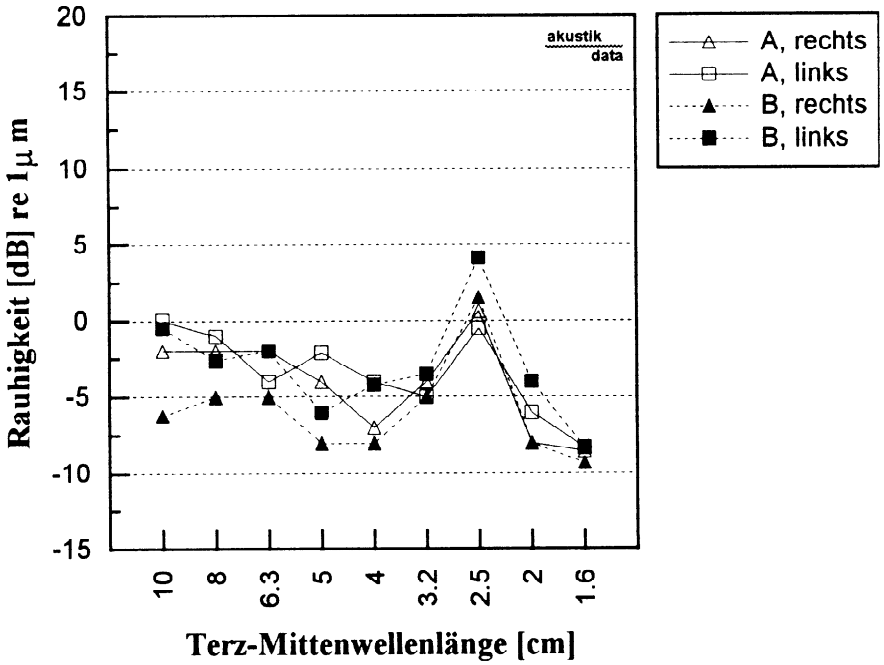


Bild 1 Mittlere Schienenrauhigkeits-Terzspektren $R_r(\lambda_r)$ im Bereich der Meßebenen A und B bei geschliffenen Schienen

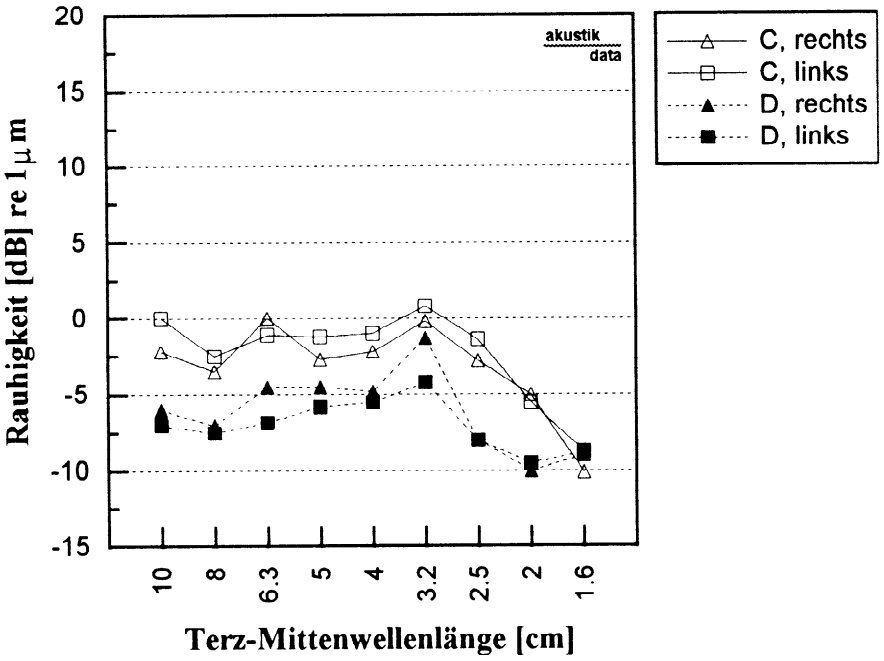


Bild 2 Mittlere Schienenrauhigkeits-Terzspektren $R_r(\lambda_r)$ im Bereich der Meßebenen C und D bei geschliffenen Schienen

Meßebene, Schienenseite	Schienenrauhigkeit 1,6 cm ≤ λ_r ≤ 10 cm [dB]	Schienenrauhigkeit 1,6 cm ≤ λ_r ≤ 10 cm Mittelwerte [1] [dB]
A, rechte Schiene	6,4	6,6
A, linke Schiene	6,8	
B, rechte Schiene	5,0	6,8
B, linke Schiene	8,0	
C, rechte Schiene	7,1	7,5
C, linke Schiene	7,9	
D, rechte Schiene	4,2	3,6
D, linke Schiene	2,8	

[1] Energetischer Mittelwert der Rauhigkeitspegel von rechter und linker Schiene

Tabelle 2 Summenpegel der Schienenrauhigkeit im Bereich der Meßebenen A, B, C und D bei geschliffenen Schienen

Die in Tabelle 2 aufgelisteten Werte sind die Summenpegel der Rauhigkeitsamplituden im akustisch relevanten Wellenlängenbereich von 1,6 bis 10 cm, die sich aus der Mittelung über jeweils zehn Stichprobenabschnitte je Meßort ergaben. Die Schienenseite bezieht sich auf die Fahrtrichtung des Zuges; die rechte Schiene war jeweils diejenige, an deren Seite sich die SSW befand.

Die niedrigen Werte im Bereich der Meßebenen A und B lassen auf einen guten Zustand der Schienenoberflächen schließen. Bei den Meßebenen C und D nimmt das Rauhigkeitsniveau ähnlich geringe Werte an, wobei in Meßebene D der niedrigste Summenpegel erreicht wird. So konnten an den Meßorten A und B die schon in [1] relativ kleinen Rauhigkeitsamplituden nochmals um etwa 5 dB gesenkt werden; die entsprechenden Werte an den Meßebenen C und D haben sich hingegen signifikant, nämlich um bis zu 20 dB gegenüber [1] verringert.

Dennoch kann der Schienenzustand an den Meßebenen A und B nicht als optimal bezeichnet werden, da infolge der Schleifarbeiten offenbar eine Riffelstruktur entstanden ist. Diese führt in den Terzspektren für alle vier Schienen jeweils zu einem deutlichen Peak im Wellenlängenbereich von 2,5 cm. Es ist nicht auszuschließen, daß diese Riffelstrukturen zum Zeitpunkt der akustischen Messungen, d. h. ca. zwei Wochen nach den Rauhigkeitsmessungen, durch den Einfluß der Zugüberfahrten auf dieser stark frequentierten Strecke bereits weniger stark ausgeprägt waren.

Ebenso bestehen wie schon in [1] Unterschiede zwischen der Rauhigkeit der rechten und linken Schiene an jeweils einer Meßebene; diese fallen mit 3 dB an der Meßebene B am stärksten aus. Eine diesbezügliche Korrektur, die schon in [1] angesetzt wurde, muß daher auch in der vorliegenden Studie berücksichtigt werden.

3. Durchführung der Messungen

Die Messungen wurden in der Zeit vom 12.05. bis zum 14.05.1997 in Northeim und vom 29.10. bis 31.10.1997 in Rodenbach/Langenselbold durchgeführt. Sie fanden bei dem in Abschnitt 2.2 dokumentierten Schienenzustand statt. Angaben zu den akustischen Randbedingungen an den vier Meßorten befinden sich in [1].

3.1 Wetterbedingungen

Die Messungen an A und B fanden bei trockenem Wetter statt. In der Nacht vom 12. auf den 13.05.1997, in der die Güterzug-Vorbeifahrten aufgezeichnet wurden, war es windstill bei Temperaturen zwischen +4 und +9°C. Bei den Messungen an ICE-Zügen an den darauffolgenden Tagen (13. und 14.05.1997) lag die Windgeschwindigkeit unter 3 m/s aus südlicher bis südwestlicher Richtung; die Temperaturen bewegten sich zwischen 24°C in den Mittagsstunden und 12°C am Abend. Bei den Messungen an C und D war es ebenfalls trocken bei Temperaturen zwischen -5 und +5°C. Es wehte zeitweise ein leichter Wind mit Geschwindigkeiten unter 2 m/s aus östlicher Richtung. Bei keiner der Messungen lag die Windrichtung im Mitwindsektor.

3.2 Zugmaterial

Im Rahmen der Meßserie 2 wurden insgesamt an den vier Meßebenen 244 Zugvorbeifahrten aufgezeichnet. Von diesen 122 Zugpaaren an OS und MS mußten zehn wegen

Zugart	Geschw. [km/h]	Meßebene A/B	Meßebene C/D	Summe Zeilen
ICE 1	200	12	14	26
ICE 1	250	12	-	12
ICE 1	280	14	-	14
ICE 2	200	-	5	5
ICE 2	280	4	-	4
IC, EC	150-190	1	6	7
IR	160	-	7	7
RE	140	-	4	4
G	90-120	23	10	33
Summe Spalten	-	66	46	**112**

Tabelle 3 Anzahl *N* der ausgewerteten Vorbeifahrten für jede Datenklasse der Meßserie 2 bei geschliffenen Schienen

Störungen bei der Messung, die erst bei der Auswertung zu Tage traten, oder aufgrund von Zuggeschwindigkeiten, die keiner Meßklasse zuzuordnen waren bzw. an den beiden Meßorten stark unterschiedlich ausfielen, gestrichen werden. So konnten 112 Zugvorbeifahrten ausgewertet werden, davon 61 ICE 1- bzw. ICE 2-Regelzüge.

Aus Tabelle 3 kann man einen Überblick über die Anzahl *N* dieser ausgewerteten Vorbeifahrten für jede Zugart und Geschwindigkeitsklasse entnehmen. Gegenüber [1] werden IC-, EC- und IR-Vorbeifahrten nicht mehr in einer Meßklasse zusammengefaßt, da sich die mittlere Geschwindigkeit der IC- und EC- Züge verglichen mit den IR-Zügen erhöht hat. In Tabelle A1 und A2 im Berichtsanhang sind alle 112 Fahrten mit Nummer, Datum, Zugart, Geschwindigkeit sowie Lok- und Wagenbauart aufgelistet.

3.2.1 ICE-Radschallabsorber

Wie schon in [1] konnte die aktuelle Rad/Absorber-Konfiguration aller ICE 1-Regelzüge erfaßt werden, die am 15. und 16.05.1997 im BW Eidelstedt gewartet worden sind. Es wurden 30 Züge in Augenschein genommen, wobei die Radbauarten analog zu [1] klassifiziert wurden. Die Rad/Absorber-Konfiguration der Züge, deren Schallabstrahlung gemessen wurde und bei denen diese Konfigurationen erfaßt werden konnten, sind wiederum im Anhang bei einigen Bildern graphisch mitdargestellt.

3.2.2 Weitere fahrzeugseitige Parameter

In Hinblick auf die Radrauhigkeiten der untersuchten Züge und der Radunrundheiten beim ICE 1 gelten weiterhin die Angaben in [1]. Bezüglich des Einflusses der Lüfter in den ICE-Triebköpfen auf die Schallemission mußte wegen des hohen organisatorischen Aufwands darauf verzichtet werden, definierte Lüfter-Leistungsstufen für einige Vorbeifahrten festzusetzen.

3.3 Meßgeräte

Die Meßdatenerfassung weicht nicht von [1] ab und wird daher nicht nochmals beschrieben.

4. Auswertung der Daten

Der Bericht 1 dieses Vorhabens [1] enthält bereits umfassende Angaben zur Ergebnisdarstellung, zur Berechnung der Einzahlwerte L_v, L_c und L_h sowie des örtlichen spezifischen Grundwerts $L_{m,s}$, zur Ermittlung der Zuggeschwindigkeiten und -längen, zur Berechnung der Einfügungsdämpfung ΔL_{SSW} sowie zur Definition statistischer Größen. Auf folgende Aspekte sei in diesem Bericht gesondert hingewiesen: Im Falle relevanter Störungen an einem einzelnen Mikrofon wurde dieses und der dazugehörige Kanal in der anderen Meßebene (MS bzw. OS) wiederum nicht in das Meßwertkollektiv aufgenommen. Durch die Herausnahme von einzelnen Mikrofonen bei einer Vorbeifahrt kann es dazu kommen, daß nicht für alle Mikrofone die mittleren Zuggeschwindigkeiten und Zuglängen einer Datenklasse identisch sind. Ausgeschlossen von der Auswertung wurde Mikrofon 2 bei den Fahrten 925 und 960, sowie Mikrofon 3 bei den Fahrten 701, 912, 915 und 951. Am Meßort C werden wiederum die Zeitsignale der Mikrofone 1, 2 und 3 bei der Berechnung von Pegeln nur über die erste Hälfte der Zugvorbeifahrt ausgewertet, da hier die SSW in einer Entfernung von ca. 105 m nach der Meßebene endet (siehe [1]).

Zugart	Meßebenen	Geschwindigkeit [km/h]	$\Delta L_{Roll}(v)$ [dB(A)]
ICE 1	A/B	200	-1,7
ICE 1	A/B	250	-1,6
ICE 1, ICE 2	A/B	280	-1,6
ICE 1, ICE 2	C/D	200	0,9
IC	A/B	190	-1,7
IC, EC	C/D	170	0,8
IR	C/D	160	0,8
RE	C/D	140	0,0
Güterzüge	A/B/C/D	alle	0,0

Tabelle 4 Korrekturpegel $\Delta L_{Roll}(v)$ zur Berücksichtigung unterschiedlicher Rauhigkeiten von rechter und linker Schiene an den Meßorten mit und ohne SSW im geschliffenen Zustand

Bei der Berechnung der SSW-Abschirmwirkung werden wie in [1] unterschiedliche Gleiszustände zwischen zwei Meßorten anhand der Korrektur $L_{m,s,OS,4}$ - $L_{m,s,MS,4}$ berücksichtigt, und zusätzlich werden wiederum die unterschiedlichen Rauhigkeiten zwischen rechter und linker Schiene miteinbezogen. Dies erfolgt anhand der Pegeldifferenz ΔL_{Roll}, welche sich nach Gleichung (8) in [1] berechnet. Es müssen in der vorliegenden Untersuchung hierbei die aktuell gemessenen Schienenrauhigkeiten berücksichtigt werden, so daß sich die in Tabelle 4 aufgelisteten neuen Werte für ΔL_{Roll} ergeben. Bei klotzgebremsten Zügen (RE- und Güterzüge) wird die Korrektur ΔL_{Roll} nicht angewendet; Erläuterungen hierzu enthält [1].

5. Ergebnisse

Im Berichtsanhang befindet sich eine Auswahl typischer Pegelverläufe und Spektren für alle Meßebenen und Geschwindigkeitsklassen für die Zugarten ICE 1, ICE 2, IC, IR, RE und Güterzüge. Eine Aufstellung dieser Vorbeifahrten mit den wichtigsten Parametern ist Tabelle A3 zu entnehmen. Es handelt sich um die Fahrten 503, 603, 611, 615, 622, 706, 802, 923, 927, 938, 955 und 957 (siehe auch Tabelle A1 und A2); die zugehörigen Kurvenverläufe sind in den Bildern A1 bis A96 dargestellt. Außerdem werden in den Legenden dieser Bilder als Einzahlwerte die Vorbeifahr-, Ereignis- und Stunden-Mittelungspegel genannt. Bei zwei ICE 1-Vorbeifahrten an den Meßebenen A und B liegen wiederum Informationen über die Rad/Absorber-Konfiguration vor; diese sind graphisch in die Diagramme des Pegelverlaufs von Mikrofon 1 eingetragen.

5.1 Pegelverläufe

Die ersten vier Bilder einer zu einer Vorbeifahrt zugehörigen Bildserie zeigen die Pegelverläufe $L_A(t)$ im gesamten ausgewerteten Zeitbereich t_a bis t_e für alle vier Mikrofone. Zur Darstellung wurden die mit einer Abtastfrequenz von 25 kHz aufgezeichneten Zeitsignale über eine Zeitspanne von 40 ms gemittelt und es wurde alle 40 ms ein Pegelwert geplottet, was in etwa einer Darstellung mit der Zeitkonstanten "Fast" entspricht. Die Gegenüberstellung der Pegelverläufe für die jeweiligen Mikrofone 1, 2 und 3 in der Meßebene mit und ohne SSW macht die prinzipielle

Wirksamkeit der SSW deutlich, und zwar für alle Zugarten, wobei Einzelheiten der späteren Betrachtung der Einzahlwerte vorbehalten sind.

Beim Vergleich der Referenzmikrofone 4 an den Meßorten A und B auf der jeweils gegenüberliegenden Gleisseite, d. h. bei freier Schallausbreitung in beiden Meßebenen sind zum Teil signifikante Pegeldifferenzen zu erkennen, die offenbar mit unterschiedlichen Schienenrauhigkeiten zusammenhängen. Zwar wiesen die Rauhigkeits-Summenpegel dieser beiden Meßorte in Tabelle 2 sehr ähnliche Werte auf, jedoch wird sich in Abschnitt 5.2 zeigen, daß für diese Pegeldifferenzen die unterschiedlichen Amplituden bei den Wellenlängenpeaks bei 2,5 cm in den Rauhigkeitsspektren der jeweils linken Schiene verantwortlich sind. Als weitere mögliche Ursache sind die verschiedenen Steifigkeiten der Zwischenlagen zu nennen (siehe [1]). Dagegen fällt der Pegelunterschied bei den Referenzmikrofonen zwischen den Meßebenen C und D eher gering aus. Obwohl hier größere Differenzen in den Schienenrauhigkeits-Summenpegeln zu verzeichnen sind als an den Meßorten A und B (siehe Tabelle 2), haben diese hier nur einen geringen Einfluß auf die Schallemission.

Die Pegelunterschiede zwischen den Referenzmikrofonen der Meßebenen A und B werden insbesondere bei Vorbeifahrten des ICE 1 und ICE 2 sichtbar. Bei Vorbeifahrten von Güterzügen (siehe Bild A42 und A90) sind diese Pegeldifferenzen weit geringer. Wie schon in [1] wird hieraus deutlich, daß die Schienenrauhigkeit bzw. die Elastizität der Zwischenlagen dann untergeordnete Einflußgrößen auf die Schallemission sind, wenn die Rauhigkeit der Radlaufflächen demgegenüber sehr viel größer ist, was bei klotzgebremsten Güterwagen im allgemeinen der Fall ist.

Bei den Mikrofonen 1, 2 und insbesondere 3 in der Meßebene C war in den Pegelverläufen in [1] eine Unsymmetrie zu beobachten, die mit größerem Mikrofonabstand von Gleismitte immer ausgeprägter wurde. Als Ursache wurde die zu kurze Wandlänge im Bereich der Meßebene C angesehen. In den hier vorliegenden Ergebnissen ist diese Unsymmetrie ebenfalls zu beobachten, allerdings in weitaus geringerem Maße. So lag vor dem Schleifen ein extrem schlechter Schienenzustand offenbar gerade in dem betreffenden Bereich hinter dem Ende der SSW vor, der für die Stärke der dort erzeugten Geräuschanteile und für die hieraus resultierende Unsymmetrie in den Pegelverläufen in [1] maßgeblich verantwortlich war. Im vorliegenden Fall, d. h. nach dem Schleifen, fällt diese Unsymmetrie eher gering aus, so daß auch über die

gesamte Zuglänge ausgewertet werden könnte. Um die Vergleichbarkeit mit [1] zu gewährleisten, werden jedoch auch in diesem Bericht alle mit den Mikrofonen 1, 2 und 3 an der Meßebene C aufgezeichneten Daten weiterhin über die halbe Zugvorbeifahrt ausgewertet.

5.2 Schalldruckspektren

Die zu den gemessenen Pegelverläufen gehörenden Schalldruckspektren sind auf der dritten und vierten Seite der Bildserie der jeweiligen Fahrt im Berichtsanhang dargestellt. Die Berechnung erfolgte analog zu [1]. Wie gleichfalls in [1] beobachtet, weisen die Verläufe der Schmalbandspektren für die Mikrofonpositionen ohne SSW maximale Spektralwerte in diskreten Frequenzbereichen auf, deren Lage sich mit der Geschwindigkeit ändert. Diese spektralen Maxima, welche in [1] auf das Rollgeräusch zurückgeführt wurden, sind jedoch nicht für alle gezeigten Zugvorbeifahrten so deutlich ausgeprägt wie in [1]. Insbesondere bei ICE 1- bzw. ICE 2-Vorbeifahrten mit hohen Geschwindigkeiten treten sie aufgrund des hier vorliegenden guten Schienenzustands gegenüber weiteren, d. h. aerodynamischen Schallquellen offenbar kaum noch in den Vordergrund.

Bei ICE 1- und ICE 2-Vorbeifahrten an Meßebene B sind allenfalls stark angehobene Amplituden bei wenigen Frequenzlinien zu verzeichnen, und zwar bei ca. 2 kHz (200 km/h) bzw. bei ca. 3 kHz (250 und 280 km/h). Diese Frequenzpeaks hängen eindeutig mit der Verriffelung des Gleises an Meßebene B zusammen: Im zugehörigen Spektrum der Schienenrauhigkeit in Bild 1 war nämlich ein deutlicher Peak bei einer Wellenlänge von 2,5 cm zu beobachten, der im Luftschall zu annähernd obigen Peakfrequenzen führt, d. h. zu 2,2 kHz bei 200 km/h und 3,1 kHz bei 280 km/h. Verglichen mit der vorausgegangenen Untersuchung an ungeschliffenen Gleisen [1] hat sich somit auch das Frequenzmaximum bei allen Geschwindigkeiten jeweils um etwa eine Terz zu höheren Frequenzen hin verschoben, da das damalige Maximum in den Rauhigkeitsspektren etwa zwischen 3,2 bis 4 cm lag.

Frequenzbereiche mit angehobenen Spektralwerten sind bei Vorbeifahrten mit niedrigeren Geschwindigkeiten sowie bei klotzgebremsten Zügen deutlicher zu erkennen, da in diesem Fall das Rollgeräusch die Gesamtemission dominiert. Insbesondere bei RE-Vorbeifahrten an Meßebene D sind diese bei etwa 1,5 kHz und bei Güterzug-

Vorbeifahrten an den Meßebenen B und D jeweils etwa zwischen 600 und 1000 Hz zu finden. Wie schon in [1] wird speziell in diesen Frequenzbereichen beim Vergleich der Meßebenen mit und ohne SSW die größte Pegeldifferenz, also die höchste Abschirmwirkung abgelesen. Ausführlichere Aussagen zur spektralen Zusammensetzung der gemessenen Signale werden nachfolgend anhand von Terzspektren gemacht. Analog zu [1] sind die über alle Vorbeifahrten in der jeweiligen Zug- bzw. Geschwindigkeitsklasse gemittelten Terzspektren in den Bildern 3 bis 15 dargestellt.

Bild 3 und 4 zeigen exemplarisch die Terzspektren aller Mikrofone für die Klasse der ICE 1-Vorbeifahrten am Meßort B (ohne SSW) und A (mit SSW für die Mikrofone 1 bis 3) bei einer mittleren Geschwindigkeit von 277 km/h. An jeweils beiden Meßorten verlaufen die Spektren für die einzelnen Mikrofone relativ parallel; bei nahezu allen Frequenzkomponenten ist eine Pegelabnahme mit etwa 3 dB pro Entfernungsverdopplung zu erkennen. Für das Mikrofon A(4) gilt dies nicht, da es nicht wie die Mikrofone A(1) bis A(3) hinter der SSW liegt. Im Falle der Meßebene B werden für alle Mikrofone die höchsten spektralen Anteile in der 3,15 kHz-Terz gemessen (siehe oben); in Meßebene A sind diese Peaks an den Mikrofonpositionen 1, 2 und 3 hinter der SSW infolge der Abschirmwirkung nicht mehr zu erkennen. Es fällt auf, daß die Terzspektren der Mikrofone 2 (B(2)) und 4 (B(4)), die sich beide in einer Entfernung von 25 m zur Gleismitte auf verschiedenen Seiten der Strecke befinden, nicht exakt übereinanderliegen. Somit ist die Schallabstrahlung zur rechten bzw. linken Seite des Gleises nicht genau identisch, so daß wie in [1] die Korrektur ΔL_{Roll} gemäß Tabelle 4 angewendet werden muß.

Zur Veranschaulichung der Abschirmwirkung der SSW sowie der unterschiedlichen akustischen Gleiszustände zwischen den Meßebenen OS und MS eignen sich die Bilder 5 bis 15. Wie schon in [1] enthalten diese für alle Klassen und Meßebenen jeweils einen Vergleich der mittleren Terzspektren an der Mikrofonposition 2 hinter der SSW (A(2) bzw. C(2)) mit dem Referenzmikrofon 4 in der gleichen Meßebene (A(4) bzw. C(4)) und dem Referenzmikrofon am Ort ohne SSW (B(4) bzw. D(4)). Wenn die mögliche Unsymmetrie der Schallabstrahlung zur rechten bzw. linken Gleisseite vernachlässigt wird, ist die Pegeldifferenz der Mikrofone A(4) - A(2) bzw. C(4) - C(2) als Näherung für die SSW-Einfügungsdämpfung anzusehen. Diese fällt in allen Bildern mit Werten zwischen 9 und 13 dB(A) am höchsten in den Terzbändern aus, welche die vom Rollgeräusch dominierten spektralen Maxima enthalten.

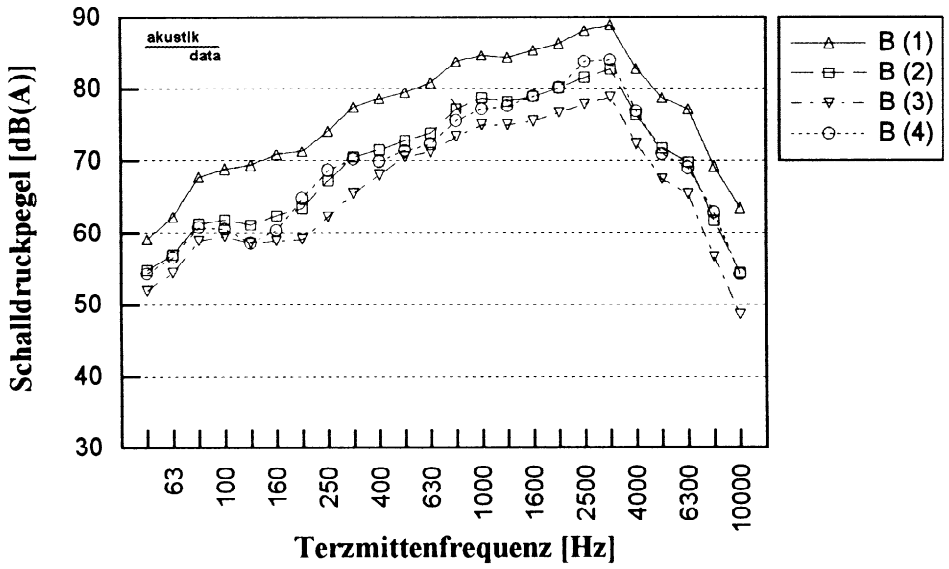


Bild 3 Über 14 (bzw. 13 bei Mikrofon 1) Vorbeifahrten des ICE 1 gemittelte und A-bewertete Terzspektren der Mikrofone 1 bis 4; Messungen in Ebene B ohne SSW bei einer mittleren Geschwindigkeit von 276 km/h

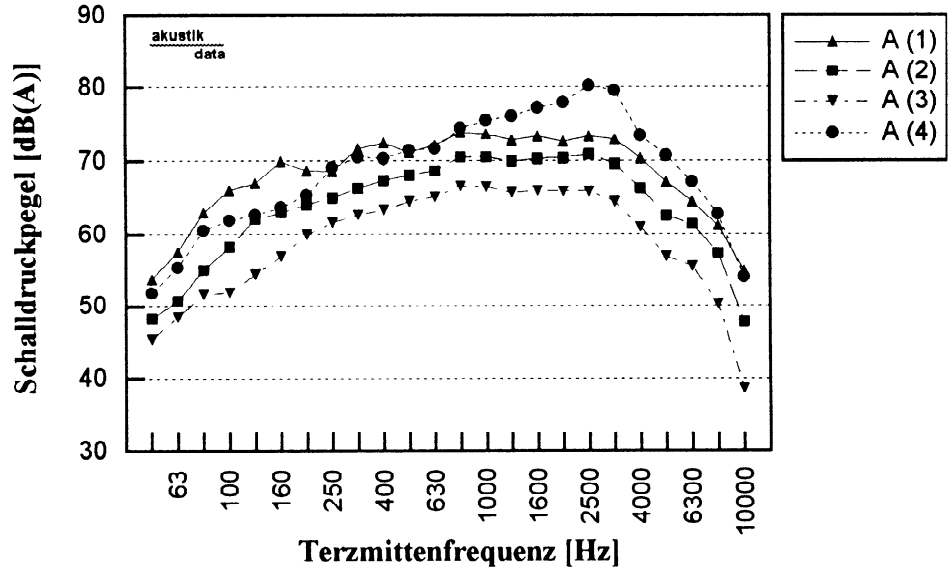


Bild 4 Über 14 (bzw. 13 bei Mikrofon 1) Vorbeifahrten des ICE 1 gemittelte und A-bewertete Terzspektren der Mikrofone 1 bis 4; Messungen in Ebene A bei einer mittleren Geschwindigkeit von 277 km/h; Mikrofone 1, 2 und 3 mit SSW, Mikrofon 4 ohne SSW

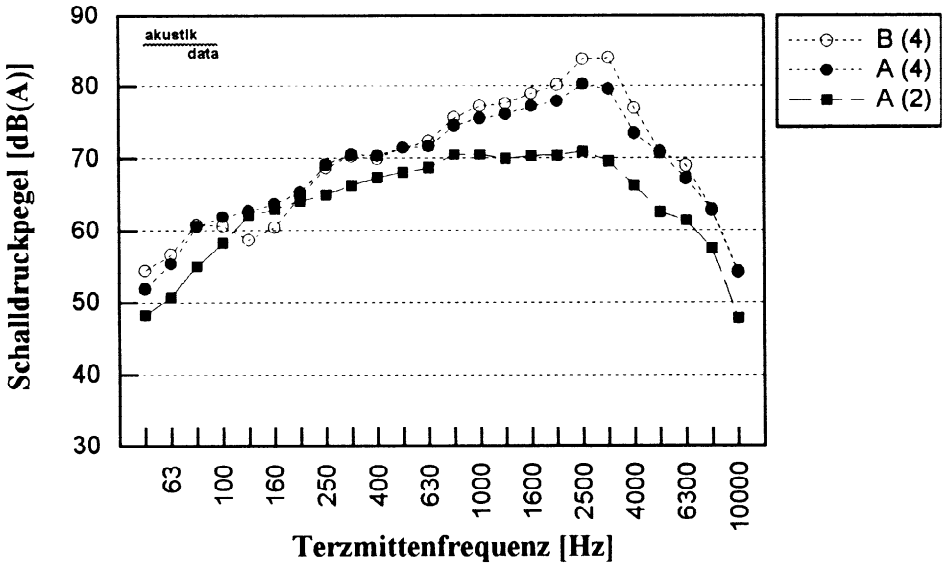


Bild 5 Über 14 Vorbeifahrten des ICE 1 gemittelte und A-bewertete Terzspektren der Mikrofone 2 (mit SSW) und 4 (ohne SSW) in Ebene A und Mikrofon 4 (ohne SSW) in Ebene B bei einer mittleren Geschwindigkeit von 277 km/h

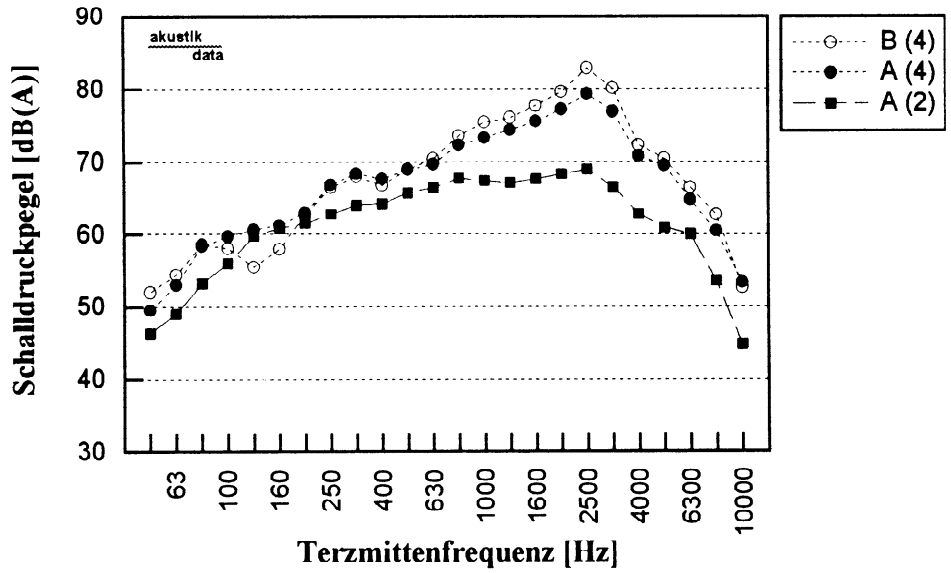


Bild 6 Über 12 Vorbeifahrten des ICE 1 gemittelte und A-bewertete Terzspektren der Mikrofone 2 (mit SSW) und 4 (ohne SSW) in Ebene A und Mikrofon 4 (ohne SSW) in Ebene B bei einer mittleren Geschwindigkeit von 251 km/h

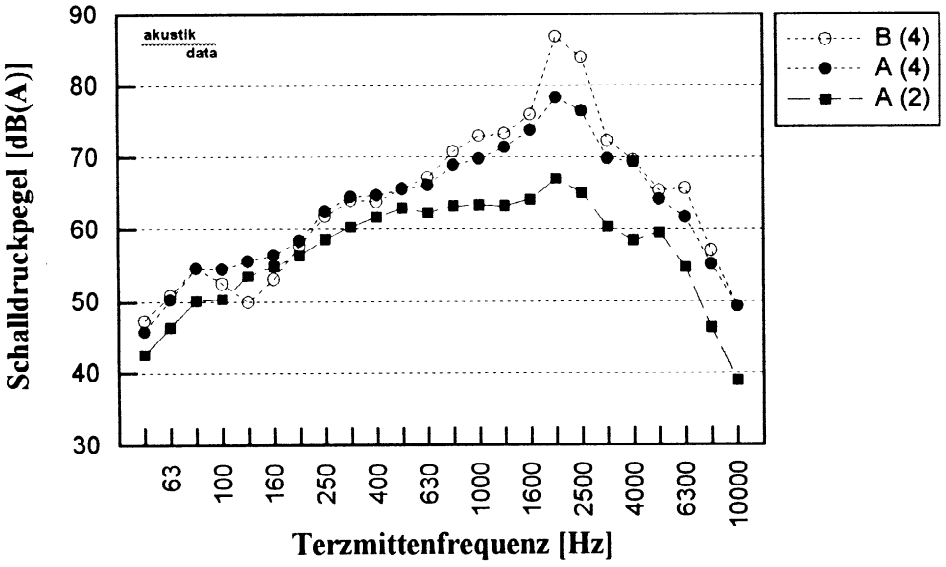


Bild 7 Über 12 Vorbeifahrten des ICE 1 gemittelte und A-bewertete Terzspektren der Mikrofone 2 (mit SSW) und 4 (ohne SSW) in Ebene A und Mikrofon 4 (ohne SSW) in Ebene B bei einer mittleren Geschwindigkeit von 201 km/h

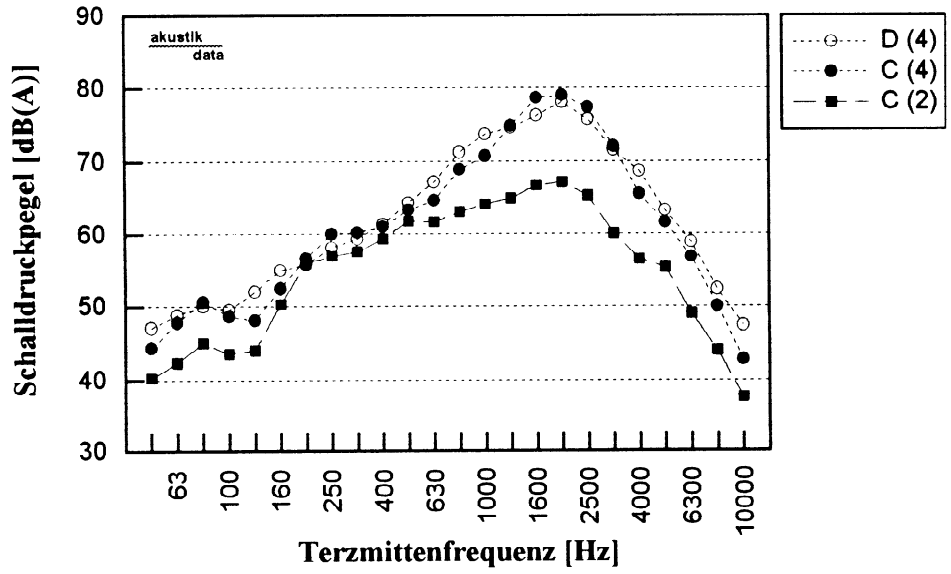


Bild 8 Über 14 (bzw. 13 bei Mikrofon 2) Vorbeifahrten des ICE 1 gemittelte und A-bewertete Terzspektren der Mikrofone 2 (mit SSW) und 4 (ohne SSW) in Ebene C und Mikrofon 4 (ohne SSW) in Ebene D bei einer mittleren Geschwindigkeit von 195 km/h

Bei einem Vergleich der Spektren der Referenzmikrofone an den Meßorten A und B zeigt sich insbesondere bei ICE 1-Vorbeifahrten in den Bildern 5 bis 7, daß die spektralen Maxima am Meßort B deutlich höher ausfallen als am Meßort A. Diese Differenz beträgt bei ca. 250 und 280 km/h etwa 4 dB(A); bei ca. 200 km/h wächst sie sogar auf etwa 9 dB(A) an. Als Ursache hierfür sind die höheren Schienenrauhigkeitspegel im Bereich der Meßebene B gegenüber Ebene A anzusehen, und zwar bezüglich der jeweils linken Schiene: So wurde in Bild 1 deutlich, daß die Amplitude der ausgeprägten Riffelwellenlänge 2,5 cm am Meßort B um etwa 5 dB größer ist als am Meßort A. Warum die Pegeldifferenz bei ca. 200 km/h noch wesentlich höher ausfällt als bei den anderen Geschwindigkeiten, kann damit erklärt werden, daß bei dieser Geschwindigkeit und Riffelwellenlänge die ICE 1-Räder bei ihrer bekannten Eigenfrequenz von ca. 2150 Hz [6] resonanzartig zu Schwingungen angeregt werden.

Ein Vergleich der ICE 1-Vorbeifahrten an den Meßebenen C und D in Bild 8 zeigt dagegen, daß die Unterschiede zwischen den Terzspektren der Referenzmikrofone diesmal deutlich geringer ausgeprägt sind, obwohl sich auch hier die Schienenrauhigkeiten der linken Schienen gemäß Bild 2 um etwa 5 dB unterscheiden, jedoch keine signifikanten Wellenlängenpeaks enthalten. Die Differenz in den Spektren der Referenzmikrofone zwischen den Meßebenen A und B kann schließlich auch auf die weichere Zwischenlage am Meßort B zurückgeführt werden (siehe [1]). Somit lassen sich die Zusammenhänge hier nicht vollständig klären; bei der Berechnung der SSW-Einfügungsdämpfung werden die auftretenden Pegeldifferenzen jedoch in geeigneter Weise anhand der Korrekturen $L_{m,s,OS,4}$ - $L_{m,s,MS,4}$ und ΔL_{Roll} berücksichtigt [1].

Ein Vergleich der Zugarten ICE 1 und ICE 2 zeigt in den Terzspektren für die Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 200 km/h (siehe Bilder 8 und 10) eine gute Übereinstimmung. Im Falle der Vorbeifahrten mit 280 km/h an den Meßebenen A und B (siehe Bilder 5 und 9) sind hingegen erhebliche Unterschiede zu beobachten. Dies betrifft insbesondere das Mikrofon A(4); hier fallen die Pegel in einzelnen Terzbändern beim ICE 2 bis zu 6 dB(A) höher aus als beim ICE 1. Die Tatsache, daß diese Differenzen im einen Fall auftreten und im anderen Fall nicht, hängt offensichtlich mit den verschiedenen Radbauarten der Züge ICE 1 (Ba 014) und ICE 2 (Ba 215) zusammen, welche in unterschiedliche Wechselwirkungen mit den jeweiligen Schienenrauhigkeiten treten. Weitere Detailanalysen, die hier notwendig wären, sind anhand der vorliegenden Daten jedoch nicht möglich.

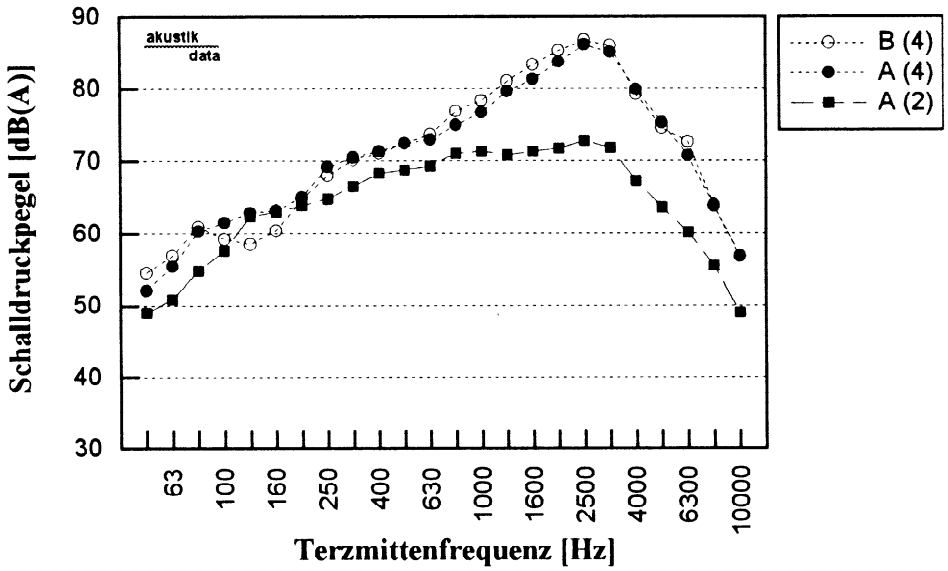


Bild 9 Über 4 Vorbeifahrten des ICE 2 gemittelte und A-bewertete Terzspektren der Mikrofone 2 (mit SSW) und 4 (ohne SSW) in Ebene A und Mikrofon 4 (ohne SSW) in Ebene B bei einer mittleren Geschwindigkeit von 278 km/h

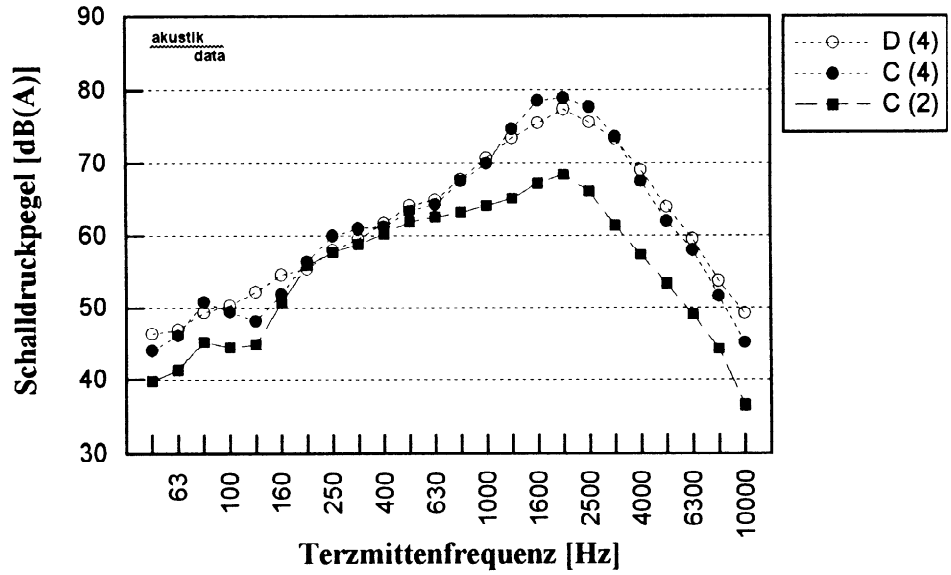


Bild 10 Über 5 Vorbeifahrten des ICE 2 gemittelte und A-bewertete Terzspektren der Mikrofone 2 (mit SSW) und 4 (ohne SSW) in Ebene C und Mikrofon 4 (ohne SSW) in Ebene D bei einer mittleren Geschwindigkeit von 195 km/h

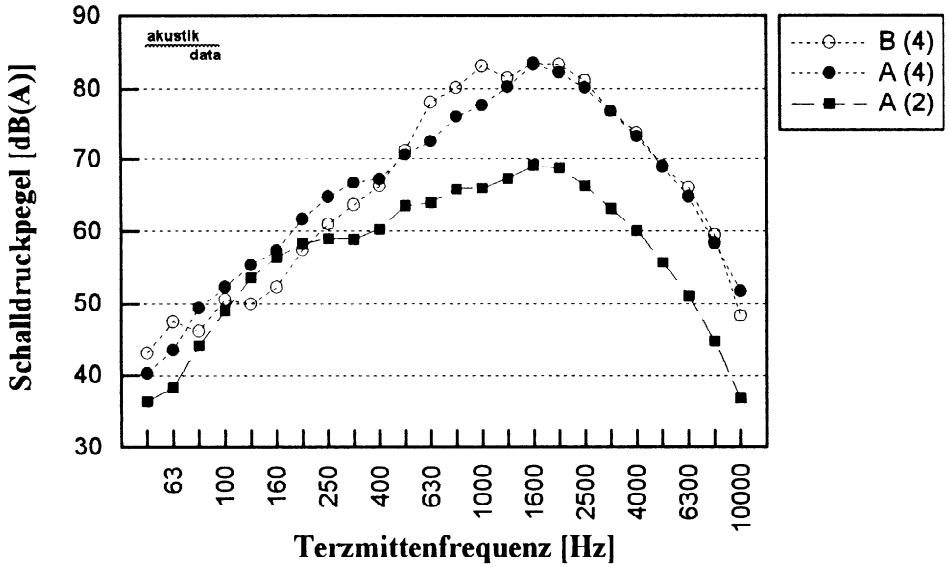


Bild 11 Über 23 Vorbeifahrten von Güterzügen gemittelte und A-bewertete Terzspektren der Mikrofone 2 (mit SSW) und 4 (ohne SSW) in Ebene A und Mikrofon 4 (ohne SSW) in Ebene B bei einer mittleren Geschwindigkeit von 113 km/h

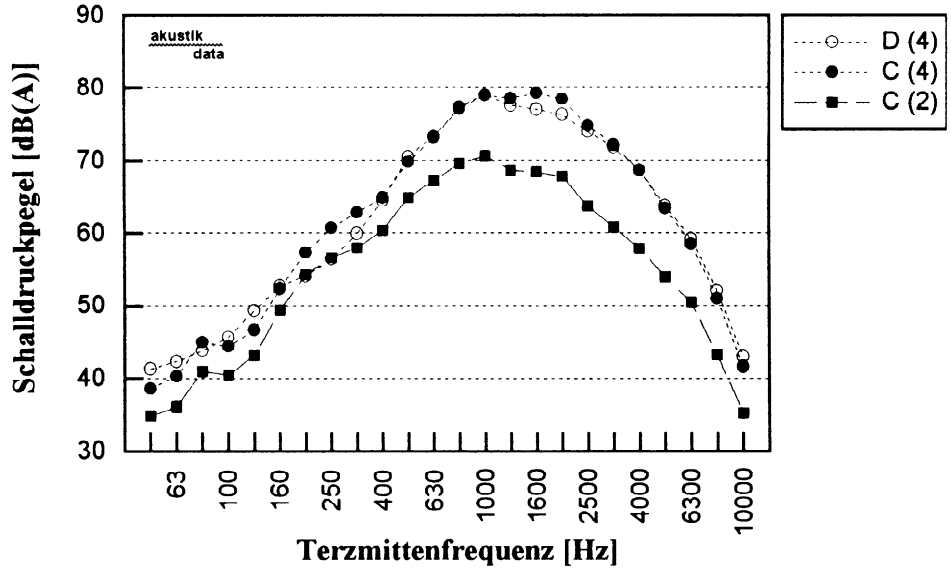


Bild 12 Über 10 Vorbeifahrten von Güterzügen gemittelte und A-bewertete Terzspektren der Mikrofone 2 (mit SSW) und 4 (ohne SSW) in Ebene C und Mikrofon 4 (ohne SSW) in Ebene D bei einer mittleren Geschwindigkeit von 98 km/h

Die mittleren Terzspektren der Güterzug-Vorbeifahrten sind in Bild 11 für den Meßort A/B und in Bild 12 für C/D zu finden. Verglichen mit den bisher betrachteten ICE 1- bzw. ICE 2-Vorbeifahrten sind die Peaks der Spektren bei Güterzügen zu tieferen Frequenzen hin verschoben, was mit der geringeren Fahrgeschwindigkeit zusammenhängt. Die Einfügungsdämpfung der SSW in der Meßebene A ist für die Rollgeräuschkomponenten um 1,6 kHz besonders hoch und liegt bei diesen Terzen in der Größenordnung von 13 dB(A). Im Frequenzbereich von 630 bis 1000 Hz sind außerdem beim Referenzmikrofon B(4) gegenüber Mikrofon A(4) höhere Pegel zu verzeichnen. Als Ursache ist neben der höheren Rauhigkeit der linken Schiene am Meßort B auch die dortige weichere Zwischenlage zu nennen, wodurch es zu einer stärkeren Entkopplung von Schienen und Schwellen und dadurch zu einer höheren Schallabstrahlung im genannten Frequenzbereich kommen kann [1].

Die Bilder 13 und 14 zeigen die Terzspektren für die Vorbeifahrten von scheibengebremsten IC-, EC- und IR-Zügen an den Orten C und D. Die spektralen Verteilungen haben jeweils einen ähnlichen Verlauf wie bei ICE 1- und ICE 2-Vorbeifahrten in der jeweiligen Meßebene. Die entsprechenden Terzspektren für RE-Züge sind in Bild 15 dokumentiert. Gegenüber den Spektren der Bilder 13 und 14 ergeben

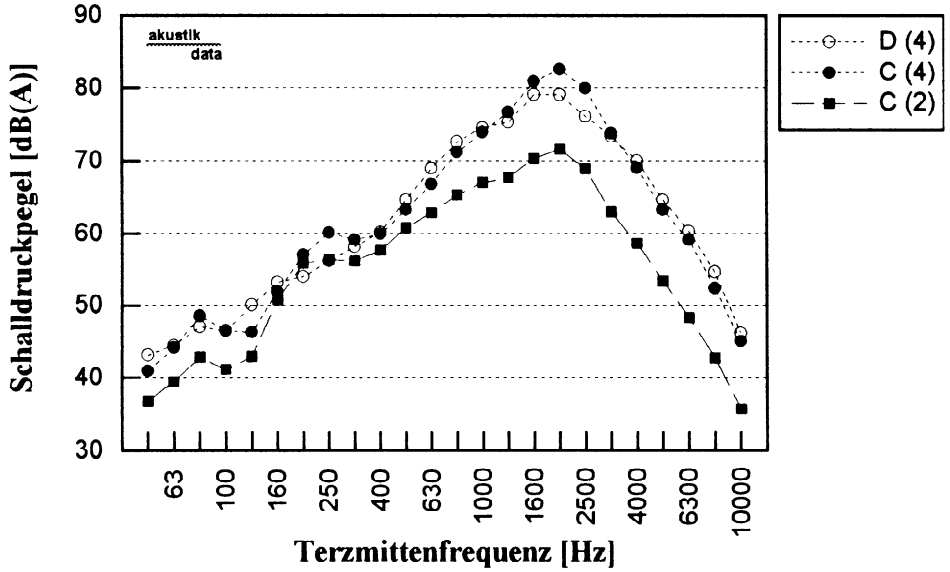


Bild 13 Über 6 Vorbeifahrten von IC- und EC-Zügen gemittelte und A-bewertete Terzspektren der Mikrofone 2 (mit SSW) und 4 (ohne SSW) in Ebene C und Mikrofon 4 (ohne SSW) in Ebene D bei einer mittleren Geschwindigkeit von 169 km/h

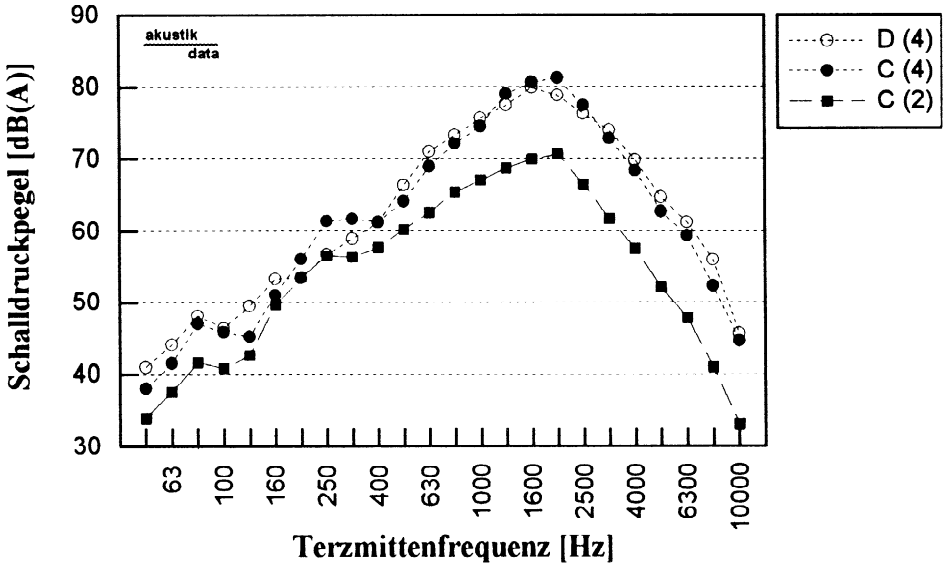


Bild 14 Über 7 (bzw. 6 bei Mikrofon 2) Vorbeifahrten von IR-Zügen gemittelte und A-bewertete Terzspektren der Mikrofone 2 (mit SSW) und 4 (ohne SSW) in Ebene C und Mikrofon 4 (ohne SSW) in Ebene D bei einer mittleren Geschwindigkeit von 156 km/h

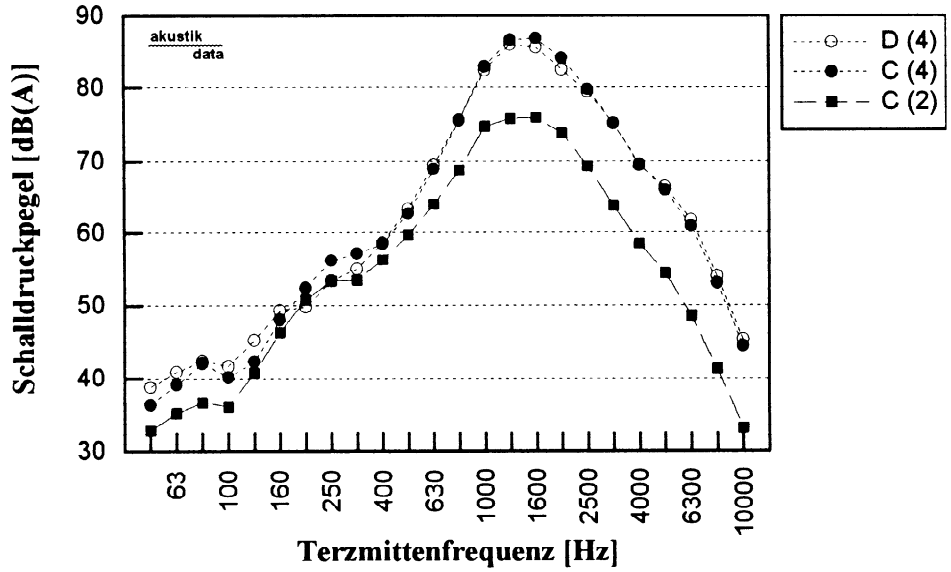


Bild 15 Über 4 Vorbeifahrten von RE-Zügen gemittelte und A-bewertete Terzspektren der Mikrofone 2 (mit SSW) und 4 (ohne SSW) in Ebene C und Mikrofon 4 (ohne SSW) in Ebene D bei einer mittleren Geschwindigkeit von 137 km/h

sich infolge der klotzgebremsten Räder höhere spektrale Amplituden. Die geringere Fahrgeschwindigkeit hat außerdem eine leichte Verschiebung der Pegelmaxima zu tieferen Frequenzen hin zur Folge.

5.3 Einzahlwerte

Die in [1] definierten Einzahlwerte L_h, L_e, L_v, L_{Max} und die örtlichen spezifischen Grundwerte $L_{m,s}$ wurden für jede Vorbeifahrt und jedes Mikrofon in allen Meßebenen berechnet. Am Beispiel der ICE 1-Vorbeifahrten mit ca. 280 km/h an den Meßorten A und B sind diese Pegel für Mikrofon 2 in Tabelle A4 und A5 aufgelistet. Am Ende der Tabellen stehen in den mit "*M*" und "*s*" bezeichneten Datenzeilen jeweils die Mittelwerte und Streuungen der einzelnen Meßgrößen.

Eine Auflistung dieser Mittelwerte und Streuungen über jeweils *N* Vorbeifahrten für alle analysierten Klassen und jedes Mikrofon enthalten die Tabellen A6 bis A17. Ergebnisse für die Meßebene ohne (OS) bzw. mit SSW (MS) sind hierin zum direkten Vergleich jeweils übereinander aufgetragen. Die Ergebnisse für die jenseits der Gleise postierten Mikrofone 4 sind mit dem Buchstaben der betreffenden Ebene gekennzeichnet und ebenfalls in zwei aufeinanderfolgenden Zeilen gegenübergestellt. Die gemittelten Werte L_h, L_e, L_v und L_{Max} haben in den Tabellen nur informativen Charakter, während die gemittelten örtlichen spezifischen Grundwerte $L_{m,s}$ im folgenden einer weitergehenden Auswertung unterzogen werden.

Bevor die eigentliche Wirkung der SSW ermittelt wird, bietet es sich an, alle Meßorte anhand der örtlichen spezifischen Grundwerte auf ihren schalltechnischen Gleiszustand hin zu überprüfen. Diese Werte, entnommen aus den Tabellen A6 bis A17, sind in Tabelle 5 zusammengestellt. Es sind auch die nach [1], Gleichung (15) ermittelten Vertrauensbereiche angegeben, welche für ein Vertrauensniveau von 0,8 berechnet wurden. Zum Vergleich mit dem Grundwert nach Schall 03 werden nur Mikrofone in 25 m Entfernung von Gleismitte betrachtet, und zwar Mikrofon 4 für die Meßebenen mit SSW und Mikrofon 2 für die Meßebenen ohne SSW. Da am Meßort C das Mikrofon 4 in 30 m Entfernung zur Gleismitte aufgestellt werden mußte, wurden die Pegel $L_{m,s,MS,4}$ analog zu [1] für eine Position in 25 m Entfernung umgerechnet, d. h. sie wurden um 10 lg (30 m/25 m) = 0,8 dB(A) erhöht. Die für Meßebene A ermittelten örtlichen spezifischen Grundwerte zeigen, daß sich das Gleis in einem

guten bis sehr guten akustischen Zustand befindet. Unterschiede in der Schallabstrahlung zwischen den Meßebenen A und B, die bis zu 4,0 dB(A) betragen, wurden bereits im vorigen Abschnitt anhand der Terzspektren erläutert.

	Meßebene	A	B	Meßebene	C	D
	v [km/h]	$L_{m,s,MS,4}$ [dB(A)]	$L_{m,s,OS,2}$ [dB(A)]	v [km/h]	$L_{m,s,MS,4}$ [1)] [dB(A)]	$L_{m,s,OS,2}$ [dB(A)]
ICE 1	201	46,8 ± 0,3	50,8 ± 0,2	195	49,3 ± 0,3	46,7 ± 0,2
	251	46,2 ± 0,2	48,3 ± 0,1	-	-	-
	277	46,7 ± 0,2	48,9 ± 0,2	-	-	-
ICE 2	278	50,9 ± 1,9	50,4 ± 1,0	195	49,5 ± 0,8	47,1 ± 0,9
IC, EC	192	43,9[2)]	47,1[2)]	169	48,9 ± 0,9	46,6 ± 1,1
IR	-	-	-	156	49,4 ± 0,3	47,4 ± 0,5
RE	-	-	-	137	50,0 ± 0,8	48,0 ± 0,8
G	113	48,8 ± 0,4	50,4 ± 0,4	98	48,8 ± 0,7	47,6 ± 0,6

[1)] Pegel enthalten Entfernungskorrektur von +0,8 dB(A)

[2)] Angabe eines Vertrauensbereichs ist nicht möglich, da $N = 1$

Tabelle 5 Örtliche spezifische Grundwerte $L_{m,s}$ und Vertrauensbereiche in dB(A) gemessen in 25 m Entfernung von Gleismitte an den vier Meßorten bei geschliffenen Schienen

Aus Tabelle 5 geht weiter hervor, daß die örtlichen spezifischen Grundwerte an den Meßorten C und D nach dem Schleifen ebenfalls sehr geringe Werte annehmen, während sie in [1] bis zu ca. 14 dB(A) höher ausfielen. Im Bereich beider Meßorte liegt der Grundwert für Güterzüge um 48 dB(A); ein solcher Wert kann zur Zeit selbst durch neuentwickelte Schleifverfahren nicht wesentlich unterboten werden. In Tabelle 2 war bei den Schienenrauhigkeits-Summenpegeln ein Unterschied von etwa 4 dB zwischen den Meßorten C und D zu verzeichnen; die entsprechenden Pegeldifferenzen im abgestrahlten Schall liegen mit Werten zwischen 2,6 dB(A) bei ICE 1- und 1,2 dB(A) bei Güterzug-Vorbeifahrten jedoch darunter. Damit bestätigt sich, daß eine Proportionalität zwischen Schienenrauhigkeit und abgestrahltem Schall nicht unbedingt für die Summenpegel gilt, sondern allenfalls für einzelne Frequenzen [1].

Die im vorigen Abschnitt kommentierten Emissionsunterschiede zwischen ICE 1- und ICE 2-Zügen sind gleichfalls aus den Einzahlwerten ersichtlich. Auch hier trifft dies

nur für die Meßebenen A und B mit Pegeldifferenzen von 4,2 bzw. 1,5 dB(A) zu. Die entsprechenden Einzahlwerte an den Meßebenen C und D unterscheiden sich hingegen nur geringfügig.

Ein weiteres Ergebnis wird im folgenden vorgestellt, welches wie in [1] auf die Notwendigkeit einer Korrektur hinweist, nämlich unterschiedliche Rauhigkeiten zwischen rechter und linker Schiene bei der Auswertung zu berücksichtigen. In Tabelle 6 werden die örtlichen spezifischen Grundwerte gemessen mit den Mikrofonen 2 und 4 in den Meßebenen ohne SSW miteinander verglichen, um zu klären, ob die Schallabstrahlung symmetrisch zur Gleismitte erfolgt.

Zugart	$v^{1)}$ [km/h]	Meß-ebene	$L_{m,s,OS,2}$ [dB(A)]	$L_{m,s,OS,4}{}^{2)}$ [dB(A)]	$L_{m,s,OS,2} - L_{m,s,OS,4}$ [dB(A)]
ICE 1	199,9	B	50,8	52,7	-1,9
ICE 1	250,5	B	48,3	48,5	-0,2
ICE 1	276,0	B	48,9	49,2	-0,3
ICE 2	276,8	B	50,4	51,9	-1,5
IC	190,2	B	47,1	48,9	-1,8
G	113,0	B	50,4	50,4	0,0
ICE 1	198,0	D	46,7	48,4	-1,7
ICE 2	193,9	D	47,1	48,2	-1,1
IC, EC	168,6	D	46,6	47,4	-0,8
IR	157,2	D	47,4	48,9	-1,5
RE	137,8	D	48,0	49,1	-1,1
G	99,0	D	47,6	47,9	-0,3

[1)] Mittlere Vorbeifahrgeschwindigkeit an den Meßorten ohne SSW

[2)] Pegel bei Meßebene D enthalten Entfernungskorrektur von +0,8 dB(A)

Tabelle 6 Örtliche spezifische Grundwerte $L_{m,s}$ rechts und links der Gleismitte an den Meßorten ohne SSW (Vergleich Mikrofon 4 mit Mikrofon 2)

Für beide Meßebenen zeigt sich, daß Unterschiede von bis zu 1,9 dB(A) in der Abstrahlung zur rechten und zur linken Seite auftreten. Bei Güterzügen beträgt diese Differenz hingegen nur 0 bis 0,3 dB(A). Analog zu [1] ist dies dadurch zu erklären, daß bei Güterwagen der Bereich zwischen Wagenböden und Gleis verglichen mit ICE-Wagen weitgehend frei von abschirmenden Hindernissen ist, wodurch der Anteil

der entfernteren Radreihe am Immissionspegel recht groß ist. Unterschiede in der Schienenrauhigkeit fallen im abgestrahlten Pegel daher nicht so stark ins Gewicht, zumal klotzgebremste Räder in der Regel ein hohes Rauhigkeitsniveau besitzen. Die Korrektur ΔL_{Roll} wird daher für Güterzüge sowie für RE-Züge nicht angewandt [1].

Schließlich wird die Wirkung der SSW gemäß [1], Gleichung (9) berechnet. Die folgenden Tabellen 7 und 8 enthalten jeweils die Differenz der gemittelten örtlichen spezifischen Grundwerte ($L_{\mathrm{m,s,OS},i}$ - $L_{\mathrm{m,s,MS},i}$) für die Mikrofone i = 1 bis 3, die Differenzen der an den Referenzmikrofonen 4 gemessenen Pegel ($L_{\mathrm{m,s,OS},4}$ - $L_{\mathrm{m,s,MS},4}$) sowie die Korrekturterme ΔL_{Roll} für alle analysierten Klassen. Ebenfalls eingetragen sind die nach [1] berechneten Vertrauensbereiche. Wegen des nicht angebbaren Vertrauensbereichs ist die eine IC-Vorbeifahrt an den Meßorten A und B in den Tabellen nicht aufgeführt.

Eine umfassende Interpretation der Ergebnisse von Tabelle 7 und 8 erfolgt erst im nächsten Abschnitt beim Vergleich mit der nach Schall 03 berechneten Einfügungsdämpfung. Es ist aber im Falle der Meßebenen A und B schon deutlich erkennbar, daß die Wirkung einer SSW bei ICE-Vorbeifahrten geringer ausfällt als bei Zügen, deren Emission größtenteils im Rad/Schiene-Bereich erzeugt wird (d. h. bei Güterzügen). Ferner deutet sich bei den ICE 1-Vorbeifahrten an, daß die Wirkung der SSW mit steigender Geschwindigkeit abnimmt, was durch den zunehmenden Einfluß hochliegender aerodynamischer Schallquellen zu begründen ist.

Bei allen analysierten Klassen der ICE 1-Vorbeifahrten tritt der Fall ein, daß der meßtechnisch ermittelte Vertrauensbereich kleiner als die Größe ΔL_{Roll} ausfällt, welche in [1], Abschnitt 4.5 als "Unsicherheitsbereich" bezeichnet wurde. In diesen Fällen muß in den folgenden Betrachtungen dieser Wert an die Stelle des Vertrauensbereichs treten, um die tatsächlichen Unwägbarkeiten richtig zu beschreiben.

Im Falle der Mikrofone 1 bis 3 am Meßort C beruhen alle Einzahlwerte auf einer Auswertung über die halbe Zuglänge (siehe Abschnitt 5.1). Es sei darauf hingewiesen, daß dies nur dann fehlerfrei möglich ist, wenn die Quellverteilung entlang des Zuges bezüglich der Zugmitte annähernd symmetrisch ist. Dies war aufgrund des schlechten Schienenzustands in [1] für sämtliche Vorbeifahrten auch der Fall. Bei dem hier vorliegenden guten Schienenzustand trifft dies hingegen nur auf die Zugarten

Mikrofon	$L_{m,s,OS,i}$ - $L_{m,s,MS,i}$ [dB(A)]	$L_{m,s,OS,4}$ - $L_{m,s,MS,4}$ [dB(A)]	ΔL_{Roll} [dB(A)]	ΔL_{SSW} [dB(A)]
ICE 1-Vorbeifahrten an den Meßorten A und B mit ca. 200 km/h				
1	16,0	5,9	-1,7	11,8 ± 0,5
2	11,6	5,9	-1,7	7,4 ± 0,5
3	11,5	5,9	-1,7	7,3 ± 0,6
ICE 1-Vorbeifahrten an den Meßorten A und B mit ca. 250 km/h				
1	12,1	2,3	-1,6	11,4 ± 0,5
2	8,2	2,3	-1,6	7,5 ± 0,4
3	8,3	2,3	-1,6	7,6 ± 0,4
ICE 1-Vorbeifahrten an den Meßorten A und B mit ca. 280 km/h				
1	11,1	2,5	-1,6	10,2 ± 0,4
2	7,4	2,5	-1,6	6,5 ± 0,4
3	7,4	2,5	-1,6	6,5 ± 0,4
ICE 1-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 200 km/h				
1	9,6	-0,8	0,9	9,5 ± 0,5
2	7,0	-0,8	0,9	6,9 ± 0,5
3	7,1	-0,8	0,9	7,0 ± 0,7
ICE 2-Vorbeifahrten an den Meßorten A und B mit ca. 280 km/h				
1	11,7	1,0	-1,6	12,3 ± 3,0
2	8,1	1,0	-1,6	8,7 ± 2,8
3	8,1	1,0	-1,6	8,7 ± 2,8
ICE 2-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 200 km/h				
1	10,0	-1,3	0,9	10,4 ± 1,3
2	6,4	-1,3	0,9	6,8 ± 1,3
3	7,9	-1,3	0,9	8,3 ± 1,5

Tabelle 7 Gemessene Einfügungsdämpfungen ΔL_{SSW} für alle analysierten Klassen (hier ICE 1- und ICE 2-Züge) bei geschliffenen Schienen einschließlich der Korrekturen gemäß Gleichung (9) in [1]

Mikrofon	$L_{m,s,OS,i}$ - $L_{m,s,MS,i}$ [dB(A)]	$L_{m,s,OS,4}$ - $L_{m,s,MS,4}$ [dB(A)]	ΔL_{Roll} [dB(A)]	ΔL_{SSW} [dB(A)]
IC- und EC-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 170 km/h				
1	11,7	-1,5	0,8	12,4 ± 2,1
2	6,8	-1,5	0,8	7,5 ± 2,2
3	7,7	-1,5	0,8	8,4 ± 2,2
IR-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 160 km/h				
1	12,8	-0,6	0,8	12,6 ± 0,8
2	7,6	-0,6	0,8	7,4 ± 0,9
3	8,9	-0,6	0,8	8,7 ± 1,1
RE-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 140 km/h				
1	14,6	-0,9	0,0	15,5 ± 1,2
2	8,6	-0,9	0,0	9,5 ± 1,3
3	9,0	-0,9	0,0	9,9 ± 1,9
Güterzug-Vorbeifahrten an den Meßorten A und B mit ca. 113 km/h				
1	18,6	1,6	0,0	17,0 ± 0,8
2	13,6	1,6	0,0	12,0 ± 0,8
3	13,4	1,6	0,0	11,8 ± 0,8
Güterzug-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 98 km/h				
1	13,1	-0,9	0,0	14,0 ± 1,2
2	8,5	-0,9	0,0	9,4 ± 1,3
3	8,4	-0,9	0,0	9,3 ± 1,3

Tabelle 8 Gemessene Einfügungsdämpfungen ΔL_{SSW} für alle analysierten Klassen (hier IC-, EC-, IR-, RE- und Güterzüge) bei geschliffenen Schienen einschließlich der Korrekturen gemäß Gleichung (9) in [1]

ICE 1, ICE 2, RE und auf Güterzüge zu (siehe Bilder A1 bis A96). Im Falle der IC-, EC- und IR-Fahrten ragt die Emission der Lokomotive jedoch am Beginn jedes Pegelverlaufs mehr oder weniger deutlich hervor; die hierfür berechneten Einzahlwerte beziehen sich daher strenggenommen nur auf einen Zug mit Lokomotive und halber Wagenanzahl. Somit fallen die Einzahlwerte für diese Züge an Meßebene C gering-

fügig zu hoch aus; die SSW-Einfügungsdämpfung wird folglich zu niedrig berechnet. Diese Abweichung wurde in Testauswertungen mit 1,5 dB(A) für Mikrofon 1, 0,7 dB(A) für Mikrofon 2 und 0,5 dB(A) für Mikrofon 3 abgeschätzt. Im kommenden Abschnitt werden daher die gemessenen Einfügungsdämpfungen ΔL_{SSW} für die Zugarten IC, EC und IR mit diesen Pegeldifferenzen beaufschlagt.

5.4 Vergleich mit Schall 03

Als nächster Schritt ist für jede Mikrofonposition die Einfügungsdämpfung der jeweiligen SSW nach Schall 03 [7] zu berechnen. Dies wird anhand eines internen Rechenmodells realisiert, welches die Vorschriften der Schall 03 erfüllt. Für jedes Mikrofon wird hierbei eine Pegeldifferenz $\Delta L_{SSW}'$ berechnet, wobei die Immissionspegel ohne bzw. mit vorhandener SSW subtrahiert werden. Diese Pegel werden nach dem Teilstückverfahren berechnet und enthalten im Falle der SSW für jedes Teilstück die Pegeldifferenz $D_{e,k}$ eines Schallschirms (Gleichung (12) in [7]). Die Mikrofonposition und die Lage der jeweiligen SSW (Abstand von Gleismitte, Höhe über SO) werden hierbei berücksichtigt, und die SSW wird jeweils als unendlich lang angenommen. Alle emissionsseitigen Parameter (Zugart, -länge, -geschwindigkeit sowie Fahrbahnart) entfallen bei der Differenzbildung und sind daher nicht relevant.

In den folgenden Tabellen 9 und 10 sind diese berechneten Einfügungsdämpfungen $\Delta L_{SSW}'$ zusammen mit den gemessenen Werten (ΔL_{SSW}, siehe Abschnitt 5.3) aufgelistet. Zur Orientierung sind auch die Schirmwerte z_0 [7] in den Tabellen genannt, welche sich jeweils auf das Teilstück beziehen, welches genau in der Meßebene liegt. Die Differenz zwischen gemessenen und berechneten Einfügungsdämpfungen wird als $\Delta L_{Schall\ 03}$ bezeichnet und stellt das endgültige Ergebnis der Untersuchung dar. Negative Werte für $\Delta L_{Schall\ 03}$ bedeuten, daß die gemessene Einfügungsdämpfung geringer ist als nach Schall 03 berechnet. Die Ergebnisse von Tabelle 9 und 10 werden in Tabelle 11 und 12 nochmals vorgestellt, wobei diesmal bei der Berechnung nach Schall 03 die derzeit umstrittene Korrektur zur Berücksichtigung der Boden- und Meteorologiedämpfung D_{BM} in Absprache mit dem Auftraggeber nicht angewandt wurde.

Als aussagekräftigste Ergebnisse sind die jeweils für das Mikrofon 2 berechneten Werte $\Delta L_{Schall\ 03}$ anzusehen, also für den Immissionsort in 25 m Entfernung von Gleismitte. In 50 m Entfernung, also am Mikrofon 3, sind diese Pegeldifferenzen nur dann

Mikrofon	Schirmwert z_0 [m]	ΔL_{SSW} (gemessen) [dB(A)]	$\Delta L_{SSW}'$ (nach Schall 03) [dB(A)]	$\Delta L_{Schall\ 03}$ (Differenz) [dB(A)]
ICE 1-Vorbeifahrten an den Meßorten A und B mit ca. 200 km/h				
1	0,434	11,8 ± 1,7	12,9	-1,1 ± 1,7
2	0,235	7,4 ± 1,7	10,5	-3,1 ± 1,7
3	0,274	7,3 ± 1,7	9,2	-1,9 ± 1,7
ICE 1-Vorbeifahrten an den Meßorten A und B mit ca. 250 km/h				
1	0,434	11,4 ± 1,6	12,9	-1,5 ± 1,6
2	0,235	7,5 ± 1,6	10,5	-3,0 ± 1,6
3	0,274	7,6 ± 1,6	9,2	-1,6 ± 1,6
ICE 1-Vorbeifahrten an den Meßorten A und B mit ca. 280 km/h				
1	0,434	10,2 ± 1,6	12,9	-2,7 ± 1,6
2	0,235	6,5 ± 1,6	10,5	-4,0 ± 1,6
3	0,274	6,5 ± 1,6	9,2	-2,7 ± 1,6
ICE 1-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 200 km/h				
1	0,504	9,5 ± 0,9	13,5	-4,0 ± 0,9
2	0,327	6,9 ± 0,9	11,1	-4,2 ± 0,9
3	0,366	7,0 ± 0,9	9,4	-2,4 ± 0,9
ICE 2-Vorbeifahrten an den Meßorten A und B mit ca. 280 km/h				
1	0,434	12,3 ± 3,0	12,9	-0,6 ± 3,0
2	0,235	8,7 ± 2,8	10,5	-1,8 ± 2,8
3	0,274	8,7 ± 2,8	9,2	-0,5 ± 2,8
ICE 2-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 200 km/h				
1	0,504	10,4 ± 1,3	13,5	-3,1 ± 1,3
2	0,327	6,8 ± 1,3	11,1	-4,3 ± 1,3
3	0,366	8,3 ± 1,5	9,4	-1,1 ± 1,5

Tabelle 9 Schirmwerte z_0, gemessene und nach Schall 03 berechnete Einfügungsdämpfungen der untersuchten SSW für alle analysierten Klassen (hier ICE 1- und ICE 2-Züge) bei geschliffenen Schienen und Abweichungen zwischen Messung und Rechnung

Mikrofon	Schirmwert z_0 [m]	ΔL_{SSW} (gemessen) [dB(A)]	$\Delta L_{SSW}'$ (nach Schall 03) [dB(A)]	$\Delta L_{Schall\ 03}$ (Differenz) [dB(A)]
IC- und EC-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 170 km/h				
1	0,504	13,9[1)] ± 2,1	13,5	+0,4 ± 2,1
2	0,327	8,2[1)] ± 2,2	11,1	-2,9 ± 2,2
3	0,366	8,9[1)] ± 2,2	9,4	-0,5 ± 2,2
IR-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 160 km/h				
1	0,504	14,1[1)] ± 0,8	13,5	+0,6 ± 0,8
2	0,327	8,1[1)] ± 0,9	11,1	-3,0 ± 0,9
3	0,366	9,2[1)] ± 1,1	9,4	-0,2 ± 1,1
RE-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 140 km/h				
1	0,504	15,5 ± 1,2	13,5	+2,0 ± 1,2
2	0,327	9,5 ± 1,3	11,1	-1,6 ± 1,3
3	0,366	9,9 ± 1,9	9,4	+0,5 ± 1,9
Güterzug-Vorbeifahrten an den Meßorten A und B mit ca. 113 km/h				
1	0,434	17,0 ± 0,8	12,9	+4,1 ± 0,8
2	0,235	12,0 ± 0,8	10,5	+1,5 ± 0,8
3	0,274	11,8 ± 0,8	9,2	+2,6 ± 0,8
Güterzug-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 98 km/h				
1	0,504	14,0 ± 1,2	13,5	+0,5 ± 1,2
2	0,327	9,4 ± 1,3	11,1	-1,7 ± 1,3
3	0,366	9,3 ± 1,3	9,4	-0,1 ± 1,3

[1)] Pegeldifferenzen sind gemäß Abschnitt 5.3 auf die volle Zuglänge umgerechnet

Tabelle 10 Schirmwerte z_0, gemessene und nach Schall 03 berechnete Einfügungsdämpfungen der untersuchten SSW für alle analysierten Klassen (hier IC-, EC-, IR-, RE- und Güterzüge) bei geschliffenen Schienen und Abweichungen zwischen Messung und Rechnung

Mikrofon	Schirmwert z_0 [m]	ΔL_{SSW} (gemessen) [dB(A)]	$\Delta L_{SSW}'$ (nach Schall 03) [dB(A)]	$\Delta L_{Schall\ 03}$ (Differenz) [dB(A)]
ICE 1-Vorbeifahrten an den Meßorten A und B mit ca. 200 km/h				
1	0,434	11,8 ± 1,7	13,1	-1,3 ± 1,7
2	0,235	7,4 ± 1,7	10,9	-3,5 ± 1,7
3	0,274	7,3 ± 1,7	11,2	-3,9 ± 1,7
ICE 1-Vorbeifahrten an den Meßorten A und B mit ca. 250 km/h				
1	0,434	11,4 ± 1,6	13,1	-1,7 ± 1,6
2	0,235	7,5 ± 1,6	10,9	-3,4 ± 1,6
3	0,274	7,6 ± 1,6	11,2	-3,6 ± 1,6
ICE 1-Vorbeifahrten an den Meßorten A und B mit ca. 280 km/h				
1	0,434	10,2 ± 1,6	13,1	-2,9 ± 1,6
2	0,235	6,5 ± 1,6	10,9	-4,4 ± 1,6
3	0,274	6,5 ± 1,6	11,2	-4,7 ± 1,6
ICE 1-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 200 km/h				
1	0,504	9,5 ± 0,9	13,6	-4,1 ± 0,9
2	0,327	6,9 ± 0,9	12,0	-5,1 ± 0,9
3	0,366	7,0 ± 0,9	12,2	-5,2 ± 0,9
ICE 2-Vorbeifahrten an den Meßorten A und B mit ca. 280 km/h				
1	0,434	12,3 ± 3,0	13,1	-0,8 ± 3,0
2	0,235	8,7 ± 2,8	10,9	-2,2 ± 2,8
3	0,274	8,7 ± 2,8	11,2	-2,5 ± 2,8
ICE 2-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 200 km/h				
1	0,504	10,4 ± 1,3	13,6	-3,2 ± 1,3
2	0,327	6,8 ± 1,3	12,0	-5,2 ± 1,3
3	0,366	8,3 ± 1,5	12,2	-3,9 ± 1,5

Tabelle 11 Schirmwerte z_0, gemessene und nach Schall 03 **ohne Korrekturwert** D_{BM} berechnete Einfügungsdämpfungen der untersuchten SSW für alle analysierten Klassen (hier ICE 1- und ICE 2-Züge) bei geschliffenen Schienen und Abweichungen zwischen Messung und Rechnung

Mikrofon	Schirmwert z_0 [m]	ΔL_{SSW} (gemessen) [dB(A)]	$\Delta L_{SSW}'$ (nach Schall 03) [dB(A)]	$\Delta L_{Schall\ 03}$ (Differenz) [dB(A)]
IC- und EC-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 170 km/h				
1	0,504	13,9[1)] ± 2,1	13,6	+0,3 ± 2,1
2	0,327	8,2[1)] ± 2,2	12,0	-3,8 ± 2,2
3	0,366	8,9[1)] ± 2,2	12,2	-3,3 ± 2,2
IR-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 160 km/h				
1	0,504	14,1[1)] ± 0,8	13,6	+0,5 ± 0,8
2	0,327	8,1[1)] ± 0,9	12,0	-3,9 ± 0,9
3	0,366	9,2[1)] ± 1,1	12,2	-3,0 ± 1,1
RE-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 140 km/h				
1	0,504	15,5 ± 1,2	13,6	+1,9 ± 1,2
2	0,327	9,5 ± 1,3	12,0	-2,5 ± 1,3
3	0,366	9,9 ± 1,9	12,2	-2,3 ± 1,9
Güterzug-Vorbeifahrten an den Meßorten A und B mit ca. 113 km/h				
1	0,434	17,0 ± 0,8	13,1	+3,9 ± 0,8
2	0,235	12,0 ± 0,8	10,9	+1,1 ± 0,8
3	0,274	11,8 ± 0,8	11,2	+0,6 ± 0,8
Güterzug-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 98 km/h				
1	0,504	14,0 ± 1,2	13,6	+0,4 ± 1,2
2	0,327	9,4 ± 1,3	12,0	-2,6 ± 1,3
3	0,366	9,3 ± 1,3	12,2	-2,9 ± 1,3

[1)] Pegeldifferenzen sind gemäß Abschnitt 5.3 auf die volle Zuglänge umgerechnet

Tabelle 12 Schirmwerte z_0, gemessene und nach Schall 03 **ohne Korrekturwert** D_{BM} berechnete Einfügungsdämpfungen der untersuchten SSW für alle analysierten Klassen (hier IC-, EC-, IR-, RE- und Güterzüge) bei geschliffenen Schienen und Abweichungen zwischen Messung und Rechnung

als realistisch einzustufen, wenn auch der starke Einfluß der Boden- und Meteorologiedämpfung D_{BM} richtig formuliert ist. Wird diese Größe nämlich nicht berücksichtigt, fallen die Abweichungen zur Schall 03 zwischen 2 und 2,8 dB(A) höher aus. Die für Mikrofon 1 ermittelten $\Delta L_{Schall\ 03}$ weichen wie schon in [1] in allen Fällen von den entsprechenden Werten für Mikrofon 2 oft um mehrere dB(A) ab, und zwar teils nach oben, teils nach unten. An dieser Mikrofonposition wirken sich kleinste Abweichungen zwischen Realität und Modell offenbar stark aus, so daß diese Werte im folgenden nicht weiter interpretiert werden. Wegen seiner geringen Entfernung von 7,5 m zur Gleismitte kommt dieser Immissionsort in der praktischen Schallschutzplanung ohnehin so gut wie nicht vor.

- ICE 1-Vorbeifahrten

Wie schon in [1] zu beobachten war, wird die Wirkung einer SSW durch die Schall 03 beim ICE 1 in der Regel zu hoch berechnet. Diese Überschätzung beträgt gemäß Tabelle 9 für Vorbeifahrten mit ca. 200 km/h am Ort des Mikrofons 2 in Meßebene A etwa 3 dB(A) und in Ebene C etwa 4 dB(A). Der entsprechende Wert am Meßort A in [1] betrug ebenfalls etwa 3 dB(A); in allen drei Fällen lagen nur geringe Schienenrauhigkeiten vor. So kann eine Überschätzung von 3 bis 4 dB(A) bei den genannten akustischen Randbedingungen als meßtechnisch abgesichert gelten. Nur im Falle eines sehr schlechten Schienenzustands am Meßort C in [1] wurde eine wesentlich bessere Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung gefunden, da hochliegende Schallquellen dann gegenüber dem Rollgeräusch in den Hintergrund treten.

Ebenfalls ergab sich bereits in [1], daß die Überschätzung der Einfügungsdämpfung mit der Geschwindigkeit nochmals wächst, da sich die relevanten Schallquellen des ICE 1 in ihrer mittleren vertikalen Position mit zunehmender Geschwindigkeit von der Schiene nach oben hin verlagern. In [1] erhöhten sich die Werte $\Delta L_{Schall\ 03}$ zwischen 200 und 280 km/h bei den Mikrofonen 2 und 3 am Meßort A um etwa 2 dB(A); bei den im vorliegenden Bericht beschriebenen Messungen ist diese Pegelzunahme mit weniger als 1 dB(A) nicht ganz so deutlich.

Es ist anzumerken, daß die Differenzen $\Delta L_{Schall\ 03}$ am Mikrofon 3 relativ gering ausfallen; gegenüber Mikrofon 2 nehmen sie um 1 bis 2 dB(A) niedrigere Beträge an. Dies muß nicht unbedingt bedeuten, daß die Schall 03 die Einfügungsdämpfung einer

SSW bei einem Mikrofonabstand von 50 m besser beschreibt als bei 25 m; vielmehr kommt es durch die ebenfalls umstrittene Größe D_{BM} offenbar zu einer teilweisen Kompensation zweier Fehlereinflüsse. Dies ist daran zu erkennen, daß durch das Fehlen der Korrektur D_{BM} in den Ergebnissen der Tabellen 11 und 12 relativ ähnliche Werte $\Delta L_{Schall\ 03}$ für die Mikrofonpositionen 2 und 3 zu verzeichnen sind. Bei einer Aktualisierung der Schall 03 hinsichtlich der Wirkung einer SSW ist daher darauf zu achten, ob die Größe D_{BM} in ihrer jetzigen Form erhalten bleiben kann.

- ICE 2-Vorbeifahrten

Ein Vergleich der Zugarten ICE 1 und ICE 2 zeigt, daß die Differenzen $\Delta L_{Schall\ 03}$ bei gleicher Meßebene, gleicher Geschwindigkeit bzw. gleicher Mikrofonposition mehr oder weniger stark voneinander abweichen. Die meisten dieser Abweichungen lassen sich durch die zum Teil großen Vertrauensbereiche von etwa ±3 dB(A) für Meßebene A und etwa ±1,5 dB(A) für Meßebene C begründen; systematische Unterschiede zwischen den beiden Zugarten wurden bereits in Abschnitt 5.2 kommentiert.

- IC-, EC- und IR-Vorbeifahrten

Da hochliegende Schallquellen bei diesen Zugarten weniger ausgeprägt sind als beim ICE 1 oder ICE 2, müßte die Abweichung zwischen gemessenen und nach Schall 03 berechneten Werten nun geringer ausfallen. Dies tritt in Tabelle 10 auch tatsächlich ein; die Differenz $\Delta L_{Schall\ 03}$ beträgt jedoch für Mikrofon 2 der Meßebene C immerhin noch etwa 3 dB(A) gegenüber ca. 4 dB(A) beim ICE 1.

In diesem Zusammenhang sei darauf hingewiesen, daß die gemessenen Pegelverläufe an den Meßorten C und D praktisch parallel zueinander liegen, wie es z. B. die Bilder A65 und A73 zeigen. Dies bedeutet, daß alle wesentlichen Schallquellen an den vermessenen Zügen in gleicher Weise abgeschirmt werden. Folglich besitzen die eingesetzten Lokomotiven der Baureihen 111, 112 und 103 bei den vorliegenden Geschwindigkeiten keine relevanten hochliegenden Schallquellen, die für eine verminderte Wirkung der SSW verantwortlich sein könnten. Daher sind auch die erhöhten Pegel im Bereich der Lokomotive in diesen Bildern in erster Linie auf tiefliegende Schallquellen zurückzuführen, d. h. auf die klotzgebremsten Räder oder die Fahrmotoren. Ein Gegenbeispiel ist allerdings in Bild A33 dokumentiert, wo ausschließlich

im Bereich der Lokomotive eine verminderte Wirkung der SSW zu erkennen ist. Daraus folgt, daß die bei dieser Vorbeifahrt benutzte Lokomotive BR 120 bei ca. 190 km/h sehr wohl für die Schallemission relevante hochliegende Quellen besitzt.

Die Ursache für die allgemein verminderte Einfügungsdämpfung am Meßort C muß vornehmlich bei der SSW selbst gesucht werden. Die Tatsache, daß die SSW am Meßort C lediglich eine Ausdehnung von 105 m in Fahrtrichtung hatte [1], würde dann als Begründung ausreichen, wenn in der zweiten Hälfte der Zugvorbeifahrt eine erheblich schlechtere Wandwirkung erkennbar wäre als in der ersten Hälfte. Dies ist aber in den Bildern A65 und A73 nicht der Fall. Als Hinweis auf die tatsächliche Ursache wurde bereits in [1] angemerkt, daß die SSW durch Körperschallanregung selbst Schall abstrahlen könnte. Es ist aber auch denkbar, daß Reflexionen zwischen der relativ nahen SSW und der Fahrzeug-Außenwand zu den beobachteten erhöhten Pegeln führen. Gleichwohl erfüllt die SSW am Meßort C die Anforderungen an eine "hochabsorbierende" SSW. Eine endgültige Klärung dieser Fragen kann somit im Rahmen dieses Berichts nicht erfolgen.

- RE- und Güterzug-Vorbeifahrten

Bei Zügen, deren Schallemission fast ausschließlich vom Rollgeräusch dominiert wird, ist eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung zu erwarten. Im Falle des Mikrofons 2 trifft dies jedoch nur auf Güterzug-Vorbeifahrten am Meßort A zu, wo die gemessene Einfügungsdämpfung sogar deutlich über den nach Schall 03 berechneten Werten liegt und sich somit auf der "sicheren Seite" befindet. Bei Güterzug- und RE-Vorbeifahrten am Mikrofon 2 in Meßebene C wird die Wirkung der SSW durch die Schall 03 hingegen um 1,6 bis 1,7 dB(A) überschätzt. Die schon bei IC- EC- und IR-Zügen an diesem Meßort beobachtete verminderte Einfügungsdämpfung gilt somit in gleicher Weise auch für diese Zugarten.

6. Zusammenfassung

Sowohl im vorliegenden Bericht als auch in [1] liegen Ergebnisse aus Messungen an einer Schnellfahr- bzw. einer Ausbaustrecke der DB AG vor, aus denen hervorgeht, daß mit der Schall 03 in der Fassung von 1990 die Einfügungsdämpfung einer SSW

nicht immer exakt berechnet wird. Bei ICE-Vorbeifahrten mit ca. 200 km/h auf geschliffenen Schienen wird die Wirkung einer SSW nach Schall 03 um etwa 3 bis 4 dB(A) zu hoch berechnet, da die hochliegenden Schallquellen dieser Züge durch die SSW keine Abschirmung erfahren. Diese Überschätzung durch die Schall 03 erhöht sich wie schon in [1] mit zunehmender Geschwindigkeit nochmals um etwa 1 dB(A). Bei Zügen, bei denen tiefliegende Schallquellen im Gesamtgeräusch überwiegen, lagen die berechneten Werte nur bei einer der beiden untersuchten SSW, nämlich am Meßort A, auf der "sicheren Seite". Am Meßort C wurde hingegen für alle Zugarten eine verminderte Wirkung der SSW festgestellt. Eine eindeutige Erklärung hierfür konnte anhand der vorliegenden Daten nicht gefunden werden.

Es ist darauf hinzuweisen, daß in der vorliegenden Studie im Bereich aller Meßebenen ein guter Schienenzustand vorlag, der im Mittel einem Grundwert von etwa 48 dB(A) entspricht. Im Falle eines "durchschnittlichen" Schienenzustands mit einem Grundwert von 51 dB(A), wie er in der Schall 03 angesetzt wird, würde vor allem beim ICE 1 bzw. ICE 2 der Anteil des Rollgeräuschs steigen und somit die Bedeutung der hochliegenden Schallquellen für die Gesamtemission abnehmen. Die Abweichung zwischen Messung und Rechnung nach Schall 03 würde dann folglich niedriger ausfallen. Wenn jedoch in einer späteren Version der Schall 03 das sogenannte "besonders überwachte Gleis" eingeführt wird, welches dem hier untersuchten Schienenzustand weitgehend entspricht, sind die obigen Ergebnisse für diesen Fall als realistisch anzusehen.

Die Wirkung einer Schallschutzwand ist somit stark abhängig von Gleisgüte, Zugart und Zuggeschwindigkeit, so daß diese Parameter in geeigneter Weise in eine zukünftige Version der Schall 03 einfließen sollten. Eine genauere Formulierung dieser Abhängigkeiten kann erst anhand einer Parameterstudie erfolgen, wobei die Schallimmission bei einer Vorbeifahrt eines ICE unter Einbeziehung einer Schallschutzwand durch das Rechenmodell AD-PRO 2.0 nachzubilden ist. Diesbezüglich sei bereits hier auf die Ergebnisse des Arbeitspakets 3 dieses Forschungsvorhabens verwiesen.

