

Ingenieurbüro Bonk-Maire-Hoppmann GbR

**Numerische Simulation der
Geräuschemissionen von
Anlieferzonen**

**Abschlussbericht des Förderprojekts Az. 26169
der Deutschen Bundesstiftung Umwelt**

Dipl.-Phys. Dipl.-Ing. Kai Schirmer

Garbsen, den 17. Dezember 2010

Dieser Bericht ist über die Deutsche Bundesstiftung Umwelt, An der Bornau 2, 49090 Osnabrück zu beziehen

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	26169	Referat	21/0	Fördersumme	75.523,00
----	--------------	---------	-------------	-------------	------------------

Antragstitel **Verbesserung der Prognosesicherheit schalltechnischer Berechnungen bei Anlieferzonen zur Verringerung der Lärmimmission**

Stichworte Schallimmissionsschutz

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
27	23.06.2008	23.09.2010	4

Zwischenberichte

Bewilligungsempfänger Bonk-Maire-Hoppmann GbR Rostocker Straße 22 30823 Garbsen	Tel 05137 / 88 95 0
	Fax 05137 / 88 95 95

Projektleitung

Dr. Hoppmann

Bearbeiter

Dipl.-Phys. Dipl.-Ing. Schirmer

Kooperationspartner Technische Universität Braunschweig
Institut für Angewandte Mechanik
Spielmannstr. 11
38106 Braunschweig

Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens

In der Vergangenheit hat sich bei der Erstellung von schalltechnischen Prognoseberechnungen im Bereich des Immissionsschutzes herausgestellt, dass bei Anlieferzonen von Discountern, SB-Märkten, u.v.m. aufgrund der komplexen geometrischen Verhältnisse eine große Unsicherheit bei den prognostizierten Schallimmissionspegeln an der betroffenen nächstgelegenen Wohnbebauung besteht. Insbesondere bei räumlich engen Nachbarschaftsverhältnissen kann hier unter Umständen ein unzureichender Schutz der Anwohner vor Lärmimmissionen bestehen. Ursächlich hierfür ist eine unzureichende rein geometrische Beschreibung der physikalischen Wirklichkeit durch die derzeit verwendeten auf dem Einsatz von PC basierenden Berechnungsverfahren nach dem Stand der Technik. Der bei der Modellbildung nach dem Stand der Technik problematische Teil soll mit einem alternativen, umfassenden Verfahren analysiert werden. Dies Verfahren (BEM) basiert auf einer wellenmechanischen Beschreibung. Standard-situationen sollen modelliert und in ein mit herkömmlicher Software kompatibles Ersatzmodell überführt werden.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Es wurden acht typisierte Anlieferzonen von SB-Märkten, die sich in ihren Abmessungen und Schallabsorptionseigenschaften unterscheiden, untersucht. Zunächst wurden die Situationen mit den herkömmlichen Methoden modelliert. Mittels Schallausbreitungsrechnung mit den Verfahren nach dem Stand der Technik (Strahlverfahren, geometrische Strahlverfolgung, einfache Reflexionsgesetze, Abschätzung von Beugungseinflüssen) kann dann die räumliche Schalldruckpegelverteilung ermittelt werden.

An der Physikalisch Technischen Bundesanstalt in Braunschweig wurden zusätzlich die oben angesprochenen acht Anlieferzonen im Modell-Maßstab 1:8 nachgebaut. Das anregende Schallfeld erzeugte eine Modellschallquelle in einem um den Faktor acht skalierten Frequenzbereich. Die Messergebnisse decken einen Frequenzbereich von 31 Hz bis 4 kHz bezogen auf den realen Maßstab ab. Für jede Modellsituation wurden an 63 festgelegten Messpunkten die Schalldruckpegel in Terzen ermittelt.