7. Literatur

[1] M. Klemenz, M. W. Hansen und B. Barsikow
Abschirmwirkung von Schallschutzwänden bei Hochgeschwindigkeitszügen;

Bericht 1, Arbeitspaket 1, Meßserie 1: Einzelmikrofon-Messungen
bei ungeschliffenen Schienen.
Umweltbundesamt, F&E-Vorhaben 296 55 215, 1998

[2] H.-J. Seyfarth et al.
Messungen mit dem RM 1200 E für ICE 2 - schalltechnische Abnahme,
SFS-Gleis Hannover - Würzburg bei Northeim km 80,000 - 81,750.
DB AG, Forschungs- und Technologiezentrum, BT 4,
Bericht 51 460/1, 1997

[3] H.-J. Seyfarth et al.
Messungen mit dem RM 1200 E für ICE 2 - schalltechnische Abnahme,
SFS-Gleis Hannover - Würzburg bei Northeim km 82,650 - 83,500.
DB AG, Forschungs- und Technologiezentrum, BT 4,
Bericht 51 460/3, 1997

[4] H.-J. Seyfarth et al.
Messungen mit dem RM 1200 E, Bf Langenselbold,
ABS Gleis Hanau - Fulda, Messung nach dem Schienenschleifen.
DB AG, Forschungs- und Technologiezentrum, BT 4,
Bericht 50 760/2/1, 1997

[5] H.-J. Seyfarth et al.
Messungen mit dem RM 1200 E bei Niederrodenbach,
ABS Gleis Hanau - Fulda, Messung nach dem Schienenschleifen.
DB AG, Forschungs- und Technologiezentrum, BT 4,
Bericht 50 760/2/2, 1997

[6] B. Müller und B. Barsikow
Normierte Spektren der Schallemission von einzelnen Rädern des ICE.
Fortschritte der Akustik, DAGA 93, Frankfurt am Main, 573-576, 1993

[7] Information Akustik 03, Richtlinie zur Berechnung der Schallimmissionen
von Schienenwegen - Schall 03.
Deutsche Bundesbahn, Bundesbahn-Zentralamt München, Ausgabe 1990

Anhang zu Bericht 2

Inhaltsverzeichnis

- Auflistung aller ausgewerteten Zugvorbeifahrten bei geschliffenen Schienen

Tabelle A1: Meßort A bzw. B
Tabelle A2: Meßort C bzw. D

- Zusammenstellung von Bildern mit Pegelverläufen und Spektren von repräsentativen Zugvorbeifahrten

Tabelle A3: Parameterliste für die Bilder A1 bis A96

- Geschwindigkeiten, Zuglängen und Schalldruckpegel sowie Mittelwerte und Streuungen für eine ausgewählte Datenklasse (ICE 1-Vorbeifahrten mit ca. 280 km/h gemessen mit Mikrofon 2 bei geschliffenen Schienen)

Tabelle A4: Meßebene B, ohne SSW
Tabelle A5: Meßebene A, mit SSW

- Mittelwerte und Streuungen bei allen Zugvorbeifahrten jeweils einer Datenklasse

Tabelle A6: ICE 1-Vorbeifahrten an den Meßorten A und B mit ca. 200 km/h
Tabelle A7: ICE 1-Vorbeifahrten an den Meßorten A und B mit ca. 250 km/h
Tabelle A8: ICE 1-Vorbeifahrten an den Meßorten A und B mit ca. 280 km/h

Tabelle A9: ICE 1-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 200 km/h

Tabelle A10: ICE 2-Vorbeifahrten an den Meßorten A und B mit ca. 280 km/h
Tabelle A11: ICE 2-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 200 km/h

Tabelle A12: IC-Vorbeifahrt an den Meßorten A und B mit ca. 190 km/h

Tabelle A13: IC- und EC-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 170 km/h

Tabelle A14: IR-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 160 km/h

Tabelle A15: RE-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 140 km/h

Tabelle A16: Güterzug-Vorbeifahrten an den Meßorten A und B mit ca. 110 km/h

Tabelle A17: Güterzug-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 100 km/h

- Bilder mit Pegelverläufen und Spektren von repräsentativen Zugvorbeifahrten

Bild A1 bis Bild A96: Auflistung der Bilder siehe Tabelle A3

Fahrt Nr.	Datum	Zugart	υ_{OS} [1] [km/h]	υ_{MS} [2] [km/h]	*Tz-Nr/* Lok [3]	Wagenbauart und Reihung [4]	Absorber bekannt [5]	Beispiel Bilder
601	13.05.97	ICE 1	190,2	193,2	*164*	12 Mw	nein	-
602	13.05.97	ICE 1	277,6	278,2	*162*	12 Mw	ja	-
603	13.05.97	ICE 1	279,1	279,3	*173*	12 Mw	nein	A17 - A24
604	13.05.97	ICE 1	251,2	252,4	*160*	12 Mw	nein	-
605	13.05.97	ICE 1	277,5	278,2	*110*	12 Mw	nein	-
606	13.05.97	ICE 1	250,9	252,0	*159*	12 Mw	nein	-
607	13.05.97	ICE 1	197,6	198,7	*179*	11 Mw	nein	-
608	13.05.97	ICE 1	245,5	249,8	*156*	12 Mw	ja	-
610	13.05.97	ICE 1	198,2	196,3	*118*	12 Mw	nein	-
611	13.05.97	ICE 1	200,6	202,5	*180*	12 Mw	ja	A1 - A8
612	13.05.97	ICE 1	258,7	259,6	*111*	12 Mw	nein	-
613	13.05.97	ICE 1	196,7	199,4	-	12 Mw	nein	-
616	13.05.97	ICE 1	246,9	247,0	*165*	12 Mw	nein	-
618	13.05.97	ICE 1	199,2	200,6	*115*	12 Mw	ja	-
619	13.05.97	ICE 1	268,7	268,2	*169*	12 Mw	ja	-
620	13.05.97	ICE 1	278,3	279,1	*114*	12 Mw	ja	-
621	13.05.97	ICE 1	199,6	200,9	*186*	10 Mw	ja	-
622	13.05.97	ICE 1	260,1	260,0	*151*	12 Mw	ja	A9 - A16
623	13.05.97	ICE 1	245,3	246,6	*161*	12 Mw	ja	-
624	13.05.97	ICE 1	226,9	232,4	*109*	12 Mw	ja	-
625	13.05.97	ICE 1	278,9	279,6	-	12 Mw	nein	-
626	13.05.97	ICE 1	258,6	253,2	-	12 Mw	nein	-
627	13.05.97	ICE 1	278,8	279,4	*112*	12 Mw	nein	-
701	14.05.97	ICE 1	278,8	279,9	*101*	10 Mw	ja	-
702	14.05.97	ICE 1	278,3	278,9	*154*	12 Mw	nein	-
703	14.05.97	ICE 1	271,0	269,7	*155*	12 Mw	ja	-
704	14.05.97	ICE 1	241,7	243,2	*174*	12 Mw	nein	-
705	14.05.97	ICE 1	199,9	199,7	*182*	12 Mw	nein	-
707	14.05.97	ICE 1	206,5	211,8	*171*	12 Mw	ja	-
709	14.05.97	ICE 1	246,0	247,0	*181*	12 Mw	ja	-
711	14.05.97	ICE 1	256,9	258,9	*166*	12 Mw	nein	-
712	14.05.97	ICE 1	200,6	203,8	*162*	12 Mw	ja	-
713	14.05.97	ICE 1	272,3	271,2	*179*	11 Mw	nein	-
714	14.05.97	ICE 1	271,9	278,0	*168*	12 Mw	ja	-
715	14.05.97	ICE 1	202,0	204,4	*107*	12 Mw	nein	-
716	14.05.97	ICE 1	195,0	196,2	*189*	12 Mw	ja	-
718	14.05.97	ICE 1	274,5	278,1	*105*	12 Mw	nein	-
719	14.05.97	ICE 1	244,5	248,0	*117*	12 Mw	ja	-

609	13.05.97	ICE 2	269,5	276,2	-	9 Mw	-	-
615	13.05.97	ICE 2	279,1	280,2	-	9 Mw	-	A25 - A32
710	14.05.97	ICE 2	279,5	280,3	-	9 Mw	-	-
717	14.05.97	ICE 2	279,1	280,0	-	9 Mw	-	-
706	14.05.97	IC	190,2	193,2	120	13 Wagen	-	A33 - A40
501	12.05.97	G	118,0	108,0	151	Sg	-	-
502	12.05.97	G	118,3	115,2	120	Sg	-	-
503	12.05.97	G	116,1	119,5	151	Ha, Sg, Hbi	-	A41 - A48
504	12.05.97	G	113,7	119,8	151	Sg, Ha	-	-
505	12.05.97	G	115,3	117,6	151	Ha, Sg	-	-
506	12.05.97	G	116,4	117,2	120	Sg, Ha, Hbi	-	-
507	12.05.97	G	112,7	113,4	151	Sg, Ha, Hbi	-	-
508	12.05.97	G	117,3	117,4	151	Sg	-	-
509	13.05.97	G	106,2	105,2	151	Sg	-	-
510	13.05.97	G	118,4	119,4	120	Sg	-	-
511	13.05.97	G	112,5	111,1	151	Sg, Hbi	-	-
512	13.05.97	G	113,5	115,0	151	Sg	-	-
513	13.05.97	G	94,9	92,7	151	Sg, Hbi	-	-
514	13.05.97	G	104,4	96,3	151	Sg, Hbi	-	-
515	13.05.97	G	119,1	121,5	151	Sg	-	-
516	13.05.97	G	117,8	123,5	151	Sg	-	-
517	13.05.97	G	92,4	96,2	151	Sg	-	-
519	13.05.97	G	121,1	121,1	151	Sg	-	-
520	13.05.97	G	101,8	100,5	140	Sg	-	-
521	13.05.97	G	121,7	120,6	151	Sg	-	-
522	13.05.97	G	119,0	121,8	151	Sg	-	-
523	13.05.97	G	117,1	117,5	120	Sg	-	-
524	13.05.97	G	118,5	117,9	120	Sg	-	-

[1] Geschwindigkeitsangabe bezieht sich auf den Meßort ohne Schallschutzwand (OS)

[2] Geschwindigkeitsangabe bezieht sich auf den Meßort mit Schallschutzwand (MS)

[3] Lokomotiv-Baureihe; im Falle des ICE 1 (BR 401) Angabe der Tz-Nr. (kursiv)

[4] Mw = Mittelwagen des ICE 1 bzw. des ICE 2

[5] Angabe der Rad/Absorber-Konfiguration der betreffenden ICE 1

Tabelle A1 Auflistung aller ausgewerteten Zugvorbeifahrten am Meßort A bzw. B bei geschliffenen Schienen

Fahrt Nr.	Datum	Zugart	υ_{OS} [1] [km/h]	υ_{MS} [2] [km/h]	*Tz-Nr/* Lok [3]	Wagenbauart und Reihung [4]	Absorber bekannt [5]	Beispiel Bilder
803	29.10.97	ICE 1	199,2	186,4	-	11 Mw	nein	
807	29.10.97	ICE 1	199,4	185,6	-	11 Mw	nein	
902	30.10.97	ICE 1	194,9	194,9	-	12 Mw	nein	
903	30.10.97	ICE 1	199,8	196,4	-	12 Mw	nein	
907	30.10.97	ICE 1	199,3	197,9	-	12 Mw	nein	
909	30.10.97	ICE 1	189,2	186,3	-	12 Mw	nein	
912	30.10.97	ICE 1	198,8	182,3	-	12 Mw	nein	
915	30.10.97	ICE 1	196,9	196,7	-	11 Mw	nein	
916	30.10.97	ICE 1	199,1	197,8	-	12 Mw	nein	
917	30.10.97	ICE 1	199,1	197,4	-	12 Mw	nein	
919	30.10.97	ICE 1	199,5	198,5	-	11 Mw	nein	
921	30.10.97	ICE 1	196,5	197,3	-	12 Mw	nein	
923	30.10.97	ICE 1	199,8	197,7	-	12 Mw	nein	A49 - A56
925	30.10.97	ICE 1	199,9	197,6	-	12 Mw	nein	
802	29.10.97	ICE 2	199,6	198,9	-	9 Mw	-	A57 - A64
808	29.10.97	ICE 2	199,5	199,4	-	9 Mw	-	
926	30.10.97	ICE 2	187,4	193,5	-	9 Mw	-	
953	31.10.97	ICE 2	192,3	198,3	-	9 Mw	-	
958	31.10.97	ICE 2	190,7	184,6	-	9 Mw	-	
806	29.10.97	IC, EC	156,2	148,6	111	9 Wagen	-	
908	30.10.97	IC, EC	180,9	176,5	103	9 Wagen	-	
922	30.10.97	IC, EC	163,5	156,1	111	10 Wagen	-	
928	30.10.97	IC, EC	162,8	181,2	103	8 Wagen	-	
955	31.10.97	IC, EC	191,8	180,9	103	11 Wagen	-	A65 - A72
959	31.10.97	IC, EC	156,1	176,0	103	5 Wagen	-	
801	29.10.97	IR	163,6	162,7	112	8 Wagen	-	
910	30.10.97	IR	147,9	147,5	112	7 Wagen	-	
918	30.10.97	IR	162,3	161,7	112	8 Wagen	-	
931	30.10.97	IR	154,8	150,3	112	8 Wagen	-	
952	31.10.97	IR	159,3	158,9	112	8 Wagen	-	
957	31.10.97	IR	155,1	155,0	112	10 Wagen	-	A73 - A80
960	31.10.97	IR	152,6	151,5	112	10 Wagen	-	
804	29.10.97	RE	135,8	135,2	110	9 Wagen	-	
809	29.10.97	RE	141,3	141,6	112	10 Wagen	-	
924	30.10.97	RE	138,8	136,2	111	9 Wagen	-	
927	30.10.97	RE	135,4	136,3	110	10 Wagen	-	A81 - A88
914	30.10.97	G	87,3	85,8	140	R, Fc	-	
920	30.10.97	G	99,6	99,2	151	gemischt	-	
932	30.10.97	G	101,2	98,0	140	Sg	-	
933	30.10.97	G	92,6	92,4	155	Sg	-	

934	30.10.97	G	121,8	119,9	151	Sg	-	
936	30.10.97	G	102,6	99,7	151	Sg	-	
937	30.10.97	G	95,4	90,5	150	Sg, Z	-	
938	30.10.97	G	104,3	97,8	151	Sg, Hbi	-	A89 - A96
951	31.10.97	G	94,9	98,1	140	Hbi	-	
956	31.10.97	G	90,3	90,4	150	Hbi, Fc	-	

[1] Geschwindigkeitsangabe bezieht sich auf den Meßort ohne Schallschutzwand (OS)

[2] Geschwindigkeitsangabe bezieht sich auf den Meßort mit Schallschutzwand (MS)

[3] Lokomotiv-Baureihe; im Falle des ICE 1 (BR 401) Angabe der Tz-Nr. (kursiv)

[4] Mw = Mittelwagen des ICE 1 bzw. des ICE 2

[5] Angabe der Rad/Absorber-Konfiguration der betreffenden ICE 1

Tabelle A2 Auflistung aller ausgewerteten Zugvorbeifahrten am Meßort C bzw. D bei geschliffenen Schienen

Fahrt Nr.	Zugart	υ [1] [km/h]	Meßort	L_h [2] [dB(A)]	L_v [2] [dB(A)]	Bilder
611	ICE 1	201,6	A/B	61,7	88,9	A1 - A8
622	ICE 1	260,0	A/B	60,0	88,0	A9 - A16
603	ICE 1	279,3	A/B	62,0	90,5	A17 - A24
615	ICE 2	280,2	A/B	63,3	92,8	A25 - A32
706	IC	191,7	A/B	63,0	90,0	A33 - A40
503	G	117,8	A/B	67,0	91,0	A41 - A48
923	ICE 1	198,7	C/D	56,7	83,6	A49 - A56
802	ICE 2	199,3	C/D	55,2	83,0	A57 - A64
955	IC, EC	186,4	C/D	58,2	85,2	A65 - A72
957	IR	155,0	C/D	58,1	84,7	A73 - A80
927	RE	135,9	C/D	64,4	90,9	A81 - A88
938	G	101,1	C/D	62,9	85,8	A89 - A96

[1] Mittelwert aus den Vorbeifahrgeschwindigkeiten in den Meßebenen OS und MS

[2] Schalldruckpegel von Mikrofon 4 am Meßort ohne SSW

Tabelle A3 Zusammenstellung von Bildern mit Pegelverläufen und Spektren von repräsentativen Zugvorbeifahrten

SSW	Fahrt	v [km/h]	l [m]	Mikro	L_h [dB(A)]	L_e [dB(A)]	L_v [dB(A)]	L_{Max} [dB(A)]	$L_{m,s}$ [dB(A)]
OS	602	277,6	357,9	2	61,77	88,58	90,23	94,98	49,36
OS	603	279,1	357,9	2	61,21	87,73	89,63	92,27	48,76
OS	605	277,5	357,9	2	61,44	87,49	89,80	92,48	49,04
OS	614	279,0	331,5	2	60,60	87,11	89,18	91,90	48,48
OS	619	268,7	357,9	2	59,92	85,89	87,94	91,09	47,80
OS	620	278,3	357,9	2	61,20	87,38	89,49	92,28	48,77
OS	625	278,9	357,9	2	61,00	87,07	89,31	92,03	48,55
OS	627	278,8	357,9	2	61,60	88,21	89,97	92,25	49,16
OS	701	278,8	305,1	2	60,69	87,45	89,72	92,27	48,94
OS	702	278,3	357,9	2	60,79	86,90	89,03	91,17	48,36
OS	703	271,0	357,9	2	60,24	86,69	88,36	92,34	48,04
OS	713	272,3	331,5	2	61,91	89,03	90,51	93,61	50,00
OS	714	271,9	357,9	2	60,42	87,15	88,50	91,19	48,19
OS	718	274,5	357,9	2	62,21	88,97	90,46	93,31	49,90
OS	*M*	276,0	350,4	2	61,12	87,63	89,50	92,50	48,86
OS	*s*	3,6	16,1	2	0,67	0,89	0,78	1,04	0,65

Tabelle A4 Geschwindigkeiten, Zuglängen und Schalldruckpegel sowie Mittelwerte und Streuungen für alle ICE 1-Vorbeifahrten mit ca. 280 km/h gemessen mit Mikrofon 2 in Meßebene B bei geschliffenen Schienen

SSW	Fahrt	v [km/h]	l [m]	Mikro	L_h [dB(A)]	L_e [dB(A)]	L_v [dB(A)]	L_{Max} [dB(A)]	$L_{m,s}$ [dB(A)]
MS	602	278,2	357,9	2	53,74	79,78	80,74	87,27	41,31
MS	603	279,3	357,9	2	53,91	80,29	80,90	87,80	41,45
MS	605	278,2	357,9	2	53,35	79,52	80,62	86,87	40,92
MS	614	279,7	331,5	2	53,71	80,07	81,13	88,06	41,57
MS	619	268,2	357,9	2	53,00	78,57	79,81	86,73	40,89
MS	620	279,1	357,9	2	53,79	79,67	80,95	87,83	41,34
MS	625	279,6	357,9	2	53,95	79,80	81,03	87,51	41,48
MS	627	279,4	357,9	2	54,21	80,33	81,32	87,81	41,75
MS	701	279,9	305,1	2	53,63	79,63	81,36	86,89	41,85
MS	702	278,9	357,9	2	53,80	79,93	80,86	87,99	41,35
MS	703	269,7	357,9	2	52,82	78,78	79,70	87,04	40,66
MS	713	271,2	331,5	2	53,84	80,75	81,28	89,40	41,97
MS	714	278,0	357,9	2	54,28	80,79	81,25	87,73	41,86
MS	718	278,1	357,9	2	54,60	81,06	81,57	87,92	42,18
MS	*M*	277,0	350,4	2	53,78	79,98	80,92	87,68	41,49
MS	*s*	4,0	16,1	2	0,47	0,71	0,55	0,68	0,44

Tabelle A5 Geschwindigkeiten, Zuglängen und Schalldruckpegel sowie Mittelwerte und Streuungen für alle ICE 1-Vorbeifahrten mit ca. 280 km/h gemessen mit Mikrofon 2 in Meßebene A bei geschliffenen Schienen

SSW (Ebene)		υ [km/h]	l [m]	Mikro	L_h [dB(A)]	L_e [dB(A)]	L_v [dB(A)]	L_{Max} [dB(A)]	$L_{m,s}$ [dB(A)]
OS	*M*	199,9	351,3	1	66,25	92,62	93,59	98,29	56,77
MS	*M*	202,0	351,3	1	50,38	76,87	77,43	86,92	40,82
OS	*s*	3,0	16,4	1	0,64	0,83	0,66	1,02	0,53
MS	*s*	4,8	16,4	1	0,69	0,73	0,74	1,11	0,63
OS	*M*	199,9	351,3	2	60,30	85,94	87,45	91,50	50,81
MS	*M*	202,0	351,3	2	48,74	73,42	74,82	81,29	39,18
OS	*s*	3,0	16,4	2	0,75	0,95	0,81	1,01	0,62
MS	*s*	4,8	16,4	2	0,59	0,74	0,68	1,10	0,56
OS	*M*	199,9	351,3	3	57,02	81,81	83,87	87,29	47,52
MS	*M*	202,0	351,3	3	45,54	69,44	71,09	76,25	35,98
OS	*s*	3,0	16,4	3	0,96	1,20	0,98	1,33	0,77
MS	*s*	4,8	16,4	3	0,69	0,71	0,65	1,11	0,68
B	*M*	199,9	351,3	4	62,21	88,36	89,47	94,04	52,71
A	*M*	202,0	351,3	4	56,38	81,62	83,39	86,74	46,78
B	*s*	3,0	16,4	4	0,99	1,26	1,04	1,18	0,84
A	*s*	4,8	16,4	4	0,85	1,04	0,96	0,96	0,63

Tabelle A6 Mittelwerte und Streuungen bei allen ICE 1-Vorbeifahrten an den Meßorten A und B mit ca. 200 km/h, $N = 12$

SSW (Ebene)		υ [km/h]	l [m]	Mikro	L_h [dB(A)]	L_e [dB(A)]	L_v [dB(A)]	L_{Max} [dB(A)]	$L_{m,s}$ [dB(A)]
OS	*M*	250,5	357,9	1	65,88	93,06	94,07	98,60	54,37
MS	*M*	251,5	357,9	1	53,85	81,24	81,71	91,72	42,29
OS	*s*	6,5	0,0	1	0,38	0,47	0,42	0,79	0,42
MS	*s*	5,6	0,0	1	0,83	0,84	0,83	1,34	0,72
OS	*M*	250,5	357,9	2	59,81	85,69	87,69	90,58	48,30
MS	*M*	251,5	357,9	2	51,67	77,19	78,41	84,86	40,12
OS	*s*	6,5	0,0	2	0,27	0,43	0,35	0,58	0,28
MS	*s*	5,6	0,0	2	0,65	0,74	0,64	0,79	0,58
OS	*M*	250,5	357,9	3	56,51	81,69	84,07	86,44	44,99
MS	*M*	251,5	357,9	3	48,28	73,07	74,53	79,39	36,73
OS	*s*	6,5	0,0	3	0,35	0,49	0,39	0,70	0,31
MS	*s*	5,6	0,0	3	0,63	0,68	0,59	0,91	0,59
B	*M*	250,5	357,9	4	60,03	86,34	87,95	91,63	48,50
A	*M*	251,5	357,9	4	57,79	83,68	85,56	89,04	46,24
B	*s*	6,5	0,0	4	0,65	0,87	0,75	1,51	0,53
A	*s*	5,6	0,0	4	0,57	0,82	0,66	1,13	0,56

Tabelle A7 Mittelwerte und Streuungen bei allen ICE 1-Vorbeifahrten an den Meßorten A und B mit ca. 250 km/h, $N = 12$

SSW (Ebene)		υ [km/h]	l [m]	Mikro	L_h [dB(A)]	L_e [dB(A)]	L_v [dB(A)]	L_{Max} [dB(A)]	$L_{m,s}$ [dB(A)]
OS	*M*	276,0	350,4	1	67,17	94,90	95,88	100,56	54,91
MS	*M*	277,0	350,4	1	56,13	84,04	84,51	94,70	43,84
OS	*s*	3,6	16,1	1	0,71	0,83	0,76	1,15	0,68
MS	*s*	4,0	16,1	1	0,54	0,55	0,59	1,01	0,54
OS	*M*	276,0	350,4	2	61,12	87,63	89,50	92,50	48,86
MS	*M*	277,0	350,4	2	53,78	79,98	80,92	87,68	41,49
OS	*s*	3,6	16,1	2	0,67	0,89	0,78	1,04	0,65
MS	*s*	4,0	16,1	2	0,47	0,71	0,55	0,68	0,44
OS	*M*	275,8	353,9	3	57,75	83,39	85,77	87,93	45,46
MS	*M*	276,7	353,9	3	50,39	75,72	77,03	82,41	38,06
OS	*s*	3,7	9,9	3	0,68	0,98	0,80	0,95	0,68
MS	*s*	4,1	9,9	3	0,42	0,68	0,47	1,10	0,34
B	*M*	276,0	350,4	4	61,51	88,36	89,90	93,43	49,24
A	*M*	277,0	350,4	4	59,03	85,43	87,19	90,81	46,74
B	*s*	3,6	16,1	4	0,46	0,46	0,47	1,15	0,33
A	*s*	4,0	16,1	4	0,52	0,66	0,63	0,88	0,51

Tabelle A8 Mittelwerte und Streuungen bei allen ICE 1-Vorbeifahrten an den Meßorten A und B mit ca. 280 km/h, $N = 14$ (Mikrofon 3: $N = 13$)

SSW (Ebene)		υ [km/h]	l [m]	Mikro	L_h [dB(A)]	L_e [dB(A)]	L_v [dB(A)]	L_{Max} [dB(A)]	$L_{m,s}$ [dB(A)]
OS	*M*	198,0	350,4	1	61,58	88,10	88,87	93,91	52,21
MS	*M*	193,8	350,4	1	51,82	78,20	78,60	86,73	42,61
OS	*s*	2,9	12,4	1	0,51	0,58	0,50	1,60	0,48
MS	*s*	5,8	12,4	1	0,74	0,94	0,83	1,06	0,50
OS	*M*	197,8	349,8	2	56,03	80,93	82,92	86,10	46,66
MS	*M*	193,5	349,8	2	48,80	73,86	74,77	79,84	39,62
OS	*s*	3,0	12,7	2	0,59	0,41	0,53	1,19	0,53
MS	*s*	5,9	12,7	2	0,49	0,60	0,54	0,63	0,31
OS	*M*	198,0	351,3	3	53,71	78,48	80,08	83,58	44,31
MS	*M*	194,5	351,3	3	46,46	71,44	71,99	75,62	37,17
OS	*s*	3,1	11,9	3	1,10	0,84	0,92	2,33	1,04
MS	*s*	5,1	11,9	3	1,20	0,87	1,16	1,42	0,90
D	*M*	198,0	350,4	4	57,01	81,93	83,93	86,73	47,63
C	*M*	193,8	350,4	4	57,69	82,92	84,59	87,23	48,47
D	*s*	2,9	12,4	4	0,92	0,79	0,83	1,15	0,87
C	*s*	5,8	12,4	4	0,97	0,98	0,96	1,23	0,79

Tabelle A9 Mittelwerte und Streuungen bei allen ICE 1-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 200 km/h, $N = 14$ (Mikrofon 2: $N = 13$; Mikrofon 3: $N = 12$)

SSW (Ebene)		v [km/h]	l [m]	Mikro	L_h [dB(A)]	L_e [dB(A)]	L_v [dB(A)]	L_{Max} [dB(A)]	$L_{m,s}$ [dB(A)]
OS	*M*	276,8	278,7	1	67,83	96,09	97,49	100,91	56,57
MS	*M*	279,2	278,7	1	56,23	85,01	85,63	95,46	44,85
OS	*s*	4,9	0,0	1	1,33	1,23	1,33	0,78	1,46
MS	*s*	2,0	0,0	1	0,89	0,89	0,89	1,70	0,83
OS	*M*	276,8	278,7	2	61,70	88,91	91,01	92,92	50,44
MS	*M*	279,2	278,7	2	53,75	80,47	81,90	87,26	42,37
OS	*s*	4,9	0,0	2	1,11	1,07	1,25	0,93	1,25
MS	*s*	2,0	0,0	2	0,60	0,86	0,51	1,04	0,54
OS	*M*	276,8	278,7	3	58,26	84,42	87,19	88,99	47,00
MS	*M*	279,2	278,7	3	50,31	76,06	77,92	82,37	38,94
OS	*s*	4,9	0,0	3	1,02	0,98	1,17	0,87	1,16
MS	*s*	2,0	0,0	3	0,49	0,44	0,40	1,29	0,43
B	*M*	276,8	278,7	4	63,20	90,69	92,67	94,32	51,93
A	*M*	279,2	278,7	4	62,26	89,55	91,67	93,76	50,90
B	*s*	4,9	0,0	4	2,09	2,12	2,24	1,73	2,18
A	*s*	2,0	0,0	4	2,29	2,53	2,64	1,90	2,32

Tabelle A10 Mittelwerte und Streuungen bei allen ICE 2-Vorbeifahrten an den Meßorten A und B mit ca. 280 km/h, $N = 4$

SSW (Ebene)		v [km/h]	l [m]	Mikro	L_h [dB(A)]	L_e [dB(A)]	L_v [dB(A)]	L_{Max} [dB(A)]	$L_{m,s}$ [dB(A)]
OS	*M*	193,9	278,7	1	61,11	88,23	89,24	93,56	52,95
MS	*M*	194,9	278,7	1	51,17	78,06	78,85	86,14	42,91
OS	*s*	5,5	0,0	1	1,29	1,36	1,32	1,02	1,42
MS	*s*	6,2	0,0	1	0,39	0,48	0,40	0,77	0,16
OS	*M*	193,9	278,7	2	55,26	80,64	82,92	86,05	47,08
MS	*M*	194,9	278,7	2	48,95	74,37	75,41	79,59	40,69
OS	*s*	5,5	0,0	2	1,15	1,19	1,21	1,01	1,26
MS	*s*	6,2	0,0	2	0,64	0,58	0,47	0,53	0,53
OS	*M*	193,9	278,7	3	53,00	78,47	79,92	82,02	44,82
MS	*M*	194,9	278,7	3	45,21	70,67	71,18	74,44	36,97
OS	*s*	5,5	0,0	3	1,38	1,36	1,20	1,20	1,42
MS	*s*	6,2	0,0	3	0,87	0,97	0,95	1,14	0,91
D	*M*	193,9	278,7	4	55,59	81,12	83,27	85,63	47,41
C	*M*	194,9	278,7	4	56,89	82,66	84,64	86,97	48,70
D	*s*	5,5	0,0	4	0,47	0,58	0,45	0,58	0,67
C	*s*	6,2	0,0	4	0,83	0,89	0,75	0,81	1,11

Tabelle A11 Mittelwerte und Streuungen bei allen ICE 2-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 200 km/h, $N = 5$

SSW (Ebene)		υ [km/h]	l [m]	Mikro	L_h [dB(A)]	L_e [dB(A)]	L_v [dB(A)]	L_{Max} [dB(A)]	$L_{m,s}$ [dB(A)]
OS	*M*	190,2	357,9	1	67,48	94,14	94,55	100,80	53,36
MS	*M*	193,2	357,9	1	51,06	77,62	77,46	88,48	36,80
OS	*M*	190,2	357,9	2	61,26	87,01	88,08	92,47	47,14
MS	*M*	193,2	357,9	2	50,18	75,92	75,01	85,54	35,92
OS	*M*	190,2	357,9	3	58,33	83,22	84,98	89,26	44,21
MS	*M*	193,2	357,9	3	46,76	71,29	70,98	79,92	32,50
B	*M*	190,2	357,9	4	62,99	89,10	89,98	95,68	48,87
A	*M*	193,2	357,9	4	58,16	83,39	84,77	88,63	43,90

Tabelle A12 Mittelwerte bei einer IC-Vorbeifahrt an den Meßorten A und B mit ca. 190 km/h, $N = 1$

SSW (Ebene)		υ [km/h]	l [m]	Mikro	L_h [dB(A)]	L_e [dB(A)]	L_v [dB(A)]	L_{Max} [dB(A)]	$L_{m,s}$ [dB(A)]
OS	*M*	168,6	249,1	1	63,41	90,74	91,50	98,24	52,35
MS	*M*	169,9	249,1	1	52,00	79,01	79,69	86,62	40,68
OS	*s*	14,6	54,0	1	0,55	1,14	1,24	1,90	1,81
MS	*s*	14,0	54,0	1	1,61	2,78	2,52	2,54	1,83
OS	*M*	168,6	249,1	2	57,64	83,70	85,27	90,09	46,57
MS	*M*	169,9	249,1	2	51,05	76,58	78,52	82,89	39,73
OS	*s*	14,6	54,0	2	0,76	1,29	1,28	1,28	1,81
MS	*s*	14,0	54,0	2	1,97	2,53	2,81	3,37	2,14
OS	*M*	168,6	249,1	3	55,15	80,13	82,20	85,55	44,07
MS	*M*	169,9	249,1	3	47,78	73,12	74,43	77,69	36,33
OS	*s*	14,6	54,0	3	1,08	1,20	1,24	1,44	1,96
MS	*s*	14,0	54,0	3	2,16	2,51	2,76	2,85	2,06
D	*M*	168,6	249,1	4	57,69	83,64	85,20	89,90	46,58
C	*M*	169,9	249,1	4	59,45	85,67	87,18	91,32	48,09
D	*s*	14,6	54,0	4	0,62	1,27	1,05	1,68	1,68
C	*s*	14,0	54,0	4	1,36	2,14	2,09	2,53	1,54

Tabelle A13 Mittelwerte und Streuungen bei allen IC- und EC-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 170 km/h, $N = 6$

SSW (Ebene)		υ [km/h]	l [m]	Mikro	L_h [dB(A)]	L_e [dB(A)]	L_v [dB(A)]	L_{Max} [dB(A)]	$L_{m,s}$ [dB(A)]
OS	*M*	156,5	240,4	1	64,12	91,21	91,85	98,99	53,45
MS	*M*	155,4	240,4	1	51,26	77,64	78,28	84,81	40,67
OS	*s*	5,6	29,9	1	0,55	0,69	0,56	2,16	0,59
MS	*s*	5,9	29,9	1	0,65	1,04	0,93	1,12	0,76
OS	*M*	157,2	233,5	2	58,00	83,60	85,30	89,90	47,44
MS	*M*	156,0	233,5	2	50,41	75,39	77,41	81,32	39,87
OS	*s*	5,8	26,0	2	0,71	1,09	0,70	1,77	0,86
MS	*s*	6,2	26,0	2	0,81	0,99	1,03	1,36	0,64
OS	*M*	156,5	240,4	3	56,00	80,91	82,59	86,74	45,29
MS	*M*	155,4	240,4	3	46,89	71,78	73,38	76,09	36,36
OS	*s*	5,6	29,9	3	1,29	1,25	1,13	2,23	1,12
MS	*s*	5,9	29,9	3	0,94	1,03	1,37	1,32	1,34
D	*M*	156,5	240,4	4	58,68	84,34	85,90	90,36	48,05
C	*M*	155,4	240,4	4	59,25	85,05	86,64	90,20	48,63
D	*s*	5,6	29,9	4	0,82	1,08	0,91	1,42	0,99
C	*s*	5,9	29,9	4	0,57	0,82	0,76	1,44	0,46

Tabelle A14 Mittelwerte und Streuungen bei allen IR-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 160 km/h, $N = 7$ (Mikrofon 2: $N = 6$)

SSW (Ebene)		υ [km/h]	l [m]	Mikro	L_h [dB(A)]	L_e [dB(A)]	L_v [dB(A)]	L_{Max} [dB(A)]	$L_{m,s}$ [dB(A)]
OS	*M*	137,8	268,6	1	70,04	96,51	97,03	101,44	53,99
MS	*M*	137,3	268,6	1	55,45	80,96	82,25	84,96	39,39
OS	*s*	2,8	15,2	1	0,48	0,55	0,60	0,84	0,75
MS	*s*	2,9	15,2	1	0,63	0,60	0,45	0,29	0,46
OS	*M*	137,8	268,6	2	64,01	89,42	90,80	94,03	47,97
MS	*M*	137,3	268,6	2	55,41	80,28	82,12	84,69	39,33
OS	*s*	2,8	15,2	2	0,69	0,39	0,69	0,87	0,91
MS	*s*	2,9	15,2	2	0,93	0,56	0,79	0,55	0,62
OS	*M*	137,8	268,6	3	61,15	85,52	87,56	90,28	45,11
MS	*M*	137,3	268,6	3	52,16	76,54	78,58	81,44	36,12
OS	*s*	2,8	15,2	3	0,81	0,65	0,80	0,52	1,00
MS	*s*	2,9	15,2	3	1,69	0,77	1,60	1,54	1,66
D	*M*	137,8	268,6	4	64,33	89,52	91,04	93,71	48,27
C	*M*	137,3	268,6	4	65,19	90,62	91,95	94,96	49,19
D	*s*	2,8	15,2	4	0,63	0,40	0,57	0,70	0,73
C	*s*	2,9	15,2	4	0,69	0,48	0,62	0,45	0,93

Tabelle A15 Mittelwerte und Streuungen bei allen RE-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 140 km/h, $N = 4$

SSW (Ebene)		υ [km/h]	l [m]	Mikro	L_h [dB(A)]	L_e [dB(A)]	L_v [dB(A)]	L_{Max} [dB(A)]	$L_{m,s}$ [dB(A)]
OS	*M*	113,0	444,9	1	73,45	96,67	97,26	101,94	56,74
MS	*M*	113,5	444,9	1	54,86	76,61	78,22	82,41	38,14
OS	*s*	7,9	152,1	1	3,11	2,32	2,09	1,96	1,57
MS	*s*	9,2	152,1	1	2,61	1,49	1,36	1,49	1,12
OS	*M*	113,0	444,9	2	67,16	89,59	90,79	94,40	50,44
MS	*M*	113,5	444,9	2	53,51	74,67	76,58	79,90	36,82
OS	*s*	7,9	152,1	2	3,08	2,25	2,14	1,97	1,51
MS	*s*	9,2	152,1	2	2,69	1,62	1,57	1,58	1,44
OS	*M*	113,0	444,9	3	63,52	85,21	86,93	89,90	46,82
MS	*M*	113,5	444,9	3	50,05	70,98	72,75	75,52	33,46
OS	*s*	7,9	152,1	3	2,96	2,23	2,19	1,99	1,42
MS	*s*	9,2	152,1	3	2,60	1,64	1,50	1,51	1,59
B	*M*	113,0	444,9	4	67,19	89,61	90,70	94,31	50,44
A	*M*	113,5	444,9	4	65,61	88,09	89,08	93,29	48,82
B	*s*	7,9	152,1	4	3,18	2,31	2,15	2,06	1,63
A	*s*	9,2	152,1	4	2,96	2,09	1,89	1,96	1,48

Tabelle A16 Mittelwerte und Streuungen bei allen Güterzug-Vorbeifahrten an den Meßorten A und B mit ca. 110 km/h, $N = 23$

SSW (Ebene)		υ [km/h]	l [m]	Mikro	L_h [dB(A)]	L_e [dB(A)]	L_v [dB(A)]	L_{Max} [dB(A)]	$L_{m,s}$ [dB(A)]
OS	*M*	99,0	474,8	1	69,31	91,91	92,34	97,26	53,55
MS	*M*	97,2	474,7	1	56,06	78,34	78,98	83,76	40,49
OS	*s*	9,7	127,2	1	2,10	1,66	1,56	2,21	1,30
MS	*s*	9,3	127,3	1	2,09	1,82	1,59	2,09	1,44
OS	*M*	99,0	474,8	2	63,35	85,04	86,18	89,66	47,59
MS	*M*	97,2	474,7	2	54,65	76,07	77,40	81,01	39,05
OS	*s*	9,7	127,2	2	2,19	1,65	1,52	1,75	1,46
MS	*s*	9,3	127,3	2	2,23	1,85	1,63	1,57	1,58
OS	*M*	99,5	486,7	3	60,83	82,11	83,39	86,33	45,02
MS	*M*	97,1	486,6	3	52,26	73,41	74,80	78,15	36,61
OS	*s*	10,2	128,9	3	1,96	1,48	1,37	1,68	1,45
MS	*s*	9,8	128,9	3	2,12	1,73	1,64	1,69	1,46
D	*M*	99,0	474,8	4	62,86	84,53	85,67	88,74	47,11
C	*M*	97,2	474,7	4	63,64	85,51	86,48	90,36	48,03
D	*s*	9,7	127,2	4	2,12	1,62	1,52	1,66	1,39
C	*s*	9,3	127,3	4	2,23	1,83	1,76	2,14	1,48

Tabelle A17 Mittelwerte und Streuungen bei allen Güterzug-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 100 km/h, $N = 10$ (Mikrofon 3: $N = 9$)

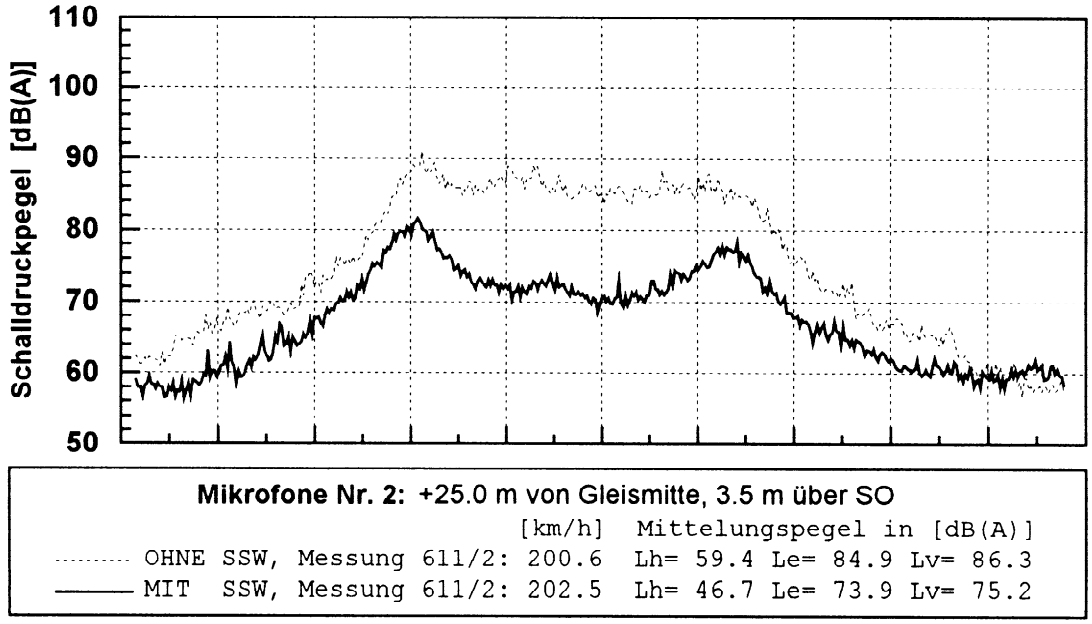


Bild A1 ICE 1, Fahrt 611, Mikrofone 2 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Pegelverläufe bei geschliffenen Schienen

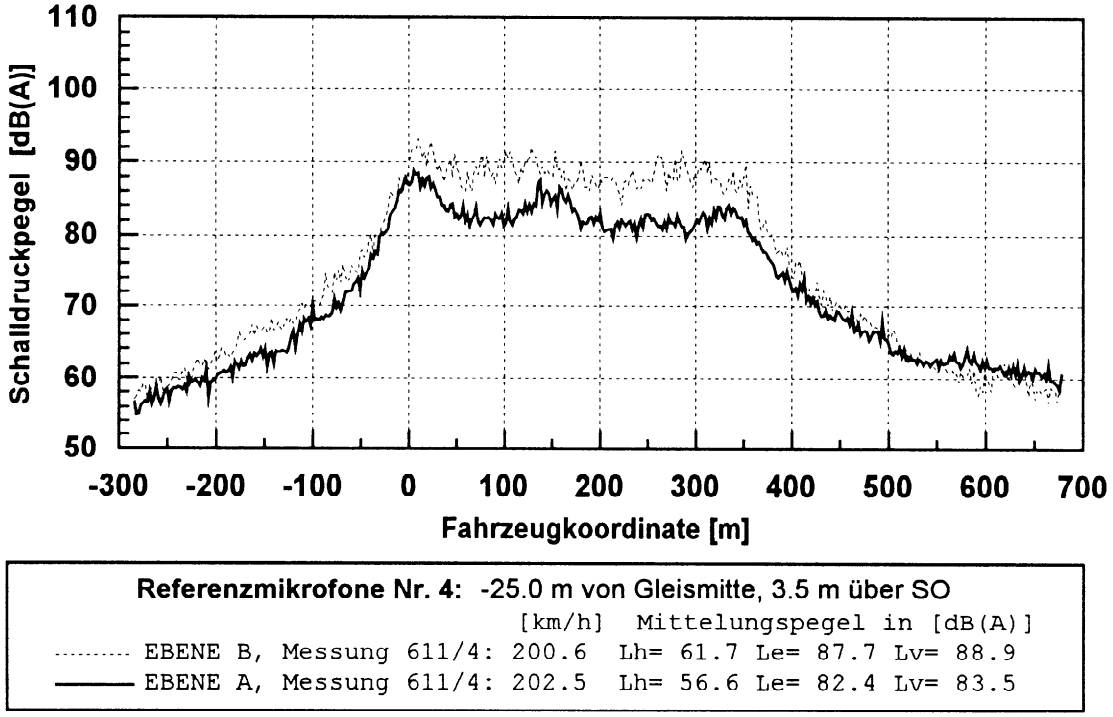


Bild A2 ICE 1, Fahrt 611, Mikrofone 4 auf jenseitiger Gleisseite ohne SSW in beiden Meßebenen, Pegelverläufe bei geschliffenen Schienen

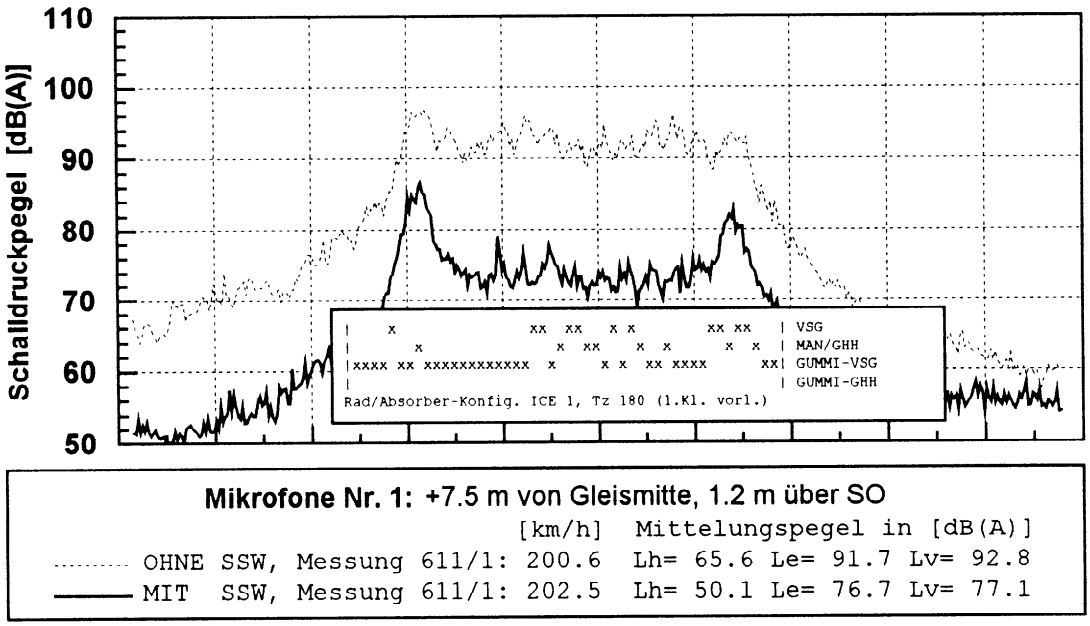


Bild A3 ICE 1, Fahrt 611, Mikrofone 1 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Pegelverläufe bei geschliffenen Schienen

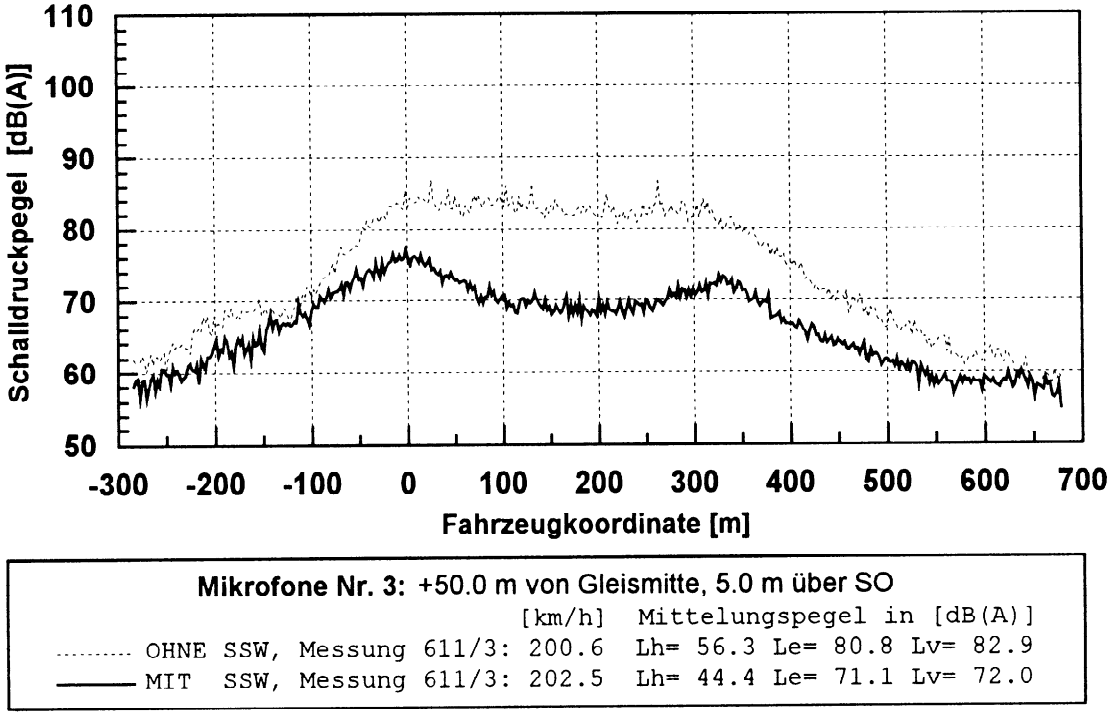


Bild A4 ICE 1, Fahrt 611, Mikrofone 3 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Pegelverläufe bei geschliffenen Schienen

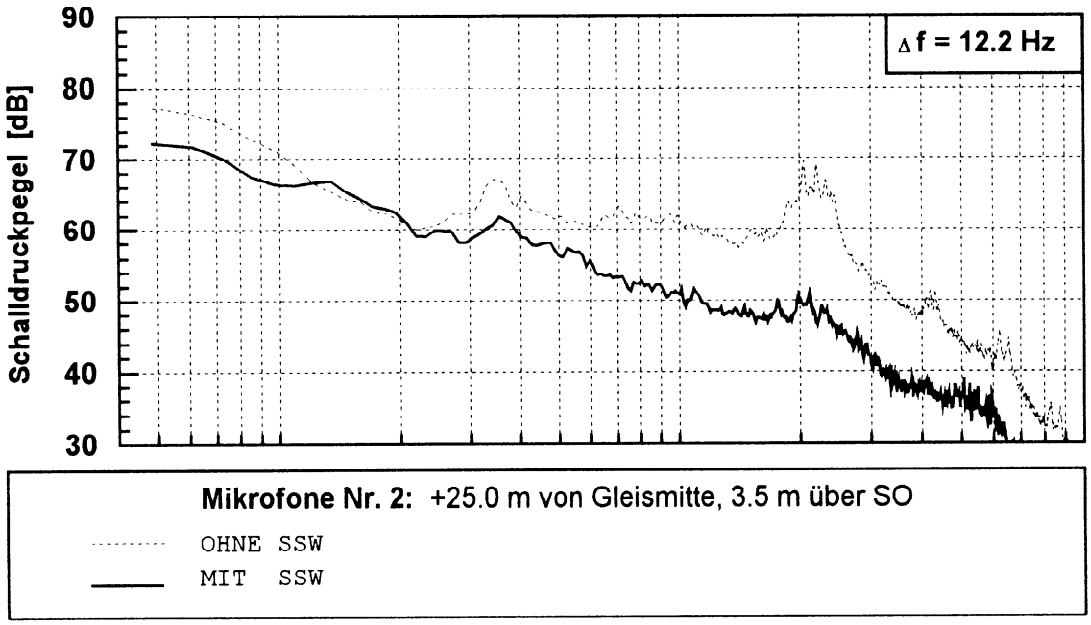


Bild A5 ICE 1, Fahrt 611, Mikrofone 2 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Schmalbandspektren bei geschliffenen Schienen

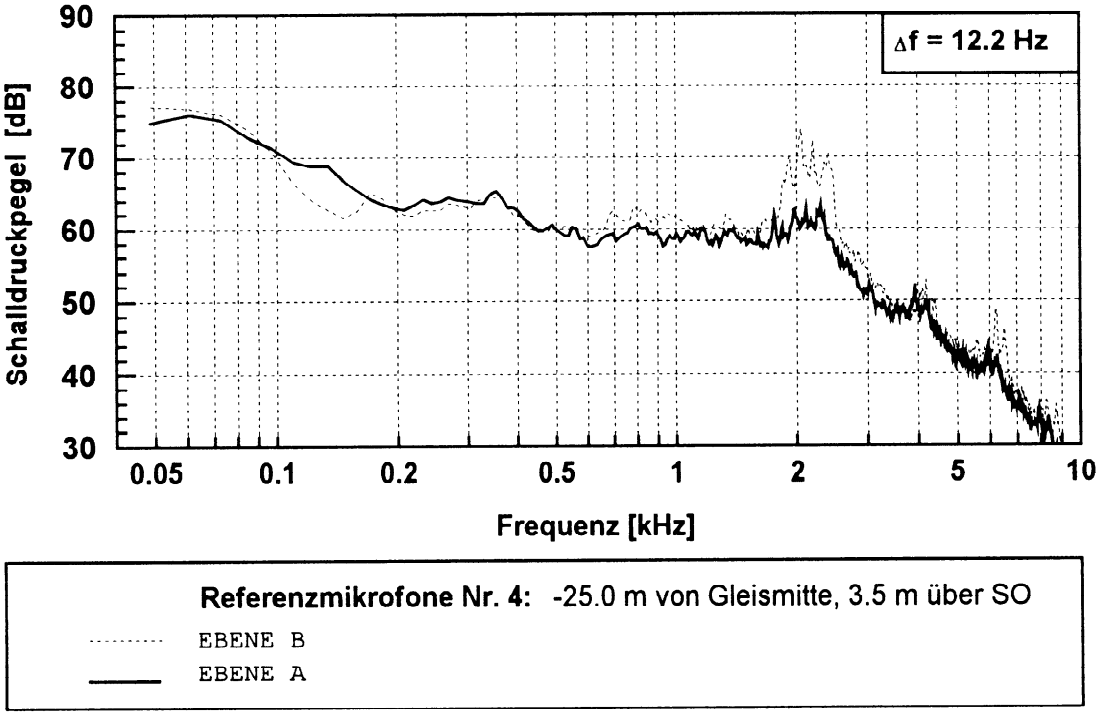


Bild A6 ICE 1, Fahrt 611, Mikrofone 4 auf jenseitiger Gleisseite ohne SSW in beiden Meßebenen, Schmalbandspektren bei geschliffenen Schienen

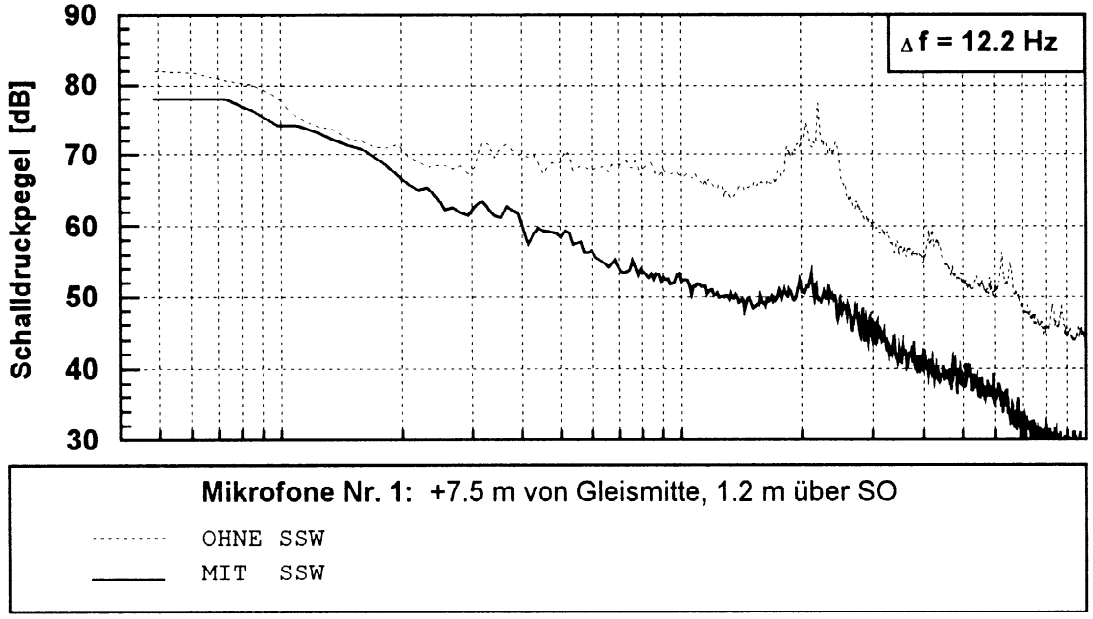


Bild A7 ICE 1, Fahrt 611, Mikrofone 1 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Schmalbandspektren bei geschliffenen Schienen

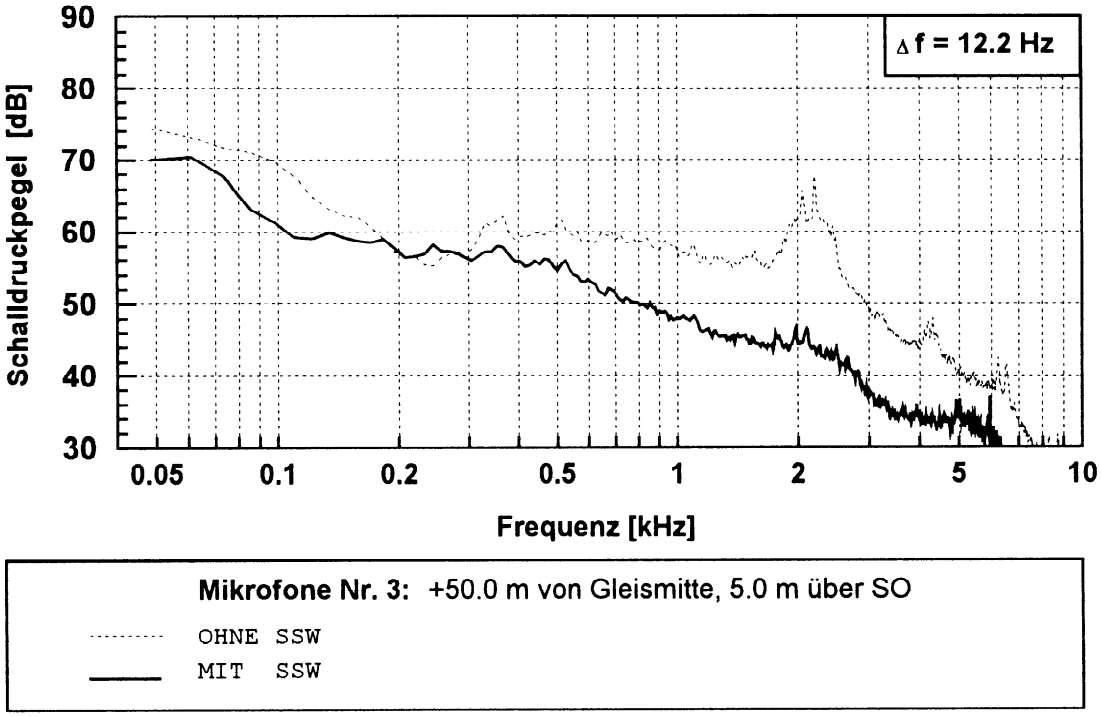


Bild A8 ICE 1, Fahrt 611, Mikrofone 3 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Schmalbandspektren bei geschliffenen Schienen

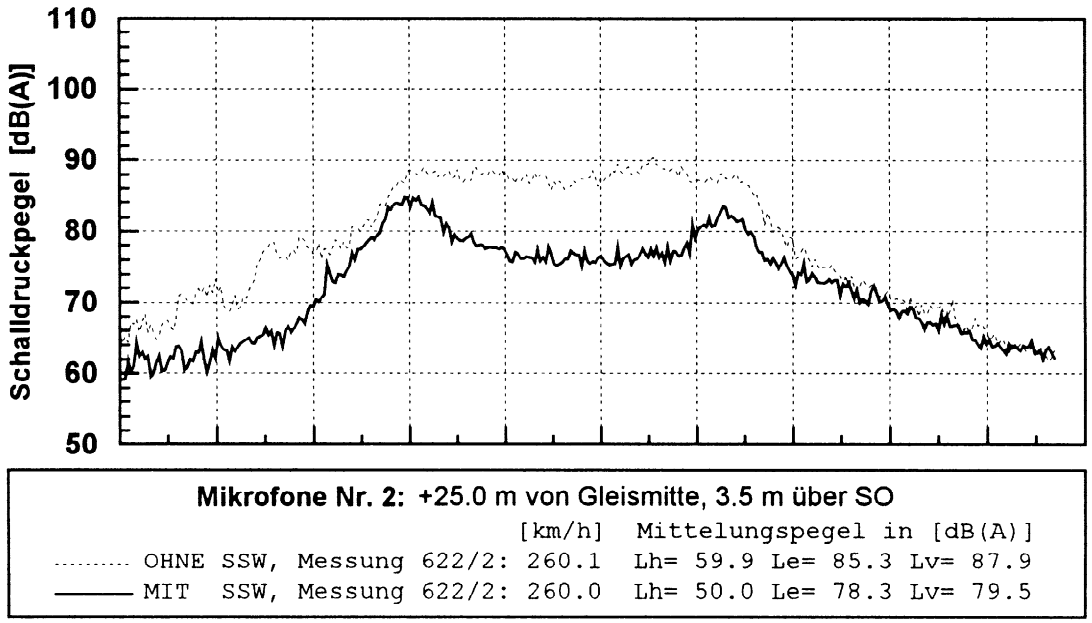


Bild A9 ICE 1, Fahrt 622, Mikrofone 2 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Pegelverläufe bei geschliffenen Schienen

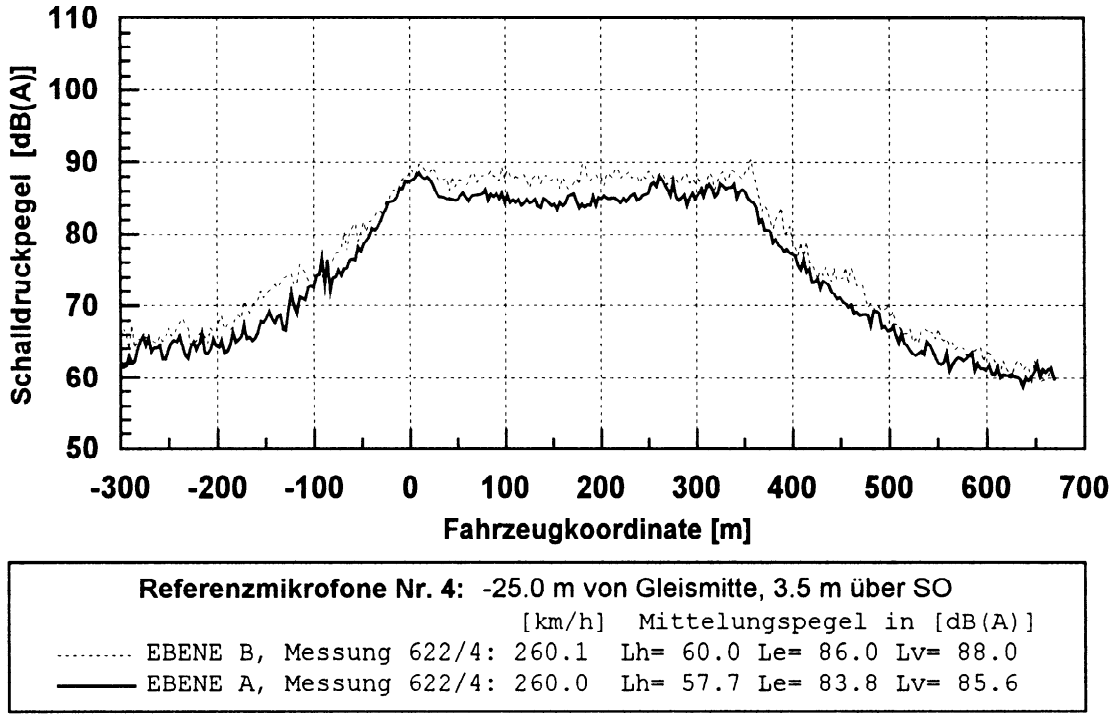


Bild A10 ICE 1, Fahrt 622, Mikrofone 4 auf jenseitiger Gleisseite ohne SSW in beiden Meßebenen, Pegelverläufe bei geschliffenen Schienen

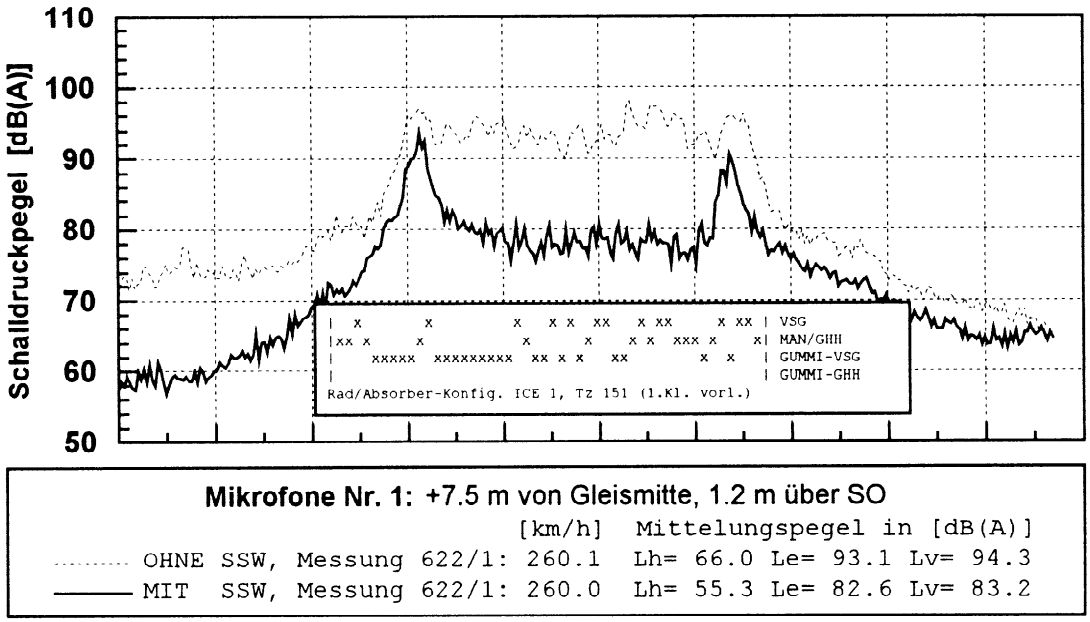


Bild A11 ICE 1, Fahrt 622, Mikrofone 3 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Pegelverläufe bei geschliffenen Schienen

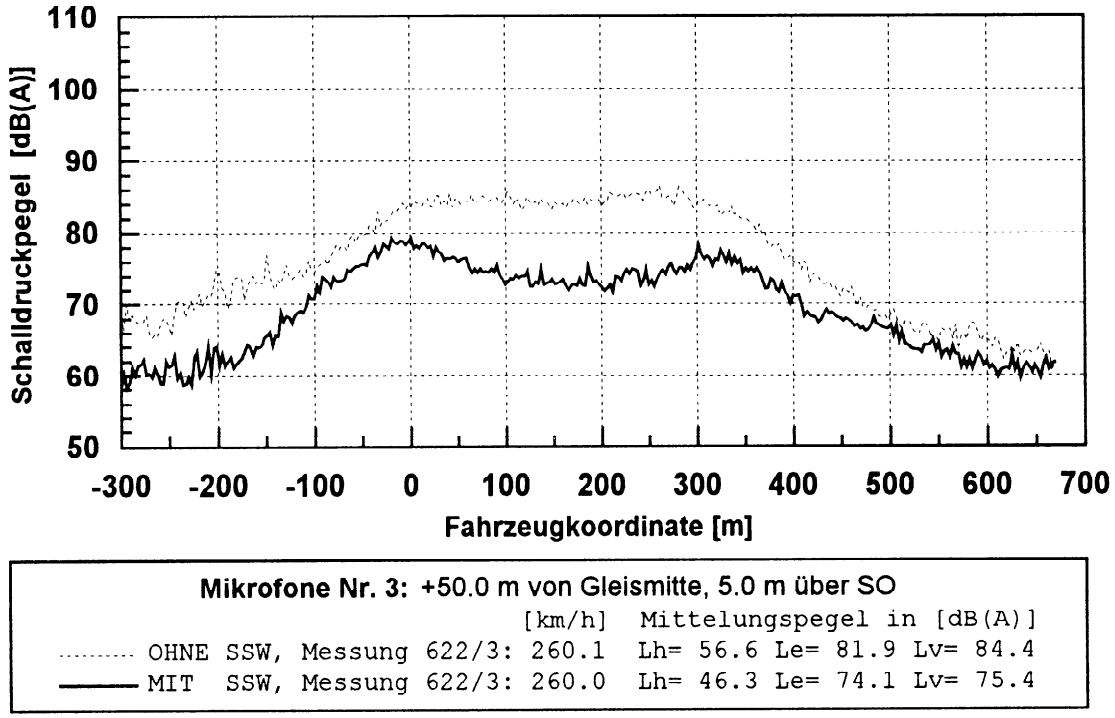


Bild A12 ICE 1, Fahrt 622, Mikrofone 3 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Pegelverläufe bei geschliffenen Schienen

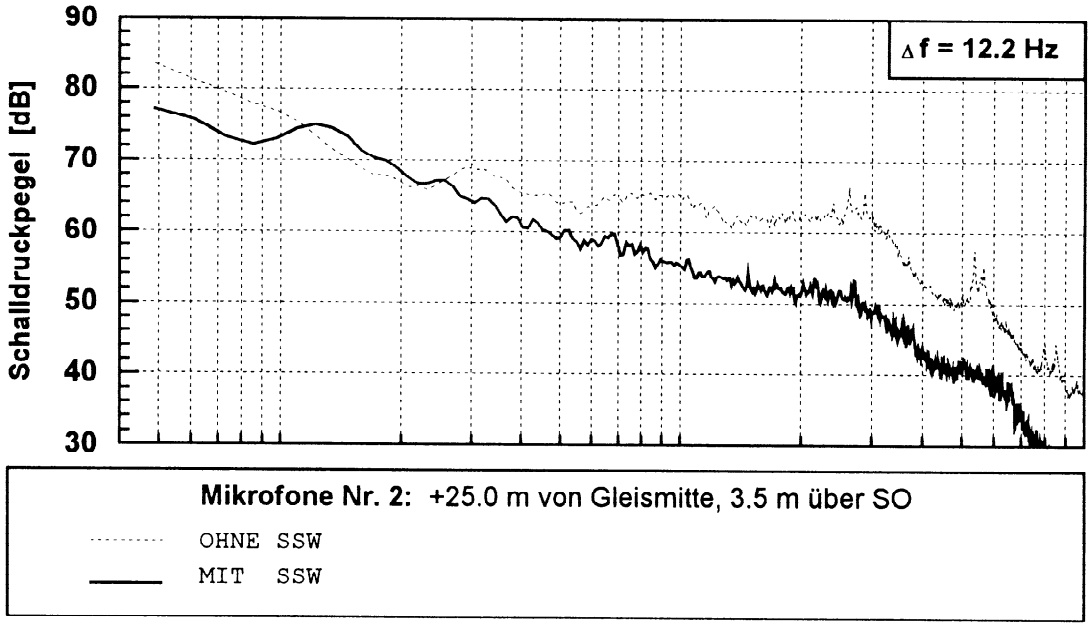


Bild A13 ICE 1, Fahrt 622, Mikrofone 2 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Schmalbandspektren bei geschliffenen Schienen

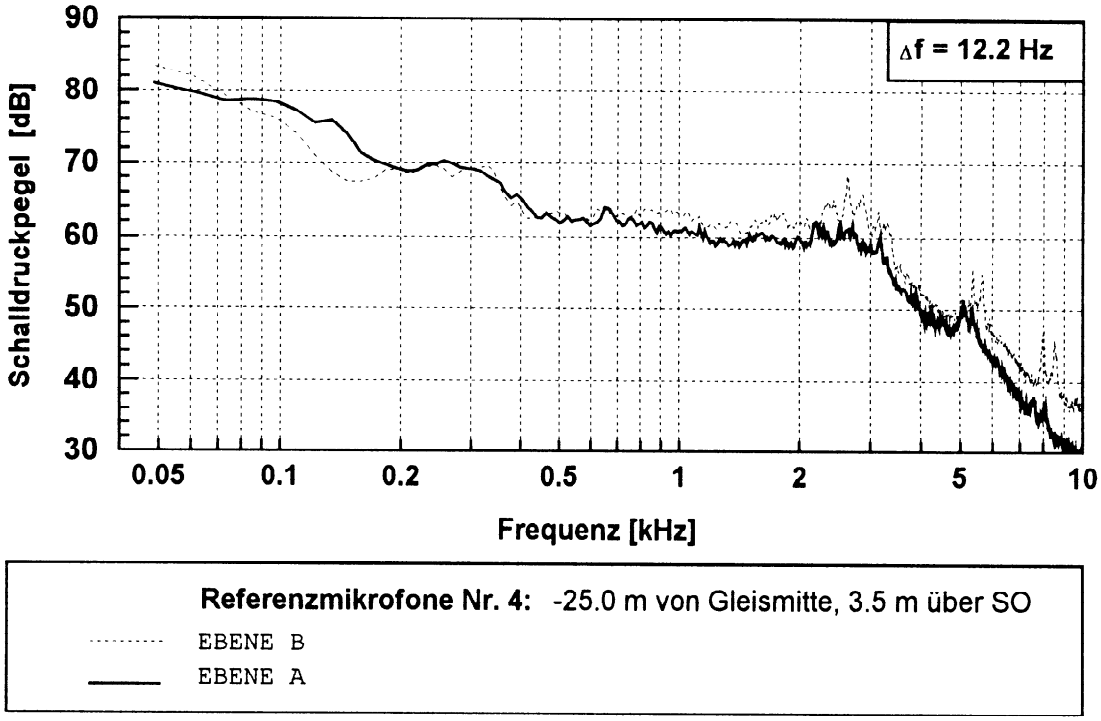


Bild A14 ICE 1, Fahrt 622, Mikrofone 4 auf jenseitiger Gleisseite ohne SSW in beiden Meßebenen, Schmalbandspektren bei geschliffenen Schienen

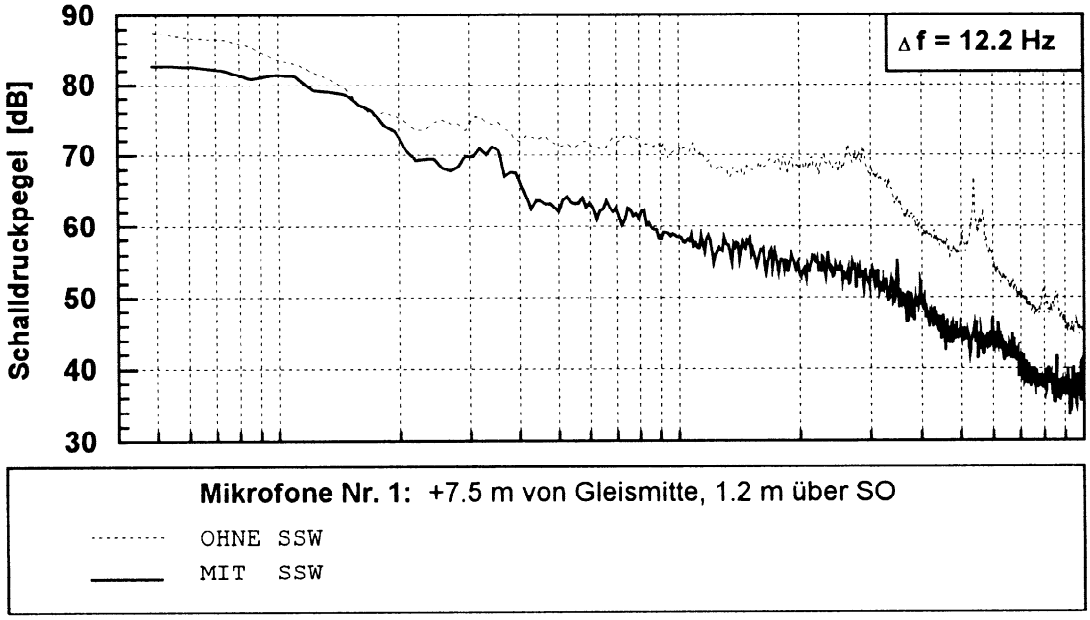


Bild A15 ICE 1, Fahrt 622, Mikrofone 1 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Schmalbandspektren bei geschliffenen Schienen

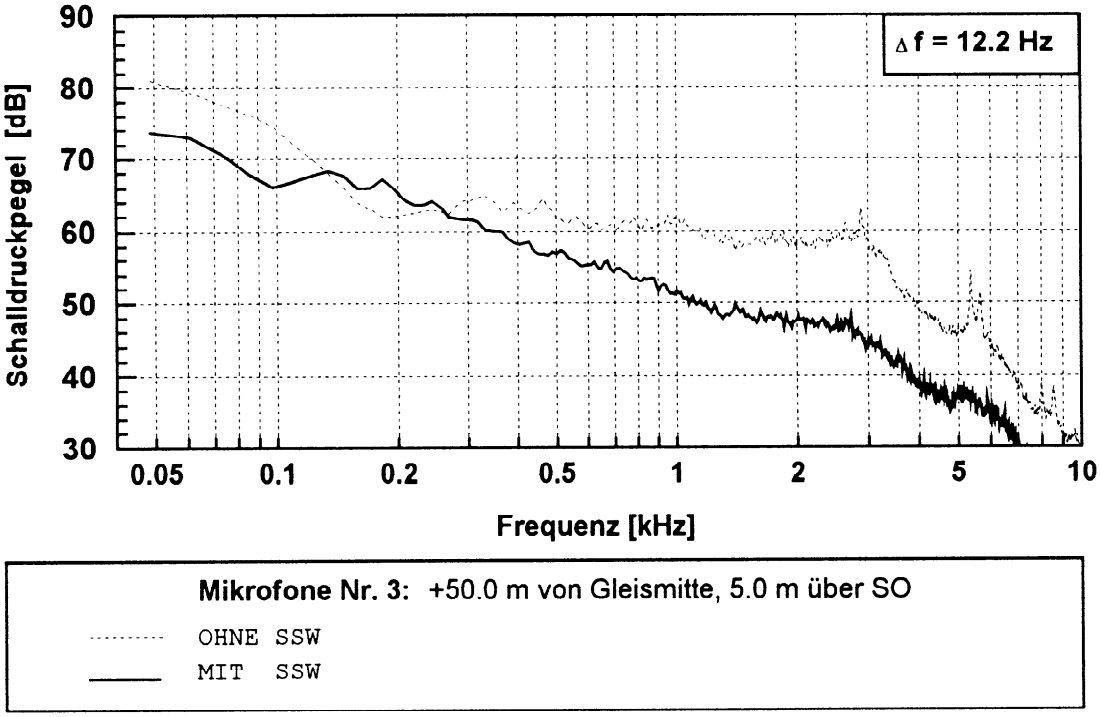


Bild A16 ICE 1, Fahrt 622, Mikrofone 3 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Schmalbandspektren bei geschliffenen Schienen

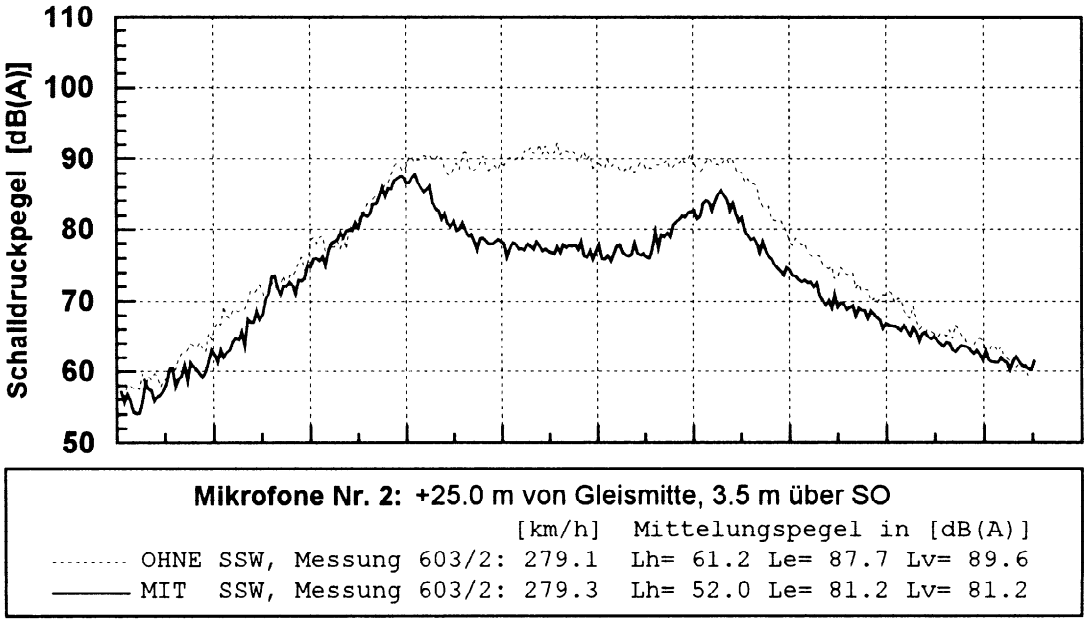


Bild A17 ICE 1, Fahrt 603, Mikrofone 2 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Pegelverläufe bei geschliffenen Schienen

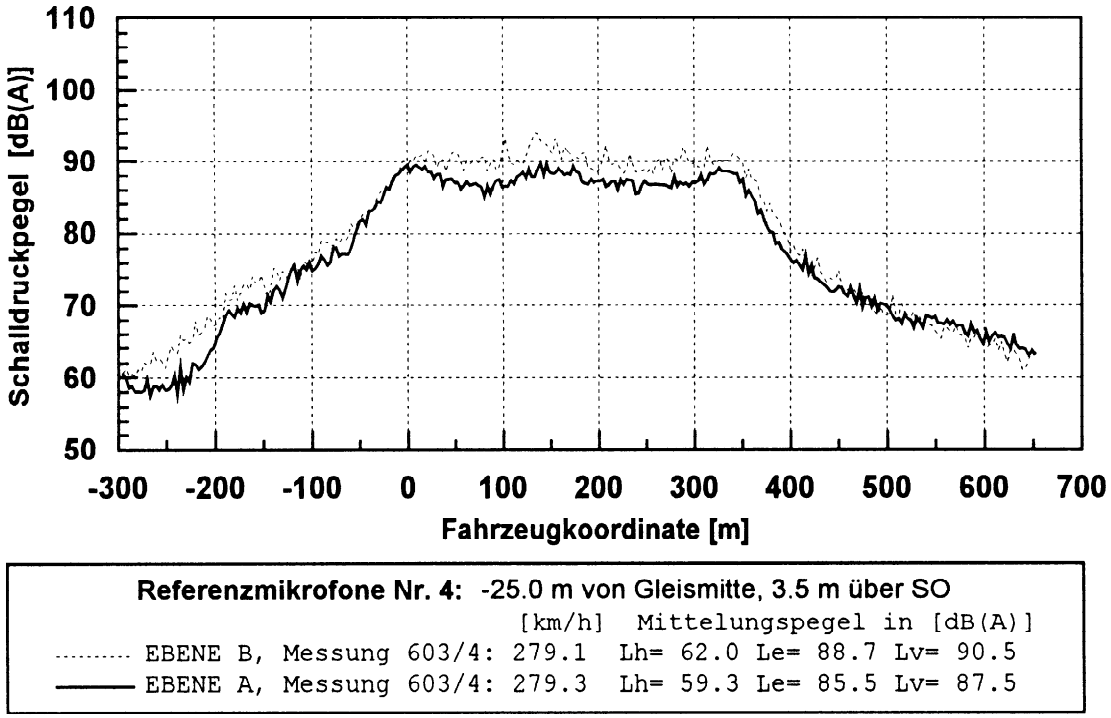


Bild A18 ICE 1, Fahrt 603, Mikrofone 4 auf jenseitiger Gleisseite ohne SSW in beiden Meßebenen, Pegelverläufe bei geschliffenen Schienen

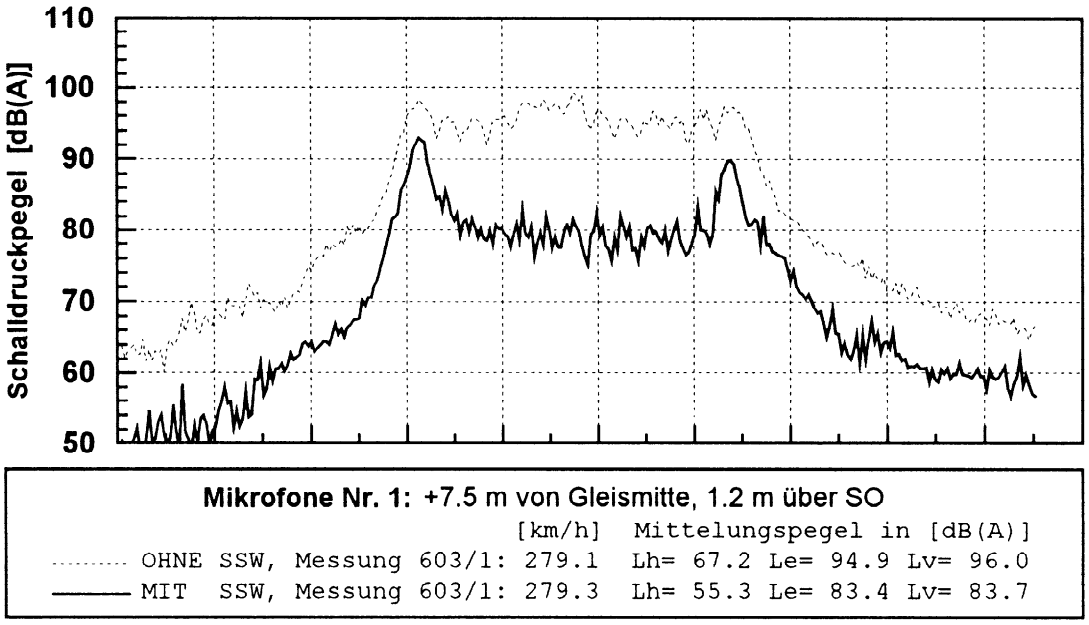


Bild A19 ICE 1, Fahrt 603, Mikrofone 1 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Pegelverläufe bei geschliffenen Schienen

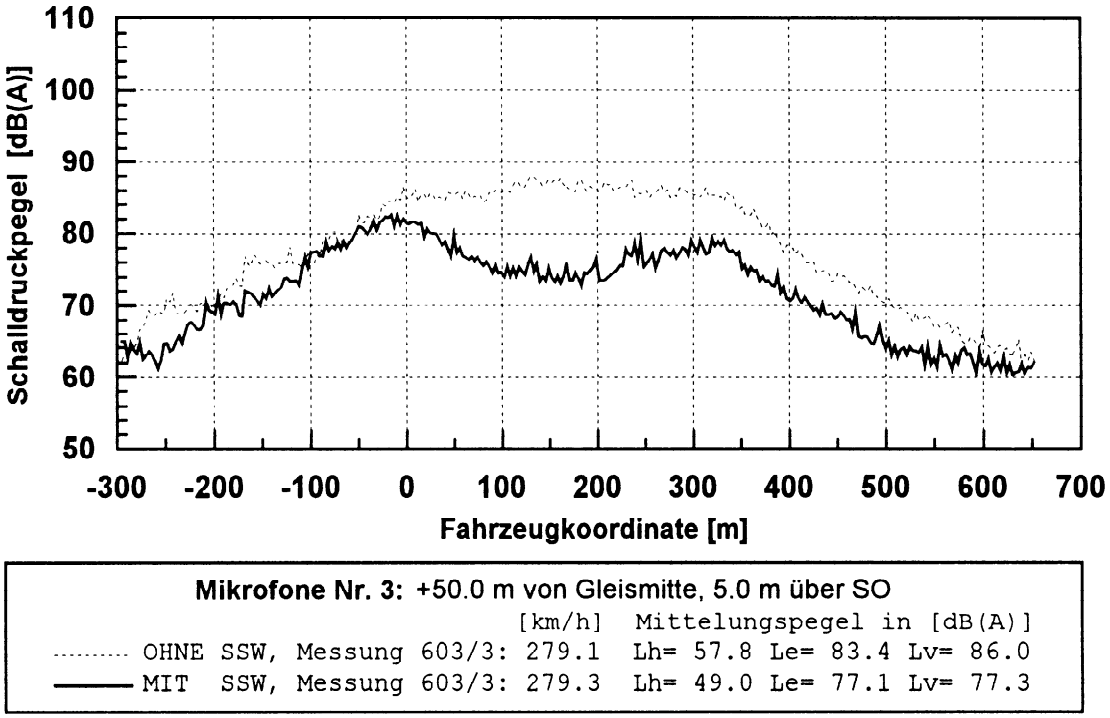


Bild A20 ICE 1, Fahrt 603, Mikrofone 3 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Pegelverläufe bei geschliffenen Schienen

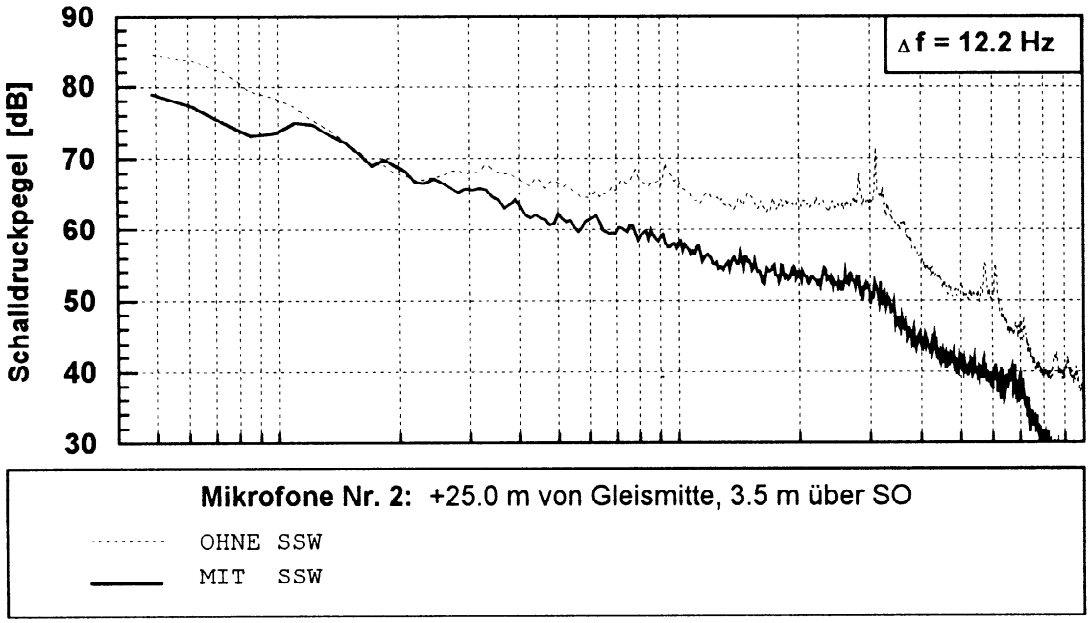


Bild A21 ICE 1, Fahrt 603, Mikrofone 2 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Schmalbandspektren bei geschliffenen Schienen

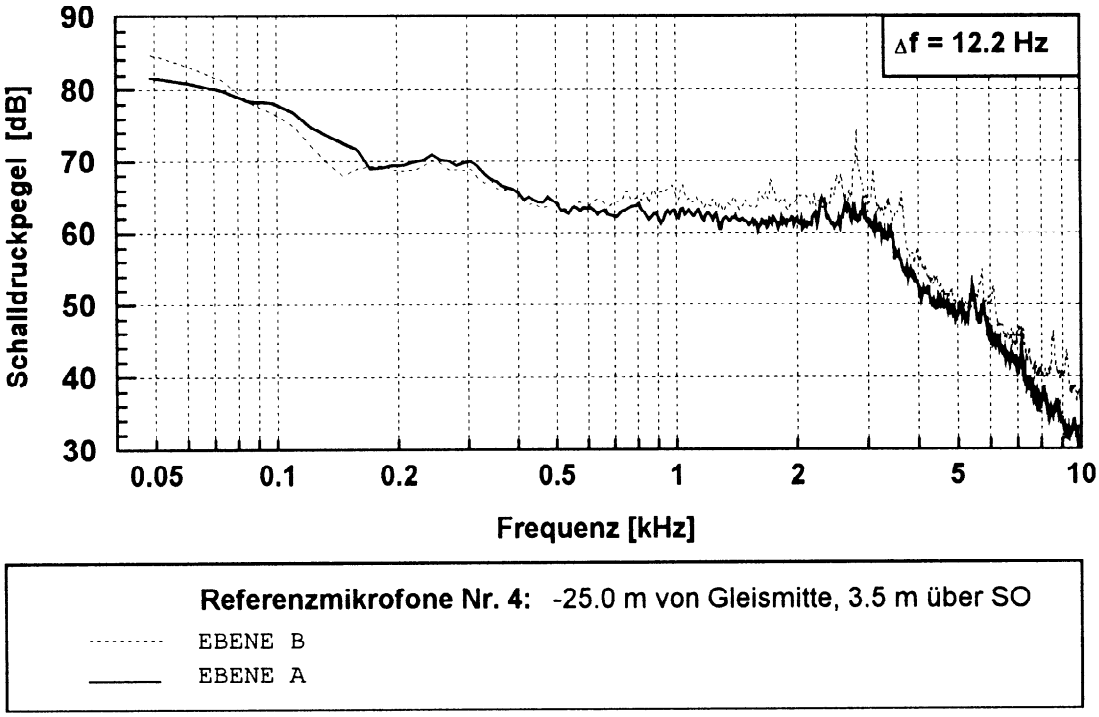


Bild A22 ICE 1, Fahrt 603, Mikrofone 4 auf jenseitiger Gleisseite ohne SSW in beiden Meßebenen, Schmalbandspektren bei geschliffenen Schienen

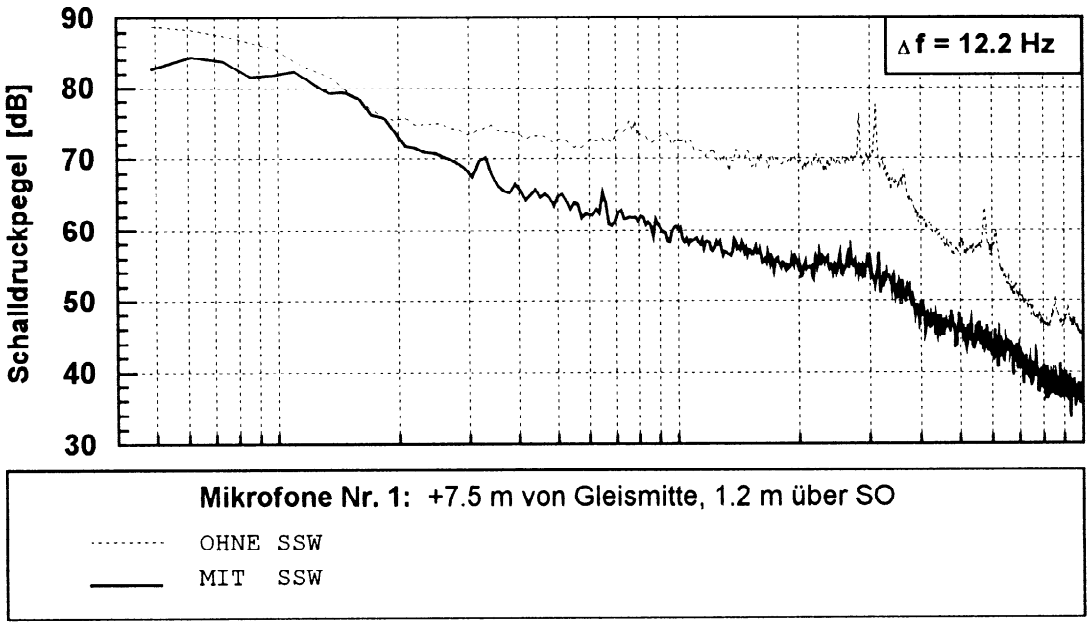


Bild A23 ICE 1, Fahrt 603, Mikrofone 1 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Schmalbandspektren bei geschliffenen Schienen

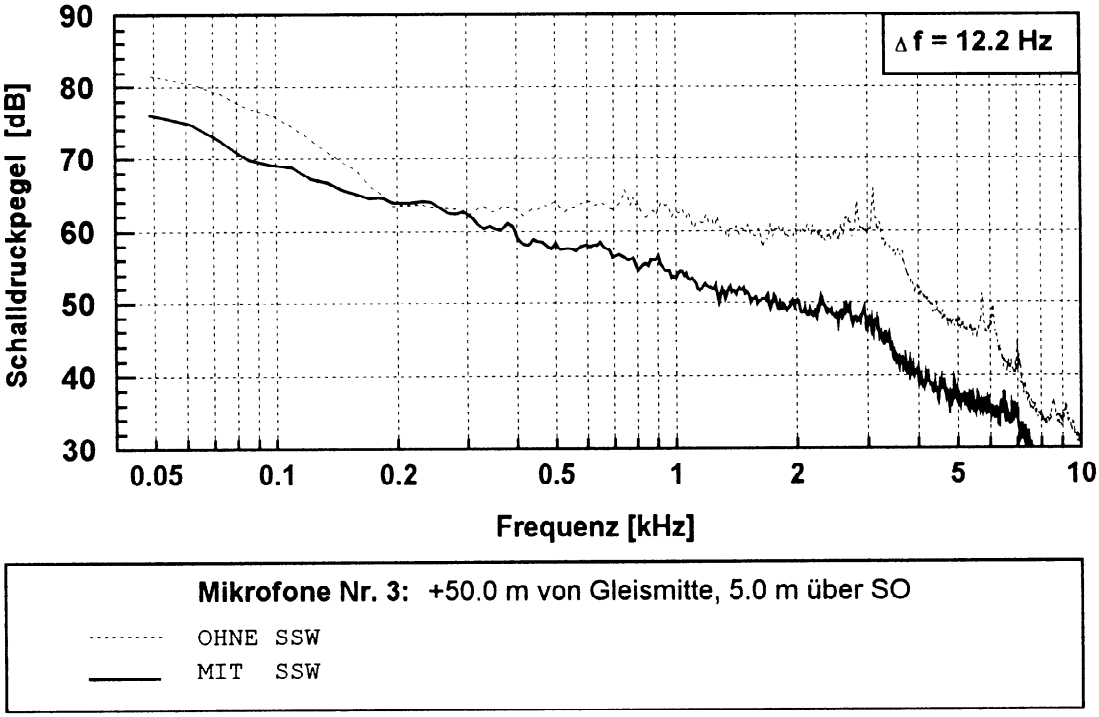


Bild A24 ICE 1, Fahrt 603, Mikrofone 3 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Schmalbandspektren bei geschliffenen Schienen

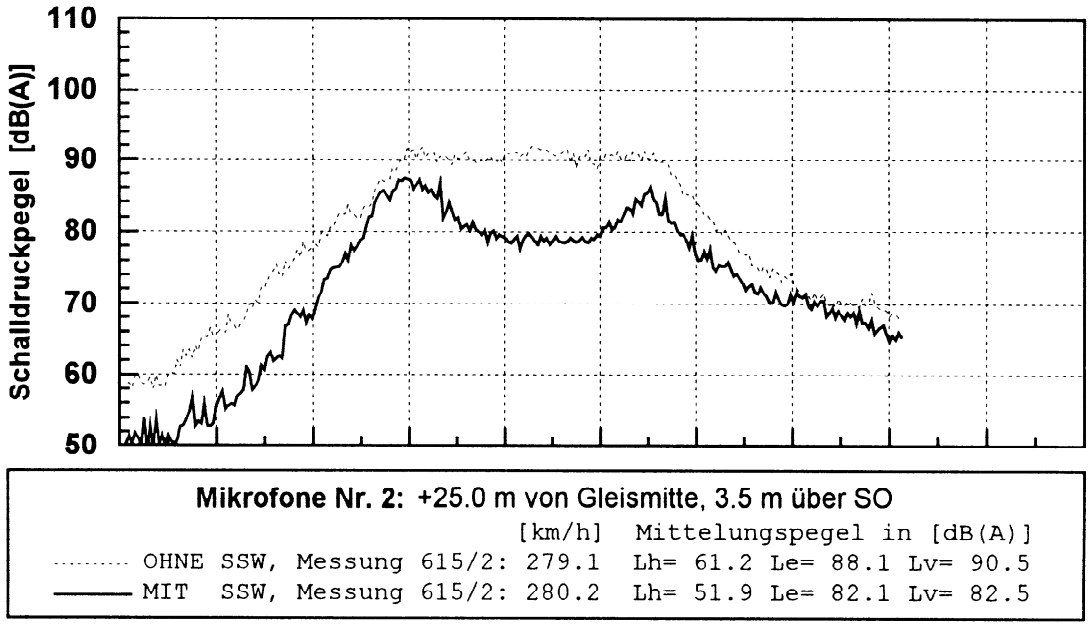


Bild A25 ICE 2, Fahrt 615, Mikrofone 2 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Pegelverläufe bei geschliffenen Schienen

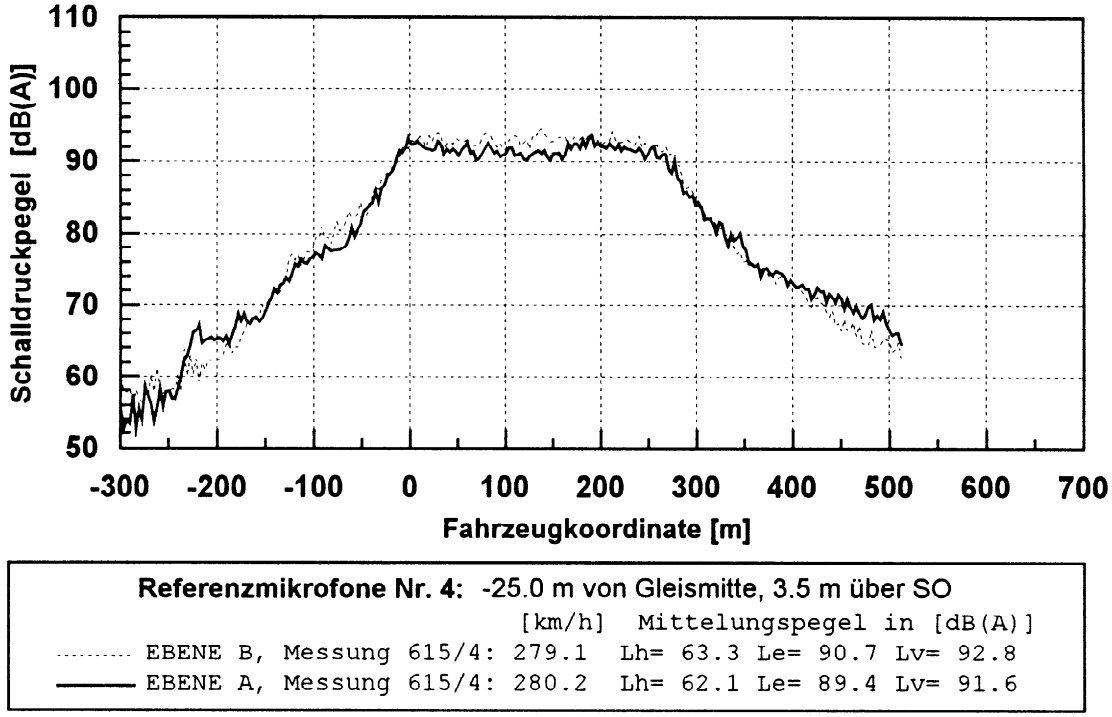


Bild A26 ICE 2, Fahrt 615, Mikrofone 4 auf jenseitiger Gleisseite ohne SSW in beiden Meßebenen, Pegelverläufe bei geschliffenen Schienen

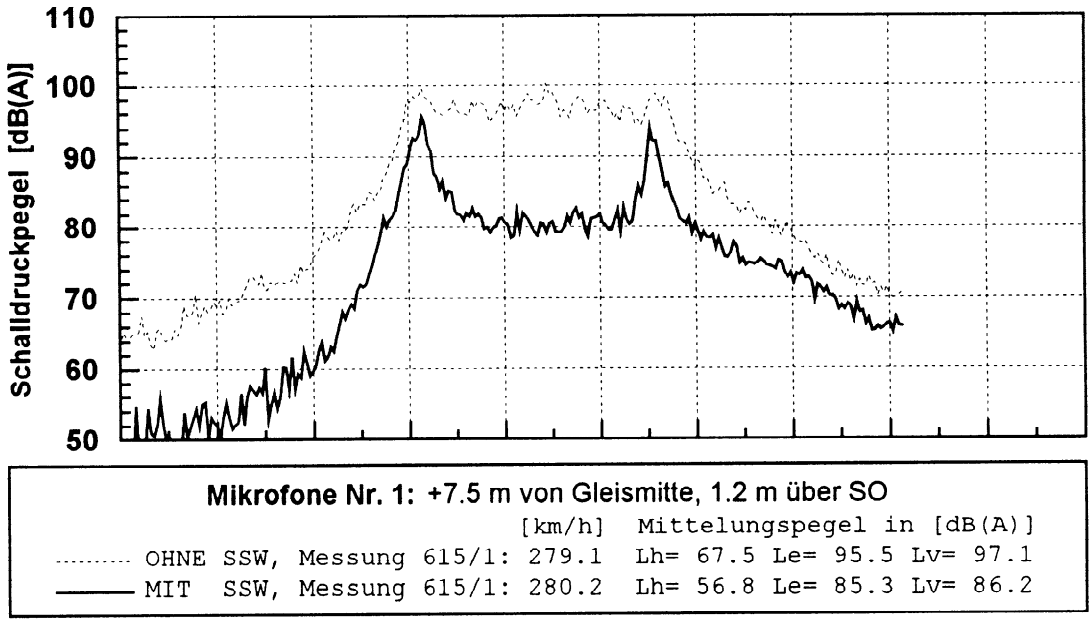


Bild A27 ICE 2, Fahrt 615, Mikrofone 1 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Pegelverläufe bei geschliffenen Schienen

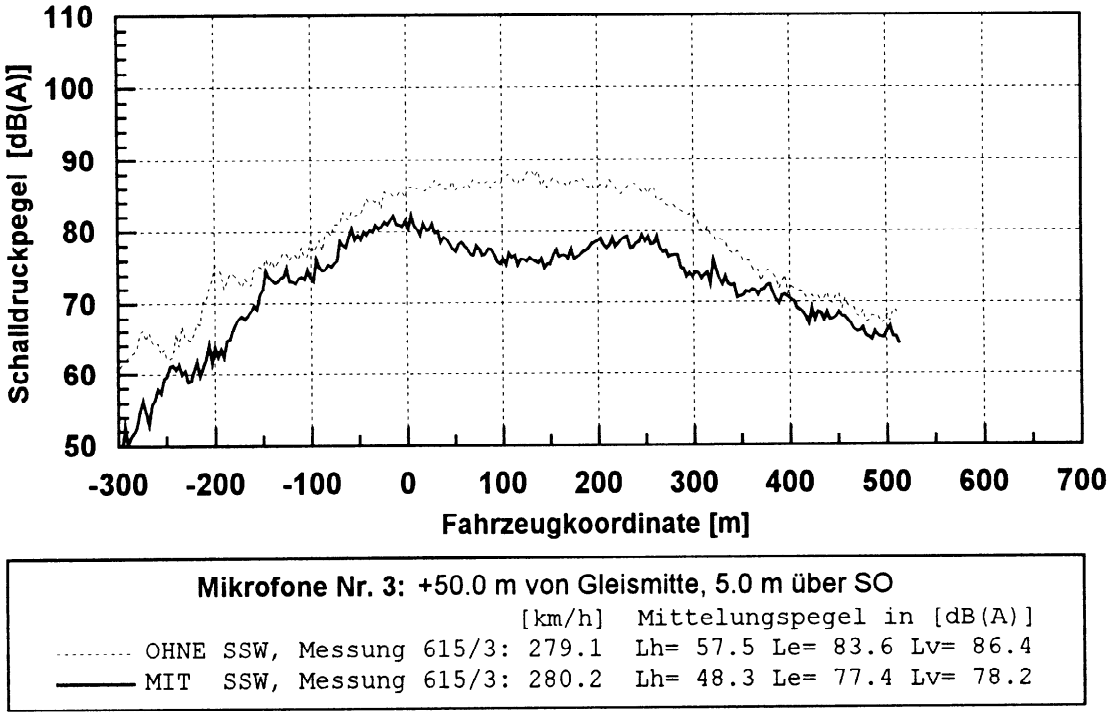


Bild A28 ICE 2, Fahrt 615, Mikrofone 3 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Pegelverläufe bei geschliffenen Schienen

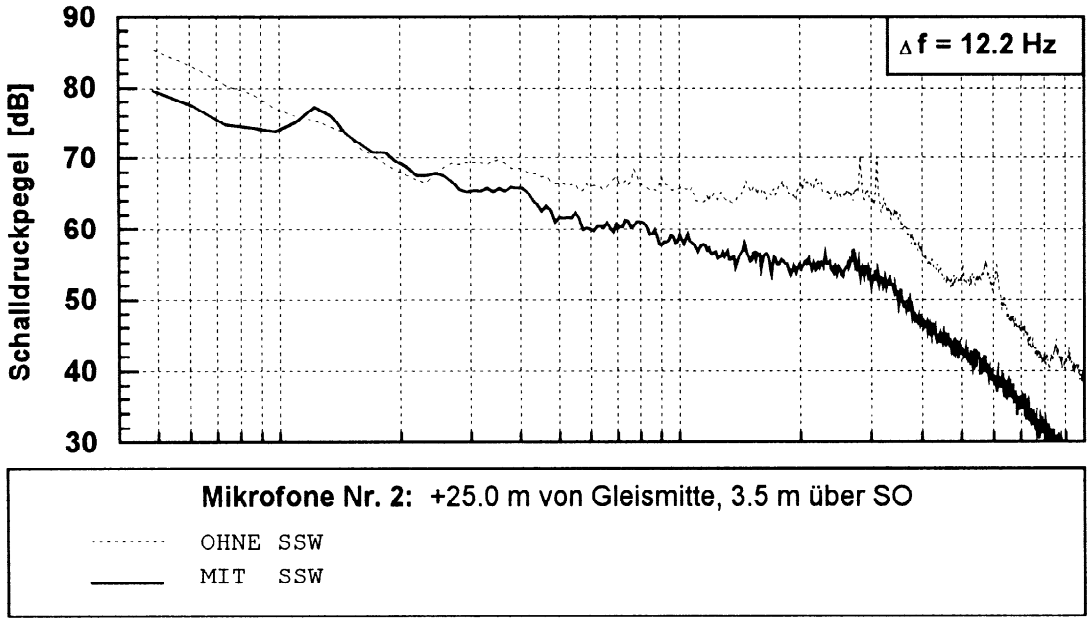


Bild A29 ICE 2, Fahrt 615, Mikrofone 2 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Schmalbandspektren bei geschliffenen Schienen

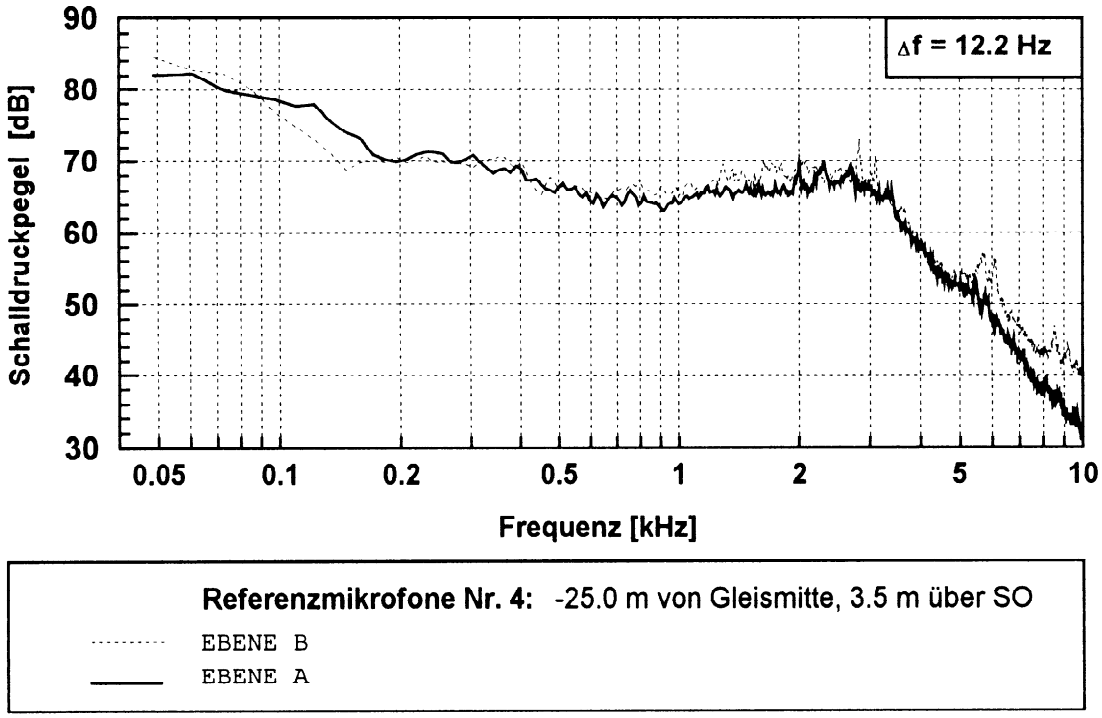


Bild A30 ICE 2, Fahrt 615, Mikrofone 4 auf jenseitiger Gleisseite ohne SSW in beiden Meßebenen, Schmalbandspektren bei geschliffenen Schienen

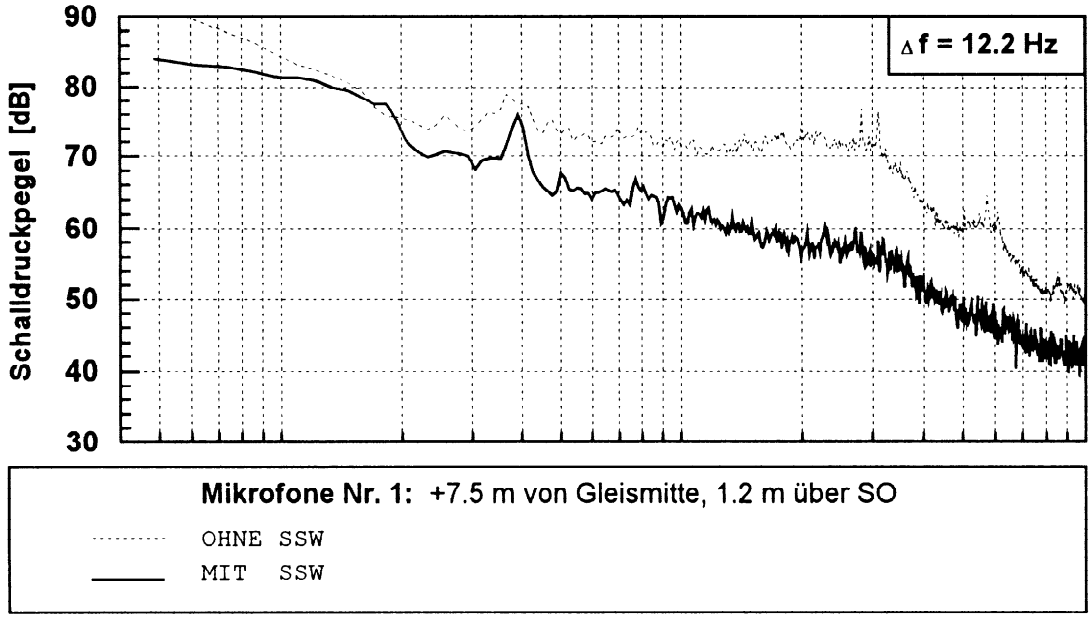


Bild A31 ICE 2, Fahrt 615, Mikrofone 1 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Schmalbandspektren bei geschliffenen Schienen

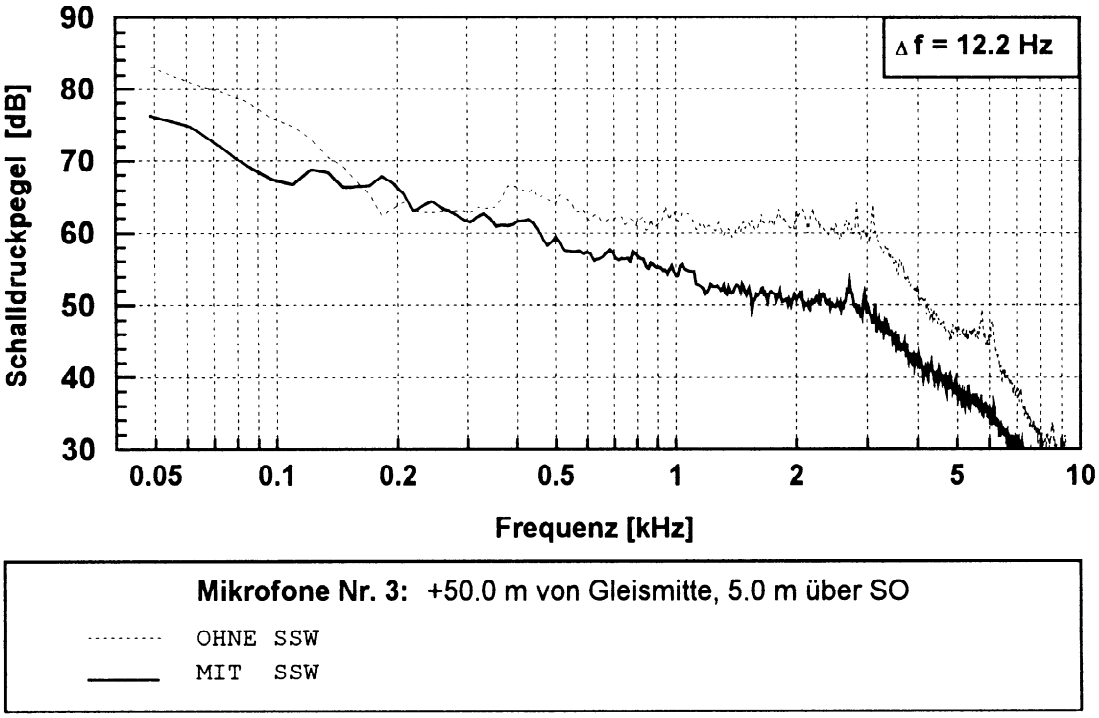


Bild A32 ICE 2, Fahrt 615, Mikrofone 3 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Schmalbandspektren bei geschliffenen Schienen

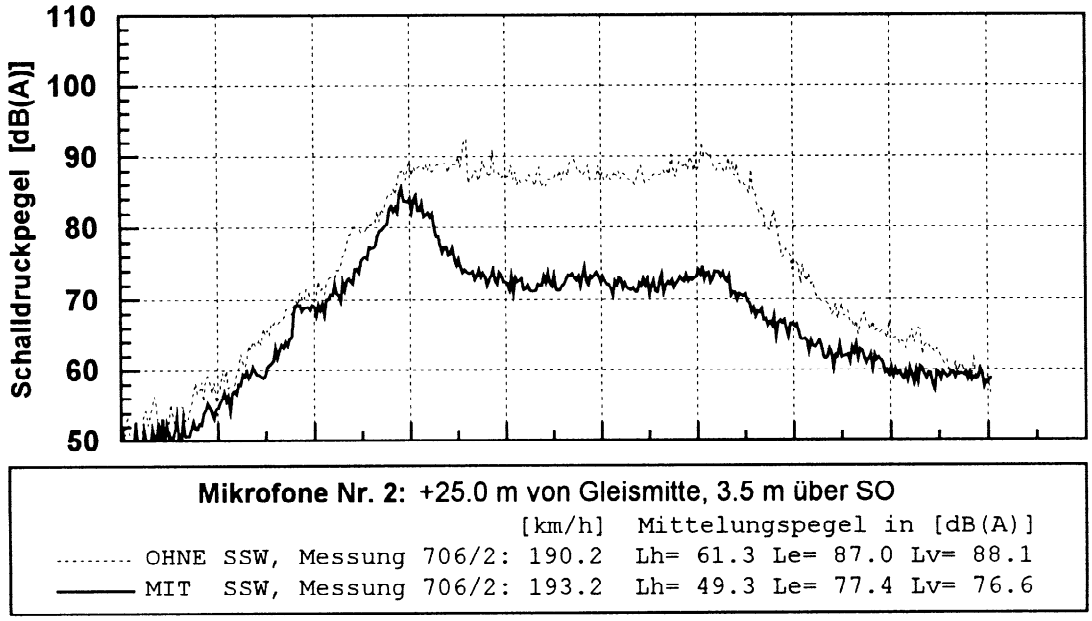


Bild A33 IC-Zug, Fahrt 706, Mikrofone 2 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Pegelverläufe bei geschliffenen Schienen

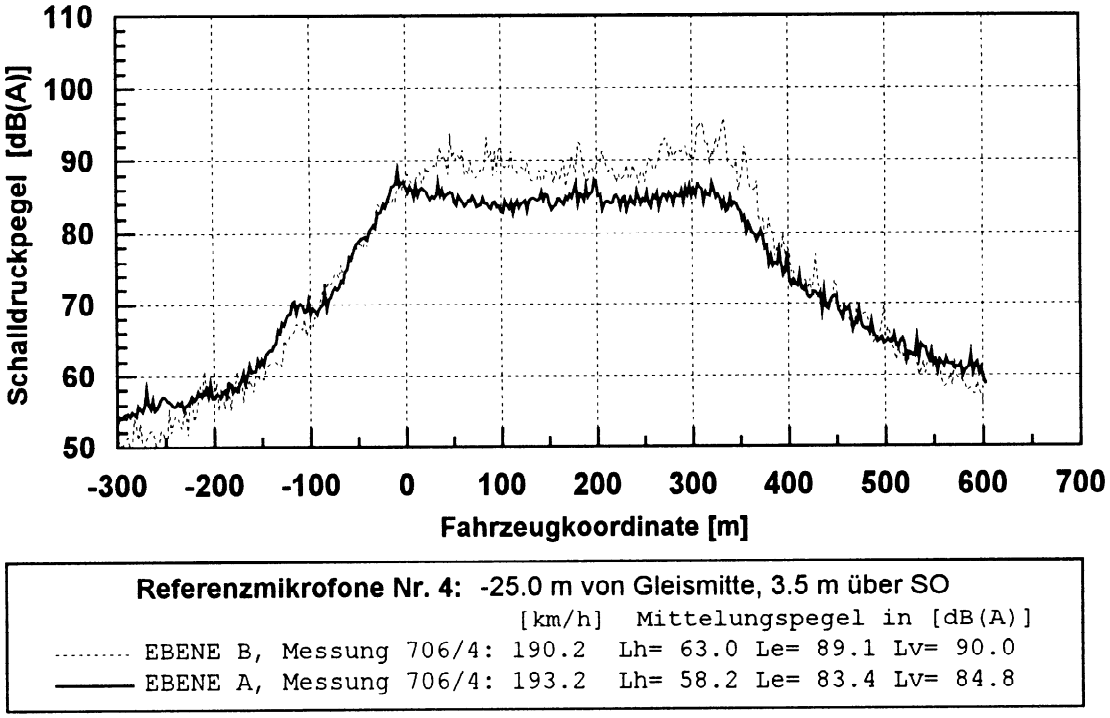


Bild A34 IC-Zug, Fahrt 706, Mikrofone 4 auf jenseitiger Gleisseite ohne SSW in beiden Meßebenen, Pegelverläufe bei geschliffenen Schienen

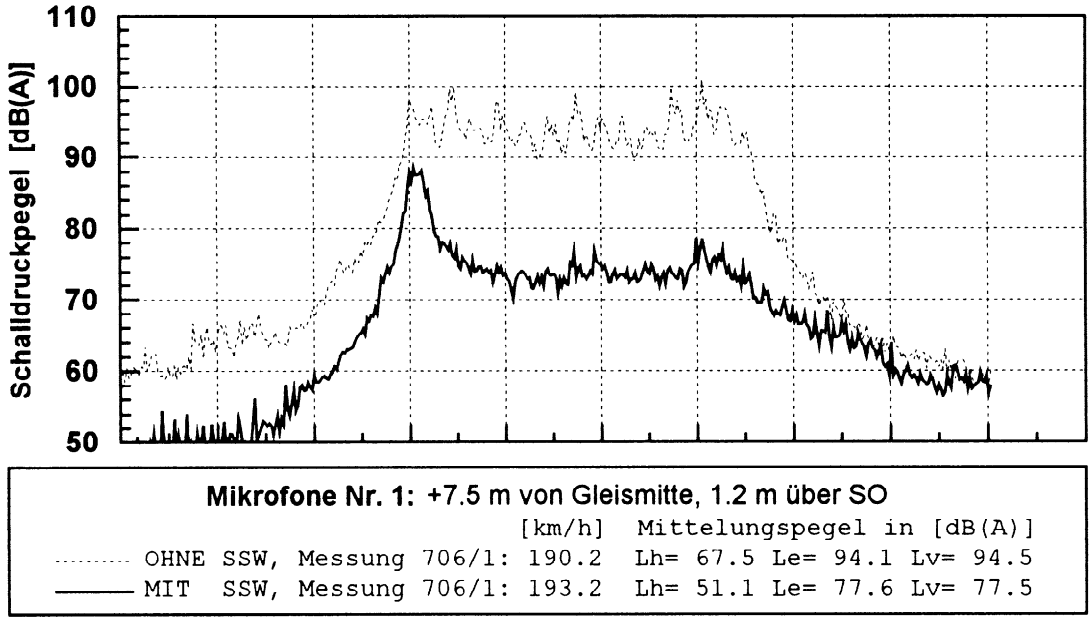


Bild A35 IC-Zug, Fahrt 706, Mikrofone 1 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Pegelverläufe bei geschliffenen Schienen

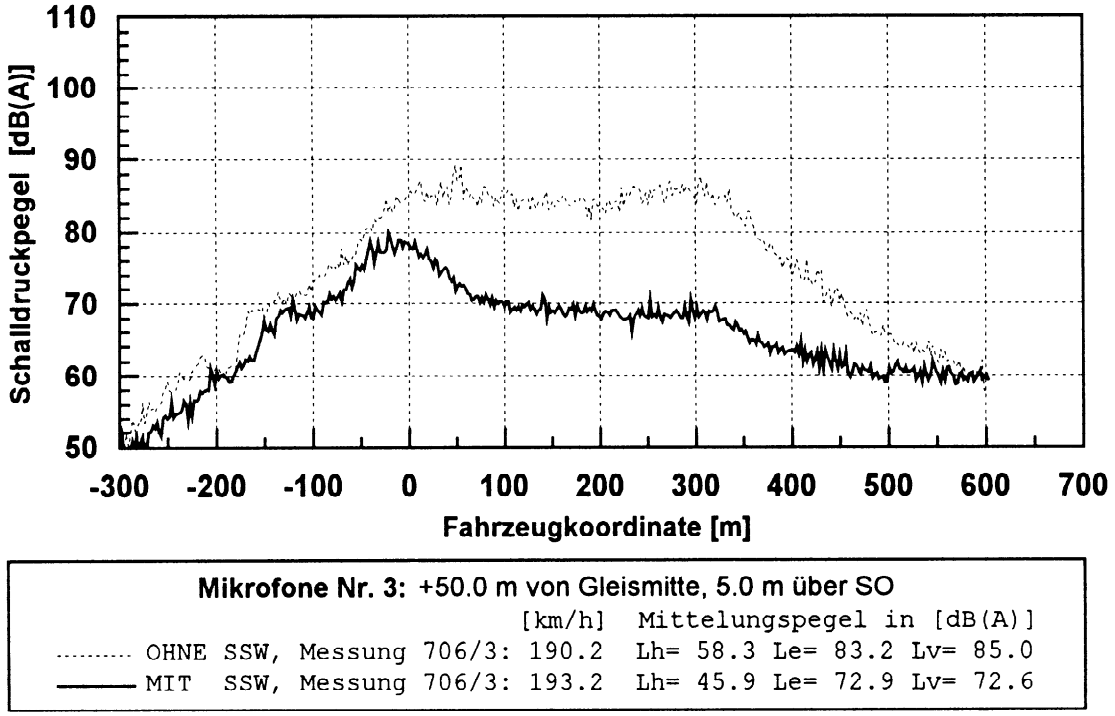


Bild A36 IC-Zug, Fahrt 706, Mikrofone 3 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Pegelverläufe bei geschliffenen Schienen

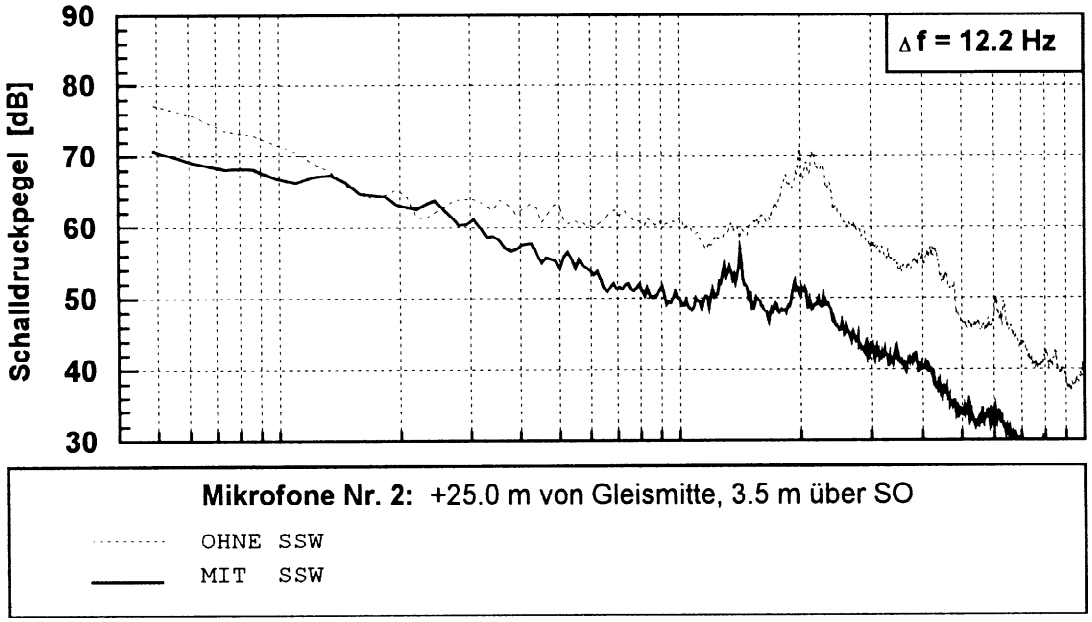


Bild A37 IC-Zug, Fahrt 706, Mikrofone 2 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Schmalbandspektren bei geschliffenen Schienen

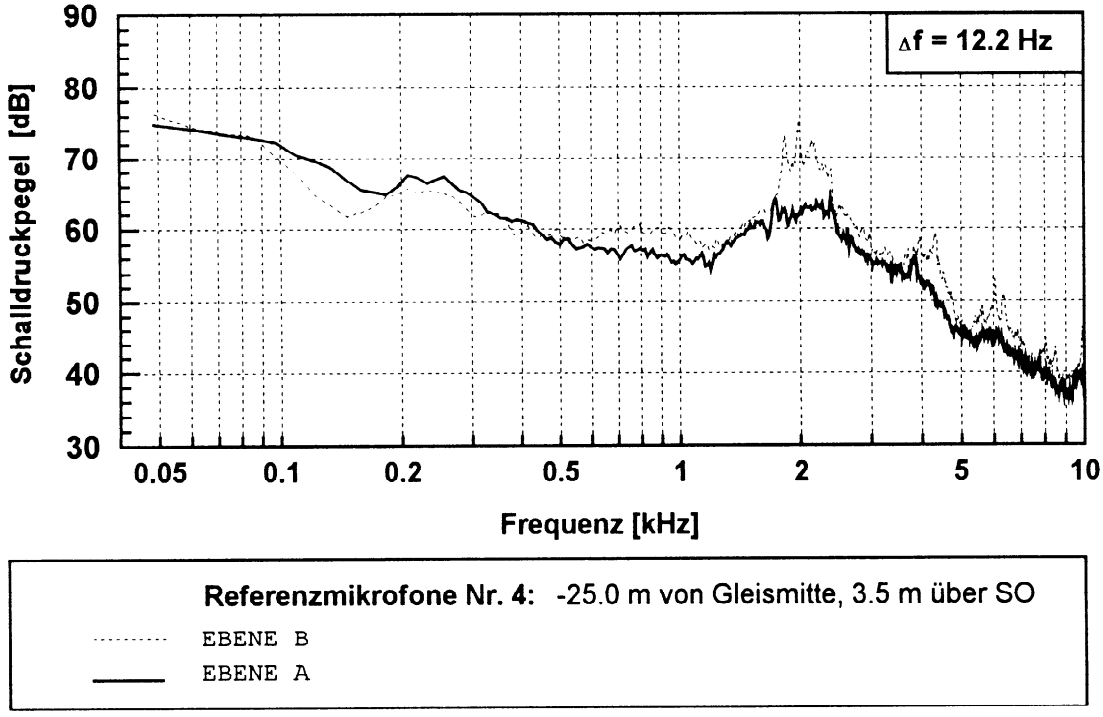


Bild A38 IC-Zug, Fahrt 706, Mikrofone 4 auf jenseitiger Gleisseite ohne SSW in beiden Meßebenen, Schmalbandspektren bei geschliffenen Schienen

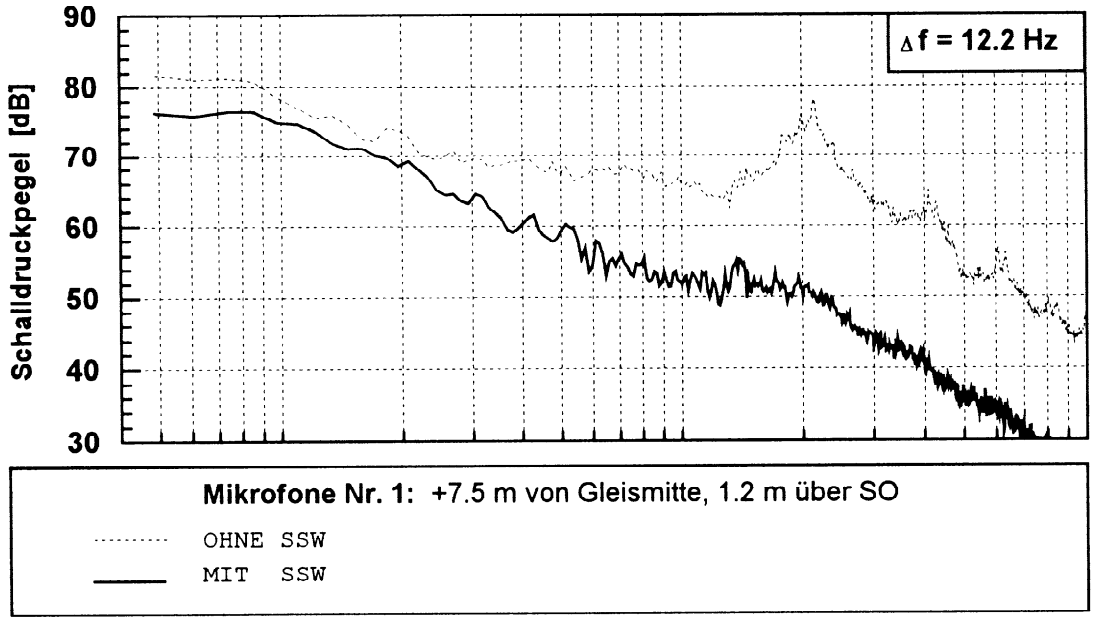


Bild A39 IC-Zug, Fahrt 706, Mikrofone 1 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Schmalbandspektren bei geschliffenen Schienen

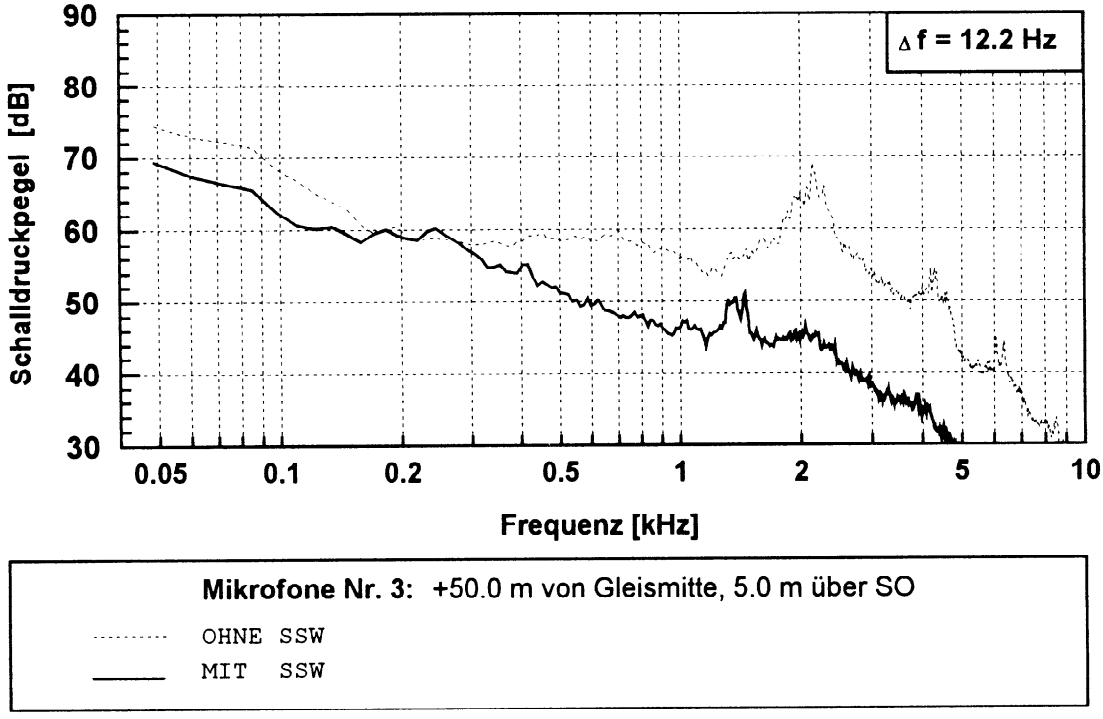


Bild A40 IC-Zug, Fahrt 706, Mikrofone 3 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Schmalbandspektren bei geschliffenen Schienen

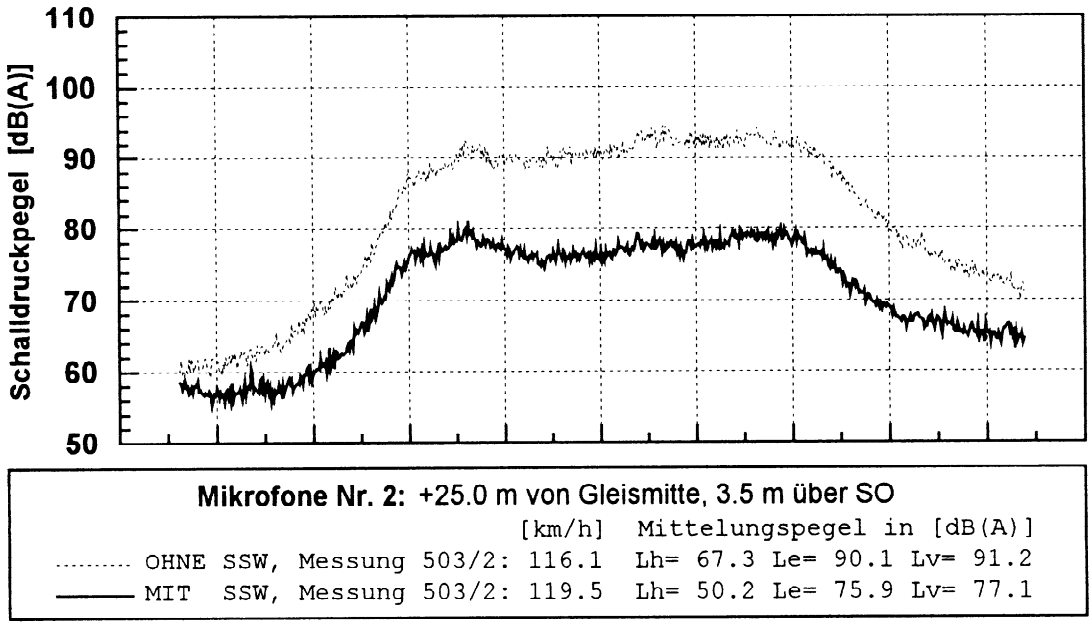


Bild A41 Güterzug, Fahrt 503, Mikrofone 2 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Pegelverläufe bei geschliffenen Schienen

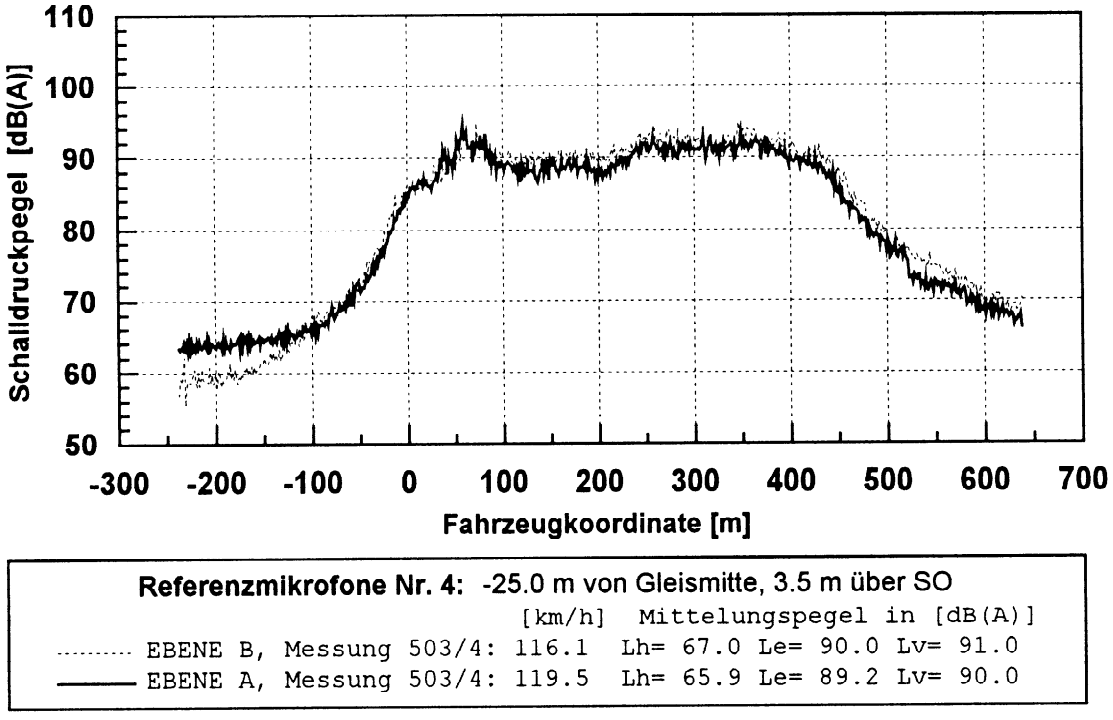


Bild A42 Güterzug, Fahrt 503, Mikrofone 4 auf jenseitiger Gleisseite ohne SSW in beiden Meßebenen, Pegelverläufe bei geschliffenen Schienen

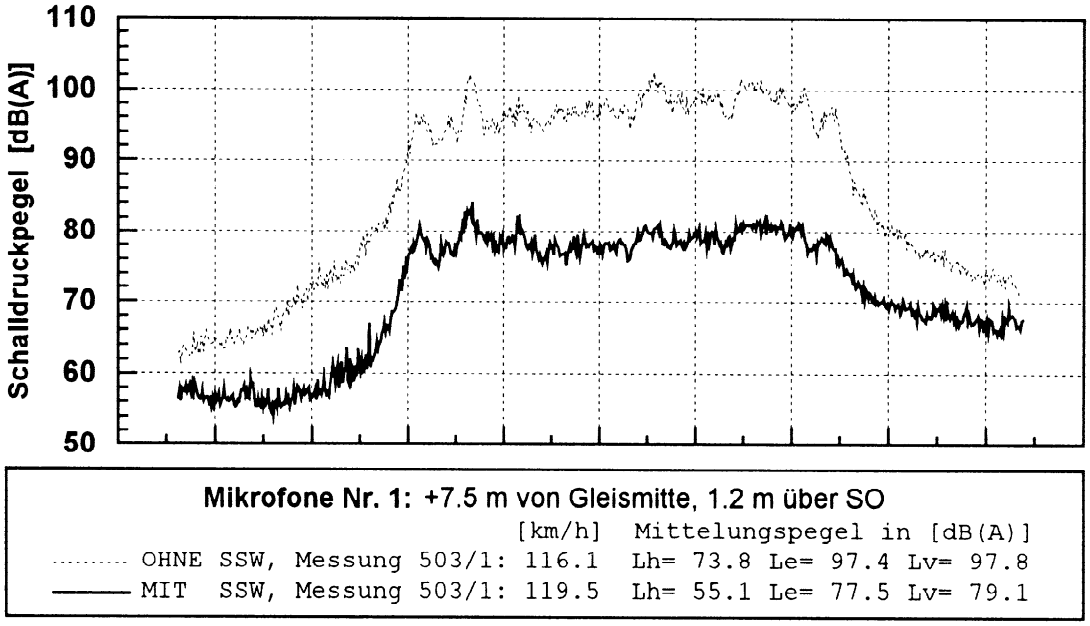


Bild A43 Güterzug, Fahrt 503, Mikrofone 1 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Pegelverläufe bei geschliffenen Schienen

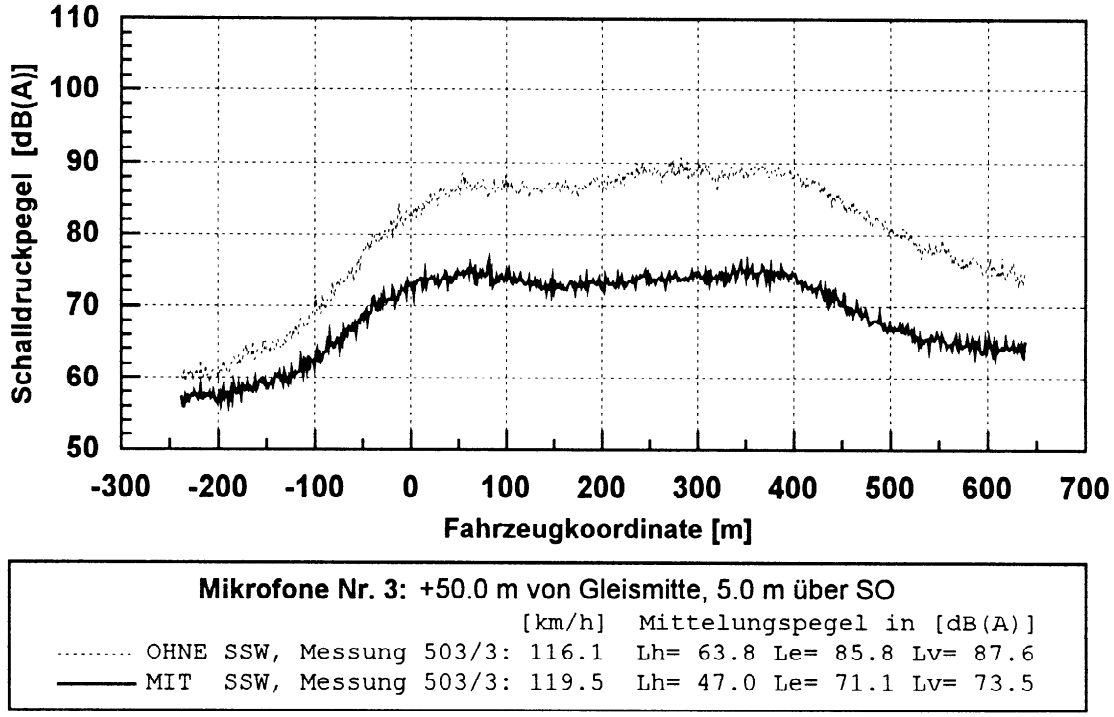


Bild A44 Güterzug, Fahrt 503, Mikrofone 3 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Pegelverläufe bei geschliffenen Schienen

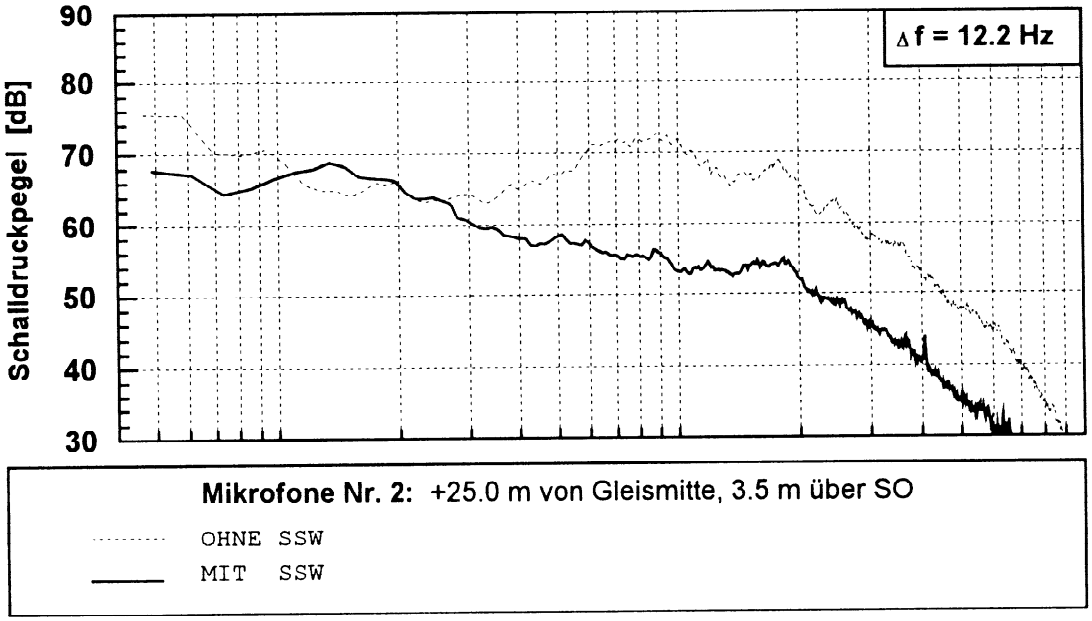


Bild A45 Güterzug, Fahrt 503, Mikrofone 2 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Schmalbandspektren bei geschliffenen Schienen

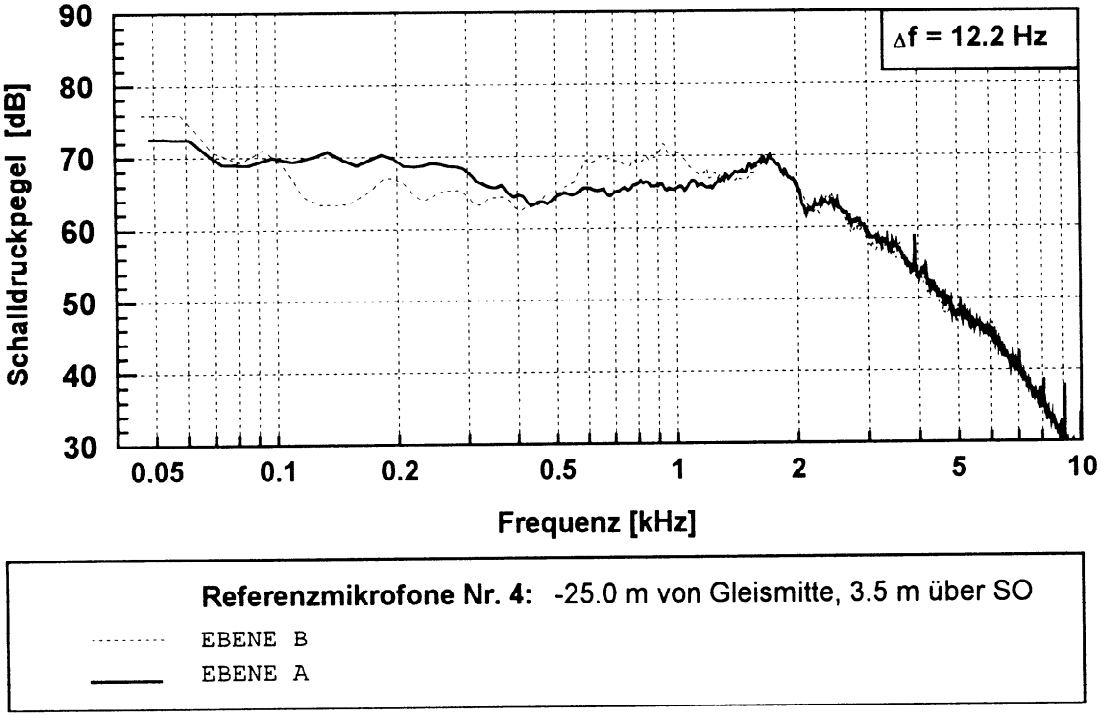


Bild A46 Güterzug, Fahrt 503, Mikrofone 4 auf jenseitiger Gleisseite ohne SSW in beiden Meßebenen, Schmalbandspektren bei geschliffenen Schienen

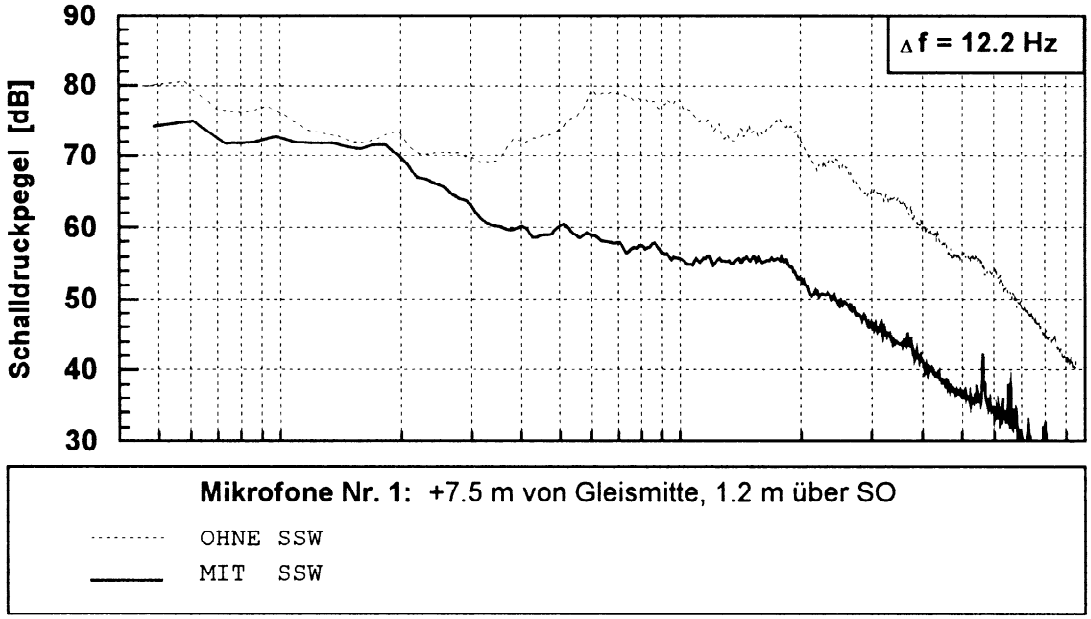


Bild A47 Güterzug, Fahrt 503, Mikrofone 1 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Schmalbandspektren bei geschliffenen Schienen

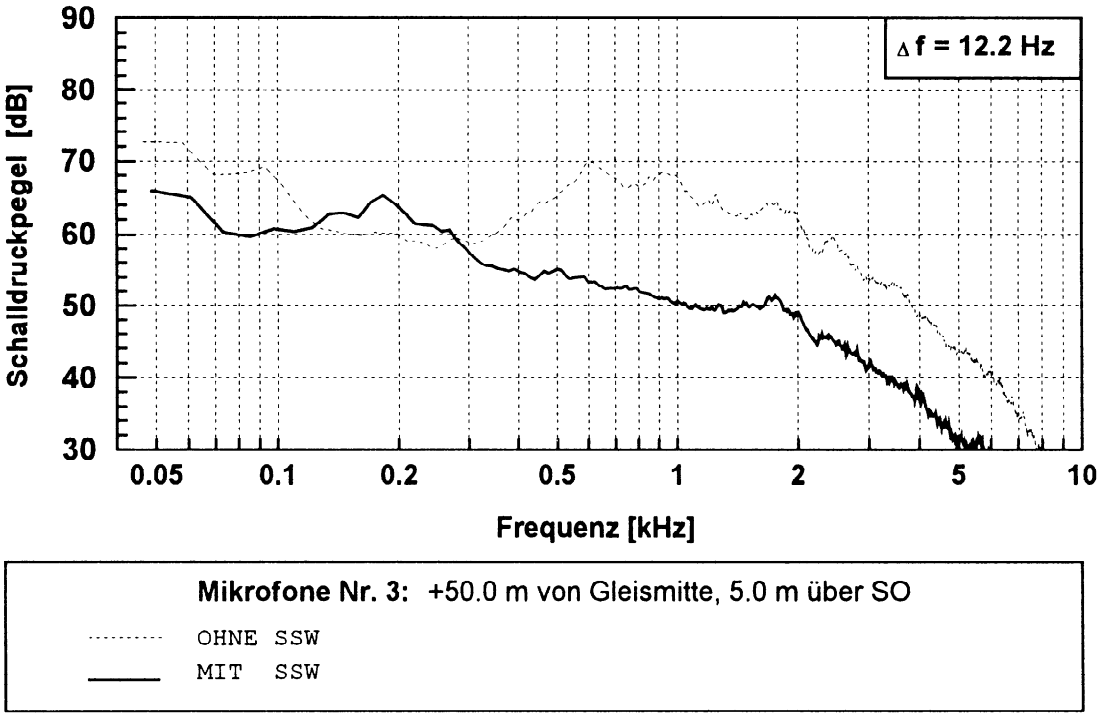


Bild A48 Güterzug, Fahrt 503, Mikrofone 3 in Meßebene A (mit SSW) und B (ohne SSW), Schmalbandspektren bei geschliffenen Schienen

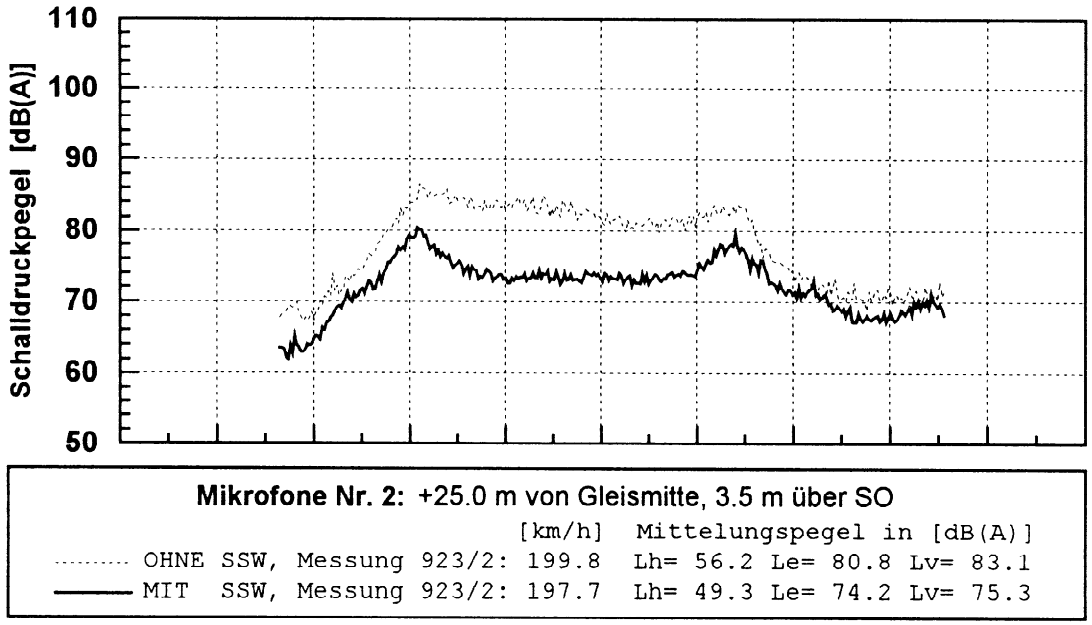


Bild A49 ICE 1, Fahrt 923, Mikrofone 2 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Pegelverläufe bei geschliffenen Schienen

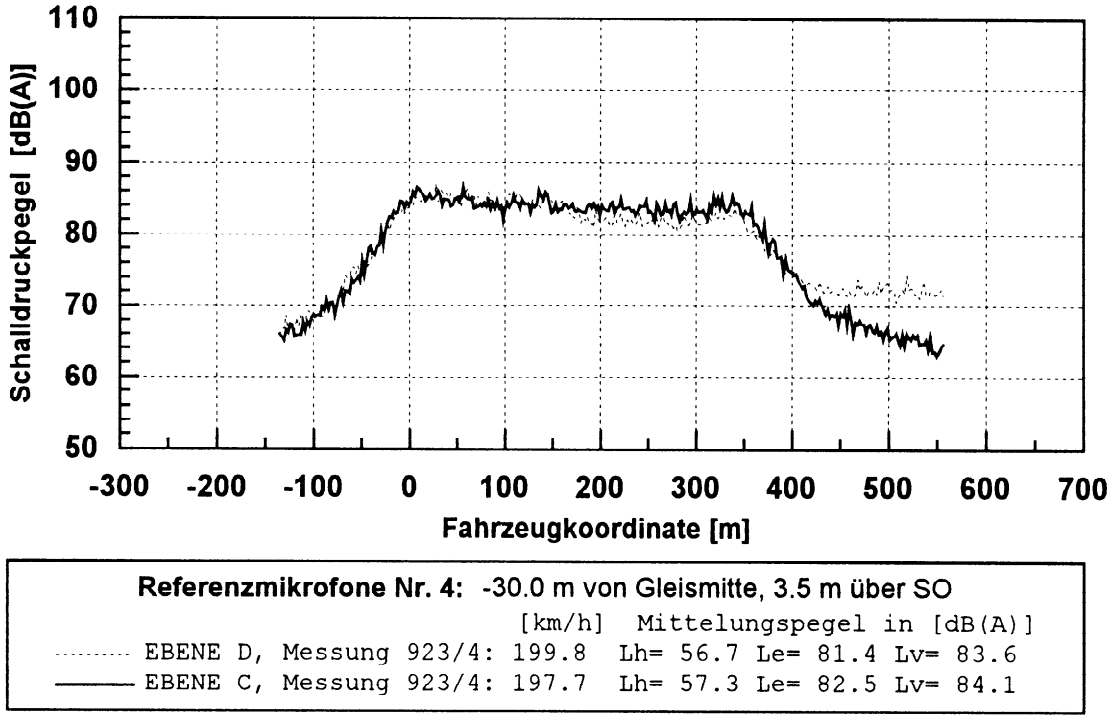


Bild A50 ICE 1, Fahrt 923, Mikrofone 4 auf jenseitiger Gleisseite ohne SSW in beiden Meßebenen, Pegelverläufe bei geschliffenen Schienen

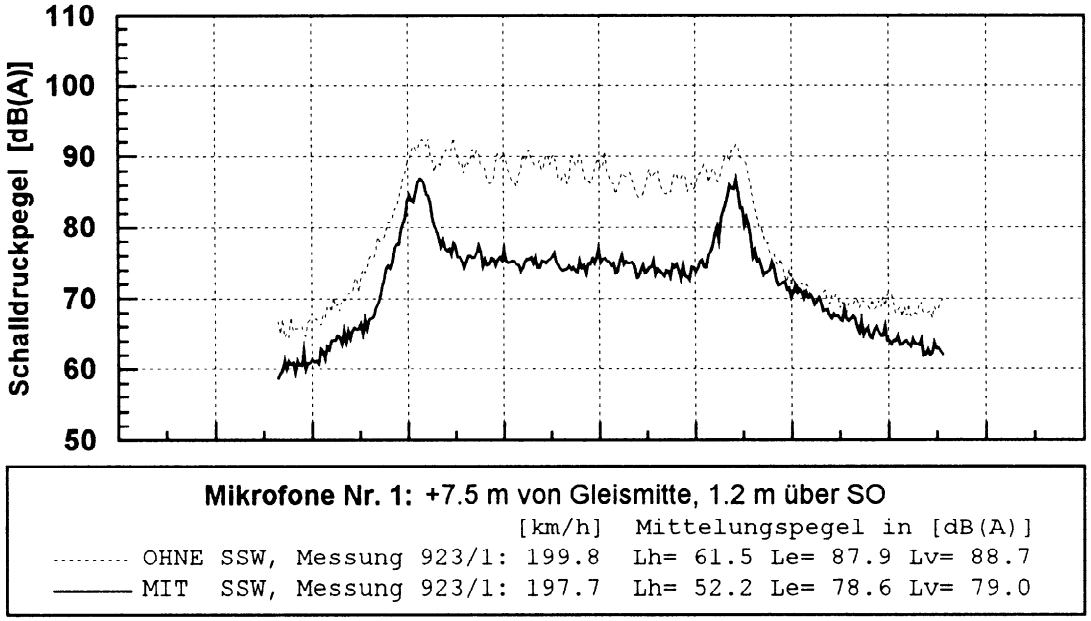


Bild A51 ICE 1, Fahrt 923, Mikrofone 1 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Pegelverläufe bei geschliffenen Schienen

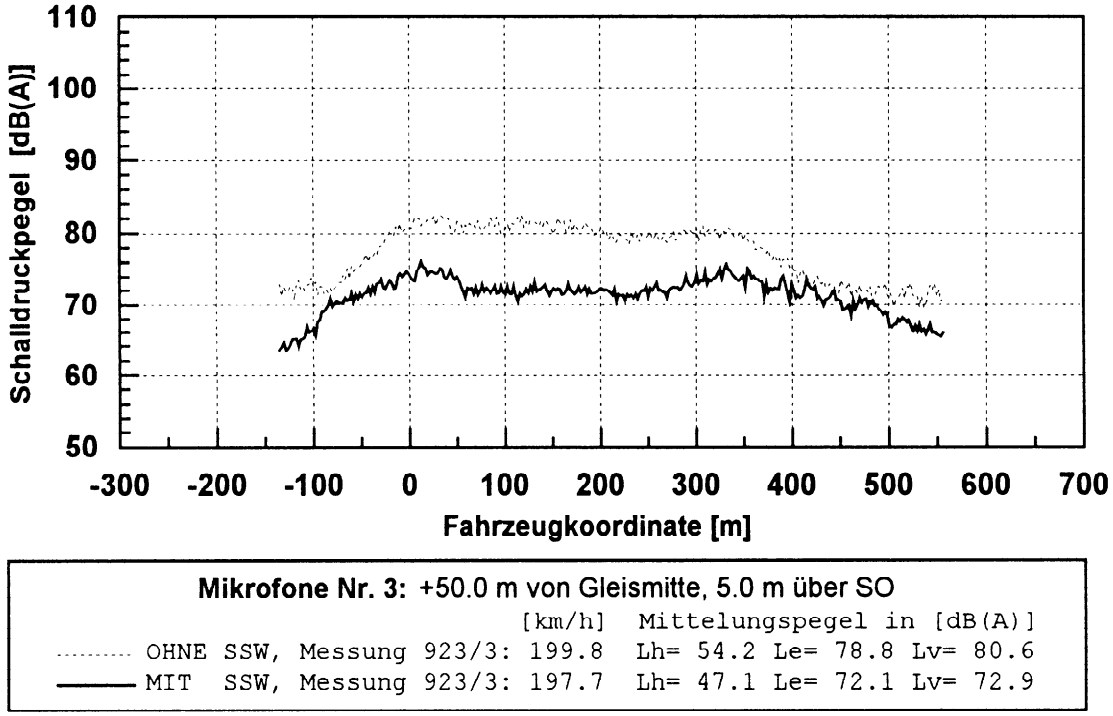


Bild A52 ICE 1, Fahrt 923, Mikrofone 3 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Pegelverläufe bei geschliffenen Schienen

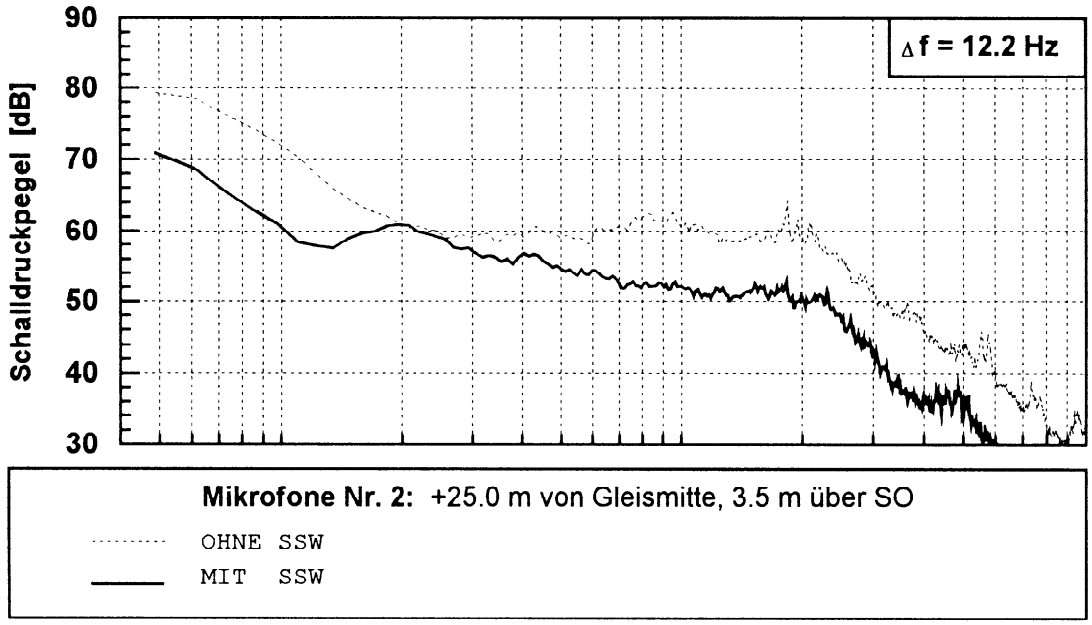


Bild A53 ICE 1, Fahrt 923, Mikrofone 2 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Schmalbandspektren bei geschliffenen Schienen

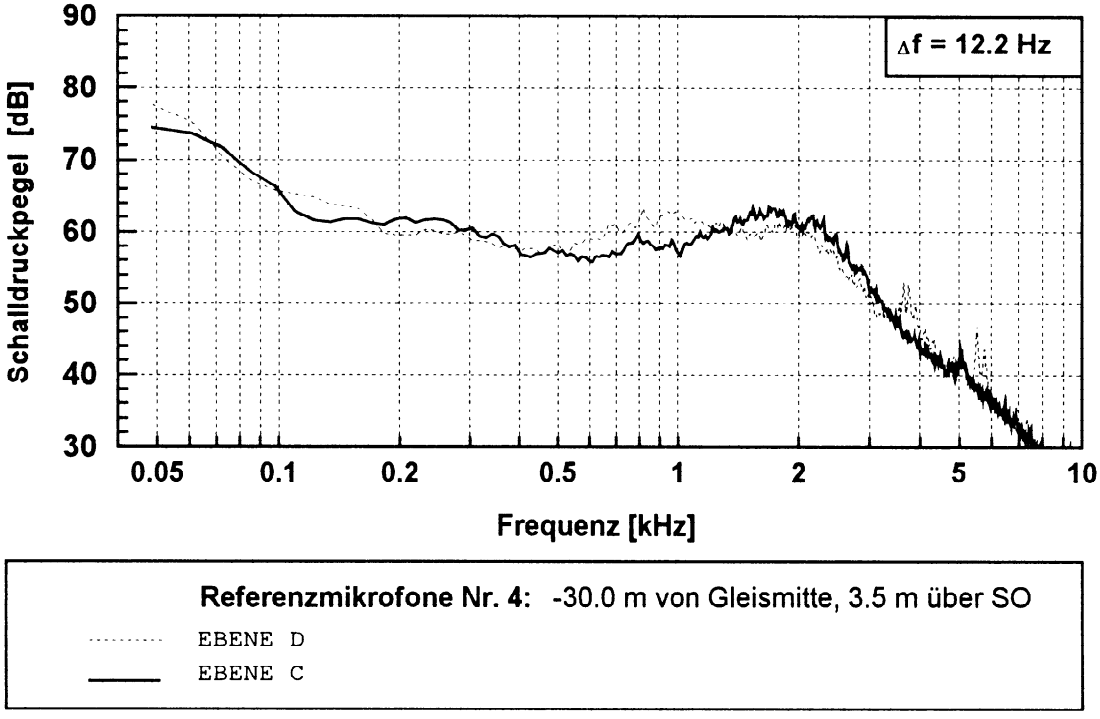


Bild A54 ICE 1, Fahrt 923, Mikrofone 4 auf jenseitiger Gleisseite ohne SSW in beiden Meßebenen, Schmalbandspektren bei geschliffenen Schienen

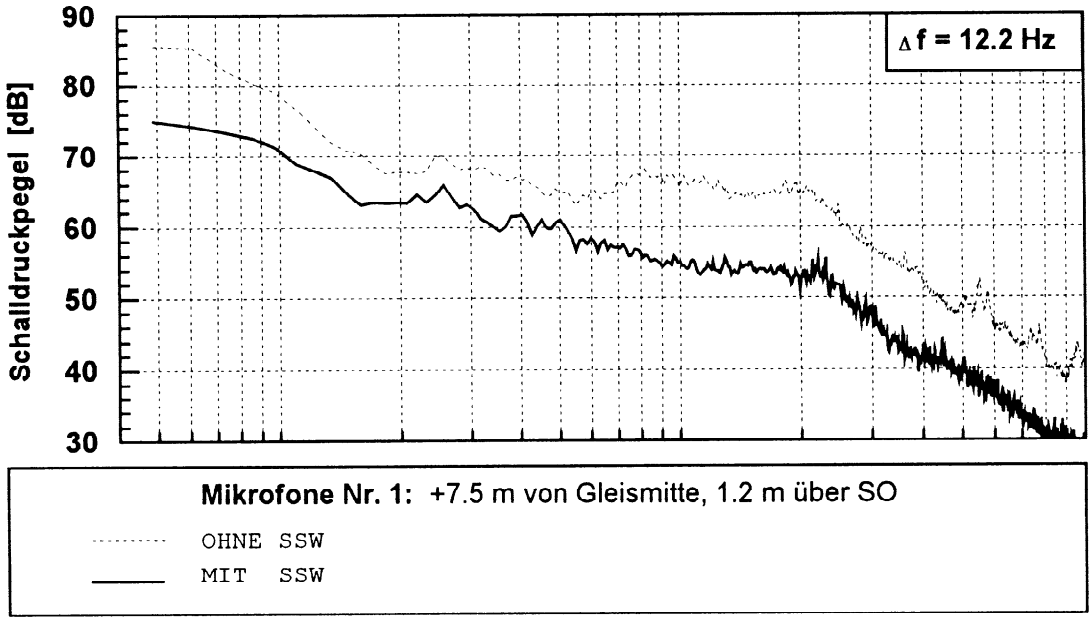


Bild A55 ICE 1, Fahrt 923, Mikrofone 1 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Schmalbandspektren bei geschliffenen Schienen

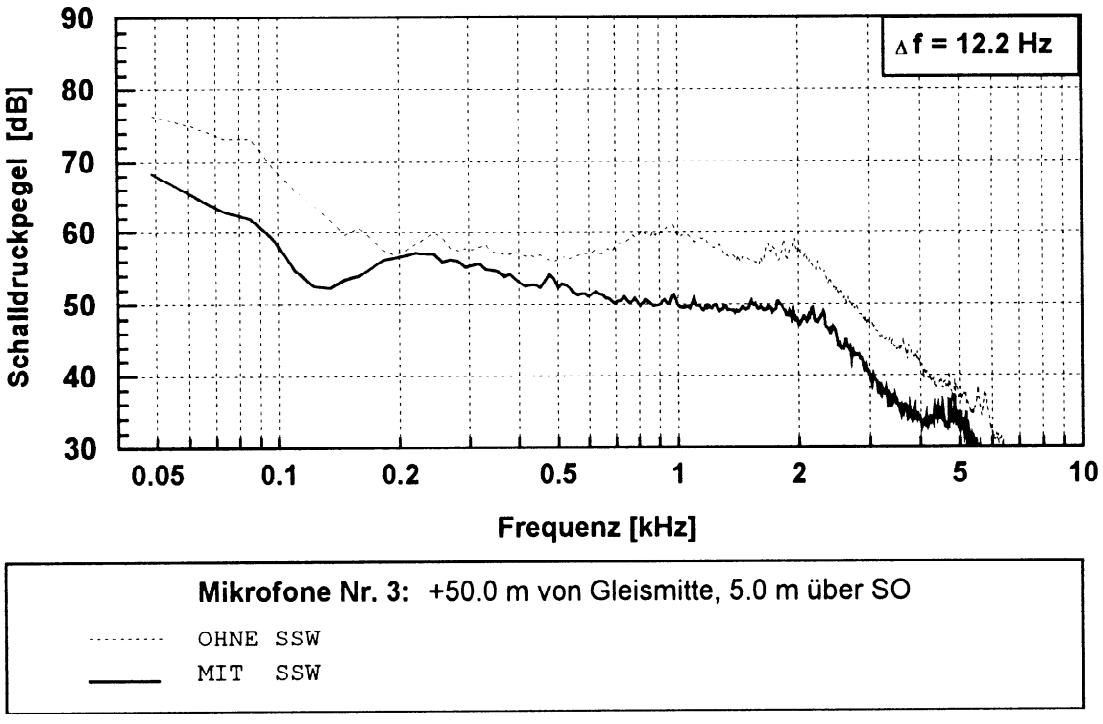


Bild A56 ICE 1, Fahrt 923, Mikrofone 3 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Schmalbandspektren bei geschliffenen Schienen

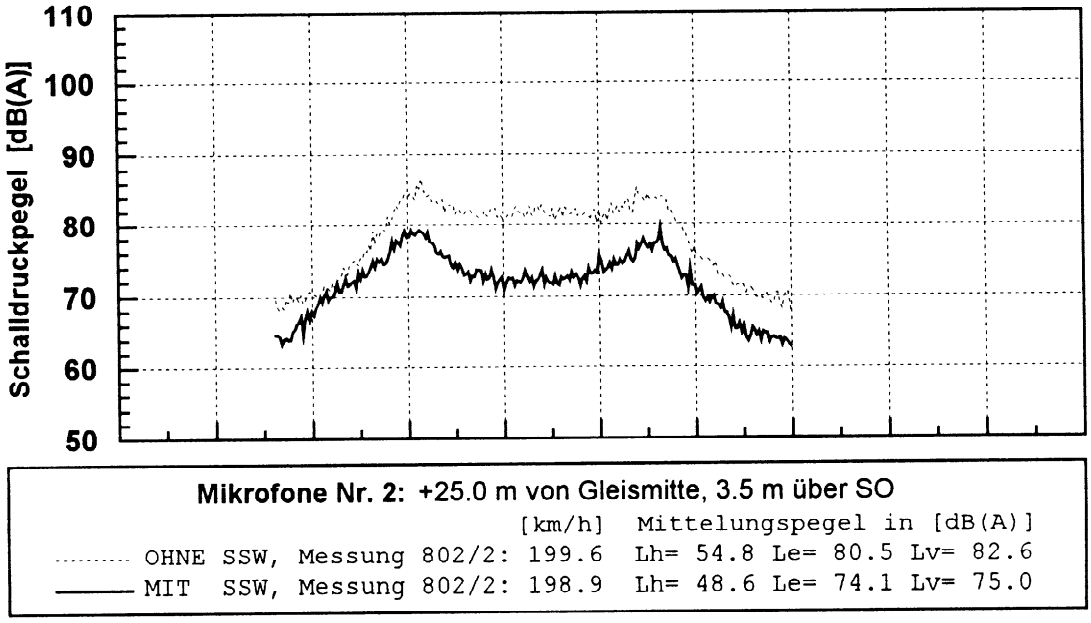


Bild A57 ICE 2, Fahrt 802, Mikrofone 2 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Pegelverläufe bei geschliffenen Schienen

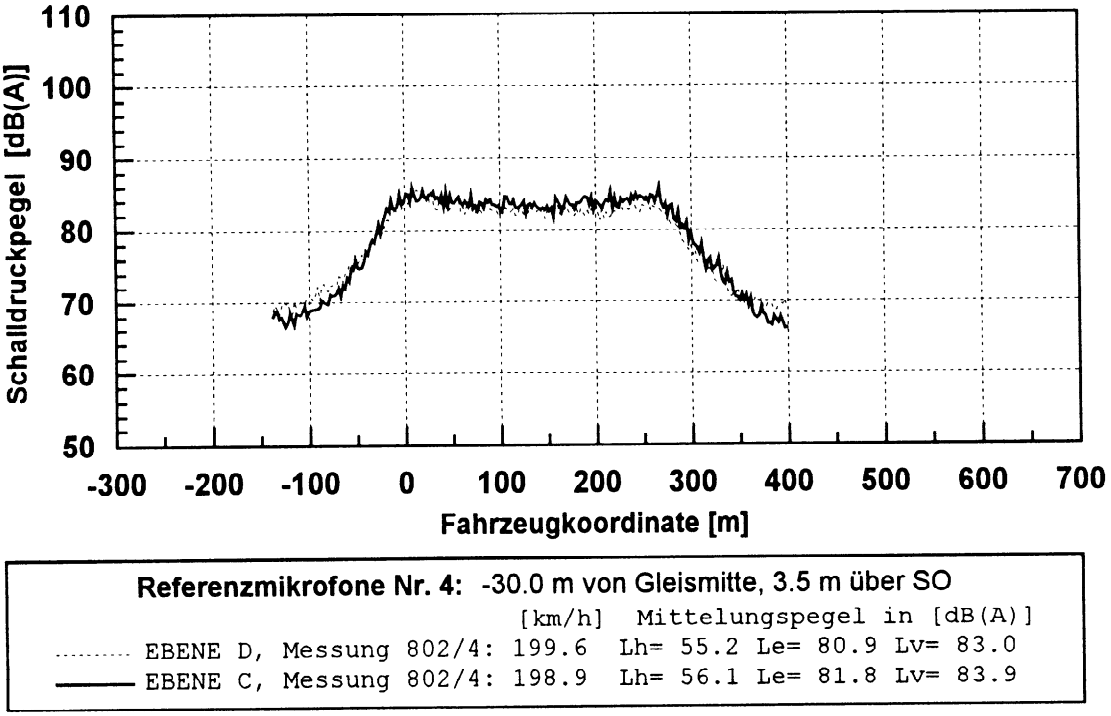


Bild A58 ICE 2, Fahrt 802, Mikrofone 4 auf jenseitiger Gleisseite ohne SSW in beiden Meßebenen, Pegelverläufe bei geschliffenen Schienen

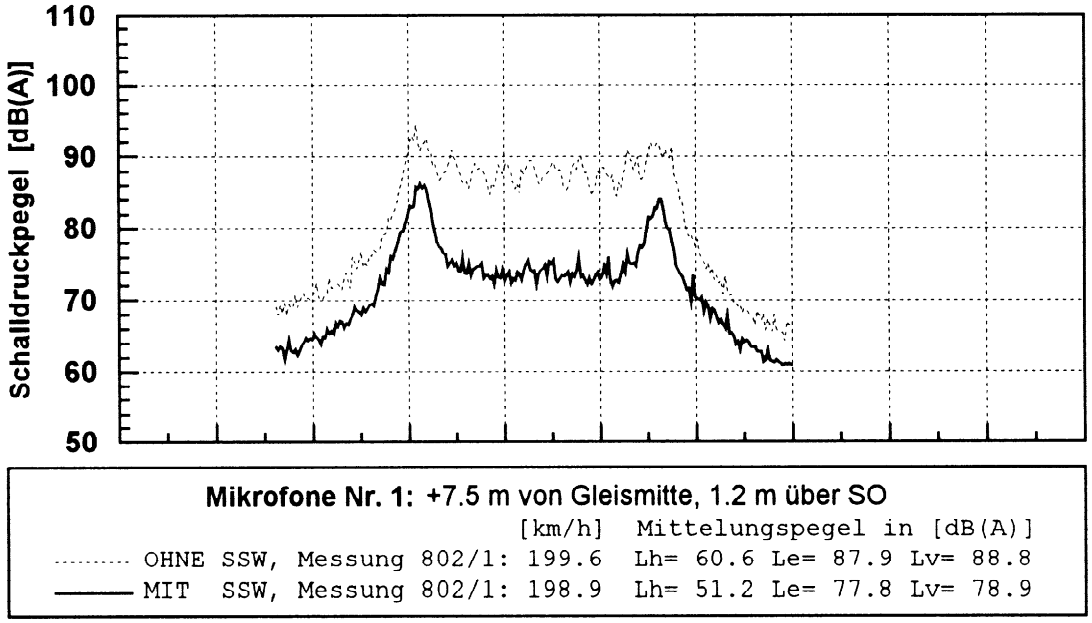


Bild A59 ICE 2, Fahrt 802, Mikrofone 1 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Pegelverläufe bei geschliffenen Schienen

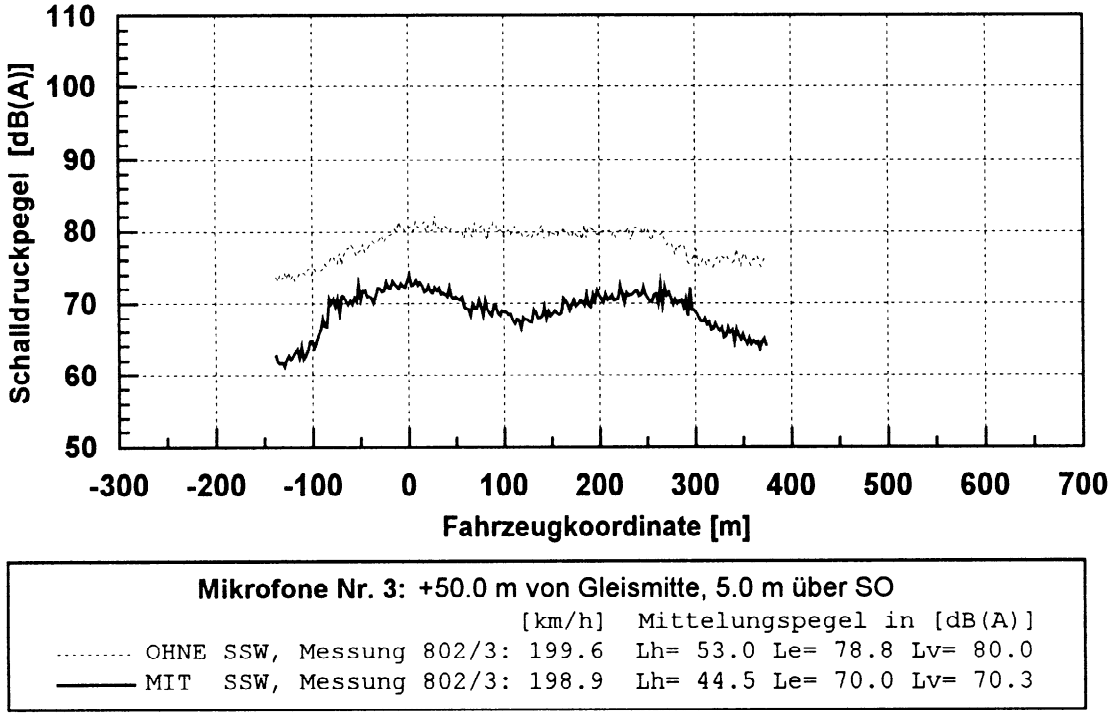


Bild A60 ICE 2, Fahrt 802, Mikrofone 3 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Pegelverläufe bei geschliffenen Schienen

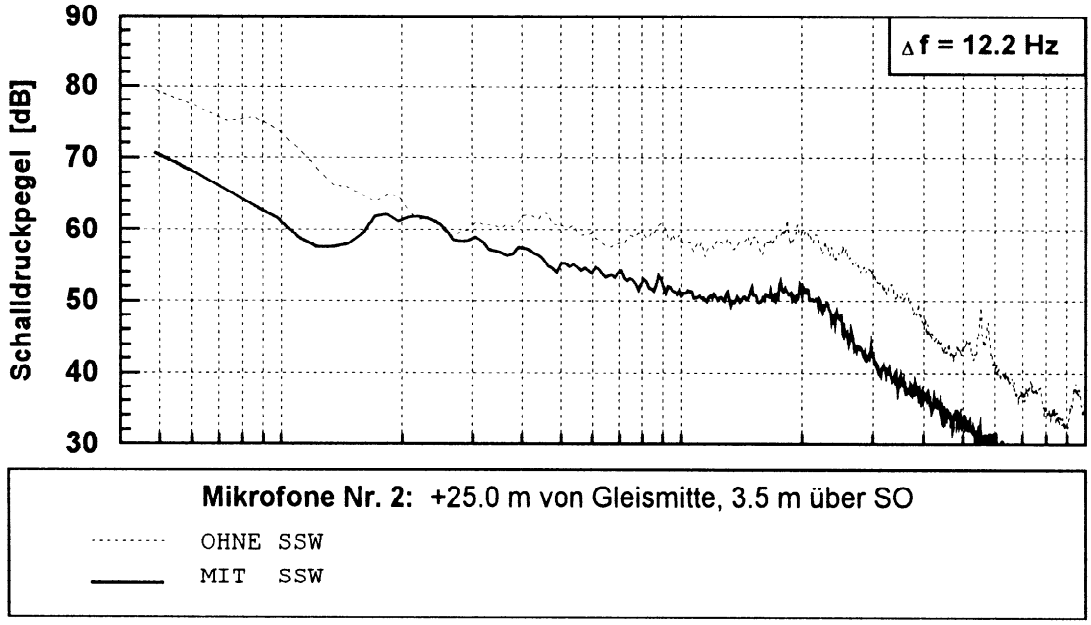


Bild A61 ICE 2, Fahrt 802, Mikrofone 2 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Schmalbandspektren bei geschliffenen Schienen

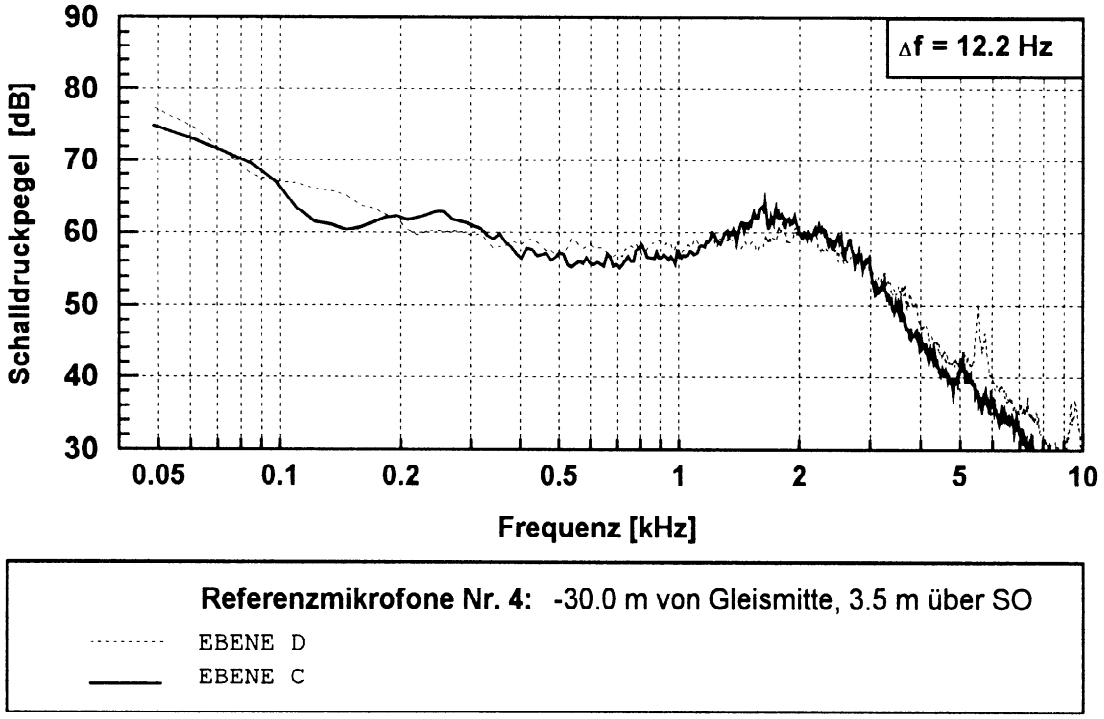


Bild A62 ICE 2, Fahrt 802, Mikrofone 4 auf jenseitiger Gleisseite ohne SSW in beiden Meßebenen, Schmalbandspektren bei geschliffenen Schienen

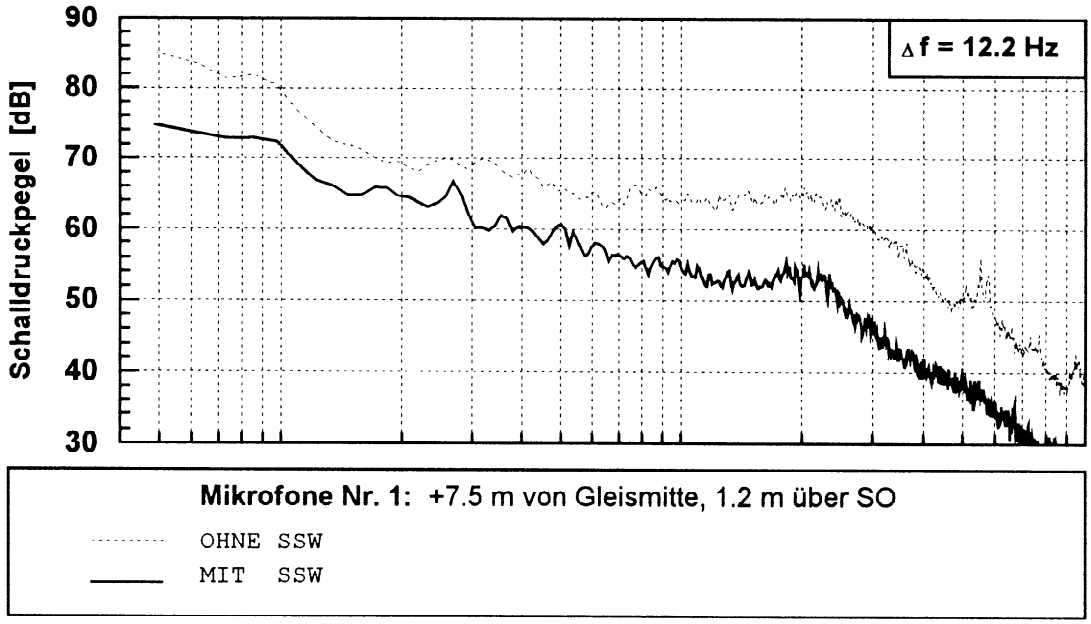


Bild A63 ICE 2, Fahrt 802, Mikrofone 1 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Schmalbandspektren bei geschliffenen Schienen

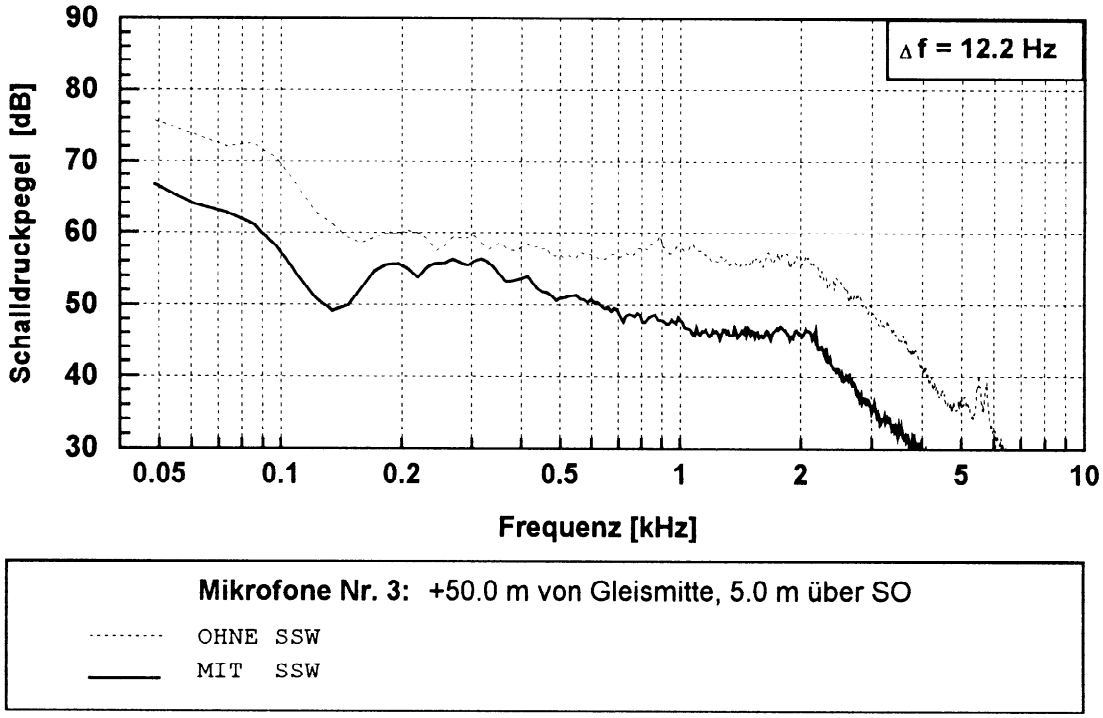


Bild A64 ICE 2, Fahrt 802, Mikrofone 3 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Schmalbandspektren bei geschliffenen Schienen

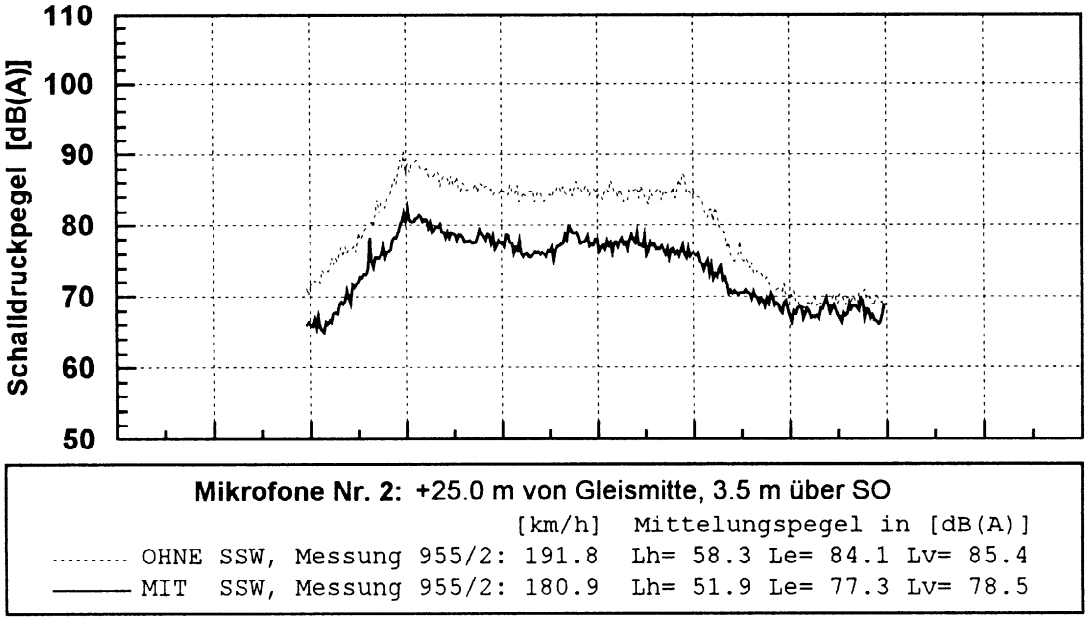


Bild A65 IC-Zug, Fahrt 955, Mikrofone 2 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Pegelverläufe bei geschliffenen Schienen

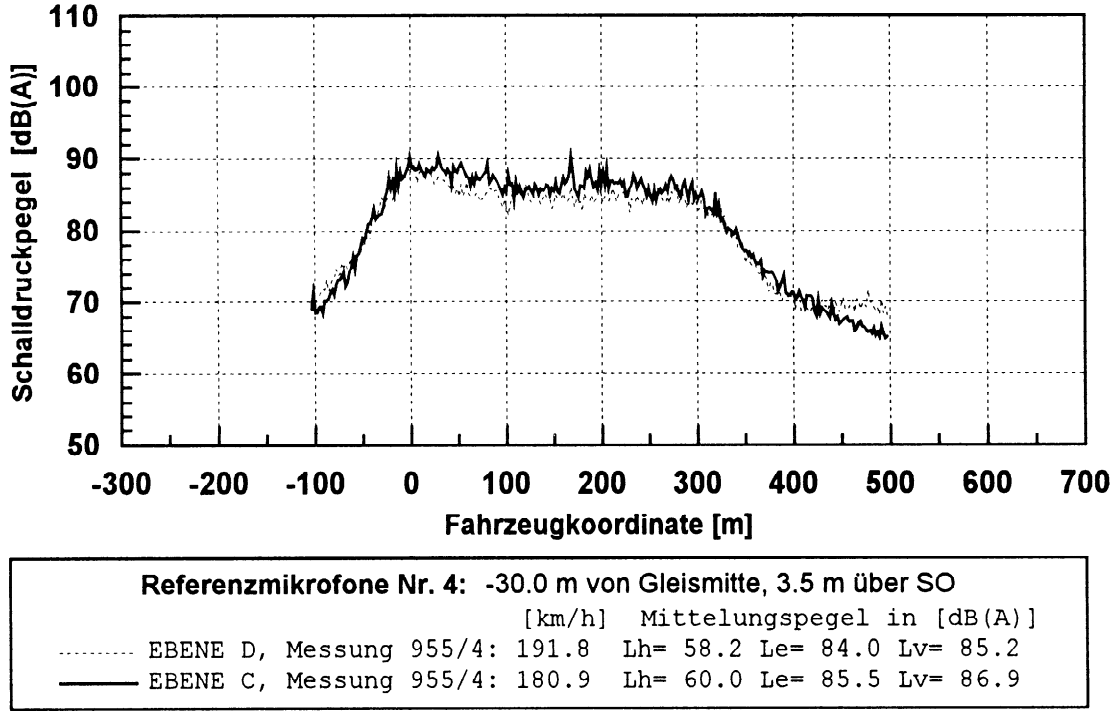


Bild A66 IC-Zug, Fahrt 955, Mikrofone 4 auf jenseitiger Gleisseite ohne SSW in beiden Meßebenen, Pegelverläufe bei geschliffenen Schienen

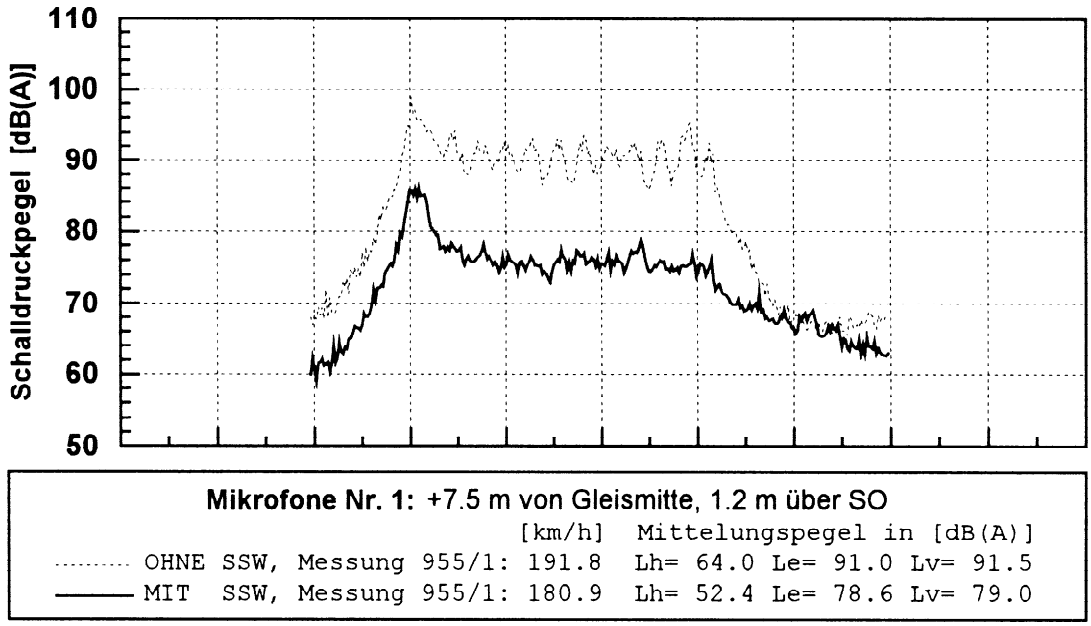


Bild A67 IC-Zug, Fahrt 955, Mikrofone 1 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Pegelverläufe bei geschliffenen Schienen

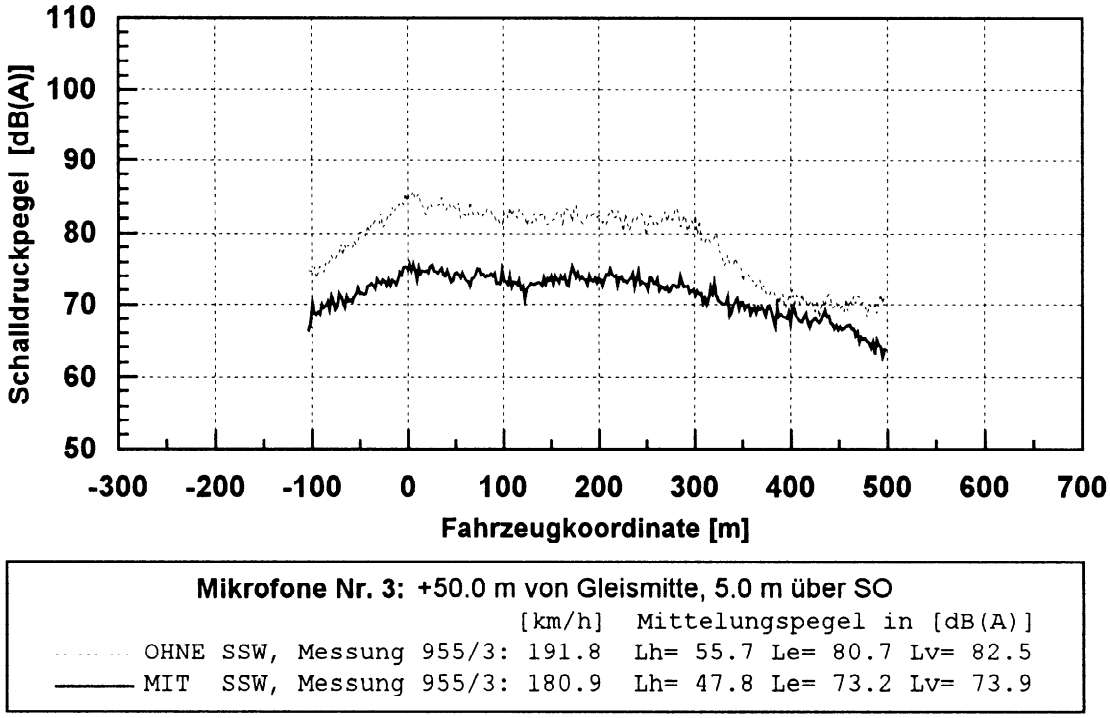


Bild A68 IC-Zug, Fahrt 955, Mikrofone 3 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Pegelverläufe bei geschliffenen Schienen

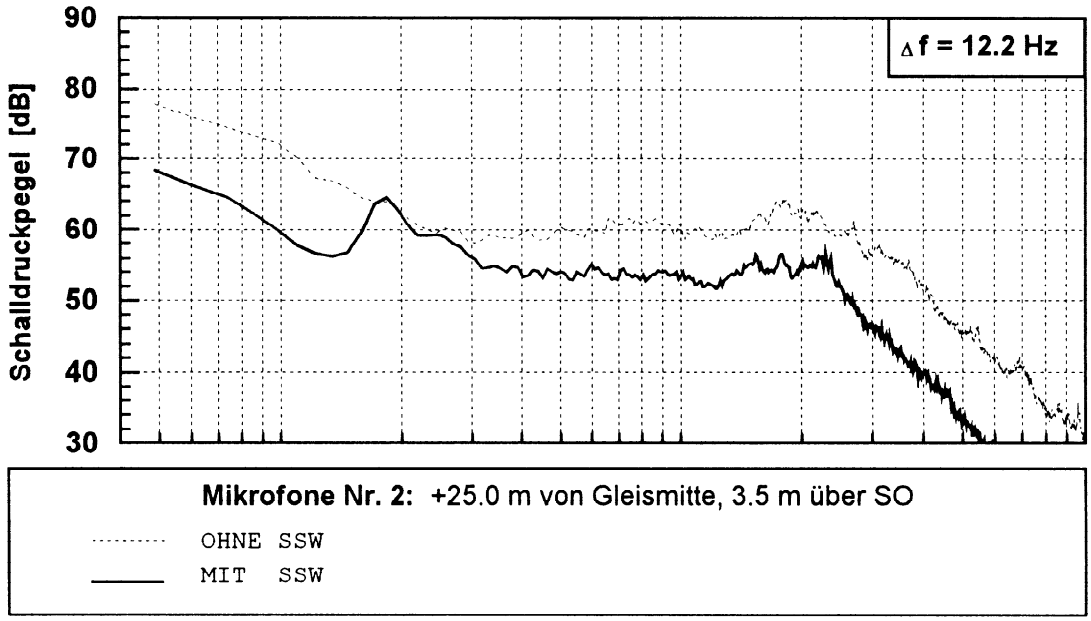


Bild A69 IC-Zug, Fahrt 955, Mikrofone 2 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Schmalbandspektren bei geschliffenen Schienen

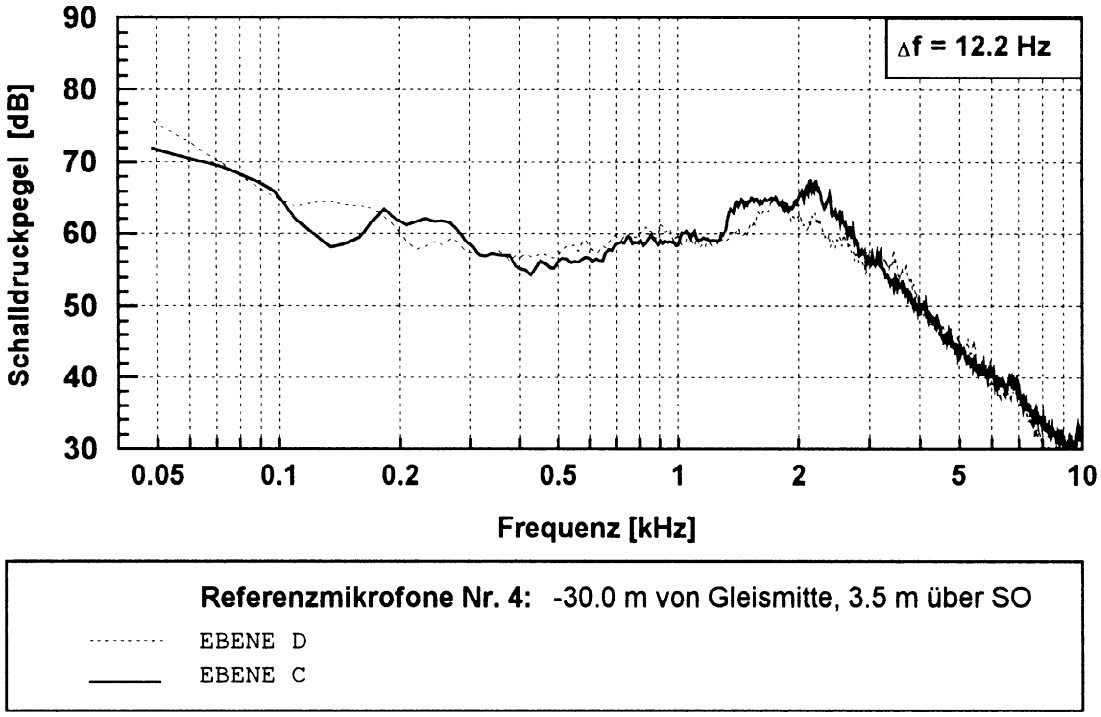


Bild A70 IC-Zug, Fahrt 955, Mikrofone 4 auf jenseitiger Gleisseite ohne SSW in beiden Meßebenen, Schmalbandspektren bei geschliffenen Schienen

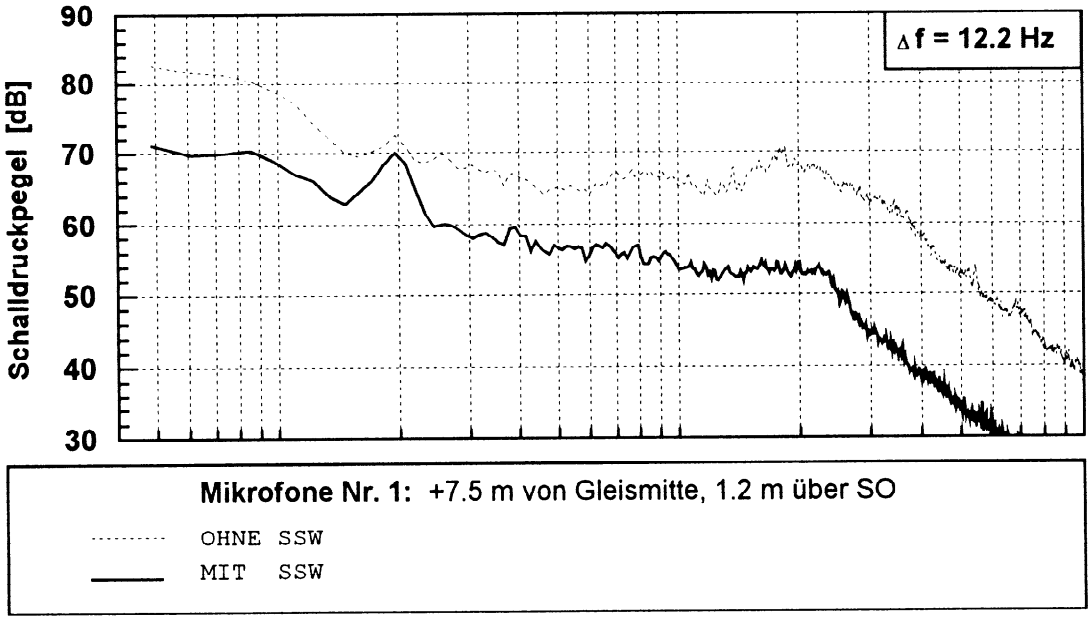


Bild A71 IC-Zug, Fahrt 955, Mikrofone 1 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Schmalbandspektren bei geschliffenen Schienen

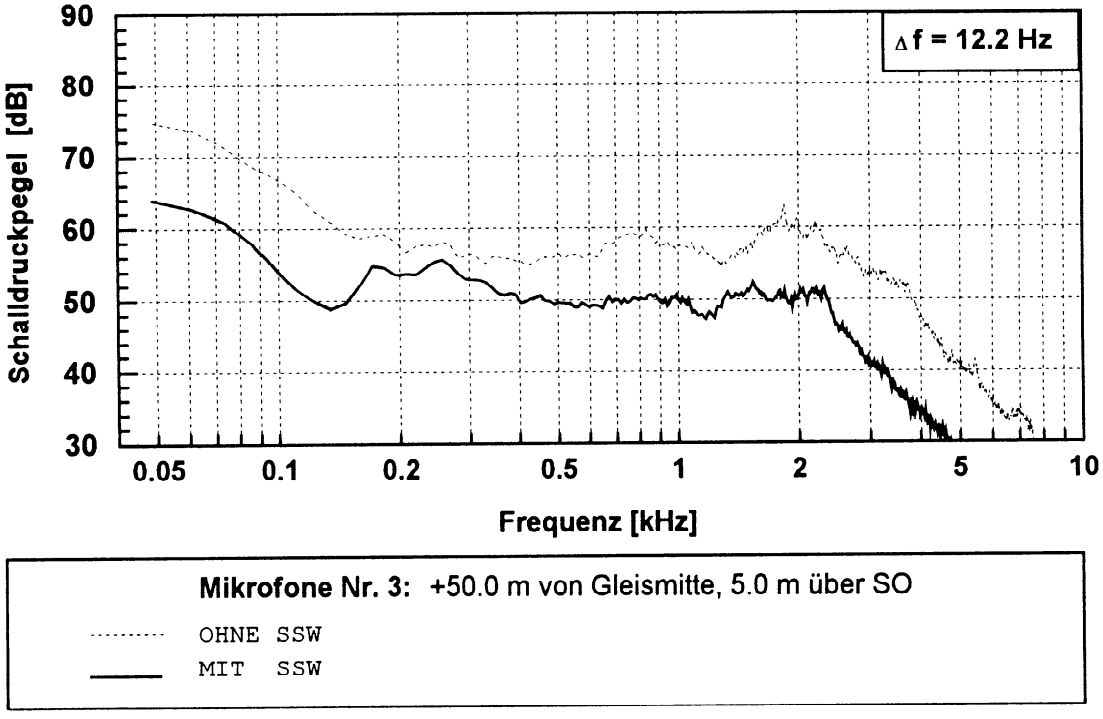


Bild A72 IC-Zug, Fahrt 955, Mikrofone 3 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Schmalbandspektren bei geschliffenen Schienen

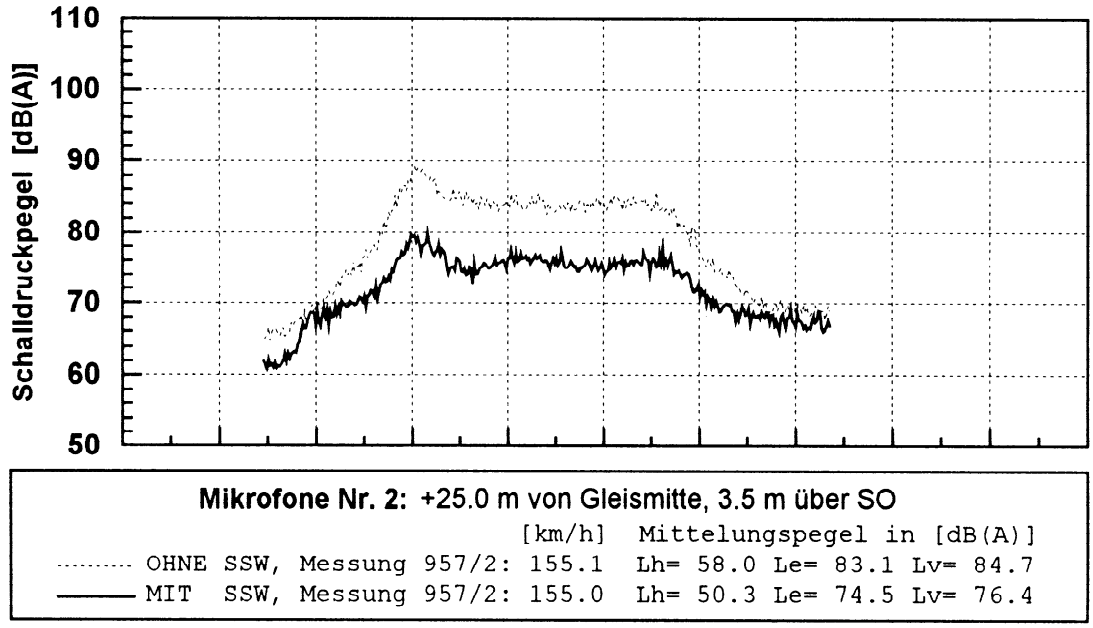


Bild A73 IR-Zug, Fahrt 957, Mikrofone 2 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Pegelverläufe bei geschliffenen Schienen

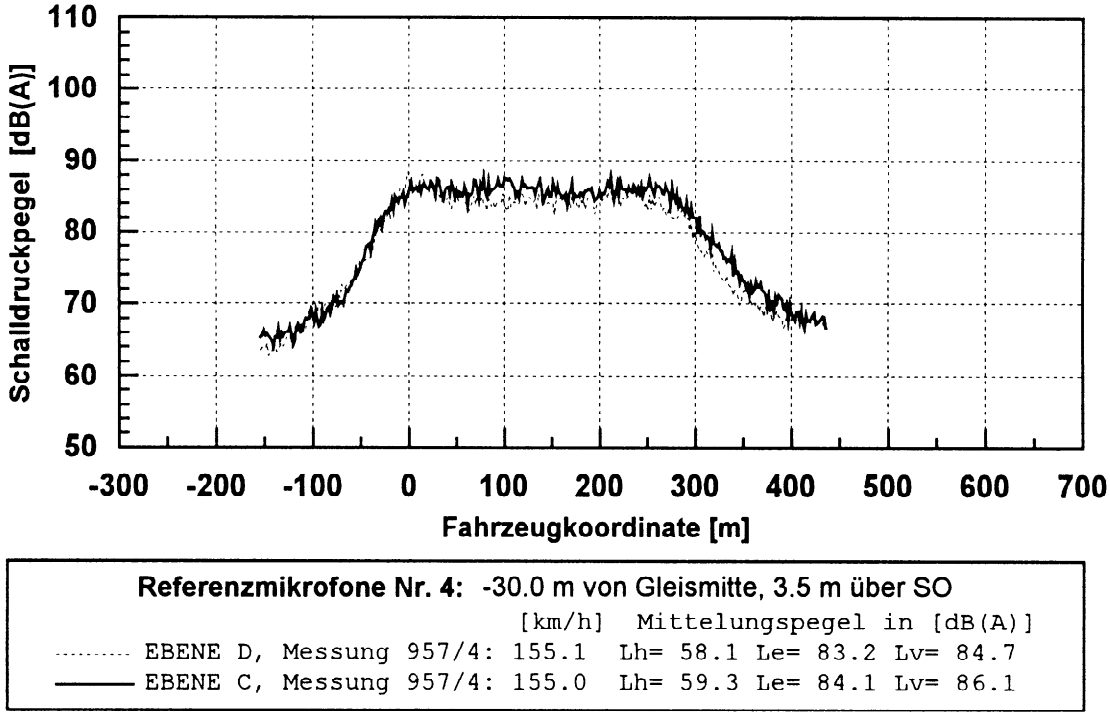


Bild A74 IR-Zug, Fahrt 957, Mikrofone 4 auf jenseitiger Gleisseite ohne SSW in beiden Meßebenen, Pegelverläufe bei geschliffenen Schienen

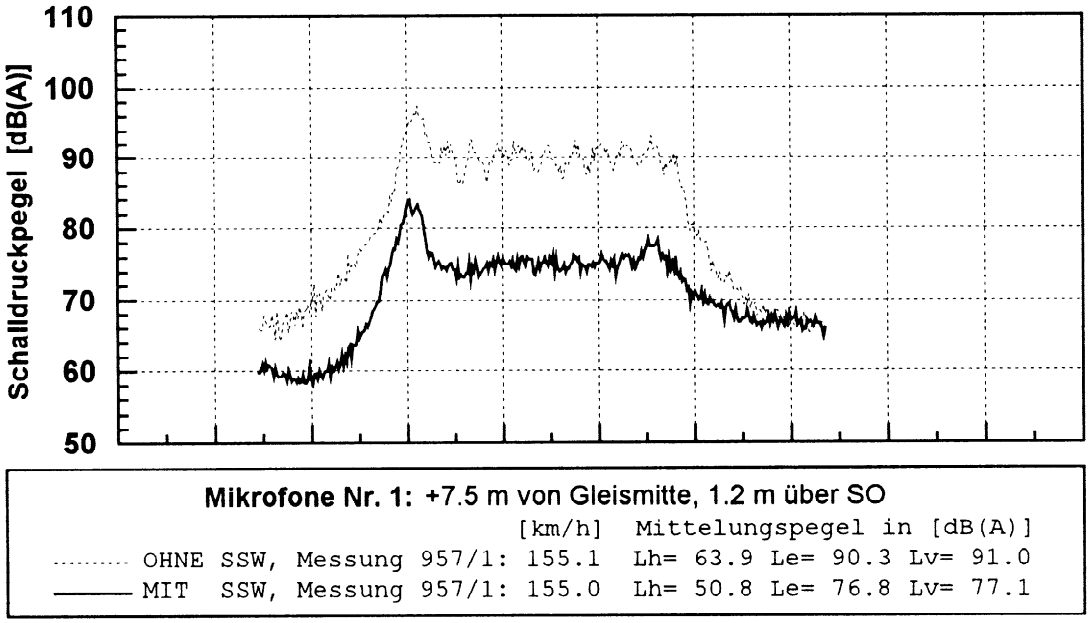


Bild A75 IR-Zug, Fahrt 957, Mikrofone 1 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Pegelverläufe bei geschliffenen Schienen

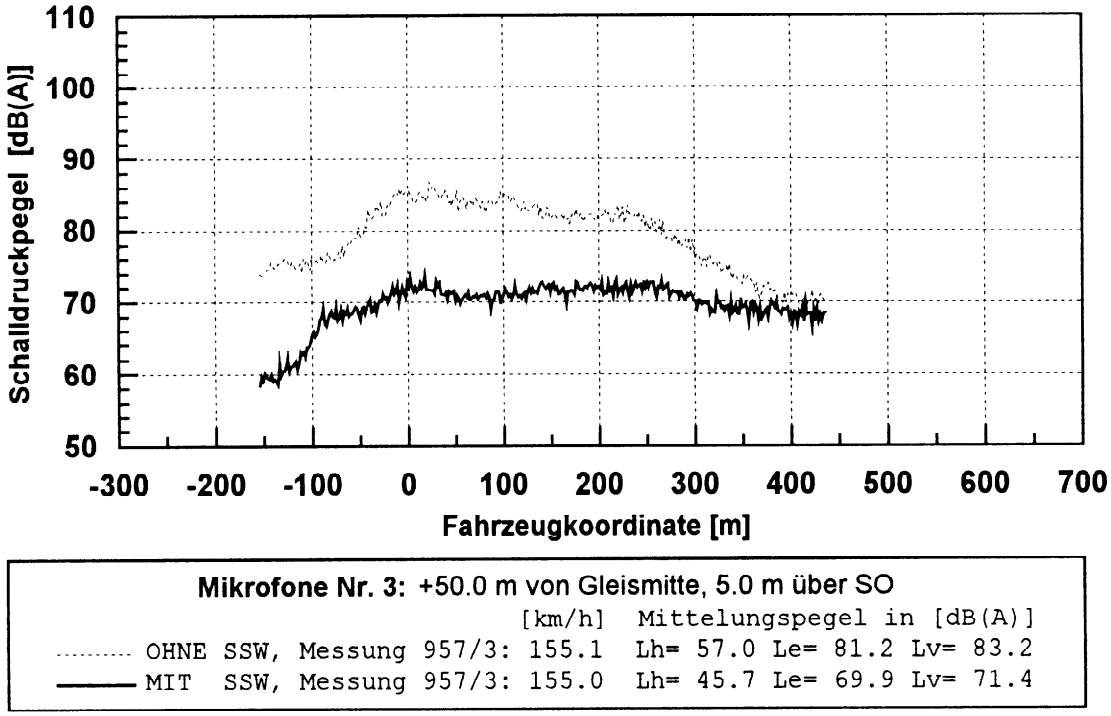


Bild A76 IR-Zug, Fahrt 957, Mikrofone 3 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Pegelverläufe bei geschliffenen Schienen

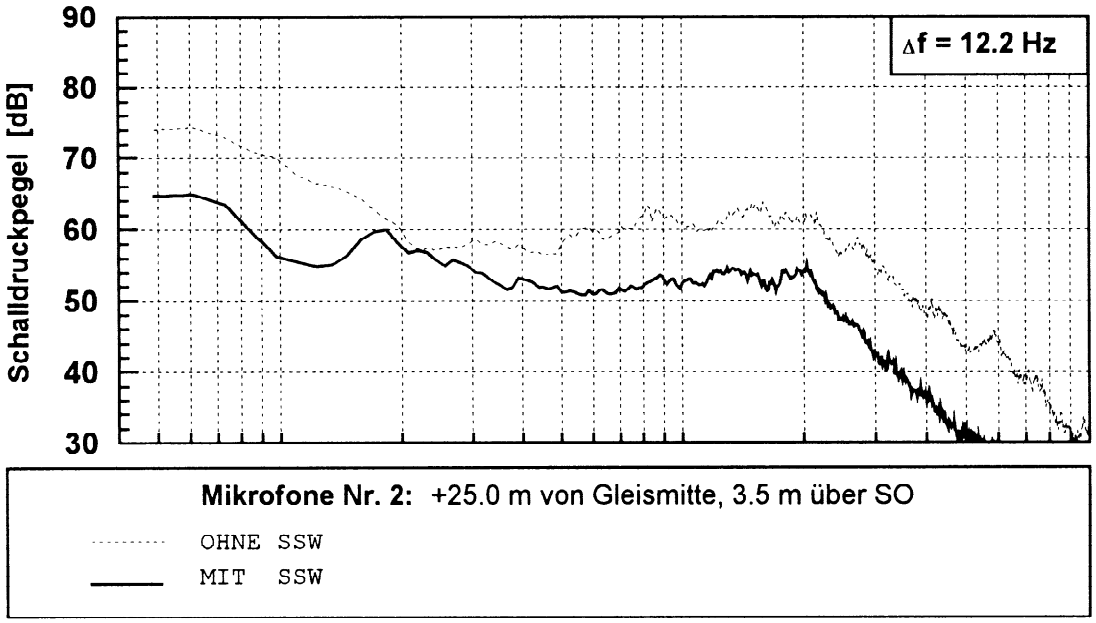


Bild A77 IR-Zug, Fahrt 957, Mikrofone 2 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Schmalbandspektren bei geschliffenen Schienen