Parallel hierzu erfolgten Studien zur numerischen Simulation der acht Fälle. Die Methoden der numerischen Simulation beruhen auf einer näherungsweise Lösung der das jeweilige Problem beschreibenden Differenzialgleichung. Im Fall der akustischen Wellengleichung sind von einer Lösung der Wellengleichung darüber hinaus vorgegebene Randbedingungen zu erfüllen. Solche Randbedingungen können vorgegebene Schalldrücke auf Oberflächen sein. Um diese Randbedingungen einer Lösung der Wellengleichung zu erfüllen ist es zweckmäßig die differenzielle Wellengleichung in eine Integralgleichung zu überführen. In dieser Gleichung bilden die Oberflächen von Strukturen die Integrationsgrenzen. Zur näherungsweise Lösung dieser Integralgleichung werden die Oberflächen der Baukörper der Anlieferzone modelliert und diskretisiert.

Die im Rechner erzeugte Oberflächen-Geometrie wird mit einem Netz überzogen. Überträgt man diese Diskretisierung auf die dem physikalischen Problem zu Grunde liegende Integralgleichung so führt dies zu einem linearen Gleichungssystem welches numerisch gelöst werden kann. Um wellenmechanische Phänomene bei dieser Methode korrekt zu erfassen muss der räumliche Bereich einer Wellenlänge mit mindestens sechs Knoten approximiert werden. Dies hat zur Folge, dass die Knotenanzahl mit der interessierenden Frequenz ansteigt, in gleichem Maße das lineare Gleichungssystem wächst und mit diesem der Speicherplatzbedarf bei der numerischen Lösung ansteigt. Damit ist dieses Verfahren aufgrund der großen geometrischen Abmessungen von Anlieferzonen nur für den unteren Frequenzbereich geeignet. Im weiteren Verlauf des Projekts wurden dann Möglichkeiten untersucht komplexe aber dennoch handhabbare Quellenmodelle (Ersatzquellen) zur Anwendung in Strahlverfahren zu entwickeln, welche die Messergebnisse besser beschreiben als die standardmäßig verwendeten einfachen Quellenmodelle. Zur Ermittlung der kennzeichnenden Emissionsparameter der Ersatzquellen wurde ein lineares Gleichungssystem aufgestellt, welches unter Berücksichtigung der Schallausbreitungsbedingungen einen Zusammenhang zwischen den Einzelquellen eines Ersatzquellenmodells und den 63 oben angesprochenen Messpunkten herstellt. Dieses Gleichungssystem wurde näherungsweise gelöst. Zur Quantifizierung der Qualität der Reproduktion der Messergebnisse durch ein Ersatzquellenmodell mussten darüber hinaus Parameter ermittelt werden, welche die komplexen frequenzabhängigen Verläufe konkurrierender Ersatzquellenmodelle auf übersichtliche Einzahlwerte reduzieren. Hierzu wurden jeweils die Konditionszahl des linearen Gleichungssystems und die mittlere quadratische Abweichung zwischen Messergebnis und Schallfeld der Ersatzquelle bestimmt.