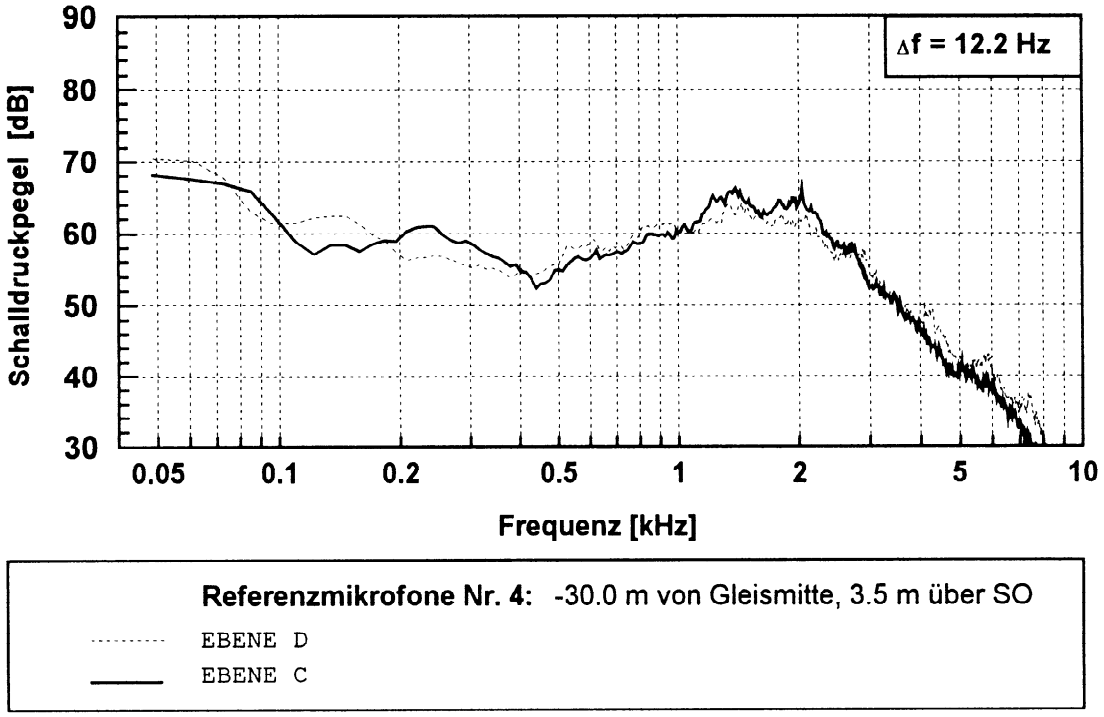


Bild A78 IR-Zug, Fahrt 957, Mikrofone 4 auf jenseitiger Gleisseite ohne SSW in beiden Meßebenen, Schmalbandspektren bei geschliffenen Schienen

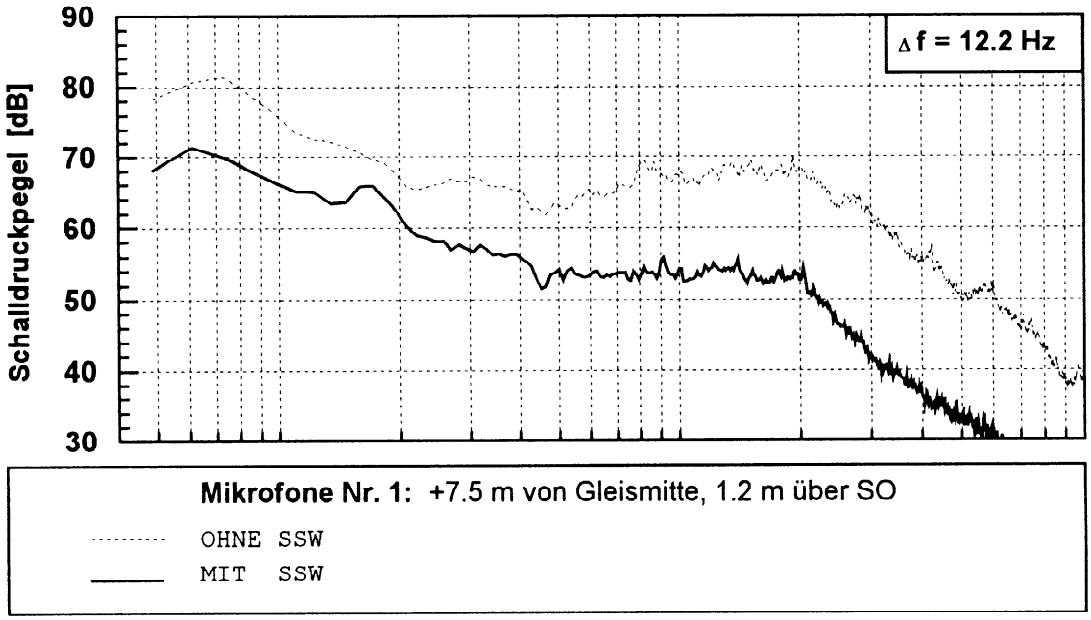


Bild A79 IR-Zug, Fahrt 957, Mikrofone 1 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Schmalbandspektren bei geschliffenen Schienen

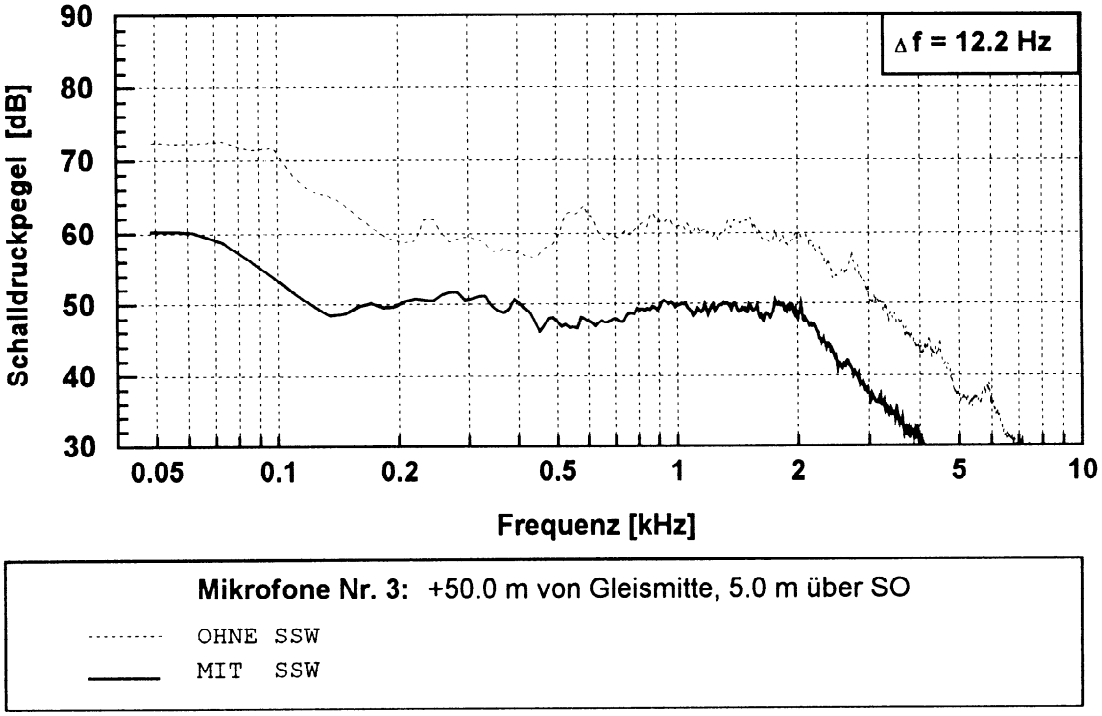


Bild A80 IR-Zug, Fahrt 957, Mikrofone 3 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Schmalbandspektren bei geschliffenen Schienen

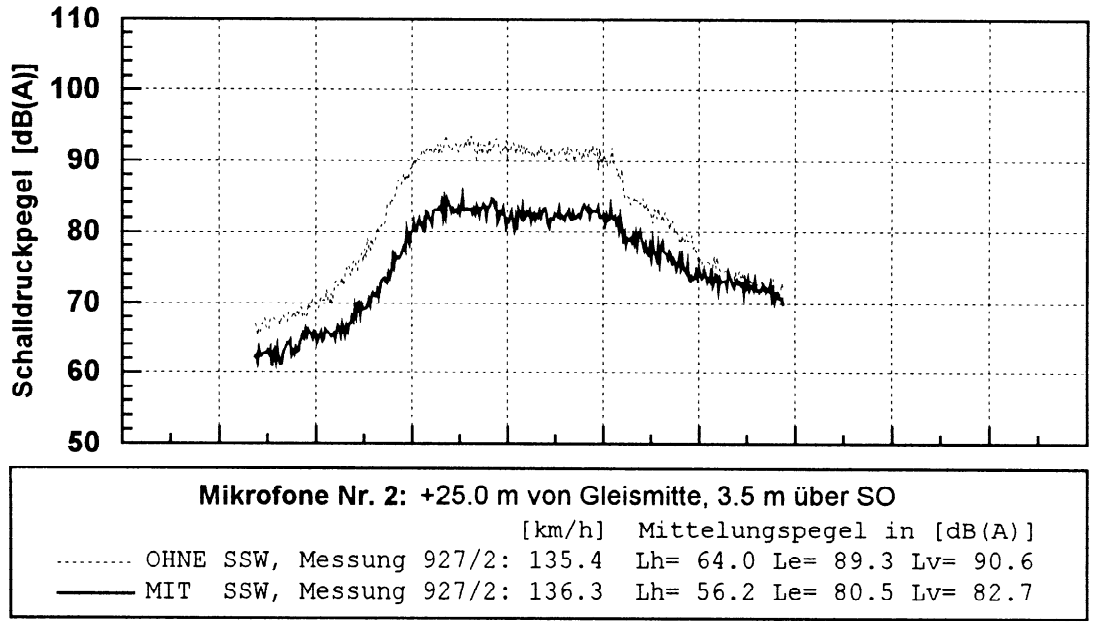


Bild A81 RE-Zug, Fahrt 927, Mikrofone 2 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Pegelverläufe bei geschliffenen Schienen

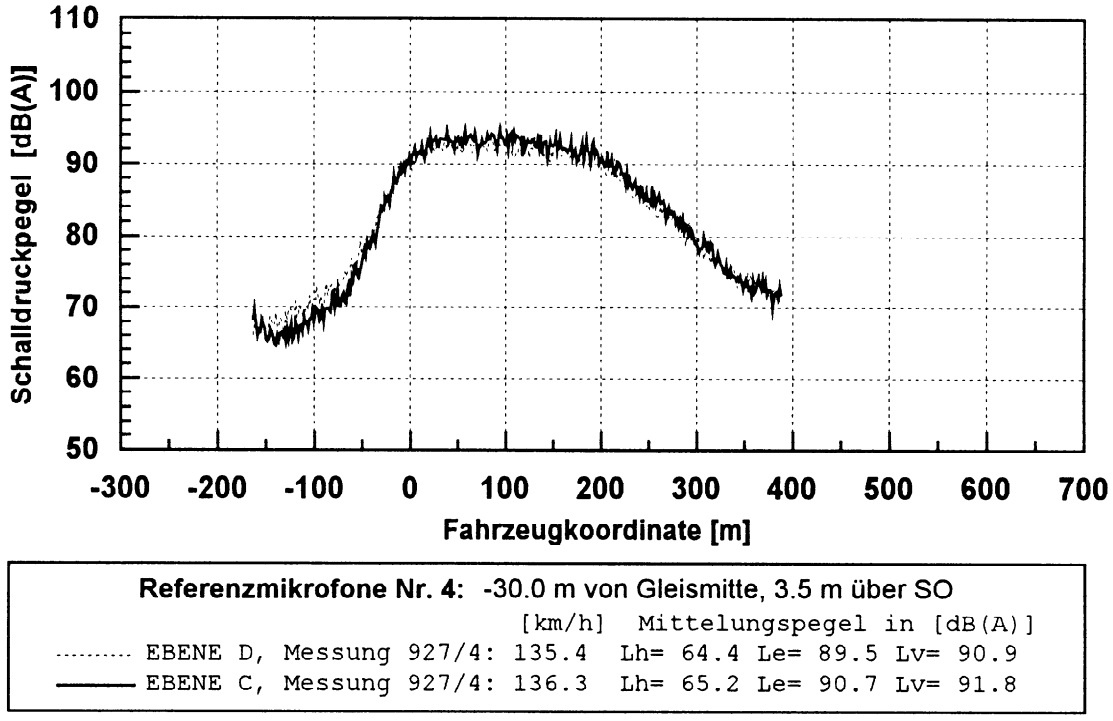


Bild A82 RE-Zug, Fahrt 927, Mikrofone 4 auf jenseitiger Gleisseite ohne SSW in beiden Meßebenen, Pegelverläufe bei geschliffenen Schienen

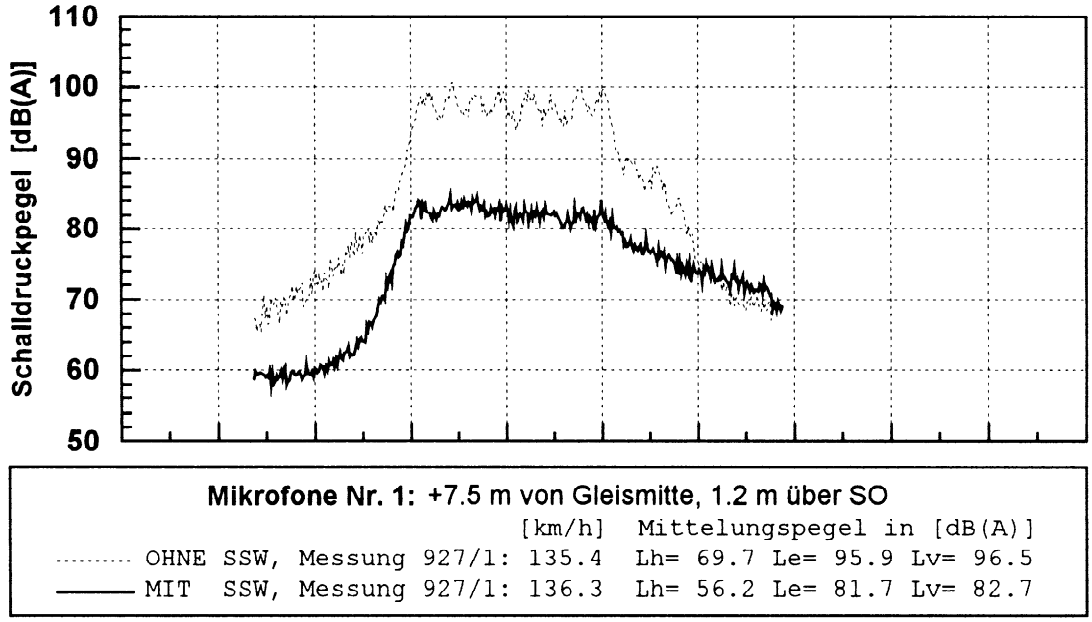


Bild A83 RE-Zug, Fahrt 927, Mikrofone 1 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Pegelverläufe bei geschliffenen Schienen

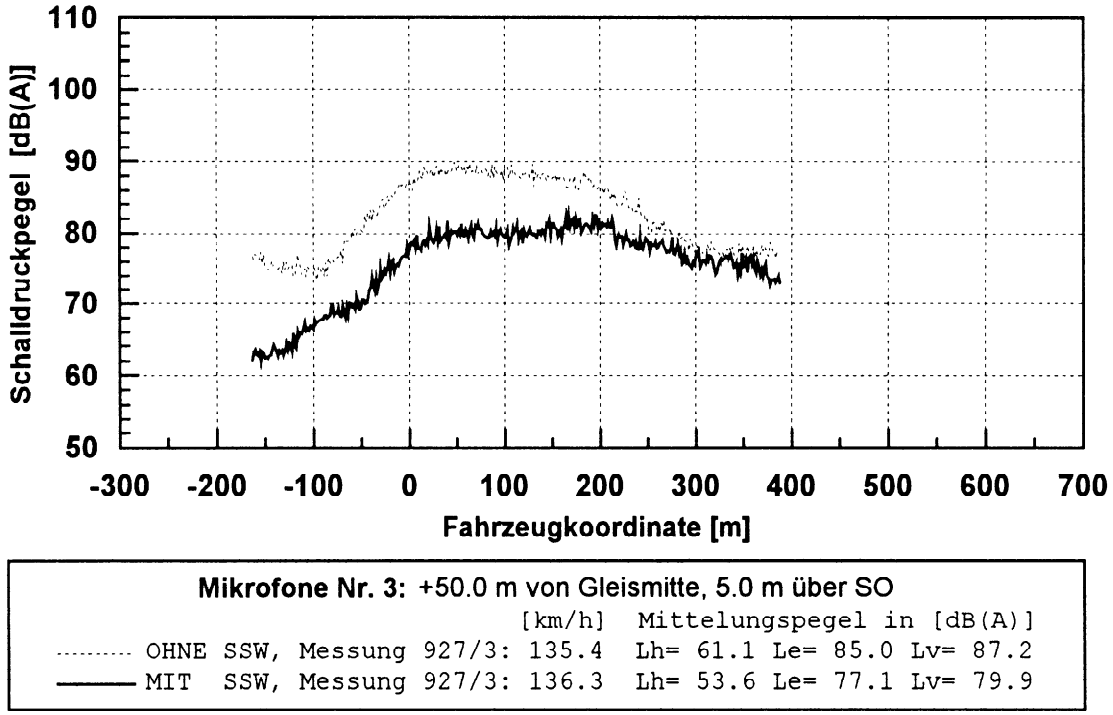


Bild A84 RE-Zug, Fahrt 927, Mikrofone 3 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Pegelverläufe bei geschliffenen Schienen

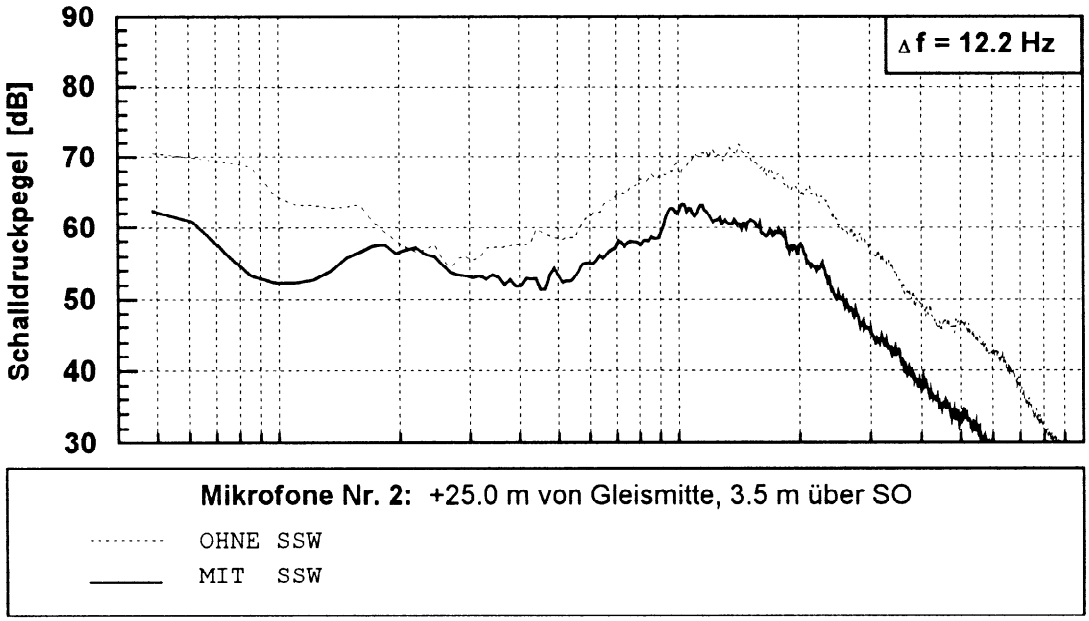


Bild A85 RE-Zug, Fahrt 927, Mikrofone 2 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Schmalbandspektren bei geschliffenen Schienen

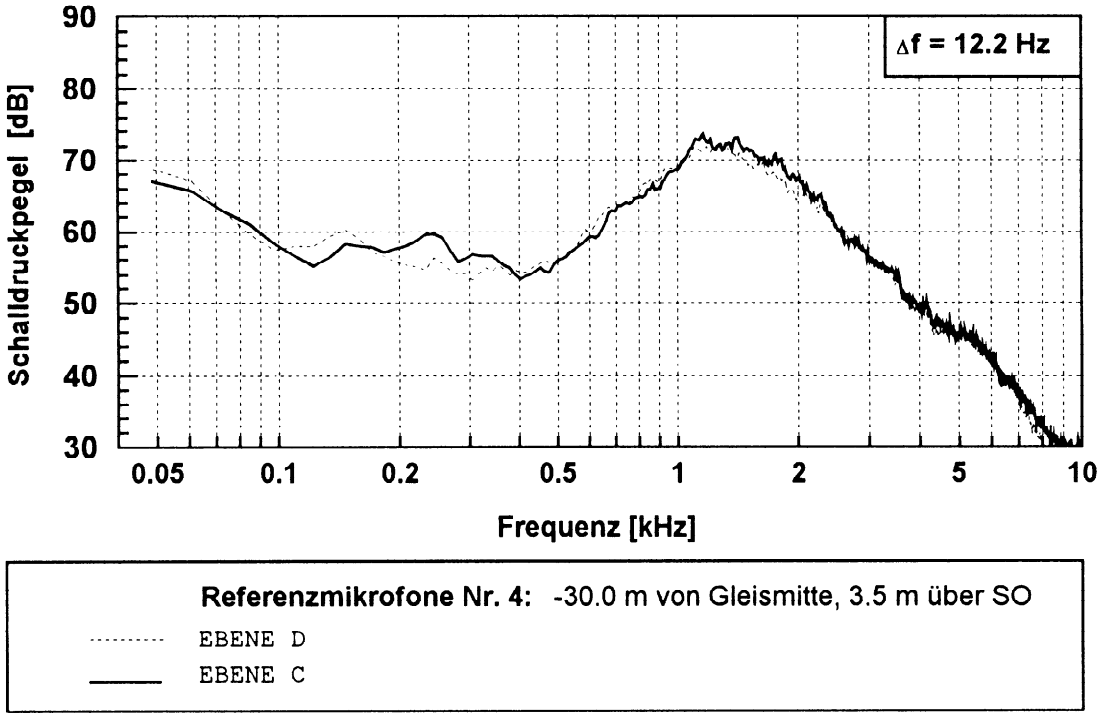


Bild A86 RE-Zug, Fahrt 927, Mikrofone 4 auf jenseitiger Gleisseite ohne SSW in beiden Meßebenen, Schmalbandspektren bei geschliffenen Schienen

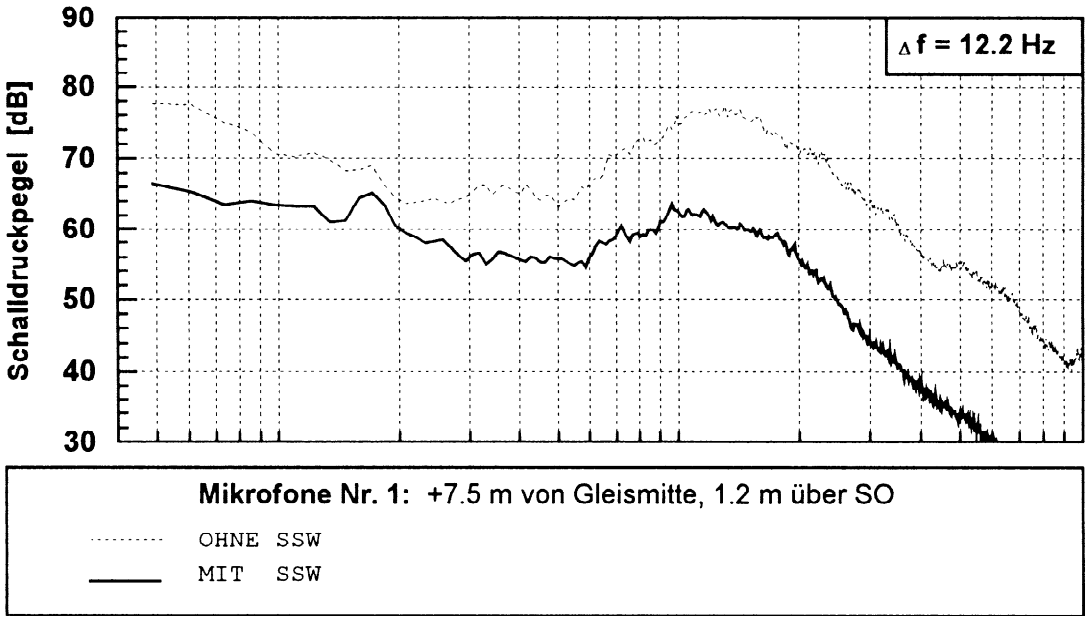


Bild A87 RE-Zug, Fahrt 927, Mikrofone 1 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Schmalbandspektren bei geschliffenen Schienen

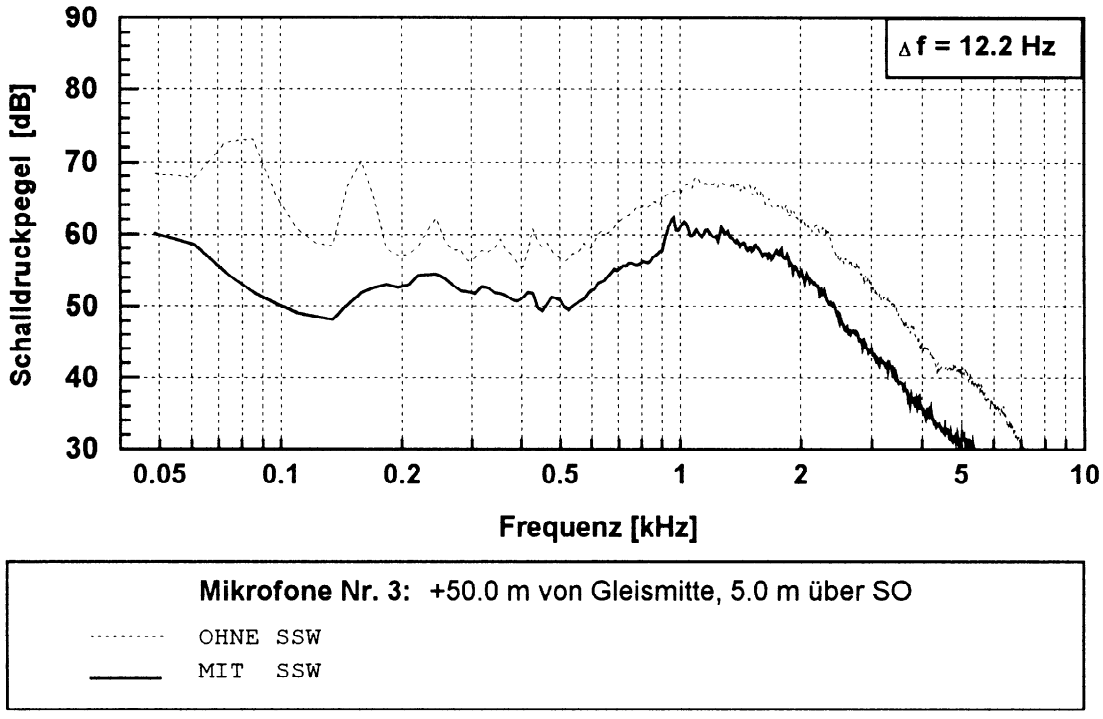


Bild A88 RE-Zug, Fahrt 927, Mikrofone 3 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Schmalbandspektren bei geschliffenen Schienen

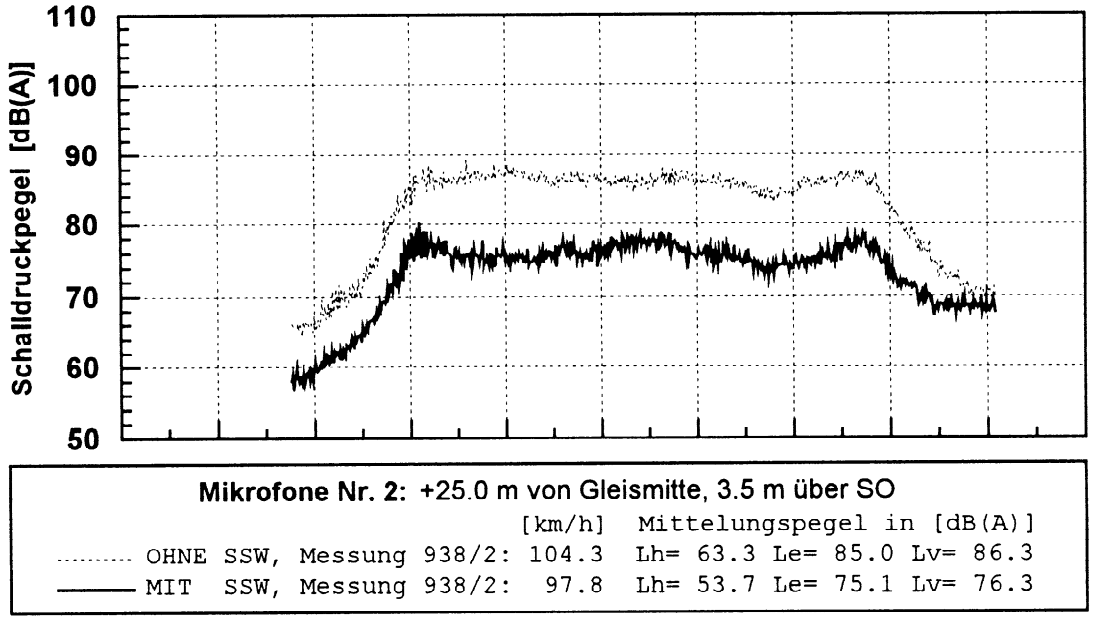


Bild A89 Güterzug, Fahrt 938, Mikrofone 2 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Pegelverläufe bei geschliffenen Schienen

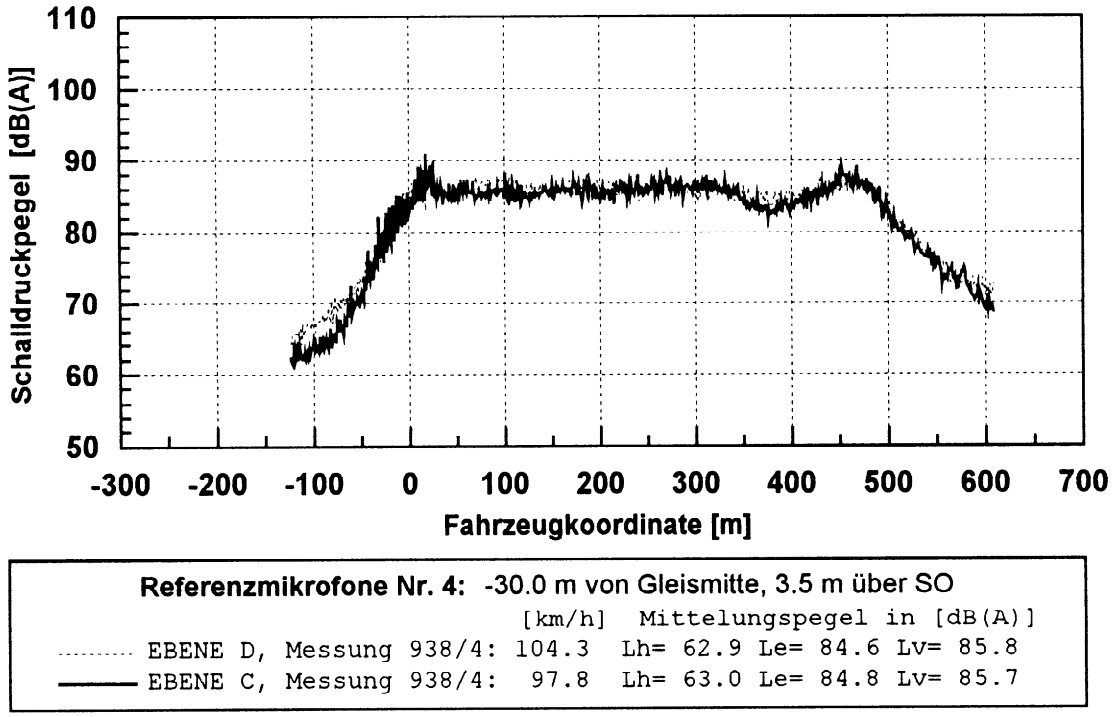


Bild A90 Güterzug, Fahrt 938, Mikrofone 4 auf jenseitiger Gleisseite ohne SSW in beiden Meßebenen, Pegelverläufe bei geschliffenen Schienen

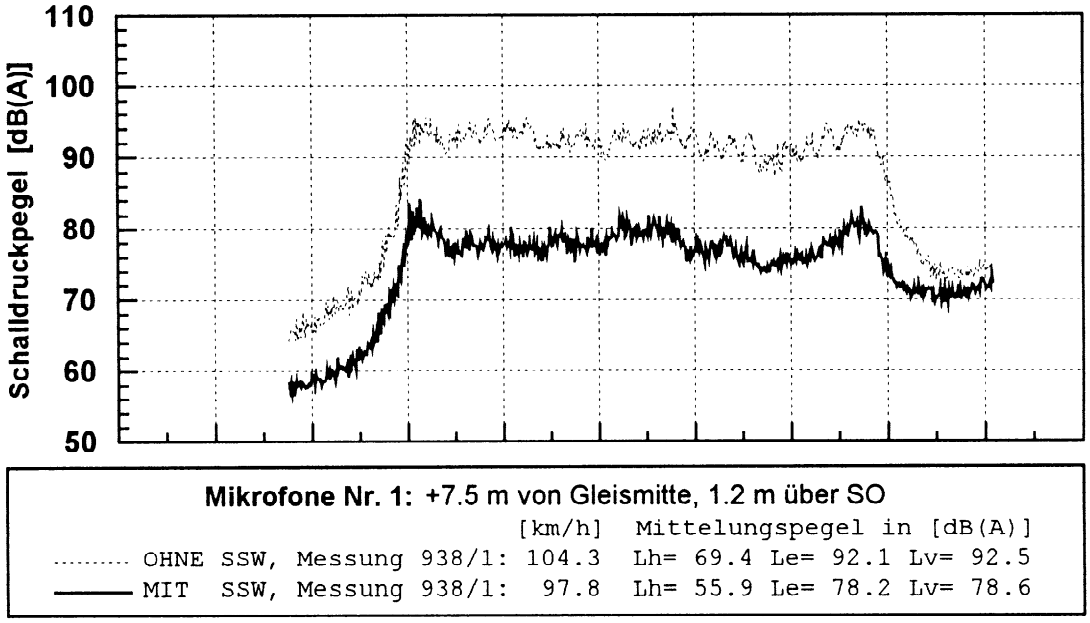


Bild A91 Güterzug, Fahrt 938, Mikrofone 1 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Pegelverläufe bei geschliffenen Schienen

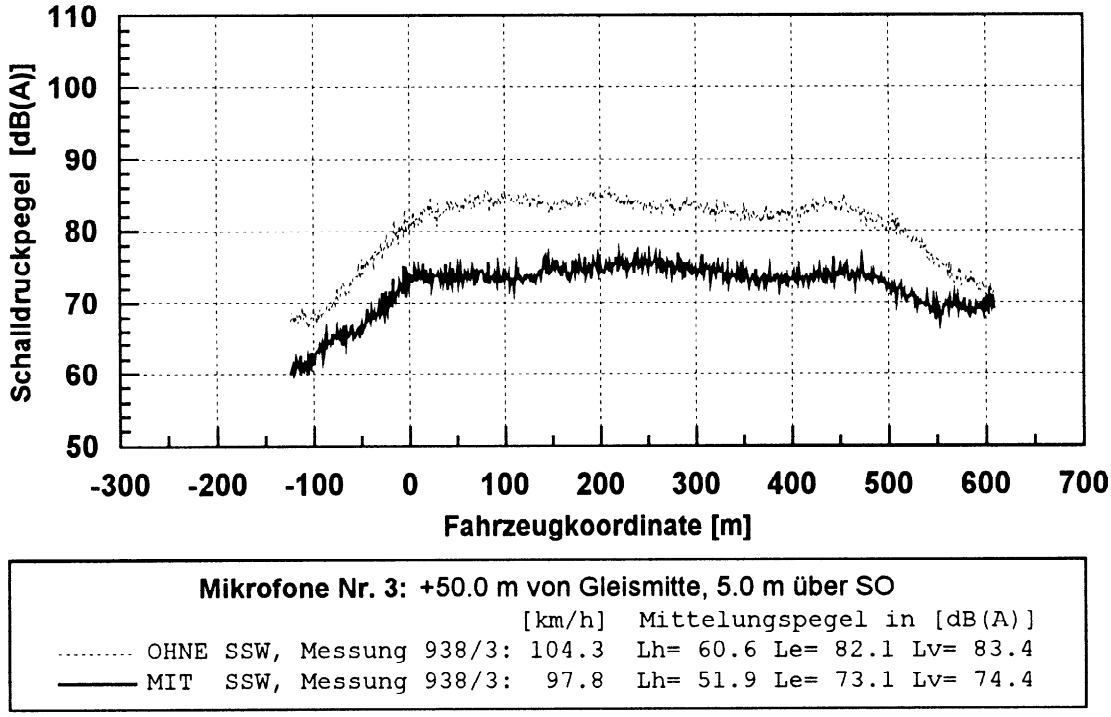


Bild A92 Güterzug, Fahrt 938, Mikrofone 3 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Pegelverläufe bei geschliffenen Schienen

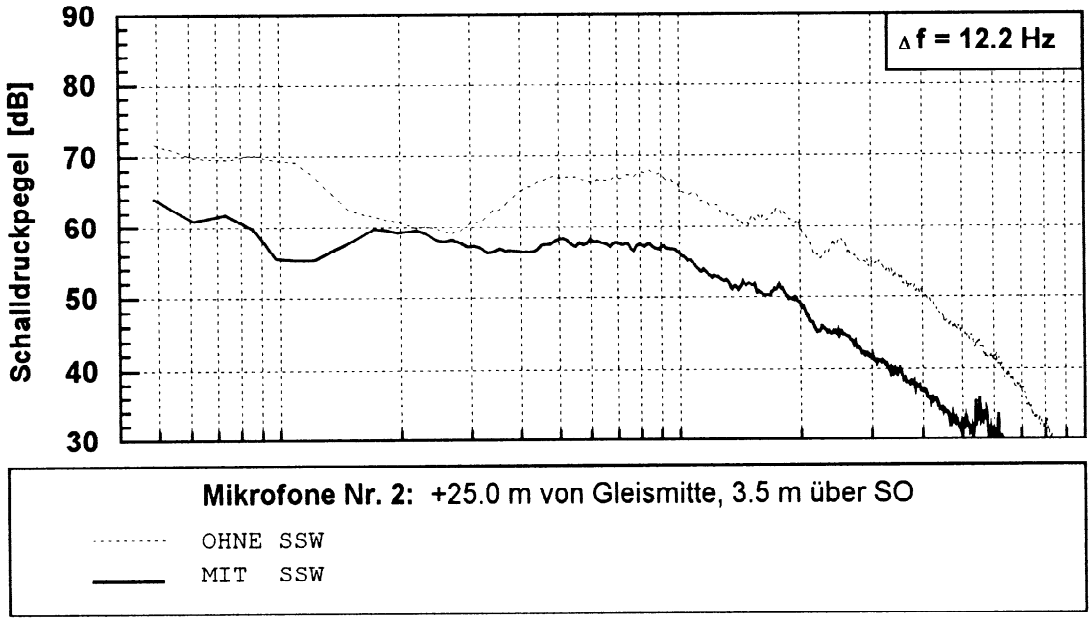


Bild A93 Güterzug, Fahrt 938, Mikrofone 2 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Schmalbandspektren bei geschliffenen Schienen

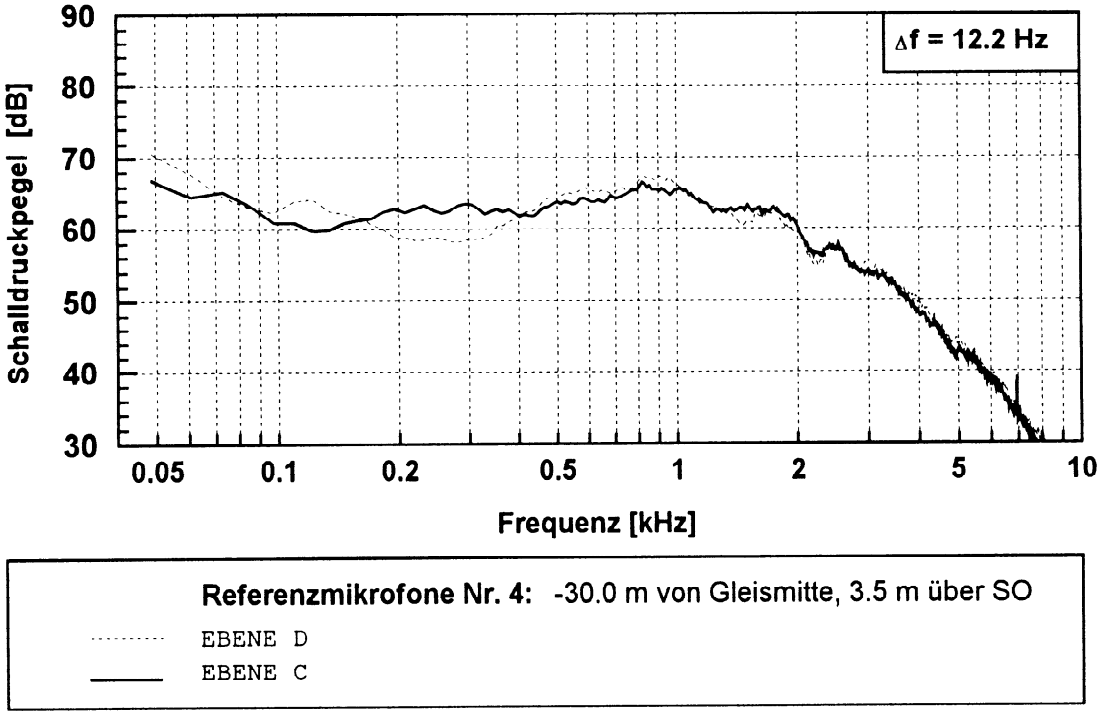


Bild A94 Güterzug, Fahrt 938, Mikrofone 4 auf jenseitiger Gleisseite ohne SSW in beiden Meßebenen, Schmalbandspektren bei geschliffenen Schienen

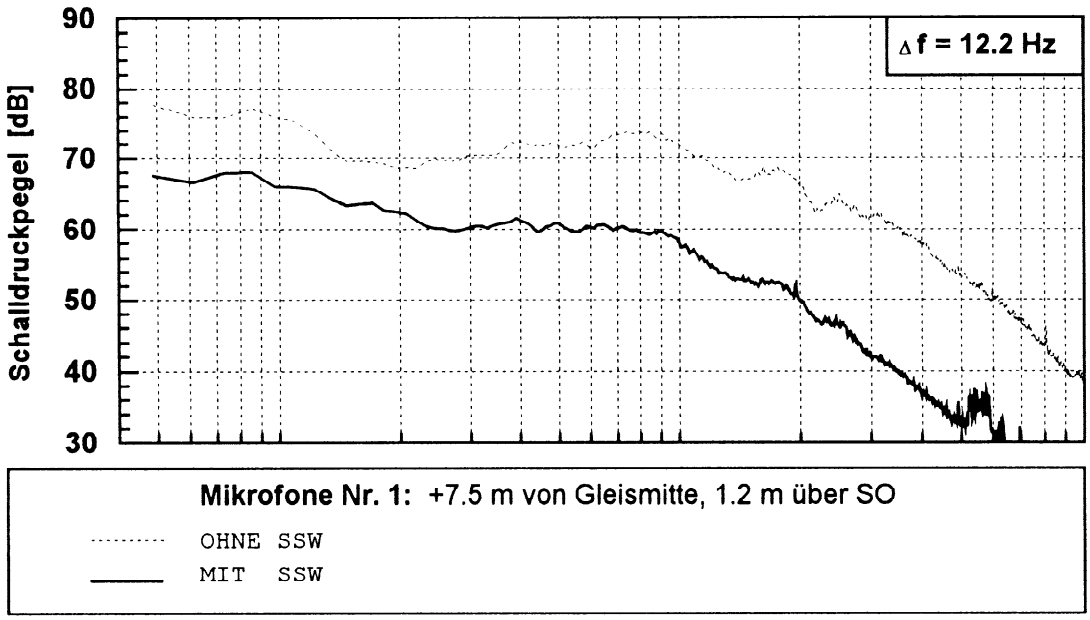


Bild A95 Güterzug, Fahrt 938, Mikrofone 1 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Schmalbandspektren bei geschliffenen Schienen

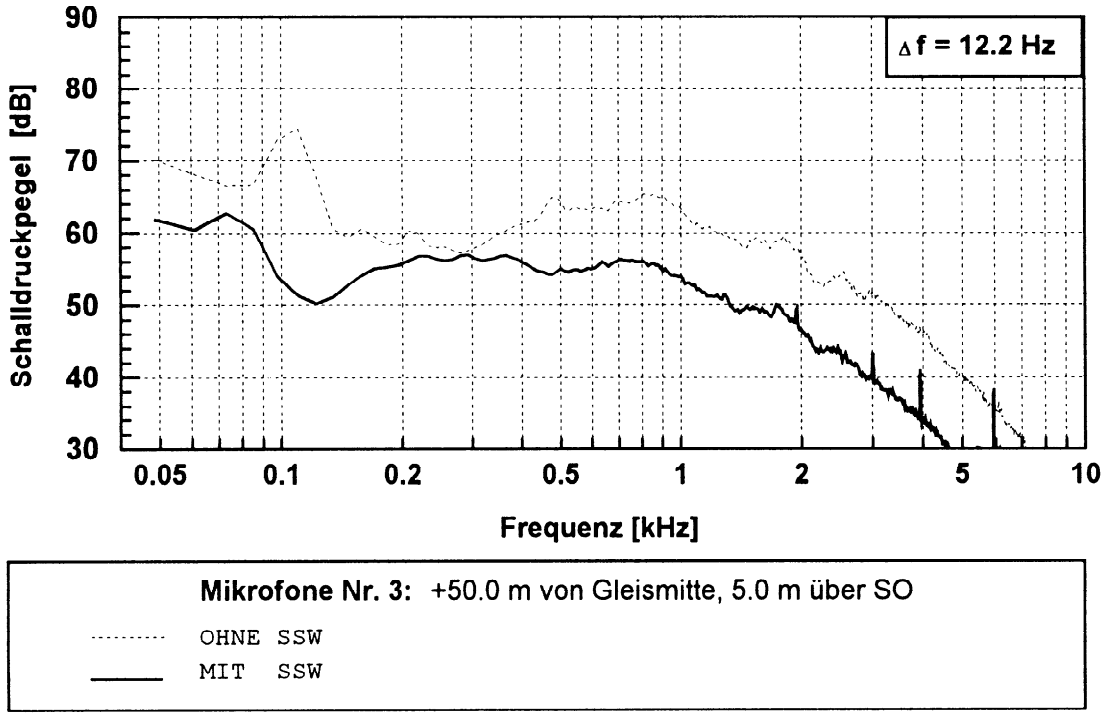


Bild A96 Güterzug, Fahrt 938, Mikrofone 3 in Meßebene C (mit SSW) und D (ohne SSW), Schmalbandspektren bei geschliffenen Schienen

Umweltforschungsplan
des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

Lärmbekämpfung

Forschungsvorhaben 296 55 215

Abschirmwirkung von Schallschutzwänden bei Hochgeschwindigkeitszügen

Bericht 3
Arbeitspaket 2:
Array-Messungen

von

Martin Klemenz
Bernd Barsikow

Ingenieurbüro akustik-data, Dipl.-Ing. B. Barsikow
Kirchblick 9, 14129 Berlin

im Auftrag
des Umweltbundesamtes
Oktober 1998

Berichts – Kennblatt

Berichtsnummer 1. UBA-FB 98-296 55 215	2.	3.
4. **Titel des Berichts** Abschirmwirkung von Schallschutzwänden bei Hochgeschwindigkeitszügen; Bericht 3, Arbeitspaket 2: Array-Messungen		
5. **Autor(en), Name(n), Vorname(n)** Klemenz, Martin; Barsikow, Bernd		8. **Abschlußdatum** 30.10.1998 9. **Veröffentlichungsdatum**
6. **Durchführende Institution (Name, Anschrift)** Ingenieurbüro akustik-data, Dipl.-Ing. B. Barsikow Kirchblick 9, 14129 Berlin		10. **UFOPLAN-Nr.** 296 55 215 11. **Seitenzahl** 83
7. **Fördernde Institution (Name, Anschrift)** Umweltbundesamt Postfach 33 00 22, 14191 Berlin		12. **Literaturangaben** 11 13. **Tabellen / Diagramme** 11 / 13 14. **Abbildungen** 29
15. **Zusätzliche Angaben**		
16. **Kurzfassung** Zur Vorhersage der Schallimmission während der Vorbeifahrt von Hochgeschwindigkeitszügen ist insbesondere für den Fall einer seitlich der Trasse befindlichen Schallschutzwand die Kenntnis der sogenannten "hochliegenden" Schallquellen von großer Bedeutung. Die vorliegende Untersuchung konzentriert sich daher auf die Bestimmung der Parameter dieser Quellen, d. h. deren Lage, Stärke, Geschwindigkeitsabhängigkeit, Frequenzgehalt und Richtcharakteristik. Die Messungen wurden an ICE 1-, ICE 2- und IC-Zügen durchgeführt, wobei zur Lokalisierung der Schallquellen ein vertikales Schachtel-Array und ein X-förmiges Array aus jeweils 29 Mikrofonen zum Einsatz kamen. Es wurden Vorbeifahrten auf der SFS Hannover - Würzburg in der Nähe von Northeim im Regelbetrieb mit teilweise reduzierter Geschwindigkeit untersucht; daraus ergab sich für die ICE-Züge ein Geschwindigkeitsbereich von ca. 180 bis 280 km/h. Als Ergebnis dieses Berichts liegen die genannten Parameter der relevanten hochliegenden Schallquellen vor, so daß nun die Emission von Hochgeschwindigkeitszügen der DB AG vollständig modelliert werden kann.		
17. **Schlagwörter** Hochgeschwindigkeitszüge, ICE 1, ICE 2, IC-Züge, Schallquellenlokalisierung, Mikrofon-Array, vertikales Schachtel-Array, X-förmiges Array, hochliegende Schallquellen, Emissionspegel, Geschwindigkeitsexponent, Schallschutzwand, Prognose der Schallimmission		
18. **Preis**	19.	20.

UBA-F+E-Berichtsmerkblatt (6.80)

Report - Data Sheet

1. **Report No.** UBA-FB 98-296 55 215	2.	3.
4. **Report Title** Shielding effect of noise barriers during passbys of high-speed trains; report No. 3, work package No. 2: Array measurements		
5. **Author(s), Family Name(s), First Name(s)** Klemenz, Martin; Barsikow, Bernd		8. **Report Date** 30 October 1998 9. **Publication Date**
6. **Performing Organisation (Name, Address)** akustik-data Engineering Office, Dipl.-Ing. B. Barsikow Kirchblick 9, 14129 Berlin		10. **UFOPLAN–No.** 296 55 215 11. **No. of Pages** 83
7. **Sponsoring Agency (Name, Address)** Federal Environmental Agency Post box 33 00 22, 14191 Berlin		12. **No. of References** 11 13. **Tables / Diagrams** 11 / 13 14. **Figures** 29
15. **Supplementary Notes**		

16. **Abstract**
To predict the wayside noise during passbys of high-speed trains on sections of track having a sound barrier, it is particularly important to know the parameters for the so-called "high-lying" sound sources. The focus of the present investigation was thus on establishing the location, strength, speed dependence, frequency content, and radiation pattern for each of these sources. Measurements were carried out for the ICE 1, ICE 2, and IC trains during scheduled runs on the Hannover - Würzburg high-speed line, near Northeim. Since it was prearranged with the DB AG for a number of trains to passby at reduced speeds, the speed range for the ICE trains extended from about 180 to 280 km/h. To locate the sound sources on the trains, a vertical nested array and an X-shaped array (each having 29 microphones) were used. With the results of this report, viz., the above-mentioned parameters for the relevant high-lying sources, the radiated noise of the DB AG's high-speed trains can be completely modelled, thereby enabling predictions to be made for the wayside noise with and without sound barriers.

17. **Key Words**
High-speed trains, ICE 1, ICE 2, IC trains, sound source location, microphone array, vertical nested array, X-shaped array, high-lying sound sources, emission level, speed exponent, sound barrier, prediction of wayside noise

18. **Price**	19.	20.

Umweltforschungsplan
des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

Lärmbekämpfung

Forschungsvorhaben 296 55 215

Abschirmwirkung von Schallschutzwänden bei Hochgeschwindigkeitszügen

Bericht 3
Arbeitspaket 2:
Array-Messungen

von

Martin Klemenz
Bernd Barsikow

Ingenieurbüro akustik-data, Dipl.-Ing. B. Barsikow
Kirchblick 9, 14129 Berlin

im Auftrag
des Umweltbundesamtes
Oktober 1998

Abschirmwirkung von Schallschutzwänden bei Hochgeschwindigkeitszügen
Arbeitspaket 2: Array-Messungen

bearbeitet von

Dipl.-Ing. M. Klemenz und Dipl.-Ing. B. Barsikow

Inhaltsverzeichnis

	Abkürzungen und Formelzeichen	2
1.	Einleitung	4
2.	Durchführung der Messungen	5
2.1	Untersuchte Zugkonfigurationen	5
2.2	Ausgewertete Fahrten und meteorologische Bedingungen	7
2.3	Meßort und Fahrweg	7
2.4	Meßgeräte	9
3.	Aufbau und Wirkungsweise der eingesetzten Mikrofon-Arrays	10
3.1	Das eingesetzte WV-Schachtel-Array	10
3.2	Das eingesetzte WX-Array	17
4.	Meßergebnisse des WV-Arrays für ICE-Züge	20
4.1	Zweidimensionale Schallquellenverteilungen	20
4.2	A-bewertete Emissionspegel für die einzelnen Schallquellen	29
4.2.1	Auswahl der untersuchten Zugkoordinaten	29
4.2.2	Eindimensionale vertikale Pegelverteilungen	31
4.2.3	Regressionsanalyse für die Schallemission der einzelnen Quellen	38
4.3	Anmerkungen zur Genauigkeit der Ergebnisse	45
4.3.1	Einschränkung durch die obere bzw. untere Grenzfrequenz	45
4.3.2	Einfluß des Rollgeräuschs auf die gemessenen Pegel der hochliegenden Schallquellen	47

4.3.3	Korrektur der gemessenen Pegelmaxima	49
4.3.4	Verschiebung der Pegelmaxima in Fahrtrichtung	49
4.4	Schalldruckspektren der einzelnen Quellen	50
5.	Meßergebnisse des WV-Arrays für IC-Züge	56
5.1	Zweidimensionale Schallquellenverteilung	56
5.2	A-bewertete Emissionspegel für die einzelnen Schallquellen	58
5.3	Schalldruckspektren der einzelnen Quellen	61
6.	Ergebnisse der Messungen mit dem WX-Array	65
6.1	Zweidimensionale Schallquellenverteilungen	65
6.2	Eindimensionale horizontale Pegelverteilungen	68
6.3	Ortung eines Lautsprechers	73
7.	Zusammenfassung der Ergebnisse	74
7.1	Angaben zu den einzelnen georteten Schallquellen	75
7.2	Über die Zuglänge gemittelte vertikale Pegelverteilungen	78
7.3	Schlußbemerkung und Ausblick	82
8.	Literatur	82

Anhang

Im vorliegenden Berichtshauptteil sind zur Verdeutlichung von einzelnen Ergebnissen nur wenige grafische Darstellungen eingefügt. Die Zusammenfassung aller übrigen Bilder erfolgt in einem gesondert gebundenen Anhang.

Abkürzungen und Formelzeichen

B	Bandbreite in [Hz]
d	Abstand der Array-Mikrofone untereinander in [cm]
D	Durchmesser in [mm]
L_A	A-bewerteter Schalldruckpegel in [dB(A)]

$L_{A,F1\text{-}V}$	A-bewerteter Emissionspegel der Quelle F1-V in [dB(A)]
$L_{A,Fuß}$	A-bewerteter Emissionspegel des Stromabnehmer-Fußes in [dB(A)]
$L_{A,Ölkühler}$	A-bewerteter Emissionspegel des Ölkühlerlüfters in Stromabnehmer-Nähe in [dB(A)]
$L_{A,200}$	A-bewerteter Emissionspegel in [dB(A)] bei einer Bezugsgeschwindigkeit von 200 km/h
$L_{A,5m,200}$	A-bewerteter Emissionspegel in [dB(A)] bei einer Bezugsgeschwindigkeit von 200 km/h in 5,0 m Abstand von der Quelle
r	Regressionskoeffizient
SO	Schienenoberkante
SPL	Schalldruckpegel (sound-pressure level)
SSW	Schallschutzwand
T	Meßzeit in [s]
υ	Zuggeschwindigkeit in [km/h]
WV	vertikales Schachtel-Array bzw. Unter-Array
WX	X-förmiges Array
α_A	Geschwindigkeitsexponent für A-bewerteten Schalldruck
Δf	Analysierbandbreite in [Hz]
ΔL	Pegeldifferenz in [dB] bzw. [dB(A)]
λ	Schallwellenlänge in [m]
σ	Standardabweichung in [dB(A)]

1. Einleitung

Im Rahmen der "Weiterentwicklung der Prognoseverfahren der Verkehrslärmschutzverordnung" wird im Auftrag des Umweltbundesamtes die abschirmende Wirkung von Schallschutzwänden (SSW) untersucht, da die Formel für die Immissionsminderung infolge einer SSW in der aktuell gültigen Richtlinie "Schall 03" [1] einer Überarbeitung bedarf. Untersuchungen im Arbeitspakets 1 dieses Forschungsvorhabens hatten nämlich gezeigt, daß die Einfügungsdämpfung einer SSW bei der Vorbeifahrt von Hochgeschwindigkeitszügen in der Schall 03 überschätzt wird [2, 3]. So ist die Pegelminderung durch eine SSW z. B. bei ICE-Zügen aufgrund des Anteils "hochliegender" Schallquellen geringer als bei Zügen, deren Schallquellen vorwiegend im Rad/Schiene-Bereich liegen.

Innerhalb der genannten Untersuchungen wurde die SSW-Abschirmwirkung einerseits gemessen (siehe Arbeitspaket 1 [2, 3]), andererseits soll sie anhand von Modellrechnungen prognostiziert werden (siehe Arbeitspaket 3 [4]). Für eine Vorhersage des Geräuschs von Eisenbahnfahrzeugen mit bzw. ohne vorhandene SSW ist die genaue Kenntnis aller Emissionsanteile während einer Zugvorbeifahrt notwendig. Dies umfaßt Angaben zur Lage, Stärke und Geschwindigkeitsabhängigkeit aller relevanten Schallquellen sowie zu deren Frequenzgehalt. In diesem Zusammenhang stehen die Untersuchungen in Arbeitspaket 2, welche Gegenstand des vorliegenden Berichts sind. Mittels der Array-Technik sollen alle wesentlichen sogenannten "hochliegenden" Schallquellen insbesondere des ICE 1 lokalisiert und analysiert werden, um das Gesamtbild der bereits meßtechnisch erfaßten Schallquellen dieses Zuges zu vervollständigen. Es sollen nach Möglichkeit auch Quellen an ICE 2- und IC-Zügen in die Untersuchung einbezogen werden. Zum Einsatz kommt ein vertikales Schachtel-Array sowie ein X-förmig angeordnetes Array mit jeweils 29 Einzelmikrofonen.

Als Ergebnis der Array-Messungen wird für jede lokalisierte Schallquelle der Emissionspegel $L_{A,5m,200}$ (A-bewerteter Schalldruckpegel in 5,0 m Abstand von der Quelle bei einer Bezugsgeschwindigkeit von 200 km/h) sowie der Geschwindigkeitsexponent α_A ermittelt. Ferner wird die Emission jeder Quelle auch in Schmalband- bzw. Terzspektren dargestellt. Um statistisch abgesicherte Aussagen treffen zu können, ist eine ausreichend große Anzahl von Vorbeifahrten in einem möglichst weiten Geschwindigkeitsbereich zu vermessen.

Zum vorliegenden Bericht gehört ein separater Anhang, was der Übersichtlichkeit der Darstellung dienen soll. Die in diesem Anhang gezeigten Ergebnisse sind als Vertiefung bzw. Vervollständigung der Aussagen des eigentlichen Berichts zu verstehen. Die wesentlichen Erkenntnisse und Schlußfolgerungen aus den einzelnen Untersuchungen sind im folgenden für einen schnellen Überblick durch die Markierung "➔" und eine Einrückung des Textes hervorgehoben.

2. Durchführung der Messungen

Zwischen dem 09. und 11.05.1997 wurden an der SFS Hannover - Würzburg die Schalldrucksignale von vorbeifahrenden ICE 1-, ICE 2- und IC-Regelzügen aufgezeichnet. Über die dabei angetroffenen Zugkonfigurationen, die vermessenen Fahrten sowie die eingesetzten Meßgeräte wird in diesem Kapitel berichtet.

2.1 Untersuchte Zugkonfigurationen

Während frühere Array-Messungen oftmals an Versuchszügen durchgeführt wurden, deren akustische Parameter im Detail bekannt waren und zum Teil während der Versuchsreihen geändert werden konnten, mußte für die vorliegenden Messungen auf die Bereitstellung eines ICE 1-Versuchszuges verzichtet werden, da hierfür der finanzielle und organisatorische Aufwand im Zuge der Bahnreform erheblich gestiegen ist. Es konnte hingegen mit den zuständigen Stellen der DB AG vereinbart werden, bei einer ausreichenden Anzahl von ICE 1-Regelzügen die Vorbeifahrgeschwindigkeit am Meßort von 280 km/h auf 250 bzw. 200 km/h zu reduzieren.

Im Verlauf der drei Meßtage wurden die Schalldrucksignale einer großen Anzahl von Regelzügen erfaßt, und zwar von 36 Vorbeifahrten mit dem vertikalen Schachtel-Array (WV-Array) und 17 Vorbeifahrten mit dem X-förmigen Array (WX-Array). Um den Datenumfang und die hiermit verbundene hohe Rechenzeit zu senken, mußte für die nachfolgende Analyse eine Auswahl aus diesen Fahrten getroffen werden, so daß schließlich 22 mit dem WV-Array aufgezeichnete Fahrten und 10 mit dem WX-Array aufgezeichnete Fahrten ausgewertet wurden. Wie sich diese insgesamt 32 Fahrten auf die einzelnen Zugarten, Geschwindigkeitsklassen und verwendeten Array-Typen verteilen, zeigt Tabelle 1.

Geschw.	vertikales Schachtel-Array				X-förmiges Array			
[km/h]	ICE 1[1)]	ICE 1[2)]	ICE 2	IC	ICE 1[1)]	ICE 1[2)]	ICE 2	IC
ca. 200	6	1	-	1	2	-	-	1
ca. 250	3	2	1	-	2	-	-	-
ca. 280	4	2	2	-	1	2	2	-
Summe	18		3	1	7		2	1

[1)] ein Stromabnehmer pro Triebkopf, [2)] zwei Stromabnehmer pro Triebkopf

Tabelle 1 Anzahl der ausgewerteten Vorbeifahrten, aufgeteilt nach Array-Typ, Zugart und Geschwindigkeitsklasse

Zu den einzelnen Zugarten sind folgende Bemerkungen zu machen:

- ICE 1-Züge

Sämtliche ausgewerteten 25 ICE 1-Züge bestanden aus je zwei Triebköpfen und 12 Mittelwagen, wobei als vierter Mittelwagen jeweils der Restaurantwagen mit erhöhtem Dach eingereiht war. Alle ICE 1 waren mit Stromabnehmern DSA 350 SEK ausgerüstet, wobei in 18 Fällen die Variante für den nationalen Verkehr mit einem (ausgefahrenen) Stromabnehmer pro Triebkopf und in sieben Fällen die internationale Variante mit zwei Stromabnehmern pro Triebkopf (ein ausgefahrener und ein abgesenkter) vorlag. Angaben zu Parametern des Rollgeräuschs, z. B. zur Bestückung der Räder mit Absorbern, können nicht gemacht werden, sind aber im Zusammenhang mit Array-Messungen an hochliegenden Schallquellen nicht von Bedeutung.

- ICE 2-Züge

Zum Zeitpunkt der Messungen fuhr im Zweistundentakt auch jeweils eine ICE 2-Garnitur am Meßort vorbei. Die akustischen Parameter waren im Vergleich mit dem ICE 1 weitgehend identisch, bis auf die geringere Anzahl von neun Mittelwagen, das Fehlen des erhöhten Restaurantwagens und die geringfügig abweichende Gestaltung der Bugform (Position des Frontgitters, Frontkupplung mit herausragendem stabförmigen Element ("Greifer")). Bei den ICE 2-Zügen befand sich ohne Ausnahme jeweils nur ein (ausgefahrener) Stromabnehmer DSA 350 SEK auf jedem Triebkopf.

- IC-Züge

Da nur ein IC-Zug pro Tag am Meßort vorbeifuhr, konnte demzufolge nur eine sehr geringe Anzahl von Fahrten aufgezeichnet werden. Die zwei untersuchten Züge bestanden jeweils aus der Lokomotive BR 120 und 13 scheibengebremsten IC-Wagen. Die Vorbeifahrgeschwindigkeit betrug in einem Fall etwa 200 km/h; im anderen Fall fiel sie etwas geringer aus.

2.2 Ausgewertete Fahrten und meteorologische Bedingungen

In Tabelle 2 sind alle ausgewerteten Vorbeifahrten mit Datum, Array-Typ, Zugart, -geschwindigkeit und -nummer, Anzahl der Stromabnehmer je Triebkopf (Tk), Umgebungstemperatur sowie Windgeschwindigkeit aufgeführt. Bei meist trockenem Wetter lag die Windgeschwindigkeit zum Teil bei etwa 2 bis 3 m/s, zum Teil aber auch bei etwa 5 m/s oder darüber, so daß die Witterungsbedingungen während der Messungen nur zeitweise als gut bezeichnet werden können.

Bei der Einteilung in Geschwindigkeitsklassen laut Tabelle 1 wurden alle Fahrten mit Geschwindigkeiten über 270 km/h zur Gruppe "ca. 280 km" zugeordnet. Die Einteilung in die übrigen beiden Geschwindigkeitsbereiche ist bei den meisten Fahrten eindeutig. Zu den Fahrten mit ca. 250 km/h werden darüber hinaus die Fahrten 2 (233,7 km/h), 4 (260,8 km/h), 22 (263,9 km/h) und 32 (235,2 km/h) als zugehörig betrachtet, und Fahrt 38 (175,7 km/h) wird noch zu den Fahrten mit ca. 200 km/h hinzugerechnet. Es sei ausdrücklich angemerkt, daß die Zuordnung der Fahrten zu Geschwindigkeitsklassen für die in den Kapiteln 4 bis 7 gezeigten Ergebnisse nur der Anschauung dient und im Gegensatz zu den Auswertungen in Arbeitspaket 1 nicht bedeutend ist. Vielmehr werden alle statistischen Aussagen in vorliegendem Bericht durch Regressionsanalysen über der Geschwindigkeit hergeleitet.

2.3 Meßort und Fahrweg

Die Messungen fanden an der SFS Hannover - Würzburg beim Strecken-km 79,2 in der Nähe von Northeim statt. Bei dem dort vorliegenden Oberbau handelt es sich um Schottergleise mit Schienen UIC 60 auf Betonschwellen. Die Trasse befindet sich im Bereich des Meßorts in geringer Dammlage.

Fahrt Nr.	Datum	Array-Typ	Zug-art	Geschw. [km/h]	Zug Nr.	Stromabn. je Tk	Tempera-tur [°C]	Windgeschw. [m/s]
1	09.05.97	WX	ICE 1	274,7	793	1	8	1,5
2	09.05.97	WX	ICE 1	233,7	585	1	8	2,0
3	09.05.97	WX	ICE 1	272,2	575	2	8	2,0
4	09.05.97	WX	ICE 1	260,8	787	1	8	2,0
5	09.05.97	WX	ICE 1	273,4	77	2	8	2,5
6	09.05.97	WX	ICE 1	196,4	589	1	12	2,0
7	09.05.97	WX	ICE 1	198,3	881	1	10	4,0
11	09.05.97	WX	ICE 2	279,0	971	1	8	2,0
12	09.05.97	WX	ICE 2	279,8	975	1	12	1,5
13	09.05.97	WX	IC	184,0	781	(BR 120)	8	2,0
21	10.05.97	WV	ICE 1	272,0	787	1	10	5,0
22	10.05.97	WV	ICE 1	263,9	71	2	10	5,0
23	10.05.97	WV	ICE 1	201,6	587	1	11	5,0
24	10.05.97	WV	ICE 1	274,1	577	1	11	5,0
25	10.05.97	WV	ICE 1	273,7	789	1	11	5,0
26	10.05.97	WV	ICE 1	271,9	77	2	10	4,0
27	10.05.97	WV	ICE 1	190,7	589	1	10	9,0
28	10.05.97	WV	ICE 1	198,2	881	1	10	2,0
29	10.05.97	WV	ICE 1	249,0	681	1	10	2,0
30	10.05.97	WV	ICE 1	252,2	671	2	11	5,0
31	10.05.97	WV	ICE 1	199,8	883	1	14	5,0
32	10.05.97	WV	ICE 1	235,2	683	1	14	5,0
33	11.05.97	WV	ICE 1	275,5	585	1	13	2,0
34	11.05.97	WV	ICE 1	197,6	795	1	15	3,0
35	11.05.97	WV	ICE 1	247,2	787	1	15	3,0
36	11.05.97	WV	ICE 1	200,1	71	2	17	3,0
37	11.05.97	WV	ICE 1	274,6	595	2	17	3,0
38	11.05.97	WV	ICE 1	175,7	587	1	17	3,0
41	10.05.97	WV	ICE 2	277,6	971	1	10	5,0
42	10.05.97	WV	ICE 2	254,3	973	1	11	5,0
43	10.05.97	WV	ICE 2	279,0	975	1	10	2,0
44	11.05.97	WV	IC	197,8	781	(BR 120)	11	1,5

Tabelle 2 Auflistung aller ausgewerteten Vorbeifahrten mit Datum, Array-Typ, Zugart, -geschwindigkeit und -nummer, Anzahl der Stromabnehmer je Triebkopf, Umgebungstemperatur sowie Windgeschwindigkeit

Während der hier geschilderten Messungen wurden nur Regelzüge auf dem westlichen Gleis, d. h. in südlicher Fahrtrichtung untersucht. Die Mikrofon-Arrays waren folglich westlich der Trasse aufgebaut. Der Meßort bietet für akustische Messungen ideale Randbedingungen, da sich beiderseits der Trasse bis zu großen Abständen ebenes Gelände ohne akustische Hindernisse erstreckt.

2.4 Meßgeräte

Mikrofone: 31 1/2"-Freifeldkapseln, B&K Typ 4191 mit Vorverstärker, B&K Typ 2619; zur Windgeräusch-Unterdrückung waren die Mikrofone mit Windschirmen, B&K Typ UA 0237 versehen.

Von den 31 verwendeten Mikrofonen wurden 29 in den beiden Arrays eingesetzt. Zwei weitere Mikrofone waren als Einzelmikrofone in 7,5 und 25 m Entfernung von Gleismitte aufgebaut. Deren Ergebnisse werden in diesem Bericht jedoch nicht gezeigt, da sie lediglich zu Kontrollzwecken dienten.

Verstärker: 32-kanaliger Mikrofonverstärker Fa. L&P;

Datenaufzeichnung: PC mit 486er Prozessor, bestückt mit vier A/D-Wandlerkarten vom Typ RTI 860 der Fa. Analog Devices, Abtastfrequenz 23,8 kHz.

Die gesamten Meßketten von den jeweiligen Mikrofonen (Array- bzw. Einzelmikrofone) bis zur Aufzeichnung wurden zu Beginn und am Ende jeden Meßtages mit einem akustischen Kalibrator, B&K Typ 4230 kalibriert.

Zugdetektor:

Um die von den Array-Mikrofonen empfangenen Schalldrucksignale den Fahrzeugkoordinaten der untersuchten Züge zuordnen zu können, war eine Lichtschranke an der vorderen Schiene montiert. Aufgrund der Unterbrechung des Lichtstrahls durch die Räder wird jede Radkoordinate im Ausgangssignal der Lichtschranke markiert. Dieses Signal dient außerdem zur exakten Berechnung der Zuggeschwindigkeit. Es wird vom Array-System parallel zu den Mikrofonsignalen aufgezeichnet.

3. Aufbau und Wirkungsweise der eingesetzten Mikrofon-Arrays

Bei den Messungen kamen zwei Array-Typen zum Einsatz, wobei jede Konfiguration aus 29 Mikrofonen bestand; nämlich

- ein vertikales Schachtel-Array (WV-Array) und
- ein X-förmiges Array (WX-Array).

Die Zuordnung dieser Array-Typen zu den einzelnen Vorbeifahrten ist in Tabelle 2 ersichtlich.

3.1 Das eingesetzte WV-Schachtel-Array

Ziel:

In einem Abstand von 4,87 m zur Gleismitte (= 4,15 m zur vorderen Schiene) sollen die Schallquellen der vorbeifahrenden Züge mittels eines eindimensionalen Mikrofon-Arrays lokalisiert und als vertikale Pegelverteilungen dargestellt werden. Dabei wird es als notwendig erachtet, daß die Hauptkeulenbreite in der Array-Richtcharakteristik - definiert als die Breite zwischen zwei Punkten auf der Array-Hauptkeule, die 3 dB unter dem Hauptkeulenmaximum liegen - im Mittel 0,5 m beträgt, d. h. benachbarte Schallquellen mit diesem Abstand zueinander sollen noch getrennt geortet werden können. Ferner wird angestrebt, die Messungen im Frequenzbereich von ca. 200 bis 3000 Hz auszuwerten, wobei angenommen wird, daß dieser Frequenzbereich die A-bewertete Schallemission von aerodynamischen Quellen bzw. Lüftern weitgehend abdeckt. Eine Abschätzung des Fehlers, der durch diese frequenzmäßige Einschränkung entsteht, befindet sich in Abschnitt 4.3.1.

Verschachtelung der Mikrofone:

Um in obigem weiten Frequenzbereich Array-Messungen durchzuführen, ist es erforderlich, mehrere Unter-Arrays mit verschiedenen Mikrofonabständen einzusetzen. Im vorliegenden Fall werden drei Unter-Arrays mit jeweils 15 Mikrofonen verwendet. Durch deren Verschachtelung reichen 29 Mikrofone (anstatt 45) zum Aufbau des gesamten vertikalen Arrays aus. Die Abstände der Mikrofone untereinander betragen

48, 24 und 12 cm. Im folgenden werden die Unter-Arrays entsprechend dieser Abstände mit "WV48-", "WV24-" und "WV12-Array" und das gesamte Array als "WV-Schachtel-Array" bzw. "WV-Array" bezeichnet.

Frequenzbereich:

Der Arbeitsbereich eines Arrays wird zum einen durch eine untere Grenzfrequenz eingeschränkt, unterhalb derer benachbarte Quellen nicht mehr getrennt lokalisiert werden können. Diese Frequenz ergibt sich aus dem gewünschten Auflösungsvermögen. Zum anderen wird durch das Auftreten von Aliasingkeulen eine obere Grenzfrequenz bestimmt, wenn die Bedingung λ (Schallwellenlänge) $> d$ (Mikrofonabstand) nicht mehr eingehalten wird. Für die verwendeten Unter-Arrays werden unter Berücksichtigung dieser Grenzfrequenzen die folgenden Arbeitsbereiche festgelegt:

WV48-Array:	sechs Terzen (200, 250, 315, 400, 500 und 630 Hz), Frequenzbereich 180 bis 710 Hz;
WV24-Array:	drei Terzen (800, 1000 und 1250 Hz), Frequenzbereich 710 bis 1410 Hz;
WV12-Array:	drei Terzen (1600, 2000 und 2500 Hz), Frequenzbereich 1410 bis 2820 Hz.

Im Vergleich mit dem WV24- bzw. dem WV12-Array ist der Frequenzbereich des WV48-Arrays doppelt so breit. Dies ist sinnvoll, da die Terzen 200, 250 und 315 Hz Geräuschanteile enthalten, welche hinsichtlich der A-bewerteten Gesamtemission von aerodynamischen Schallquellen bzw. Lüftern nicht vernachlässigt werden dürfen, auch wenn sie mit der relativ breiten Hauptkeule des WV48-Arrays gemessen werden.

Lage des Arrays:

Das WV-Array war in einem Abstand von 4,87 m zur Gleismitte bzw. 4,15 m zur vorderen Schiene postiert. Die Erfahrung hat gezeigt, daß die sich entlang eines Zuges ausbildende turbulente Grenzschicht die in einem solchen Abstand gelegenen Mikrofone nicht beeinflußt. Die Lage der einzelnen Array-Mikrofone bezüglich des

Gleises bzw. der Schienenoberkante (SO) ist in Bild 1 skizziert. Die Mittelpunkte der WV-Unter-Arrays befanden sich in den Höhen 3,73 m (WV48-), 3,97 m (WV24-) und 3,85 m (WV12-Array) über SO, also ungefähr in Höhe der Dachkante der ICE-Züge. Bild 2 zeigt eine Fotografie des Meßorts mit dem WV-Schachtel-Array und einem vorbeifahrenden ICE.

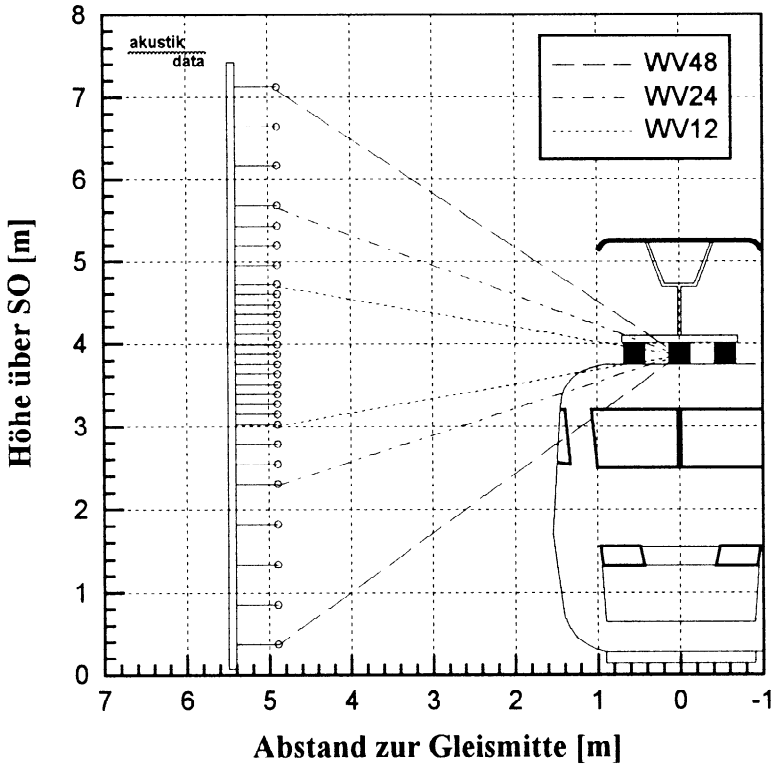


Bild 1 Skizze zur Lage des WV-Schachtel-Arrays am Meßort

Datenauswertung:

In einem ersten Schritt, der zur Ermittlung der Schallquellenverteilung über die gesamte Fahrzeuglänge dient (siehe Abschnitt 4.1), wird jeder Zug in vertikaler Richtung in Auswertepositionen bzw. Meßpunkte unterteilt, die in Abständen von 20 cm angeordnet sind. Durch eine zusätzliche Unterteilung in horizontale Meßpunkte entlang des Zuges können auch Informationen über die zweidimensionale Schallquellenverteilung gewonnen werden, wobei jedoch das Auflösungsvermögen in horizontaler Richtung nur dem eines Einzelmikrofons entspricht. In horizontaler Richtung beträgt der Abstand zweier Meßpositionen 1,0 m.



Bild 2 Fotografie des Meßorts mit WV-Schachtel-Array und vorbeifahrendem ICE

Für jede ausgewertete Vorbeifahrt und jedes Unter-Array werden für alle Meßpunkte Schmalband-Schalldruckspektren aus 512 Signalsamples berechnet, was eine Analysierbandbreite von 46,5 Hz ergibt. Diese Spektren werden sodann über eine Zeitdauer gemittelt, die einer Zugbewegung um 3,0 m entspricht und folglich geschwindigkeitsabhängig ist. Entsprechend des Arbeitsbereichs des jeweiligen Unter-Arrays lassen sich hieraus A-bewertete "Teil"pegel berechnen. Zur Betrachtung des gesamten Frequenzbereichs werden diese Pegel anschließend addiert. In den FFT-Eingangsdaten rührt jedes Zeitsample aus einer Addition über die 15 Mikrofonsignale des jeweiligen Unter-Arrays her. Hierbei ist für jedes Einzelsignal eine Phasenkorrektur berücksichtigt worden, die die Schallausbreitung von einem bestimmten Quellpunkt, dem sogenannten Array-Fokus, zu dem jeweiligen Mikrofon nachbildet. Vereinfachend kann dies als Bildung eines Brenn"punktes" bzw. eines Brenn"kreises" interpretiert werden, mitttels dessen das Array auf die Emission aus einem bestimmten Bereich "zielt".

Ähnlich wie bei einem optischen System ergeben sich nur dann gute Ergebnisse, wenn der Fokus des Mikrofon-Arrays auf die Ebene der betrachteten Quelle eingestellt ist. Der horizontale Abstand zwischen "Fokusebene" und den Array-Mikrofonen ist daher für verschiedene Fahrzeughöhen unterschiedlich gewählt, um in jedem Höhenbereich die dort befindlichen Schallquellen möglichst gut erfassen zu können. Die Aufteilung bzw. Abgrenzung dieser Fokusebenen in Höhenrichtung ist in Tabelle 3 aufgelistet.

Höhenbereich des Fokus über SO		Abstand der Mikrofone zur Fokus-ebene [m]	Abstand von Fokusebene zur Gleis-mitte [m]	wichtigste Schallquellen in betrachtetem Höhenbereich
untere Grenze [m]	obere Grenze [m]			
1,0	3,8	3,37	1,50	Fahrmotorlüfter
3,8	5,0	4,87	0,00	Stromabn.-Fußbereich, Ölkühlerlüfter
5,0	6,0	4,00	0,87	Stromabn.-Wippe (Seite)

Tabelle 3 Horizontaler Abstand zwischen Array-Mikrofonen und Fokusebene für verschiedene untersuchte Höhenbereiche am Fahrzeug

Die hierbei genannten "wichtigsten" Schallquellen sind nur als Auswahl anzusehen, da noch weitere Schallquellen untersucht werden sollen, deren Abstand zu den Mikrofonen nicht immer dem gewählten Fokusabstand entspricht. So dient die Auswertung mit den Fokusebenen nach Tabelle 3 zunächst der allgemeinen Anschauung, während in einer detaillierteren Untersuchung der einzelnen Schallquellen in Abschnitt 4.2 der Fokusabstand für jede Quelle nochmals neu, d. h. individuell gewählt wird.

Shading:

Bei eng benachbarten Schallquellen mit sehr unterschiedlicher Quellstärke können die Meßergebnisse durch den Empfang von Schallsignalen über die Array-Nebenkeulen verfälscht werden. Es empfiehlt sich daher, die Empfindlichkeit der Nebenkeulen gegenüber der Hauptkeule mittels Gewichtungsfaktoren für die einzelnen Mikrofone stark zu vermindern, auch wenn hierdurch eine geringfügige Verbreiterung der Hauptkeule in Kauf genommen werden muß. So wurde als Kompromiß zwischen Nebenkeulenunterdrückung und Hauptkeulenverbreiterung bei den folgenden Auswertungen

eine Gewichtung nach Dolph-Tschebyscheff angewandt, die die Empfindlichkeit aller Nebenkeulenmaxima theoretisch um 25 dB bezüglich des Hauptkeulenmaximums absenkt. Ohne Shading würde diese Differenz lediglich 13 dB betragen.

Geschwenkter Fokus:

Um bewegte Schallquellen mit einem Mikrofon-Array zu messen, muß gewährleistet sein, daß das Produkt aus Bandbreite B und Integrationszeit T (BT-Produkt) ausreichend groß ist. Ferner empfiehlt es sich insbesondere für schmalbandige Auswertungen, Bewegungseffekte zu eliminieren. Für diesen Fall bietet das Array-System die Möglichkeit, den Fokus mit der bewegten Quelle "elektronisch" mitzuführen. Bei dieser Technik des geschwenkten Fokus werden die oben erwähnten Phasenkorrekturen so angesetzt, daß der Array-Brennpunkt mit der Zuggeschwindigkeit mitbewegt wird. Dadurch kann unter wesentlicher Beibehaltung des örtlichen Auflösungsvermögens die Mittelungszeit und damit die Meßgenauigkeit gesteigert werden.

Diese Technik wird prinzipiell bei horizontal angeordneten Arrays verwendet, sie kann aber auch bei einer WV-Anordnung zum Einsatz kommen. Obwohl der Fokus beim WV-Array zur Schallquellenlokalisierung nur in vertikaler Richtung bewegt werden kann, können die Signale durch horizontales Mitschwenken des Fokus zumindest entdopplert werden. Im vorliegenden Fall wird jedoch auf diese Auswertetechnik verzichtet, da in den Ergebnissen kein nennenswerter Unterschied zwischen mitbewegtem und festem Fokus auszumachen war und die Rechenzeit nicht unnötig erhöht werden sollte.

Das vertikale Auslenken des Array-Fokus aus der Array-Normalen, die senkrecht zur Mikrofonreihe durch die Array-Mitte verläuft, hat eine Vergrößerung der Hauptkeulenbreite zur Folge, und Aliasingkeulen treten schon bei tieferen Frequenzen auf. Es kann jedoch gezeigt werden, daß bei Schwenkwinkeln bis zu 90° für Wellenlängen $\lambda > 2d$ keine Aliasingkeulen auftreten können. Für Wellenlängen $d < \lambda < 2d$ muß allerdings mit Aliasingkeulen gerechnet werden, wenn die Auslenkung des Fokus zu groß wird. Bezüglich der hier untersuchten "hochliegenden" Schallquellen liegt die maximale Fokus-Auslenkung bei ca. 30°, so daß dort gemessene Pegel durch das über Aliasingkeulen empfangene Rollgeräusch beeinflußt sein können. In Hinsicht auf dieses Problem wird in Abschnitt 4.3.2 eine Simulationsrechnung durchgeführt.

Auflösungsvermögen:

In Bild 3 sind für die drei Unter-Arrays die Hauptkeulenbreiten in Abhängigkeit von der Frequenz aufgetragen, wobei die Arbeitsbereiche für die einzelnen Unter-Arrays schraffiert hervorgehoben sind. Es handelt sich um das Ergebnis von Rechnungen, in denen eine punktförmige Monopolquelle mit einer Geschwindigkeit von 280 km/h simuliert wurde. Alle geometrischen Abmessungen entsprachen dabei der realen Meßsituation: die Schallquelle bewegt sich in Höhe des Mittelpunkts des WV12-Arrays in einem Abstand von 4,15 m zu den Mikrofonen am Array vorbei. Die Anforderung einer mittleren Hauptkeulenbreite von etwa 0,5 m wird für das WV24- und das WV12-Array erfüllt; für das WV48-Array beträgt die mittlere Hauptkeulenbreite wegen der schlechteren Auflösung zu tiefen Frequenzen hin jedoch nur etwa 0,9 m. Es kann aber davon ausgegangen werden, daß durch die geringe Bedeutung der tieffrequenten Geräuschanteile an der A-bewerteten Gesamtemission das Auflösungsvermögen des gesamten WV-Schachtel-Arrays hierdurch nicht wesentlich beeinträchtigt wird.

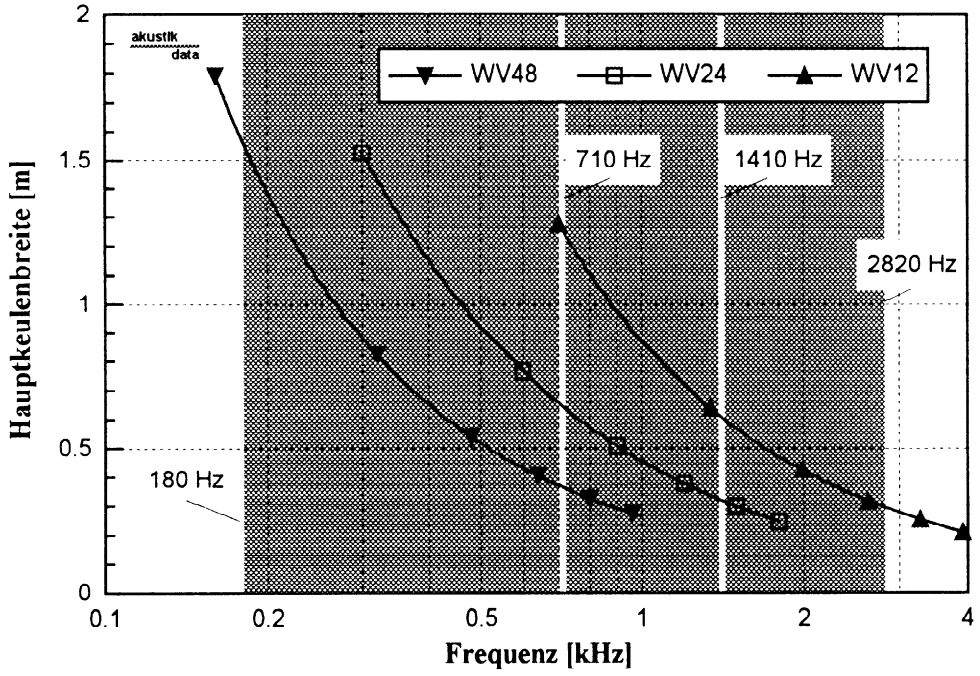


Bild 3 Hauptkeulenbreiten als Funktion der Frequenz für die verschiedenen Unter-Arrays; die Arbeitsbereiche der Unter-Arrays sind gekennzeichnet; Ergebnisse bei -25 dB Dolph-shading

3.2 Das eingesetzte WX-Array

Ziel:

Während das linienförmige WV-Array Schallquellen nur in einer Dimension, nämlich in Höhenrichtung voneinander unterscheidet, gestattet ein gekreuztes Array eine zweidimensionale Trennung der Quellen. Hierzu wurde ein sogenanntes X-Array eingesetzt, welches aus zwei linienförmigen Unter-Arrays mit je 15 Mikrofonen bestand. Die beiden Unter-Arrays waren gegeneinander um 90° gedreht und hatten das mittlere Mikrofon gemeinsam, so daß sich wiederum eine Anzahl von 29 Mikrofonen ergab. Die Verknüpfung der Summensignale der Unter-Arrays eröffnet die Möglichkeit einer zweidimensionalen Schallquellenortung.

Frequenzbereich:

Das X-förmige Array war nicht verschachtelt; somit konnte mit diesem im Vergleich zum WV-Schachtel-Array nur ein eingeschränkter Frequenzbereich betrachtet werden. Da im vorliegenden Fall hauptsächlich aerodyamische Schallquellen und Lüfter untersucht werden sollten, deren Emission erfahrungsgemäß vornehmlich durch Frequenzkomponenten unterhalb von 1 kHz bestimmt wird, wurde als Abstand der Mikrofone untereinander 32 cm gewählt. Die Kriterien zur Festlegung der Grenzfrequenzen eines X-Arrays bleiben gegenüber einem Linien-Array unverändert, so daß sich für das mit "WX32" bezeichnete Array der folgende Arbeitsbereich ergibt:

WX32-Array:	sechs Terzen (315, 400, 500, 630, 800 und 1000 Hz), Frequenzbereich 280 bis 1120 Hz.

Anordnung und Lage des Arrays:

Das WX32-Array befand sich seitlich der Trasse und die durch die Mikrofone aufgespannte Fläche war parallel zur Fahrtrichtung der Züge ausgerichtet. Im Vergleich mit einem sogenannten Kreuz-Array, welches aus einem horizontalen und einem vertikalen Linien-Array zusammengesetzt ist, wird beim WX-Array durch eine Drehung um 45° im Falle von Eisenbahn-Fahrzeugen eine bessere Trennung der Schallquellen ermöglicht. Da diese an einem fahrenden Zug hauptsächlich in der Horizontalen bzw.

Vertikalen eng benachbart sind, können sie vom X-Array durch das Auftreten der Array-Nebenkeulen in den Diagonalen leichter geortet werden als vom Kreuz-Array, dessen Nebenkeulen in horizontaler und vertikaler Richtung liegen. Das eingesetzte WX32-Array ist in Bild 4 fotografisch dargestellt. Die Entfernung der beiden Mikrofonreihen zur Gleismitte betrug wie beim WV-Schachtel-Array 4,87 m; der Mittelpunkt des Arrays befand sich wiederum in 3,85 m Höhe über SO.



Bild 4 Fotografie des WX32-Arrays mit herannahendem ICE

Datenauswertung:

Bei der Auswertung der Daten werden die zu vermessenden Züge in Meßpunkte unterteilt, die in vertikaler Richtung in Abständen von jeweils 20 cm und in horizontaler Richtung in Abständen von jeweils 50 cm angeordnet sind. Der Auswerte-Algorithmus ähnelt sehr stark dem in Abschnitt 3.1 beschriebenen Verfahren, wobei die Besonderheit eines X-Arrays darin besteht, daß die Spektren beider Unter-Arrays je Meßpunkt multipliziert werden. Die Datenauswertung des WX32-Arrays erfolgt wie beim WV-Schachtel-Array mit den in Tabelle 3 angegebenen verschiedenen Fokusebenen.

Shading:

Wie beim WV-Schachtel-Array werden die Daten des WX32-Arrays mit Gewichtsfaktoren nach Dolph-Tschebyscheff ausgewertet, die die Empfindlichkeit aller Nebenkeulenmaxima um 25 dB bezüglich des Hauptkeulenmaximums absenken. Dieser Wert gilt allerdings nur für jedes der Unter-Arrays einzeln. Wegen der multiplikativen Verknüpfung der beiden Unter-Arrays beträgt die Nebenkeulenunterdrückung in der Richtcharakteristik des Gesamtsystems theoretisch nur noch 12,5 dB, was in der Meßpraxis obendrein nicht einmal ganz erreicht wird.

Geschwenkter Fokus:

Im Gegensatz zum WV-Schachtel-Array erfolgt die Datenauswertung beim WX32-Array für jeden untersuchten Meßpunkt mit geschwenktem Fokus. Der dabei überstrichene Winkelbereich ergibt sich aus dem jeweils zurückgelegten Weg von 3,0 m und liegt somit je nach Fokusabstand zwischen ± 17° und ± 24° zur Array-Normalen.

Auflösungsvermögen:

In Analogie zu Bild 3 zeigt Bild 5 die Hauptkeulenbreite des WX32-Arrays *in vertikaler Richtung*. Die Angabe der Hauptkeulenbreite mit dem Zusatz der Richtung ist notwendig, da ein X-Array kein kreisförmiges Abtast"fenster", sondern eines mit richtungsabhängiger Breite besitzt. Die Vorgehensweise zur Erstellung von Bild 5 ist dabei identisch mit derjenigen, die bereits im Zusammenhang mit Bild 3 beschrieben wurde.

Vergleicht man die Hauptkeulenbreite des WX32-Arrays mit der des WV48-Arrays, welches zwar nicht denselben, aber zumindest einen gleich breiten Frequenzbereich einschließt, und welches in der Zuordnung von Mikrofonabstand und unterer Grenzfrequenz ebenfalls mit dem WX32-Array vergleichbar ist, stellt man fest, daß das Auflösungsvermögen eines X-förmigen Arrays gegenüber einem Linien-Array geringer ist: an der unteren Grenze des Arbeitsbereichs ist die Hauptkeulenbreite von ca. 1,55 m beim WV48-Array auf ca. 1,75 m beim WX32-Array gestiegen; an der oberen Bereichsgrenze liegt ein Zuwachs auf ca. 0,45 m beim WX32-Array gegenüber ca. 0,35 m beim WV48-Array vor.

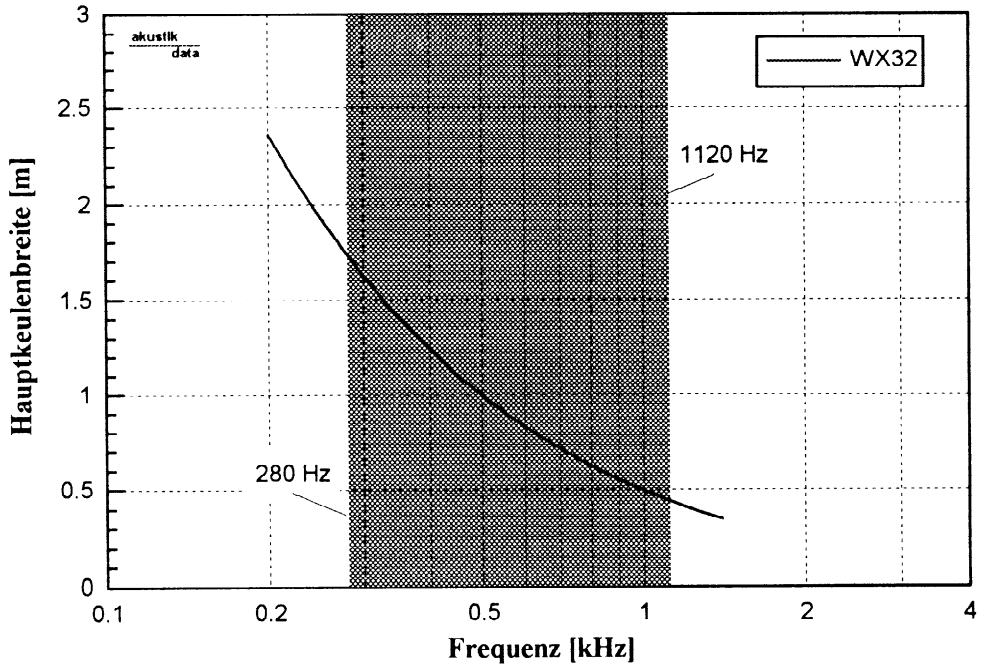


Bild 5 Vertikale Hauptkeulenbreite als Funktion der Frequenz für das WX32-Array; der Arbeitsbereich ist gekennzeichnet; Ergebnis bei -25 dB Dolph-shading

4. Meßergebnisse des WV-Arrays für ICE-Züge

In den folgenden Kapiteln 4 bis 7 werden die Ergebnisse der Messungen mit den beiden Array-Typen diskutiert. Viele der grafischen Darstellungen sind im vorliegenden Berichtshauptteil nur in Form von wenigen Beispielen aufgeführt. Die Zusammenstellung aller Ergebnisse befindet sich in einem separaten Berichtsanhang. Bei allen Bildern, die dort gezeigt werden, wird eine gesonderte Numerierung eingeführt, die von der bisherigen Schreibweise dadurch abweicht, daß jede Bildserie durch Buchstaben gekennzeichnet ist und die Bilder innerhalb dieser Serien fortlaufend numeriert sind. So wird z. B. das achte Bild der dritten Serie ("C") mit "Bild C8" bezeichnet.

4.1 Zweidimensionale Schallquellenverteilungen

Das Ziel der Analyse der mit dem WV-Schachtel-Array durchgeführten Messungen besteht in einer Aussage über die geschwindigkeitsabhängige Schallemission für jede

beobachtete hochliegende Schallquelle. Hierzu werden in einem ersten Schritt die A-bewerteten Schallquellenverteilungen entlang der gesamten Züge für jede ausgewertete Vorbeifahrt dargestellt. Diese zweidimensionalen Pegelverteilungen geben Aufschluß über die relevanten hochliegenden Quellen, für welche anschließend in den Abschnitten 4.2 bis 4.4 genauere Aussagen hinsichtlich ihrer individuellen Schallemission getroffen werden. Die in diesem Abschnitt gezeigten Verteilungen des A-bewerteten Pegels beruhen auf der in Abschnitt 3.1 beschriebenen Vorgehensweise bei der Datenauswertung.

Darstellungen im Anhang:

- Bilder A1a bis A4c für die drei Teilfrequenzbereiche der WV-Unter-Arrays bei vier ausgewählten Vorbeifahrten von ICE 1-Zügen (Fahrten 25 und 26 mit ca. 280 km/h und Fahrten 27 und 28 mit ca. 200 km/h),
- Bilder B1 bis B21 für den durch Summation über diese Einzelverläufe resultierenden Gesamtfrequenzbereich bei allen Vorbeifahrten von ICE 1- bzw. ICE 2-Zügen;

Beispiel im Hauptteil (Fahrt 25 eines ICE 1-Zuges mit ca. 280 km/h):

- Bild 6a bis 6c für die drei Teilfrequenzbereiche der WV-Unter-Arrays,
- Bild 7 für den hieraus resultierenden Gesamtfrequenzbereich.

➔ Aus den Bildern folgt, daß sich die wesentlichen hochliegenden Schallquellen in den Bereichen der Triebköpfe befinden. Zu erkennen sind vor allem jeweils ein ausgedehntes Quellgebiet in Höhe des Daches, welches sich aus der Emission von Stromabnehmer-Fuß und Ölkühlerlüfter ergibt, und die Stromabnehmer-Wippe in Höhe des Fahrdrahts.

➔ Für die Abstrahlung in Dachhöhe werden am vorderen Triebkopf in der Regel um einige dB(A) höhere Schalldruckpegel gemessen als am hinteren Triebkopf. Dies wird hauptsächlich dadurch verursacht, daß die turbulente Grenzschicht, welche sich entlang der Fahrzeugkontur ausbildet, am hinteren Triebkopf eine wesentlich größere Dicke aufweist als am vorderen Triebkopf. Hierdurch werden Bauteile wie der Stromabnehmer-Fuß am hinteren Triebkopf mit einer deutlich geringeren Geschwindigkeit angeströmt als am vorderen Triebkopf, was ihre Schallemission entsprechend reduziert.