Ergebnisse und Diskussion

Um eine Verbesserung bei der Beschreibung der Schallabstrahlung von Anlieferzonen zu erhalten muss zunächst die Realitätsnähe der mit Einsatz des Strahlverfahrens gewonnenen Berechnungsergebnisse analysiert werden. Hierzu wurden die von der Physikalisch Technischen Bundesanstalt in Braunschweig gewonnenen Ergebnisse der Modellmessungen verwendet. Im Allgemeinen gleicht das Verhalten des Schalls bei der Ausbreitung mit zunehmender Frequenz dem eines Strahls. Somit war ein monotoner Verlauf der gemessenen Spektren im höherfrequenten Bereich erwartet worden. Der gemessene Verlauf der Spektren weist im gesamten Frequenzbereich Maxima und Minima auf. Diese lassen sich als Resonanzen im Schallfeld deuten. Dieses Ergebnis ist in dieser Form überraschend. Vergleicht man die Messergebnisse mit den Berechnungsergebnissen herkömmlicher strahlbasierter Schallausbreitungsmodelle so zeigt sich, dass die Messergebnisse durch keines der einfachen Quellenmodelle exakt oder auch nur näherungsweise beschrieben werden können. Der Grund liegt darin, dass wellenmechanische Eigenschaften bei den untersuchten Fällen offenbar über den gesamten Frequenzbereich eine Rolle spielen. Die jeweiligen Abweichungen der Berechnungsergebnisse von den Messergebnissen betragen rd. 5 dB. Bei der Erstellung eines Ersatzquellenmodells ergibt sich die zunächst paradox erscheinende Aufgabe u.a. Resonanzphänomene durch eine entsprechende Quellmodellierung mit einem Strahlverfahren abbilden zu wollen. Die ist näherungsweise möglich. In Parameterstudien zeigte sich, dass kein erkennbarer systematischer Zusammenhang zwischen Anzahl und Anordnung der Ersatzquellen und der Konditionszahl besteht. Die Generierung eines Ersatzquellenmodells folgte als Konsequenz dieses Sachverhalts vielmehr physikalischen Überlegungen im jeweiligen Einzelfall. Weiterhin musste die Handhabung des jeweiligen Modells abgewogen werden. Zur besseren Handhabung wurde die Anzahl der Einzelquellen der Ersatzquelle soweit wie möglich reduziert. Darüber hinaus wurde bei der Entwicklung des Ersatzquellenmodells darauf geachtet, dass dieses an geringe Veränderungen der Geometrie anpassbar ist. Als Ergebnis wurde für jede Situation ein Ersatzquellenmodell bestehend aus 5 Einzelquellen mit jeweils charakteristischen Frequenzgängen entwickelt.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die grundsätzliche Vorgehensweise sowie Teilergebnisse wurden auf den Jahrestagungen der Deutschen Akustischen Gesellschaft 2009 und 2010 und dem „17. international congress of sound and vibration“ in Kairo vorgestellt und in den jeweiligen Konferenzmanuskripten veröffentlicht. Das Projekt wurde in einem Beitrag „Krach vom Jogurtbecher“ von „Forschung aktuell“ am 25.08.2010 um 16:30 im Deutschlandfunk vorgestellt.

Fazit

Es ist grundsätzlich möglich Schalldruckpegelverteilungen, welche mit wellenmechanischen Verfahren für geometrische Situationen ermittelt wurden, durch eine entsprechende Verteilung von Punktschallquellen zur Verwendung in Strahlverfahren näherungsweise zu beschreiben. Für den Fall von Anlieferzonen führt eine auf Messergebnissen basierende Modellierung gegenüber der herkömmlichen zu einer Verbesserung in den A-bewerteten Pegeln von 1-5 dB(A). Die numerische Simulation mittels Randelementmethode kann beim derzeitigen Stand nur für den unteren Frequenzbereich für die Interpretation des Verhaltens des Schallfelds herangezogen werden.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	5
1 Zusammenfassung	8
2 Einleitung	9
2.1 Beispiele zu Anlieferzonen	11
2.2 Modellvarianten	12
3 Hauptteil	15
3.1 Schallimmissionsprognosen	15
3.1.1 Allgemeine Anforderungen	15
3.1.2 Schallfeldgrößen in der technischen Akustik	15
3.1.3 Beschreibung der Schallausbreitung nach DIN ISO 9613-2	18
3.1.4 Diffuses Schallfeld - Abstrahlung nach VDI 2571	21
3.2 Modellbildung bei Anlieferzonen	24
3.2.1 Schallquellen bei Anlieferprozessen	24
3.2.2 Beschreibung der Emission durch eine Punktschallquelle	24
3.2.3 Ergebnis der Immissionsberechnung	25
3.2.4 Modellanpassung - Beschreibung der Emissionen durch Flächenquelle	25
3.2.5 Ergebnis nach Modellanpassung	26
3.2.6 Schlussfolgerung	26
3.3 Modellmessungen	27
3.3.1 Aufbau	27
3.3.2 Durchführung	27
3.3.3 Ergebnisse der Modellmessungen	28
3.4 Ersatzquellenmodell	35
3.4.1 Prinzip der Ersatzquelle	35
3.4.2 Qualität der Approximation durch eine Ersatzschallquelle	35
3.4.3 Verringerung der Komplexität	36
3.4.3.1 Methode der Fundamentallösung	36
3.4.3.2 Singulärwertzerlegung - Pseudoinverse	38
3.4.3.3 Die Konditionszahl	38
3.4.4 Ergebnis: Reduzierte Ersatzquellen	39
3.5 Die Randelement-Methode	43
3.5.1 Grundlagen	43
3.5.1.1 Diskretisierung	45
3.5.1.2 Außenraumprobleme	47
3.5.1.3 Innenpunktauswertung	48
3.5.1.4 Zusammenhang der Quellstärke mit der akustischen Leistung	49
3.5.2 Anwendung der Randelement-Methode auf Anlieferzonen	49
4 Fazit	53
A Ersatzquelle Fall 1	56
B Ersatzquelle Fall 2	58