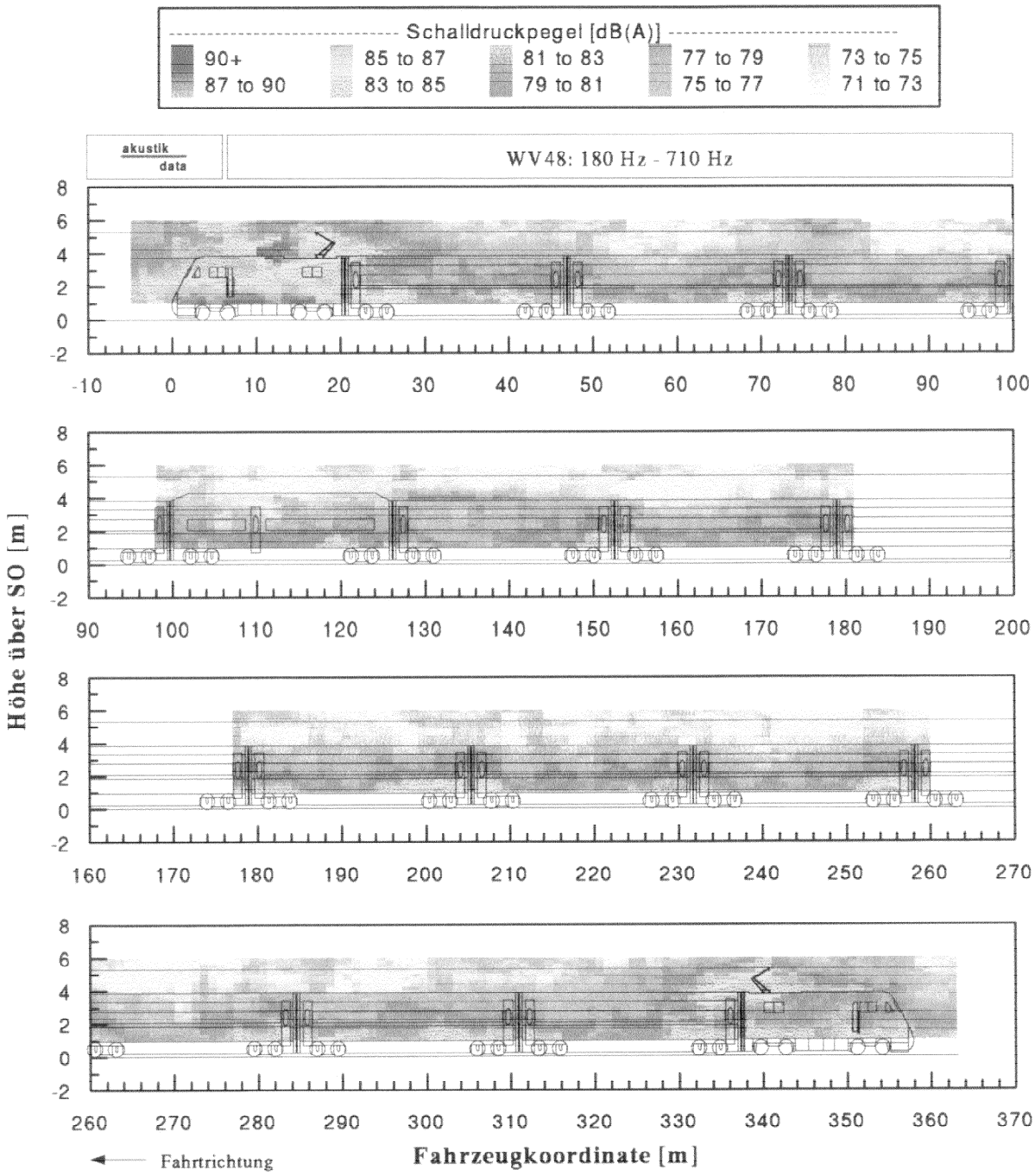


Bild 6a Zweidimensionale Verteilung des A-bewerteten Pegels gemessen mit dem WV48-Array im Frequenzbereich 180 bis 710 Hz bei Fahrt 25 mit 273,7 km/h (ICE 1 mit einem Stromabnehmer je Triebkopf) in 4,87 m Entfernung zur Gleismitte

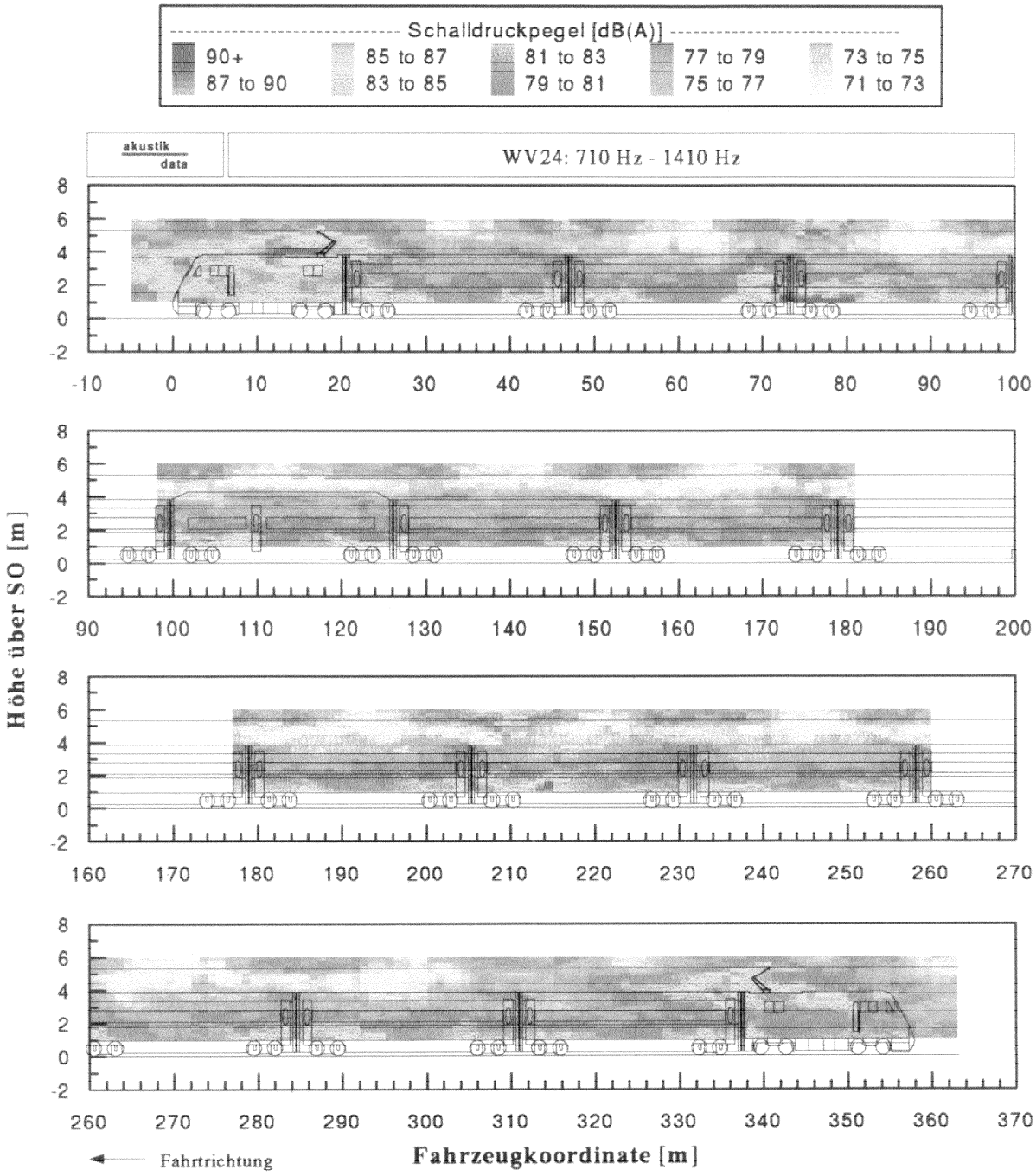


Bild 6b Zweidimensionale Verteilung des A-bewerteten Pegels gemessen mit dem WV24-Array im Frequenzbereich 710 bis 1410 Hz bei Fahrt 25 mit 273,7 km/h (ICE 1 mit einem Stromabnehmer je Triebkopf) in 4,87 m Entfernung zur Gleismitte

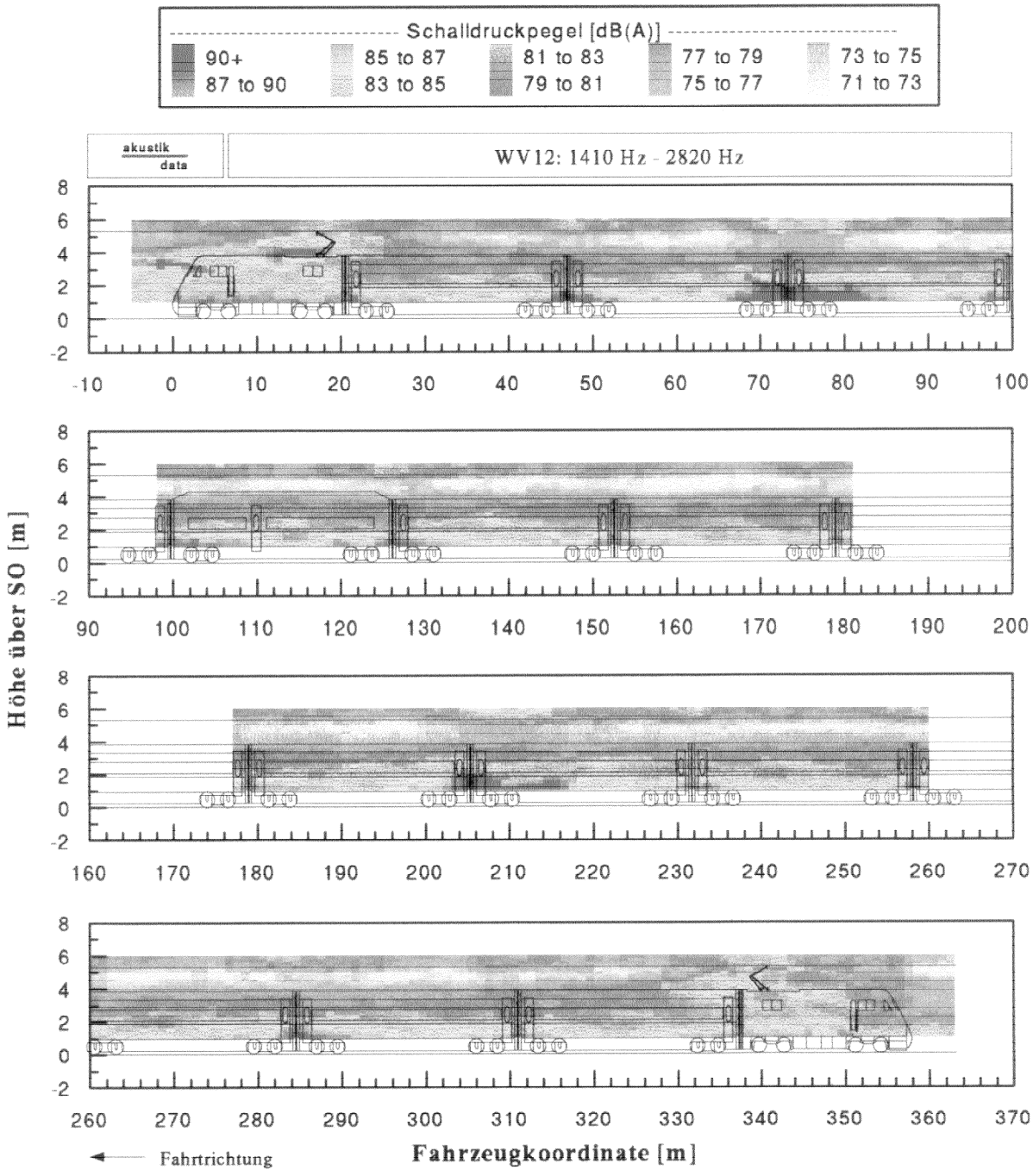


Bild 6c Zweidimensionale Verteilung des A-bewerteten Pegels gemessen mit dem WV12-Array im Frequenzbereich 1410 bis 2820 Hz bei Fahrt 25 mit 273,7 km/h (ICE 1 mit einem Stromabnehmer je Triebkopf) in 4,87 m Entfernung zur Gleismitte

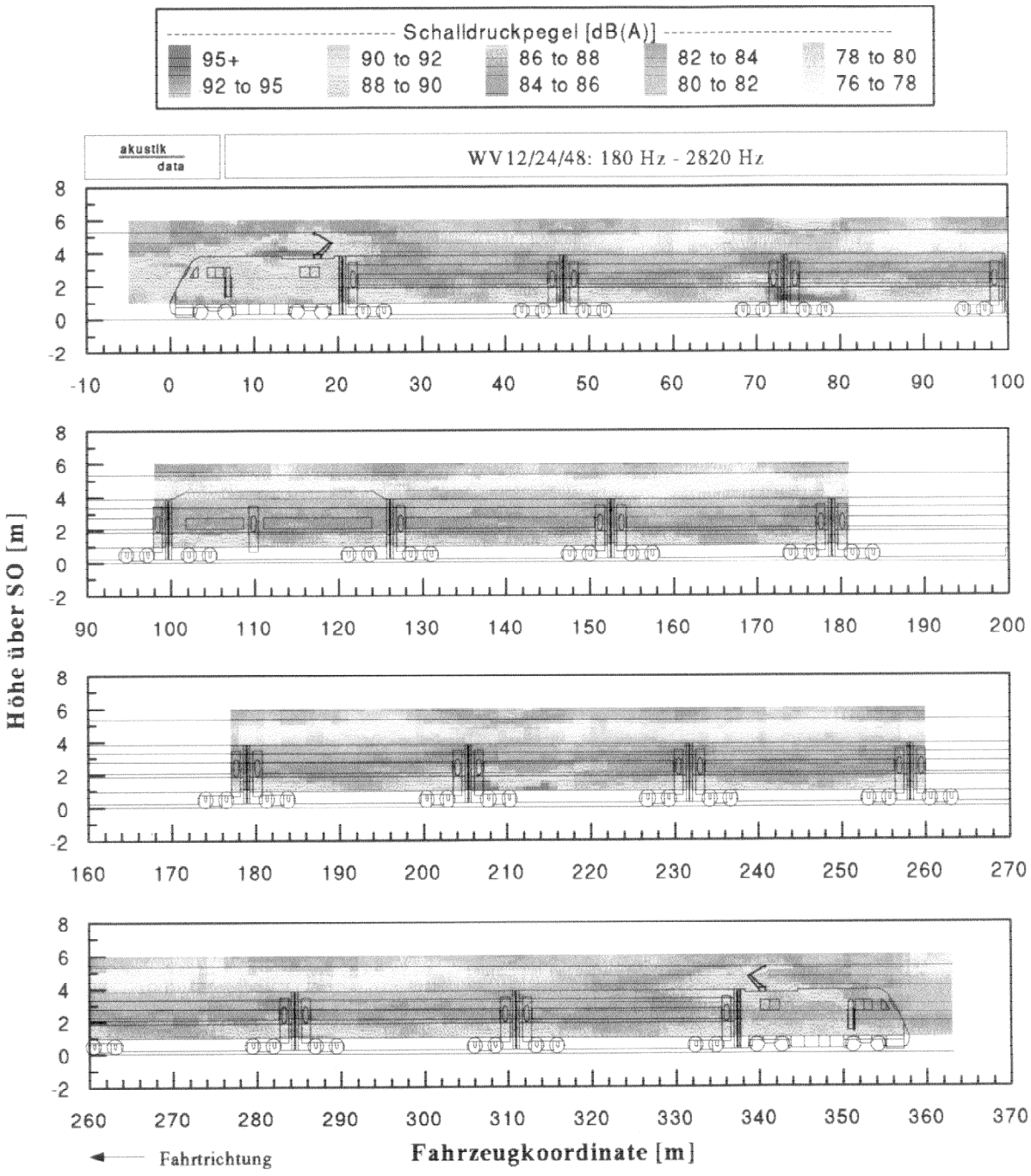


Bild 7 Zweidimensionale Verteilung des A-bewerteten Pegels gemessen mit dem WV-Schachtel-Array im Frequenzbereich 180 bis 2820 Hz bei Fahrt 25 mit 273,7 km/h (ICE 1 mit einem Stromabnehmer je Triebkopf) in 4,87 m Entfernung zur Gleismitte

➔ Die Erwartung, daß der höchste Pegel am Ort der tatsächlich vorhandenen Schallquelle beobachtet wird, erfüllt sich nicht immer. So ist beispielsweise bei der Stromabnehmer-Wippe das Pegelmaximum oft um etwa 1 m in Fahrtrichtung verschoben. Dies wird zum einen durch die nach vorne gerichtete Abstrahlung einer bewegten Schallquelle verursacht, welche bei 280 km/h eine Verschiebung des Maximums in dieser Größenordnung (ca. 1,0 m) zur Folge hat. Falls jedoch eine weitere Verschiebung in den Meßergebnissen auftritt, ist diese nur durch eine zusätzliche Richtwirkung zu begründen.

➔ So wird hierdurch eine im Bereich der Frontscheibe am vorderen Triebkopf lokalisierte Schallquelle, welche vor allem bei Fahrten mit ca. 280 km/h hervortritt, nicht etwa durch eine Strömungsablösung am Fahrzeugbug erzeugt, sondern durch die Abstrahlung der Ansaugöffnung des vorderen seitlichen Fahrmotorlüfters. Ein wichtiges Indiz für diese Behauptung ist die Tatsache, daß derartige Quellen bei allen vier Fahrmotorlüftern meist in gleicher Weise zu erkennen sind. Dies zeigt sich sehr deutlich z. B. in Bild 6b für den Frequenzbereich des WV24-Arrays. Die möglichen Ursachen für die starke Richtwirkung werden in Abschnitt 7.1 kurz kommentiert. Zur Vereinfachung werden mit der Bezeichnung "Lüfter" im folgenden stets die Lüfter-Ansaugöffnungen umschrieben.

➔ Bei den bislang genannten Schallquellen wird darüber hinaus beobachtet, daß mit wachsendem Abstand in Fahrtrichtung vom eigentlichen Quellort die vertikale Quellkoordinate steigt (im Falle der Fahrmotorlüfter) oder sinkt (im Falle der Stromabnehmer-Wippen). Dies ist eine Folge der Meßtechnik, da sich die errechneten Phasenunterschiede für den Array-Fokus immer auf die Abstrahlung einer in Richtung der Array-Normalen vermuteten Quelle beziehen. Befindet sich eine Schallquelle jedoch an einer abweichenden Fahrzeugkoordinate, wird diese aufgrund der für diese Quellposition nicht mehr exakten Phasenunterschiede in vertikaler Richtung fehlgeortet, und zwar zur Array-Mitte hin verschoben.

➔ Im Bereich der Stromabnehmer-Wippe liegt das gemessene Pegelmaximum jedoch auch in der Nähe der exakten Fahrzeugkoordinate oft in einer geringeren Höhe als der Fahrdraht. Dies liegt zum einen daran, daß die akustisch relevanten Elemente der Wippe (z. B. Hubbegrenzer, Auflaufhorn) unterhalb des Fahrdrahts liegen. Zum anderen wurde der Fokus auf die dem Array zugewandte Seite der Wippe

gerichtet, wo sich ein Teil dieser Bauteile befindet. Aufgrund der vertikalen Auslenkung des Array-Fokus wird die Emission der abgewandten Seite der Wippe, die diese Elemente ebenfalls enthält, an einer scheinbar niedrigeren vertikalen Quellposition mitgemessen. Wegen des größeren Abstands zu den Mikrofonen sind die zugehörigen Pegel zwar geringer, in der Summe ergibt sich dennoch ein etwas zu tief geortetes Pegelmaximum.

➔ Daß mit dem WV48-Array in Bild 6a Stromabnehmer-Wippe und Fuß nicht getrennt geortet werden können und vielmehr ein in Höhenrichtung ausgedehntes Quellgebiet bilden, liegt am geringeren Auflösungsvermögen dieses Unter-Arrays (siehe Bild 3). Im gesamten Frequenzbereich des WV-Schachtel-Arrays macht sich dieses aber nicht stark bemerkbar (siehe Bild 7).

➔ Schallquellen, die weit über dem Fahrdraht (d. h. im Höhenbereich oberhalb von 5,2 m über SO) lokalisiert werden, sind als physikalisch nicht vorhandene Aliasing-Quellen anzusehen, die durch das Rollgeräusch hervorgerufen werden. So treten diese Quellen im Bereich der Mittelwagen immer an solchen Zugkoordinaten auf, wo auch die Emission aus dem Bereich der Räder deutlich ansteigt.

Da für den gesamten Zug eine einheitliche Pegelskala gewählt wurde, sind die Quellverteilungen im Bereich der Mittelwagen nicht immer deutlich zu erkennen. Hiermit verbindet sich die Frage, inwieweit die Übergänge zwischen den Wagen, das erhöhte Dach des Restaurantwagens und die Antennen auf dem Servicewagen als akustisch relevante Quellen anzusehen sind. In den bisher gezeigten Bildern waren an deren Positionen keine merklich erhöhten Emissionspegel zu beobachten. Daher werden in Bild 8 nochmals die in den Bildern 6a bis 6c dargestellten Pegelverteilungen gezeigt, die sich hier allerdings nur auf den Bereich vom vierten bis zum sechsten Mittelwagen erstrecken (d. h. vom Restaurantwagen über den Servicewagen zu einem "normalen" Mittelwagen) und in ihrer Pegelskala den dortigen Schallquellen besser angepaßt sind.

➔ Zwischen 1,0 und 6,0 m Höhe über SO werden entlang der Mittelwagen die stärksten Pegel im Rad/Schiene-Bereich erzeugt und insbesondere durch das WV12-Array auch noch in einem Höhenbereich von etwa 2,0 bis 3,0 m deutlich mitgemessen. Da das Rollgeräusch nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchung ist, wird auf diese Quellen jedoch nicht weiter eingegangen.

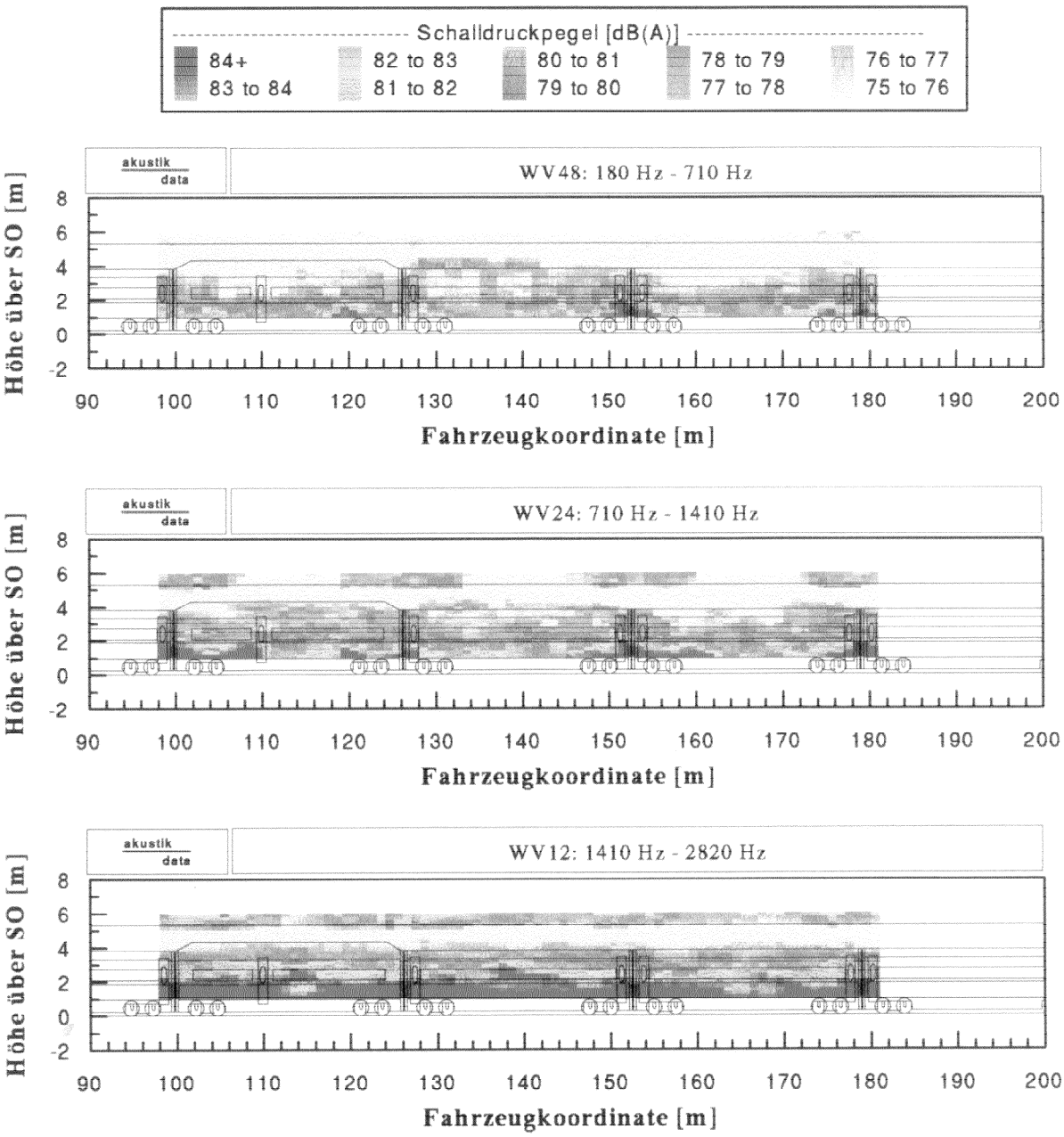


Bild 8 Zweidimensionale Verteilungen des A-bewerteten Pegels im Bereich von drei ICE 1-Mittelwagen gemessen mit den drei WV-Unter-Arrays in verschiedenen Frequenzbereichen bei Fahrt 25 mit 273,7 km/h in 4,87 m Entfernung zur Gleismitte

➔ Es sind jedoch noch weitere Bereiche mit geringeren, aber durchaus merklich erhöhten Pegeln zu entdecken. So erkennt man im Falle des WV48- und WV24-Arrays diesbezügliche Quellen auf dem Dach des Servicewagens (mittlerer Wagen in Bild 8), welche eindeutig der aerodynamischen Abstrahlung der dort befindlichen Antennen zuzuordnen sind. Ferner werden vom WV24-Array Schallquellen in einer Höhe von etwa 3,5 m an zwei Wagenübergängen (Zugkoordinaten ca. 152 und 178 m) und in einer Höhe von etwa 3,8 m in der Mitte des Restaurantwagens geortet. Diese Positionen entsprechen exakt den Koordinaten der Lüfteröffnungen der Klimaanlage bzw. der Bordküche.

➔ Es ist allerdings nicht zu beobachten, daß die Wagenübergänge an sich infolge der Querschnittsänderung eine relevante Schallemission zur Folge haben.

4.2 A-bewertete Emissionspegel für die einzelnen Schallquellen

Die im vorigen Abschnitt gezeigten zweidimensionalen Darstellungen gaben einen ersten Überblick über die Positionen der hochliegenden Schallquellen am ICE 1 und ICE 2. Im folgenden werden bei den Zugkoordinaten dieser Quellen vertikale Schnitte angefertigt. Aus diesen eindimensionalen Verteilungen des A-bewerteten Pegels in Höhenrichtung werden die Maxima abgelesen und den einzelnen Schallquellen zugeordnet. Diese Pegel werden anschließend über der Geschwindigkeit aufgetragen, und anhand einer Regressionsanalyse wird hieraus für jede Quelle ein Emissionspegel $L_{A,200}$ und ein Geschwindigkeitsexponent α_A berechnet.

4.2.1 Auswahl der untersuchten Zugkoordinaten

In diesem Abschnitt werden die Zugkoordinaten festgelegt, die zur Untersuchung der hochliegenden Schallquellen am geeignetsten erscheinen. Hierzu werden folgende Vereinbarungen getroffen:

- Jede vorhandene bzw. vermutete Schallquelle erhält eine Abkürzung, welche zum einen auf den Namen (z. B. "Ö" für "Ölkühlerlüfter"), zum anderen auf die Lage hinsichtlich des Gesamtfahrzeugs ("V" für "vorne", "H" für "hinten") hinweisen soll. Befinden sich an einem Zug zwei gleichartige Quellen, werden diese durch die Bezeichnungen ("A" oder "B") kenntlich gemacht.

- Die ausgewählten Zugkoordinaten sind teilweise um 0,5 bis 1,5 m in Fahrtrichtung verschoben, um die in Abschnitt 4.1 beobachtete Richtwirkung der Quellen zu berücksichtigen.

- Der Übersichtlichkeit halber wird für jede betrachtete Quelle nur eine Zugkoordinate für alle Fahrten festgelegt. Der Frage, ob hierbei der maximale Pegel in beiden Dimensionen korrekt ermittelt wird, wird in Abschnitt 4.3.4 nachgegangen.

- Im Bereich der Mittelwagen werden an einigen Positionen Schnitte "auf Verdacht" angefertigt, um zunächst generelle Informationen über die dortige Quellenverteilung zu erhalten, auch wenn dort Schallquellen nicht unmittelbar zu erkennen waren. Für die Übergänge zwischen den Mittelwagen (Ü) werden exemplarisch zwei Positionen ausgewählt, und zwar relativ weit am Anfang und am Ende des Zuges (vom ersten zum zweiten und vom elften zum zwölften Mittelwagen). Die Auswertungen im Bereich der Mittelwagen erfolgen nur für ICE 1-Vorbeifahrten.

- Im Falle der Triebköpfe werden ICE 1 und ICE 2 als gleichwertig angesehen. Eine Ausnahme hiervon bildet der Bugbereich, bei dem am ICE 2 geringe konstruktive Änderungen vorliegen. Somit werden für die Zugkoordinate 1,0 m getrennte Auswertungen durchgeführt. Für das Zugende wird nur der ICE 1 betrachtet.

- Beim Stromabnehmer-Fußbereich ist es erforderlich, Vorbeifahrten mit einem Stromabnehmer bzw. mit zwei Stromabnehmern je Triebkopf getrennt auszuwerten. Im letzteren Fall muß die abweichende Zugkoordinate des resultierenden Quellgebiets berücksichtigt werden.

- Bezüglich der Ölkühlerlüfter wird nur der der Zugspitze (Ö-VA) und der dem Zugende (Ö-HB) zugewandte Lüfter herangezogen, da die Emission der anderen beiden Ölkühlerlüfter nicht getrennt von der Abstrahlung der nahegelegenen Stromabnehmer-Fußbereiche gemessen werden kann.

Die somit ausgewählten Schallquellen sind zusammen mit ihren Bezeichnungen und Positionen in Tabelle 4 aufgelistet. Bei den entsprechenden Zugkoordinaten werden im kommenden Abschnitt eindimensionale vertikale Verteilungen des A-bewerteten Pegels dargestellt.

Abkürzung	Name der Quelle	Zugart	Stromabn. je Tk	Zugkoordinate [m]	Höhe über SO [m]
B1-V	Bugbereich	ICE 1		1,0	Quellen noch nicht identifiziert
B1-H				356,0	
B2-V		ICE 2		1,0	
S-VA	Seitenlüfter (=Fahrmotorlüfter)	ICE 1/2		4,0	ca. 3,0
S-VB				15,0	
S-HA				339,5[1] / 260,0[2]	
S-HB				351,0[1] / 271,5[2]	
Ö-VA	Ölkühlerlüfter			7,5	ca. 4,0
Ö-HB				349,5[1] / 270,0[2]	
F1-V	Stromabn.-Fuß		1	16,5	ca. 4,0
F1-H				339,5[1] / 260,0[2]	
FW2-V	Stromabn.-Fuß[3]	ICE 1	2	15,0	
FW2-H				340,5	
W-V	Stromabn.-Wippe	ICE 1/2		16,5	ca. 5,2
W-H				340,0[1] / 260,5[2]	
Ü-V	Wagenübergang	ICE 1		47,0	Quellen noch nicht identifiziert
Ü-H				311,0	
M	Wagenmitte			60,0	
Ü-RA	Wagenübergang	ICE 1[4]		100,0	
Ü-RB				126,0	
M-R	Wagenmitte			113,0	
A	Antennen	ICE 1[5]		132,0	ca. 4,0

[1] ICE 1, [2] ICE 2, [3] inkl. Wippe des zweiten, abgesenkten Stromabnehmers, [4] ICE 1-Restaurantwagen, [5] ICE 1-Servicewagen (hinter Restaurantwagen)

Tabelle 4 Auflistung der zu untersuchenden Schallquellen mit Angabe der Abkürzungen, Namen und Auswertepositionen

4.2.2 Eindimensionale vertikale Pegelverteilungen

Die hierzu durchgeführte Datenauswertung weist folgende Unterschiede zu den zweidimensionalen Ergebnissen in Abschnitt 4.1 auf:

- Der Abstand zwischen zwei Meßpunkten in Höhenrichtung wird zur besseren Erkennung von Details auf 0,1 m verringert.

- Für jede Schnittebene werden die Fokusabstände neu, und zwar für jede Quelle individuell angesetzt. Befinden sich in einer Ebene zwei Quellen, werden zwei verschiedene Fokusabstände für die unterschiedlichen Höhenbereiche der Quellen gewählt. Dies führt zwar in den Pegelverläufen zu geringfügigen Unstetigkeiten an den Bereichsübergängen, diese haben jedoch keine physikalische Bedeutung.

- Bezüglich der Wippe des hier untersuchten Stromabnehmers DSA 350 SEK ist bekannt, daß deren Emission wesentliche Frequenzkomponenten außerhalb des hier betrachteten Frequenzbereichs enthält [5]. Daher wird in diesem Fall ausnahmsweise die obere Frequenzgrenze für das WV12-Array auf 4,5 kHz heraufgesetzt (siehe Abschnitt 4.3.1). Mögliche Fehler, die sich durch diesen Schritt ergeben, werden in Abschnitt 4.3.2 abgeschätzt. Ferner wird ein Fokusabstand von 4,37 m als geeigneter angesehen als die in Abschnitt 4.1 verwendeten 4,0 m, um die Anteile von beiden Wippenseiten gleichermaßen zu berücksichtigen und hierdurch ein Maximum in etwa 5,2 m Höhe zu erhalten.

Eine nochmalige Auflistung der betrachteten Zugkoordinaten, in der auch die aktuell benutzten Fokusabstände mit den zugehörigen Höhenbereichen genannt werden, enthält Tabelle 5. Die mit diesen Parametern angefertigten Bilder zeigen zum einen die gemessenen Pegelverteilungen aller Vorbeifahrten separat in drei Geschwindigkeitsbereichen. Andererseits sind zur Anschauung für jeden Geschwindigkeitsbereich auch die über die zugehörigen Fahrten gemittelten Verteilungen dargestellt. Anhand dieser Ergebnisse wird im folgenden festgelegt, für welche der in Tabelle 4 aufgelisteten Schallquellen eine weitergehende Analyse der Schallemission sinnvoll ist.

Darstellungen im Anhang: • Bilder C1 bis C21 für alle untersuchten Schnittebenen;
Beispiel im Hauptteil für eine ausgewählte Schnittebene: • Bild 9 für die Zugkoordinate der Wippe am vorderen Triebkopf.

➔ Wie schon in Abschnitt 4.1 angemerkt, repräsentiert die an der Zugkoordinate 1,0 m in ca. 3,2 m Höhe geortete Quelle die Abstrahlung des vorderen Fahrmotorlüfters. Eine Schallemission aufgrund einer eventuellen Strömungsablösung im oberen Bugbereich des ICE 1 wird somit nicht beobachtet.

Zug-art	Zug-koordinate [m]	Fokusebene			Bildnummer
		von Höhe [m]	bis Höhe [m]	Abstand [m]	Quelle in der betrachteten Schnittebene
ICE 1	1,0	1,0	6,0	3,37	Bild C1: B1-V
	4,0	1,0	6,0	3,37	Bild C2: S-VA
	7,5	1,0	6,0	5,67	Bild C3: Ö-VA
	15,0	1,0	3,6	3,37	Bild C4: S-VB
		3,6	6,0	4,87	Bild C5: FW2-V
	16,5	1,0	4,6	4,87	Bild C6: F1-V
		4,6	6,0	4,37	Bild C7 und 9: W-V
	47,0	1,0	6,0	3,37	Bild C8: Ü-V
	60,0	1,0	6,0	3,37	Bild C9: M
	100,0	1,0	6,0	3,37	Bild C10: Ü-RA
	113,0	1,0	6,0	3,37	Bild C11: M-R
	126,0	1,0	6,0	3,37	Bild C12: Ü-RB
	132,0	1,0	6,0	4,87	Bild C13: A
	311,0	1,0	6,0	3,37	Bild C14: Ü-H
	339,5	1,0	3,6	3,37	Bild C15: S-HA
		3,6	6,0	4,87	Bild C16: F1-H
	340,0	1,0	6,0	4,37	Bild C17: W-H
	340,5	1,0	6,0	4,87	Bild C18: FW2-H
	349,5	1,0	6,0	4,07	Bild C19: Ö-HB
	351,0	1,0	6,0	3,37	Bild C20: S-HB
	356,0	1,0	6,0	3,37	Bild C21: B1-H
ICE 2	1,0	1,0	6,0	3,37	Bild 10: B2-V
	4,0	1,0	6,0	3,37	Bild C2: S-VA
	7,5	1,0	6,0	5,67	Bild C3: Ö-VA
	15,0	1,0	3,6	3,37	Bild C4: S-VB
	16,5	1,0	4,6	4,87	Bild C6: F1-V
		4,6	6,0	4,37	Bild C7 und 9: W-V
	260,0	1,0	3,6	3,37	Bild C15: S-HA
		3,6	6,0	4,87	Bild C16: F1-H
	260,5	1,0	6,0	4,37	Bild C17: W-H
	270,0	1,0	6,0	4,07	Bild C19: Ö-HB
	271,5	1,0	6,0	3,37	Bild C20: S-HB

Tabelle 5 Auflistung der untersuchten Schnittebenen mit Angabe der Zugkoordinaten, Fokusabständen, betrachteten Quellen und Bildnummern

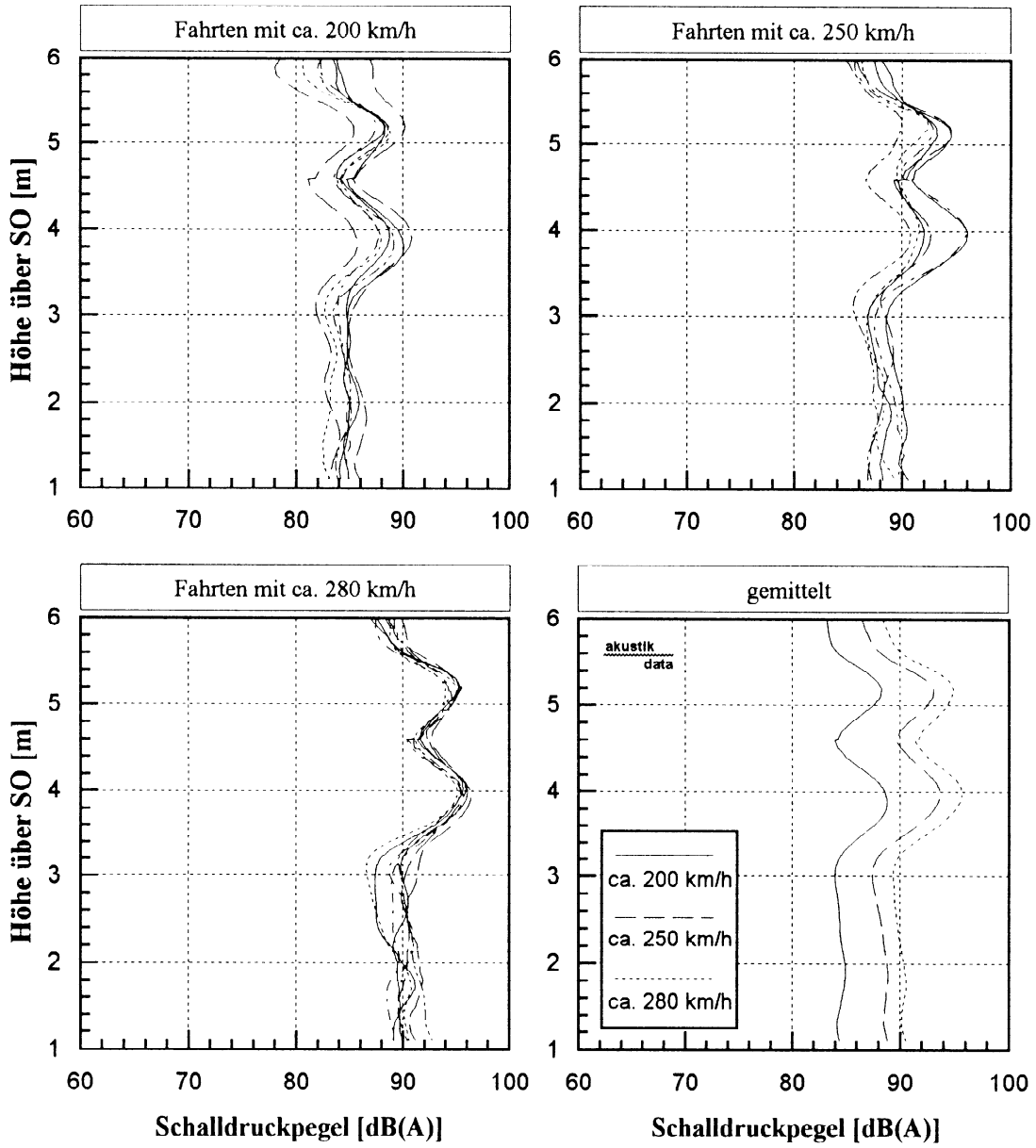


Bild 9 Vertikale Pegelverteilungen an der Zugkoordinate 16,5 m bei allen ICE 1- und ICE 2-Vorbeifahrten gemessen mit dem WV-Schachtel-Array im Frequenzbereich 180 bis 4500 Hz und hieraus gemittelte Verteilungen für drei Geschwindigkeiten; geortete Quelle: W-V in ca. 5,2 m Höhe

➔ Dies gilt auch für das Zugende an der Koordinate 356,0 m. Es sei erwähnt, daß die Existenz von Strömungsablösungen im oberen Bugbereich des ICE 1 bereits in der Untersuchung [6] widerlegt wurde, da die dort geortete Schallquelle eindeutig auf die Abstrahlung der Fahrmotorlüfter zurückzuführen war.

➔ Von den vier vorhandenen Fahrmotorlüftern weisen die beiden Lüfter am selben Triebkopf fast identische gemittelte Spitzenpegel bei gleicher Geschwindigkeit auf. Da die gemessene Emission der Lüfter S-VB und S-HA durch die Abstrahlung aus den nahegelegenen Stromabnehmer-Fußbereichen im Pegel beeinflußt sein kann, werden im folgenden nur die Lüfter S-VA und S-HB stellvertretend für den anderen Lüfter am jeweiligen Triebkopf betrachtet.

➔ Größere Schwierigkeiten bereitet hingegen die Aufgabe, die seitliche Emission des vorderen Ölkühlerlüfters Ö-VA zu bestimmen. So werden die Ergebnisse des WX32-Arrays in Kapitel 6 deutlich machen, daß bei hohen Geschwindigkeiten die Emission des Stromabnehmer-Fußbereichs auf dem vorderen Triebkopf die Emission der Ölkühlerlüfter bei weitem überragt und die Meßwerte an der Zugkoordinate 7,5 m noch erheblich mitbestimmt. In den vorliegenden vertikalen Pegelverteilungen zeigt sich, daß für den Ölkühlerlüfter Ö-VA höhere Pegel und eine stärkere Geschwindigkeitsabhängigkeit beobachtet werden als für den Ölkühlerlüfter Ö-HB auf dem hinteren Triebkopf. Dort sind die Meßwerte an der Koordinate des Ölkühlerlüfters nämlich weitaus weniger von der Emission des Stromabnehmer-Fußbereichs beeinflußt als am vorderen Triebkopf, da zum einen die abgestrahlten Pegel aus dem Fußbereich hier deutlich geringer ausfallen und diese zum anderen durch die zusätzliche Richtwirkung in Fahrtrichtung an der Koordinate des Lüfters Ö-HB noch weiter abgeschwächt sind.

Außerdem sind die Öffnungen der Ölkühlerlüfter um ±0,8 m seitlich versetzt angeordnet, und zwar im Falle von Ö-HB in Richtung der Array-Mikrofone, im Falle von Ö-VA jedoch in entgegengesetzter Richtung. Aufgrund dieser Tatsache kann die Emission des Lüfters Ö-HB offenbar zuverlässiger bestimmt werden als für den Lüfter Ö-VA, dessen Abstrahlung daher erst in Abschnitt 6.2 durch eine Abschätzung ermittelt wird. Es sei noch erwähnt, daß die hohen Pegel in etwa 3,0 m Höhe über SO, welche dem Fahrmotorlüfter zuzuordnen sind, in diesem Zusammenhang nicht von Bedeutung sind.

➔ In Höhe des Stromabnehmer-Fußbereichs und der Stromabnehmer-Wippe sind bei allen Fahrten in den Pegelverteilungen deutlich ausgeprägte Pegelmaxima vorhanden. Bei Geschwindigkeiten von ca. 200 km/h muß anhand der später in Kapitel 6 gezeigten Ergebnisse damit gerechnet werden, daß die gemessene Emis-

sion der Fußbereiche auf beiden Triebköpfen auch Anteile der Abstrahlung der nahegelegenen Ölkühlerlüfter enthält. Dies ist unproblematisch, wenn die entsprechenden Meßwerte in späteren Prognoserechnungen für eine aus diesem Lüfter und dem Stromabnehmer-Fuß zusammengefaßte Quelle verwendet werden.

➔ An den Wagenübergängen Ü-V und Ü-H sind trotz der geringen Absolutwerte deutliche Maxima in den Pegelverteilungen bei etwa 3,5 m Höhe über SO zu beobachten. Diese Pegel repräsentieren offenbar die Abstrahlung der Lüfter für die Klimatisierung der Wagen. Es fällt weiterhin auf, daß eine solche Quelle an der Zugkoordinate 100,0 m (Wagenübergang Ü-RA) nicht zu erkennen ist, an der sich am Zug auch tatsächlich kein Klimalüfter befindet. Eine weitere vermutete Schallquelle, nämlich eine Strömungsablösung am erhöhten Dach des Restaurantwagens, kann weder am vorderen (Ü-RA) noch am hinteren Ende dieses Wagens (Ü-RB) identifiziert werden. Als einzige relevante Schallquelle im Bereich der Wagenübergänge wird somit im folgenden die Emission der Klimalüfter untersucht; hierfür werden weiterhin die Bezeichnungen Ü-V und Ü-H verwendet.

➔ Bei den Mittelwagen ist im Bereich der Wagenmitte, d. h. exemplarisch an der Zugkoordinate 60,0 m (Quelle M), keine ausgeprägte Schallquelle zu erkennen. Vorhandene Pegelanhebungen bis etwa 2,5 m Höhe über SO sind als Auswirkung des Rollgeräuschs anzusehen. Zwei Ausnahmen hiervon sind schon in Abschnitt 4.1 diskutiert worden, nämlich der Lüfter der Bordküche (Zugkoordinate 113,0 m, Quelle M-R) und die Antennen auf dem Servicewagen (Zugkoordinate 132,0 m, Quelle A). Da diese Quellen im Gegensatz zu den Klimalüftern der Mittelwagen am gesamten Zug nur jeweils einmal vorhanden sind und auch nur geringe Pegel abstrahlen, werden sie für den Vorbeifahrpegel als vernachlässigbar eingestuft und nicht weiter untersucht.

Als Ergebnis der obigen Ausführungen werden die folgenden hochliegenden Schallquellen als wesentlich für die A-bewertete Gesamtemission angesehen und im nächsten Abschnitt einer Regressionsanalyse unterzogen:

- Fahrmotorlüfter (Quellen S-VA und S-HB),

- Ölkühlerlüfter (Quelle Ö-HB, bezüglich Quelle Ö-VA siehe Abschnitt 6.2),

- Stromabnehmer-Fußbereich (Quellen F1-V, FW2-V, F1-H und FW2-H),
- Stromabnehmer-Wippe (Quellen W-V und W-H),
- Wagenübergänge bzw. dortige Klimalüfter (Quellen Ü-V und Ü-H).

Als zusätzliches Ergebnis werden in Bild 10 nochmals Pegelverteilungen an der Zugkoordinate 1,0 m gezeigt, und zwar als Vergleich zwischen dem ICE 1 und dem ICE 2. Im Falle des ICE 1 sind die gemittelten Verteilungen dargestellt, für den ICE 2 liegen drei ausgewertete Fahrten in zwei Geschwindigkeitsbereichen vor.

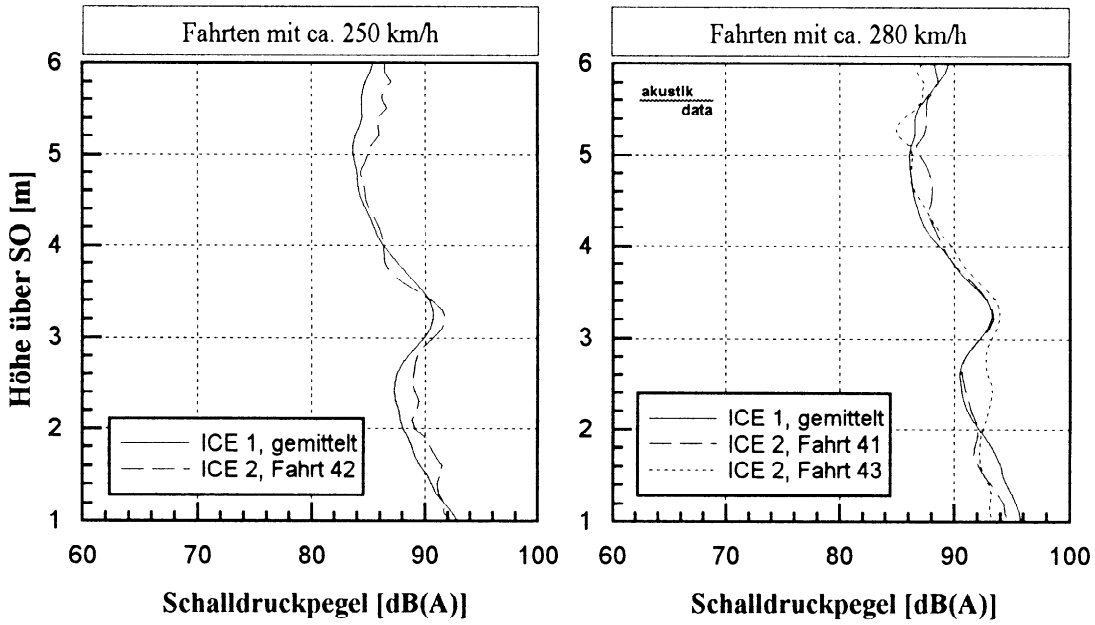


Bild 10 Vertikale Pegelverteilungen an der Zugkoordinate 1,0 m des ICE 1 (gemittelt über alle Vorbeifahrten) und des ICE 2 (drei einzelne Fahrten) für zwei Geschwindigkeitsbereiche gemessen mit dem WV-Schachtel-Array im Frequenzbereich 180 bis 2820 Hz

➔ Während sich die den Fahrmotorlüftern zuzuordnenden Pegelmaxima in einer Höhe von 3,2 m über SO um nicht mehr als 1 dB(A) unterscheiden, fällt die Schallemission beim ICE 2 in einem Bereich um etwa 2,5 m über SO in zwei von drei Fällen merklich höher aus als beim ICE 1. Es sei hierzu auf Abschnitt 6.1 verwiesen, wo dieser Unterschied noch deutlicher herausgestellt wird.

4.2.3 Regressionsanalyse für die Schallemission der einzelnen Quellen

Für die im vorigen Abschnitt ausgewählten Schallquellen sind die aus den Bildern C1 bis C21 abgelesenen Pegelmaxima in den Bildern 11a bis 11k über der Geschwindigkeit aufgetragen. Mit diesen Werten wurde je Einzelquelle eine Regressionsanalyse durchgeführt, so daß in jedem Bild zusätzlich die daraus berechnete Regressionsgerade eingezeichnet ist. Diese Geraden lassen sich jeweils durch einen Pegel $L_{A,200}$ bei der Bezugsgeschwindigkeit von 200 km/h und einen Geschwindigkeitsexponenten α_A beschreiben. Mittels $L_{A,200}$ und α_A wird der Emissionspegel L_A der fraglichen Schallquelle für eine beliebige Geschwindigkeit υ berechnet anhand

$$L_A(\upsilon) = L_{A,200} + \alpha_A \cdot 10\,\lg\,(\upsilon/200\ \text{km/h})\ \ [\text{dB(A)}]\ , \qquad (1)$$

wobei sich der Meßabstand jeder Quelle individuell aus dem Abstand zwischen Array und Gleismitte von 4,87 m ergibt. Für die untersuchten Schallquellen sind die Werte von $L_{A,200}$ und α_A sowie die zugehörigen Standardabweichungen σ und Regressionskoeffizienten r in Tabelle 6 aufgelistet.

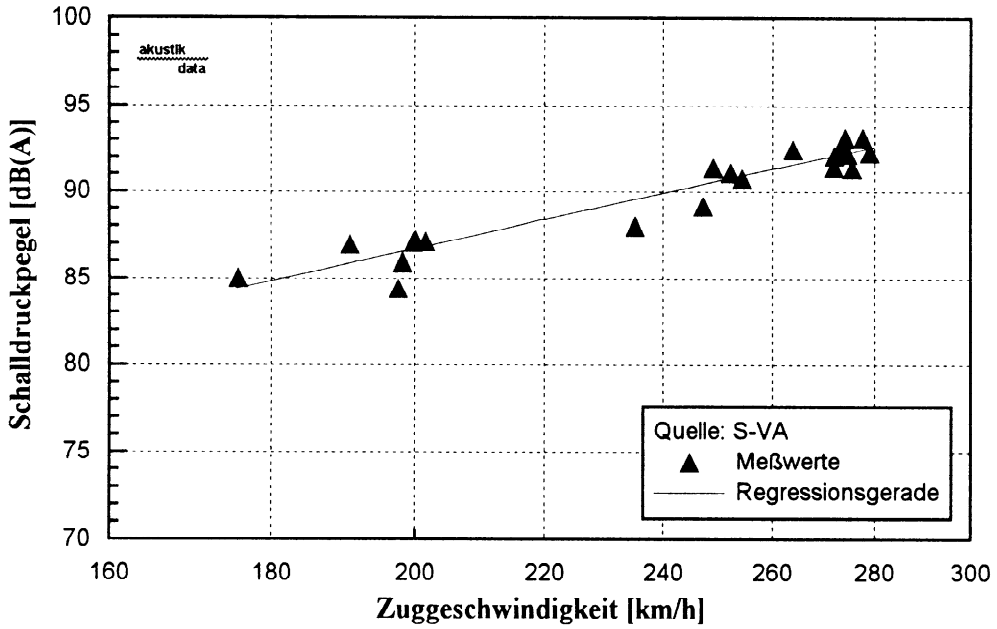


Bild 11a Gemessene Pegelmaxima am vorderen Fahrmotorlüfter des vorlaufenden Triebkopfs des ICE 1 und ICE 2 sowie hieraus berechnete Regressionsgerade

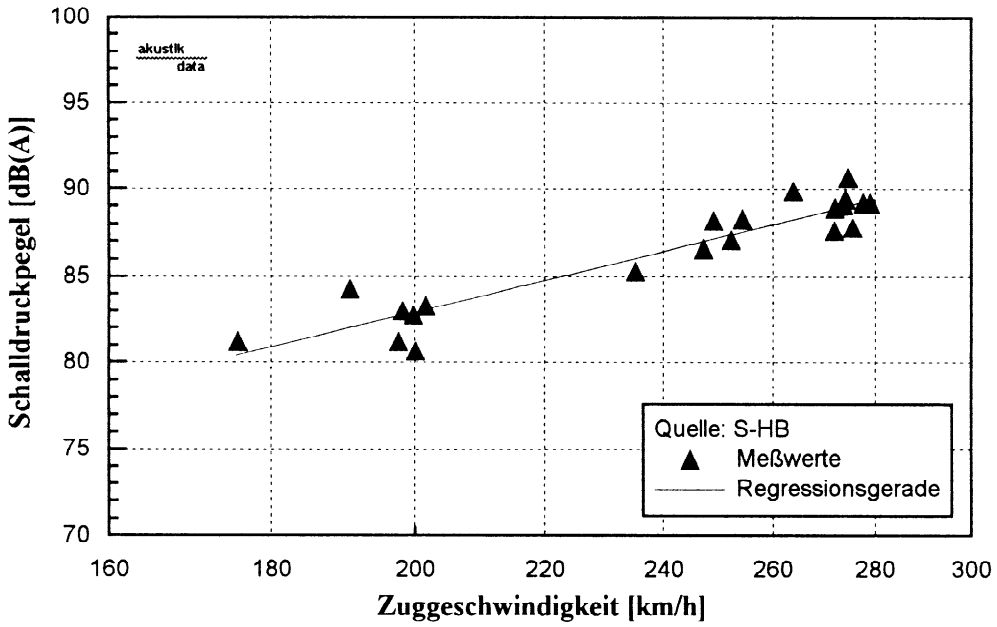


Bild 11b Gemessene Pegelmaxima am hinteren Fahrmotorlüfter des nachlaufenden Triebkopfs des ICE 1 und ICE 2 sowie hieraus berechnete Regressionsgerade

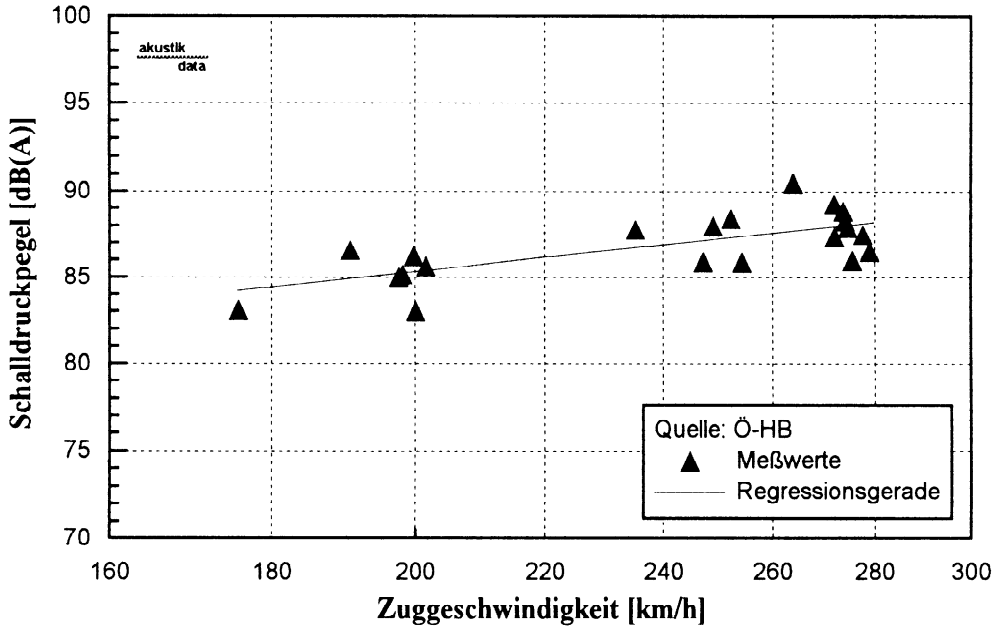


Bild 11c Gemessene Pegelmaxima am hinteren Ölkühlerlüfter des nachlaufenden Triebkopfs des ICE 1 und ICE 2 sowie hieraus berechnete Regressionsgerade

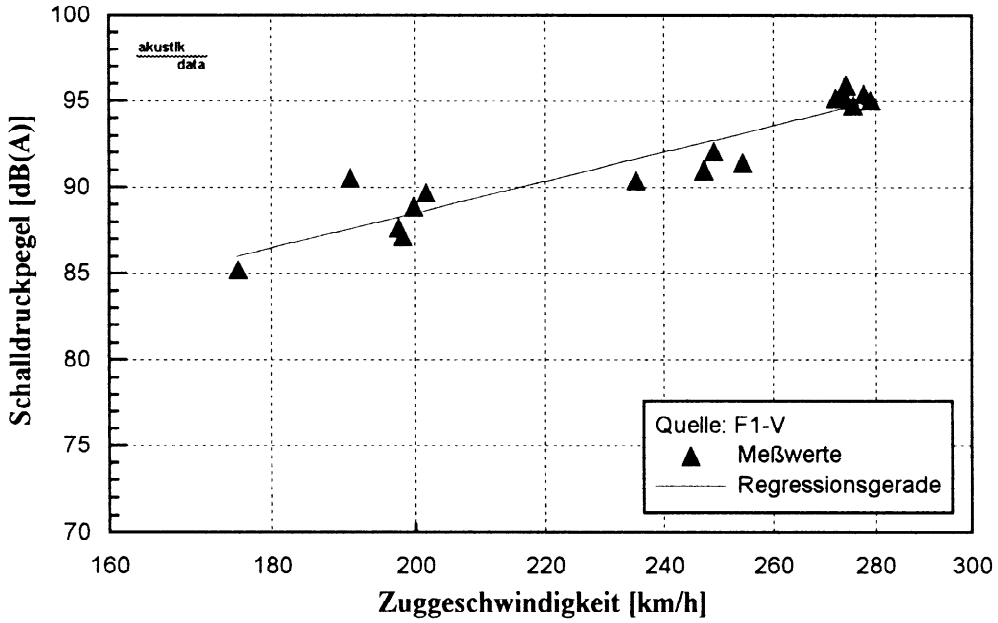


Bild 11d Gemessene Pegelmaxima am Stromabnehmer-Fuß des vorlaufenden Triebkopfs des ICE 1 und ICE 2 **mit einem Stromabnehmer je Triebkopf** sowie hieraus berechnete Regressionsgerade

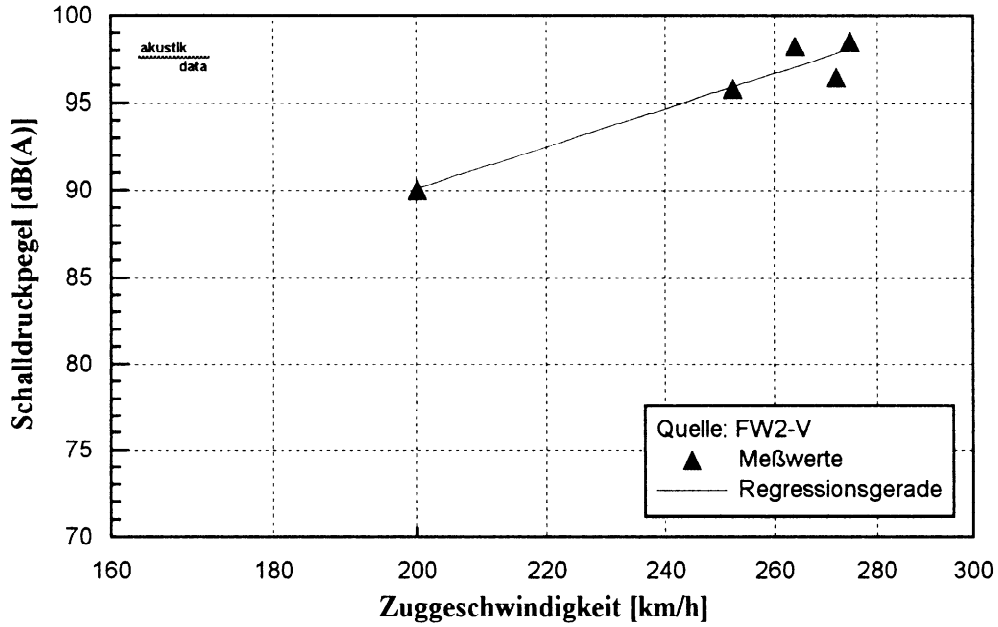


Bild 11e Gemessene Pegelmaxima am Stromabnehmer-Fuß des vorlaufenden Triebkopfs des ICE 1 **mit zwei Stromabnehmern je Triebkopf** sowie hieraus berechnete Regressionsgerade

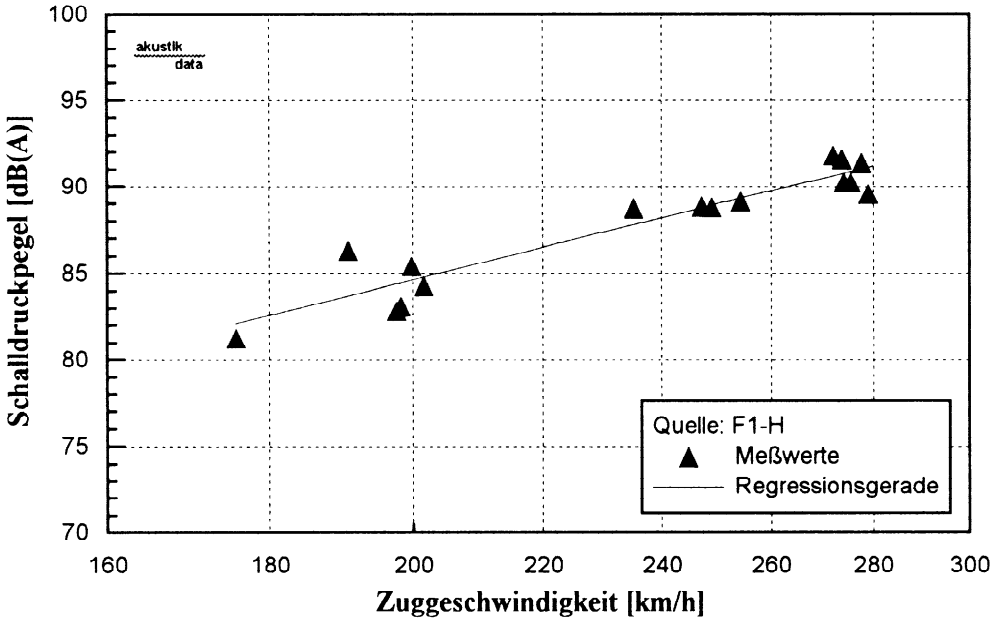


Bild 11f Gemessene Pegelmaxima am Stromabnehmer-Fuß des nachlaufenden Triebkopfs des ICE 1 und ICE 2 **mit einem Stromabnehmer je Triebkopf** sowie hieraus berechnete Regressionsgerade

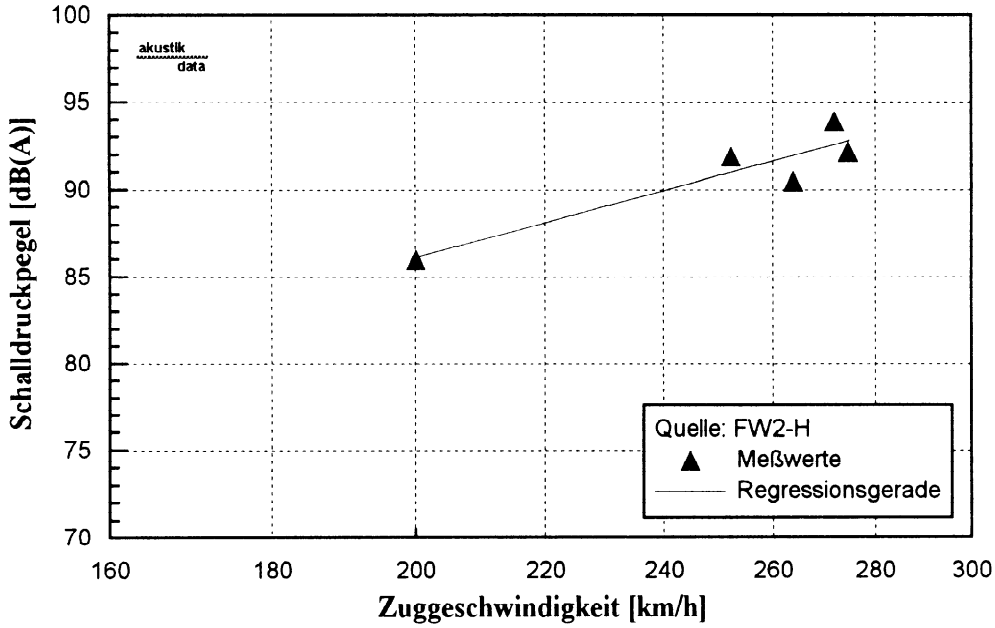


Bild 11g Gemessene Pegelmaxima am Stromabnehmer-Fuß des nachlaufenden Triebkopfs des ICE 1 **mit zwei Stromabnehmern je Triebkopf** sowie hieraus berechnete Regressionsgerade

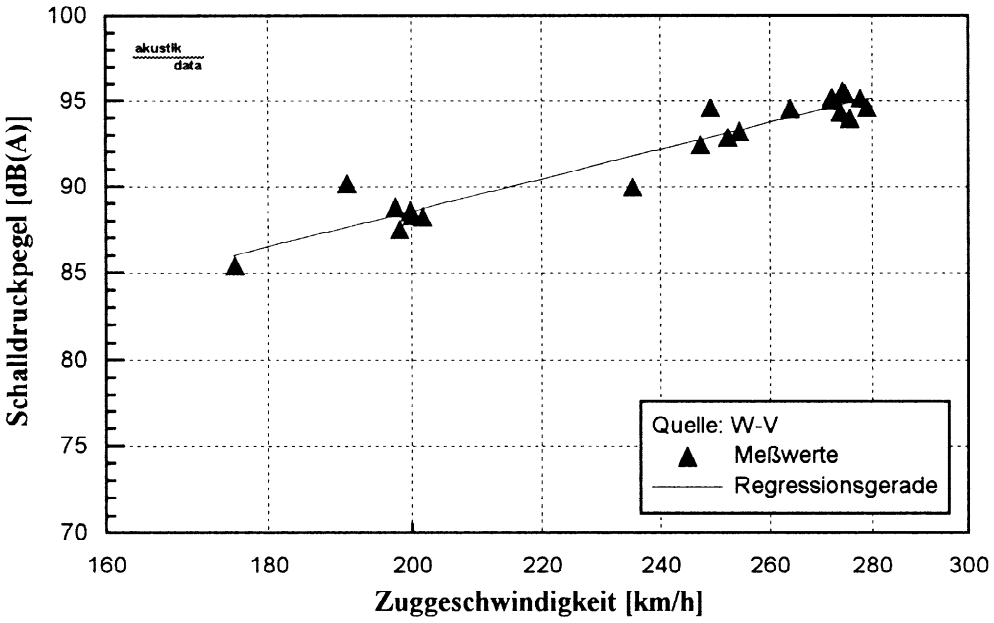


Bild 11h Gemessene Pegelmaxima an der Stromabnehmer-Wippe des vorlaufenden Triebkopfs des ICE 1 und ICE 2 sowie hieraus berechnete Regressionsgerade

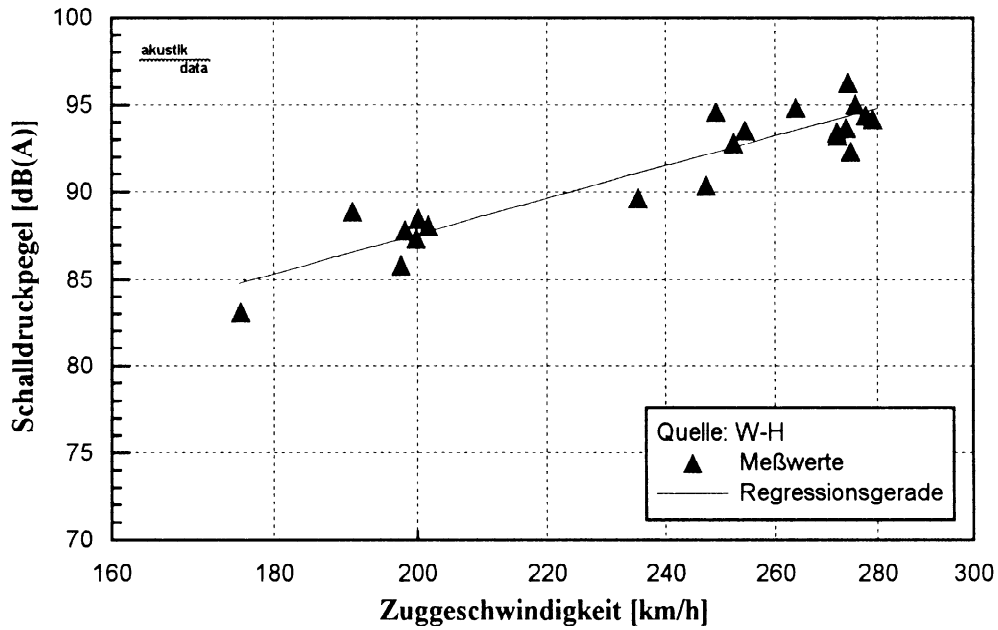


Bild 11i Gemessene Pegelmaxima an der Stromabnehmer-Wippe des nachlaufenden Triebkopfs des ICE 1 und ICE 2 sowie hieraus berechnete Regressionsgerade

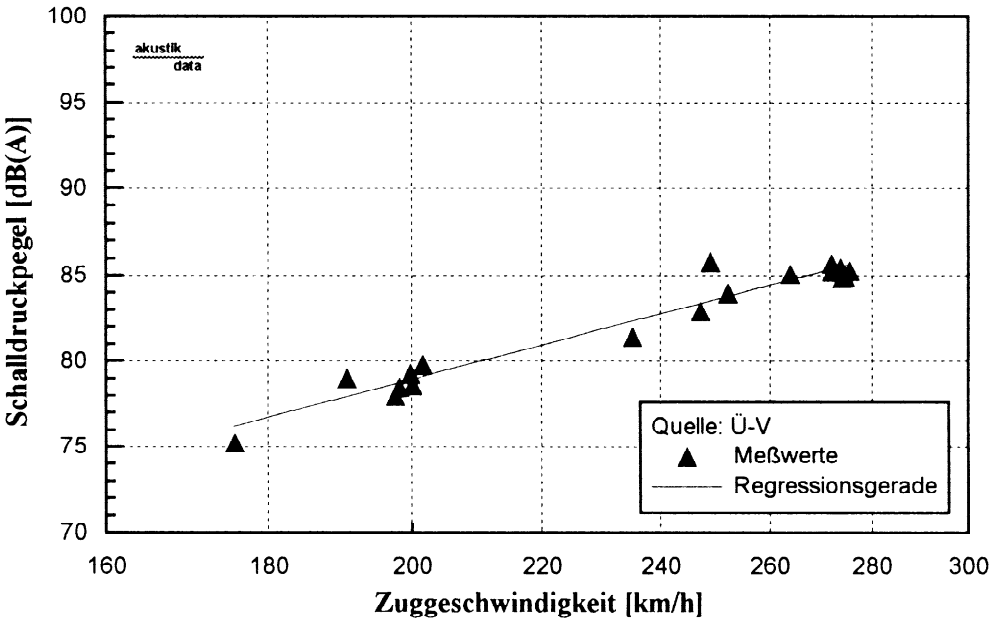


Bild 11j Gemessene Pegelmaxima am Übergang vom ersten zum zweiten Mittelwagen des ICE 1 bzw. am dortigen Klimalüfter sowie hieraus berechnete Regressionsgerade

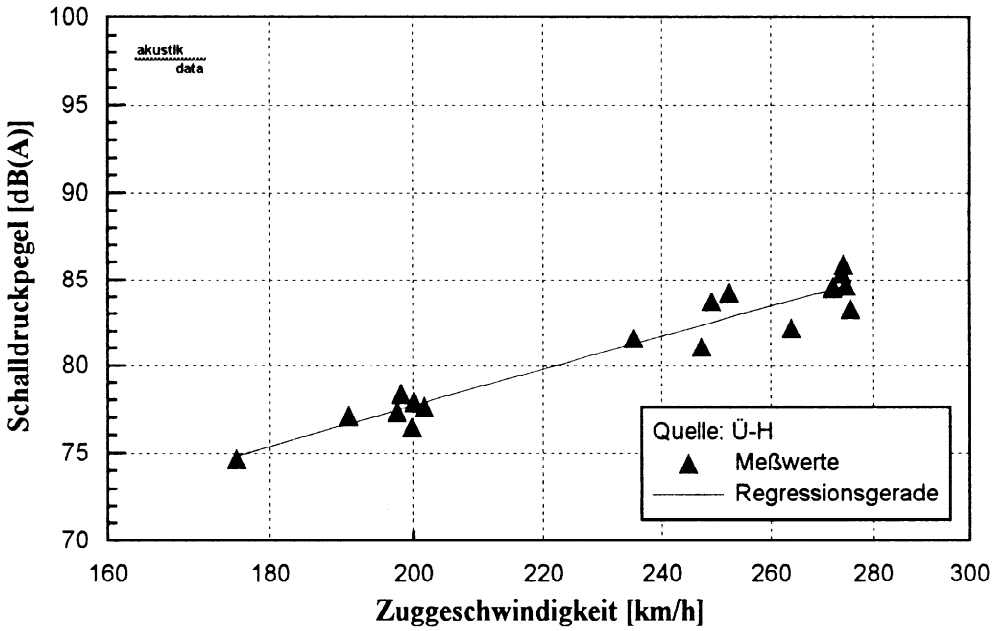


Bild 11k Gemessene Pegelmaxima am Übergang vom elften zum zwölften Mittelwagen des ICE 1 bzw. am dortigen Klimalüfter sowie hieraus berechnete Regressionsgerade

Bezeichnung der Quelle	$L_{A,200}$ [dB(A)]	α_A	σ [dB(A)]	r
S-VA	86,7	4,0	0,9	0,95
S-HB	82,9	4,5	1,1	0,94
Ö-HB	85,3	2,0	1,4	0,71
F1-V	88,5	4,4	1,3	0,93
F1-H	84,6	4,5	1,2	0,94
FW2-V	90,1	5,8	1,1	0,96
FW2-H	86,1	4,9	1,3	0,93
W-V	88,6	4,6	1,0	0,96
W-H	87,6	4,9	1,4	0,93
Ü-V	78,9	4,8	0,8	0,97
Ü-H	77,7	5,1	1,0	0,97

Tabelle 6 A-bewertete Bezugspegel bei 200 km/h in 4,87 m Abstand von Gleismitte sowie Geschwindigkeitsexponenten, Standardabweichungen und Regressionskoeffizienten für die akustisch relevanten hochliegenden Schallquellen des ICE 1 und ICE 2 im Frequenzbereich 180 bis 2820 Hz (bzw. 180 bis 4500 Hz für die Quellen W-V und W-H)

Zu den Werten in Tabelle 6 ist anzumerken:

➔ Der Regressionskoeffizient r liegt in den meisten Fällen zwischen 0,93 und 0,97, wodurch sich der in (1) gewählte funktionale Zusammenhang als geeignet erweist. Die Standardabweichung σ nimmt Werte zwischen 0,8 und 1,4 dB(A) an, die für akustische Messungen ebenfalls als zufriedenstellend einzustufen sind.

➔ Eine abschließende Diskussion der ermittelten Bezugspegel $L_{A,200}$ und Geschwindigkeitsexponenten α_A findet sich in Abschnitt 7.1. Zunächst werden die Werte nach Tabelle 6 in Testauswertungen hinsichtlich ihrer Aussagefähigkeit überprüft und anhand von Schalldruckspektren und der Ergebnisse der Messungen mit dem WX-Array in einigen Punkten ergänzt.

➔ Es sei aber schon an dieser Stelle angemerkt, daß die Geschwindigkeitsexponenten für die Stromabnehmer-Wippe mit Werten zwischen 4,6 und 4,9 im Vergleich mit

früheren Messungen am gleichen Stromabnehmer (DSA 350 SEK) merklich geringer ausfallen. In einem Windkanal-Versuch lag der entsprechende Exponent zwischen 6,5 und 7,0 [7], und auch in einem kürzlich durchgeführten Streckenversuch wurde für die Wippe zumindest ein Geschwindigkeitsexponent von 5,7 ermittelt [5]. Somit erscheint es angezeigt, bei den folgenden Testauswertungen insbesondere die Emission der Wippe bezüglich ihrer Geschwindigkeitsabhängigkeit zu überprüfen.

4.3 Anmerkungen zur Genauigkeit der Ergebnisse

4.3.1 Einschränkung durch die obere bzw. untere Grenzfrequenz

Aufgrund der Geometrie des verwendeten Mikrofon-Arrays können die Messungen nur in einem begrenzten Frequenzbereich ausgewertet werden. Gewählt wurden als untere bzw. obere Grenzfrequenz 180 bzw. 2820 Hz. Die Frage, ob hierdurch wichtige Geräuschanteile eventuell unberücksichtigt bleiben, wird im folgenden untersucht. In Bild 12 werden einige der vertikalen Pegelverteilungen aus Bild 9 an der Zugkoordinate von Stromabnehmer-Wippe und -Fuß am vorderen Triebkopf für jeweils eine ausgewählte Fahrt pro Geschwindigkeitsbereich nochmals gezeigt, wobei die Daten in drei verschiedenen Frequenzbereichen ausgewertet wurden.

➔ Das Heraufsetzen der oberen Grenzfrequenz von 2820 auf 4500 Hz hat im Bereich der Wippe in ca. 5,2 m Höhe über SO eine deutliche Zunahme des gemessenen Pegels um etwa 2 dB(A) zur Folge. Somit wäre in diesem Falle die obere Grenzfrequenz mit 2820 Hz sicherlich zu niedrig angesetzt, was bei den Auswertungen in Abschnitt 4.2 jedoch bereits berücksichtigt wurde. Als Ursache für die starke Abstrahlung der Wippe bei höheren Frequenzen ist die Emission der Hubbegrenzer zu nennen (siehe Abschnitt 4.4).

➔ Das Pegelmaximum in Höhe des Stromabnehmer-Fußbereichs (ca. 4,0 m über SO) nimmt hingegen nur geringfügig beim Heraufsetzen der oberen Grenzfrequenz zu, d. h. um weniger als 0,5 dB(A). Offensichtlich sind unterhalb von 2820 Hz alle wesentlichen Geräuschanteile dieses Quellbereichs enthalten. Es wird angenommen, daß dies auch für die anderen betrachteten Schallquellen, d. h. die Fahrmotor-, Ölkühler- und Klimalüfter gilt.

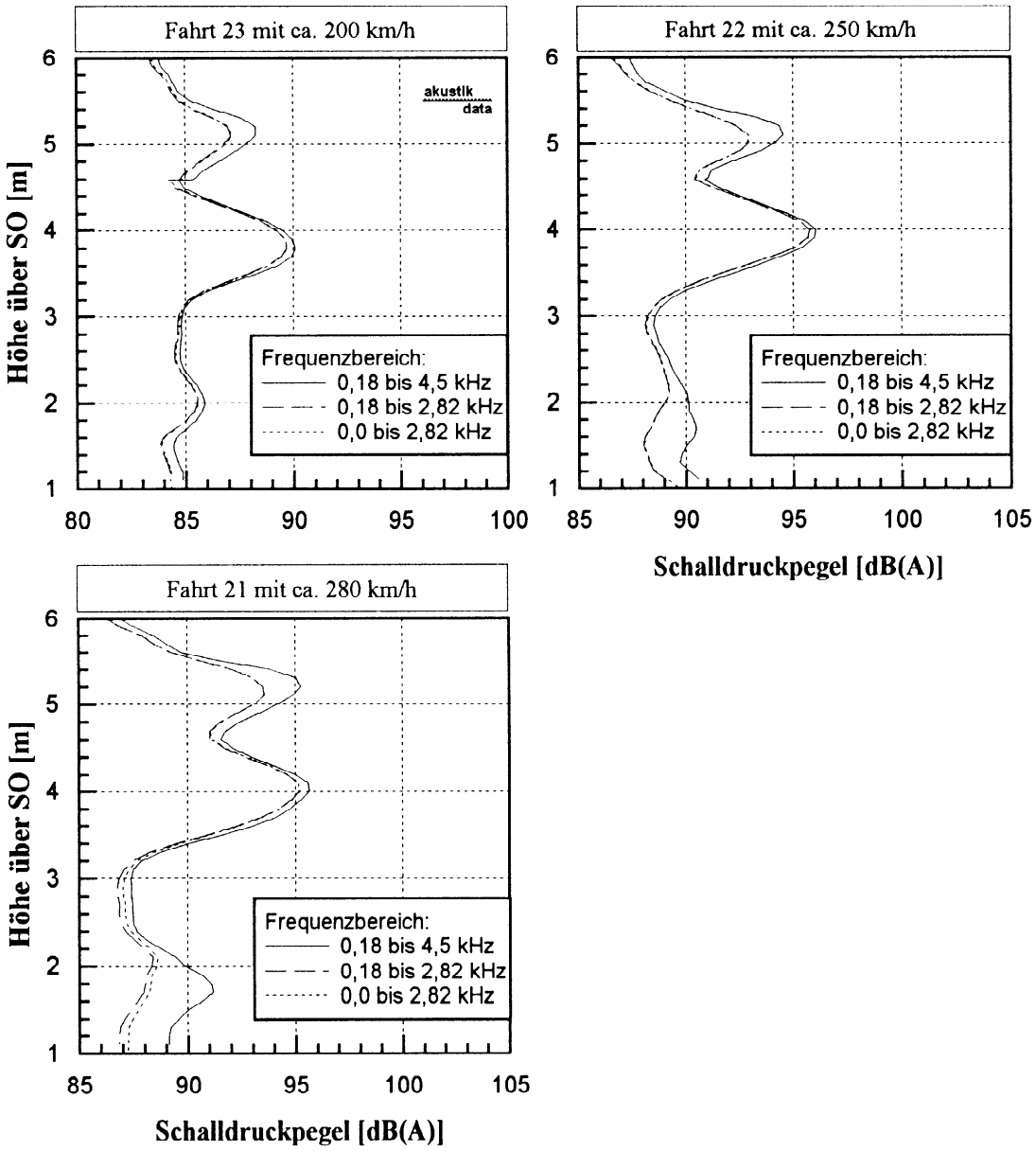


Bild 12 Vertikale Pegelverteilungen an der Zugkoordinate 16,5 m bei drei ICE 1-Vorbeifahrten gemessen mit dem WV-Schachtel-Array in drei verschiedenen Frequenzbereichen

➔ Die Wahl einer oberen Grenzfrequenz von 4500 Hz ist somit nur für die Stromabnehmer-Wippe erforderlich und sollte als Ausnahme angesehen werden, da hierdurch Aliasing-Keulen in anderen Höhenbereichen erzeugt werden können. So sind z. B. unterhalb von ca. 2,0 m über SO nach Heraufsetzen der oberen Grenzfrequenz deutlich angehobene Pegel bei den Fahrten 21 und 22 zu verzeichnen.

Der Ursprung dieser scheinbar georteten Quellen (Emission der Wippe oder Rollgeräusch) ist nicht zweifelsfrei zu klären.

➔ Bezüglich der unteren Frequenzgrenze von 180 Hz kann die eindeutige Aussage gemacht werden, daß Anteile unterhalb dieser Frequenz für die A-bewertete Gesamtemission unbedeutend sind, da sich die gemessenen Pegel bei Verschiebung der unteren Grenzfrequenz von 180 nach 0 Hz praktisch nicht ändern.

4.3.2 Einfluß des Rollgeräuschs auf die gemessenen Pegel der hochliegenden Schallquellen

In diesem Zusammenhang stellt sich das Problem, ob die Wahl der oberen Grenzfrequenz von 4500 Hz für die Meßwerte in Höhe der Wippe und die damit verbundenen Aliasing-Effekte zur Folge haben, daß die dort gemessenen Pegel Anteile des Rollgeräuschs enthalten. Wegen des geringeren Geschwindigkeitsexponenten des Rollgeräuschs um etwa 3,0 könnte dies bei niedrigen Geschwindigkeiten zu einer Überschätzung der Emission der Wippe führen und somit den niedrigen hier bestimmten Geschwindigkeitsexponenten der Quellen W-V und W-H erklären.

Um dieser Frage nachzugehen, wird die Situation an der Zugkoordinate des Stromabnehmers anhand einer Simulationsrechnung nachgebildet. Es werden hierbei drei punktförmige Rauschquellen in den Höhen 5,2 m (Wippe), 4,0 m (Fußbereich) und 0,5 m (Rollgeräusch) über SO modelliert, welche sich mit 200 km/h am WV-Array vorbeibewegen. Für das Rollgeräusch wird ein um 3 dB(A) höherer Pegel angesetzt als für die anderen beiden Quellen, was den Verhältnissen bei 200 km/h nahekommt. Es werden relative Pegel dargestellt, wobei geringfügige Ungenauigkeiten in der Amplitude auf die kurze Mittelungszeit zurückzuführen sind. Alle weiteren Parameter bei der Datenauswertung entsprechen denen in Abschnitt 4.2.

Bild 13 zeigt die Pegelverteilungen, mit denen das WV-Schachtel-Array die modellierte Anordnung der Schallquellen abbildet. Hierbei erfolgte die Datenauswertung einerseits im Frequenzbereich von 180 bis 2820 Hz und andererseits von 180 bis 4500 Hz. Ferner sind in jedem Bild drei verschiedene Situationen wiedergegeben, und zwar mit allen drei Quellen, mit den beiden Stromabnehmer-Quellen ohne Rollgeräusch und nur mit dem Rollgeräusch alleine.

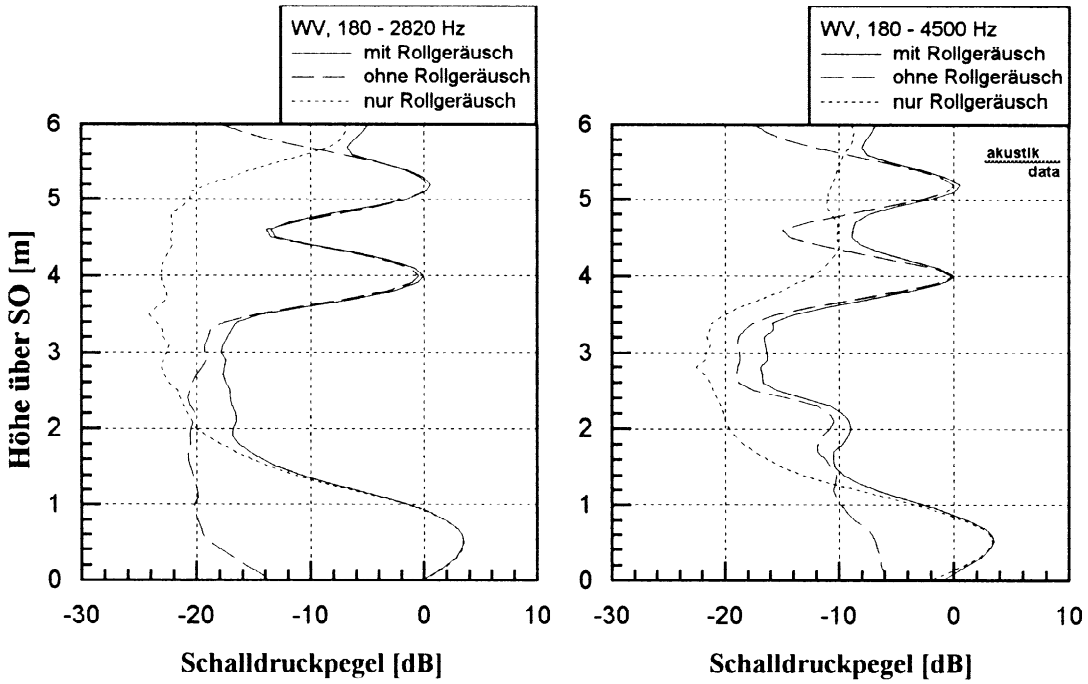


Bild 13 Mit dem WV-Schachtel-Array in zwei Frequenzbereichen bestimmte Pegelverteilungen aus simulierten Daten; modelliert wurden drei punktförmige Rauschquellen in den Höhen 5,2, 4,0 und 0,5 m über SO

➔ Im Frequenzbereich von 180 bis 2820 Hz kommen Aliasing-Effekte infolge des Rollgeräuschs erst in Höhen oberhalb von etwa 5,5 m zum Tragen, so daß die Pegelmaxima von Wippe und Fuß etwa 20 bzw. 23 dB über dem in dieser Höhe gemessenen Pegel des Rollgeräuschs liegen. Es sei angemerkt, daß dies der theoretisch zu erwartenden Nebenkeulen-Unterdrückung bei -22 dB entspricht, nämlich -25 dB Dolph-Shading bezüglich des bei +3 dB angesetzten Rollgeräuschs.

➔ Durch das Heraufsetzen der oberen Grenzfrequenz von 2820 auf 4500 Hz ist ein deutlicher Pegelanstieg der durch das Rollgeräusch hervorgerufenen Aliasing-Quellen im Höhenbereich oberhalb von etwa 4 m zu verzeichnen. Die Pegelmaxima in Höhe der Wippe und des Fußbereichs liegen aber immer noch mindestens 10 dB über dem Anteil des Rollgeräuschs, so daß weiterhin keine Verfälschung der Meßwerte von Wippe und Fuß durch den Einfluß des Rollgeräuschs zu befürchten ist. Folglich müssen die gemessenen Emissionspegel des Stromabnehmers auch im erweiterten Frequenzbereich nicht angezweifelt werden.

➔ Es ist aber auch erkennbar, daß nach der Erhöhung der oberen Grenzfrequenz von 2820 auf 4500 Hz weitere Aliasing-Quellen in etwa 2,2 m über SO und darunter entstanden sind, welche auf der Spiegelung der Stromabnehmer-Quellen an der Array-Mittelachse beruhen. Dieses Beispiel macht deutlich, daß die obere Grenzfrequenz nur in Ausnahmefällen heraufgesetzt werden sollte, um nicht mit scheinbaren Schallquellen konfrontiert zu werden.

4.3.3 Korrektur der gemessenen Pegelmaxima

Eine punktförmige Schallquelle wird durch das WV-Array in vertikaler Richtung als ein örtliches Pegelmaximum abgebildet, dessen Hauptkeulenbreite in Bild 3 ersichtlich war. Wenn allerdings die gemessene Pegelverteilung in Höhe der Quelle breiter ist als die zu erwartende Hauptkeulenbreite, bedeutet dies, daß es sich um einen in Höhenrichtung ausgedehnten Quellbereich handeln muß. Dann repräsentiert nicht der Wert des Pegelmaximums allein die Gesamtenergie des empfangenen Schalls, sondern auch die Verbreiterung in der gemessenen Pegelverteilung ist zu berücksichtigen. So müßte zum abgelesenen Maximalpegel gegebenenfalls eine Differenz hinzuaddiert werden, welche dieser Energiezunahme entspricht.

Andererseits beträgt der Abfall zu beiden Seiten der in den Bildern C1 bis C21 erkennbaren Pegelmaxima meist nur wenige dB(A). Hierdurch enthalten diese Maxima auch Anteile von benachbarten Schallquellen, die prinzipiell nicht vernachlässigt werden dürfen. Somit müßten die abgelesenen Maximalpegel nicht nur wie beschrieben nach oben, sondern auch nach unten korrigiert werden. Es wird allerdings im folgenden angenommen, daß sich beide Effekte näherungsweise kompensieren und daher nicht besonders zu beachten sind.

4.3.4 Verschiebung der Pegelmaxima in Fahrtrichtung

Um die vertikalen Pegelverteilungen in Abschnitt 4.2.2 zu erzeugen, wurde bei allen Fahrten für die jeweilige betrachtete Schallquelle nur eine Zugkoordinate benutzt. Hierbei wurde berücksichtigt, daß sich die horizontale Position des Maximums bei einer bewegten Quelle in Fahrtrichtung verschiebt. Die Geschwindigkeitsabhängigkeit und die statistische Schwankung dieser Verschiebung wurde hierbei allerdings wegen des hohen Aufwands vernachlässigt, so daß die Zugkoordinate nicht für jede Fahrt

individuell gewählt, sondern zwischen den Geschwindigkeiten 200, 250 und 280 km/h gemittelt wurde. In der Regel liegt die Verschiebung zwischen 0,5 und 1,0 m.

Die an diesen einheitlichen Positionen ermittelten Maximalpegel können somit gegenüber den tatsächlichen Maxima geringer ausfallen. In einer Testauswertung wurde diese Differenz überprüft, und zwar am Beispiel der Wippe auf dem vorlaufenden Triebkopf: Wenn der jeweils höchste auftretende Wert in den Pegelverteilungen abgelesen wird, würden sich demnach die Emissionspegel gegenüber den Werten in Tabelle 6 im Mittel um 0,2 dB(A) bei 200 km/h und um 0,6 dB(A) bei 280 km/h erhöhen. Aufgrund der kleinen Pegelunterschiede wird dieser Effekt jedoch insgesamt als vernachlässigbar angesehen. Es wird angenommen, daß dies für alle in Abschnitt 4.2.3 betrachteten Schallquellen gilt. Die Werte in Tabelle 6 sind somit weiterhin als repräsentativ anzusehen.

Für die Fahrmotorlüfter muß allerdings eine gesonderte Betrachtung erfolgen. Hier zeigte sich in den Bildern B1 bis B21, daß das Pegelmaximum bei Geschwindigkeiten $\geq$ 250 km/h teilweise stark nach vorne verschoben geortet wird. Als Zugkoordinate für die betreffenden vertikalen Pegelverteilungen wurde daher eine vergleichsweise große Verschiebung in Fahrtrichtung von mindestens 1,5 m verwendet. Darüber hinaus hat ein seitlich stark verschobenes Maximum zur Folge, daß dieser Pegel aufgrund der Entfernung zum eigentlichen Quellort korrigiert werden muß. Um beide Effekte in die Meßergebnisse einzubeziehen, werden als geeignete Approximation die Geschwindigkeitsexponenten für die Fahrmotorlüfter um jeweils 1,0 angehoben. Hierdurch erhöhen sich die zugehörigen Emissionspegel um etwa 1,5 dB(A) bei 280 km/h; bei 200 km/h tritt hingegen keine Änderung auf.

4.4 Schalldruckspektren der einzelnen Quellen

Die Auswertung der Array-Daten liefert für jeden Meßpunkt ein Schalldruckspektrum, aus dem beispielsweise A-bewertete Pegel in einem Teil- oder im Gesamtfrequenzbereich berechnet werden können. Hier soll auf die Spektren an sich näher eingegangen werden. Als Meßpunkte dienen die Koordinaten der in Abschnitt 4.2.3 untersuchten relevanten Schallquellen, d. h. die entsprechenden Koordinaten in Zugrichtung und die mittleren Höhen der jeweils gefundenen Pegelmaxima. Anhand der Spektren sollen die bisher gemachten Aussagen vertieft bzw. ergänzt werden.

Um die spektrale Auflösung zu erhöhen, wurden die Array-Daten nochmals ausgewertet, und zwar mit einer Anzahl von 1024 statt bisher 512 FFT-Stützstellen bzw. einer Analysierbandbreite von 23,25 Hz anstatt 46,5 Hz. Die Darstellung der Spektren erfolgt im Frequenzbereich von 0 bis 3000 Hz (bzw. bis 5000 Hz im Falle der Stromabnehmer-Wippe), und zwar sowohl als linear aufgetragene, unbewertete schmalbandige Schalldruckspektren als auch als A-bewertete Terzspektren.

Entsprechend der Array-Arbeitsbereiche stammen Anteile unterhalb von 710 Hz vom WV48-, zwischen 710 und 1410 Hz vom WV24- und oberhalb von 1410 Hz vom WV12-Array. Da die Richtungsempfindlichkeit unterhalb von 180 Hz beim WV48-Array stark nachläßt, können diese Spektralanteile nicht mehr einem engen Höhenbereich zugeordnet werden. Vielmehr wird in diesem Frequenzbereich durch die zu tiefen Frequenzen hin immer breiter werdende Hauptkeule über die Schallabstrahlung aus einem zunehmend größeren Gebiet integriert.

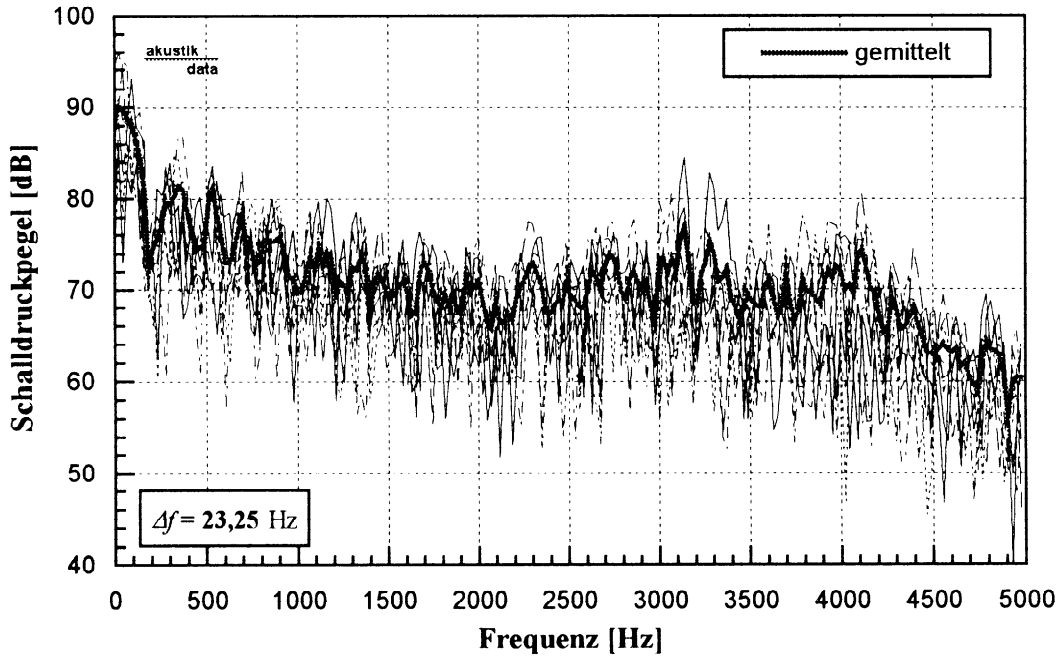


Bild 14 Schmalband-Schalldruckspektren der Emission der Stromabnehmer-Wippe des vorlaufenden Triebkopfs des ICE 1 und ICE 2 (Quelle W-V in 5,2 m Höhe über SO, Zugkoordinate 16,5 m) bei allen Fahrten mit ca. 280 km/h gemessen mit dem WV-Schachtel-Array in 4,87 m Abstand von Gleismitte sowie hierüber gemitteltes Spektrum

Wegen des großen Datenumfangs wird im folgenden darauf verzichtet, für jede relevante Schallquelle und jeden Geschwindigkeitsbereich alle Emissionsspektren der einzelnen Fahrten darzustellen. Vielmehr werden für jeden Geschwindigkeitsbereich die über die zugehörigen Fahrten energetisch gemittelten Spektren gezeigt. Um diesen Mittelungsprozeß an einem Beispiel zu illustrieren, sind in Bild 14 die an den Koordinaten der Stromabnehmer-Wippe (Quelle W-V) gemessenen Spektren für alle Fahrten mit ca. 280 km/h aufgetragen; mit dicker Linie ist außerdem das über diese Einzelspektren gemittelte Spektrum eingezeichnet.

➔ Wegen der kurzen Mittelungszeit infolge der hohen Zuggeschwindigkeit sind die Einzelspektren starken Schwankungen unterworfen, die sich jedoch im gemittelten Spektrum kaum noch bemerkbar machen. Ausgeprägte Frequenzspitzen treten bei einigen einzeln dargestellten Vorbeifahrten deutlicher hervor als im gemittelten Spektrum. Der dabei entstehende Informationsverlust wird aber nicht als kritisch angesehen, da es ja gerade das Ziel der Untersuchung ist, zu einer repräsentativen Aussage über die mittlere Schallemission vieler Vorbeifahrten zu gelangen.

Darstellungen im Anhang:
• Bilder D1 bis D11 für alle in Abschnitt 4.2.3 untersuchten Schallquellen;
Beispiele im Hauptteil für zwei ausgewählte Schallquellen:
• Bild 15 für den hinteren Ölkühlerlüfter am hinteren Triebkopf (Quelle Ö-HB),
• Bild 16 für die Stromabnehmer-Wippe am vorderen Triebkopf (Quelle W-V).

In den gemittelten schmalbandigen Spektren sind bei den meisten Schallquellen nur wenige Frequenzpeaks deutlich auszumachen, und die A-bewerteten spektralen Darstellungen in Terzen fallen für fast alle Quellen relativ gleichmäßig aus. Auf die Herkunft einiger der erkennbaren Peaks wird im folgenden näher eingegangen.

Bei den verschiedenen Lüftern stellt sich die Frage, ob die jeweilige Drehklangfrequenz, d. h. das Produkt aus Drehzahl und Anzahl der Schaufeln, in den Spektren bemerkbar ist. Laut [8] beträgt diese Frequenz für die Fahrmotorlüfter je nach Betriebsstufe 315 oder 473 Hz, wobei im Fahrbetrieb auch Frequenzen dazwischen auftreten können. Die Frequenz der Ölkühlerlüfter liegt konstant bei etwa 350 Hz [8]; für die Klimalüfter der Mittelwagen sind solche Angaben nicht erhältlich.

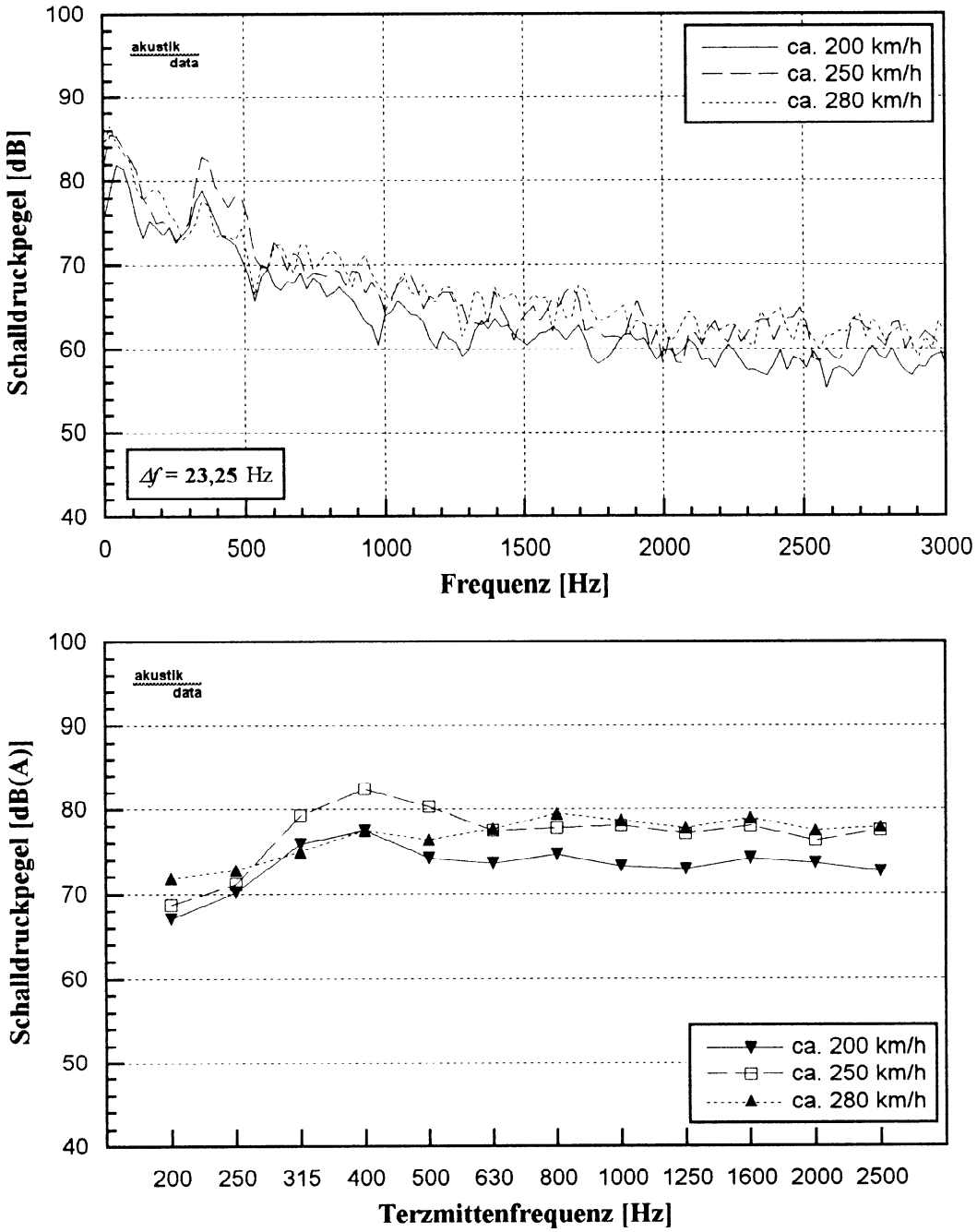


Bild 15 Gemittelte unbewertete Schmalband-Schalldruckspektren und A-bewertete Terzspektren der Emission des hinteren Ölkühlerlüfters des nachlaufenden Triebkopfs des ICE 1 und ICE 2 (Quelle Ö-HB in 3,8 m Höhe über SO, Zugkoordinate 349,5 m (ICE 1) bzw. 270,0 m (ICE 2)) gemessen mit dem WV-Schachtel-Array in 4,87 m Abstand von Gleismitte

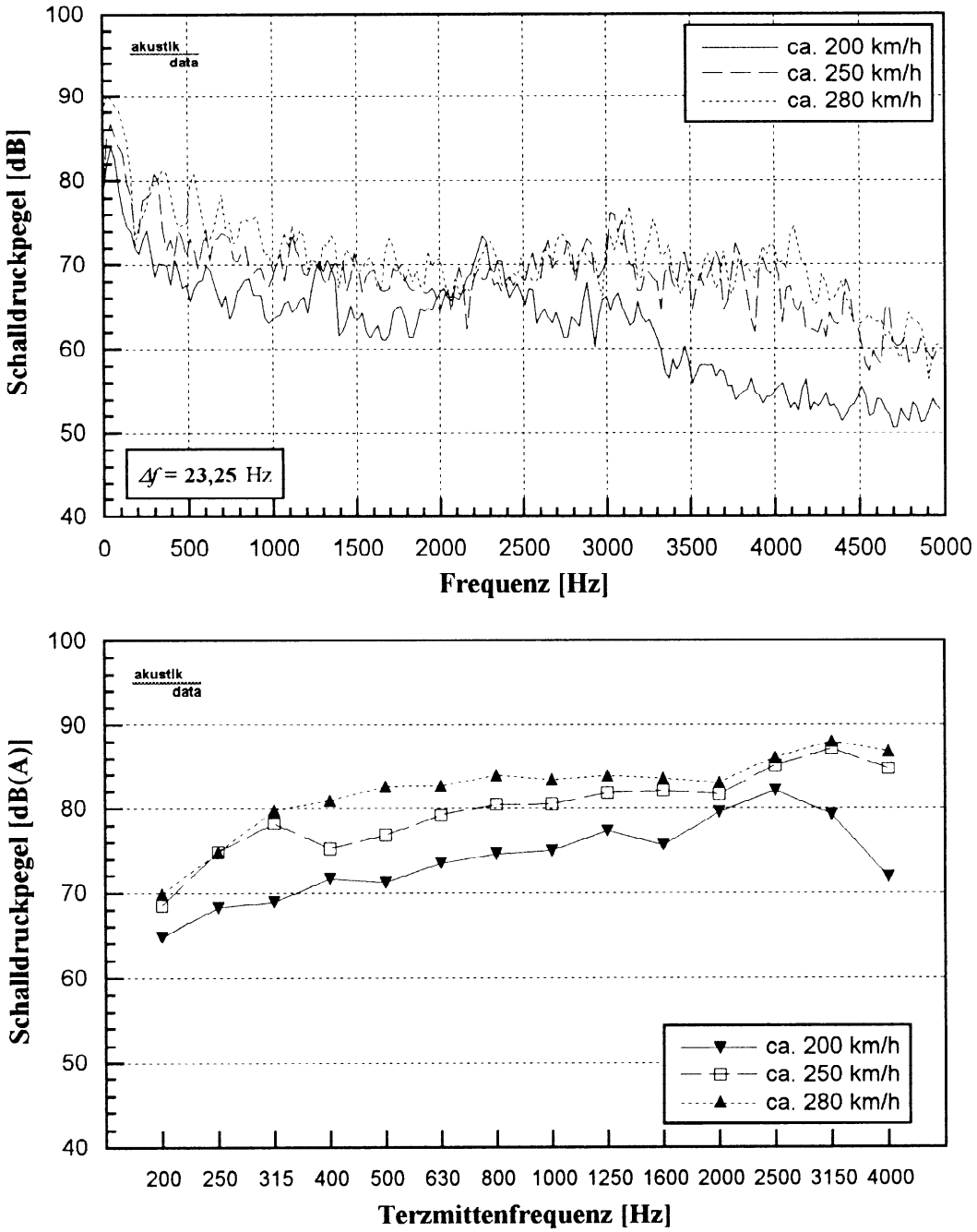


Bild 16 Gemittelte unbewertete Schmalband-Schalldruckspektren und A-bewertete Terzspektren der Emission der Stromabnehmer-Wippe des vorlaufenden Triebkopfs des ICE 1 und ICE 2 (Quelle W-V in 5,2 m Höhe über SO, Zugkoordinate 16,5 m) gemessen mit dem WV-Schachtel-Array in 4,87 m Abstand von Gleismitte

➔ Bei den Fahrmotorlüftern sind die genannten Frequenzen teilweise zu erkennen; so liegt beim vorderen Lüfter S-VA zumindest bei den Fahrten mit 250 km/h eine deutliche Frequenzspitze bei ca. 300 Hz und bei 280 km/h ein etwas schwächerer Peak bei etwa 400 Hz vor, während bei Fahrten um 200 km/h kein Peak zu erkennen ist. Dagegen tritt am hinteren Lüfter S-HB bei den Fahrten mit 200 km/h eine ausgeprägte Spitze bei ca. 450 Hz auf; jedoch ist bei den anderen Geschwindigkeiten keine solche spektrale Komponente mehr auszumachen. Beim Ölkühlerlüfter Ö-HB ist in allen drei Geschwindigkeitsbereichen ein deutlicher Peak erkennbar, der genau der erwarteten Lüfterfrequenz von 350 Hz entspricht. Bei den Klimalüftern Ü-V und Ü-H fallen hingegen keine Spitzen im Spektrum auf, allenfalls ein hervortretender Frequenzbereich zwischen 600 und 900 Hz.