C Ersatzquelle Fall 3	60
D Ersatzquelle Fall 4	62
E Ersatzquelle Fall 1 mit Absorption	64
F Ersatzquelle Fall 2 mit Absorption	66
G Ersatzquelle Fall 3 mit Absorption	68
H Ersatzquelle Fall 4 mit Absorption	70
I Messergebnisse Fall 1	72
J Messergebnisse Fall 2	79
K Messergebnisse Fall 3	86
L Messergebnisse Fall 4	93
M Messergebnisse Fall 1 mit Absorption	100
N Messergebnisse Fall 2 mit Absorption	107
O Messergebnisse Fall 3 mit Absorption	114
P Messergebnisse Fall 4 mit Absorption	121

Tabellenverzeichnis

3.1	Ergebnisübersicht mit mittlerer quadratischer Abweichung	41
A.1	Koordinaten der Einzelquellen - Fall 1	56
A.2	Frequenzen 31Hz bis 200Hz	57
A.3	Frequenzen 250Hz bis 1.6kHz	57
A.4	Frequenzen 2kHz bis 4kHz	57
B.1	Koordinaten der Einzelquellen - Fall 2	58
B.2	Frequenzen 31Hz bis 200Hz	59
B.3	Frequenzen 250Hz bis 1.6kHz	59
B.4	Frequenzen 2kHz bis 4kHz	59
C.1	Koordinaten der Einzelquellen - Fall 3	60
C.2	Frequenzen 31Hz bis 200Hz	61
C.3	Frequenzen 250Hz bis 1.6kHz	61
C.4	Frequenzen 2kHz bis 4kHz	61
D.1	Koordinaten der Einzelquellen - Fall 4	62
D.2	Frequenzen 31Hz bis 200Hz	63
D.3	Frequenzen 250Hz bis 1.6kHz	63
D.4	Frequenzen 2kHz bis 4kHz	63
E.1	Koordinaten der Einzelquellen - Fall 1 mit Absorption	64
E.2	Frequenzen 31Hz bis 200Hz	65
E.3	Frequenzen 250Hz bis 1.6kHz	65
E.4	Frequenzen 2kHz bis 4kHz	65
F.1	Koordinaten der Einzelquellen - Fall 2 mit Absorption	66
F.2	Frequenzen 31Hz bis 200Hz	67
F.3	Frequenzen 250Hz bis 1.6kHz	67
F.4	Frequenzen 2kHz bis 4kHz	67
G.1	Koordinaten der Einzelquellen - Fall 3 mit Absorption	68
G.2	Frequenzen 31Hz bis 200Hz	69
G.3	Frequenzen 250Hz bis 1.6kHz	69
G.4	Frequenzen 2kHz bis 4kHz	69
H.1	Koordinaten der Einzelquellen - Fall 4 mit Absorption	70
H.2	Frequenzen 31Hz bis 200Hz	71
H.3	Frequenzen 250Hz bis 1.6kHz	71
H.4	Frequenzen 2kHz bis 4kHz	71
I.1	Auf Eingangsschallleistung normierte Messergebnisse Fall 1 - 250Hz-1,6kHz	73
I.2	Auf Eingangsschallleistung normierte Messergebnisse Fall 1 - 250Hz-1,6kHz	74
I.3	Auf Eingangsschallleistung normierte Messergebnisse Fall 1 - 2kHz-12,5kHz	75
I.4	Auf Eingangsschallleistung normierte Messergebnisse Fall 1 - 2kHz-12,5kHz	76
I.5	Auf Eingangsschallleistung normierte Messergebnisse Fall 1 - 16kHz-40kHz	77
I.6	Auf Eingangsschallleistung normierte Messergebnisse Fall 1 - 16kHz-40kHz	78
J.1	Auf Eingangsschallleistung normierte Messergebnisse Fall 2 - 250Hz-1,6kHz	80
J.2	Auf Eingangsschallleistung normierte Messergebnisse Fall 2 - 250Hz-1,6kHz	81