➔ In den Spektren der Stromabnehmer-Fußbereiche F1-V und F1-H sind die wenigen sichtbaren Peaks nur schwach ausgeprägt. So scheint bei ca. 850 Hz eine geschwindigkeitsunabhängige Frequenzspitze zu liegen. Pegelanhebungen um 350 Hz sind auf den nahegelegenen Ölkühlerlüfter zurückzuführen (siehe oben). Die Spektren der Quellbereiche FW2-V und FW2-H aufgrund der Emission von zwei Stromabnehmer-Füßen und der Wippe des jeweils zweiten, abgesenkten Stromabnehmers unterliegen wegen der nur geringen Anzahl von Vorbeifahrten großen Schwankungen und sind daher wenig aussagefähig.

Die Emission der Stromabnehmer-Wippe ist in letzter Zeit mehrmals detailliert untersucht worden [5, 7]. Es zeigte sich dabei, daß starke tonale Komponenten hauptsächlich durch die in Tabelle 7 aufgelisteten Bauteile erzeugt werden. In den Spektren der Quellen W-V und W-H sind diese Peakfrequenzen zum Teil gut zu erkennen.

Bauteil des Stromabnehmers DSA 350 SEK	Berechnete Peakfrequenz in [Hz] bei 200 km/h	280 km/h
Schleifleisten (neuwertig)	190	270
Auflaufhörner	570	800
Hubbegrenzer (D = 5 mm)	2170	3030
Hubbegrenzer (D = 4 mm)	2710	3790

Tabelle 7 Peakfrequenzen der aerodynamischen Abstrahlung verschiedener Bauteile der Stromabnehmer-Wippe laut [5, 7] bei zwei Geschwindigkeiten

➔ Ausgeprägte Frequenzspitzen bei ca. 300 Hz sowohl an der vorderen als auch hinteren Wippe bei allen Fahrten um 250 und 280 km/h deuten auf die Emission der Schleifleisten hin, wobei die etwas höheren Frequenzen im Vergleich zu Tabelle 7 wahrscheinlich durch die geringeren Abmessungen von benutzten Schleifleisten gegenüber neuwertigen Schleifleisten zustande kommen. Die Emission der Auflaufhörner ist in keinem Fall deutlich zu erkennen, wie es schon in [5] der Fall war und auch dort kommentiert wurde.

➔ Bei den Hubbegrenzern ist nicht bekannt, wie viele ICE-Stromabnehmer mit der älteren (Durchmesser 4 mm) bzw. neueren Ausführung (Durchmesser 5 mm) ausgerüstet waren. Die Spektren zeigen, daß die der neueren Ausführung zuzuordnenden Peaks stärker ausgeprägt sind, daß aber ebenfalls Frequenzspitzen auftreten, die mit den Hubbegrenzern der älteren Bauart zusammenhängen können.

➔ In den Spektren von vorderer und hinterer Wippe wird ein Peak bei ca. 1300 Hz beobachtet, welcher allerdings nur bei den Fahrten mit ca. 200 km/h auftritt. Die Ursache eines solchen Peaks ist trotz der Untersuchung in [5] nicht näher bekannt. Die relativ geringen Geschwindigkeitsexponenten der Emission der Wippe (siehe Tabelle 6) können zum Teil durch die Existenz dieses Peaks hervorgerufen sein.

5. Meßergebnisse des WV-Arrays für IC-Züge

Die Vorgehensweise von Kapitel 4 zur Auswertung der mit dem WV-Schachtel-Array gemessenen Daten wird im folgenden auch bei der Untersuchung von IC-Zügen angewendet. Da allerdings mit diesem Array-Typ nur die Vorbeifahrt eines IC-Zuges aufgezeichnet werden konnte, reduziert sich der Umfang der Ergebnisse und auch deren statistische Aussagefähigkeit erheblich.

5.1 Zweidimensionale Schallquellenverteilung

In Analogie zu Bild 7 ist in Bild 17 zunächst für die ausgewertete IC-Vorbeifahrt die zweidimensionale Verteilung des A-bewerteten Schalldruckpegels entlang des gesamten Zuges dargestellt, um erste Informationen über die wesentlichen hochliegenden Schallquellen zu erhalten.

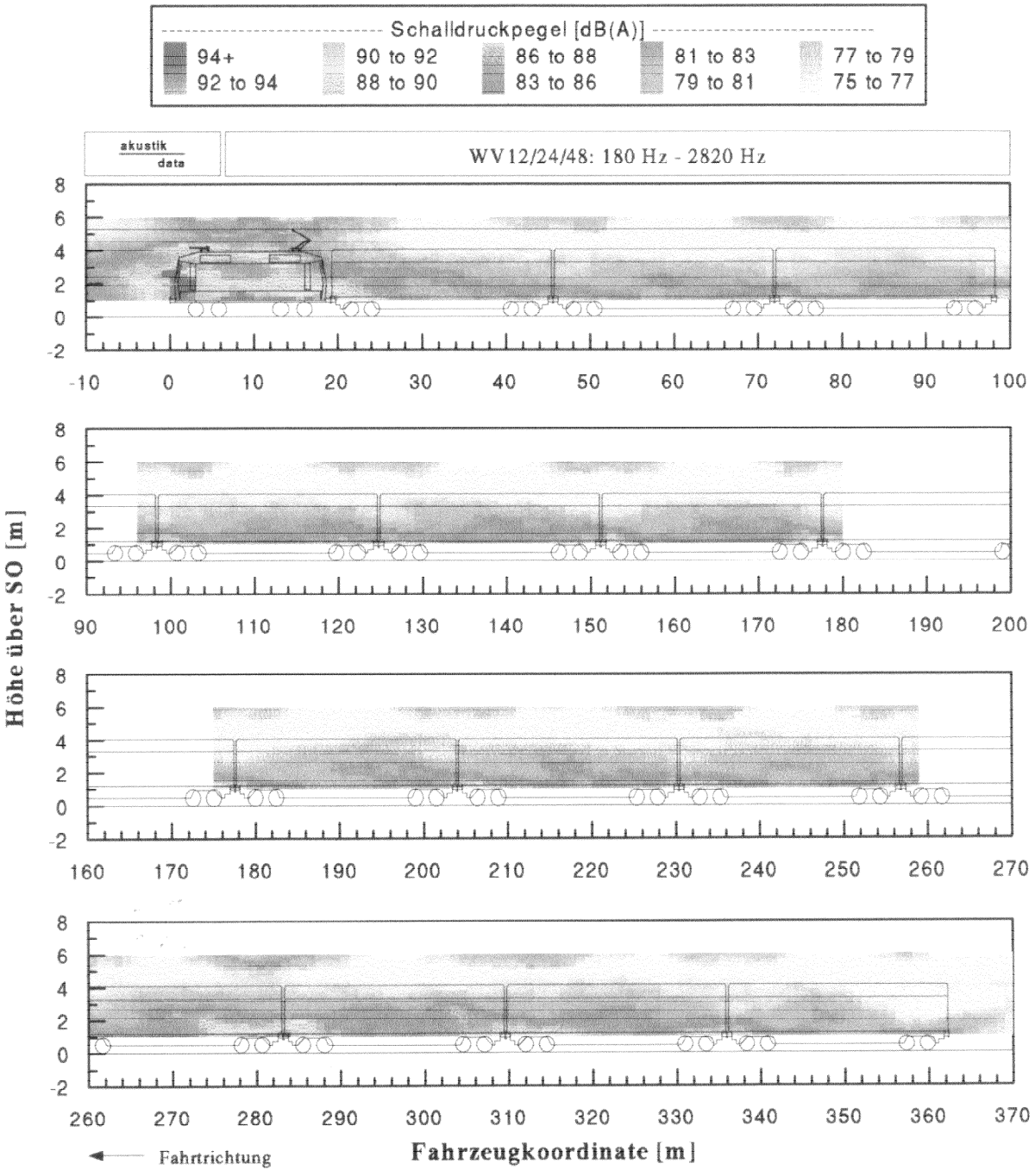


Bild 17 Zweidimensionale Verteilung des A-bewerteten Pegels gemessen mit dem WV-Schachtel-Array im Frequenzbereich 180 bis 2820 Hz bei Fahrt 44 mit 197,8 km/h (IC mit Lokomotive BR 120 und 13 Wagen) in 4,87 m Entfernung zur Gleismitte

➔ Die relevanten hochliegenden Schallquellen sind ausschließlich im Bereich der Lokomotive BR 120 zu finden. Zu erkennen sind vor allem eine deutliche Pegelanhebung an deren Bug sowie weitere Quellen in Höhe der Fahrmotorlüfter und der Stromabnehmer. Im gesamten Bereich der Wagen gibt es hingegen keinerlei Anzeichen für hochliegende Quellen vergleichbarer Stärke.

5.2 A-bewertete Emissionspegel für die einzelnen Schallquellen

Analog zu Abschnitt 4.2.2 werden an den Zugkoordinaten der oben genannten Schallquellen vertikale Schnitte in der zweidimensionalen Pegelverteilung von Bild 17 angefertigt. Die darin auftretenden Pegelmaxima kennzeichnen die Emission und die Höhenkoordinate der betreffenden Quelle. Eine Auflistung der Bezeichnungen der so lokalisierten Quellen und deren gefundener Koordinaten enthält Tabelle 8. In Tabelle 9 sind wie in Tabelle 5 zusätzlich die individuellen Fokusabstände bei der Datenauswertung angegeben.

Abkürzung	Name der Quelle	Zugkoordinate [m]	Höhe über SO [m]
B	Bugbereich	0,5	ca. 2,5
S-A	Seitenlüfter	4,5	ca. 3,5
S-B	(=Fahrmotorlüfter)	14,5	
FW-A[1)]	Stromabnehmer-	4,5	ca. 4,0
F-B	Fußbereich	14,5	
W-B	Stromabnehmer-Wippe	14,5	ca. 5,3

[1)] einschließlich der abgesenkten Wippe

Tabelle 8 Auflistung der zu untersuchenden Schallquellen an der Lokomotive BR 120 mit Angabe der Abkürzungen, Namen und Auswertepositionen

Die eindimensionalen vertikalen Verteilungen des A-bewerteten Pegels an den Zugkoordinaten der in Tabelle 8 bzw. 9 aufgeführten Schallquellen sind in Bild 18 dargestellt. Hierbei wurde im Falle der Wippe die obere Frequenzgrenze nicht heraufgesetzt, da sich am Stromabnehmer der BR 120 kein Hubbegrenzer von der Bauart des ICE-Stromabnehmers DSA 350 SEK befindet und folglich keine derartig hohen Frequenzanteile auftreten.

Zug-koordinate [m]	Fokusebene			Bildnummer Quelle in der betrachteten Schnittebene
	von Höhe [m]	bis Höhe [m]	Abstand [m]	
0,5	1,0	6,0	3,37	Bild 18: B
4,5	1,0	3,8	3,37	Bild 18: S-A
	3,8	6,0	4,87	Bild 18: FW-A
14,5	1,0	3,8	3,37	Bild 18: S-B
	3,8	4,6	4,87	Bild 18: F-B
	4,6	6,0	4,37	Bild 18: W-B

Tabelle 9 Auflistung der untersuchten Schnittebenen mit Angabe der Zugkoordinaten, Fokusabständen und betrachteten Quellen der Lok BR 120

In Bild 18 werden für die einzelnen Schallquellen die zugehörigen Pegelmaxima abgelesen; deren Werte sind in Tabelle 10 eingetragen. In zwei Fällen (S-A und F-B) läßt sich ein entsprechendes Maximum allerdings nicht finden. Aus den verbleibenden Pegelspitzen kann zumindest einem der beiden Seitenlüfter ein Emissionspegel zugeordnet werden, im Falle des Stromabnehmer-Fußbereichs jedoch nur einschließlich der abgesenkten Wippe.

Abkürzung	Name der Quelle	Zugkoordinate [m]	Höhe über SO [m]	Pegel [dB(A)]
B	Bugbereich	0,5	2,5	98,2
S-A	Seitenlüfter	4,5	3,5	-
S-B	(=Fahrmotorlüfter)	14,5	3,5	90,2
FW-A[1)]	Stromabnehmer-	4,5	4,0	89,0
F-B	Fußbereich	14,5	4,0	-
W-B	Stromabnehmer-Wippe	14,5	5,3	86,8

[1)] einschließlich der abgesenkten Wippe

Tabelle 10 A-bewertete Emissionspegel der relevanten hochliegenden Schallquellen der Lokomotive BR 120 in 4,87 m Abstand von Gleismitte gemessen mit dem WV-Schachtel-Array im Frequenzbereich 180 bis 2820 Hz bei 197,8 km/h und Angabe der Quellkoordinaten

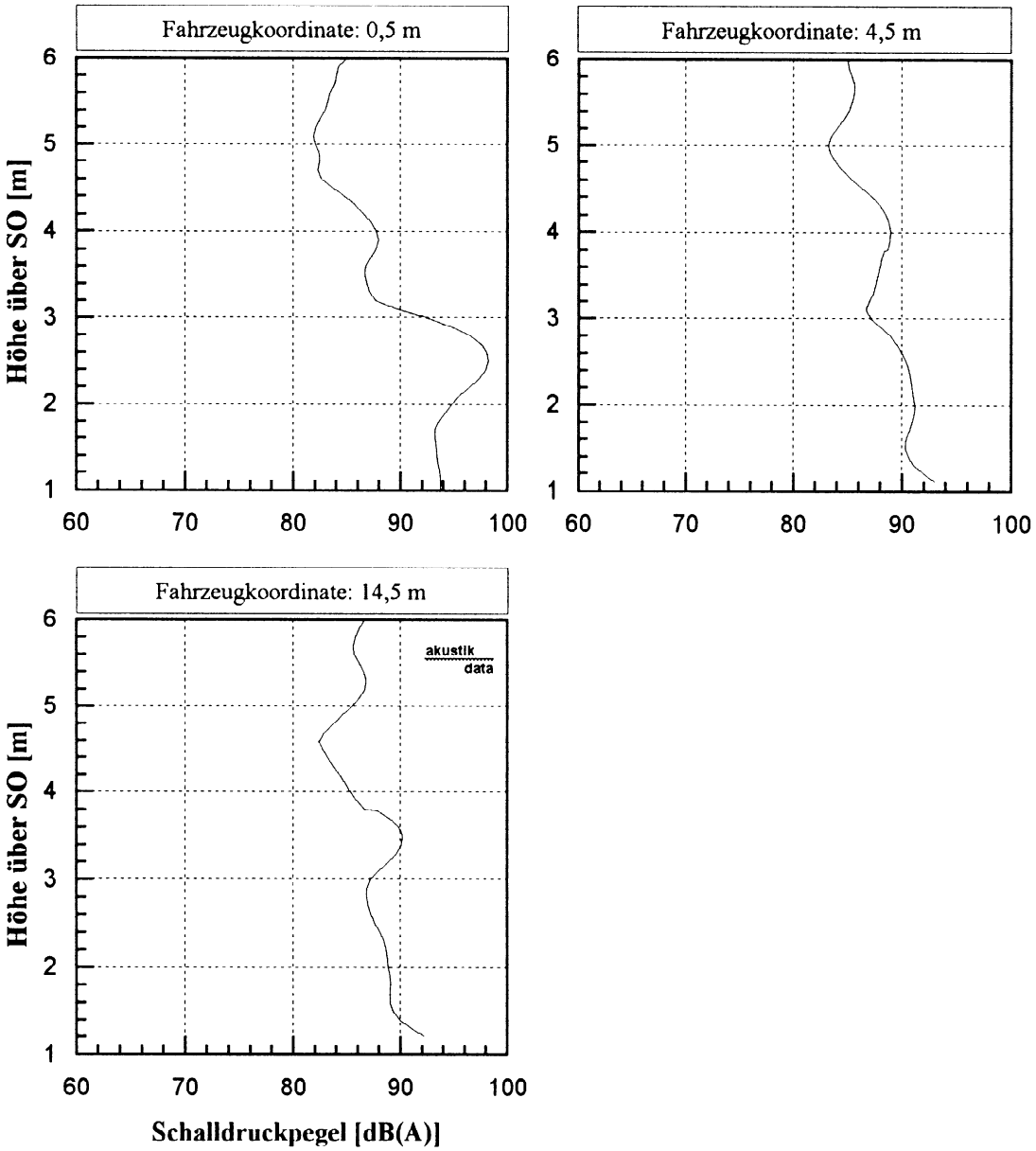


Bild 18 Vertikale Pegelverteilungen an drei Zugkoordinaten der Lokomotive BR 120 gemessen mit dem WV-Schachtel-Array im Frequenzbereich 180 bis 2820 Hz bei Vorbeifahrt eines IC-Zuges (Fahrt 44) mit 197,8 km/h

➔ Wegen der fast identischen Geschwindigkeit können die Pegel aus Tabelle 10 mit den Werten $L_{A,200}$ aus Tabelle 6 für die entsprechenden Quellen an ICE-Zügen verglichen werden. So liegt der Pegel von 98,2 dB(A) am Bug der BR 120 (Quelle B) in einer beim ICE nicht erreichten Größenordnung. Zur Klärung seiner Entstehung sei auf das zugehörige Spektrum im folgenden Abschnitt verwiesen.

➔ Die Emission des Fahrmotorlüfters der BR 120 (Quelle S-B) ist im Vergleich mit einem ICE-Triebkopf als relativ hoch zu bewerten, da der gemessene Wert um 3,5 dB(A) über dem Pegel der entsprechenden Quelle S-VA in Tabelle 6 liegt.

➔ Die Quelle FW-A im Bereich des Stromabnehmer-Fußes der BR 120 kann nicht direkt mit einem am ICE bestimmten Wert verglichen werden, da ein abgesenkter Stromabnehmer bei ICE-Zügen niemals allein vorkommt. Der hier gemessene Wert von 89,0 dB(A) liegt aber zwischen den für die Quellen F1-V und FW2-V ermittelten Pegeln in Tabelle 6 und deutet auf die akustische Gleichwertigkeit der jeweiligen Stromabnehmer-Fußbereiche hin. Für den Fußbereich des hinteren Stromabnehmers (Quelle F-B) war in Bild 18 kein Pegelmaximum erkennbar; als mittlerer Emissionspegel ergibt sich hier in etwa 85 dB(A). Gegenüber der Quelle FW-A bedeutet dies eine um mindestens 4 dB(A) geringere Abstrahlung.

  Diese große Differenz kann nicht allein durch das Fehlen der abgesenkten Wippe begründet werden. Sie wird vielmehr auch durch die räumliche Nähe der beiden Stromabnehmer verursacht. Hierdurch liegt der Fußbereich des hinteren Stromabnehmers im Nachlauf des vorderen, abgesenkten Stromabnehmers und ist so einer geringeren Strömungsgeschwindigkeit ausgesetzt. Die sich zwischen den Stromabnehmern auf dem Lokomotivdach befindende erhebliche Anzahl von Isolatoren, Schaltern, usw. und die größere Grenzschichtdicke am hinteren Stromabnehmer sorgen für eine dortige weitere Verringerung der Anströmung.

➔ Die Emission der Wippe (Quelle W-B) fällt im Vergleich zum ICE-Stromabnehmer DSA 350 SEK etwas geringer aus, nämlich um ca. 2 dB(A) gegenüber der Quelle W-V in Tabelle 6, was durch das Fehlen der sich akustisch negativ auswirkenden Hubbegrenzer beim Stromabnehmer der BR 120 zu erklären ist.

5.3 Schalldruckspektren der einzelnen Quellen

Im folgenden soll analog zu Abschnitt 4.4 auf die Emissionsspektren der einzelnen Schallquellen eingegangen werden. Die Darstellung erfolgt im Frequenzbereich von 0 bis 3000 Hz, wobei hier nur die unbewerteten Schmalbandspektren interessieren. Es werden jene vier Quellen betrachtet, die in Bild 18 lokale Pegelspitzen hervorgerufen haben. Die Bilder 19a bis 19d zeigen die zu diesen Quellen gehörigen Spektren.

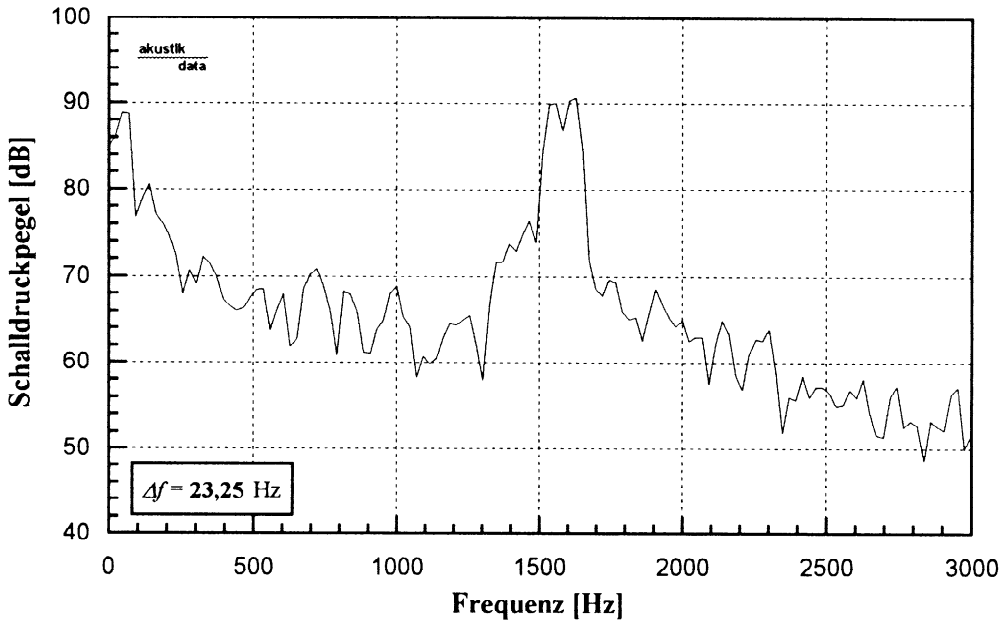


Bild 19a Schmalband-Schalldruckspektrum der Emission im Bugbereich der Lokomotive BR 120 (Quelle B in 2,5 m Höhe über SO, Zugkoordinate 0,5 m) bei einer Vorbeifahrt mit 197,8 km/h

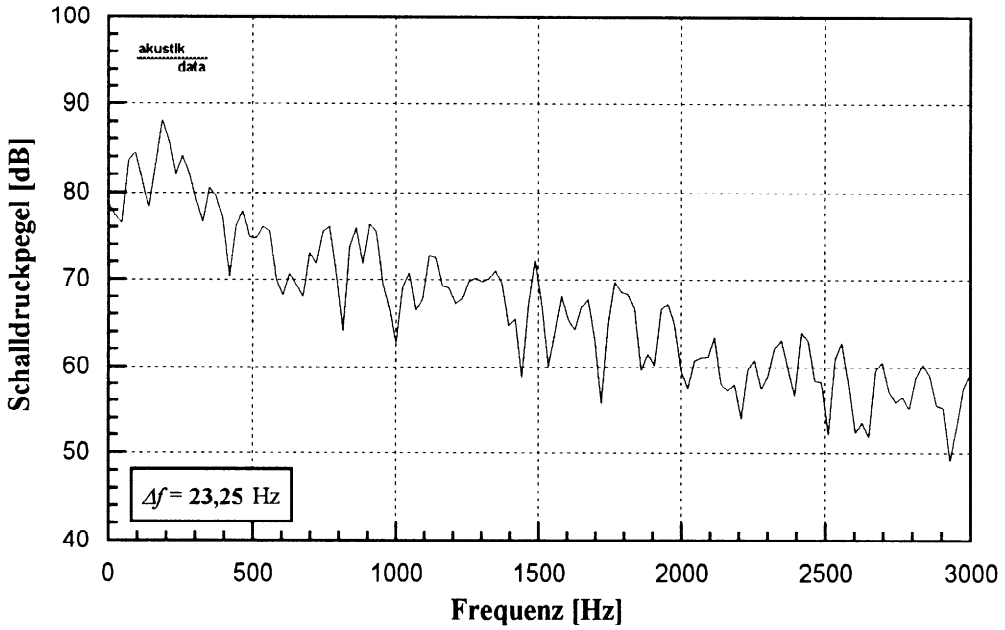


Bild 19b Schmalband-Schalldruckspektrum der Emission des hinteren Fahrmotorlüfters der Lokomotive BR 120 (Quelle S-B in 3,5 m Höhe über SO, Zugkoordinate 14,5 m) bei einer Vorbeifahrt mit 197,8 km/h

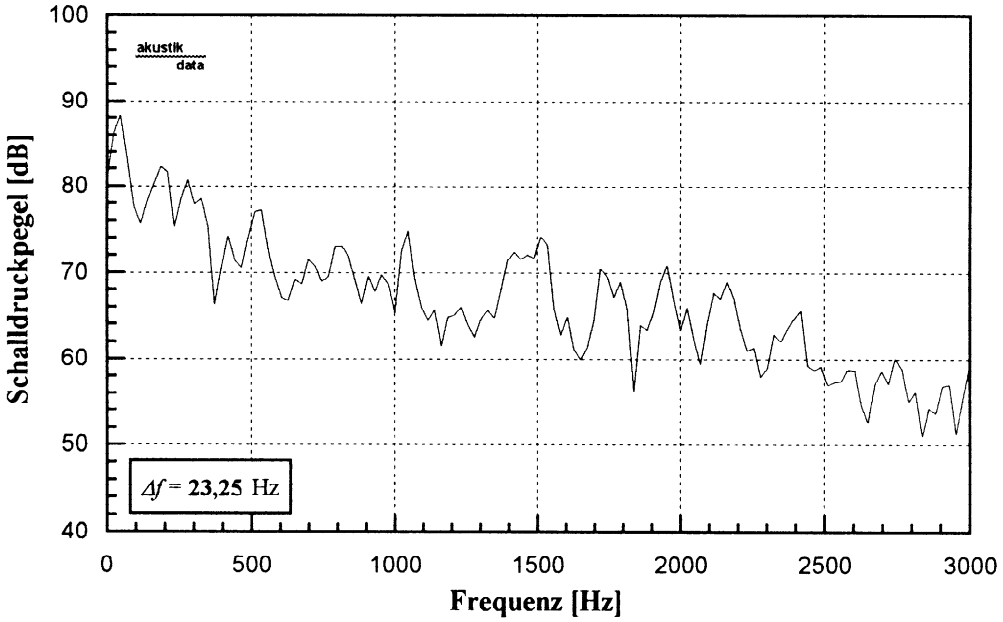


Bild 19c Schmalband-Schalldruckspektrum der Emission des abgesenkten vorderen Stromabnehmers der Lokomotive BR 120 (Quelle FW-A in 4,0 m Höhe über SO, Zugkoordinate 4,5 m) bei einer Vorbeifahrt mit 197,8 km/h

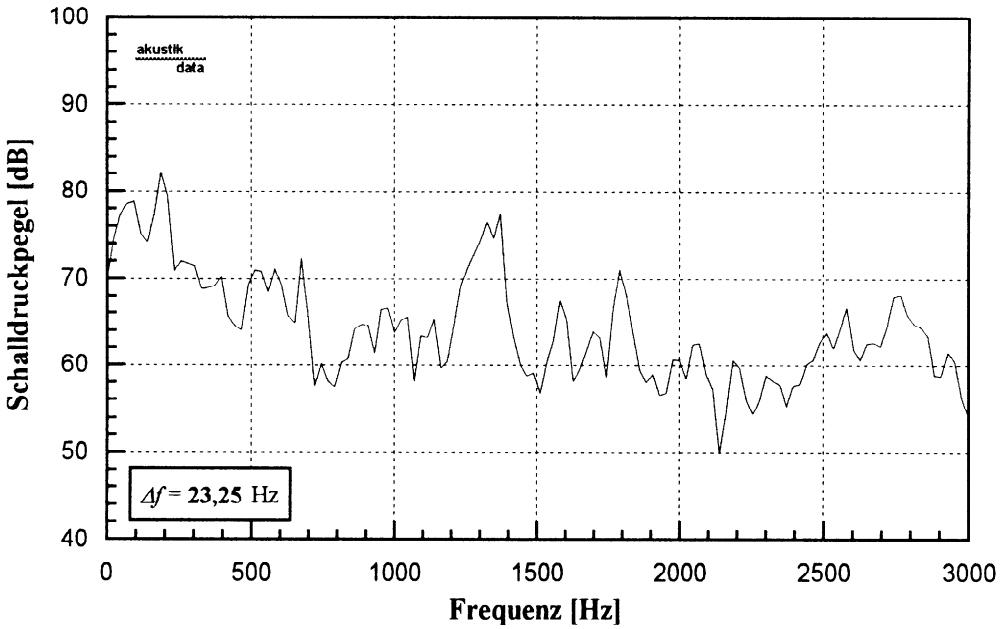


Bild 19d Schmalband-Schalldruckspektrum der Emission der Wippe des hinteren Stromabnehmers der Lokomotive BR 120 (Quelle W-B in 5,3 m Höhe über SO, Zugkoordinate 14,5 m) bei einer Vorbeifahrt mit 197,8 km/h

➔ Die hohe Schallemission am Bug der Lokomotive BR 120 wird von einem nahezu tonalen Spektralanteil bei etwa 1,6 kHz dominiert. Wahrscheinlich handelt es sich um eine aerodynamische Schallquelle, wobei die Frequenz auf ein senkrecht angeordnetes zylindrisches Bauteil mit einem Durchmesser von etwa 7 mm schließen läßt (wenn man beispielsweise eine Strouhal-Zahl von 0,19 für einen Kreiszylinder annimmt). Die gesuchte Schallquelle besteht möglicherweise aus den an der Frontseite der Lokomotive herausragenden Rohren für das Scheibenwischwasser oder aus einem Element der Scheibenwischer.

Ob diese Schallquelle bei allen Lokomotiven der BR 120 und bei allen Geschwindigkeiten eine derartig hohe Emission erzeugt, ist schwierig zu beantworten. Bei einer anderen, im November 1997 durchgeführten Array-Messung [9] wurde zu Testzwecken ebenfalls die Vorbeifahrt eines IC-Zuges mit der Lok BR 120 bei ca. 200 km/h ausgewertet. Die dabei an der identischen Position gemessene Schallemission aus dem Bugbereich der Lokomotive zeigt im Spektrum die gleiche Frequenzspitze mit dem gleichen Pegel wie in Bild 19a.

Andererseits wurde eine weitere Vorbeifahrt eines IC-Zuges in der vorliegenden Meßreihe mit dem WX-Array aufgezeichnet (Fahrt 13). In dem entsprechenden Emissionsspektrum aus dem Bugbereich, welches später in Abschnitt 6.1 gezeigt wird, ist eine bei ca. 1,6 kHz hervortretende Spektralkomponente hingegen überhaupt nicht zu erkennen. Somit kann obige Frage wegen der geringen Anzahl von ausgewerteten IC-Vorbeifahrten nicht generell beantwortet werden.

➔ Im Emissionsspektrum des Fahrmotorlüfters deutet sich ein Frequenzpeak bei ca. 200 Hz an, der erfahrungsgemäß dem Drehklang des Ventilators zugeordnet werden kann.

➔ Bezüglich der Schallemission der Stromabnehmer sind in den Spektren sowohl für den Fußbereich als auch insbesondere für die Wippe mehrere Frequenzspitzen zu verzeichnen. Ob die meisten dieser Peaks jedoch eine statistische Signifikanz besitzen, ist wegen der hier nur einen zugrunde liegenden Vorbeifahrt fraglich. Ohne technische Angaben, d. h. ohne Kenntnis von Detailzeichnungen des Stromabnehmers der BR 120, ist zudem die Zuordnung der Peaks zu bestimmten Bauteilen nicht durchführbar.

6. Ergebnisse der Messungen mit dem WX-Array

Wie in Abschnitt 3.2 beschrieben, erfolgte mit dem WX32-Array eine zweidimensionale Lokalisierung von Schallquellen im Bereich von 280 bis 1120 Hz. Wegen dieses eingeschränkten Frequenzbereichs können die Ergebnisse im allgemeinen keine Aussage zum Gesamtemissionspegel der georteten Schallquellen machen. Auch ist die statistische Sicherheit für die bestimmten Pegel wegen der kleineren Anzahl von Fahrten gegenüber der Messung mit dem WV-Schachtel-Array geringer, jedoch lassen sich in Einzelfällen aufgrund der zweidimensionalen Ortungsfähigkeit des Arrays genauere Schlüsse ziehen als in den vorigen beiden Kapiteln.

6.1 Zweidimensionale Schallquellenverteilungen

Die Vorgehensweise bei der Datenauswertung ist bereits in Abschnitt 3.2 erläutert worden. Die so erhältlichen zweidimensionalen Verteilungen des A-bewerteten Pegels dienen in erster Linie als Übersicht über die auftretenden hochliegenden Schallquellen. In einigen der gezeigten Pegelverteilungen sind X-förmige Muster zu erkennen, in deren Mittelpunkt sich die jeweilige georteten Schallquelle befindet. Ursache hierfür ist die nicht ideale Richtcharakteristik eines X-Arrays, d. h. die geringe Unterdrückung der Nebenkeulen auf den "Diagonalen" des Arrays. Im Extremfall führt dies zur scheinbaren Lokalisierung von Schallquellen auf diesen Diagonalen, insbesondere wenn sich die Ortungs-Muster zweier benachbarter tatsächlicher Quellen kreuzen.

Darstellungen im Anhang: • Bilder E1 bis E10 für alle aufgezeichneten ICE-Fahrten und einen IC-Zug;
Beispiel im Hauptteil: • Bild 20 für eine ausgewählte ICE 1-Vorbeifahrt mit ca. 280 km/h.

➔ Viele Erkenntnisse aus den Abschnitten 4.1 und 5.1 spiegeln sich gleichfalls in diesen Bildern wieder. So ist z. B. zu beobachten, daß sich auch hier die wesentlichen hochliegenden Schallquellen beim ICE 1 und ICE 2 im Bereich der Triebköpfe bzw. bei einem IC-Zug an der Lokomotive befinden, und daß diese Quellen bei den ICE-Zügen am vorderen Triebkopf im allgemeinen höhere Quellstärken aufweisen als am hinteren Triebkopf.

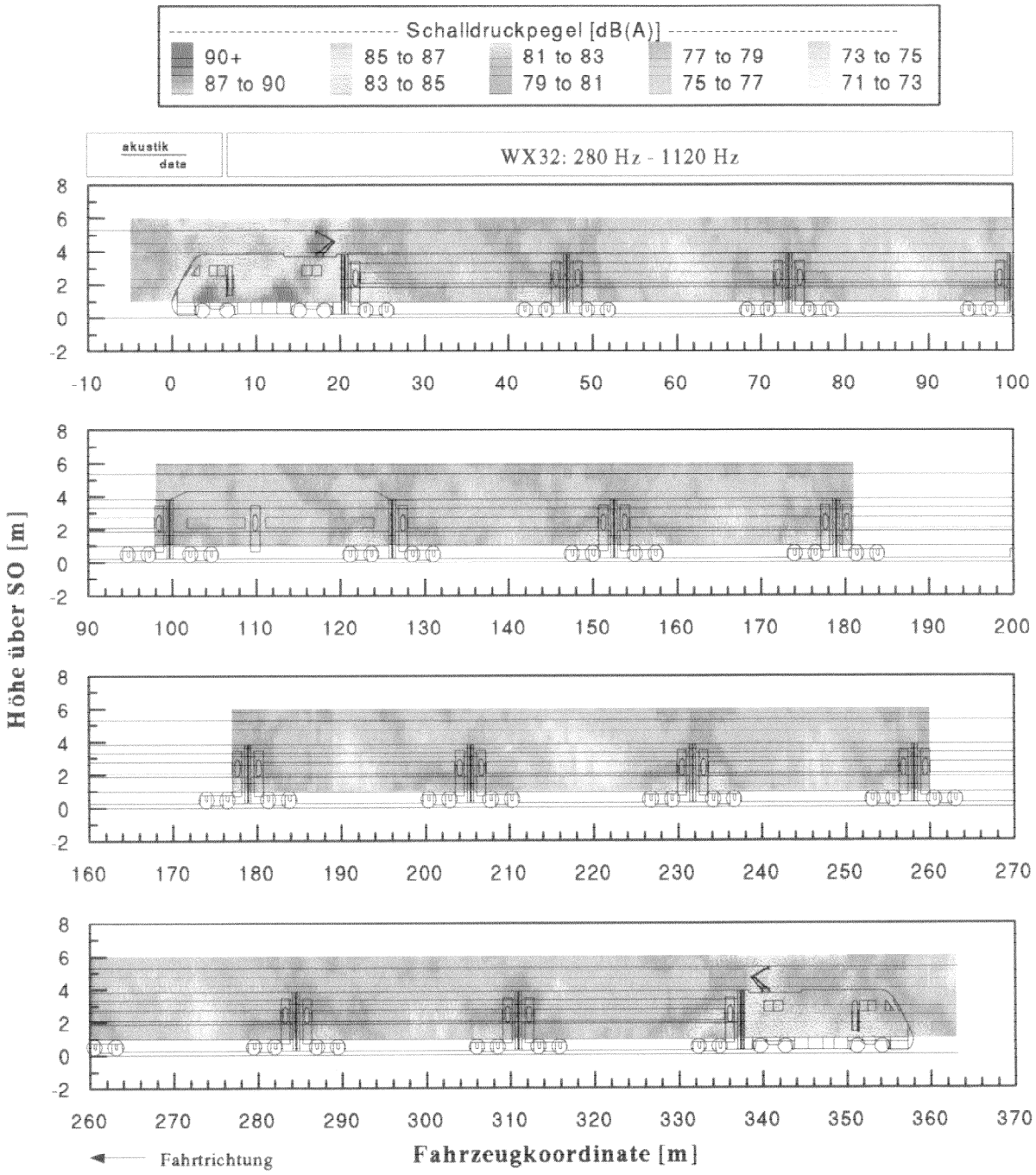


Bild 20 Zweidimensionale Verteilung des A-bewerteten Pegels gemessen mit dem WX32-Array im Frequenzbereich 280 bis 1120 Hz bei Fahrt 1 mit 274,7 km/h (ICE 1 mit einem Stromabnehmer je Triebkopf) in 4,87 m Entfernung zur Gleismitte

➔ Aufgrund des zweidimensionalen Ortungsvermögens des WX-Arrays können noch weitergehende Schlüsse gezogen werden. So war im Bugbereich des ICE 1 und ICE 2 mit dem WV-Schachtel-Array eine Schallquelle in etwa 3 m Höhe über SO lokalisiert worden, welche auf die Emission des vorderen Fahrmotorlüfters zurückgeführt wurde und nicht etwa auf eine Strömungsablösung an der Frontpartie des Triebkopfs. Aus den hier gezeigten Ergebnissen ist der gleiche Schluß zu ziehen, da direkt am Fahrzeugbug keine angehobenen Pegel auftreten. Die Emission an den Koordinaten der Fahrmotorlüfter ist hingegen bedeutend höher, auch wenn sich dort in der Regel keine lokalen Maxima abzeichnen. Die Ursache hierfür liegt in der schlechten Unterdrückung der Nebenkeulen beim WX-Array (siehe oben), wodurch in 3 m Höhe noch ein beträchtlicher Anteil des Rollgeräuschs mitgemessen wird.

➔ Wie schon in Bild 10 angedeutet, treten bei den Pegelverteilungen im Bugbereich zwischen ICE 1 und ICE 2 Unterschiede auf. So existiert im Falle des ICE 2 eine deutliche Schallquelle in etwa 2 m Höhe über SO, welche beim ICE 1 nicht zu beobachten ist. Der diesbezügliche konstruktive Unterschied zwischen ICE 2 und ICE 1 besteht darin, daß beim ICE 2 ein stabförmiges Kupplungselement, der sogenannte "Greifer", aus der Frontverkleidung herausragt und somit aerodynamischen Schall erzeugt. Dessen Höhe beträgt zwar nur ca. 1,0 m über SO, eine "Fehl"ortung in 2,0 m Höhe ist aber aufgrund des in diesem Höhenbereich verwendeten Fokusabstands von 3,37 m erklärbar. Da das Kupplungselement nicht in der Ebene der Triebkopf-Seitenwand, sondern der Gleismitte liegt, rückt es in seiner vertikalen Position hierdurch scheinbar nach oben.

➔ Die Ölkühlerlüfter sind in vielen Fällen deutlich als punktförmige Schallquellen zu erkennen. Dies ist insbesondere bei den Fahrten mit ca. 200 km/h der Fall, wo der Anteil dieser Quellen an der Gesamtemission wegen ihres geringen Geschwindigkeitsexponenten größer ist als bei höheren Geschwindigkeiten. Im nächsten Abschnitt erfolgt eine Abschätzung, um die Emission des vorderen Lüfters Ö-VA zu quantifizieren.

➔ Bei der einen aufgezeichneten IC-Vorbeifahrt läßt sich im Gegensatz zu der in Bild 17 dargestellten Fahrt kein stark erhöhter Pegel am Lokomotivbug erkennen. Zunächst ist dies kein Widerspruch, da die dortige Schallquelle gemäß Bild 19a

von einer einzigen Frequenzspitze bei 1,6 kHz dominiert wird und somit bei einer Darstellung von 280 bis 1120 Hz wie in Bild E10 gar nicht enthalten ist. Das Spektrum an den entsprechenden Koordinaten für die hier vorliegende Fahrt 13, welches in Bild 21 für Frequenzen bis 1800 Hz wiedergegeben ist, zeigt im Bereich um 1,6 kHz jedoch keinen Frequenzpeak, so daß eine derartige Quelle bei dieser Fahrt tatsächlich nicht vorhanden war. Der höchste Emissionspegel im Falle der IC-Fahrt wird im Bereich des hinteren Fahrmotorlüfters detektiert.

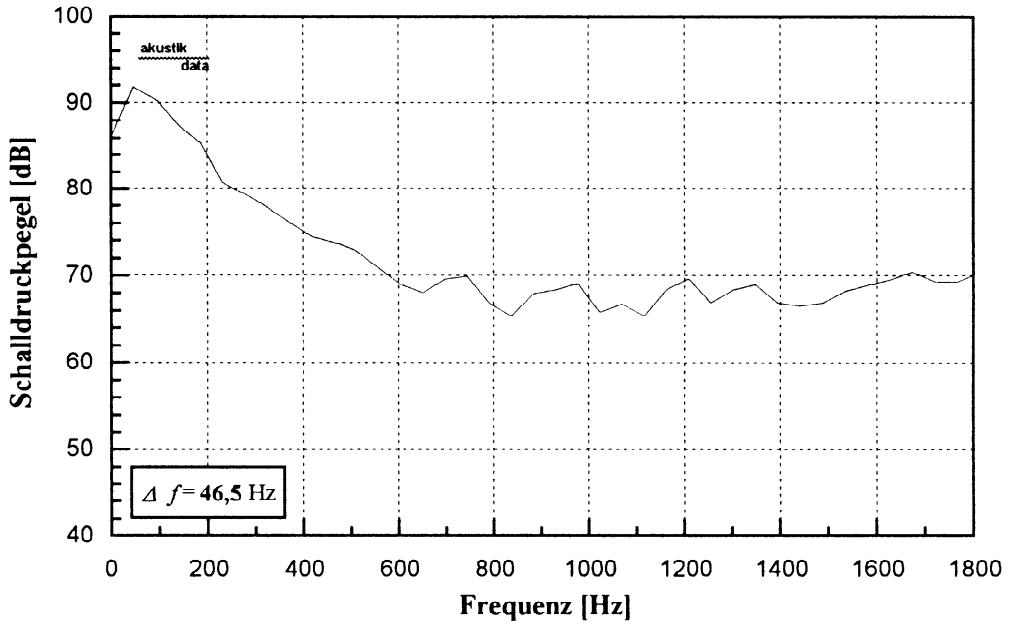


Bild 21 Schmalband-Schalldruckspektrum der Emission im Bugbereich der Lokomotive BR 120 gemessen mit dem WX32-Array in 2,5 m Höhe über SO an der Zugkoordinate 0,5 m bei Fahrt 13 mit 184,0 km/h

6.2 Eindimensionale horizontale Pegelverteilungen

Als wichtigen Beitrag zum Gesamtergebnis soll mit dem WX-Array versucht werden, die Geräuschanteile von Ölkühlerlüfter und Stromabnehmer-Fußbereich am vorderen ICE-Triebkopf zu trennen, was mit Hilfe des WV-Schachtel-Arrays nicht gelang. Hierzu werden in den Bildern E1, E2, E4 und E6 bis E9 horizontale Schnitte in einer Höhe von 3,9 m angefertigt, welche sich über die Länge des vorderen und hinteren Triebkopfs des ICE 1 bzw. ICE 2 erstrecken (ICE 1-Züge mit zwei Stromabnehmern je Triebkopf werden hierbei nicht betrachtet). Die so gemessenen Pegelverläufe sind

für jeweils drei Geschwindigkeitsbereiche in den Bildern 22a und 22b aufgetragen. Die Auflösung in horizontaler Richtung wurde gegenüber den zweidimensionalen Verteilungen in den Bildern E1 bis E10 erhöht; der horizontale Abstand zweier Meßpunkte beträgt nun 0,1 m.

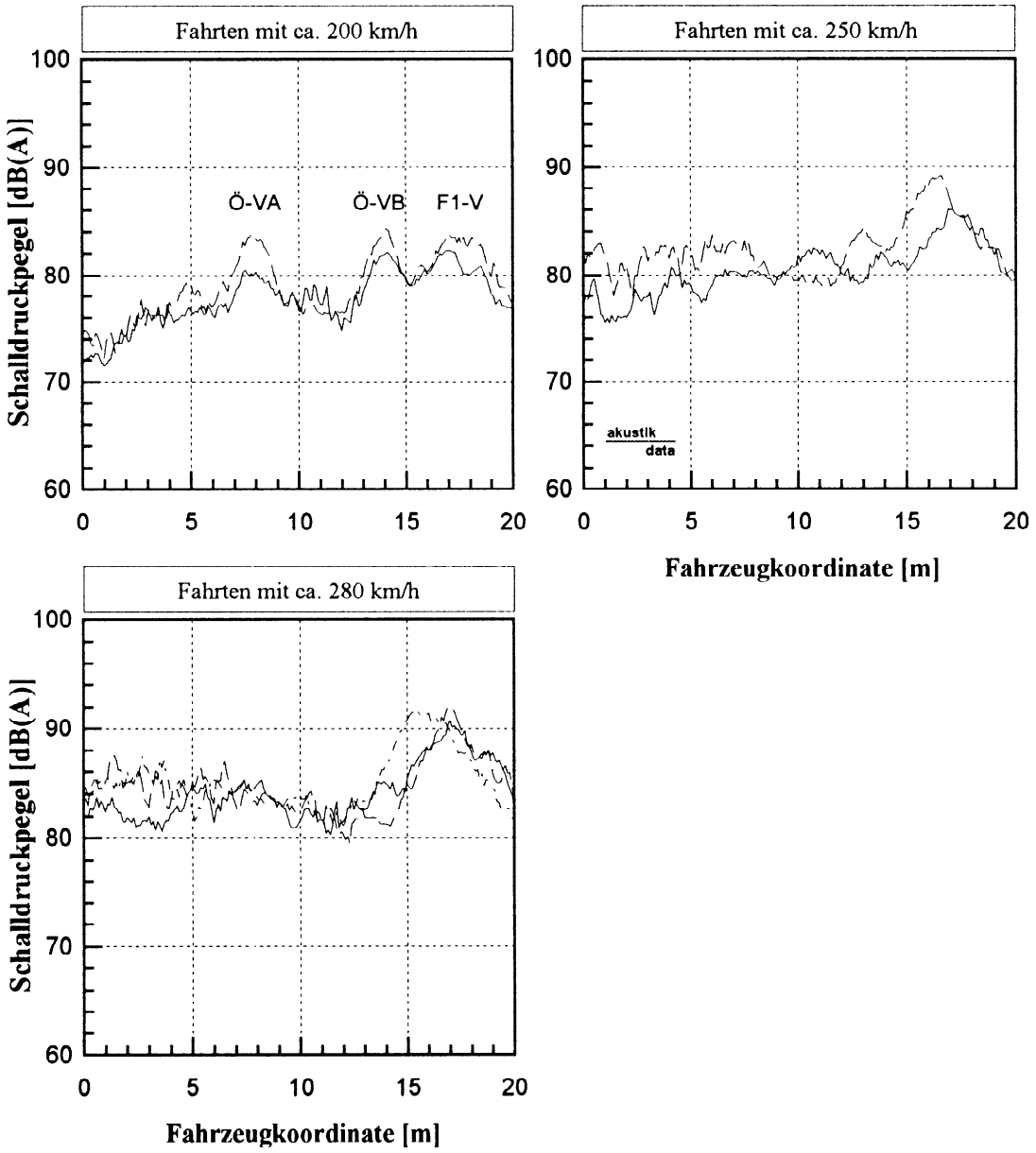


Bild 22a Horizontale Pegelverteilungen in 3,9 m Höhe über SO im Bereich des vorderen Triebkopfs bei allen ICE 1- und ICE 2-Vorbeifahrten mit einem Stromabnehmer je Triebkopf gemessen mit dem WX32-Array im Frequenzbereich 280 bis 1120 Hz in 4,87 m Entfernung zur Gleismitte

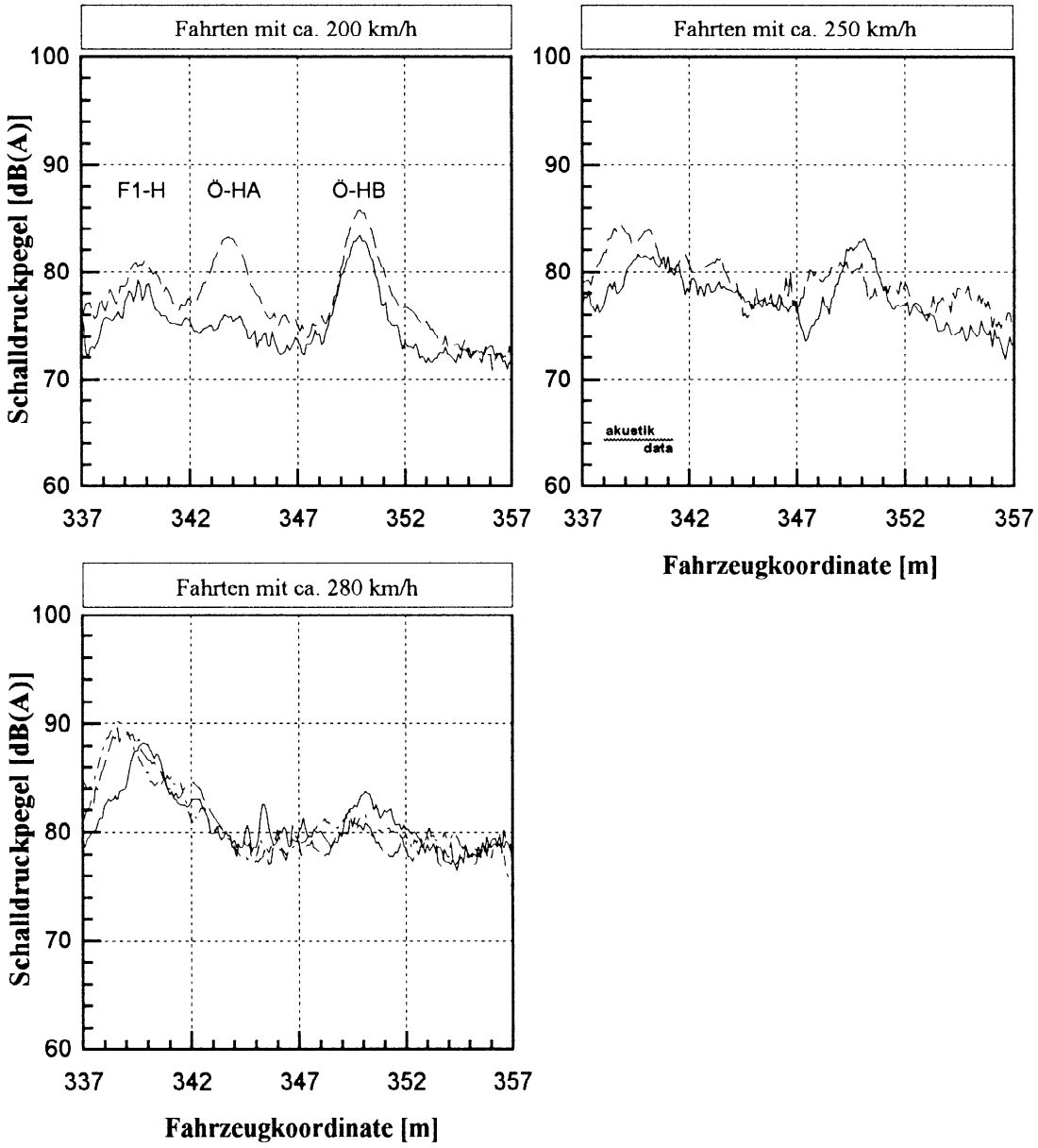


Bild 22b Horizontale Pegelverteilungen in 3,9 m Höhe über SO im Bereich des hinteren Triebkopfs bei allen ICE 1- und ICE 2-Vorbeifahrten mit einem Stromabnehmer je Triebkopf gemessen mit dem WX32-Array im Frequenzbereich 280 bis 1120 Hz in 4,87 m Entfernung zur Gleismitte; Fahrzeugkoordinate für ICE 2-Züge: 258,0 bis 278,0 m

➔ Es ist klar zu erkennen, daß an beiden Triebköpfen bei 200 km/h jeweils drei Pegelmaxima hervortreten, welche eindeutig den beiden Ölkühlerlüftern und dem Stromabnehmer-Fuß zugeordnet werden können. Bei 280 km/h bleibt hiervon (am

vorderen Triebkopf) als einziges Gebiet mit merklich angehobenem Pegel der Fußbereich übrig. Infolgedessen kann, wie schon in Abschnitt 4.2.2 ausgeführt, die Emission der beiden Ölkühlerlüfter mit dem WV-Schachtel-Array nicht bestimmt werden, da bei 280 km/h der Anteil des Stromabnehmer-Fußbereichs F1-V zu sehr dominiert und auch nicht weit genug von der Quelle Ö-VA entfernt ist. Im Gegenzug enthält die mit dem WV-Schachtel-Array gemessene Emission für die Fußbereiche bei niedrigen Geschwindigkeiten auch erhebliche Anteile der Abstrahlung der jeweils nahegelegenen Lüfter Ö-VB bzw. Ö-HA.

➔ Wegen der geringen Anzahl von Fahrten und des eingeschränkten Frequenzbereichs soll keine genaue Analyse dieser Pegelmaxima erfolgen. Es kann aber aus Bild 22a näherungsweise entnommen werden, daß die abgestrahlten Pegel des Fußbereichs F1-V und des nahegelegenen Ölkühlerlüfters Ö-VB auf dem vorderen Triebkopf bei 200 km/h ungefähr gleich groß sind.

Auf dieser Grundlage können die Anteile von Fußbereich und Ölkühlerlüfter auch für andere Geschwindigkeiten zumindest abgeschätzt werden. Der mit dem WV-Schachtel-Array gemessene Emissionspegel der Quelle F1-V (bezeichnet mit $L_{A,F1\text{-}V}$) wird hierzu aufgeteilt in die Abstrahlung des Fußbereichs ($L_{A,Fuß}$) und des nahegelegenen Lüfters Ö-VB ($L_{A,Ölkühler}$):

$$L_{A,F1\text{-}V}(v) = 10 \lg (10^{L_{A,Fuß}(v)/10} + 10^{L_{A,Ölkühler}(v)/10}). \qquad (2)$$

Bei 200 km/h werden gleiche Quellstärken für beide Komponenten angesetzt, deren Emission gegenüber dem Pegel $L_{A,200}$ aus Tabelle 6 für die Quelle F1-V demnach um 3 dB(A) zu reduzieren ist:

$$L_{A,Fuß}(200 \text{ km/h}) = L_{A,Ölkühler}(200 \text{ km/h}) = 85{,}5 \text{ dB(A)}. \qquad (3)$$

Bei 280 km/h besitzt $L_{A,F1\text{-}V}$ nach Gleichung (1) mit den Werten aus Tabelle 6 einen Pegel von 94,9 dB(A) und setzt sich zusammen aus

$$L_{A,Fuß}(280 \text{ km/h}) = L_{A,Fuß}(200 \text{ km/h}) + \Delta L, \qquad (4a)$$

wobei die Pegelzunahme ΔL die gesuchte Größe ist, und

$$L_{A,Ölkühler}(280\ km/h) = L_{A,Ölkühler}(200\ km/h) + 20\ lg\ (280/200). \qquad (4b)$$

In Gleichung (4b) wird angenommen, daß der Geschwindigkeitsexponent 2,0, welcher für den Ölkühlerlüfter Ö-HB auf dem hinteren ICE-Triebkopf ermittelt wurde, auch für die Ölkühlerlüfter auf dem vorderen Triebkopf übernommen werden kann. Somit schreibt sich (2) bei 280 km/h:

$$10^{94,9/10} = 10^{(85,5 + \Delta L)/10} + 10^{(85,5 + 2,9)/10}. \qquad (5)$$

Als Lösung für ΔL folgt daraus $\Delta L = 8,3$ dB(A).

Dieser Pegelzunahme entspricht ein Geschwindigkeitsexponent von 5,7. Da es sich beim Stromabnehmer-Fußbereich um eine rein aerodynamische Schallquelle handelt, stimmt dieser Wert weitaus besser mit bisherigen Erkenntnissen überein als der Exponent von 4,4 in Tabelle 6. Die beiden Geräuschanteile der Quelle F1-V können somit beschrieben werden anhand

$$L_{A,Fuß}(\upsilon) = 85,5 + 57\ lg\ (\upsilon/200\ km/h)\ dB(A)\ und \qquad (6a)$$

$$L_{A,Ölkühler}(\upsilon) = 85,5 + 20\ lg\ (\upsilon/200\ km/h)\ dB(A). \qquad (6b)$$

Da es sich hierbei nur um eine Abschätzungsrechnung handelt, wird auf weitergehende quantitative Analysen verzichtet; für die Quellen F1-V und F1-H wird auch im folgenden Kapitel weiterhin nur jeweils eine Quellstärke stellvertretend für beide Komponenten angegeben.

Unter der Voraussetzung, daß sich die beiden Ölkühlerlüfter auf einem ICE 1- bzw. ICE 2-Triebkopf in ihrer Schallabstrahlung nicht unterscheiden, kann zur Bestimmung der Emission des vorderen Ölkühlerlüfters Ö-VA nun Gleichung (6b), d. h. das Ergebnis für die Quelle Ö-VB, verwendet werden. Hierzu ist lediglich dessen abweichende Entfernung von den Array-Mikrofonen (5,67 m statt 4,07 m) zu berücksichtigen. Um für den Lüfter Ö-VA gemäß Tabelle 6 einen Emissionspegel in 4,87 m Entfernung zur Gleismitte angeben zu können, muß der Wert in (6b) somit um 2,9 dB(A) reduziert werden.

6.3 Ortung eines Lautsprechers

Die Genauigkeit der Schallquellenortung mit dem WX-Array kann in einfacher Weise überprüft werden, indem eine punktförmige Schallquelle an einer bekannten Zugposition befestigt und dessen Abstrahlung während der Zugvorbeifahrt vom Array mit aufgezeichnet wird. Zu diesem Zweck wurde ein Miniaturlautsprecher mit einer Signalfrequenz von etwa 2,6 kHz an einem Fenster des zwölften Wagens des IC-Zuges bei Fahrt 13 angebracht. Obwohl die Lautsprecherfrequenz außerhalb des beim WX32-Array eigentlich betrachteten Frequenzbereichs liegt, ist mit Aliasing-Effekten kaum zu rechnen, da die vertikale Position des Lautsprechers von etwa 2,9 m über SO von der Mitte des WX32-Arrays nicht stark abwich und folglich der Array-Schwenkwinkel bezüglich des Lautsprecherorts mit ca. 15° relativ klein ist.

Die Array-Daten wurden in einem schmalen Frequenzbereich von 2550 bis 2650 Hz ausgewertet, um die Emission des Lautsprechers möglichst gut von anderen Geräuschquellen zu unterscheiden. Die so gemessene zweidimensionale Pegelverteilung am Anfang des zwölften IC-Wagens ist in Bild 23 dargestellt. Darin deutet sich wieder ein X-förmiges Muster an, in dessen Mitte die geortete Schallquelle liegt.

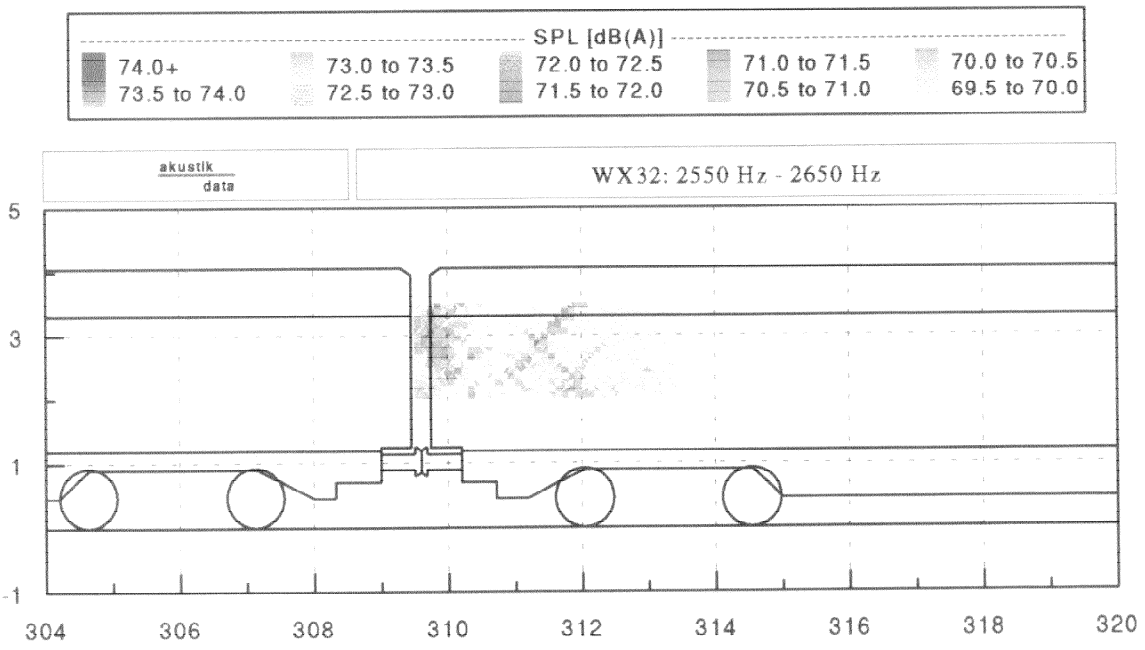


Bild 23 Zweidimensionale Verteilung des A-bewerteten Pegels am Anfang des zwölften IC-Wagens gemessen mit dem WX32-Array im Frequenzbereich 2550 bis 2650 Hz bei Fahrt 13 mit 184,0 km/h

Für die in Bild 23 erkennbare Position des Lautsprechers, nämlich an der Zugkoordinate 311,3 m in 2,9 m Höhe über SO, wurde des weiteren ein Schmalband-Spektrum erstellt, welches in Bild 24 gezeigt ist.

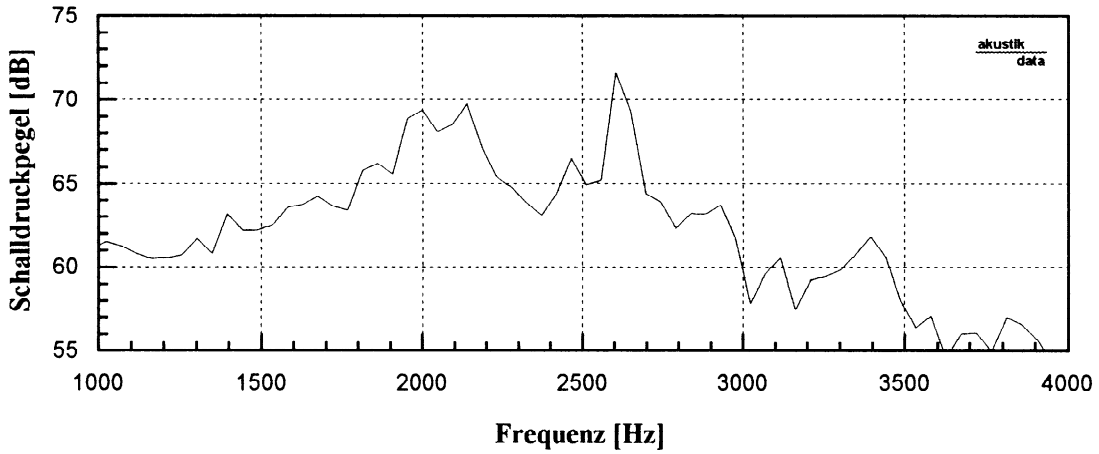


Bild 24 Schmalband-Schalldruckspektrum der Emission am Ort des Lautsprechers bei Vorbeifahrt eines IC-Zuges (Fahrt 13) mit 184,0 km/h

➔ Der Ort des Lautsprechers ist in der zweidimensionalen Pegelverteilung als lokales Pegelmaximum klar zu erkennen, und auch im Spektrum findet sich die abgestrahlte Frequenz als deutlicher Peak bei 2,6 kHz wieder. Hieraus folgt, daß bei einfachen Quellanordnungen wie punktförmigen Schallquellen mit dem WX-Array eine sehr präzise Lokalisierung erreicht werden kann.

7. Zusammenfassung der Ergebnisse

Um den Vorbeifahrpegel von ICE 1- bzw. ICE 2-Zügen mit und ohne seitlich der Trasse befindlicher Schallschutzwand prognostizieren zu können, ist die detaillierte Kenntnis aller Geräuschquellen während der Zugvorbeifahrt notwendig. Bezüglich der Emission der Räder liegen bereits umfassende Daten aus früheren Array-Messungen vor (z. B. [10]), während für die hochliegenden Schallquellen Angaben zu deren Lage, Emissionspegel, Geschwindigkeitsabhängigkeit und Frequenzgehalt noch der Vervollständigung bedurften. Hierin lag die Zielsetzung der im vorliegenden Bericht beschriebenen Array-Messungen.

7.1 Angaben zu den einzelnen georteten Schallquellen

Als Ergebnis der Messungen mit dem WV-Schachtel-Array sind in Tabelle 6 für jede als relevant eingestufte hochliegende Schallquelle der Emissionspegel $L_{A,200}$ (A-bewerteter Pegel bei der Bezugsgeschwindigkeit von 200 km/h) und der Geschwindigkeitsexponent α_A aufgelistet. Es konnte jedoch zunächst nicht für alle Lüfter der Emissionspegel bestimmt werden, sondern nur für diejenigen Lüfter, denen in den eindimensionalen Verteilungen von Abschnitt 4.2.2 ein deutliches Pegelmaximum zuzuordnen war. Für die übrigen Lüfter gleichen Typs am selben Fahrzeug werden die Pegel entsprechend übernommen.

Bezüglich des vorderen Ölkühlerlüfters auf dem vorlaufenden ICE-Triebkopf mußte anhand der Meßergebnisse mit dem WX-Array eine Abschätzung vorgenommen werden. Die Emission der in der Nähe der Stromabnehmer gelegenen Ölkühlerlüfter Ö-VB und Ö-HA ist in den Pegeln für die Stromabnehmer-Fußbereiche bereits enthalten und wird nicht gesondert aufgeführt. Die Lüfter der Klimaanlagen der ICE-Mittelwagen wurden exemplarisch an nur zwei Zugpositionen betrachtet.

So ergeben sich die in Tabelle 11 zusammengestellten Emissionspegel und Geschwindigkeitsexponenten. Dabei sind die Pegel $L_{A,5m,200}$ auf einen einheitlichen Abstand von 5,0 m von der jeweiligen Schallquelle bezogen. Die gleichfalls angegebenen Koordinaten in drei Dimensionen geben die exakten Positionen der Quellen wieder und weichen von den in Tabelle 4 gewählten, an die Meßergebnisse angepaßten Auswertepositionen geringfügig ab. Die jeweilige Zugkoordinate gilt für einen ICE 1-Zug mit 12 Mittelwagen. Der Abstand der Quellen von der Gleismitte wird in Richtung des Meßorts seitlich der Trasse positiv gezählt.

➔ Die in Tabelle 11 enthaltenen Emissionsdaten stellen eine wesentliche Ergänzung des bisherigen Kenntnisstands zu den hochliegenden Schallquellen des ICE 1 dar, da erstmals eine Schallquellenlokalisierung über die gesamte Zuglänge erfolgte und aufgrund der großen Anzahl von gemessenen Vorbeifahrten eine hohe statistische Sicherheit erreicht werden konnte. Die Angaben zu den genannten Schallquellen können somit als zuverlässig gelten. In gleicher Weise kann für weitere, nicht aufgeführte Schallquellen attestiert werden, daß diese im Hinblick auf die Gesamtemission vernachlässigt werden können.

Quelle	Bezeich-nung	Zug-koordinate [m]	Höhe über SO [m]	Abstand von Gleismitte [m]	$L_{A,5m,200}$ [dB(A)]	α_A
Seitenlüfter (=Fahr-motorlüfter)	S-VA	5,4	3,0	+1,5	83,3	5,0
	S-VB	16,7				
	S-HA	341,2			79,5	5,5
	S-HB	352,5				
Ölkühler-lüfter	Ö-VA	7,8	3,85	-0,8	83,9	2,0
	Ö-HB	350,1		+0,8	83,7	2,0
Stromabn.-Fußbereich[1)]	F1-V	17,6	4,0	0,0	88,3	4,4
	F1-H	340,3			84,4	4,5
Stromabn.-Fußbereich[1)2)]	FW2-V	16,7	4,0	0,0	89,9	5,8
	FW2-H	341,2			85,9	4,9
Stromabn.-Wippe	W-V	17,2	5,2	0,0	88,4	4,6
	W-H	340,7			87,4	4,9
Klima-lüfter	Ü-V	[3)]	3,5	+1,5	75,5	4,8
	Ü-H	[4)]			74,3	5,1

[1)] enthält auch Anteile der Emission des nahegelegenen Ölkühlerlüfters

[2)] einschließlich der Wippe des zweiten, abgesenkten Stromabnehmers

[3)] alle Wagenübergänge im vorderen Zugteil (bis auf die Zugkoordinate 99,8 m)

[4)] alle Wagenübergänge im hinteren Zugteil

Tabelle 11 A-bewertete Emissionspegel in 5,0 m Abstand bei 200 km/h und Geschwindigkeitsexponenten für die hochliegenden Schallquellen des ICE 1 mit Angabe deren Bezeichnung und exakter Zugposition

➔ Für den ICE 2 können die Emissionsdaten aus Tabelle 11 übernommen werden. Möglicherweise muß als weitere Schallquelle das stabförmige Kupplungselement am Fahrzeugbug ("Greifer") hinzugerechnet werden, dessen Emission wegen der geringen Anzahl von ICE 2-Vorbeifahrten nicht genau bestimmt werden konnte.

➔ Für die Fahrmotor- und Klimalüfter ergeben sich als Geschwindigkeitsexponenten mehr als doppelt so hohe Werte (α_A = 4,8 bis 5,5) wie für die Ölkühlerlüfter (α_A = 2,0). Ferner zeigt ein Vergleich mit Meßwerten aus Standversuchen der DB AG [8], daß sich die bei 200 km/h abgestrahlten Pegel von den im Standbetrieb gemessenen Pegeln nur geringfügig unterscheiden. Die Emission aus den

Lüfteröffnungen wird in einem Geschwindigkeitsbereich, der bis zu ca. 200 km/h reicht, offenbar nur vom eigentlichen Ventilatorgeräusch bestimmt und weist daher eine sehr geringe Geschwindigkeitsabhängigkeit auf.

Bei höheren Geschwindigkeiten oberhalb von ca. 200 km/h scheint hingegen eine geschwindigkeitsabhängige Komponente zum Lüftergeräusch hinzuzukommen, welche bei den Fahrmotor- und Klimalüftern stärker ausgeprägt ist als bei den Ölkühlerlüftern. Da die Lamellen der Lüftergitter bei den Fahrmotor- und Klimalüftern senkrecht, bei den Ölkühlerlüftern hingegen parallel zur Strömungsrichtung angeordnet sind, könnte die Ursache hierfür in der Wechselwirkung der Strömung insbesondere mit den senkrechten Lamellen liegen und der damit verbundenen aerodynamischen Schallerzeugung (siehe hierzu auch [11]). Als Konsequenz sind die für die Fahrmotor- und Klimalüfter in Tabelle 11 angegebenen Geschwindigkeitsexponenten nur für den betrachteten Geschwindigkeitsbereich gültig; unterhalb von ca. 150 km/h ist mit geringeren Exponenten zu rechnen.

➔ Zwischen den abgestrahlten Pegeln zweier aerodynamischer Schallquellen mit gleicher Herkunft am vor- und nachlaufenden Triebkopf ist ein deutlicher Unterschied zu erwarten, wenn die rückwärtige Quelle aufgrund der dicker gewordenen Grenzschicht mit geringerer Geschwindigkeit angeströmt und folglich in ihrer Emission reduziert wird. Dies trifft für die nahe der Fahrzeugkontur befindlichen Quellen im allgemeinen zu: so beträgt die Pegeldifferenz bei den Fahrmotorlüftern und den Stromabnehmer-Fußbereichen jeweils etwa 4,0 dB(A) zwischen vorderem und hinterem Triebkopf. Warum diese Differenz für die Klimalüfter der Mittelwagen geringer ausfällt, kann nicht eindeutig geklärt werden, zumal die Klimalüfter nur an zwei beispielhaften Zugpositionen vermessen wurden.

Für die Stromabnehmer-Wippe ist ein von der Zugkoordinate nur wenig abhängiger Pegel zu vermuten, da sich für die nachlaufende Wippe die Anströmgeschwindigkeit nicht in dem Maße verringert wie für ein Bauteil nahe der Außenkontur des Zuges. Die gemessene Pegeldifferenz von ca. 1 dB(A) zwischen vor- und nachlaufender Wippe entspricht dieser Erwartung. Daß bei der Emission der Ölkühlerlüfter hingegen überhaupt kein Unterschied zwischen vorderem und hinterem Triebkopf auszumachen ist, kann als weiterer Hinweis gedeutet werden, daß der zusätzliche aerodynamische Anteil durch die Lamellen bei diesen Lüftern

wesentlich geringer ausfällt als bei den Fahrmotorlüftern. Dies bedeutet, daß das Ventilatorgeräusch an sich von der Zugkoordinate unabhängig ist.

➔ Wie schon in Abschnitt 4.2.3 erwähnt, ergeben sich hier für den Stromabnehmer-Fußbereich und die -Wippe im Vergleich mit früheren Windkanal-Messungen deutlich kleinere Geschwindigkeitsexponenten. Bezüglich des Fußbereichs ist dies durch den Geräuschanteil des nahegelegenen Ölkühlerlüfters zu erklären.

Für die Stromabnehmer-Wippe konnte hingegen trotz intensiver Nachforschungen (siehe Abschnitt 4.3.2) keine Erklärung gefunden werden. Eine kürzlich durchgeführte Untersuchung [9] zeigte jedoch, daß einerseits der betrachtete Geschwindigkeitsbereich ein wesentlicher Parameter ist. So kann unterhalb von 200 km/h der Geschwindigkeitsexponent durch den stärkeren Einfluß der A-Bewertung auf tieffrequente Anteile im Spektrum größere Werte annehmen. Daraus folgt, daß die in Tabelle 11 für die Wippe angegebenen Exponenten für Geschwindigkeiten unterhalb von ca. 200 km/h gegebenenfalls zu niedrig angesetzt sind. Zum anderen kann im Streckenversuch ein mechanisches Geräusch hinzukommen, das bei geringen Geschwindigkeiten zur Pegelerhöhung und damit zur Verringerung des Exponenten führen würde. Für weitere Details sei auf [9] verwiesen.

➔ Die Emissionspegel der hochliegenden Schallquellen von IC-Zügen, d. h. im vorliegenden Fall einzig diejenigen der Lokomotive BR 120, wurden bereits in Tabelle 10 aufgelistet und werden hier nicht nochmals wiederholt. Die dortigen Pegel müssen lediglich auf einen einheitlichen Abstand von 5,0 m zur jeweiligen Schallquelle umgerechnet werden.

7.2 Über die Zuglänge gemittelte vertikale Pegelverteilungen

Als letzter Arbeitsschritt werden im folgenden nicht die Kennwerte für die einzelnen Schallquellen, sondern Vorbeifahrpegel in verschiedenen Höhenbereichen angegeben, die jeweils eine Mittelung über die gesamte Zugvorbeifahrt bedeuten. Hiermit lassen sich anschauliche und pauschale Aussagen zu den Geräuschanteilen von hoch- und tiefliegenden Quellen herleiten. Diesbezüglich wurden die in den Bildern B1 bis B18 gezeigten zweidimensionalen Pegelverteilungen über die gesamte Zuglänge gemittelt, woraus die in Bild 25 dargestellten eindimensionalen vertikalen Verteilungen resul-

tieren. Es sind sowohl die Ergebnisse für die einzelnen Vorbeifahrten als auch die über alle Fahrten eines Geschwindigkeitsbereichs gemittelten Verteilungen aufgetragen, wobei nur Vorbeifahrten des ICE 1 berücksichtigt wurden.

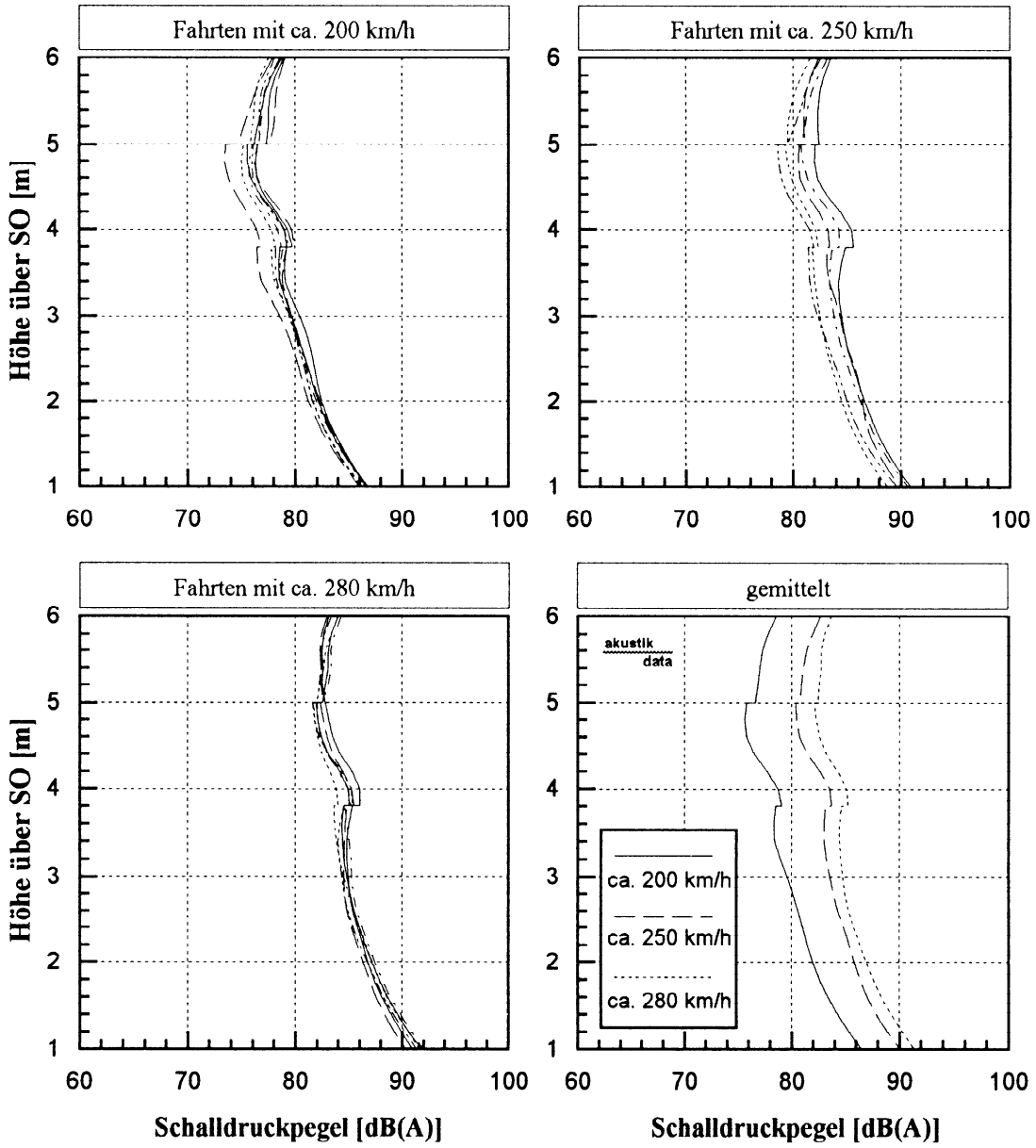


Bild 25 Vertikale Pegelverteilungen gemittelt über die gesamte Zuglänge des ICE 1 für alle Einzelfahrten und hierüber gemittelte Verteilungen in drei Geschwindigkeitsbereichen gemessen mit dem WV-Schachtel-Array im Frequenzbereich 180 bis 2820 Hz in 4,87 m Entfernung zur Gleismitte

Um den zugrundeliegenden Mittelungsprozeß an drei exemplarischen Fahrten mit ca. 200, 250 und 280 km/h zu demonstrieren, sind in den Bildern F1 bis F3 eindimensionale horizontale Pegelverteilungen bzw. Pegelverläufe über der Zugkoordinate aufgetragen. Diese ergeben sich aus horizontalen Schnitten in den zweidimensionalen Pegelverteilungen der Bilder B1 bis B3 in einer Höhe von 4,0 m über SO. Die Mittelung solcher Pegelverläufe in verschiedenen Höhen führt in Bild 25 jeweils zu einem Pegelwert je Vorbeifahrt an der entsprechenden Höhenkoordinate. Die Bilder F1 bis F3 bestätigen nochmals, daß die Emission in der gewählten Höhe von 4,0 m über SO im Bereich der Triebköpfe merklich höher ist als bei den Mittelwagen, und daß die Pegel am nachlaufenden Triebkopf generell geringer ausfallen als am vorlaufenden Triebkopf.

Die in Bild 25 gezeigten Pegelverteilungen müssen zunächst hinsichtlich der Meßtechnik interpretiert werden. Da der Anteil des Rollgeräuschs bei einer Mittelung über die gesamte Zuglänge sehr groß ist, sind die Pegel, die unterhalb von etwa 2,5 m über SO deutlich ansteigen, als Auswirkung der Emission im Rad/Schiene-Bereich anzusehen. Wie schon in Abschnitt 4.3.2 gezeigt, hat das Rollgeräusch gleichfalls Aliasing-Effekte für Höhen größer als ca. 5,5 m über SO zur Folge, so daß die Pegelzunahme in größeren Höhen keine physikalische Bedeutung hat.

➔ Die in einem Höhenbereich zwischen 2,5 und 5,5 m über SO auftretenden Pegel können folglich als tatsächlich vorhandene Abstrahlung von hochliegenden Schallquellen aufgefaßt werden. Es deutet sich hierbei ein Maximum in einer Höhe von etwa 4,0 m über SO an.

Es stellt sich nun die Frage, wie groß der Anteil der hochliegenden Schallquellen im Vergleich zu den tiefliegenden Schallquellen ausfällt. Zur Bestimmung des letzteren Werts wurde eine Modellrechnung mittels des Programms AD-PRO 2.0 durchgeführt, bei der eine Vorbeifahrt des ICE 1 mit 280 km/h auf geschliffenen Schienen simuliert wird. Der Immissionsort liegt dabei in 4,87 m Abstand von Gleismitte in 0,5 m Höhe über SO. Neben dem Rollgeräusch wird auch das aerodynamische Geräusch aus den Drehgestellen bei der Rechnung berücksichtigt. Das Ergebnis der Simulation, nämlich ein Vorbeifahrpegel von 96 dB(A) in 0,5 m Höhe über SO, ist in Bild 26 schematisch eingezeichnet, und zwar als Fortsetzung der gemittelten Pegelverteilung aus Bild 25 für den Geschwindigkeitsbereich 280 km/h.

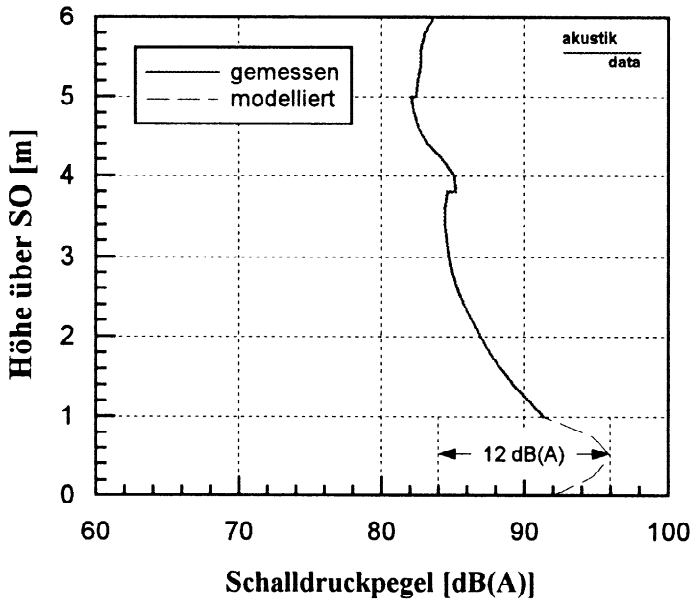


Bild 26 Vertikale Pegelverteilung gemittelt über die gesamte Zuglänge des ICE 1 sowie gemittelt über alle Fahrten mit ca. 280 km/h gemessen mit dem WV-Schachtel-Array; die Emission der Quellen im Rad/Schiene-Bereich als Ergebnis einer Modellrechnung ist schematisch mit eingezeichnet

Der Geräuschanteil der hochliegenden Schallquellen liegt bei 280 km/h und freier Schallausbreitung etwa 12 dB(A) unter dem Anteil aus dem Rad/Schiene-Bereich. Da es sich bei den hochliegenden Schallquellen aber um einen in Höhenrichtung ausgedehnten Quellbereich handelt, und da aufgrund der Array-Auflösung jeder Wert der vertikalen Pegelverteilung die Schallemission eines etwa 0,7 m in Höhenrichtung ausgedehnten Quellbereichs repräsentiert, müssen die in Bild 26 abzulesenden Pegel somit noch im Abstand von 0,7 m addiert werden, um einen Einzahlwert für die Emission aus dem gesamten Quellbereich zwischen 2,5 und 5,5 m zu erhalten. Daraus ergibt sich ein Pegel von etwa 90 dB(A).

Dies bedeutet aber, daß bei einer typischerweise 2 m hohen SSW, d. h. bei einer Absenkung der Emission aus dem Rad/Schiene-Bereich um ca. 12 dB(A), die Abstrahlung der nicht abgeschirmten hochliegenden Quellen im Gesamtgeräusch um etwa 6 dB(A) überwiegt. In Abhängigkeit von der Höhe der SSW und des Abstands des Immissionsorts vom Gleis läßt sich daraus eine wesentlich geringere Wandwirkung erwarten als bei Zügen, deren Schallquellen allein im Rad/Schiene-Bereich liegen.

7.3 Schlußbemerkung und Ausblick

Für weitergehende Aussagen bezüglich der Wirkung einer Schallschutzwand sei auf den Bericht 4 [4] dieses Forschungsvorhabens verwiesen, der die Ergebnisse von Arbeitspaket 3 enthält. Diese umfassen gemessene Pegelverläufe aus Arbeitspaket 1 des Vorhabens im Vergleich mit Prognosen, die auf den in diesem Bericht erarbeiteten Erkenntnissen beruhen. Hierdurch wird auch die Anwendbarkeit des Rechenmodells AD-PRO 2.0 überprüft. Aus den anschließenden Modellrechnungen folgt als Endergebnis eine Aussage darüber, wie die Wirkung einer SSW im Hochgeschwindigkeitsverkehr in einer zu modifizierenden Schall 03 mit zufriedenstellender Genauigkeit formuliert werden kann.

8. Literatur

[1] Information Akustik 03, Richtlinie zur Berechnung der Schallimmissionen von Schienenwegen - Schall 03.
Deutsche Bundesbahn, Bundesbahn-Zentralamt München, Ausgabe 1990

[2] M. Klemenz, M. W. Hansen und B. Barsikow
Abschirmwirkung von Schallschutzwänden bei Hochgeschwindigkeitszügen;
Bericht 1, Arbeitspaket 1, Meßserie 1: Einzelmikrofon-Messung bei ungeschliffenen Schienen.
Umweltbundesamt, Forschungsvorhaben 296 55 215, August 1998

[3] M. Klemenz, M. W. Hansen und B. Barsikow
Abschirmwirkung von Schallschutzwänden bei Hochgeschwindigkeitszügen;
Bericht 2, Arbeitspaket 1, Meßserie 2: Einzelmikrofon-Messung bei geschliffenen Schienen.
Umweltbundesamt, Forschungsvorhaben 296 55 215, August 1998

[4] M. Klemenz und B. Barsikow
Abschirmwirkung von Schallschutzwänden bei Hochgeschwindigkeitszügen;
Bericht 4, Arbeitspaket 3: Modellrechnungen und Vorschläge zur Modifikation der Schall 03.
Umweltbundesamt, Forschungsvorhaben 296 55 215, Dezember 1998

[5] M. Klemenz und B. Barsikow
Verification of sound-abatement measures applied to a DSA 350 SEK pantograph with microphone-array measurements.
Deutsch-Französische Kooperation (DeuFraKo), Anhang K2,
Technical document 1A 7G01 T1.DA, 1997

[6] M. Klemenz und B. Barsikow
Sound generated by possible flow separations on the upper half of the head on the ICE/V.
Deutsch-Französische Kooperation (DeuFraKo), Anhang K2,
Technical document 1A 8A17 T1.DA, 1998

[7] B. Barsikow und W. F. King III
Acoustical investigations of a full-scale DSA 350 SEK pantograph in an anechoic open-jet wind tunnel.
Deutsch-Französische Kooperation (DeuFraKo), Anhang K2,
Technical document 1A 6G09 T1.DA, 1996

[8] Luftschallmessungen an ICE-Fahrmotorlüftern.
Deutsche Bahn AG, Versuchszentrum München, Bericht 356 033, 1994

[9] M. Klemenz, B. Barsikow und M. Schüttpelz
Untersuchungen zur Geschwindigkeitsabhängigkeit des Stromabnehmergeräuschs.
Ingenieurbüro akustik-data, Bericht Nr. 98/2, 1998

[10] B. Müller und B. Barsikow
Normierte Spektren der Schallemission von einzelnen Rädern des Intercity Express (ICE).
Fortschritte der Akustik, Proc. DAGA 93, 573-576, 1993

[11] Y. Moritoh, Y. Zenda und K. Nagakura
Noise control of high speed Shinkansen.
Journal of Sound and Vibration, Vol. 193(1), 319-334, 1996

Umweltforschungsplan
des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

Lärmbekämpfung

Forschungsvorhaben 296 55 215

Abschirmwirkung von Schallschutzwänden bei Hochgeschwindigkeitszügen

Bericht 4
Arbeitspaket 3:
Modellrechnungen und Vorschläge zur Modifikation der Schall 03

von

Martin Klemenz
Bernd Barsikow

Ingenieurbüro akustik-data, Dipl.-Ing. B. Barsikow
Kirchblick 9, 14129 Berlin

im Auftrag
des Umweltbundesamtes
Dezember 1998

Berichts – Kennblatt

Berichtsnummer 1. UBA-FB 98-296 55 215	2.	3.
4. **Titel des Berichts** Abschirmwirkung von Schallschutzwänden bei Hochgeschwindigkeitszügen; Bericht 4, Arbeitspaket 3: Modellrechnungen und Vorschläge zur Modifikation der Schall 03		
5. **Autor(en), Name(n), Vorname(n)** Klemenz, Martin; Barsikow, Bernd		8. **Abschlußdatum** 18.12.1998 9. **Veröffentlichungsdatum**
6. **Durchführende Institution (Name, Anschrift)** Ingenieurbüro akustik-data, Dipl.-Ing. B. Barsikow Kirchblick 9, 14129 Berlin		10. **UFOPLAN-Nr.** 296 55 215 11. **Seitenzahl** 67
7. **Fördernde Institution (Name, Anschrift)** Umweltbundesamt Postfach 33 00 22, 14191 Berlin		12. **Literaturangaben** 14 13. **Tabellen / Diagramme** 7 / 34 14. **Abbildungen**
15. **Zusätzliche Angaben**		
16. **Kurzfassung** Die Untersuchungen im vorliegenden Bericht ergeben, daß die Wirkung einer Schallschutzwand (SSW) in der aktuell gültigen Richtlinie Schall 03 im Fall des ICE 1 und ICE 2 überschätzt wird und damit diesbezüglich ein Bedarf zur Modifikation besteht, während bei allen anderen Zugarten in dieser Hinsicht keine Änderung der Schall 03 erforderlich ist. Für eine zukünftige Version der Schall 03 wird für obige ICE-Züge ein korrigiertes Vorgehen zur Berechnung der SSW-Abschirmwirkung vorgeschlagen, und zwar anhand einer Parameterstudie mittels der Software AD-PRO 2.0. Als Eingangsdaten für diese Prognosen dienen langjährige Erfahrungen aus Array-Messungen. Der Grundgedanke bei der modifizierten Berechnung der Einfügungsdämpfung einer SSW besteht darin, zusätzliche Schallquellen für den aerodynamischen Geräuschanteil eines ICE einzuführen und für diese Quellen andere Höhen zu wählen als die Schienenoberkante. Die vorgeschlagenen Korrekturen sind zunächst nur für den ICE 1 und ICE 2 gültig. Für zukünftige Hochgeschwindigkeitszüge müssen deren Kennwerte für die Schall 03 erst noch bestimmt werden.		
17. **Schlagwörter** Schallschutzwände, Hochgeschwindigkeitszüge, ICE 1, ICE 2, Richtlinie Schall 03, Abschirmwirkung, Einfügungsdämpfung, Parameterstudie, Rechenmodell AD-PRO 2.0, hochliegende Schallquellen, Quellhöhen, Lüfteremission, Modifikation der Schall 03		
18. **Preis**	19.	20.

UBA-F+E-Berichtsmerkblatt (6.80)

Report - Data Sheet

1. **Report No.** UBA-FB 98-296 55 215	2.	3.
4. **Report Title** Shielding effect of noise barriers during passbys of high-speed trains; report No. 4, work package No. 3: Model calculations and suggestions for modifying the "Schall 03" guidelines		
5. **Author(s), Family Name(s), First Name(s)** Klemenz, Martin; Barsikow, Bernd		8. **Report Date** 18 December 1998 9. **Publication Date**
6. **Performing Organisation (Name, Address)** akustik-data Engineering Office, Dipl.-Ing. B. Barsikow Kirchblick 9, 14129 Berlin		10. **UFOPLAN–No.** 296 55 215 11. **No. of Pages** 67
7. **Sponsoring Agency (Name, Address)** Federal Environmental Agency Post box 33 00 22, 14191 Berlin		12. **No. of References** 14 13. **Tables / Diagrams** 7 / 34 14. **Figures**
15. **Supplementary Notes**		

16. **Abstract**
The results of the investigations described in the present report demonstrate that the shielding effect of sound barriers given by the "Schall 03" guidelines in their currently valid version is overestimated for ICE 1 and ICE 2 high-speed trains. Consequently, the guidelines should be modified for these trains but not for conventional ones. To lay the groundwork for a corrected, future version of Schall 03, as it applies to calculating the effect of sound barriers for ICE trains, a parametric study was carried out using the AD-PRO 2.0 computer program. The input data for this study were based upon results of microphone-array measurements. The basic technique used in developing a more accurate method for calculating the insertion loss in the presence of a sound barrier was to model supplementary noise sources that represent the aerodynamically generated sound on ICE trains, and position these sources at realistic heights above the rails. At the present time, these suggested corrections are valid only for the ICE 1 and ICE 2. For future high-speed vehicles, similar corrections can only be made after the characteristics of these trains become known.

17. **Key Words**
Sound barriers, high-speed trains, ICE 1, ICE 2, "Schall 03" guidelines, shielding effect, insertion loss, parametric study, AD-PRO 2.0 computer model, high-lying sound sources, source heights, fan noise, modification of Schall 03

18. **Price**	19.	20.

Umweltforschungsplan
des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

Lärmbekämpfung

Forschungsvorhaben 296 55 215

Abschirmwirkung von Schallschutzwänden bei Hochgeschwindigkeitszügen

Bericht 4
Arbeitspaket 3:
Modellrechnungen und Vorschläge zur Modifikation der Schall 03

von

Martin Klemenz
Bernd Barsikow

Ingenieurbüro akustik-data, Dipl.-Ing. B. Barsikow
Kirchblick 9, 14129 Berlin

im Auftrag
des Umweltbundesamtes
Dezember 1998

Abschirmwirkung von Schallschutzwänden bei Hochgeschwindigkeitszügen
Arbeitspaket 3:
Modellrechnungen und Vorschläge zur Modifikation der Schall 03

bearbeitet von

Dipl.-Ing. M. Klemenz und Dipl.-Ing. B. Barsikow

Inhaltsverzeichnis

	Abkürzungen und Formelzeichen	2
1.	Einleitung	3
2.	Beschreibung des Prognosemodells AD-PRO 2.0	4
2.1	Aktualisierung der Eingangsdaten	6
3.	Verifizierung des Prognosemodells AD-PRO 2.0	7
3.1	Vergleich mit gemessenen Pegelverläufen	9
3.2	Vergleich mit gemessenen Einzahlwerten	13
4.	Entwurf einer Formulierung bezüglich der Wirkung einer Schallschutzwand für die Neufassung der Schall 03	16
4.1	Aktuell gültige Version der Schall 03	17
4.2	Korrigierte Version der Schall 03 (Variante A)	20
4.3	Korrigierte Version der Schall 03 (Variante B)	22
4.4	Korrigierte Version der Schall 03 (Variante C)	23
4.5	Erweiterung für niedrige Geschwindigkeiten (Variante D)	24
4.6	Variation der Geometrie der Schallschutzwand	27
4.7	Variation der Fahrzeuglänge	28
4.8	Übertragung auf ICE 2-, IC-, EC- und IR-Züge	28
5.	Zusammenfassung	30

6. Literatur 31

Anhang 34

Abkürzungen und Formelzeichen

C_2	Faktor zur Berücksichtigung von Bodenreflexionen in VDI 2720, Blatt 1
D_{Ac}	Pegeldifferenz in [dB(A)] zur Berücksichtigung aerodynamischer Einflüsse in der Schall 03
D_{BM}, D_D, $D_{e,k}$, D_{Fb}, D_{Fz}, D_l, D_v	Pegeldifferenzen in [dB(A)] gemäß Schall 03
K_0	Raumwinkelmaß in VDI 2714 in [dB(A)]
$K_{w,k}$	Witterungskorrektur für das Teilstück k gemäß Schall 03
L_h	Stunden-Mittelungspegel in [dB(A)]
$L_{m,s}$	Örtlicher spezifischer Grundwert in [dB(A)]
$L_{m,s,MS,i}$	Örtlicher spezifischer Grundwert ermittelt mit Mikrofon i in einer Meßebene mit vorhandener SSW in [dB(A)]
$L_{m,s,OS,i}$	Örtlicher spezifischer Grundwert ermittelt mit Mikrofon i in einer Meßebene ohne SSW in [dB(A)]
MS	Meßebene mit einer einseitigen SSW
OS	Meßebene mit freier Schallausbreitung zu beiden Seiten des Gleises
SO	Schienenoberkante
SSW	Schallschutzwand
υ	Zuggeschwindigkeit in [km/h]
z_k	Schirmwert in [m] für das Teilstück k gemäß Schall 03
α_A	Geschwindigkeitsexponent für A-bewerteten Schalldruck
ΔL_{Rauh}	Pegeldifferenz in [dB(A)], die in der Prognoserechnung zum Rollgeräusch hinzuaddiert wird
ΔL_{Roll}	Korrekturterm in [dB(A)] für unterschiedliche Rauhigkeiten von rechter und linker Schiene
λ	Schallwellenlänge in [m]

1. Einleitung

Im Rahmen des Themas "Weiterentwicklung der Prognoseverfahren der Verkehrslärmschutzverordnung" wird im Auftrag des Umweltbundesamtes die Abschirmwirkung von Schallschutzwänden (SSW) an Bahnstrecken untersucht. Innerhalb dieses Forschungsvorhabens liegen bereits drei Berichte vor [1, 2, 3]. Die in [1] und [2] dokumentierten Ergebnisse des Arbeitspakets 1 zeigten, daß die Einfügungsdämpfung einer SSW in der gültigen Richtlinie Schall 03 [4] bei Hochgeschwindigkeitszügen überschätzt wird, da die Pegelminderung durch eine SSW z. B. beim ICE 1 aufgrund des Anteils "hochliegender" Schallquellen geringer ist als bei einem Zug, dessen Schallquellen hauptsächlich im Rad/Schiene-Bereich liegen.

Darum ist geplant, eine verbesserte Formel für die Abschirmwirkung einer SSW vorzuschlagen, die in eine künftige Version der Schall 03 eingehen soll. Im vorliegenden Bericht wird dies anhand einer Parameterstudie realisiert. Für diese Berechnungen kommt das von akustik-data entwickelte Prognosemodell AD-PRO 2.0 zum Einsatz. Es ermöglicht die Simulation des Pegelverlaufs an einem bestimmten Immissionsort bei der Vorbeifahrt eines beliebigen Zuges, wobei viele Parameter variiert werden können, z. B. die Geschwindigkeit, der schalltechnische Zustand von Schienen und Rädern oder die Abschirmung durch eine beliebig angeordnete SSW.

Um beispielsweise den Vorbeifahrpegel eines ICE 1 mit bzw. ohne SSW prognostizieren zu können, ist die Kenntnis aller Geräuschanteile während der Zugvorbeifahrt notwendig. Hierzu müssen als Eingangsdaten die Lage, die Stärke, die Geschwindigkeitsabhängigkeit und der Frequenzgehalt jeder relevanten Schallquelle bekannt sein. Bezüglich der Emission aus dem Rad/Schiene-Bereich liegen bereits umfassende Daten aus früheren Array-Messungen vor, während die entsprechenden Daten für die Modellierung der hochliegenden Schallquellen noch der Vervollständigung bedurften. Aus diesem Grunde erfolgte innerhalb der Untersuchungen im Arbeitspaket 2 [3] eine Lokalisierung und Analyse dieser Quellen beim ICE 1 und ICE 2 mittels der Array-Technik, wobei auch ein IC-Zug mit der Lokomotive BR 120 in die Auswertung einbezogen werden konnte.

Mit den in [3] gewonnenen Kenntnissen über relevante und vernachlässigbare hochliegende Schallquellen bei den genannten Zugarten ist das Rechenmodell AD-PRO 2.0

in der vorliegenden Studie zu aktualisieren. Anschließend soll hiermit die Einfügungsdämpfung von Schallschutzwänden bestimmt werden, die in ihren geometrischen Abmessungen denen entsprechen, die in Arbeitspaket 1 [1, 2] untersucht wurden. Die Berechnungen erfolgen in Abhängigkeit von Geschwindigkeit, Gleiszustand, Zugart und anderer relevanter Parameter. Für eine beschränkte Anzahl von Vorbeifahrten sollen zunächst die Verläufe des A-bewerteten Pegels bei freier Schallausbreitung und bei vorhandener SSW simuliert und mit den jeweiligen gemessenen Pegelverläufen verglichen werden. Schließlich werden die Ergebnisse der Modellrechnungen in Form von Einzahlwerten anhand der Meßergebnisse aus Arbeitspaket 1 überprüft.

Ziel ist es, die Anwendbarkeit der modifizierten Version von AD-PRO 2.0 bei Variation möglichst vieler Parameter zu testen und zu bestätigen. Abschließend wird daraus ein Vorschlag zur aktualisierten Berechnung der Einfügungsdämpfung einer SSW für die Novellierung der Verkehrslärmschutzverordnung erarbeitet. Zur besseren Übersichtlichkeit dieses Berichts sind alle Bilder bzw. Diagramme in einem Anhang zusammengefaßt. Die wesentlichen Erkenntnisse und Schlußfolgerungen aus den einzelnen Untersuchungen sind im folgenden für einen schnellen Überblick durch die Markierung "➔" und eine Einrückung des Textes hervorgehoben.

2. Beschreibung des Prognosemodells AD-PRO 2.0

Das Rechenmodell AD-PRO 2.0 wurde von akustik-data zur Prognose der Schallemission und -immission bei Vorbeifahrten von spurgebundenen Fahrzeugen entwickelt. Zugart und Wagenreihung können frei gewählt werden; bei jedem Einzelfahrzeug müssen hierbei alle relevanten Schallquellen bekannt sein. Jede Schallquelle kann als Punkt-, Linien- oder Flächenschallquelle mit variabler horizontaler Richtcharakteristik angesetzt werden. Die Berechnung erfolgt anhand einer energetischen Addition der A-bewerteten Schalldruckpegel, die von den einzelnen Schallquellen an einem zu wählenden Immissionsort zu verschiedenen Zeitpunkten während der Vorbeifahrt erzeugt werden. Das Ergebnis ist dann ein zeitlicher Pegelverlauf, aus dem sich Einzahlwerte, wie z. B. der Vorbeifahrpegel, ermitteln lassen. Bei der Prognoserechnung wird die Abstrahlung bewegter Schallquellen berücksichtigt. Die Schallausbreitung ist entsprechend der Richtlinie VDI 2714 formuliert [5].

Die Wirkung einer SSW wird für jede einzelne Zugquelle und für alle Zeitpunkte während der Vorbeifahrt anhand der Richtlinie VDI 2720 [6] berechnet. Höhe und Abstand der SSW zum Gleis sind frei wählbar. Da Bodenreflexionen als vernachlässigbar angesehen werden, wird der Proportionalitätsfaktor C_2 in [6] auf 40 gesetzt. Letztere Annahme ist begründet durch Erfahrungen, die bei der Lokalisierung von Spiegelschallquellen in der Nähe von Bahnstrecken mittels Mikrofon-Arrays immer wieder gemacht wurden (siehe z. B. [7]).

Tabelle 1 enthält eine Übersicht über alle Parameter, die jeweils für eine Prognoserechnung mittels AD-PRO 2.0 anzugeben sind. Diejenigen Parameter, die sich auf die Schallquellen an einem bestimmten Einzelfahrzeug, z. B. einer Lokomotive oder eines Wagens beziehen, sind in Tabelle 2 aufgelistet. Diese fahrzeugbezogenen Dateien müssen jeweils nur einmal erstellt werden; bei der Prognose für den Gesamtzug ist lediglich die Reihenfolge der betreffenden Einzelfahrzeuge anzugeben.

akustische Randbedingungen	• Vorbeifahrgeschwindigkeit • Entfernung des Immissionsorts von Gleismitte • Höhe des Immissionsorts über Schienenoberkante (SO) • Höhe des Immissionsorts über Boden • Höhe und Abstand einer SSW (bei freier Schallausbreitung wird die Höhe zu Null gesetzt) • schalltechnischer Zustand von Schienen und Rädern
Zugbildung	• Reihung der Einzelfahrzeuge aus Tabelle 2
prognostiziertes Geräusch	• Gesamtgeräusch oder • Geräuschkomponenten separat (z. B. die Emission der Lüfter, das Rollgeräusch oder aerodynamische Geräuschquellen wie die Stromabnehmer)
schallmindernde Maßnahmen	• individuelle Pegelminderung für jede Schallquelle

Tabelle 1 Parameter für Prognoserechnungen mittels AD-PRO 2.0

Nicht alle Optionen des Rechenmodells sind in der vorliegenden Untersuchung von Interesse, so werden z. B. die Auswirkungen schallmindernder Maßnahmen an einzel-

nen Quellen nicht untersucht; ebenso wird stets nur das Gesamtgeräusch berechnet. Von der Möglichkeit, die Schallemission zukünftiger Züge vorherzusagen, wird ebenfalls kein Gebrauch gemacht. Es sei an dieser Stelle erwähnt, daß das Rechenmodell AD-PRO in der derzeitigen Version 2.0 nur intern von akustik-data angewendet werden kann, da es noch nicht alle Anforderungen an eine benutzerfreundliche Software erfüllt.

Fahrzeug A	• Länge • Anzahl der Schall-quellen	Schallquelle A1	• A-bewerteter Schalldruckpegel in 5 m Abstand von der Quelle bei der Bezugsgeschwindigkeit von 200 km/h • Geschwindigkeitsexponent [3] • Quelltyp (Punkt, Linie, Fläche) • Quellkoordinaten (x, y, z) • horizontale Richtcharakteristik (zwischen Monopol und Dipol) • dominierender Frequenzbereich • Angabe des Geräuschtyps
		Schallquellen A2, A3, ...	
Fahrzeug B		Schallquellen B1, B2, ...	

Tabelle 2 Parameter für die Schallquellen der einzelnen Fahrzeuge

2.1 Aktualisierung der Eingangsdaten

Folgende hochliegende Schallquellen wurden in [3] beim ICE 1 und beim ICE 2 als relevant für die A-bewertete Gesamtemission im Geschwindigkeitsbereich von 200 bis 280 km/h eingestuft: **die Fahrmotorlüfter, die Ölkühlerlüfter, die Klimalüfter der Mittelwagen und die Stromabnehmer (Wippe und Fußbereich)**.

Im Falle eines IC-Zuges befinden sich die relevanten hochliegenden Schallquellen ausschließlich im Bereich der Lokomotive. Als solche stellten sich für die BR 120 bei der einen aufgezeichneten Vorbeifahrt mit ca. 190 km/h heraus: **die Fahrmotorlüfter, die Rohre für das Scheibenwischwasser an der Frontseite bzw. ein Bauteil der Scheibenwischer und die Stromabnehmer (Wippe und Fußbereich)**.

Angaben zu den A-bewerteten Pegeln, den Geschwindigkeitsexponenten und den Zugkoordinaten dieser Schallquellen sind [3] zu entnehmen, und zwar aus Tabelle 11 für den ICE 1 bzw. ICE 2 und aus Tabelle 10 für die Lokomotive BR 120. Im letzteren Fall konnten keine Geschwindigkeitsexponenten gemessen werden, so daß diese in Analogie zum ICE 1 gewählt werden müssen. Alle aufgeführten Schallquellen können als punktförmige Quellen idealisiert werden, für deren Richtcharakteristik eine Mischform aus 50% Monopol- und 50% Dipolanteil angenommen wird.

Ferner läßt sich aus den in [3] dargestellten Terzspektren für jede Schallquelle ein dominierender Frequenzbereich ableiten, wobei sich dieser aber nur bezüglich der Luftabsorption bemerkbar macht und daher bei relativ nahen Immissionsorten nahezu unbedeutend ist. In einem Frequenzbereich um 1 kHz, wie er sich für die meisten hochliegenden Schallquellen als vorherrschend herausstellte, hat die Luftabsorption z. B. in einer Entfernung von 50 m eine Pegelminderung von nur 0,2 dB(A) zur Folge [5]. Es sei erwähnt, daß das nach [5] berechnete Raumwinkelmaß K_0 für alle Schallquellen um 2 dB(A) vermindert werden mußte, da es sich im Vergleich mit gemessenen Daten gezeigt hat, daß Bodenreflexionen an den vorliegenden Meßorten so gut wie nicht stattfinden (siehe oben).

3. Verifizierung des Prognosemodells AD-PRO 2.0

Wenn alle Eingangsdaten für das Rechenmodell anhand von Array-Messungen (u. a. in [3]) korrekt bestimmt worden sind, müßte der prognostizierte Pegelverlauf bei einer Zugvorbeifahrt mit dem entsprechenden Einzelmikrofon-Meßergebnis gut übereinstimmen. Zur Überprüfung der Anwendbarkeit des Prognosemodells werden im folgenden solche Vergleiche durchgeführt. Hierzu wird eine Auswahl der in [1, 2] gemessenen Pegelverläufe und Einzahlwerte verwendet, welche durch die Prognoserechnungen mittels AD-PRO 2.0 nachgebildet werden. Es handelt sich hierbei um

- ICE 1-Vorbeifahrten an den Meßorten A und B mit ca. 200, 250 und 280 km/h

bei ungeschliffenen Schienen [1] und

- ICE 1-Vorbeifahrten an den Meßorten A und B mit ca. 200, 250 und 280 km/h,

- ICE 1-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 200 km/h,
- ICE 2-Vorbeifahrten an den Meßorten A und B mit ca. 280 km/h,
- ICE 2-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 200 km/h,
- eine IC-Vorbeifahrt an den Meßorten A und B mit ca. 190 km/h und
- IR-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D mit ca. 160 km/h

bei geschliffenen Schienen [2]. Die Lage der Meßorte A bis D ist in [1] bzw. [2] angegeben.

Für jede dieser Vorbeifahrsituationen, welche analog zu [1, 2] wieder als Analysierklassen bezeichnet werden, erfolgt ein Vergleich zwischen Messung und Prognose für den Fall der ungehinderten Schallausbreitung (OS) wie auch für den Fall mit vorhandener SSW (MS). Bei allen Analysierklassen wird dieser Vergleich für die "diesseitige" Mikrofonposition in 25 m Entfernung von Gleismitte durchgeführt. Darüber hinaus werden in drei exemplarischen Fällen auch Mikrofonabstände von 7,5 und 50 m untersucht, nämlich für ICE 1-Vorbeifahrten an den Meßorten A und B mit ca. 200 und 280 km/h sowie an den Meßorten C und D mit ca. 200 km/h jeweils bei geschliffenen Schienen. Genaue Angaben zu den Mikrofonpositionen enthält die Tabelle 1 sowohl in [1] als auch in [2].

Nicht alle in [1, 2] untersuchten Analysierklassen finden sich in der obigen Auflistung wieder. So macht es keinen Sinn, Vorbeifahrten an den Meßorten C und D bei ungeschliffenen Schienen [1] zu modellieren. Hier lag eine extrem hohe Schienenrauhigkeit vor, so daß die gemessenen Pegel allein das Rollgeräusch widerspiegeln. Ein Vergleich mit Prognoserechnungen würde deshalb keinerlei Aussage bezüglich der hochliegenden Schallquellen ermöglichen.

An den Meßorten A und B konnte sowohl in [1] als auch in [2] jeweils nur eine IC-Vorbeifahrt aufgezeichnet werden. Wegen der ohnehin nur geringen statistischen Aussagefähigkeit wird hiervon nur das Beispiel bei geschliffenen Schienen [2] gezeigt. Bei IC- und EC-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D bei geschliffenen Schienen [2] wichen die Geschwindigkeiten zum Teil deutlich vom Mittelwert ab, was einen graphischen Vergleich mit der Prognose erschwert. Bei den akustisch äquivalenten IR-Vorbeifahrten war dies nicht der Fall, so daß stellvertretend für diese Klasse nur die letztere Zugart betrachtet wird.

3.1 Vergleich mit gemessenen Pegelverläufen

Für jede Analysierklasse sind die gemessenen Pegelverläufe für jeweils drei ausgewählte Vorbeifahrten zusammen mit dem berechneten Pegelverlauf in den Bildern A1 bis A17 dargestellt. Eine Auflistung dieser Analysierklassen enthält Tabelle 3, worin

	Zugart	Meßort	v [km/h]	ΔL_{Rauh} [dB(A)]	graphische Darstellung
unge-schliffene Schienen (siehe [1])	ICE 1 (12 Mittel-wagen)	B (OS)	199,9	+7	Bild A1
		A (MS)	201,3	0	(25 m)
		B (OS)	249,5	+7	Bild A2
		A (MS)	249,2	0	(25 m)
		B (OS)	276,4	+6	Bild A3
		A (MS)	277,3	0	(25 m)
ge-schliffene Schienen (siehe [2])	ICE 1 (12 Mittel-wagen)	B (OS)	199,9	+4	Bild A4 bis A6
		A (MS)	202,0	0	(7,5, 25 und 50 m)
		B (OS)	250,5	0	Bild A7
		A (MS)	251,5	0	(25 m)
		B (OS)	276,0	+1	Bild A8 bis A10
		A (MS)	277,0	0	(7,5, 25 und 50 m)
		D (OS)	198,0	-2	Bild A11 bis A13
		C (MS)	193,8	0	(7,5, 25 und 50 m)
	ICE 2 (9 Mittel-wagen)	B (OS)	276,8	+2	Bild A14
		A (MS)	279,2	+2	(25 m)
		D (OS)	193,9	-2	Bild A15
		C (MS)	194,9	0	(25 m)
	IC (13 Wagen)	B (OS)	190,2	-2	Bild A16
		A (MS)	193,2	-4	(25 m)
	IR (8 Wagen)	D (OS)	156,5	-2	Bild A17
		C (MS)	155,4	0	(25 m)

Tabelle 3 Auflistung der Analysierklassen für einen Vergleich zwischen Prognose und Messung; Angabe von Zugart, Meßort, mittlerer Geschwindigkeit, Schienenzustand (anhand der Größe ΔL_{Rauh}) und Meßentfernung

neben Zugart, Meßort und Meßentfernung auch die über alle Fahrten der jeweiligen Klasse gemittelte Geschwindigkeit eingetragen ist [1, 2]. Es wurden für die Bilder stets solche drei Fahrten ausgewählt, deren Geschwindigkeiten relativ nah am Mittelwert lagen, bei denen die Wagenanzahl identisch war und bei denen sich im Falle des ICE 1 jeweils ein Stromabnehmer auf jedem Triebkopf befand.

Ferner enthält die Tabelle eine als ΔL_{Rauh} bezeichnete Pegeldifferenz, welche die unterschiedlichen Schienenrauhigkeiten bzw. Elastizitäten der Zwischenlagen zum Ausdruck bringt und in der Prognose zum Rollgeräusch hinzuaddiert wird. Als Referenz wurde ein Zustand mit gut geschliffenen Schienen gewählt, der ungefähr dem Grundwert gemäß Schall 03 von 51 dB(A) abzüglich 3 dB(A) entspricht. Die Werte für ΔL_{Rauh} wurden durch Anpassung der Prognose an die gemessenen Pegelverläufe ermittelt. Eine Herleitung dieser Größe aus gemessenen Einzahlwerten ist schwierig, da das Rollgeräusch in Einzelmikrofon-Messungen nicht separat erfaßt wird. Bei ungehinderter Schallausbreitung stellt das Rollgeräusch allenfalls den überwiegenden Anteil im Gesamtgeräusch dar, so daß die Werte ΔL_{Rauh} im Sinne einer Abschätzung mit den in [1, 2] angegebenen Pegeln $L_{\text{m,s,OS,2}}$ für die Meßorte ohne SSW und mit den Differenzen $L_{\text{m,s,OS,2}} - (L_{\text{m,s,OS,4}} - L_{\text{m,s,MS,4}}) - \Delta L_{\text{Roll}}$ für die Meßorte mit SSW verglichen werden können. Es zeigt sich, daß diese örtlichen spezifischen Grundwerte von den in der Prognose angesetzten ΔL_{Rauh} um höchstens 1 dB(A) abweichen, wenn man sie auf den Referenzwert von 48 dB(A) bezieht. Somit sind die gewählten ΔL_{Rauh} realistische Größen, auch wenn sie in einigen Fällen zunächst wenig plausibel erscheinen. So ist z. B. die Beobachtung, daß bei geschliffenen Schienen für den ICE 1 am Meßort B bei 200 km/h ein um 4 dB(A) höheres Rollgeräuschniveau angesetzt werden muß als bei 250 km/h, in [2] meßtechnisch nachgewiesen worden.

➔ Aus den Bildern läßt sich entnehmen, daß in den meisten Fällen ein gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und prognostizierten Pegelverläufen erzielt wird. Die wenigen kritischen Fälle werden später kommentiert.

➔ Zunächst ist die gute Übereinstimmung teilweise auch durch Manipulation entstanden, da das Niveau des Rollgeräuschs an die gemessenen Pegelverläufe angepaßt wurde. Im Bereich der ICE-Mittelwagen bzw. IC-Wagen kann daher eine beliebige Genauigkeit bei der Prognose erreicht werden. Im Bereich der ICE-Triebköpfe bzw. einer Lokomotive ist dies jedoch insbesondere bei vorhandener

SSW aufgrund der dominierenden hochliegenden Schallquellen nicht möglich, und gerade hier werden die gemessenen Pegel meist sehr genau nachgebildet. Ebenso ist hervorzuheben, daß die Übereinstimmung der Kurven in der Regel für alle drei Meßentfernungen gleichartig ausfällt, so daß die Anwendbarkeit des Prognosemodells AD-PRO 2.0 insgesamt bestätigt werden kann.

➔ Bei den Fahrzeugkoordinaten, die vor der Zugspitze bzw. hinter dem Zugende liegen, sind oftmals größere Abweichungen zwischen Messung und Prognose zu erkennen, und zwar zum Teil nach oben bzw. nach unten. In diesen Bereichen sind die dort befindlichen Schallquellen offenbar noch nicht hinreichend genau modelliert, wie z. B. die Abstrahlung der Schienen oder die aerodynamischen Nachlaufquellen. Da die hier gemessenen Pegel aber gegenüber den Maximalwerten relativ gering ausfallen, üben diese Abweichungen auf gemittelte Einzahlwerte keinen nennenswerten Einfluß aus (siehe Abschnitt 3.2).

➔ Bei hohen Geschwindigkeiten, insbesondere bei 280 km/h, sind ebenfalls Abweichungen im Bereich der ICE-Triebköpfe zu erkennen (siehe z. B. Bild A10). Die dortigen Pegelmaxima erscheinen in den gemessenen Pegelverläufen in Fahrtrichtung verschoben, was durch die Prognose nicht nachgebildet wird. Da die konvektive Verstärkung aufgrund der Bewegung der Schallquellen bereits im Prognosemodell enthalten ist, sind diese Abweichungen nur durch eine zusätzliche Richtwirkung der Quellen in Fahrtrichtung zu erklären. Auch in diesem Fall gilt, daß Einzahlwerte von dieser Abweichung nicht betroffen sind.

➔ Größere Differenzen zwischen Messung und Prognose sind an den Meßorten C und D in 25 und 50 m Entfernung von Gleismitte zu beobachten. Im Bereich der Mittelwagen des ICE 1 liegen die berechneten Pegel am Ort C in 25 m etwa 3 dB(A) und in 50 m etwa 5 dB(A) unterhalb der gemessenen Pegel (siehe Bild A12 bzw. A13). Bei Fahrzeugkoordinaten hinter dem Zugende fallen die Abweichungen sogar noch größer aus, wobei deren Ursache in der zu geringen Länge der dortigen SSW liegt [1, 2]. Dieser Effekt würde aber für die Differenzen im Bereich der ICE-Mittelwagen als Begründung nicht ausreichen, so daß wie schon in [2] die Vermutung ausgesprochen werden muß, daß die Wirkung der SSW am Meßort C nicht optimal ist. Als eine mögliche Ursache kommen Reflexionen zwischen Fahrzeug und Wandfläche in Frage.

In Bild A13 ist weiterhin zu erkennen, daß auch am Meßort D ohne SSW in 50 m Entfernung etwa 3 dB(A) zu niedrige Pegel berechnet wurden. Gleichwohl fiel die Prognose an diesem Meßort für Entfernungen von 7,5 und 25 m recht genau aus (siehe Bild A11 und A12). Als mögliche Fehlereinflüsse speziell für das 50 m-Mikrofon sind einerseits Störgeräusche während der Messung durch die nahegelegene Straße zu nennen. Andererseits können die prognostizierten Pegel auch unterschätzt sein: Die Boden- und Meteorologiedämpfung D_{BM} fällt wegen der geringen Höhe über Boden in der Prognose nämlich relativ hoch aus; ihr Einfluß auf den Stunden-Mittelungspegel beträgt etwa 2 dB(A). In der Realität liegt möglicherweise eine geringere Pegelminderung vor.

➔ Ein Vergleich der Zugarten ICE 1 und ICE 2, welcher sich aus den Bildern A9 und A14 bzw. aus den Bildern A12 und A15 ergibt, zeigt eine weitgehende Übereinstimmung hinsichtlich der Genauigkeit der Prognose. Die oben beschriebenen Abweichungen treten für beide Zugarten in gleicher Weise auf. Somit bestätigt sich, daß die für den ICE 1 angesetzten Eingangsdaten für den ICE 2 übernommen werden können. Eine Ausnahme bilden höhere Pegeldifferenzen ΔL_{Rauh} für den ICE 2 an den Meßorten A und B. Erläuterungen hierzu enthält [2].

➔ Bei den akustisch äquivalenten Zugarten IC und IR fällt die Übereinstimmung zwischen Messung und Prognose in Bild A16 gut, in Bild A17 hingegen schlecht aus. Zunächst kann aus Bild A16 der Schluß gezogen werden, daß sowohl hoch- als auch tiefliegende Schallquellen für einen IC-Zug mit der Lokomotive BR 120 exakt formuliert wurden. Da Array-Meßwerte nur für diese Lokomotivbaureihe zur Verfügung stehen, wurden diese auch für die IR-Vorbeifahrten an den Meßorten C und D übernommen.

Die höheren Meßwerte am Ort D in Bild A17 lassen jedoch erkennen, daß die Lokomotive BR 112, welche bei allen drei dargestellten Fahrten eingesetzt wurde, stärkere Geräusche erzeugt als die BR 120. Da diese höheren Pegel vor allem bei freier Schallausbreitung und nur in geringerem Maße bei vorhandener SSW auftreten, muß es sich in erster Linie um tiefliegende Schallquellen handeln, also um eine höhere Emission der Räder oder der Fahrmotoren. Die hohe Pegeldifferenz im Bereich der IR-Mittelwagen am Meßort C läßt sich wie bei den ICE-Vorbeifahrten durch die zu geringe Einfügungsdämpfung der SSW erklären.

Es sei im folgenden kurz auf weitere Parameter hingewiesen, die bei einem Vergleich zwischen gemessenen und prognostizierten Pegelverläufen von Interesse sind. So war z. B. ursprünglich vorgesehen, bei einigen der vermessenen ICE 1 jedes Rad mit seiner individuellen Schallemission zu modellieren. Als Grundlage hierfür sollten frühere Array-Meßwerte dienen [8]. Allerdings hat sich anhand der Meßergebnisse in [1, 2] herausgestellt, daß diese früheren Werte insbesondere für gummigefederte Einringräder nicht mehr gültig sind. Auf eine Prognose mit individuellen Emissionspegeln für die verschiedenen Rad/Absorber-Konfigurationen wurde daher verzichtet.

Bei einigen ICE 1-Vorbeifahrten befanden sich auf jedem Triebkopf zwei Stromabnehmer, und zwar jeweils ein ausgefahrener für Fahrten im Netz der DB AG und ein abgesenkter für Fahrten in der Schweiz. Für diese zusätzlichen Schallquellen wurden in [3] entsprechende Array-Meßwerte ermittelt. Die prognostizierten Stunden-Mittelungspegel erhöhen sich hierdurch um bis zu 0,1 dB(A) bei ungehinderter Schallausbreitung und zwischen 0,1 und 0,7 dB(A) bei vorhandener SSW. Bei solch geringen Pegeldifferenzen wird auf eine detailliertere Untersuchung dieses Parameters verzichtet. Gleichwohl erscheint es sinnvoll, in Kapitel 4 bei der Formulierung der Wirkung einer SSW für die Neufassung der Schall 03 den ICE 1 mit zwei Stromabnehmern pro Triebkopf im Sinne einer "worst-case"-Abschätzung anzunehmen.

Das anfängliche Ziel, bei einigen ICE 1-Vorbeifahrten definierte Betriebszustände der Fahrmotor- und Ölkühlerlüfter einzuhalten, konnte in [1] nur bei zwei Fahrten und in [2] überhaupt nicht realisiert werden. Da auch die Array-Meßwerte für die Lüfter bei unbekannten Betriebszuständen ermittelt wurden [3], ist eine genauere Untersuchung dieses Parameters nicht möglich. Die gute Übereinstimmung zwischen Messung und Prognose im Bereich der ICE-Triebköpfe deutet aber darauf hin, daß die angesetzten Quellstärken realistisch sind.

3.2 Vergleich mit gemessenen Einzahlwerten

Während in Abschnitt 3.1 jeweils nur drei ausgewählte Fahrten pro Analysierklasse für einen Vergleich zwischen Messung und Prognose herangezogen wurden, sollen nun Einzahlwerte betrachtet werden, die auf einer Mittelung über alle Fahrten einer Klasse beruhen und daher eine hohe statistische Aussagekraft besitzen. Als maßgebliche Einzahlwerte, die für die Schall 03 [4] Bedeutung haben, werden im folgenden

nur die Stunden-Mittelungspegel L_h [1] betrachtet. So enthält Tabelle 4 eine Gegenüberstellung dieser gemessenen und berechneten Pegel für alle in Tabelle 3 aufgeführten Analysierklassen. Die gemessenen Stunden-Mittelungspegel wurden aus den entsprechenden Tabellen der Anhänge von [1, 2] entnommen.

Die berechneten Stunden-Mittelungspegel beziehen sich jeweils auf die prognostizierten Pegelverläufe, die in den Bildern A1 bis A17 dieses Berichts dargestellt sind. Hierbei wurde schon von vornherein die mittlere Geschwindigkeit für jede Analysierklasse angenommen. Die mittlere Zuglänge konnte hingegen nicht immer genau nachgebildet werden, da die Wagenanzahl in AD-PRO 2.0 selbstverständlich nur ganzzahlig angegeben werden kann. Ferner geht die Prognose von ICE 1-Triebköpfen mit jeweils nur einem Stromabnehmer aus, während bei einigen Vorbeifahrten auch zwei Stromabnehmer pro Triebkopf vorlagen. Die beiden letztgenannten Effekte können jedoch als vernachlässigbar angesehen werden.

➔ Die Abweichung zwischen den gemessenen und berechneten Stunden-Mittelungspegeln fällt in den meisten Fällen gering aus, nämlich mit Differenzen von weniger als 1 dB(A). **Die Anwendbarkeit des Prognosemodells AD-PRO 2.0 kann somit bestätigt werden.** Ebenso war die im vorigen Abschnitt geäußerte Vermutung zutreffend, daß sich viele der beobachteten Unterschiede zwischen gemessenen und prognostizierten Pegelverläufen auf gemittelte Einzahlwerte, d. h. hier den Stunden-Mittelungspegel kaum auswirken.

Pegeldifferenzen, die mit Werten bis zu 3,7 dB(A) als kritisch einzustufen sind, treten wiederum nur an den Meßorten C und D auf. Im vorigen Abschnitt zeigte sich, daß diese offenbar nicht durch Fehler im Prognosemodell verursacht sind. Vielmehr konnte für jeden dieser Fälle eine plausible, wenn auch nicht nachweisbare Ursache gefunden werden. Die Abweichung von 2,8 dB(A) bei den IR-Vorbeifahrten am Meßort C erweckt einen falschen Eindruck, da sich einerseits der gemessene Stunden-Mittelungspegel auf die vordere Hälfte der Zugvorbeifahrt bezieht [2]. Wenn dies in der Prognose berücksichtigt wird, steigt der berechnete Pegel um 1,1 dB(A) an, so daß nur noch eine Abweichung von 1,7 dB(A) verbleibt. Dieser Wert würde sich abermals verringern, wenn in der Prognose an Stelle der Emissionsdaten der Lokomotive BR 120 die stärkere Abstrahlung der BR 112 berücksichtigt würde.

	Zugart	Meßort	v [km/h]	Entfernung [m]	L_h [dB(A)] gemessen	berechnet	Differenz [dB(A)]
ungeschliffene Schienen	ICE 1	B (OS)	199,9	25	63,7	63,3	-0,4
		A (MS)	201,3	25	48,5	48,7	+0,2
		B (OS)	249,5	25	65,3	65,5	+0,2
		A (MS)	249,2	25	51,8	52,0	+0,2
		B (OS)	276,4	25	65,7	65,7	0
		A (MS)	277,3	25	54,1	53,6	-0,5
geschliffene Schienen	ICE 1	B (OS)	199,9	7,5	66,3	66,1	-0,2
				25	60,3	60,5	+0,2
				50	57,0	55,9	-1,1
		A (MS)	202,0	7,5	50,4	51,7	+1,3
				25	48,7	48,6	-0,1
				50	45,5	44,9	-0,6
		B (OS)	250,5	25	59,8	59,7	-0,1
		A (MS)	251,5	25	51,7	52,0	+0,3
		B (OS)	276,0	7,5	67,2	67,2	0
				25	61,1	61,7	+0,6
				50	57,8	57,1	-0,7
		A (MS)	277,0	7,5	56,1	56,8	+0,7
				25	53,8	53,6	-0,2
				50	50,4	49,8	-0,6
		D (OS)	198,0	7,5	61,6	61,2	-0,4
				25	56,0	55,3	-0,7
				50	53,7	50,0	-3,7
		C (MS)	193,8	7,5	51,8	52,1	+0,3
				25	48,8	47,5	-1,3
				50	46,5	43,1	-3,4
	ICE 2	B (OS)	276,8	25	61,7	61,5	-0,2
		A (MS)	279,2	25	53,8	53,6	-0,2
		D (OS)	193,9	25	55,3	54,2	-1,1
		C (MS)	194,9	25	49,0	47,3	-1,7
	IC	B (OS)	190,2	25	61,3	61,6	+0,3
		A (MS)	193,2	25	50,2	51,0	+0,8
	IR	D (OS)	156,5	25	58,0	57,7	-0,3
		C (MS)	155,4	25	50,4	47,6	-2,8

Tabelle 4 In [1] und [2] gemessene und mittels AD-PRO 2.0 berechnete Stunden-Mittelungspegel für die in Tabelle 3 aufgeführten Analysierklassen und Angabe der Differenzen zwischen diesen beiden Werten

4. Entwurf einer Formulierung bezüglich der Wirkung einer Schallschutzwand für die Neufassung der Schall 03

In diesem Kapitel soll eine korrigierte Formulierung bezüglich der Einfügungsdämpfung einer SSW für die Neufassung der Schall 03 entworfen werden. Die Untersuchungen beschränken sich zunächst auf den ICE 1; im späteren Abschnitt 4.8 werden die gewonnenen Erkenntnisse auf die Zugarten ICE 2, IC, EC und IR übertragen. Da in Kapitel 3 gezeigt wurde, daß das Prognosemodell AD-PRO 2.0 präzise Angaben zur Schallemission dieser Zugarten liefert, können die nach Schall 03 berechneten Pegel somit hieran angepaßt werden, und zwar unter Variation mehrerer Parameter. Für die im folgenden dargestellten Prognoserechnungen mittels AD-PRO 2.0 werden die nachstehenden Vereinbarungen getroffen:

- Es wird ein ICE 1 mit 12 Mittelwagen angenommen; auf jedem Triebkopf befinden sich im Sinne einer "worst case"-Abschätzung zwei Stromabnehmer, d. h. ein ausgefahrener und ein abgesenkter.

- Entsprechend [1, 2] werden drei Meßpositionen seitlich der Trasse betrachtet, nämlich in 7,5 m Entfernung von Gleismitte und 1,2 m Höhe über SO, in 25 m Entfernung und 3,5 m Höhe und in 50 m Entfernung und 5,0 m Höhe.

- Berechnet werden die Stunden-Mittelungspegel bei Vorbeifahrt eines ICE 1 pro Stunde, und zwar jeweils für den Fall der ungehinderten Schallausbreitung und für den Fall einer unendlich langen SSW in einem Abstand von 4,5 m zur Gleismitte mit einer Höhe von 2,0 m über SO. Ebenso wird jeweils die Differenz dieser beiden Pegel angegeben, welche die Einfügungsdämpfung der SSW beschreibt.

- Um den Einfluß der umstrittenen Boden- und Meteorologiedämpfung D_{BM} möglichst gering zu halten, wird für alle drei Meßpositionen eine relativ große Höhe der Schienenoberkanten über Grund von 2,0 m angenommen.

- Die Berechnung erfolgt in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit. Da die Array-Meßwerte im Geschwindigkeitsbereich von 200 bis 280 km/h ermittelt wurden [3], können die Prognosen prinzipiell nur in diesem Bereich erfolgen. Eine Extrapolation auf höhere bzw. niedrigere Geschwindigkeiten ist allerdings dann korrekt,

wenn sich die gemessenen Geschwindigkeitsexponenten α_A [3] in den angrenzenden Geschwindigkeitsbereichen nicht wesentlich ändern. Da dies nicht von vornherein vorausgesetzt werden kann [9], wurden als Grenzen der Auswertung diejenigen Geschwindigkeiten bestimmt, bei denen ein um 1,0 abweichender Geschwindigkeitsexponent einen Fehler von höchstens 1 dB(A) pro Einzelquelle zur Folge hat. Es ergibt sich hieraus ein Geschwindigkeitsbereich von 160 bis 350 km/h für die Prognosen mittels AD-PRO 2.0.

4.1 Aktuell gültige Version der Schall 03

Anhand der getroffenen Vereinbarungen werden die mittels AD-PRO 2.0 prognostizierten Stunden-Mittelungspegel zunächst mit denen gemäß der aktuell gültigen Version der Schall 03 verglichen. Wie schon in [1] wird hierzu ein internes Rechenmodell angewandt, welches die Vorschriften der Schall 03 erfüllt. Für die Berechnung der Stunden-Mittelungspegel nach Schall 03 gelten die oben genannten Vereinbarungen in gleicher Weise. Als weitere Eingangsdaten sind hierbei zu nennen: D_{Fz} = -4 dB(A), D_D = 0 dB(A) und D_l = 10 lg (358 m/100 m) = 5,5 dB(A) für einen ICE 1 mit 12 Mittelwagen.

Wichtig ist die Angabe des schalltechnischen Zustands der Schienenoberflächen, welcher für die Prognoserechnungen mit AD-PRO 2.0 anzusetzen ist. Dieser sollte möglichst genau dem als "durchschnittlich" bezeichneten Schienenzustand entsprechen, der in der Schall 03 anhand des Grundwertes von 51 dB(A) und des Korrekturwerts D_{Fb} von +2 dB(A) für das Betonschwellengleis definiert ist. Darüber hinaus soll jeweils auch ein zweiter Rauhigkeitszustand der Schienen nachgebildet werden, der das "besonders überwachte Betonschwellengleis" mit D_{Fb} = -1 dB(A) repräsentiert. Dies ist sinnvoll, da dieser Wert vermehrt in der Praxis zur Anwendung kommt und gerade in diesem Fall die Wirkung einer SSW erheblich überschätzt werden kann.

Innerhalb der Prognose mittels AD-PRO 2.0 wird der Schienenzustand anhand der in Abschnitt 3.1 erläuterten Korrektur ΔL_{Rauh} festgelegt. Die geeigneten Werte für die beiden betrachteten Rauhigkeitszustände lassen sich am besten im Vergleich mit der aktuell gültigen Version der Schall 03 ermitteln. So ist ein erster Vergleich der beiden Prognoseverfahren in Bild B1 dargestellt. Bei der Berechnung mittels AD-PRO 2.0 wurde die Korrektur ΔL_{Rauh} in fünf Schritten zwischen -2 und +6 dB(A) variiert.

➔ Aus dem oberen Teilbild ergibt sich, daß einem nach Schall 03 "durchschnittlichen" Schienenzustand, d. h. einem D_{Fb} von +2 dB(A) am ehesten ein ΔL_{Rauh} von +4 dB(A) zugeordnet werden kann. Im Falle des "besonders überwachten Gleises", d. h. mit einem D_{Fb} von -1 dB(A), würde ΔL_{Rauh} etwa 0 dB(A) betragen. Des weiteren erkennt man, daß die Berechnung nach Schall 03 in diesen Fällen für Geschwindigkeiten bis 280 km/h eine obere Abschätzung darstellt und somit bis zur Höchstgeschwindigkeit des ICE 1 auf der "sicheren Seite" liegt. Für alle im folgenden gezeigten Prognoserechnungen mit AD-PRO 2.0 reicht es also aus, nur noch die Kurven für diese beiden Rauhigkeitszustände der Schienen anzugeben, d. h. für die Werte ΔL_{Rauh} von +4 und 0 dB(A).

➔ Im oberen Teilbild ist außerdem zu erkennen, daß die Berechnung nach Schall 03 dadurch einen Fehler produziert, daß die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Schallemission des ICE 1 zu niedrig angesetzt ist, so daß die Pegel zu höheren Geschwindigkeiten hin schwächer ansteigen als die mit AD-PRO 2.0 prognostizierten Werte. Ursache hierfür ist der zunehmende Anteil aerodynamischer Geräuschquellen, welcher stärker mit der Geschwindigkeit ansteigt als der Anteil des Roll- und des sogenannten Antriebsgeräuschs. In der bisherigen Version der Schall 03 sind aerodynamische Geräusche jedoch nicht modelliert. Es besteht daher schon seit langem der Wunsch, in einer zukünftigen Version der Schall 03 eine zweite Geräuschquelle für den ICE 1 mit einer höheren Geschwindigkeitsabhängigkeit einzuführen, um die tatsächliche Schallemission für alle Geschwindigkeiten richtig nachzubilden.

➔ An dieser Stelle muß die Frage gestellt werden, ob die mit D_{Fb} = +2 dB(A) bezeichnete Kurve überhaupt bei allen Geschwindigkeiten auf der "sicheren Seite" liegt, oder ob sie die tatsächlich abgestrahlten Pegel möglicherweise nur bei niedrigen Geschwindigkeiten richtig wiedergibt. In diesem Fall würden die realen Pegel bei hohen Geschwindigkeiten unterschätzt werden. Als Anhaltspunkt für diese Annahme ist zu nennen, daß von der DB AG zwischenzeitlich neue Pegeldifferenzen für den ICE 1, nämlich D_{Fz} = -3 dB(A) [10] und D_{Ae} = +1 dB(A) für Geschwindigkeiten oberhalb von 250 km/h [11] eingeführt worden sind. Als Konsequenz ergäbe sich, daß einem nach Schall 03 "durchschnittlichen" Schienenzustand statt eines ΔL_{Rauh} von +4 dB(A) nun ein Wert von +5 oder +6 dB(A) gleichzusetzen wäre.

Andererseits gilt für viele der in [1, 2] gemessenen Stunden-Mittelungspegel, daß sie weitgehend mit der durch ΔL_{Rauh} = -2 dB(A) charakterisierten Kurve übereinstimmen. Dies gilt insbesondere für die jenseitige 25 m-Mikrofonposition an den Meßorten A und C, wie es den Anhängen von [1, 2] entnommen werden kann. Die Pegel für das "besonders überwachte Gleis" werden somit durch den ICE 1 um mehrere dB(A) unterboten, obwohl die Schienenzustände am Meßort A in [1] bzw. an den Meßorten A und C in [2] nicht einmal als optimal bezeichnet wurden. So tritt hier der umgekehrte Fall ein, daß die nach Schall 03 berechneten Pegel eine Überschätzung der Schallimmission beim ICE 1 darstellen. Aufgrund dieser gegenläufigen Hinweise ergibt sich, daß die Werte ΔL_{Rauh} von +4 bzw. 0 dB(A) von der Realität der beiden diskutierten Schienenzustände offenbar nicht weit entfernt sind und daher im folgenden beibehalten werden können.

➔ Aus dem unteren Teilbild kann abgelesen werden, daß die Wirkung einer SSW bei ICE 1-Vorbeifahrten nach Schall 03 in der Regel höher berechnet wird als sie in der Realität ausfällt. Sie beträgt für den vorliegenden Immissionsort unabhängig von der Geschwindigkeit nämlich nach Schall 03 10,5 dB(A), während die tatsächliche Pegelminderung zu hohen Geschwindigkeiten hin stetig abfällt und z. B. bei 280 km/h abhängig vom Schienenzustand zwischen 6 und 10 dB(A) liegt. Die in [1, 2] gemessenen Einfügungsdämpfungen betrugen für den Meßort A etwa 7,5 dB(A) bei 200 km/h und zwischen 5,9 und 6,5 dB(A) bei 280 km/h, so daß sie sich mit den prognostizierten Werten decken (für ΔL_{Rauh} = -2 dB(A)) und wiederum auf den sehr guten Schienenzustand an diesem Meßort hinweisen.

Beim "durchschnittlichen", mit ΔL_{Rauh} = +4 dB(A) bezeichneten Schienenzustand fällt die Überschätzung durch die Schall 03 hingegen wesentlich geringer aus; aus dem mittleren Teilbild ergibt sich sogar, daß die Stunden-Mittelungspegel unterhalb von etwa 250 km/h noch auf der "sicheren Seite" liegen. Somit produziert die aktuelle Version der Schall 03 bei vorhandener SSW für den "durchschnittlichen" Schienenzustand einen eher geringen Fehler. Da jedoch im Falle des "besonders überwachten Gleises" bereits ab ca. 180 km/h deutlich unterschätzte Immissionspegel berechnet werden und dieser Fehler bei Geschwindigkeiten um 300 km/h auf ca. 5 dB(A) anwächst, erscheint eine Überarbeitung der Schall 03 hinsichtlich der Wirkung einer SSW unbedingt erforderlich. Hierzu soll in den kommenden Abschnitten ein Vorschlag unterbreitet werden.

Zunächst wird aber noch die in Bild B1 gezeigte Gegenüberstellung der beiden Prognoseverfahren für die Meßentfernungen 7,5 und 25 m ergänzt. In den Bildern B2 und B3 sind die entsprechenden Ergebnisse dargestellt.

➔ Die im Zusammenhang mit Bild B1 gemachten Aussagen gelten auch für die hier betrachteten Mikrofonpositionen; qualitativ neue Erkenntnisse ergeben sich nicht.

4.2 Korrigierte Version der Schall 03 (Variante A)

Die Korrektur der Wandwirkung beim ICE 1 für die Schall 03 wird in mehreren Schritten vorgenommen. Die einfachste und effektivste Modifizierung besteht darin, eine zweite Schallquelle einzuführen, die die aerodynamische Geräuschkomponente repräsentiert; und zwar mit einem höher gelegenen Emissionsort als dem der mechanischen Komponente. Da die Abstrahlung der aerodynamischen Schallquellen stärker mit der Geschwindigkeit ansteigt als bei den mechanischen, rückt auf diese Weise auch der Emissionsort des Gesamtgeräuschs mit zunehmender Geschwindigkeit nach oben, wodurch sich die Schirmwirkung einer SSW entsprechend verringert. Es sei darauf hingewiesen, daß zwei separate Schallquellen - jedoch mit gleicher Höhenkoordinate - in einer anderen Richtlinie [12] bereits angewandt werden.

Die folgende Tabelle 5 enthält alle relevanten Angaben zu den zwei Schallquellen, nämlich jeweils den Grundwert, den Geschwindigkeitsexponenten α_A und die Höhe des Emissionsorts über SO. Die fahrzeugseitige Pegeldifferenz D_{Fz} ist zudem getrennt für die mechanische und aerodynamische Geräuschkomponente angegeben.

Geräuschkomponente	Grundwert [dB(A)]	D_{Fz} [dB(A)]	α_A	Höhe des Emissionsorts über SO [m]
mechanisch	51	-5	2,0	0
aerodynamisch	28	0	5,0	4,5

Tabelle 5 Angaben zu den Geräuschkomponenten des ICE 1 für die **korrigierte Version der Schall 03 (Variante A)**

Der Geschwindigkeitsexponent α_A geht in die Pegeldifferenz D_v jeweils wie folgt ein:

$$D_v = \alpha_A \cdot 10 \lg (v/100 \text{ km/h}) \text{ dB(A)}. \quad (1)$$

Da der Anstieg der Schallemission (mit gleichzeitiger kontinuierlicher Zunahme des Gradienten) zu höheren Geschwindigkeiten durch die aerodynamische Geräuschkomponente bewirkt wird, mußte in Tabelle 5 der mechanische Geräuschanteil anhand der Pegeldifferenz $D_{Fz.me}$ um 1 dB(A) vermindert werden. Für die aerodynamische Quelle wurde eine Höhe des Emissionsorts von 4,5 m über SO gewählt, welche sich für die hochliegenden Schallquellen ungefähr als Mittelwert ergibt (siehe Abschnitt 4.6). Ebenso stellt der für diese Quelle gewählte Geschwindigkeitsexponent von 5,0 einen Mittelwert aus den Angaben in [3] dar. Alle weiteren Rechenschritte bleiben innerhalb der Schall 03 unverändert und sind für beide Geräuschkomponenten getrennt durchzuführen. Die energetische Addition des mechanischen und aerodynamischen Anteils erfolgt wie in [12] erst nach der Berechnung der einzelnen Beurteilungspegel.

Analog zu Bild B1 sind die neu berechneten Pegel in Bild B4 den mittels AD-PRO 2.0 prognostizierten Werten gegenübergestellt. Da es sich bei Variante A um einen Zwischenschritt handelt, wird zunächst nur die Meßentfernung in 25 m betrachtet.

➔ Das Ziel der korrigierten Version der Schall 03 besteht darin, die prognostizierten Stunden-Mittelungspegel möglichst gut nachzubilden. Hierbei darf es bei keiner Geschwindigkeit zu einer Unterschreitung kommen. Dieses Ziel wird bei freier Schallausbreitung auch gut erreicht. Im Falle des "durchschnittlichen" Schienenzustands liegen die beiden Kurven sogar praktisch übereinander.

➔ Bei vorhandener SSW liegen die mittels der korrigierten Version der Schall 03 (Variante A) berechneten Pegel zwar auf der "sicheren Seite", sie fallen jedoch deutlich zu hoch aus. Die Überschätzung beträgt bis zu 3,5 dB(A) bei 350 km/h; die Einfügungsdämpfung wird hierdurch in gleichem Maße zu gering berechnet. Ursache hierfür ist, daß sich nicht alle aerodynamischen Schallquellen des ICE 1 an einer hochliegenden Position befinden. Insbesondere werden in den Bereichen der Drehgestelle aerodynamische Geräuschanteile erzeugt, die wegen ihrer Ausdehnung über die gesamte Zuglänge einen ähnlich großen Anteil im Gesamtgeräusch aufweisen wie die hochliegenden aerodynamischen Quellen. Da diese Geräuschquellen durch die SSW abgeschirmt werden, fällt die Gesamtwirkung der SSW höher aus als in Bild B4 dargestellt.

Eine erste Möglichkeit, dieses Problem zu umgehen, besteht darin, die Höhe des Emissionsorts der aerodynamischen Geräuschkomponente so zu wählen, daß die Gesamtwirkung der SSW richtig nachgebildet wird. Es hat sich jedoch in einer früheren Studie [13] gezeigt, daß dieses bei Variation einzelner Parameter, insbesondere der Höhe der SSW, zu erheblichen Ungenauigkeiten führen kann.

4.3 Korrigierte Version der Schall 03 (Variante B)

Als sinnvollere Alternative bietet sich an, eine dritte Schallquelle einzuführen. Diese würde die Geschwindigkeitsabhängigkeit einer aerodynamischen Schallquelle aufweisen, und ihr Emissionsort auf der Höhe von SO angesetzt werden. Da dies die Realität recht gut wiedergibt, sind entsprechend genaue Ergebnisse zu erwarten. Eine weitere Anpassung an die Gegebenheiten besteht darin, die hochliegende aerodynamische Schallquelle unabhängig von der Fahrzeuglänge zu definieren. Dies entspricht der Tatsache, daß die wesentlichen zugehörigen Einzelquellen nur auf den Triebköpfen des ICE 1 zu finden sind und daher nicht von der Anzahl der Mittelwagen abhängen. Eine genauere Darstellung der Abhängigkeit von der Fahrzeuglänge findet sich in Abschnitt 4.7. Die genannten Maßnahmen führen zu Kennwerten für die drei Einzelquellen, wie sie in Tabelle 6 aufgelistet sind. Die Ergebnisse der mit diesen Werten durchgeführten Prognosen zeigt Bild B5.

Geräuschkomponente	Grundwert [dB(A)]	D_{Fz} [dB(A)]	α_A	Höhe des Emissionsorts über SO [m]
mechanisch	51	-5	2,0	0
aerodynamisch (tief)	25	0	5,0	0
aerodynamisch (hoch)	30[1)]	0	5,0	4,5

[1)] Korrekturterm D_I entfällt bei dieser Geräuschkomponente

Tabelle 6 Angaben zu den Geräuschkomponenten des ICE 1 für die **korrigierte Version der Schall 03 (Variante B)**

➔ Während sich die mit Variante B berechneten Stunden-Mittelungspegel bei ungehinderter Schallausbreitung gegenüber Bild B4 praktisch nicht geändert haben, wird bei vorhandener SSW nun eine verbesserte Annäherung an die mittels

AD-PRO 2.0 prognostizierten Werte erreicht. So liegen die durch die korrigierte Version der Schall 03 vorhergesagten Pegel bei 350 km/h nur noch ca. 1 dB(A) oberhalb der Prognose mittels AD-PRO 2.0.

Es verbleibt jedoch eine größere Überschätzung der Stunden-Mittelungspegel bei vorhandener SSW durch die modifizierte Schall 03 bei niedrigen Geschwindigkeiten; bei 160 km/h beträgt diese bis zu 2,5 dB(A). Als Ursache wird vermutet, daß die tatsächliche Einfügungsdämpfung einer SSW bezüglich des Rollgeräuschs eines ICE 1 größer ist als in Schall 03 angesetzt. Dort wurde nämlich die Formel für die "Pegeldifferenz eines Schallschirms" so erstellt, daß die Frequenzabhängigkeit der Abschirmung pauschal im Quotienten $C_2/\lambda = 60$ zusammengefaßt wird [6]:

$$D_{e,k} = -10 \lg (3 + 60 \cdot z_k \cdot K_{w,k}) - D_{BM,k} \text{ dB(A)} \qquad (2)$$

In [14] wird jedoch ausgeführt, daß sich dieser Wert in erster Linie am tieffrequenteren Emissionsspektrum bei einer Güterzug-Vorbeifahrt orientiert. Da die Spektren bei ICE-Vorbeifahrten in der Regel höherfrequenter sind, kann auch ein größerer Wert als 60 für C_2/λ gewählt werden. Dies gilt in gleichem Maße auch für den Fall einer hochabsorbierenden SSW [14].

4.4 Korrigierte Version der Schall 03 (Variante C)

Entsprechend den Anmerkungen im vorigen Abschnitt wird in einem dritten Schritt die Formel zur Berechnung der "Pegeldifferenz eines Schallschirms" (2) modifiziert, und zwar anhand einer Verdoppelung des Quotienten C_2/λ:

$$D_{e,k,me} = -10 \lg (3 + 120 \cdot z_{k,me} \cdot K_{w,k,me}) - D_{BM,k,me} \text{ dB(A)}, \qquad (3)$$

wobei (3) nur für Hochgeschwindigkeitszüge wie den ICE 1 benutzt werden darf. Der Index "me" weist außerdem darauf hin, daß diese Gleichung nur auf die mechanische Geräuschkomponente anzuwenden ist. Für die beiden aerodynamischen Schallquellen bleibt die Vorschrift (2) bestehen. Ansonsten gelten weiterhin die Angaben zu den drei Schallquellen in Tabelle 6. Die so erhältlichen Ergebnisse für die Meßentfernung in 25 m sind in Bild B6 dargestellt.

➔ Nach diesem dritten Schritt wird sowohl ohne und mit SSW eine sehr gute Annäherung an die Prognose mit AD-PRO 2.0 erreicht, und zwar im gesamten betrachteten Geschwindigkeitsbereich. Für das "besonders überwachte Gleis" wird die Einfügungsdämpfung zwar um etwa 1 dB(A) überschätzt, doch liegen die nach Schall 03 in der Variante C berechneten Pegel weder im oberen noch im mittleren Teilbild unterhalb der mittels AD-PRO 2.0 prognostizierten Werte.

Die Genauigkeit der letztgenannten Variante C einer korrigierten Schall 03 wird im folgenden auch für die Meßpositionen in 7,5 und 50 m Entfernung überprüft; in den Bildern B7 und B8 sind die prognostizierten Pegel gegenübergestellt.

➔ Auch für diese Immissionsorte zeigt sich eine ausreichende Genauigkeit. Die Pegel liegen größtenteils auf der "sicheren Seite". Eine geringe Unterschreitung der mittels AD-PRO 2.0 berechneten Pegel durch die Schall 03 in der Variante C wird nur für die Mikrofonposition in 50 m Entfernung bei ungehinderter Schallausbreitung beobachtet. Folglich ist die korrigierte Version der Schall 03 richtig formuliert, und zwar unabhängig von der Wahl des Immissionsorts. Somit kann auf eine weitere Untersuchung dieses Parameters verzichtet werden; alle weiteren Betrachtungen beziehen sich daher nur noch auf die Meßentfernung in 25 m.

4.5 Erweiterung für niedrige Geschwindigkeiten (Variante D)

Bei den bisherigen Modifizierungen wurde die Tatsache nicht berücksichtigt, daß die Geschwindigkeitsexponenten für die Lüfterquellen in [3] nur im Geschwindigkeitsbereich von 200 bis 280 km/h bestimmt wurden. Es besteht aber die berechtigte Annahme, daß diese Exponenten für niedrigere Geschwindigkeiten weitaus kleiner ausfallen. So wurde in [3] darauf hingewiesen, daß die Emission der Fahrmotor-, Ölkühler- und Klimalüfter in einem Geschwindigkeitsbereich von 0 bis ca. 200 km/h größtenteils von den Ventilatoren selbst erzeugt wird und daher eine sehr geringe Geschwindigkeitsabhängigkeit aufweist. Ein Vergleich mit Meßwerten aus Standversuchen der DB AG zeigte sogar, daß sich die bei ca. 200 km/h abgestrahlten Pegel von den im Standbetrieb gemessenen Pegeln nur geringfügig unterscheiden [3]. Oberhalb von ca. 200 km/h kommt dann allerdings eine geschwindigkeitsabhängige, von den Lüfterjalousien verursachte aerodynamische Komponente hinzu, welche schließlich die in [3] gemessenen Geschwindigkeitsexponenten bis zu 5,5 zur Folge hat.

Um die Schallemission des ICE 1 auch bei niedrigen Geschwindigkeiten mittels AD-PRO 2.0 richtig zu modellieren, wird daher in diesem Abschnitt eine gesonderte Berechnung für Geschwindigkeiten von 50 bis 200 km/h durchgeführt. Hierzu werden die von den Fahrmotor-, Ölkühler- und Klimalüftern abgestrahlten Pegel für Geschwindigkeiten unterhalb von 200 km/h im Sinne einer oberen Abschätzung nicht mehr verringert; d. h., deren Geschwindigkeitsexponent wird gleich Null gesetzt.

Eine Ausnahme bilden diejenigen Schallquellen, die in [3] bei 200 km/h auf dem vorderen Triebkopf des ICE 1 höhere Pegel aufwiesen als auf dem hinteren Triebkopf. Da die Gleichheit der "internen" Ventilatorgeräusche auf beiden Triebköpfen vorausgesetzt werden kann, entstehen diese Pegelunterschiede offensichtlich durch verschiedene Zuströmbedingungen und die nicht gleichartige Umströmung der Lüfterjalousien. Die Pegel solcher Quellen werden daher auf dem vorlaufenden Triebkopf unterhalb von 200 km/h nicht konstant gehalten, sondern dem Niveau der jeweils gleichartigen Quellen auf dem hinteren Triebkopf allmählich angeglichen, bis sie bei 50 km/h identisch sind.

Die entsprechenden Ergebnisse finden sich in der gewohnten Form in Bild B9. Die mit AD-PRO 2.0 berechneten Pegel wurden dabei oberhalb von 200 km/h unverändert übernommen. Die nach Schall 03 berechneten Pegel beziehen sich im gesamten dargestellten Geschwindigkeitsbereich auf die Variante C (siehe Abschnitt 4.4).

➔ Der unstetige Verlauf bei den mit AD-PRO 2.0 berechneten Kurven ergibt sich aus dem Wechsel der Geschwindigkeitsexponenten für die Lüfter bei 200 km/h.

➔ Es ist sehr deutlich zu erkennen, daß die Schallemission des ICE 1 bei niedrigen Geschwindigkeiten durch Variante C einer korrigierten Version der Schall 03 bei vorhandener SSW unterschätzt wird. Selbst bei ungehinderter Schallausbreitung werden die Pegel unterhalb von etwa 100 km/h zu niedrig berechnet. Verursacht wird dies durch die bislang nicht modellierte Schallemission der Lüfter bei kleinen und mittleren Geschwindigkeiten.

➔ Dies betrifft im übrigen auch die aktuell gültige Version der Schall 03, welche im Vergleich mit Variante C bei niedrigen Geschwindigkeiten nur um 1 dB(A) höhere Pegel prognostiziert.

Wie schon in den beiden vorigen Abschnitten liegt es als Abhilfe nahe, eine weitere Schallquelle einzuführen, deren Geschwindigkeitsexponent auf Null gesetzt wird und deren Quellhöhe 3,5 m über SO beträgt. Auch hier kann wie schon in Abschnitt 4.3 die Abhängigkeit von der Fahrzeuglänge entfallen. Tabelle 7 faßt die zugehörigen Kennwerte der Variante D zusammen. Für die drei bisherigen Geräuschkomponenten gelten weiterhin die Angaben von Variante C.

Geräuschkomponente	Grundwert [dB(A)]	D_{Fz} [dB(A)]	α_A	Höhe des Emissionsorts über SO [m]
Ventilatorgeräusch	48[1)]	0	0	3,5
mechanisch	51	-5	2,0	0
aerodynamisch (tief)	25	0	5,0	0
aerodynamisch (hoch)	30[1)]	0	5,0	4,5

[1)] Korrekturterm D_I entfällt bei diesen Geräuschkomponenten

Tabelle 7 Angaben zu den Geräuschkomponenten des ICE 1 für die **korrigierte Version der Schall 03 (Variante D)**

Die mit Variante D berechneten Pegel sind in Bild B10 den mittels AD-PRO 2.0 prognostizierten Werten gegenübergestellt.

➔ Durch die Einführung der vierten Schallquelle liegen die mit der korrigierten Version der Schall 03 (Variante D) berechneten Pegel nun im gesamten dargestellten Geschwindigkeitsbereich auf der "sicheren Seite". Da die Pegel zum Teil um mehrere dB(A) überschätzt werden, stellt Variante D allerdings noch keine optimale Approximation an die mit AD-PRO 2.0 prognostizierten Kurven dar.

Es sei darauf hingewiesen, daß auch die mit AD-PRO 2.0 prognostizierten Pegel nur eine Abschätzung darstellen, da zuverlässige Array-Meßergebnisse für die Lüfter bei niedrigen Geschwindigkeiten nicht zur Verfügung stehen. Somit dient Variante D bzw. Bild B10 nur der Anschauung; genauere Aussagen sind im Rahmen dieses Berichts nicht möglich. Die folgenden Abschnitte beziehen sich daher weiterhin auf Variante C. Eine Untersuchung der Schallemission des ICE 1 bei niedrigen Geschwindigkeiten wird nicht weiter verfolgt.

4.6 Variation der Geometrie der Schallschutzwand

Die Anwendbarkeit der korrigierten Version der Schall 03, Variante C soll in den folgenden zwei Abschnitten durch die Variation weiterer Parameter bestätigt werden. Hierbei bietet es sich an, die geometrische Anordnung der SSW zu verändern.

Zunächst wird die Höhe der SSW zwischen 1,5 und 4,5 m über SO variiert, und zwar sowohl in der Prognoserechnung mittels AD-PRO 2.0 als auch in der korrigierten Version der Schall 03, Variante C. Der Wandabstand von Gleismitte verbleibt jeweils bei 4,5 m. Die Berechnungen erfolgen für zwei ausgewählte Geschwindigkeiten, nämlich 200 und 280 km/h. Da sich die Pegel nur bei vorhandener SSW ändern, werden in den Bildern B11 und B12 nur die Stunden-Mittelungspegel mit SSW sowie die Einfügungsdämpfungen gezeigt.

➔ Die mit Variante C berechneten Pegel mit SSW liegen bei beiden Geschwindigkeiten im wesentlichen auf der "sicheren Seite". Eine Unterschätzung um etwa 1 dB(A) ergibt sich lediglich für SSW-Höhen über 4,0 m bei 200 km/h für das "besonders überwachte Gleis"; allerdings kommen solche Höhen in der Praxis nicht häufig zur Anwendung. Da in Variante C alle hochliegenden Schallquellen bei einer einzigen Quellhöhe, nämlich 4,5 m zusammengefaßt sind, kann die Wirkung der SSW nicht für alle Höhen der SSW exakt nachgebildet werden. So ergeben sich für SSW-Höhen zwischen 3,5 und 4,0 m Überschätzungen bis zu etwa 3 dB(A). Es sei erwähnt, daß diese Abweichung bei der Wahl einer anderen Höhe für die hochliegende aerodynamische Geräuschkomponente noch größer ausfallen würde; und zwar zum Teil auch in Form von erheblichen Unterschreitungen [13]. Die Wahl einer Höhe von 4,5 m über SO für die hochliegende aerodynamische Quelle kann daher als Optimum angesehen werden.

Als weiterer Parameter wird in den Bildern B13 und B14 der Abstand der SSW von Gleismitte zwischen 3 und 5 m variiert; die Höhe der SSW verbleibt in diesem Fall bei 2,0 m über SO. Ansonsten entspricht die Darstellung den Bildern B11 und B12 bis auf den verkleinerten Pegelbereich der Ordinate.

➔ Auch in diesen Bildern ist eine gute Übereinstimmung der beiden Prognoseverfahren zu beobachten; die Abweichungen betragen höchstens 1 dB(A).

4.7 Variation der Fahrzeuglänge

Als letzter Parameter wird die Anzahl der Mittelwagen des ICE 1 verändert, und zwar zwischen 8 und 14. Die Bilder B15 und B16 zeigen die entsprechenden graphischen Darstellungen. Im Unterschied zu den Bildern B11 bis B14 ist die Situation ohne SSW hierin wieder enthalten.

➔ Auch in diesem Fall liefert die korrigierte Version der Schall 03, Variante C eine ausreichende Genauigkeit mit einer Abweichung von höchstens 1 dB(A). Es ist deutlich zu erkennen, daß die Stunden-Mittelungspegel bei vorhandener SSW, welche vorwiegend durch die hochliegenden Schallquellen geprägt sind, weitaus weniger von der Fahrzeuglänge abhängen als bei Schallausbreitung ohne SSW. Hierdurch bestätigt sich die Annahme in Abschnitt 4.3, daß die hochliegende aerodynamische Geräuschkomponente nur in geringem Maße von der Fahrzeuglänge abhängt, so daß die Pegeldifferenz D_l bei dieser Schallquelle entfallen kann. Strenggenommen besteht eine geringe Abhängigkeit von der Fahrzeuglänge durch die sich ändernde Anzahl der Klimalüfter der Mittelwagen; ebenso würden bei sehr kurzen Zügen die Unterschiede in den abgestrahlten Pegeln der hochliegenden Schallquellen zwischen dem vor- und nachlaufenden Triebkopf geringer ausfallen. Diese beiden Effekte werden jedoch als vernachlässigbar angesehen, zumal die Anzahl der Mittelwagen des ICE 1 im fahrplanmäßigen Betrieb selten kleiner als 10 oder größer als 12 ist (siehe [1, 2]).

4.8 Übertragung auf ICE 2-, IC-, EC- und IR-Züge

Die in den vorigen Abschnitten erstellten Korrekturvarianten für die Schall 03 sind zunächst nur für den ICE 1 gültig; deren Übertragung auf andere Zugarten bedarf der individuellen Überprüfung. Bezüglich des ICE 2 wurde in [3] festgestellt, daß dieser hinsichtlich der hochliegenden Schallquellen als akustisch gleichwertig mit dem ICE 1 anzusehen ist. Die in Variante C angesetzten zwei zusätzlichen aerodynamischen Schallquellen können für diese Zugart also unverändert übernommen werden. Die Anzahl der Wagen beträgt beim ICE 2 pro Halbzug sieben, nämlich sechs Mittelwagen und der akustisch gesehen einem Mittelwagen gleichende Steuerwagen. Der Vollzug besteht folglich aus 14 (Mittel)Wagen. Somit liegt auch die Fahrzeuglänge des ICE 2 innerhalb des im vorigen Abschnitt verifizierten Bereichs.

Der einzige Unterschied bezüglich der Schallemission von ICE 1 und ICE 2 besteht in der in [2] dokumentierten Abweichung des Rollgeräuschs, da die Räder des ICE 2 bei bestimmten Kombinationen von Schienenrauhigkeit und Oberbau zu einer erhöhten Schallemission tendieren. Als Konsequenz müßte die Pegeldifferenz D_{Fz} der mechanischen Geräuschkomponente überprüft werden, was jedoch nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchung ist.

Die Wirkung einer SSW bei IC-, EC- oder IR-Vorbeifahrten ist zur Anschauung in Bild B17 skizziert, und zwar in der gewohnten vergleichenden Form für die mittels AD-PRO 2.0 prognostizierten Pegel und die nach Schall 03 berechneten Werte. Beide Prognosen beziehen sich auf Vorbeifahrten eines Zuges mit acht scheibengebremsten Wagen im Geschwindigkeitsbereich von 160 bis 200 km/h. Für die Rechnung mittels AD-PRO 2.0 wurden die bereits in Kapitel 3 verwendeten Eingangsdaten für die Lokomotive BR 120 verwendet; die angesetzten Werte für ΔL_{Rauh} betragen weiterhin +4 und 0 dB(A). Es sei nochmals darauf hingewiesen, daß die Modellierung der hochliegenden Schallquellen aufgrund der geringen statistischen Aussagekraft und der spärlichen Kenntnis aus [3] über die Geschwindigkeitsabhängigkeit nur als Abschätzung anzusehen ist. Die Rechnung mit Schall 03 erfolgte anhand der aktuell gültigen Version; als Eingangsdaten wurden dabei benutzt: D_{Fz} = 0 dB(A), D_D = 1,3 dB(A) und D_l = 10 lg (231 m/100 m) = 3,6 dB(A) für einen IC-Zug mit klotzgebremster Lokomotive und acht scheibengebremsten Wagen.

➔ Ohne SSW liegen die nach Schall 03 berechneten Immissionspegel zwischen 0,5 und 1,5 dB(A) unterhalb der Prognose mittels AD-PRO 2.0. Die Werte für ΔL_{Rauh} müßten in AD-PRO 2.0 also für IC-Vorbeifahrten etwas niedriger gewählt werden, um einen Schall 03-gemäßen Schienenzustand anzunähern.

➔ Bereits ohne Absenkung des Rollgeräuschniveaus ergibt sich aus dem mittleren Teilbild für den "durchschnittlichen" Schienenzustand, daß die nach Schall 03 berechneten Stunden-Mittelungspegel trotz der erwähnten Unterschätzung bei freier Schallausbreitung im Fall mit vorhandener SSW höher ausfallen als prognostiziert. Somit ist die SSW-Wirkung bei einem IC-Zug in der Realität wesentlich höher als in Schall 03 modelliert. Die wenigen hochliegenden Schallquellen der Lokomotive BR 120 geben somit keinen Anlaß, die aktuelle Version der Schall 03 zu verändern bzw. eine zweite, hochliegende Schallquelle einzuführen.

Lediglich für Geschwindigkeiten oberhalb von etwa 180 km/h ist im Falle des "besonders überwachten Gleises" eine Unterschätzung der Einfügungsdämpfung zu beobachten. Hieraus kann aber noch kein Änderungsbedarf für die Schall 03 abgeleitet werden, da nur die hochliegenden Schallquellen der BR 120 zur Prognose herangezogen wurden und Array-Meßwerte für andere Lokomotiv-Baureihen nicht vorliegen. Aus dem Hinweis in Abschnitt 3.1 bzw. in [2], daß hochliegende Schallquellen bei den Baureihen 103, 111 und 112 bei ca. 160 km/h relativ unbedeutend sind, kann allenfalls vermutet werden, daß die aktuelle Version der Schall 03 die Wirkung einer SSW bei Zügen mit scheibengebremsten Wagen auch bei diesem Schienenzustand im Mittel noch richtig wiedergibt.

Es sei kurz angemerkt, daß die in [1, 2] gemessenen Einfügungsdämpfungen für IC-, EC- und IR-Züge zum Teil erheblich geringer ausfielen als mit Schall 03 berechnet. Doch auch hieraus ergibt sich kein zwingender Änderungsbedarf für die Schall 03, da die Meßergebnisse zum Teil großen statistischen Unsicherheiten unterlagen und die SSW am Meßort C nicht den akustischen Anforderungen genügte, um nach Schall 03 rechnen zu können. Bei klotzgebremsten Zügen wurde hingegen schon in [1] bzw. [2] bestätigt, daß die bisherige Version der Schall 03 für die Modellierung der SSW-Wirkung eine ausreichende Genauigkeit liefert, da der Anteil hochliegender Schallquellen bezogen auf das Gesamtgeräusch in diesem Falle vernachlässigbar ist.

5. Zusammenfassung

Aus den Untersuchungen des vorliegenden Arbeitspakets 3 sowie den Berichten [1, 2, 3] ergibt sich, daß die Wirkung einer SSW in der aktuell gültigen Richtlinie Schall 03 im Falle des ICE 1 und ICE 2 überschätzt wird, während bei allen anderen untersuchten Zugarten (IC-, EC-, IR-, RE- und Güterzüge) keine Änderung der bisherigen Version der Schall 03 erforderlich ist. Für eine zukünftige Version der Schall 03 wurde für den ICE 1 eine korrigierte Vorgehensweise zur Berechnung der Abschirmwirkung einer SSW vorgeschlagen, und zwar anhand einer Parameterstudie mit dem Rechenmodell AD-PRO 2.0. Als Eingangsdaten für die Prognoserechnungen dienten u. a. Ergebnisse der Array-Messungen aus [3] (siehe Kapitel 2). Die Anwendbarkeit von AD-PRO 2.0 konnte durch den Vergleich mit Meßergebnissen aus [1, 2] bestätigt werden (siehe Kapitel 3).

Der Grundgedanke zur korrigierten Berechnung der Einfügungsdämpfung einer SSW liegt darin, in Analogie zu [12] zusätzliche Schallquellen für die aerodynamischen Geräuschanteile des ICE 1 einzuführen und für diese Quellen andere Höhen zu wählen als die Schienenoberkante. Es zeigte sich, daß bereits mit zwei zusätzlichen Schallquellen eine ausreichende Genauigkeit bei hohen Geschwindigkeiten erreicht werden kann. Hierbei ist allerdings der Einfluß der Lüfteremission bei niedrigen Geschwindigkeiten noch nicht berücksichtigt; hierzu müßte noch eine weitere separate Quelle modelliert werden.

Die vorgeschlagenen Korrekturen für die Schall 03 sind zunächst nur für ICE 1- und ICE 2-Züge zulässig. Für zukünftige Hochgeschwindigkeitszüge müssen die Kennwerte bzw. Pegeldifferenzen jeweils erst bestimmt werden. Ein Vorteil der beschriebenen Vorgehensweise liegt in der Kompatibilität mit dem bestehenden Formelwerk, wobei für jede neue Zugart bzw. die einzelnen Geräuschkomponenten jeweils der Grundwert, der Geschwindigkeitsexponent und die Quellhöhe neu anzugeben sind.

Weitergehende Anpassungen der Korrekturvarianten an die Realität wurden zum Teil vorgeschlagen und verifiziert. Dies betrifft z. B. Geräuschkomponenten, die nicht von der Fahrzeuglänge abhängen, oder die modifizierte Frequenzabhängigkeit der Abschirmung für das Rollgeräusch. Inwiefern die Modellierung solcher Details in der Richtlinie Schall 03 sinnvoll bzw. erwünscht ist, ist vom zuständigen Gremium zu entscheiden. Letztendlich zieht eine höhere Genauigkeit der Prognose immer auch ein komplizierteres Rechenmodell nach sich.

6. Literatur

[1] M. Klemenz, M. W. Hansen und B. Barsikow
Abschirmwirkung von Schallschutzwänden bei Hochgeschwindigkeitszügen;
Bericht 1, Arbeitspaket 1, Meßserie 1: Einzelmikrofon-Messungen
bei ungeschliffenen Schienen.
Umweltbundesamt, Forschungsvorhaben 296 55 215, August 1998

[2] M. Klemenz, M. W. Hansen und B. Barsikow
Abschirmwirkung von Schallschutzwänden bei Hochgeschwindigkeitszügen;

Bericht 2, Arbeitspaket 1, Meßserie 2: Einzelmikrofon-Messungen
bei geschliffenen Schienen.
Umweltbundesamt, Forschungsvorhaben 296 55 215, August 1998

[3] M. Klemenz und B. Barsikow
Abschirmwirkung von Schallschutzwänden bei Hochgeschwindigkeitszügen;
Bericht 3, Arbeitspaket 2: Array-Messungen.
Umweltbundesamt, Forschungsvorhaben 296 55 215, Oktober 1998

[4] Information Akustik 03, Richtlinie zur Berechnung der Schallimmissionen
von Schienenwegen - Schall 03.
Deutsche Bundesbahn, Bundesbahn-Zentralamt München, Ausgabe 1990

[5] VDI 2714, Schallausbreitung im Freien. Januar 1988

[6] VDI 2720, Blatt 1, Schallschutz durch Abschirmung im Freien.
Entwurf Februar 1991

[7] B. Barsikow, M. Klemenz, M. Hellmig und M. Schüttpelz
Bestimmung und Analyse des Geräuschs von Güterwagen auf dem Streckennetz der Niederländischen Staatsbahn (NS).
Ingenieurbüro akustik-data, Bericht Nr. 95/7, 1995

[8] B. Müller und B. Barsikow
Schallemission von ICE-Rädern mit und ohne Regelabsorbern, von schalloptimierten Rädern und von gummigefederten Einringrädern Bo 84.
Ingenieurbüro akustik-data, Bericht Nr. 93/2, 1993

[9] M. Klemenz, B. Barsikow und M. Schüttpelz
Untersuchungen zur Geschwindigkeitsabhängigkeit des Stromabnehmergeräuschs.
Ingenieurbüro akustik-data, Bericht Nr. 98/2, 1998

[10] Einfluß von Radabsorbern.
Akustik-Information des BZA München, Nr. 016 vom 19.04.1991

[11] Schall 03, aerodynamische Einflüsse.
Akustik-Information des BZA München, Nr. 021 vom 17.08.1991

[12] Magnetschwebebahnverordnung, Artikel 2:
Magnetschwebebahn-Lärmschutzverordnung (MbLVO)
vom 23. September 1997 (BGBl. I 2329, 2338)

[13] M. Klemenz
Entwurf einer Formel für die Neufassung der Schall 03 bezüglich der Wirkung einer Schallschutzwand bei Vorbeifahrten des ICE 1.
Ingenieurbüro akustik-data, Bericht Nr. 95/3, 1995

[14] U. J. Kurze
Geräuschimmissionen in der Umgebung von Bahnanlagen.
Zeitschrift für Lärmbekämpfung, Vol. 37, 121-128, 1990

Anhang

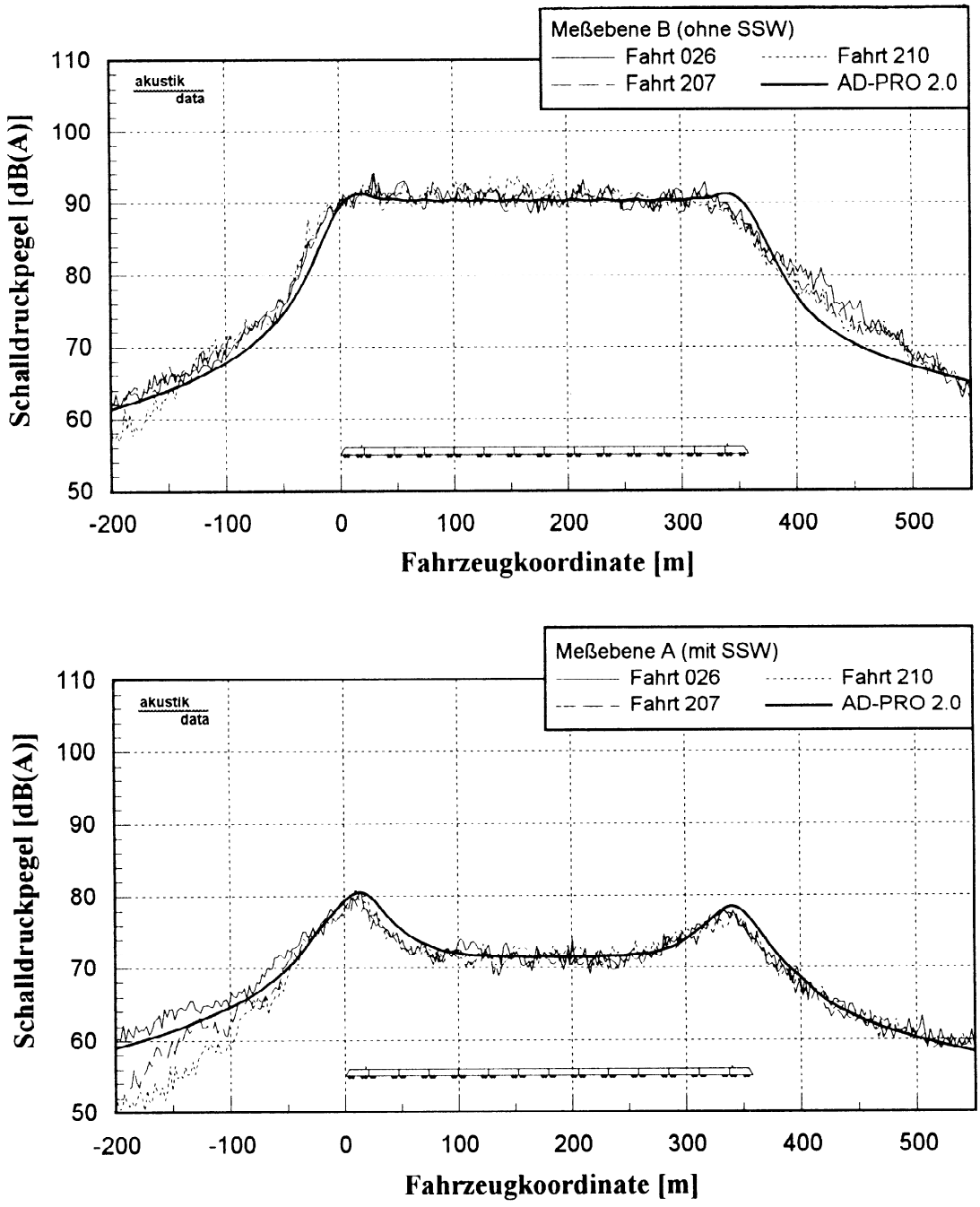


Bild A1 In 25 m Entfernung von Gleismitte und 3,5 m über SO gemessene Pegelverläufe bei drei ausgewählten ICE 1-Vorbeifahrten mit ca. 200 km/h an den Meßorten A und B bei ungeschliffenen Schienen [1] sowie mittels AD-PRO 2.0 entsprechend berechnete Pegelverläufe

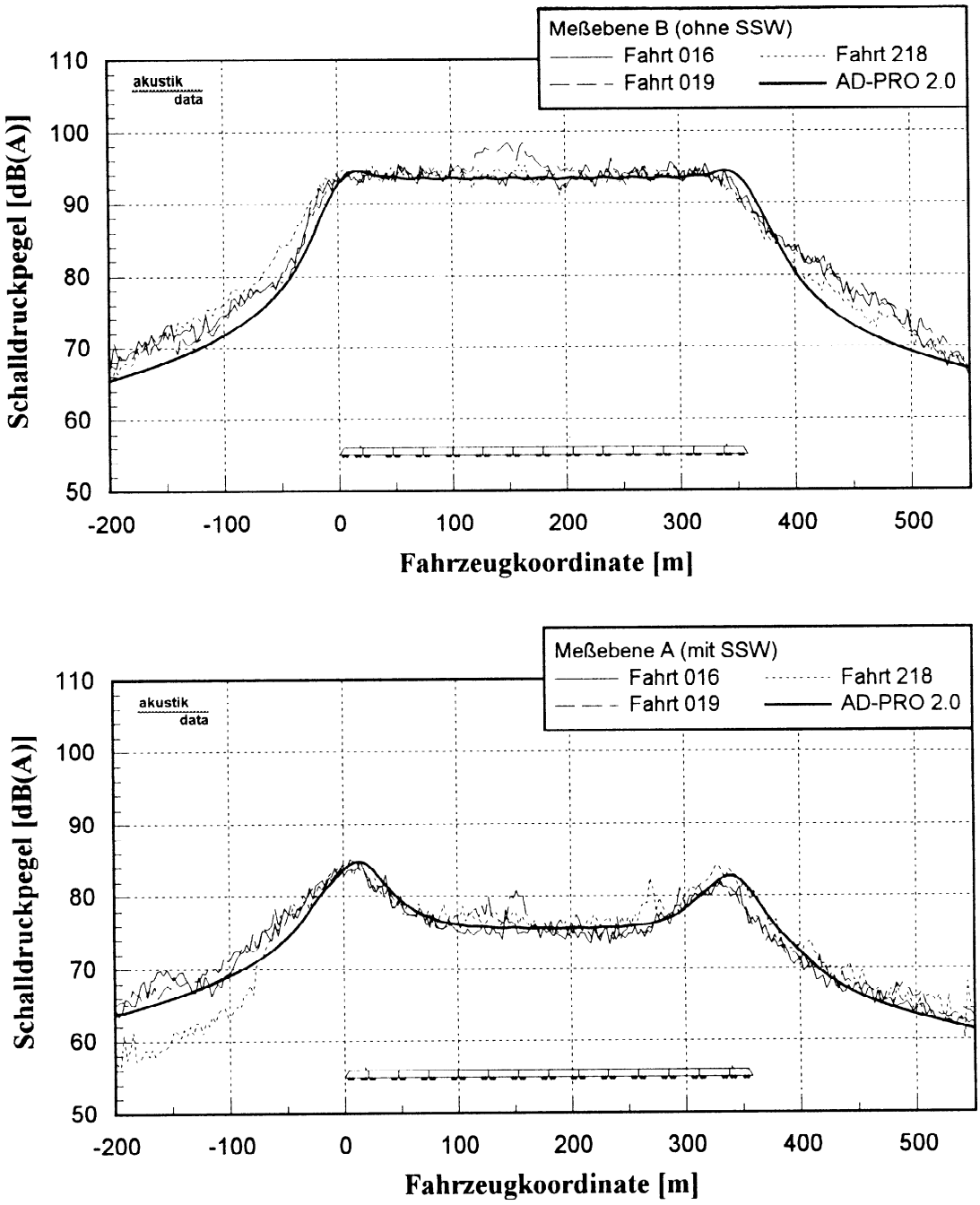
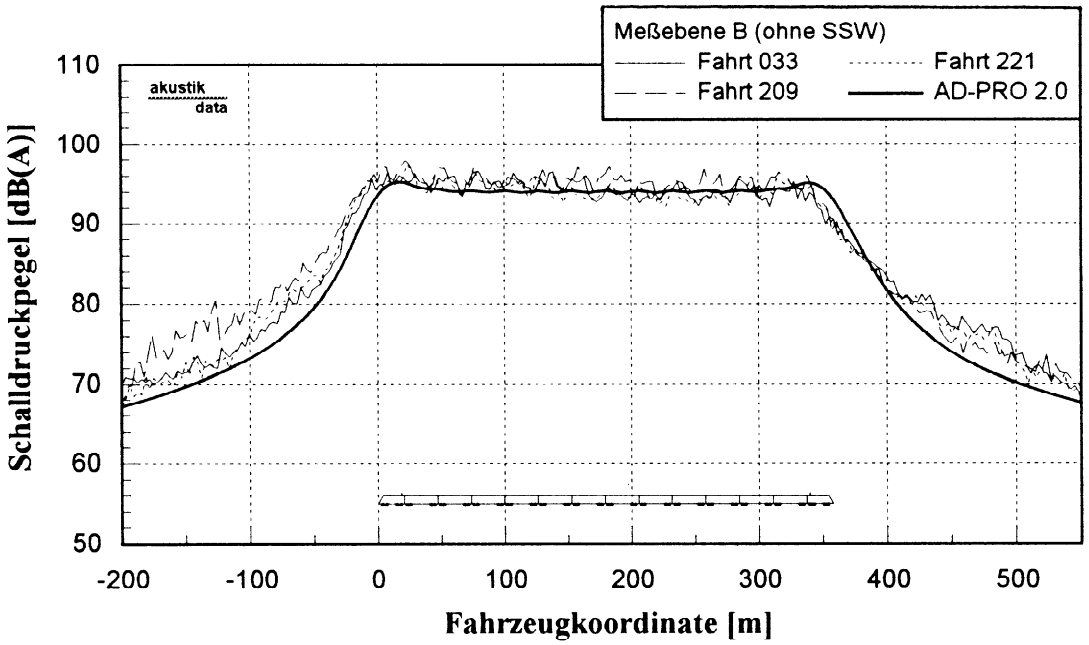


Bild A2 In 25 m Entfernung von Gleismitte und 3,5 m über SO gemessene Pegelverläufe bei drei ausgewählten ICE 1-Vorbeifahrten mit ca. 250 km/h an den Meßorten A und B bei ungeschliffenen Schienen [1] sowie mittels AD-PRO 2.0 entsprechend berechnete Pegelverläufe



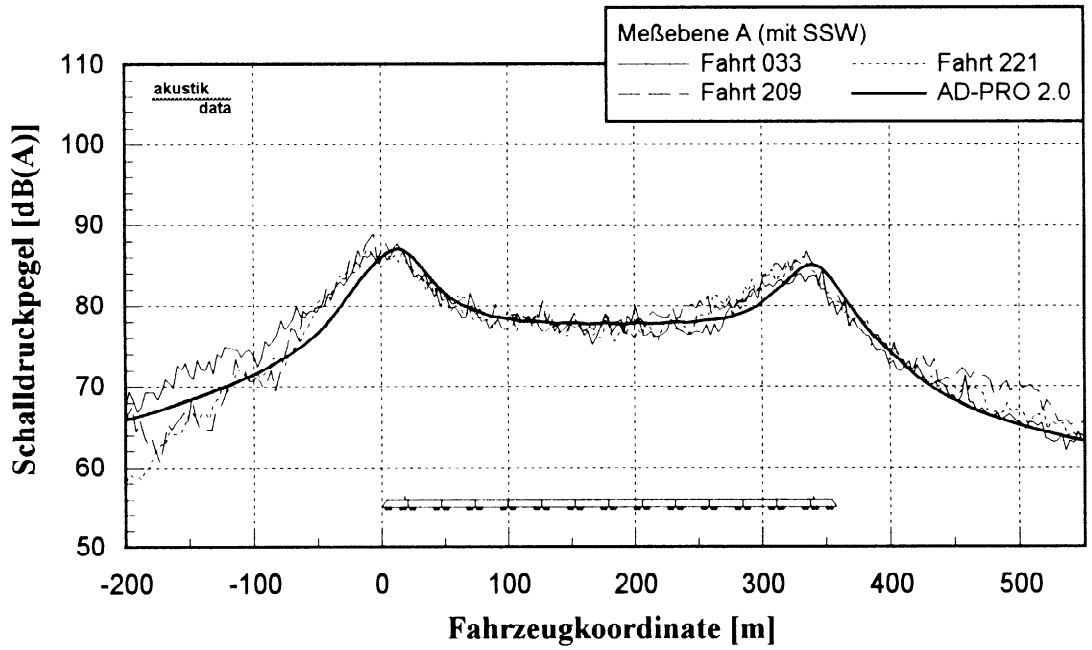
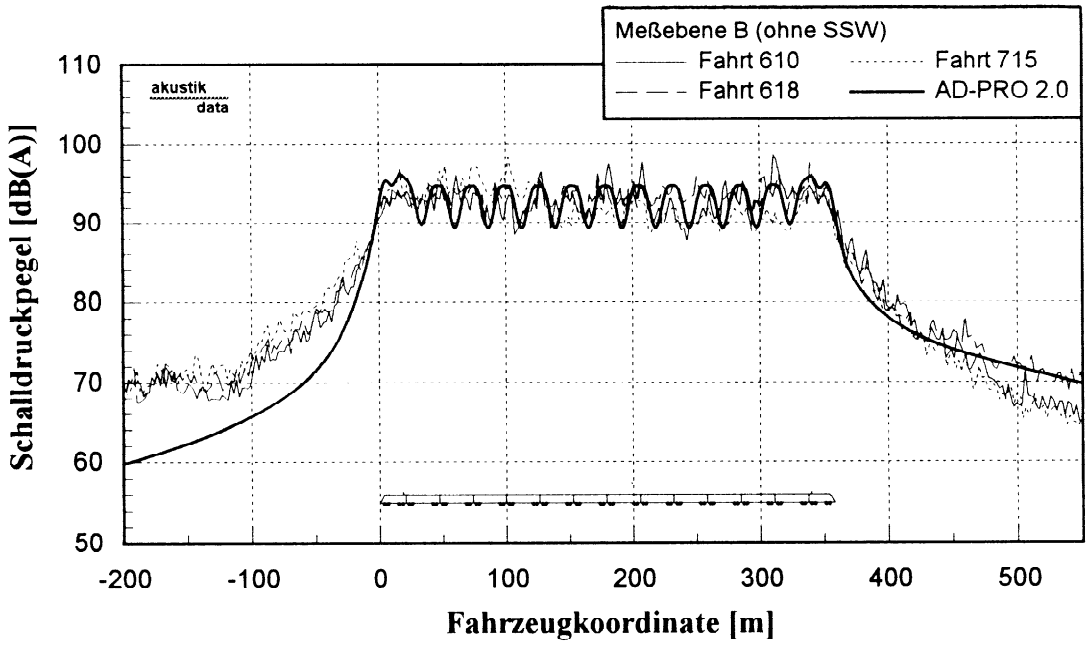


Bild A3 In 25 m Entfernung von Gleismitte und 3,5 m über SO gemessene Pegelverläufe bei drei ausgewählten ICE 1-Vorbeifahrten mit ca. 280 km/h an den Meßorten A und B bei ungeschliffenen Schienen [1] sowie mittels AD-PRO 2.0 entsprechend berechnete Pegelverläufe



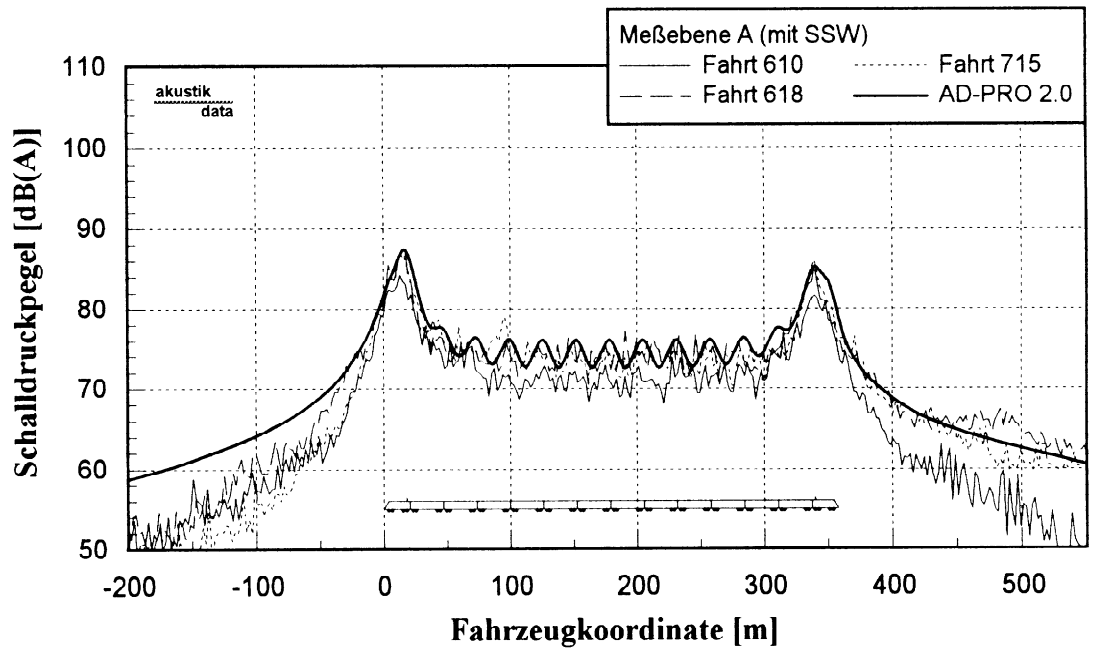
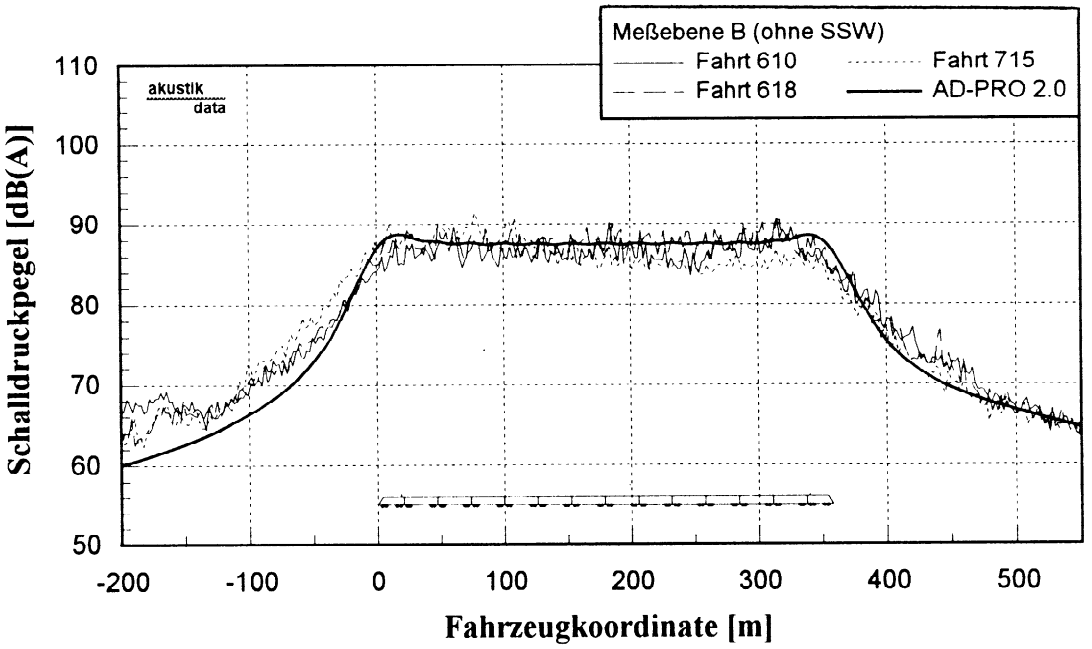


Bild A4 In 7,5 m Entfernung von Gleismitte und 1,2 m über SO gemessene Pegelverläufe bei drei ausgewählten ICE 1-Vorbeifahrten mit ca. 200 km/h an den Meßorten A und B bei geschliffenen Schienen [2] sowie mittels AD-PRO 2.0 entsprechend berechnete Pegelverläufe



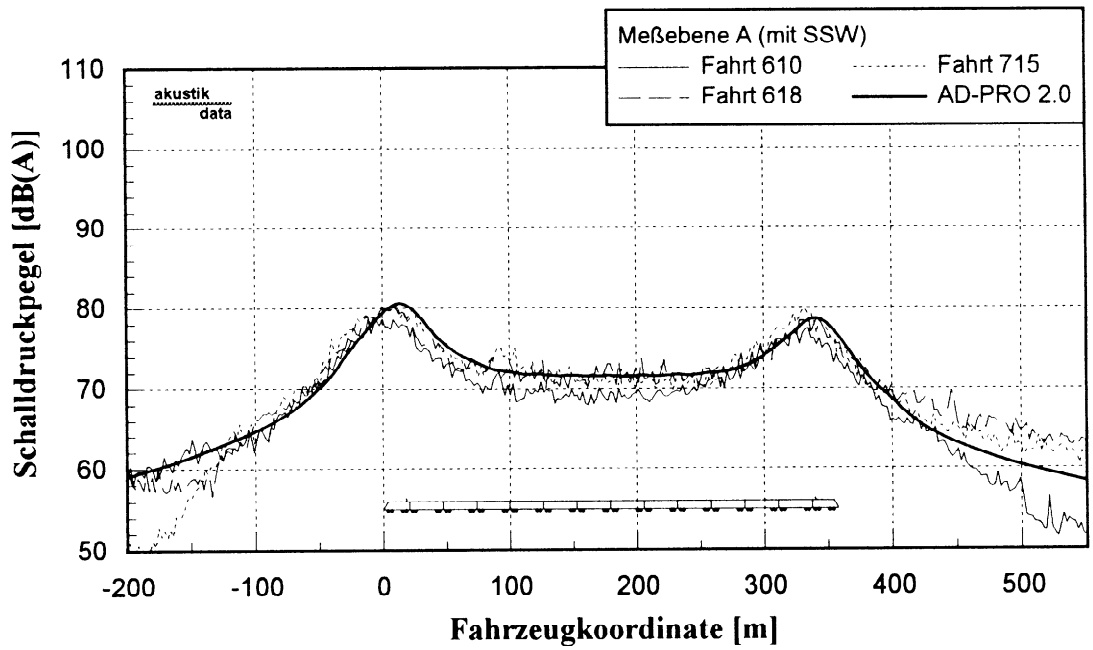


Bild A5 In 25 m Entfernung von Gleismitte und 3,5 m über SO gemessene Pegelverläufe bei drei ausgewählten ICE 1-Vorbeifahrten mit ca. 200 km/h an den Meßorten A und B bei geschliffenen Schienen [2] sowie mittels AD-PRO 2.0 entsprechend berechnete Pegelverläufe

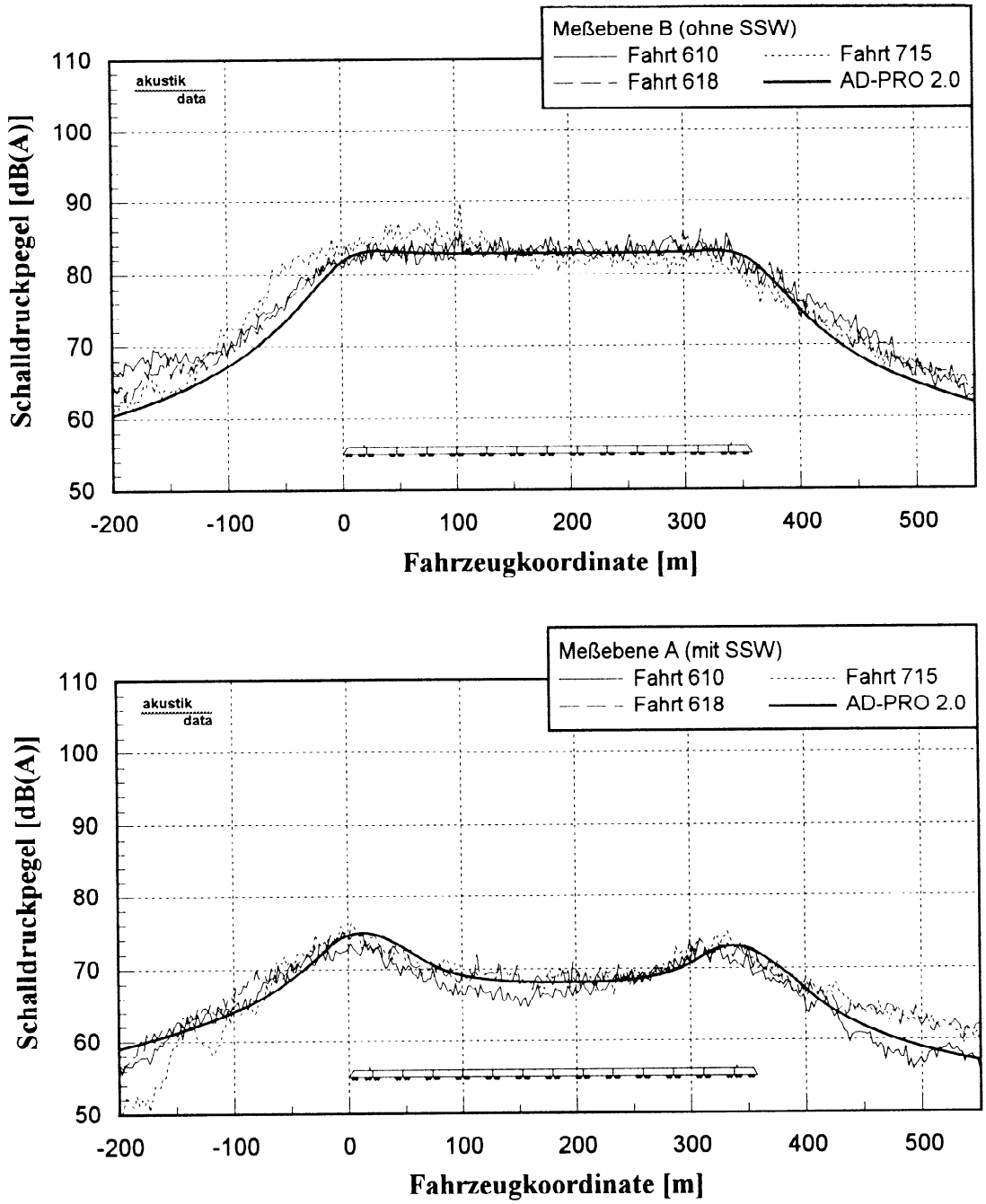
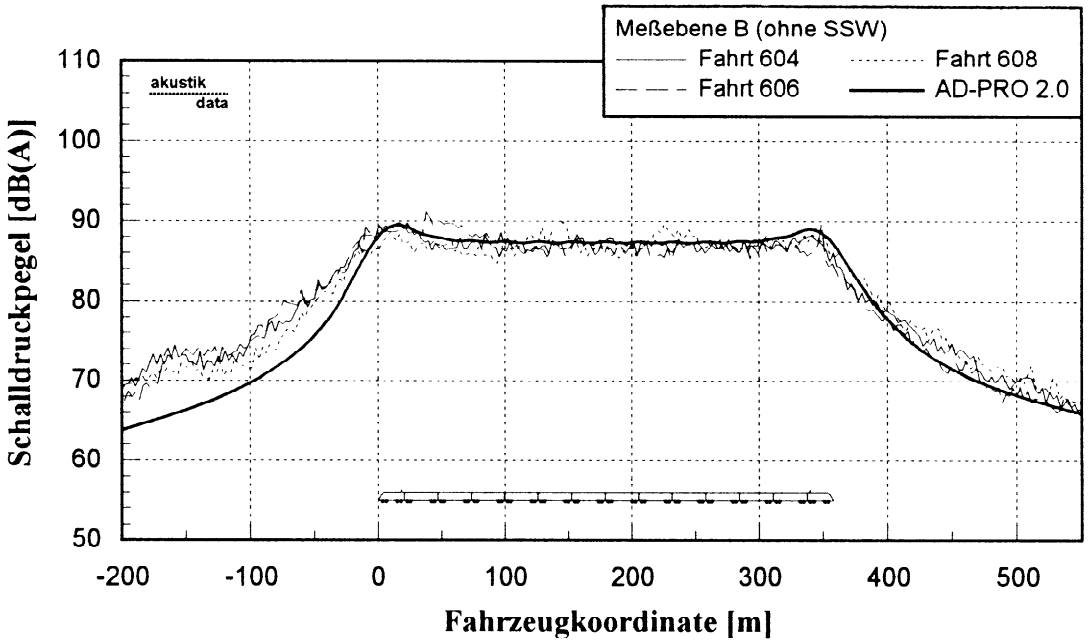


Bild A6 In 50 m Entfernung von Gleismitte und 5,0 m über SO gemessene Pegelverläufe bei drei ausgewählten ICE 1-Vorbeifahrten mit ca. 200 km/h an den Meßorten A und B bei geschliffenen Schienen [2] sowie mittels AD-PRO 2.0 entsprechend berechnete Pegelverläufe



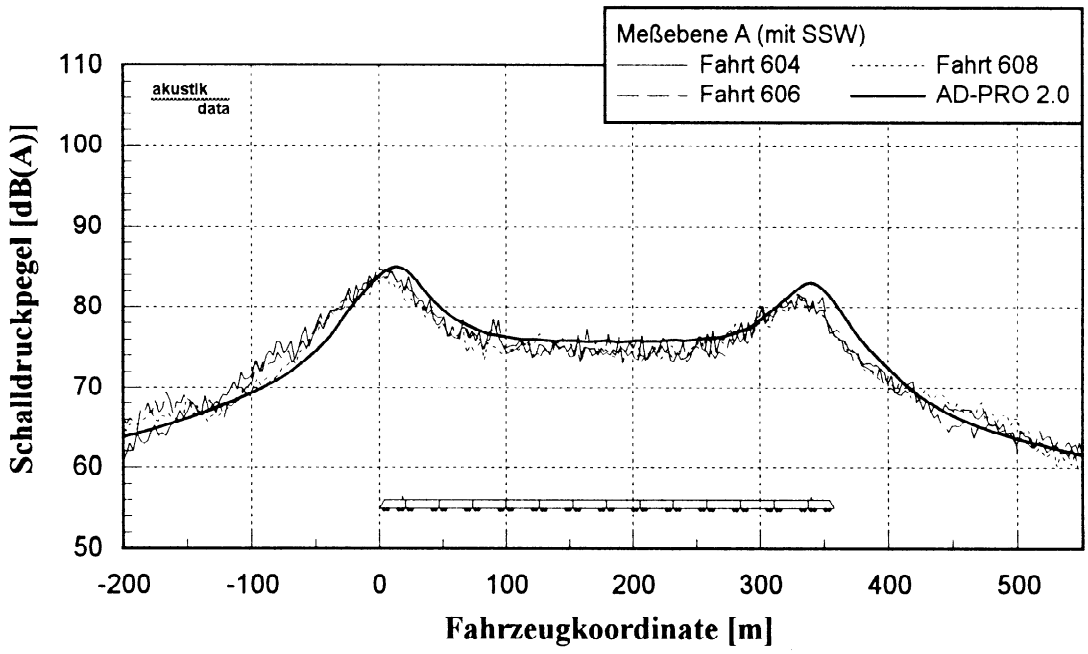
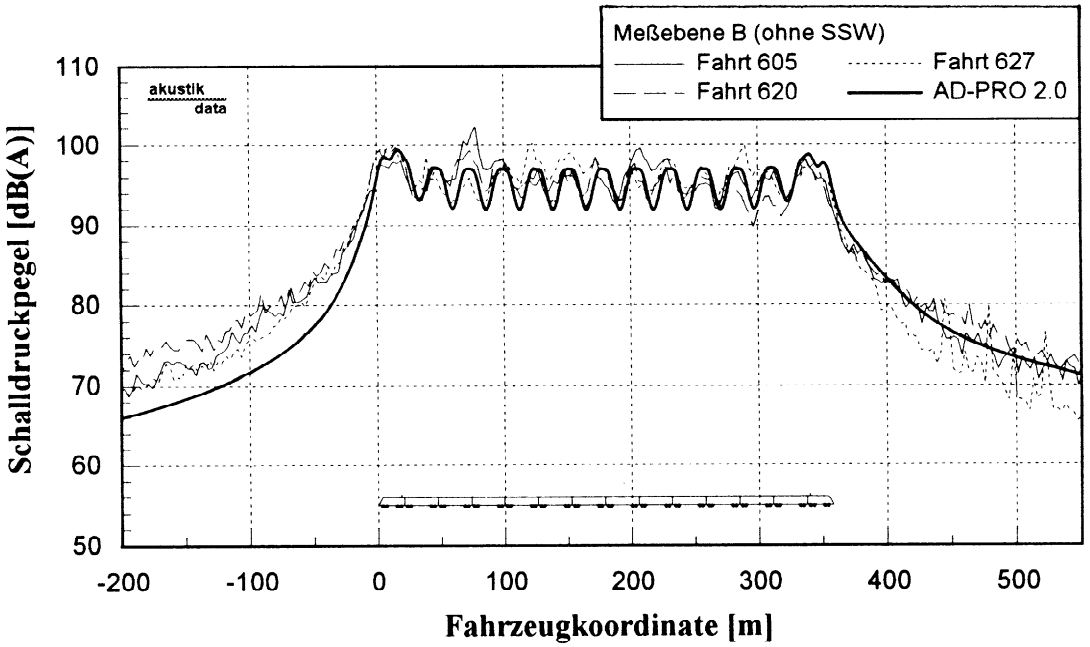


Bild A7 In 25 m Entfernung von Gleismitte und 3,5 m über SO gemessene Pegelverläufe bei drei ausgewählten ICE 1-Vorbeifahrten mit ca. 250 km/h an den Meßorten A und B bei geschliffenen Schienen [2] sowie mittels AD-PRO 2.0 entsprechend berechnete Pegelverläufe



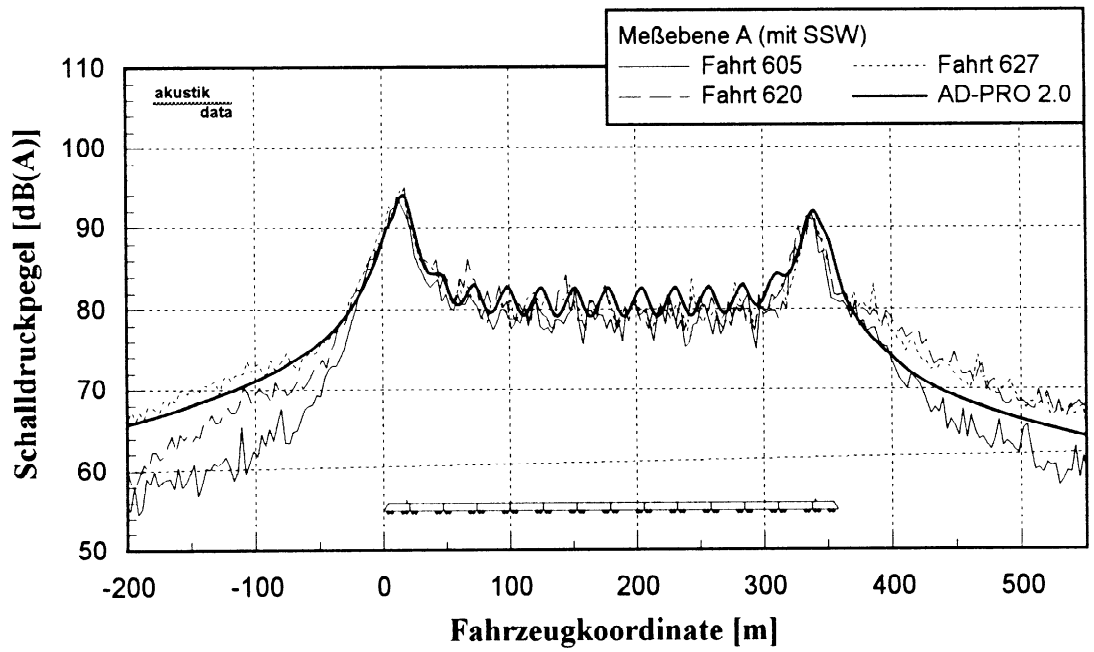
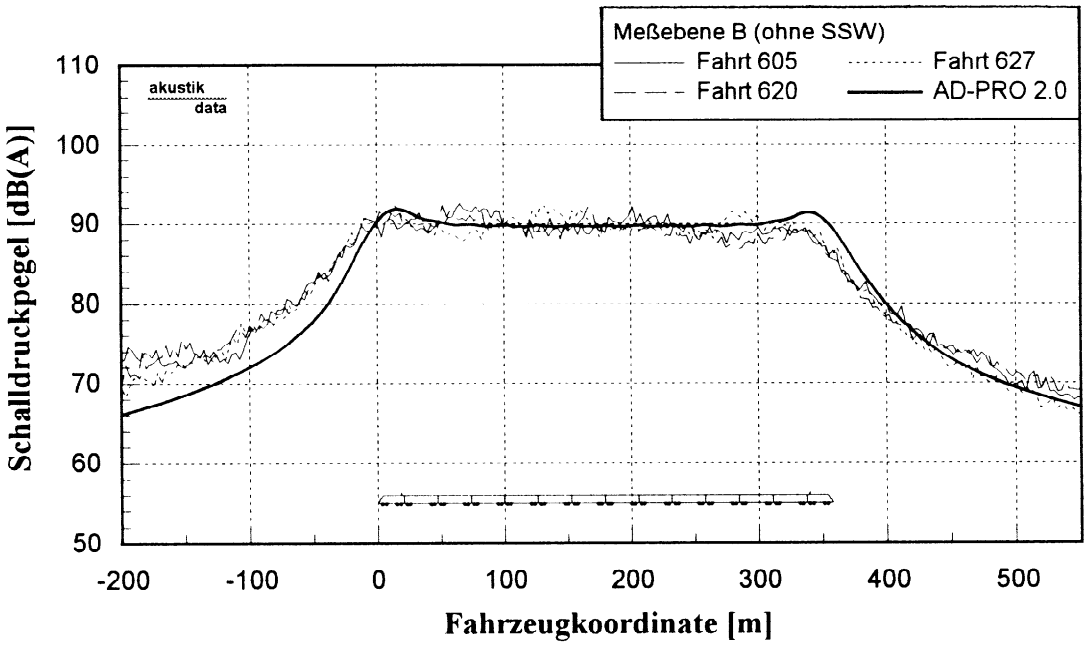