J.3	Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse	Fall 2 - 2kHz-12,5kHz	. . . .	82
J.4	Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse	Fall 2 - 2kHz-12,5kHz	. . . .	83
J.5	Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse	Fall 2 - 16kHz-40kHz	. . . .	84
J.6	Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse	Fall 2 - 16kHz-40kHz	. . . .	85
K.1	Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse	Fall 3 - 250Hz-1,6kHz	. . . .	87
K.2	Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse	Fall 3 - 250Hz-1,6kHz	. . . .	88
K.3	Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse	Fall 3 - 2kHz-12,5kHz	. . . .	89
K.4	Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse	Fall 3 - 2kHz-12,5kHz	. . . .	90
K.5	Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse	Fall 3 - 16kHz-40kHz	. . . .	91
K.6	Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse	Fall 3 - 16kHz-40kHz	. . . .	92
L.1	Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse	Fall 4 - 250Hz-1,6kHz	. . . .	94
L.2	Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse	Fall 4 - 250Hz-1,6kHz	. . . .	95
L.3	Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse	Fall 4 - 2kHz-12,5kHz	. . . .	96
L.4	Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse	Fall 4 - 2kHz-12,5kHz	. . . .	97
L.5	Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse	Fall 4 - 16kHz-40kHz	. . . .	98
L.6	Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse	Fall 4 - 16kHz-40kHz	. . . .	99
M.1	Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse	Fall 1 abs - 250Hz-1,6kHz	. .	101
M.2	Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse	Fall 1 abs - 250Hz-1,6kHz	. .	102
M.3	Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse	Fall 1 abs - 2kHz-12,5kHz	. .	103
M.4	Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse	Fall 1 abs - 2kHz-12,5kHz	. .	104
M.5	Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse	Fall 1 abs - 16kHz-40kHz	. .	105
M.6	Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse	Fall 1 abs - 16kHz-40kHz	. .	106
N.1	Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse	Fall 2 abs - 250Hz-1,6kHz	. .	108
N.2	Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse	Fall 2 abs - 250Hz-1,6kHz	. .	109
N.3	Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse	Fall 2 abs - 2kHz-12,5kHz	. .	110
N.4	Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse	Fall 2 abs - 2kHz-12,5kHz	. .	111
N.5	Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse	Fall 2 abs - 16kHz-40kHz	. .	112
N.6	Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse	Fall 2 abs - 16kHz-40kHz	. .	113
O.1	Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse	Fall 3 abs - 250Hz-1,6kHz	. .	115
O.2	Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse	Fall 3 abs - 250Hz-1,6kHz	. .	116
O.3	Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse	Fall 3 abs - 2kHz-12,5kHz	. .	117
O.4	Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse	Fall 3 abs - 2kHz-12,5kHz	. .	118
O.5	Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse	Fall 3 abs - 16kHz-40kHz	. .	119
O.6	Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse	Fall 3 abs - 16kHz-40kHz	. .	120
P.1	Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse	Fall 4 abs - 250Hz-1,6kHz	. .	122
P.2	Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse	Fall 4 abs - 250Hz-1,6kHz	. .	123
P.3	Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse	Fall 4 abs - 2kHz-12,5kHz	. .	124
P.4	Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse	Fall 4 abs - 2kHz-12,5kHz	. .	125
P.5	Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse	Fall 4 abs - 16kHz-40kHz	. .	126
P.6	Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse	Fall 4 abs - 16kHz-40kHz	. .	127

Verwendete Begriffe und Definitionen

dB(A):

Kurzzeichen für Dezibel, bezeichnet Pegel dessen Wert mit der Frequenzbewertung „A“ ermittelt wurde

Emissionspegel:

Bezugspegel zur Beschreibung der Schallabstrahlung einer Geräuschquelle

Mittelungspegel L_m in dB(A):

äquivalenter Mittelwert der Geräuschimmissionen; I.d.R. unter Einbeziehung der Schallausbreitungsbedingungen; d.h. unter Beachtung von Ausbreitungsdämpfung, Abschirmungen und Reflexionen.

Beurteilungspegel in dB(A):

Mittelungspegel von Geräuschimmissionen; ggf. korrigiert um Pegelzu- oder -abschläge. Z.B. Zuschlag für Impulshaltigkeit, Tonhaltigkeit, besondere Störwirkung, ...

Immissionsgrenzwert (IGW):

Grenzwert für Verkehrslärmimmissionen nach § 2 der 16. BImSchV

Orientierungswert (OW):

Anhaltswert für die städtebauliche Planung nach Beiblatt 1 zu DIN 18005

Immissionsrichtwert (IRW):

Richtwert für die Beurteilung von Anlagengeräuschen oder vergleichbaren Geräuschimmissionen (Freizeitlärm usw.); vgl. z.B. T.A.Lärm

Effektivwert:

Zeitlich integrierter Wert des Quadrats des Schalldrucks - Maß für den Energiegehalt eines Geräuschs

Schalldruckpegel

Zehnfache des dekadischen Logarithmus des auf einen Bezugswert normierten Effektivwerts des Quadrats des Schalldrucks

Schalleistungspegel

Zehnfache des dekadischen Logarithmus der auf einen Bezugswert normierten Effektivwerts der Schalleistung

lg

dekadischer Logarithmus (Logarithmus zur Basis 10)

Kapitel 1

Zusammenfassung

Bei der Ansiedlung von Nahversorgungsmärkten ist im Rahmen des Baugenehmigungsverfahrens auf Grundlage des Bundes-Immissionsschutzgesetzes zur Erteilung der Baugenehmigung häufig eine Schallimmissionsprognose zu erstellen. Mögliche Immissionskonflikte müssen vorzeitig erkannt, deren Lösung muss durch Planung entsprechender Maßnahmen vorab sichergestellt werden. Immissionsprognosen erfolgen durch eine computergestützte rechnerische Prognose.

Bei diesen Prognoseberechnungen werden Schallausbreitungsmodelle angewendet, welche als Stand der Technik angesehen werden können und in einschlägigen Richtlinien festgelegt sind. Diese Schallausbreitungsmodelle bedienen sich des Strahlenmodells bei der Beschreibung der Schallausbreitung. Bei der Konstruktion der Schallwege werden die Umgebungseinflüsse wie Reflexion, Abschirmung und ggf. Absorption ausgewertet. Diese Vorgehensweise, in Verbindung mit der Anwendung der Schallausbreitungsmodelle, beinhaltet bereits eine starke Abstraktion bzw. Vereinfachung der physikalischen Realität. Aus dieser Konstruktion der Schallwege resultiert somit eine verfahrensbedingte Ungenauigkeit bei der Prognose von Schallfeldern resp. Schalldruckpegeln welche mit zunehmender Komplexität der Situation ansteigt. Bei Situationen, in denen die Ergebnisse der Prognoseberechnungen offensichtlich unphysikalisch sind, kann zum Teil unter Annahme bestimmter physikalischer Eigenschaften des Schallfeldes (Diffusfeld) eine Anpassung der Quellgeometrie zur Verbesserung der Prognose erfolgen. Ein Beispiel für eine Situation mit hoher geometrischer Komplexität stellt eine Anlieferzone der oben angesprochenen Nahversorgungsmärkte dar. Von diesen Anlieferzonen gehen aber besonders störende und im Tagesmittel pegelbestimmende Geräusche aus. Gerade hier ist eine möglichst exakte Prognose von Schalldruckpegeln wünschenswert. Wie gut die üblicherweise verwendete, oben angesprochene Anpassung der Quellgeometrie die Realität tatsächlich beschreibt, ist offen.