Bild A8 In 7,5 m Entfernung von Gleismitte und 1,2 m über SO gemessene Pegelverläufe bei drei ausgewählten ICE 1-Vorbeifahrten mit ca. 280 km/h an den Meßorten A und B bei geschliffenen Schienen [2] sowie mittels AD-PRO 2.0 entsprechend berechnete Pegelverläufe



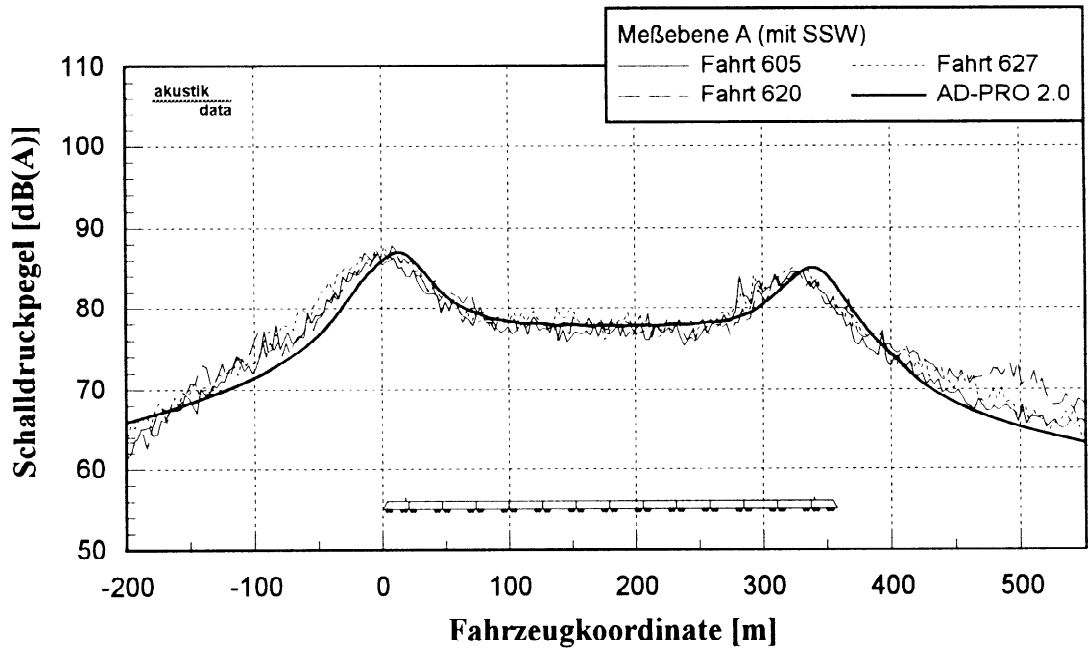
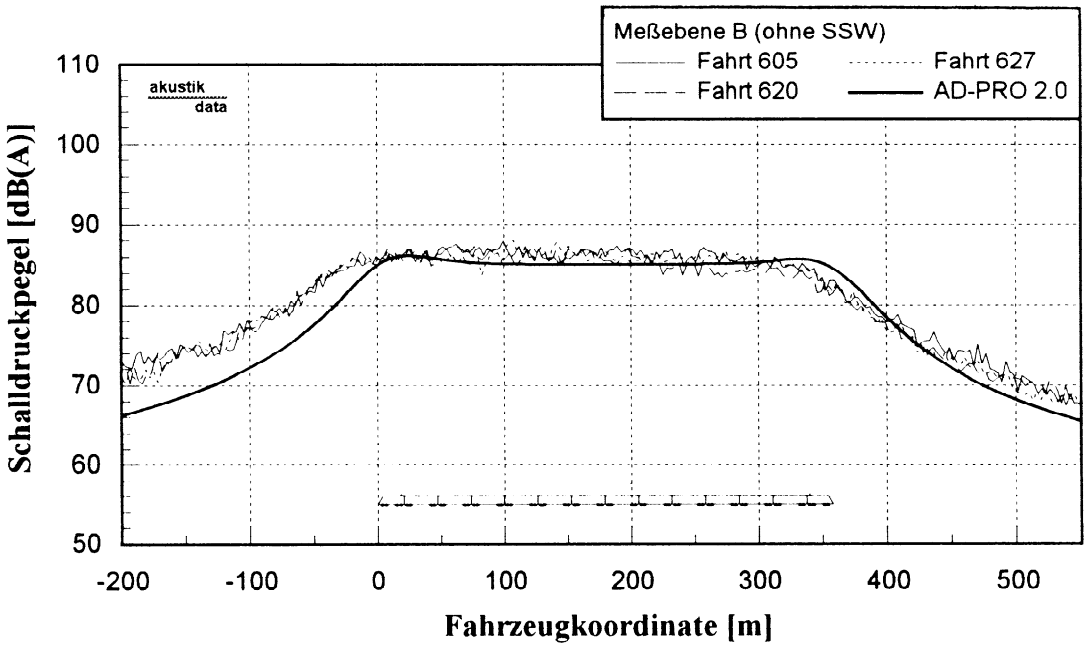


Bild A9 In 25 m Entfernung von Gleismitte und 3,5 m über SO gemessene Pegelverläufe bei drei ausgewählten ICE 1-Vorbeifahrten mit ca. 280 km/h an den Meßorten A und B bei geschliffenen Schienen [2] sowie mittels AD-PRO 2.0 entsprechend berechnete Pegelverläufe



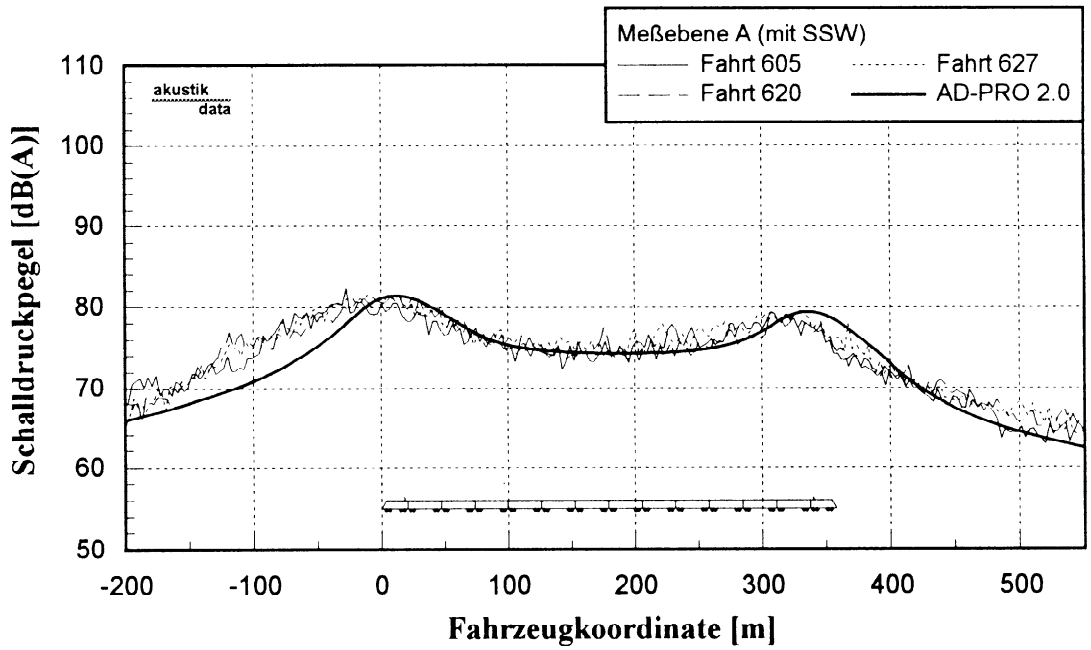


Bild A10 In 50 m Entfernung von Gleismitte und 5,0 m über SO gemessene Pegelverläufe bei drei ausgewählten ICE 1-Vorbeifahrten mit ca. 280 km/h an den Meßorten A und B bei geschliffenen Schienen [2] sowie mittels AD-PRO 2.0 entsprechend berechnete Pegelverläufe

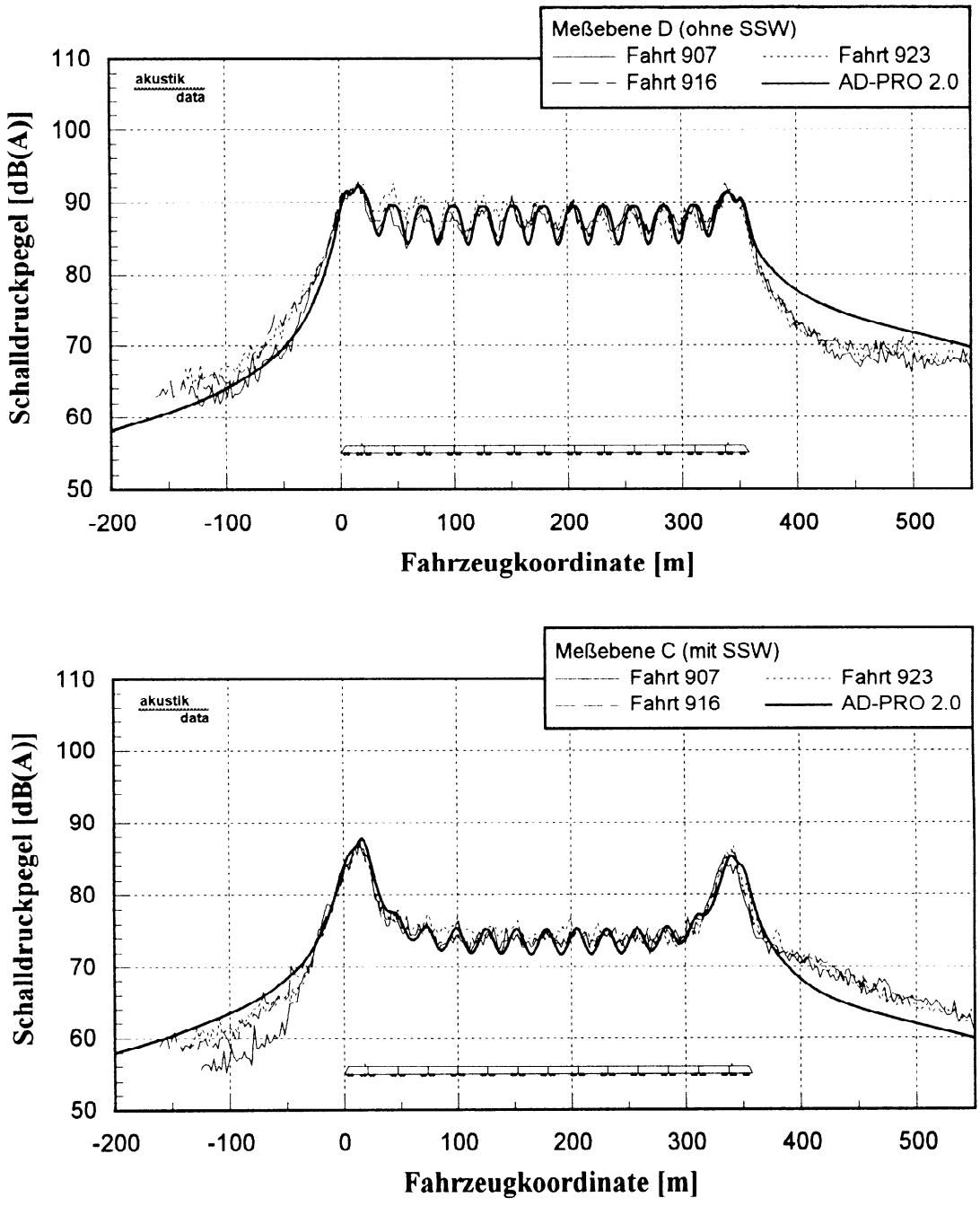
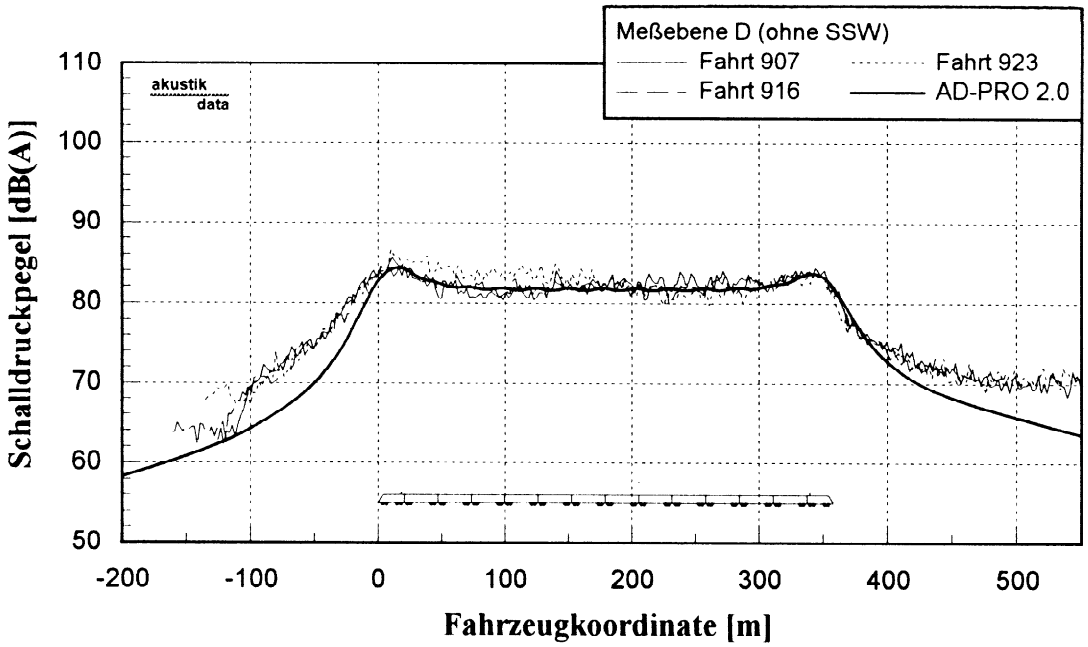


Bild A11 In 7,5 m Entfernung von Gleismitte und 1,2 m über SO gemessene Pegelverläufe bei drei ausgewählten ICE 1-Vorbeifahrten mit ca. 200 km/h an den Meßorten C und D bei geschliffenen Schienen [2] sowie mittels AD-PRO 2.0 entsprechend berechnete Pegelverläufe



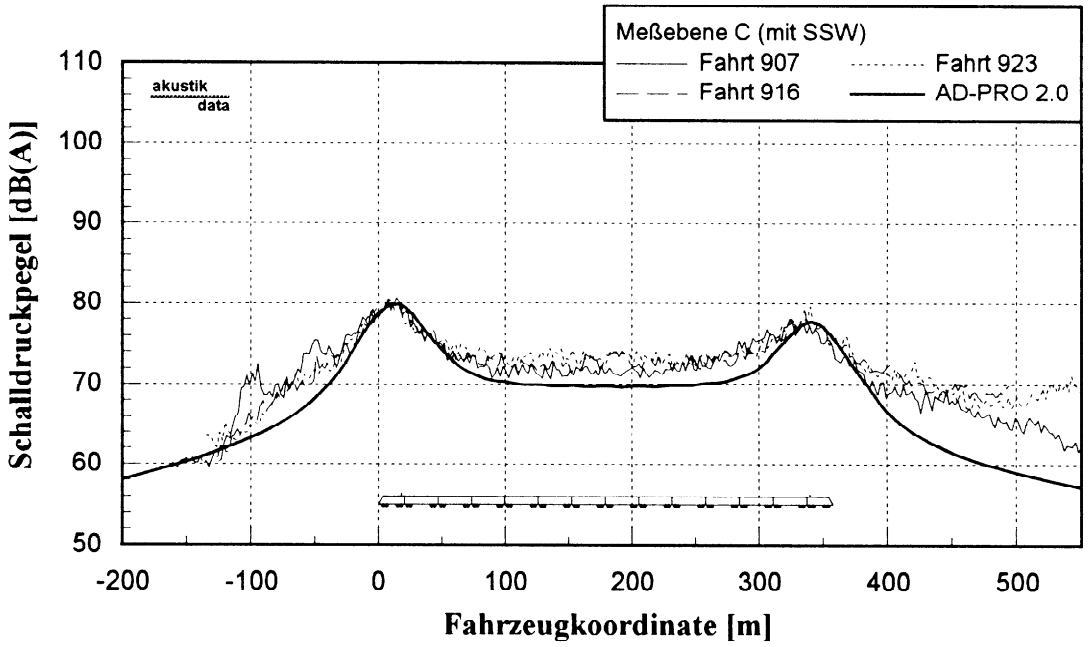
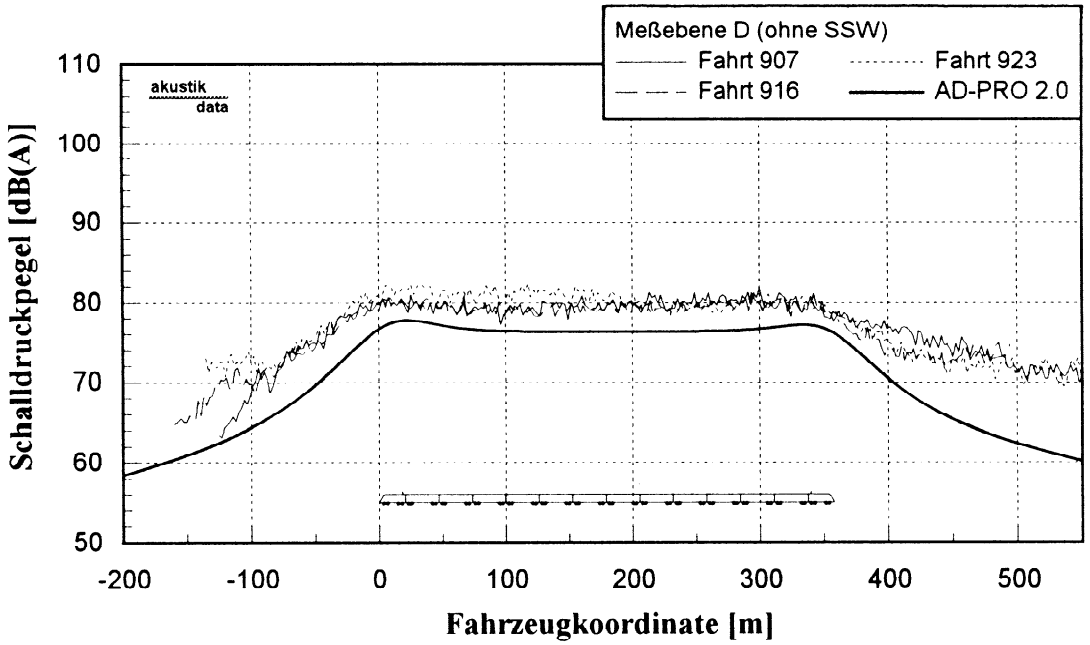


Bild A12 In 25 m Entfernung von Gleismitte und 3,5 m über SO gemessene Pegelverläufe bei drei ausgewählten ICE 1-Vorbeifahrten mit ca. 200 km/h an den Meßorten C und D bei geschliffenen Schienen [2] sowie mittels AD-PRO 2.0 entsprechend berechnete Pegelverläufe



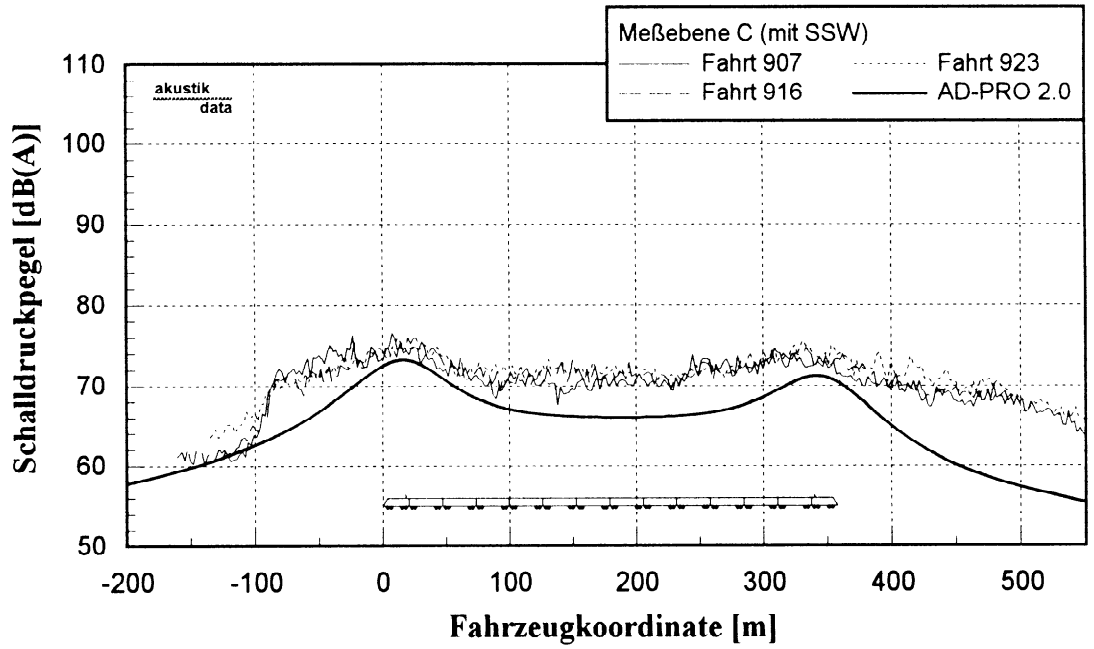


Bild A13 In 50 m Entfernung von Gleismitte und 5,0 m über SO gemessene Pegelverläufe bei drei ausgewählten ICE 1-Vorbeifahrten mit ca. 200 km/h an den Meßorten C und D bei geschliffenen Schienen [2] sowie mittels AD-PRO 2.0 entsprechend berechnete Pegelverläufe

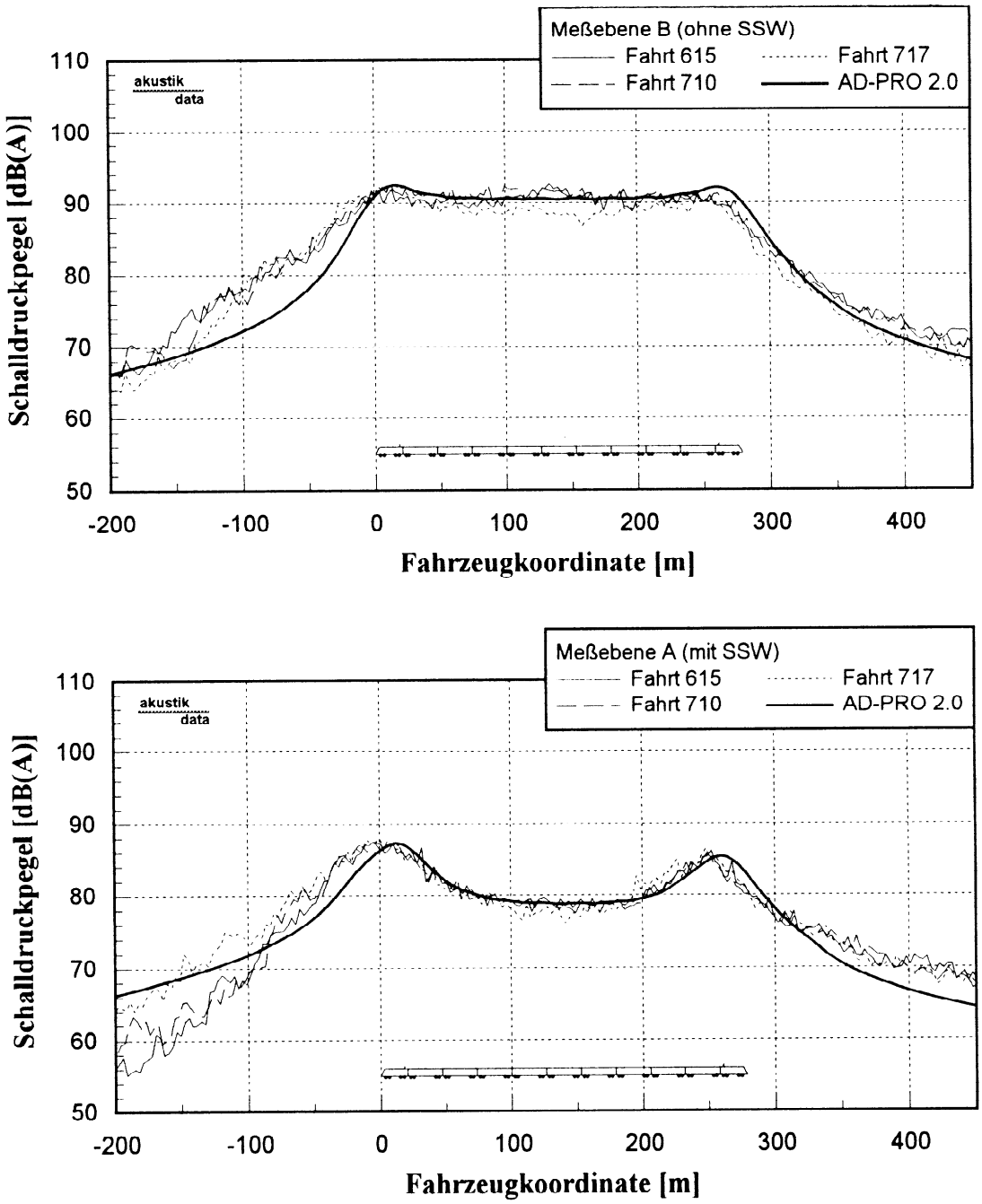


Bild A14 In 25 m Entfernung von Gleismitte und 3,5 m über SO gemessene Pegelverläufe bei drei ausgewählten ICE 2-Vorbeifahrten mit ca. 280 km/h an den Meßorten A und B bei geschliffenen Schienen [2] sowie mittels AD-PRO 2.0 entsprechend berechnete Pegelverläufe

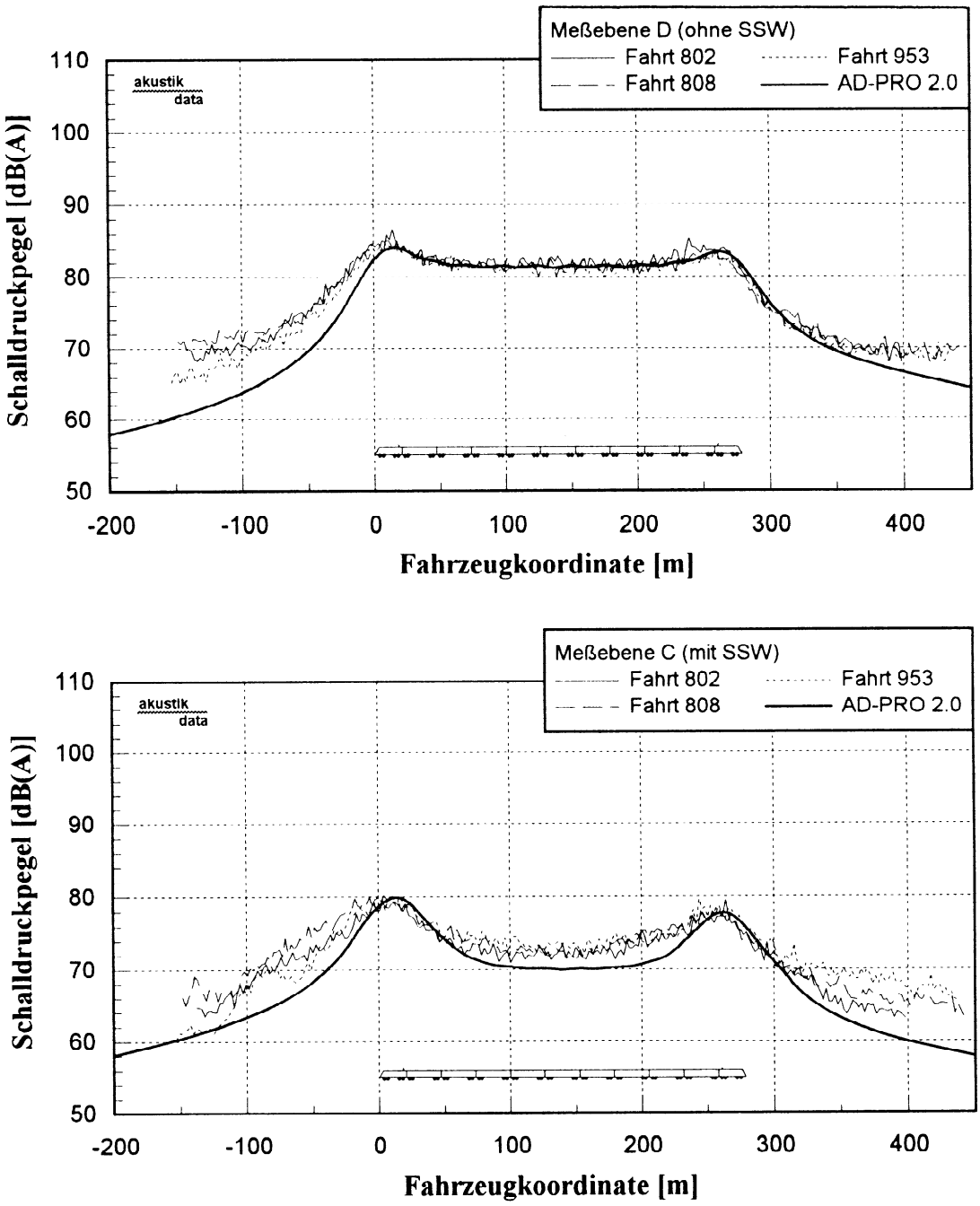
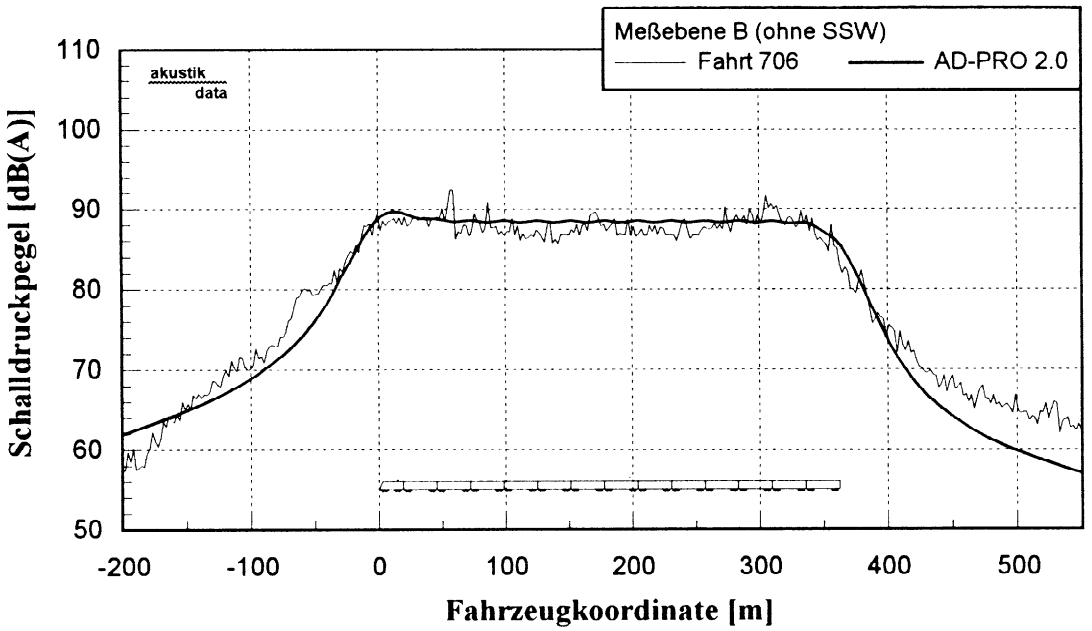


Bild A15 In 25 m Entfernung von Gleismitte und 3,5 m über SO gemessene Pegelverläufe bei drei ausgewählten ICE 2-Vorbeifahrten mit ca. 200 km/h an den Meßorten C und D bei geschliffenen Schienen [2] sowie mittels AD-PRO 2.0 entsprechend berechnete Pegelverläufe



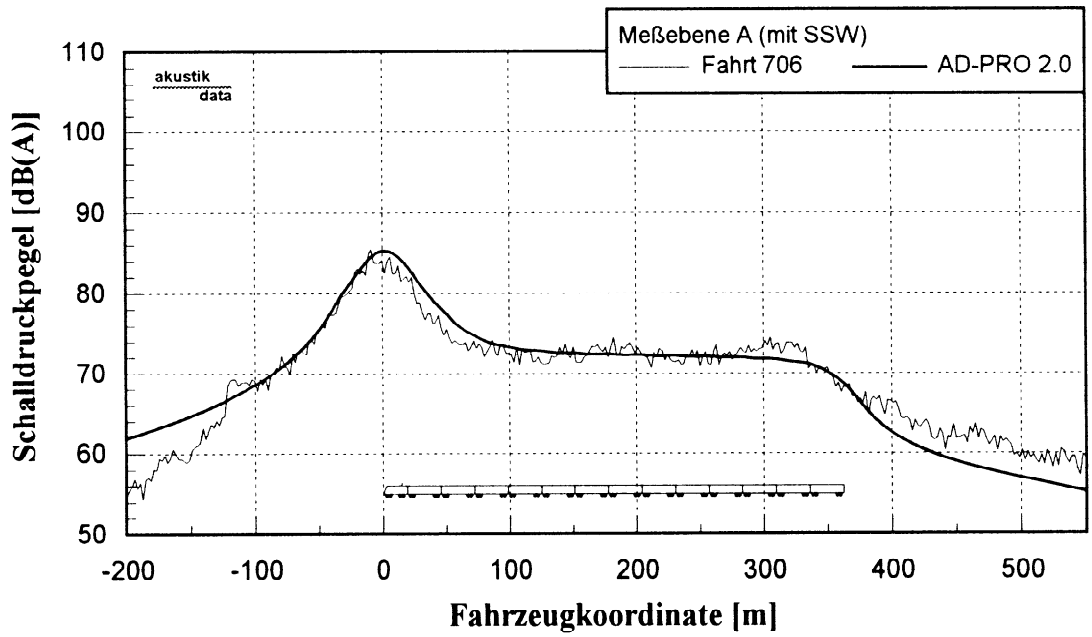
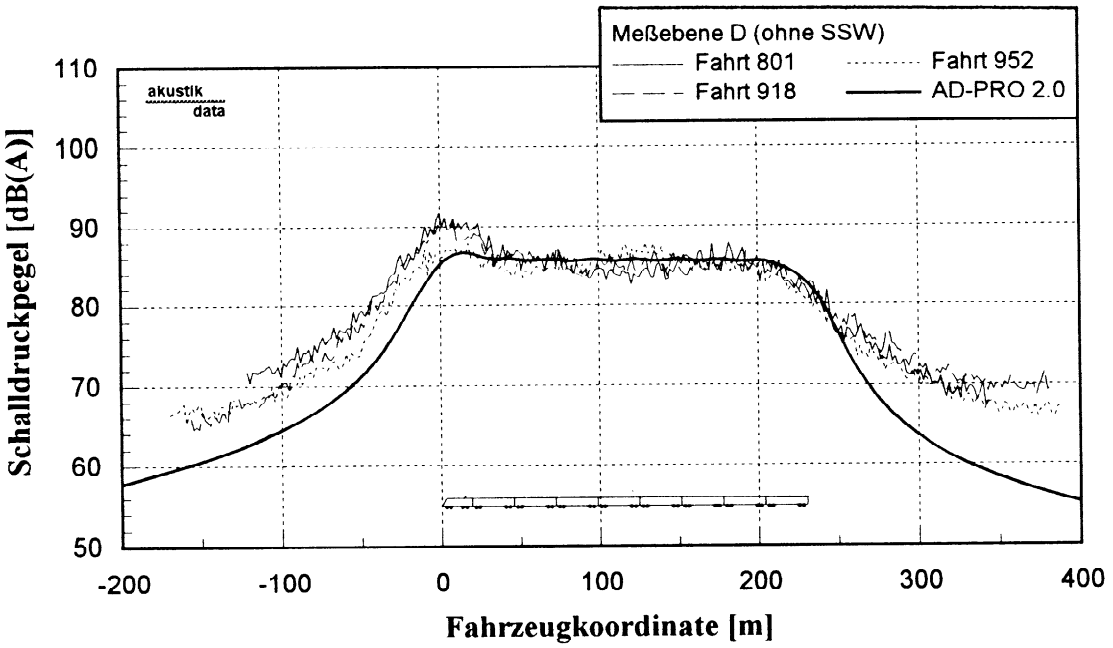


Bild A16 In 25 m Entfernung von Gleismitte und 3,5 m über SO gemessener Pegelverlauf bei einer IC-Vorbeifahrt mit ca. 190 km/h an den Meßorten A und B bei geschliffenen Schienen [2] sowie mittels AD-PRO 2.0 entsprechend berechnete Pegelverläufe



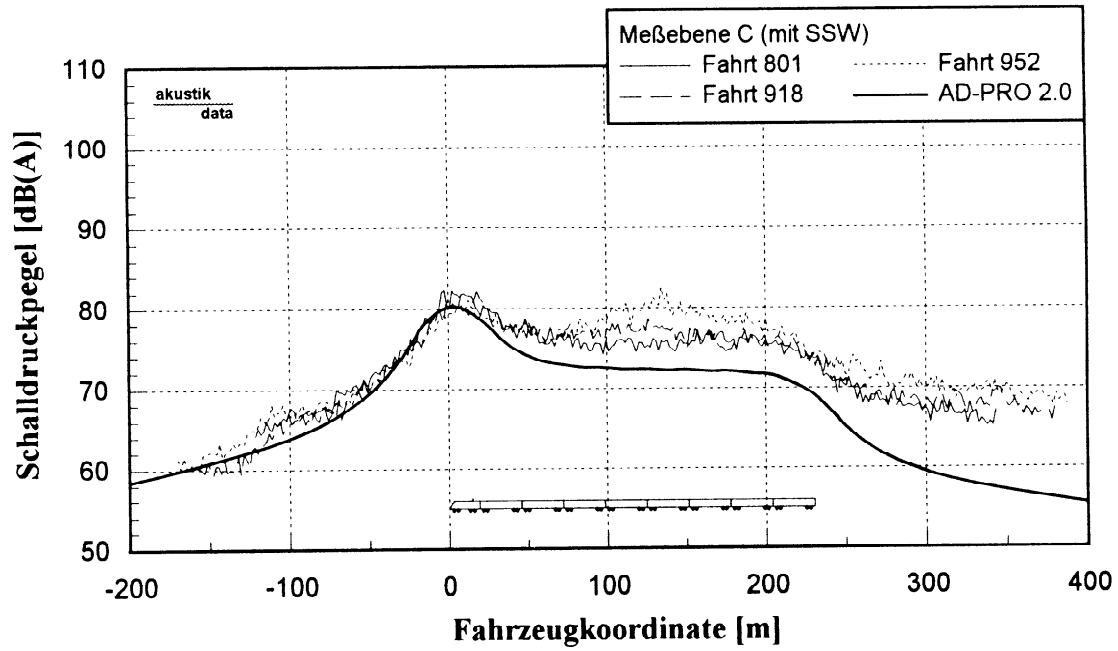


Bild A17 In 25 m Entfernung von Gleismitte und 3,5 m über SO gemessene Pegelverläufe bei drei ausgewählten IR-Vorbeifahrten mit ca. 160 km/h an den Meßorten C und D bei geschliffenen Schienen [2] sowie mittels AD-PRO 2.0 entsprechend berechnete Pegelverläufe

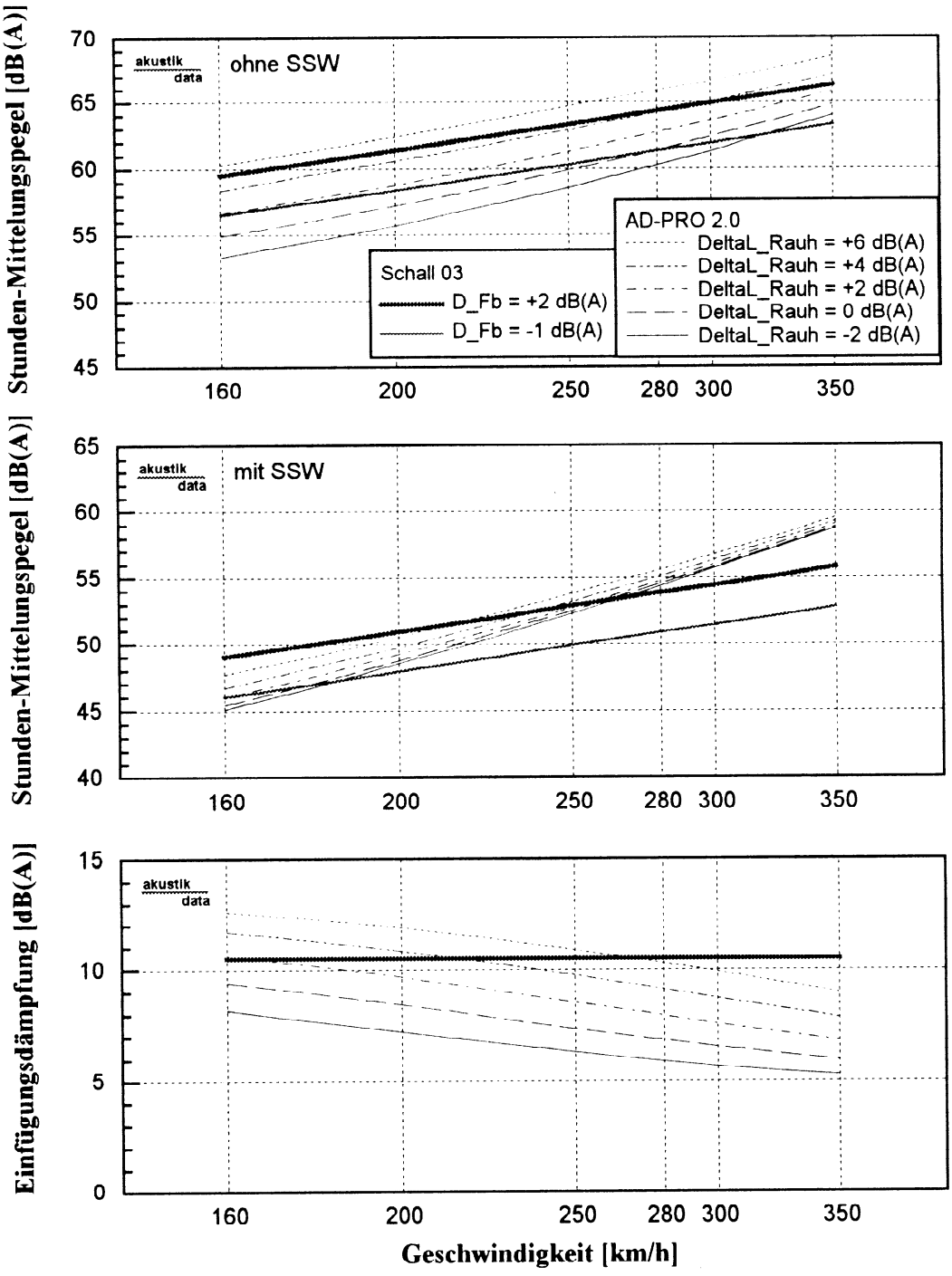


Bild B1 Stunden-Mittelungspegel bei Vorbeifahrt eines ICE 1 pro Stunde in 25 m Entfernung von Gleismitte ohne SSW (oben), mit SSW (Mitte) und deren Differenz (unten); die Pegel sind mittels AD-PRO 2.0 für verschiedene Schienenzustände (ΔL_{Rauh}) prognostiziert bzw. anhand der **aktuell gültigen Schall 03** für verschiedene Werte D_{Fb} berechnet

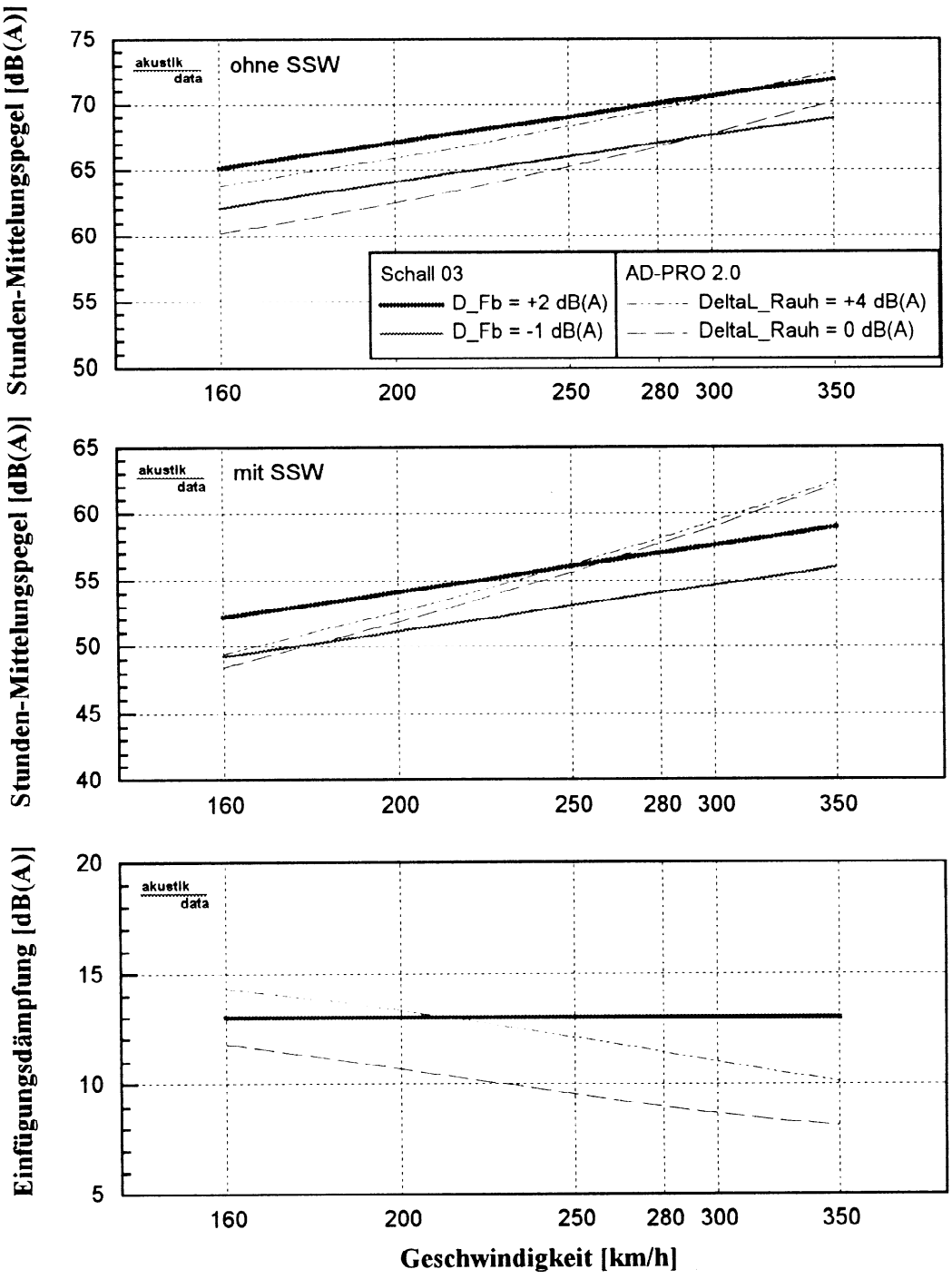


Bild B2 Stunden-Mittelungspegel bei Vorbeifahrt eines ICE 1 pro Stunde in 7,5 m Entfernung von Gleismitte ohne SSW (oben), mit SSW (Mitte) und deren Differenz (unten); die Pegel sind mittels AD-PRO 2.0 für verschiedene Schienenzustände (ΔL_{Rauh}) prognostiziert bzw. anhand der **aktuell gültigen Schall 03** für verschiedene Werte D_{Fb} berechnet

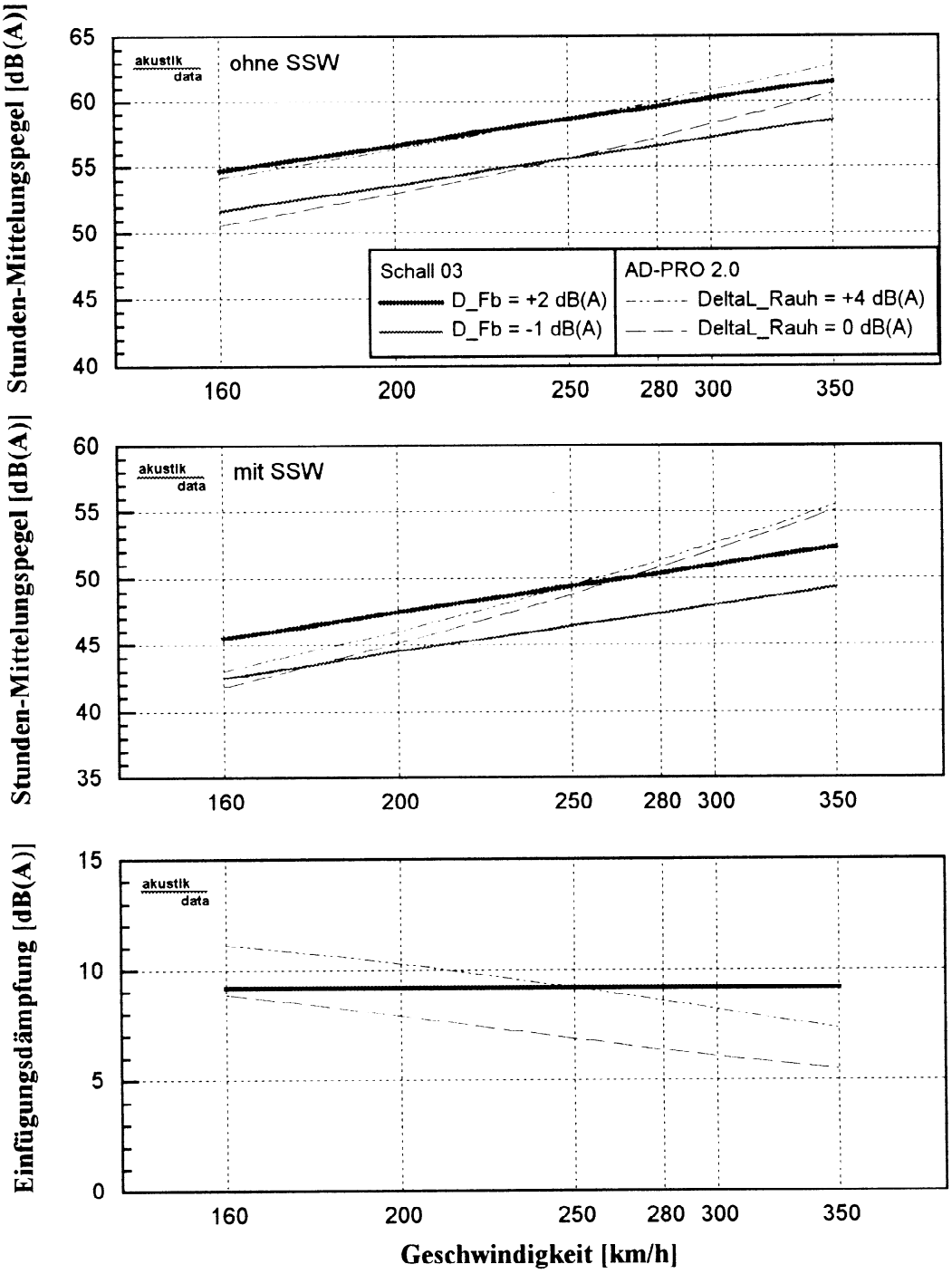


Bild B3 Stunden-Mittelungspegel bei Vorbeifahrt eines ICE 1 pro Stunde in 50 m Entfernung von Gleismitte ohne SSW (oben), mit SSW (Mitte) und deren Differenz (unten); die Pegel sind mittels AD-PRO 2.0 für verschiedene Schienenzustände (ΔL_{Rauh}) prognostiziert bzw. anhand der **aktuell gültigen Schall 03** für verschiedene Werte D_{Fb} berechnet

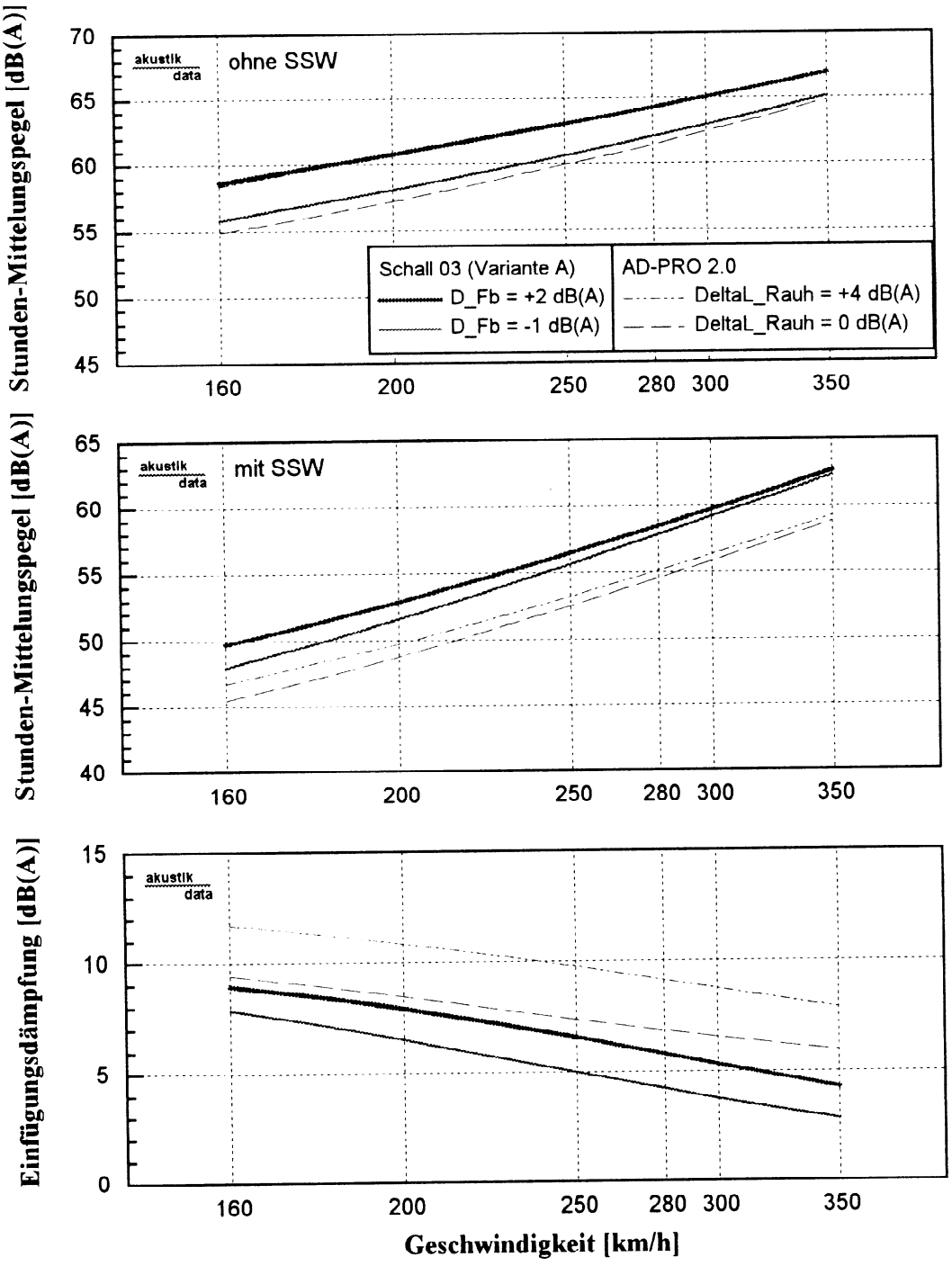


Bild B4 Stunden-Mittelungspegel bei Vorbeifahrt eines ICE 1 pro Stunde in 25 m Entfernung von Gleismitte ohne SSW (oben), mit SSW (Mitte) und deren Differenz (unten); die Pegel sind mittels AD-PRO 2.0 für verschiedene Schienenzustände (ΔL_{Rauh}) prognostiziert bzw. anhand einer **korrigierten Version der Schall 03 (Variante A)** für verschiedene Werte D_{Fb} berechnet

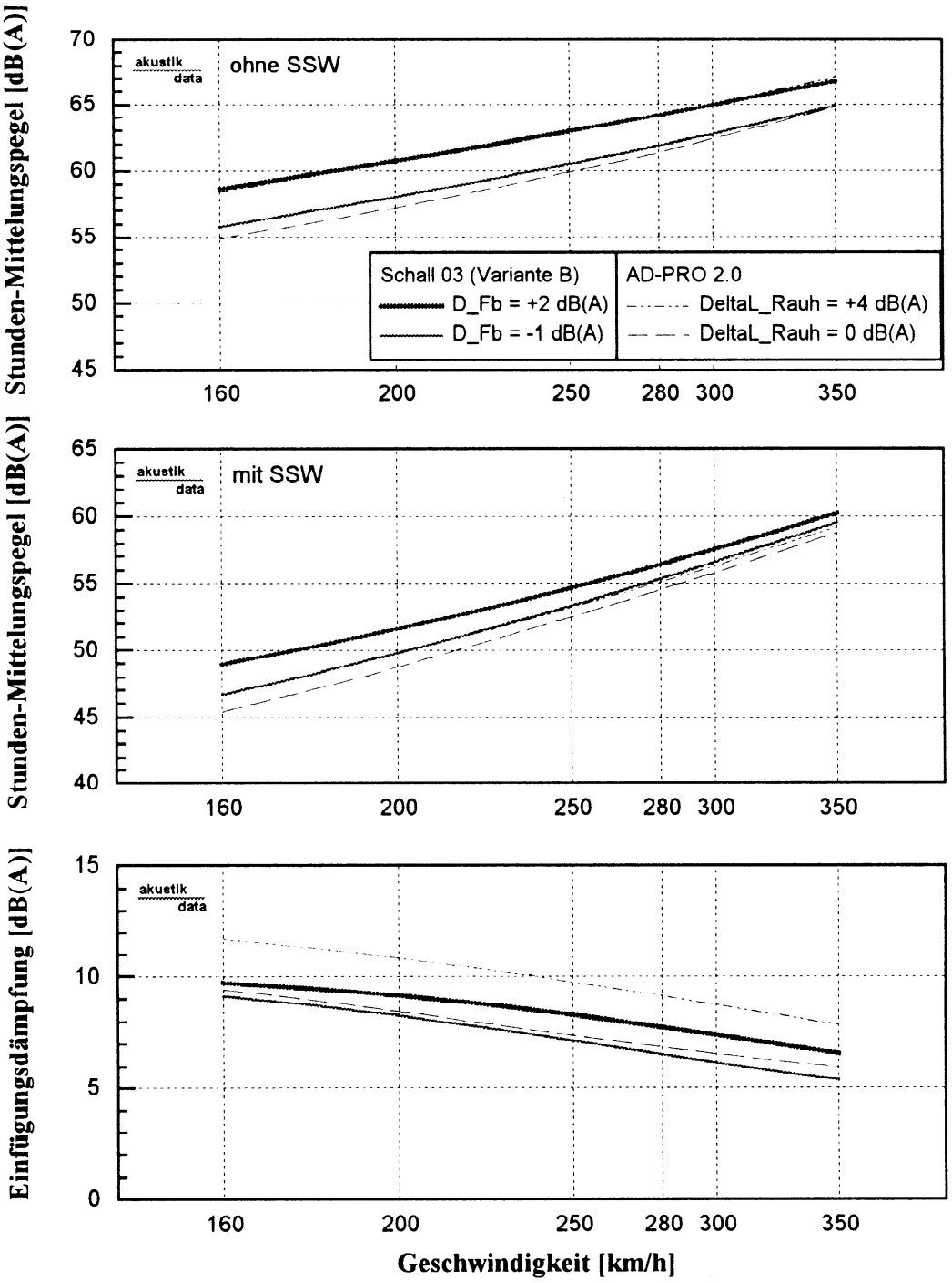


Bild B5 Stunden-Mittelungspegel bei Vorbeifahrt eines ICE 1 pro Stunde in 25 m Entfernung von Gleismitte ohne SSW (oben), mit SSW (Mitte) und deren Differenz (unten); die Pegel sind mittels AD-PRO 2.0 für verschiedene Schienenzustände (ΔL_{Rauh}) prognostiziert bzw. anhand einer **korrigierten Version der Schall 03 (Variante B)** für verschiedene Werte D_{Fb} berechnet

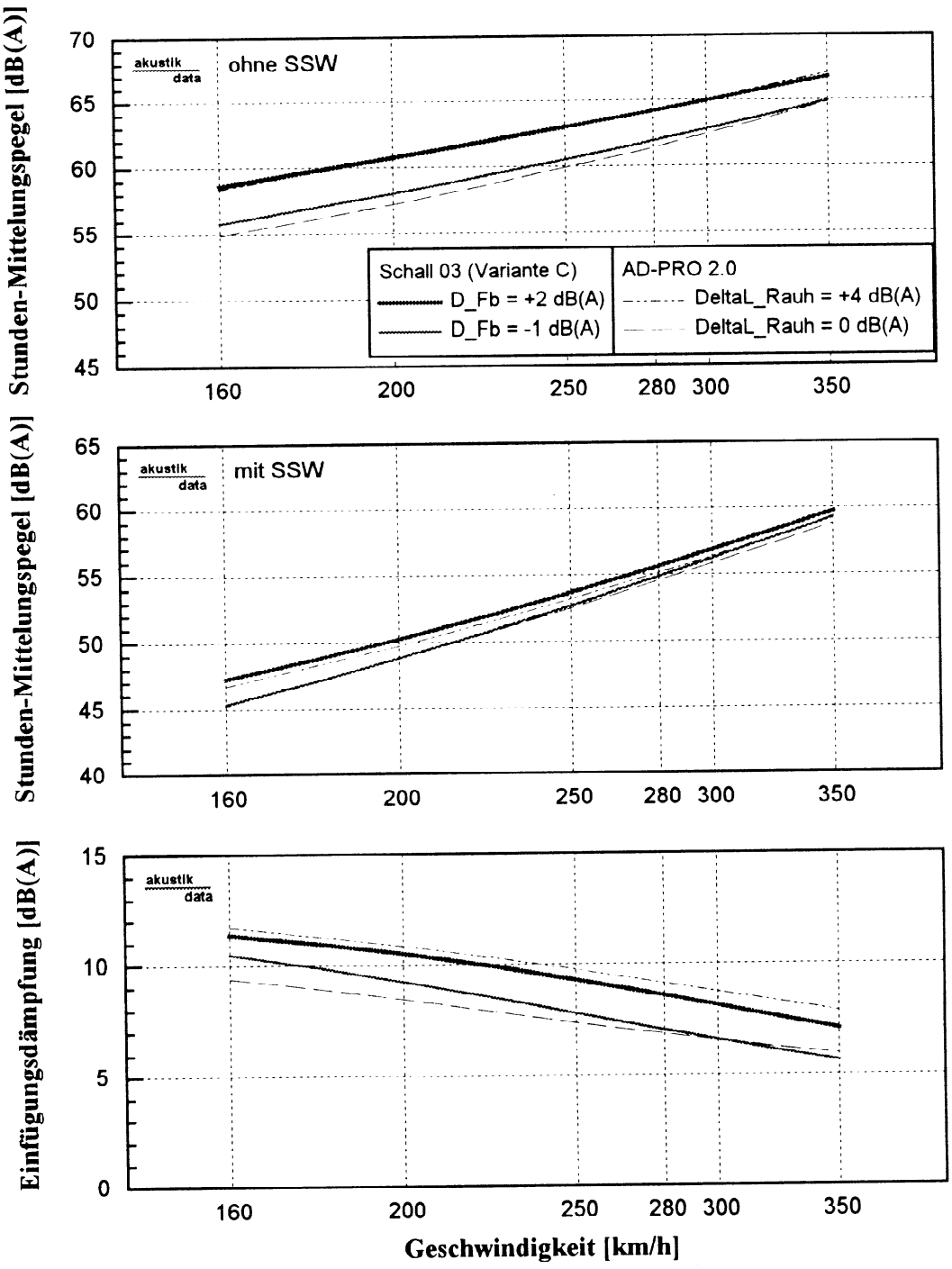


Bild B6 Stunden-Mittelungspegel bei Vorbeifahrt eines ICE 1 pro Stunde in 25 m Entfernung von Gleismitte ohne SSW (oben), mit SSW (Mitte) und deren Differenz (unten); die Pegel sind mittels AD-PRO 2.0 für verschiedene Schienenzustände (ΔL_{Rauh}) prognostiziert bzw. anhand einer **korrigierten Version der Schall 03 (Variante C)** für verschiedene Werte D_{Fb} berechnet

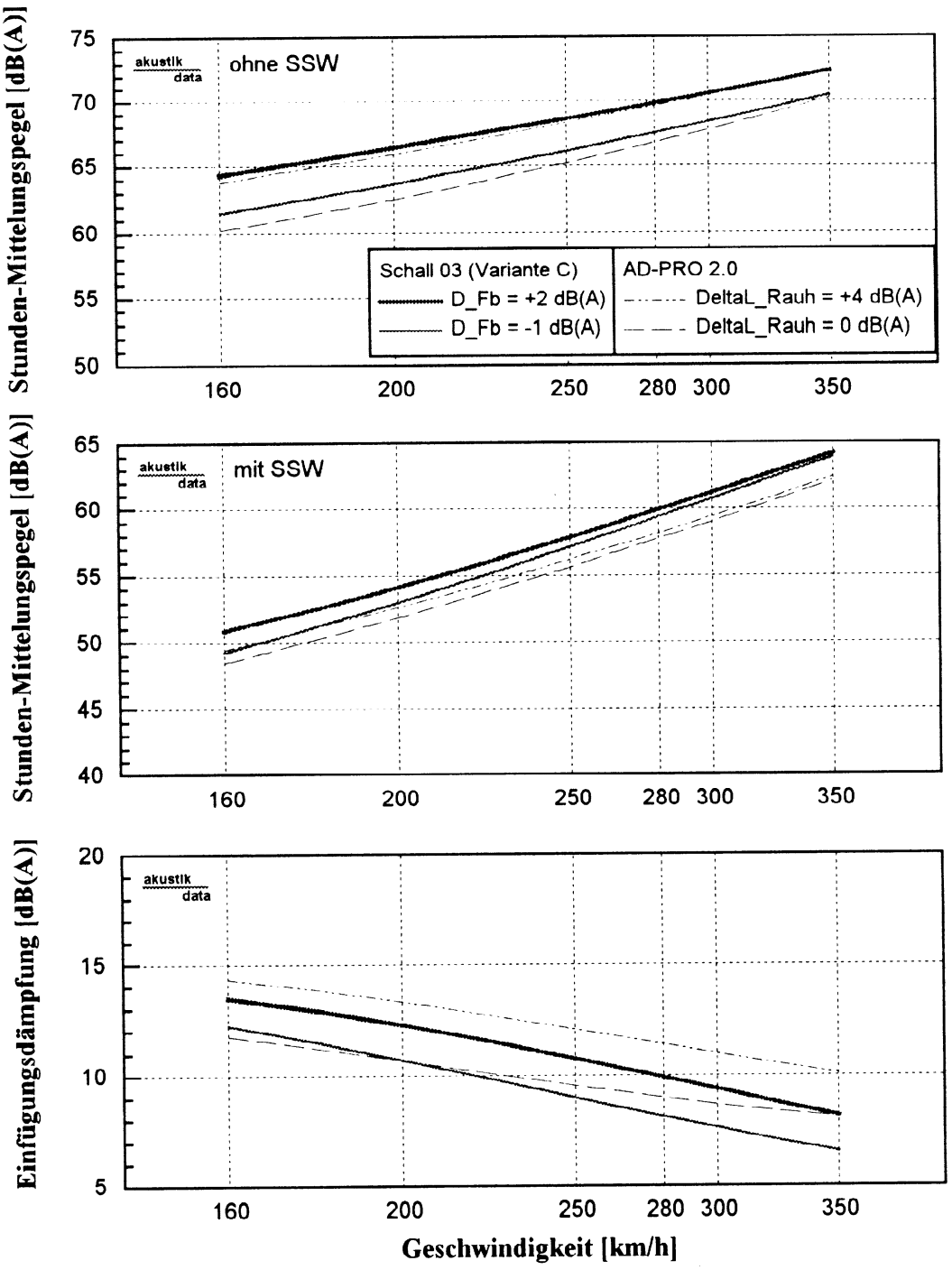


Bild B7 Stunden-Mittelungspegel bei Vorbeifahrt eines ICE 1 pro Stunde in 7,5 m Entfernung von Gleismitte ohne SSW (oben), mit SSW (Mitte) und deren Differenz (unten); die Pegel sind mittels AD-PRO 2.0 für verschiedene Schienenzustände (ΔL_{Rauh}) prognostiziert bzw. anhand einer **korrigierten Version der Schall 03 (Variante C)** für verschiedene Werte D_{Fb} berechnet

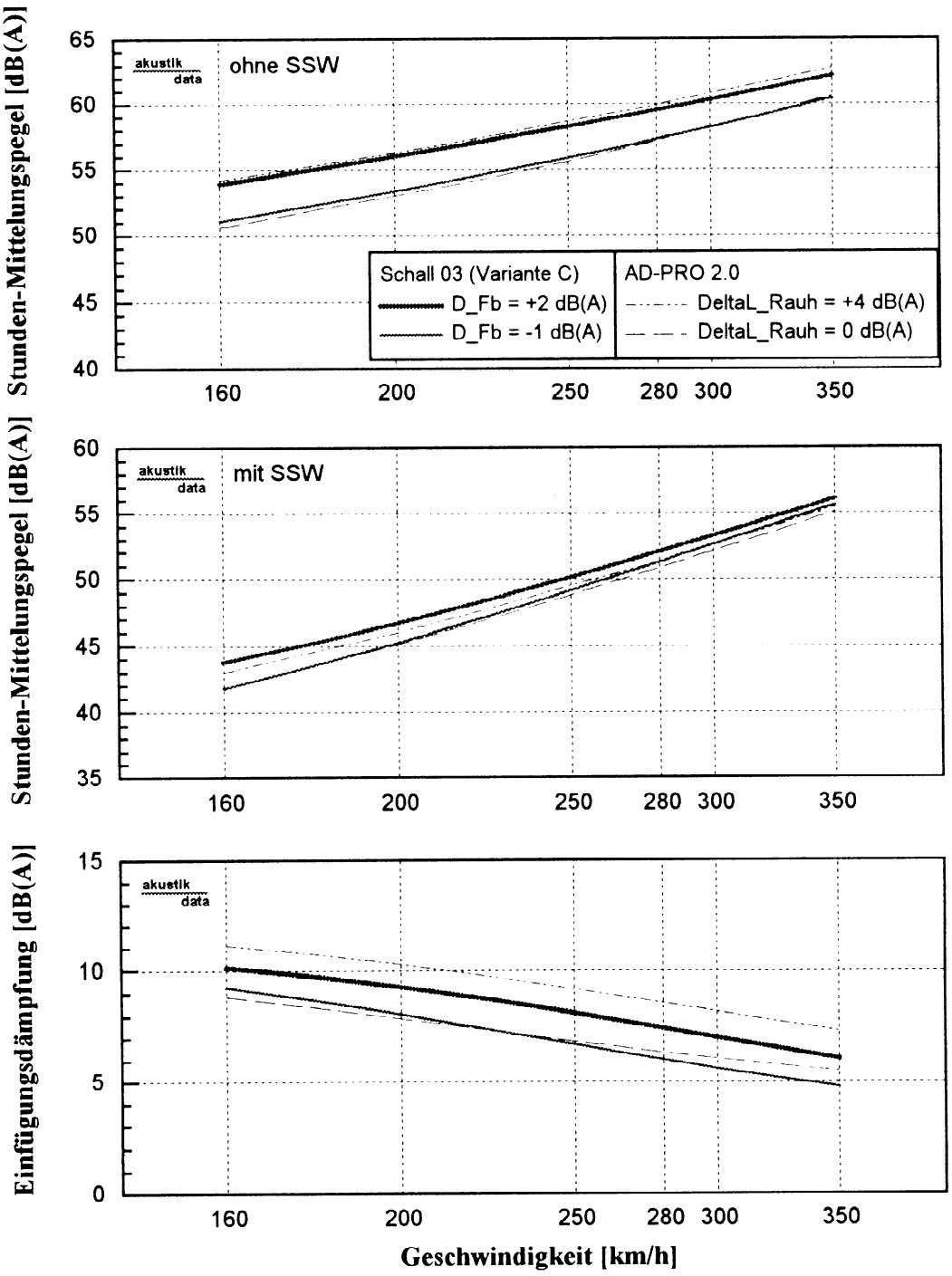


Bild B8 Stunden-Mittelungspegel bei Vorbeifahrt eines ICE 1 pro Stunde in 50 m Entfernung von Gleismitte ohne SSW (oben), mit SSW (Mitte) und deren Differenz (unten); die Pegel sind mittels AD-PRO 2.0 für verschiedene Schienenzustände (ΔL_{Rauh}) prognostiziert bzw. anhand einer **korrigierten Version der Schall 03 (Variante C)** für verschiedene Werte D_{Fb} berechnet

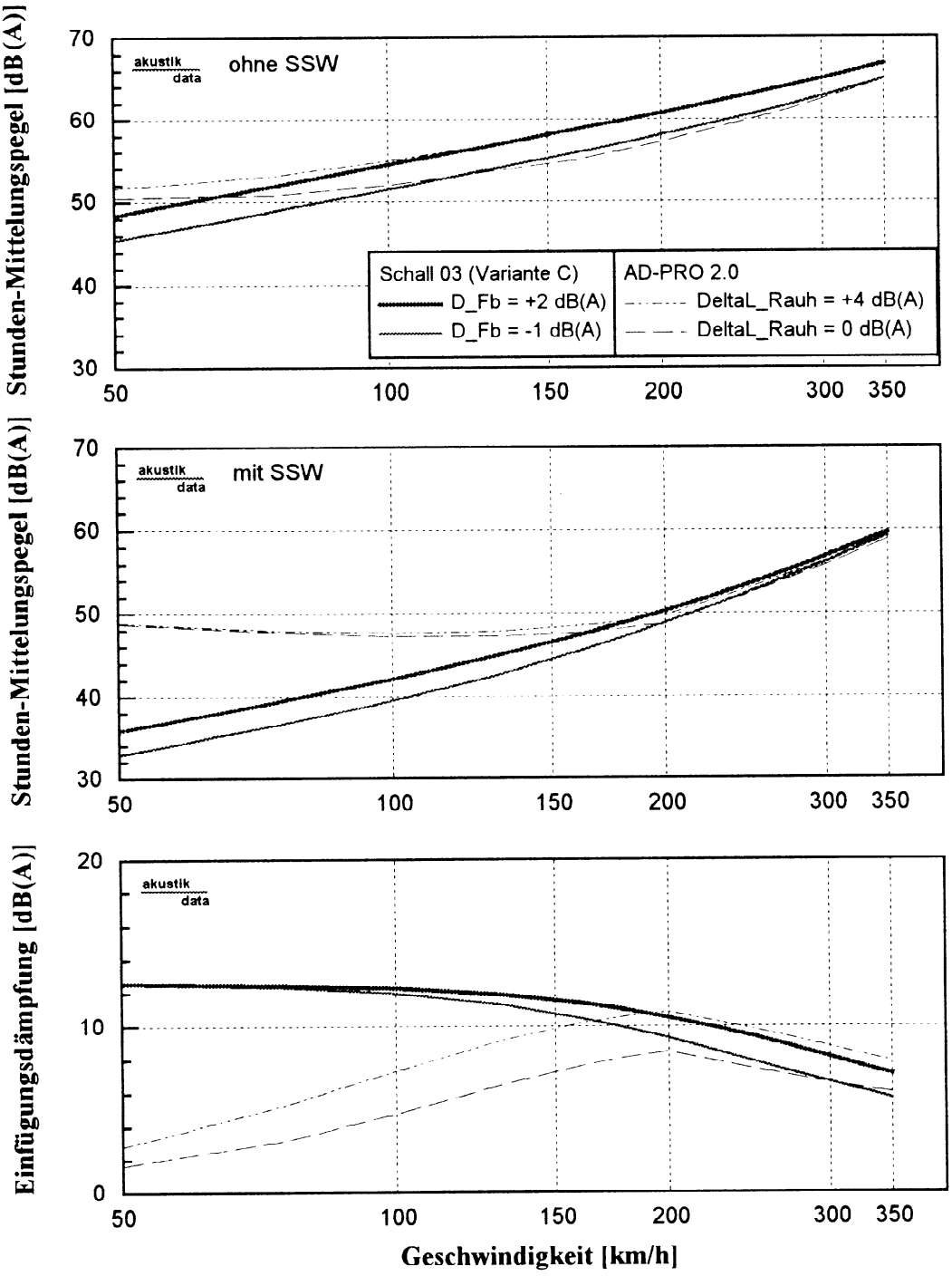


Bild B9 Stunden-Mittelungspegel bei Vorbeifahrt eines ICE 1 pro Stunde in 25 m Entfernung von Gleismitte wie in Bild B6; die Prognose mittels AD-PRO 2.0 enthält eine Abschätzung des Lüftergeräuschs bei niedrigen Geschwindigkeiten; die **korrigierte Version der Schall 03 (Variante C)** ist hieran noch nicht angepaßt

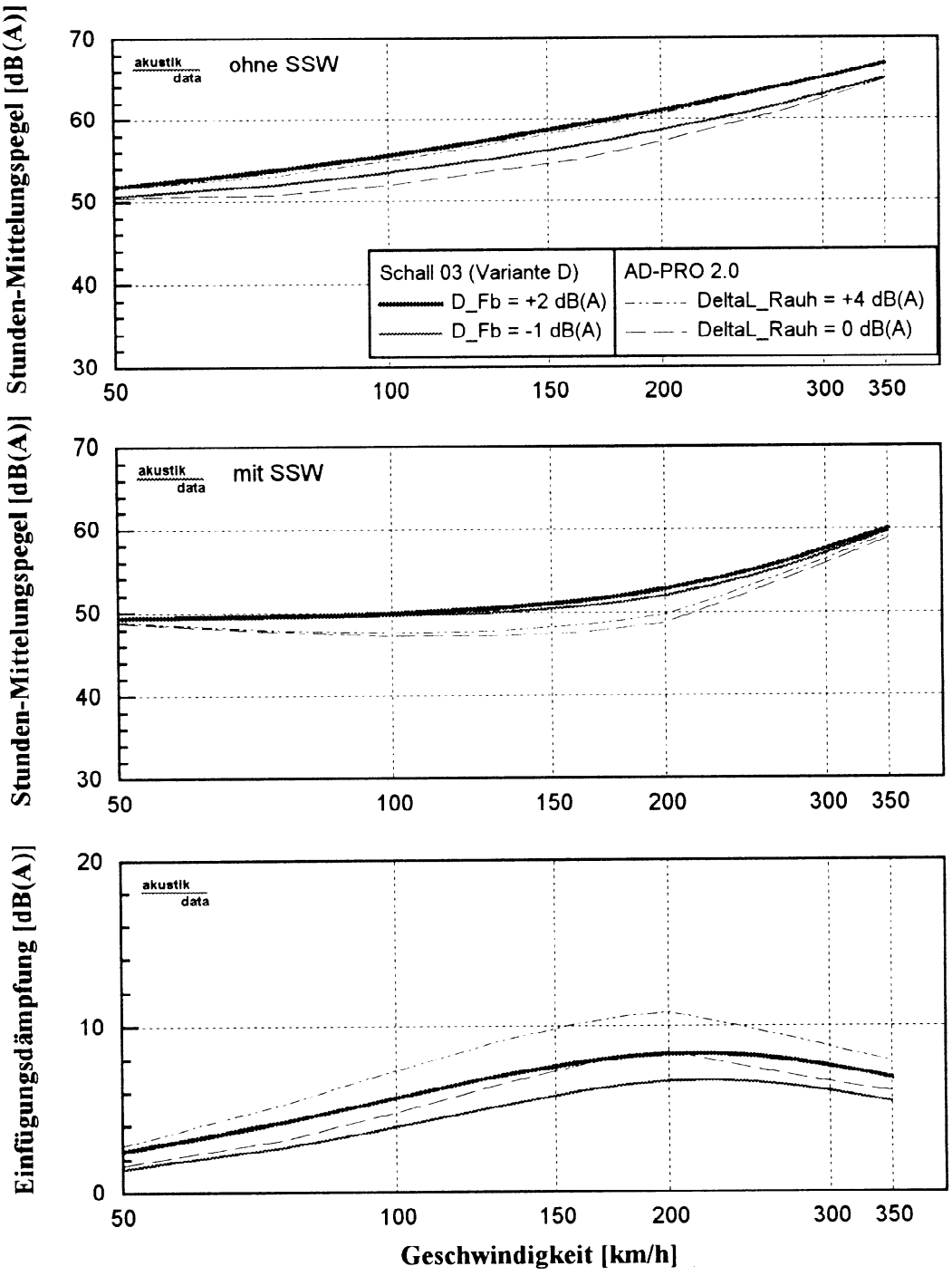


Bild B10 Stunden-Mittelungspegel bei Vorbeifahrt eines ICE 1 pro Stunde in 25 m Entfernung von Gleismitte wie in Bild B6; die Prognose mittels AD-PRO 2.0 enthält eine Abschätzung des Lüftergeräuschs bei niedrigen Geschwindigkeiten; die **korrigierte Version der Schall 03 (Variante D)** ist hieran angepaßt

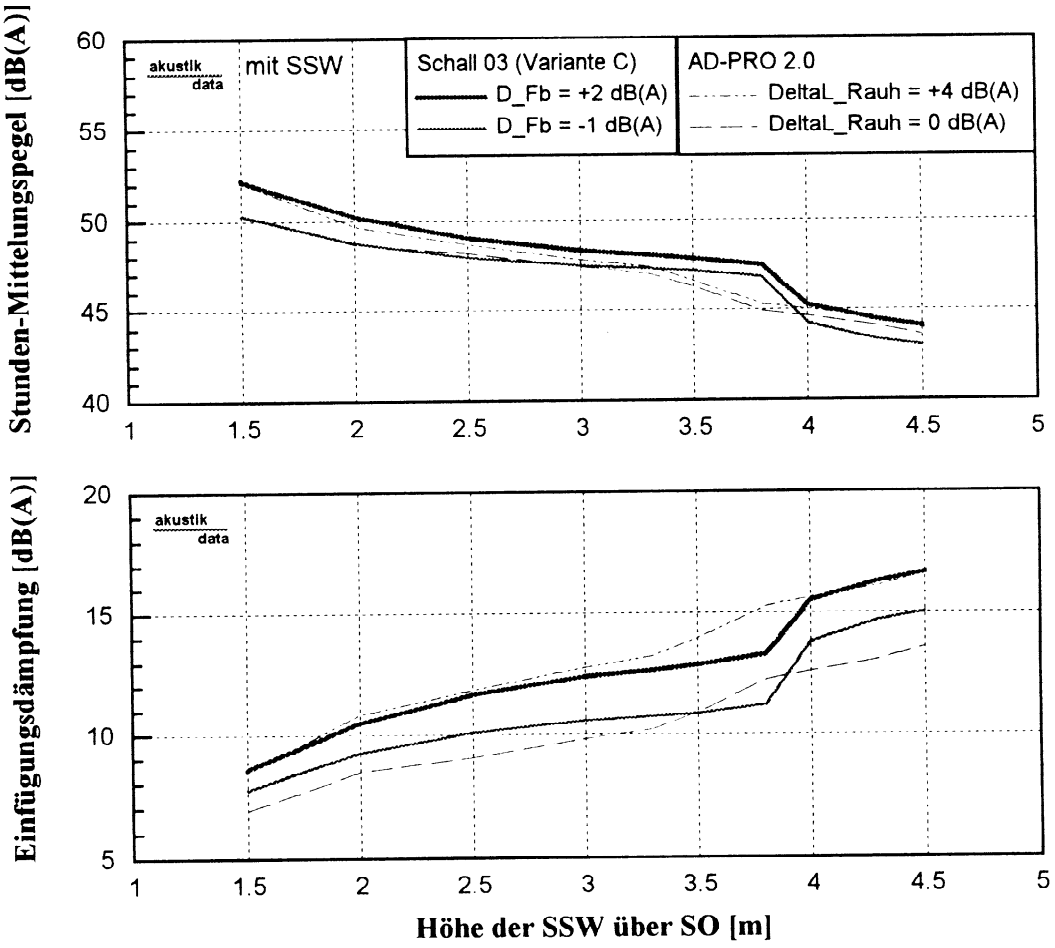


Bild B11 Stunden-Mittelungspegel in 25 m Entfernung von Gleismitte bei Vorbeifahrt eines ICE 1 pro Stunde mit 200 km/h mit SSW (oben) sowie Einfügungsdämpfung (unten) in Abhängigkeit von der Höhe der SSW; die Pegel sind mittels AD-PRO 2.0 für verschiedene Schienenzustände (ΔL_{Rauh}) prognostiziert bzw. anhand einer **korrigierten Version der Schall 03 (Variante C)** für verschiedene Werte D_{Fb} berechnet

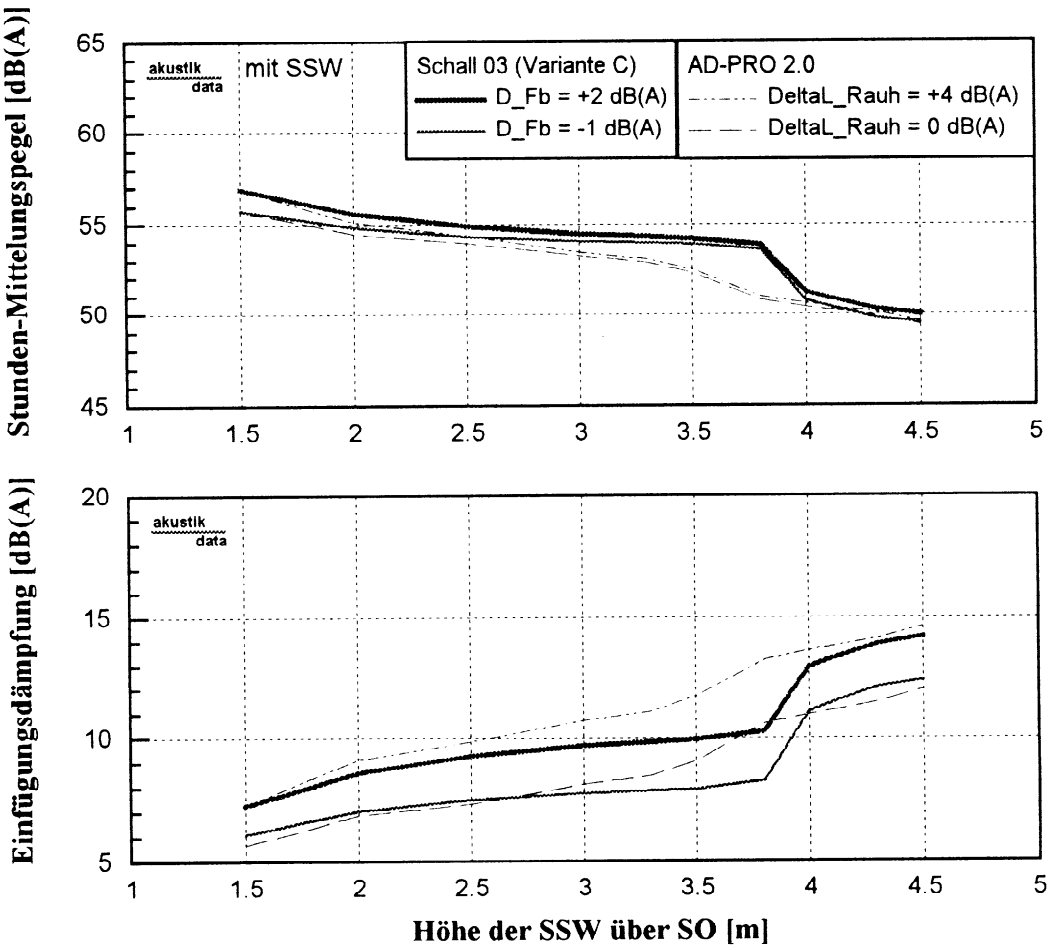


Bild B12 Stunden-Mittelungspegel in 25 m Entfernung von Gleismitte bei Vorbeifahrt eines ICE 1 pro Stunde mit 280 km/h mit SSW (oben) sowie Einfügungsdämpfung (unten) in Abhängigkeit von der Höhe der SSW; die Pegel sind mittels AD-PRO 2.0 für verschiedene Schienenzustände (ΔL_{Rauh}) prognostiziert bzw. anhand einer **korrigierten Version der Schall 03 (Variante C)** für verschiedene Werte D_{Fb} berechnet

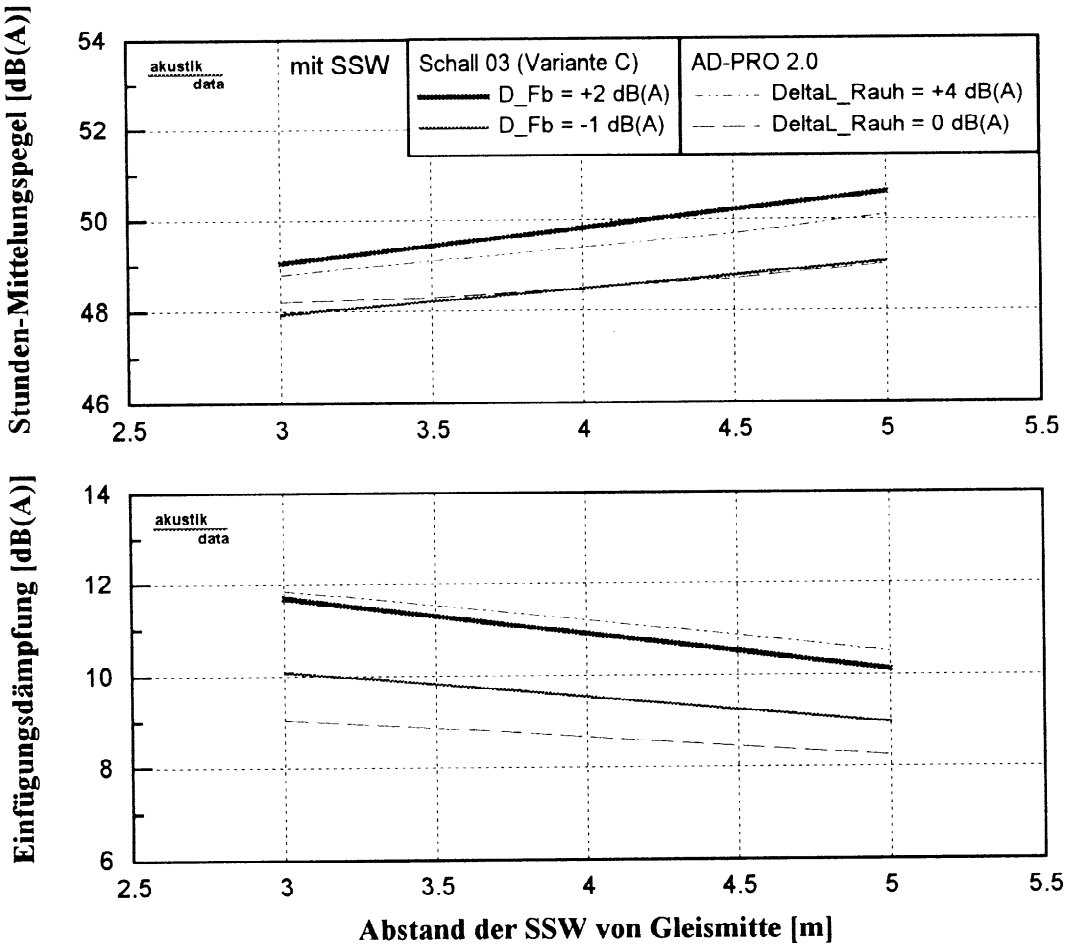


Bild B13 Stunden-Mittelungspegel in 25 m Entfernung von Gleismitte bei Vorbeifahrt eines ICE 1 pro Stunde mit 200 km/h mit SSW (oben) sowie Einfügungsdämpfung (unten) in Abhängigkeit vom Abstand der SSW von Gleismitte; die Pegel sind mittels AD-PRO 2.0 für verschiedene Schienenzustände (ΔL_{Rauh}) prognostiziert bzw. anhand einer **korrigierten Version der Schall 03 (Variante C)** für verschiedene Werte D_{Fb} berechnet

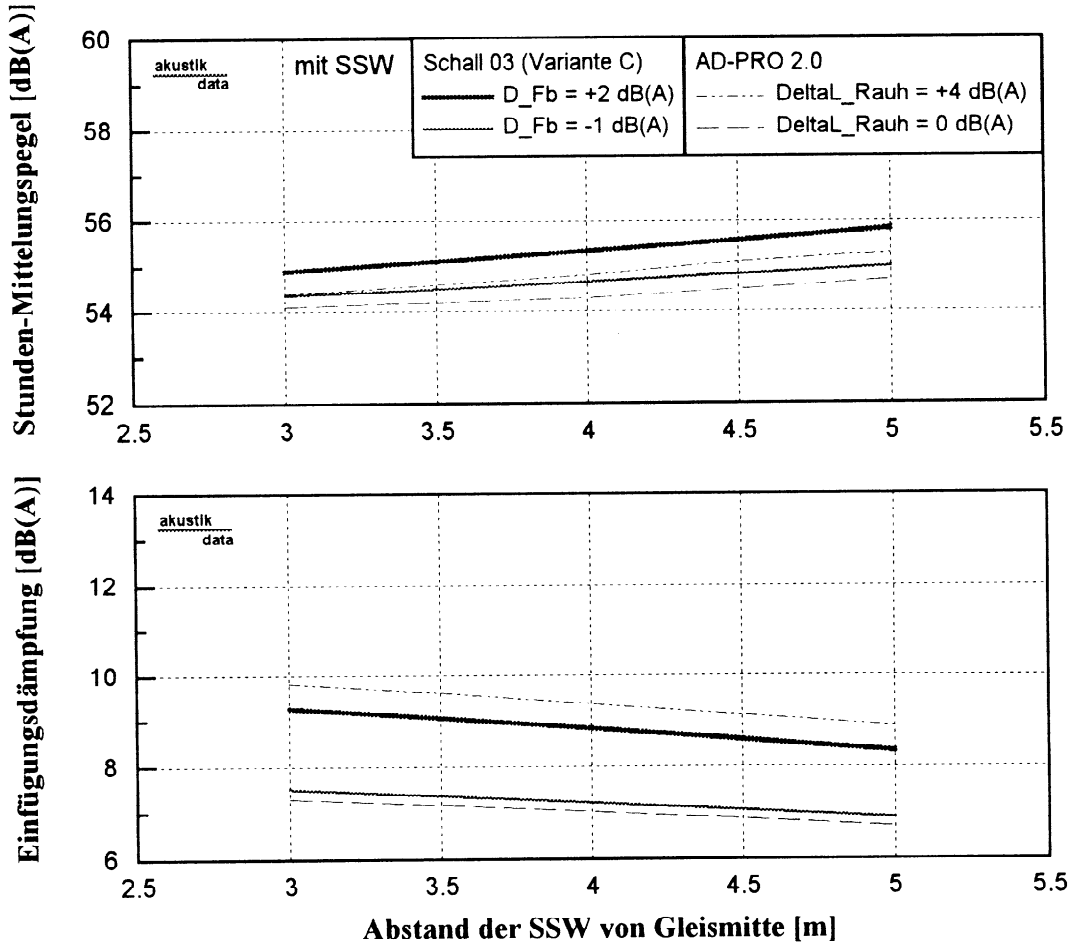


Bild B14 Stunden-Mittelungspegel in 25 m Entfernung von Gleismitte bei Vorbeifahrt eines ICE 1 pro Stunde mit 280 km/h mit SSW (oben) sowie Einfügungsdämpfung (unten) in Abhängigkeit vom Abstand der SSW von Gleismitte; die Pegel sind mittels AD-PRO 2.0 für verschiedene Schienenzustände (ΔL_{Rauh}) prognostiziert bzw. anhand einer **korrigierten Version der Schall 03 (Variante C)** für verschiedene Werte D_{Fb} berechnet

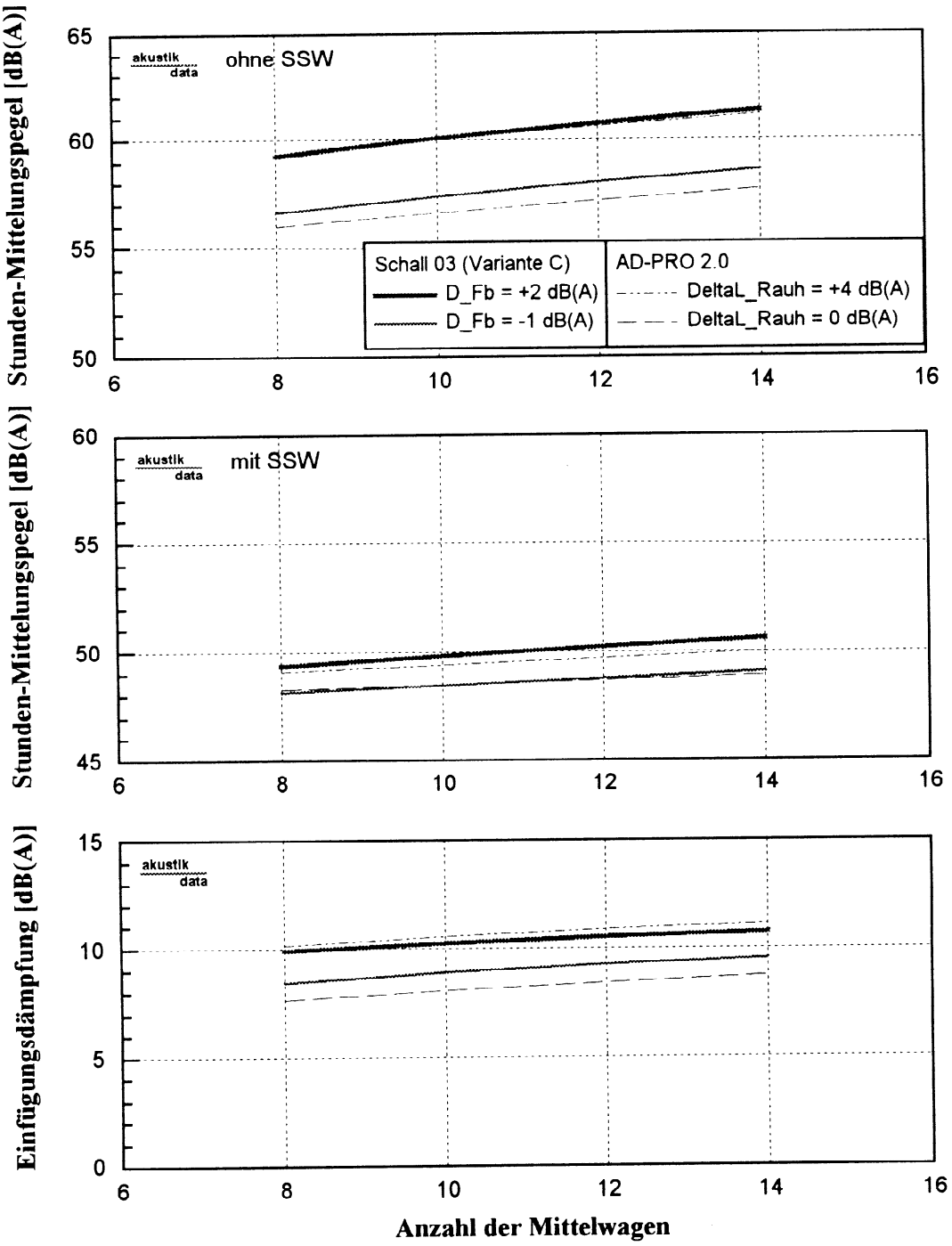


Bild B15 Stunden-Mittelungspegel in 25 m Entfernung von Gleismitte bei Vorbeifahrt eines ICE 1 pro Stunde mit 200 km/h und variabler Anzahl von Mittelwagen ohne SSW (oben), mit SSW (Mitte) und deren Differenz (unten); die Pegel sind mittels AD-PRO 2.0 bzw. anhand einer **korrigierten Version der Schall 03 (Variante C)** berechnet (siehe Bild B6)

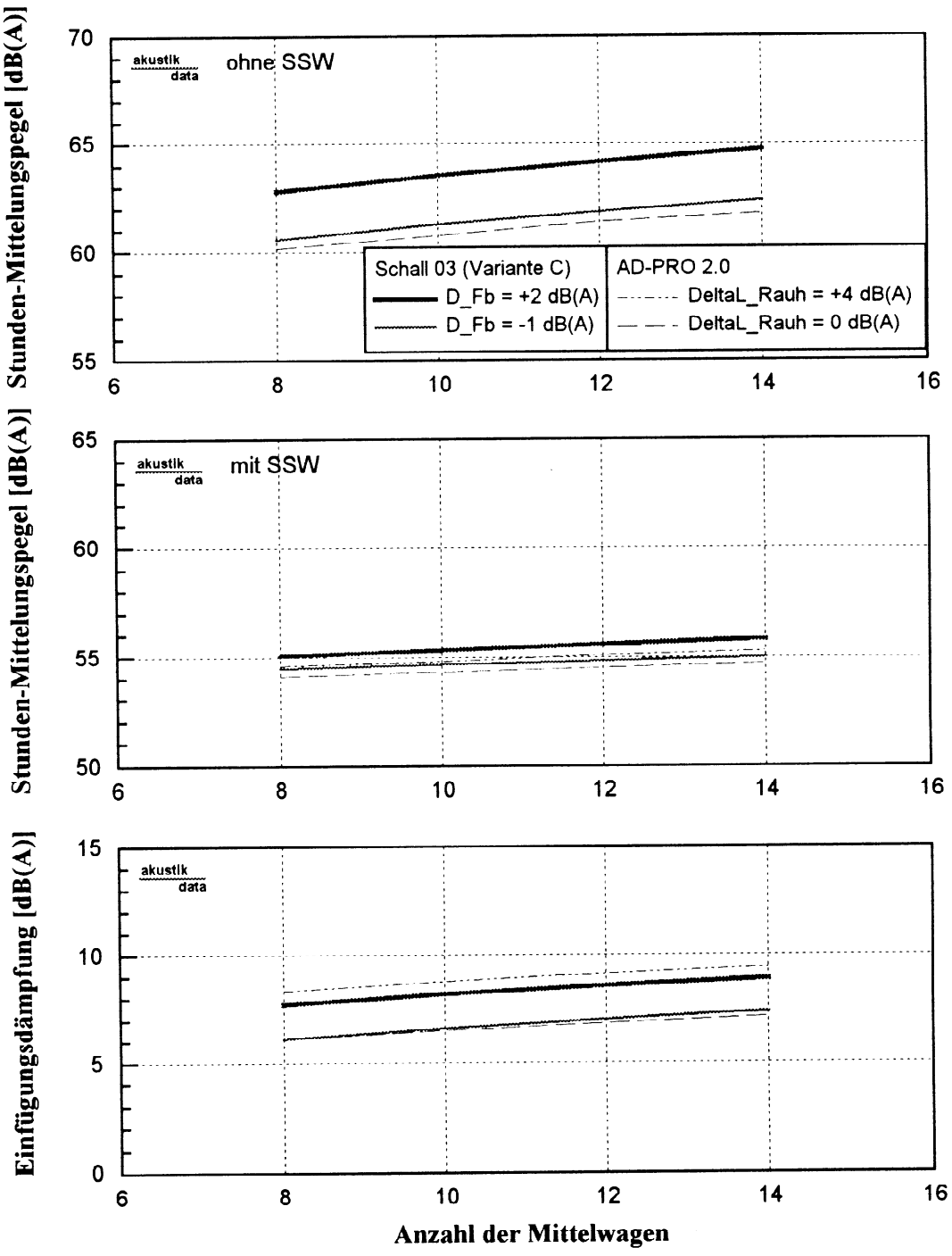


Bild B16 Stunden-Mittelungspegel in 25 m Entfernung von Gleismitte bei Vorbeifahrt eines ICE 1 pro Stunde mit 280 km/h und variabler Anzahl von Mittelwagen ohne SSW (oben), mit SSW (Mitte) und deren Differenz (unten); die Pegel sind mittels AD-PRO 2.0 bzw. anhand einer **korrigierten Version der Schall 03 (Variante C)** berechnet (siehe Bild B6)

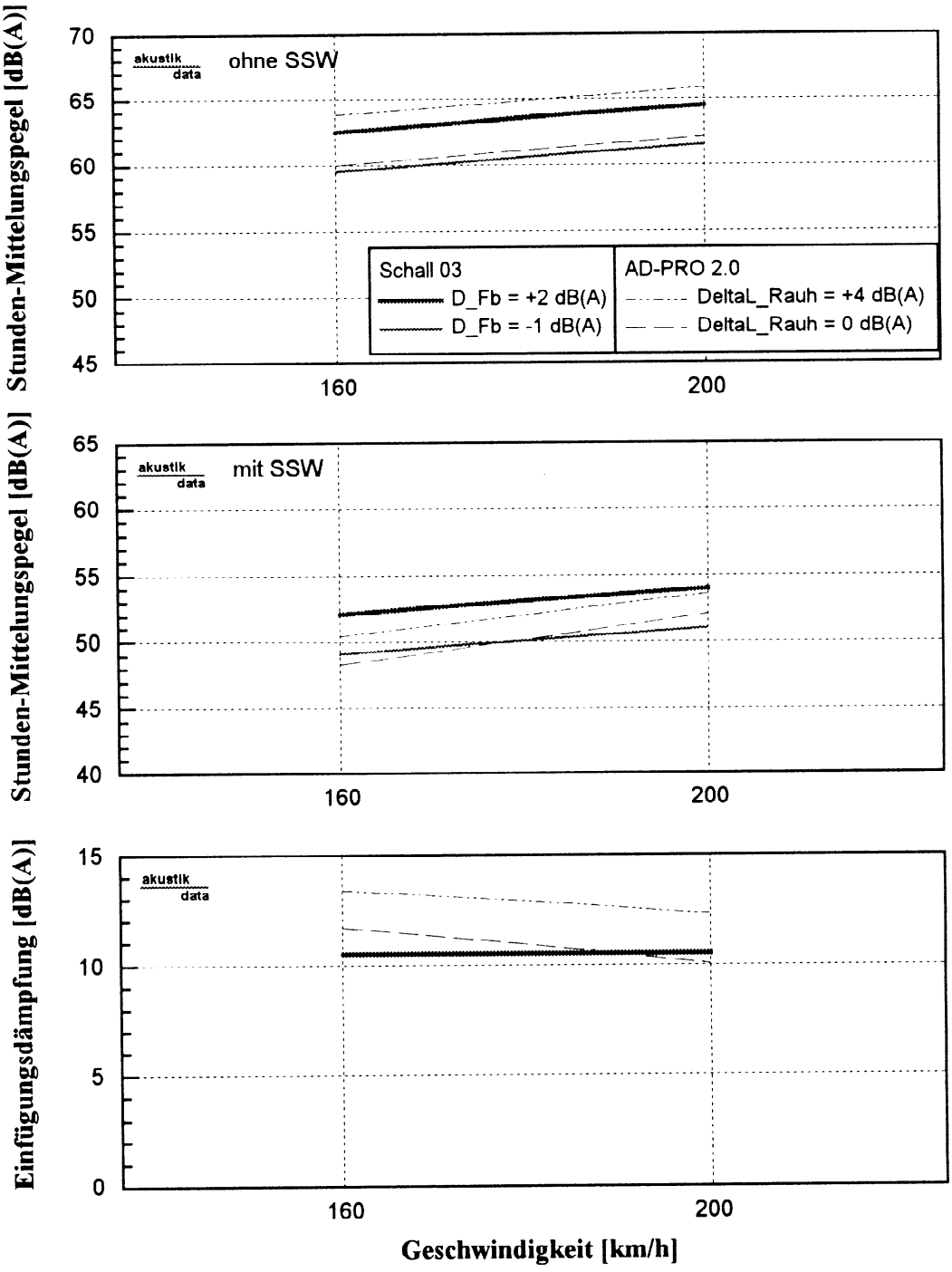


Bild B17 Stunden-Mittelungspegel in 25 m Entfernung von Gleismitte bei Vorbeifahrt eines IC/IR-Zuges mit 8 Wagen pro Stunde ohne SSW (oben), mit SSW (Mitte) und deren Differenz (unten); die Pegel sind mittels AD-PRO 2.0 für verschiedene Schienenzustände (ΔL_{Rauh}) prognostiziert bzw. anhand der **aktuell gültigen Schall 03** für verschiedene Werte D_{Fb} berechnet