Zur Klärung dieses Sachverhalts sind an der Physikalisch Technischen Bundesanstalt in Braunschweig Modellmessungen an einer verkleinerten und abstrahierten Anlieferzone durchgeführt und mit den Berechnungsergebnissen üblicherweise verwendeter Prognosemodelle verglichen worden. Es wurden, je nach Situation, mittlere Abweichungen zwischen Prognoseberechnung und Messung von 4 dB(A) bis 10 dB(A) festgestellt. Zur Reduzierung dieser mittleren Abweichungen der Prognoseberechnungen von den Messergebnissen ist eine weitere Verfeinerung der die akustische Situation beschreibende Quellgeometrie vorgenommen worden. In einem halbempirischen Verfahren wurden für verschiedene Ausprägungen von Anlieferzonen spezifische Quellgeometrien (Ersatzquellen) gefunden, welche eine bessere Beschreibung des tatsächlich vorliegenden Schallfeldes von Anliefervorgängen an Anlieferzonen erlauben. Darüber hinaus wurden Möglichkeiten untersucht die gewonnenen Messergebnisse durch eine numerische Simulation der vermessenen Situationen zu gewinnen. Hierzu wurde in Zusammenarbeit mit dem Institut für Angewandte Mechanik der Universität Braunschweig die Randelementmethode in Kombination mit einem parallel arbeitenden Gleichungslöser verwendet. Die jeweiligen Schallfelder der untersuchten Fälle konnten mit dieser Methode bis zu einer Frequenz von rd. 200 Hz numerisch simuliert werden.

Kapitel 2

Einleitung

Schall bezeichnet allgemein das Geräusch, den Klang, den Ton, den Knall, wie er von Menschen und auch von Tieren auditiv wahrgenommen werden kann. Schall stellt die Ausbreitung von kleinsten Druck- und Dichteschwankungen in einem elastischen Medium (Gase, Flüssigkeiten, Festkörper) dar. Als reinste Form des Schalls könnte man den Ton bezeichnen. Im Idealfall entspricht ein Ton einer periodischen Dichteschwankung der Luft mit genau einer Frequenz. Ein Klang ist eine Überlagerung mehrerer Töne (mehrerer Frequenzen). Ein Geräusch ist eine Überlagerung einer Vielzahl von Frequenzen. Man unterscheidet zwischen nichtstörenden Geräuschen, wie Musik oder die Stimme beim Gespräch, und störenden Geräuschen, wie z.B. Baustellenlärm, Verkehrslärm oder den Lärm gewerblicher Anlagen. Die dauerhafte Lärmbelastung von Menschen ist seit langem als gesundheitsschädlich bekannt. Aus diesem Grunde ist 1974 das Bundes-Immissions-Schutz-Gesetz BImSchG[1] erlassen worden. Das BImSchG beinhaltet eine Vielzahl unbestimmter Rechtsbegriffe, wie z.B. den der „schädlichen Umwelteinwirkungen“, vor denen die „Nachbarschaft“ und die „Allgemeinheit“ geschützt werden sollen. Durch das BImSchG wird die Grundlage geschaffen, Regelwerke wie Bundes-Immissions-Schutz-Verordnungen (z.B. 16. BImSchV[2], 18. BImSchV[3], 32. BImSchV[4], 34. BImSchV[5],...) und Verwaltungsvorschriften (z.B. 6. Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Schutz gegen Lärm -TA Lärm[6]), welche die unbestimmten Rechtsbegriffe konkretisieren, einzuführen. Dies bedeutet, dass somit Regelungen zur Ermittlung und Quantifizierung von Immissionen und deren Beurteilung, also die Prüfung auf das Vorliegen von schädlichen Umwelteinwirkungen, getroffen werden.

Durch die oben angesprochenen unbestimmten Rechtsbegriffe des BImSchG kommt zum Ausdruck, wer vor was geschützt werden soll. Dies bedeutet, dass nicht grundsätzlich jedes Geräusch in den Anwendungsbereich des BImSchG fällt. So ist z.B. sörrende laute Musik eines Nachbarn kein Anwendungsfall des BImSchG, der recht häufig auftretende Fall der Ansiedlung von Nahversorgern wie einem SB-Markt oder einem Discounter im innerstädtischen Bereich hingegen schon. SB-Märkte oder Discounter sind sog. „nicht genehmigungsbedürftige Anlagen“ im Sinne des 2. Teils des BImSchG. Für diese Anlagen gilt die oben angesprochene TA Lärm. Diese konkretisiert für gewerbliche Anlagen den unbestimmten Rechtsbegriff der „schädlichen Umwelteinwirkung“ durch Festlegen von Immissionsrichtwerten. Diese stellen Richtwerte dar, bei deren Überschreiten vom Vorliegen einer „schädlichen Umwelteinwirkung“ auszugehen ist. Diese Richtwerte unterscheiden sich hinsichtlich der Beurteilungszeiträume „Tag“ (6.00 Uhr bis 22.00 Uhr) und „Nacht“ (22.00 Uhr bis 6.00 Uhr). Durch eine Differenz von 15 dB(A) zwischen Tag- und Nacht-Richtwert soll dem gesteigerten Ruhebedürfnis zur Nachtzeit Rechnung getragen werden. Die Richtwerte hängen weiterhin von der Gebietsart (im Sinne der BauNVO[7]) der schutzbedürftigen Wohnbebauung ab. Auch der Begriff der „Nachbarschaft“ wird spezifiziert. Demnach soll das Vorliegen „schädlicher Umwelteinwirkungen“ (Ermittlung von Schallimmissionen) 0,5 m vor dem geöffneten Fenster des der Anlage nächstgelegenen Aufenthaltsraumes (im Sinne der DIN 4109[8]) dem sog. Immissionsort untersucht werden. Darüber hinaus regelt die TA Lärm die Art der Ermittlung der Schallimmissionen. Es werden Verfahren festgelegt, wie aus der physikalischen Größe des energieäquivalenten Dauerschallpegels (definiert in der DIN 45641[9]) der sog. Beurteilungspegel gebildet wird. Dieser wird mit den oben angesprochenen Richtwerten verglichen. Die Ermittlung des energieäquivalenten Dauerschallpegels kann durch Messung oder durch Berechnung erfolgen. Messungen finden häufig im Rahmen der behördlichen Überwachung (§§26, 28 BImSchG) bei bestehenden Anlagen Anwendung. Durch Berechnungen können die Beurteilungspegel von geplanten Anlagen prognostiziert werden. Dies ist im Rahmen von Genehmigungsverfahren erforderlich, da bereits zum Zeitpunkt der Genehmigung sichergestellt sein muss, dass von der geplanten Anlage keine „schädlichen Umwelteinwirkungen“ ausgehen. Auch für die Erstellung von Prognosen regelt die TA Lärm

die Verfahrensweise. Die Geräuschemission einer Schallquelle wird durch den Schalleistungspegel gekennzeichnet. Er ist unabhängig von den äußeren Abmessungen der Quelle und unabhängig von der gewählten Messentfernung des durch die Schallquelle erzeugten Schalldruckpegels (definiert in der DIN EN 60651[10]) am Messort / Immissionsort. Aus dem Schalleistungspegel kann unter Berücksichtigung einer Abstrahlcharakteristik und der Einflüsse auf dem Schallausbreitungsweg der Schalldruckpegel am Immissionsort errechnet werden. Bei der Berechnung des Beurteilungspegels müssen die Einsatzzeiten / Betriebsdauer der Anlage oder deren einzelner Aggregate und weitere Besonderheiten, z.B. Impulshaltigkeit und Tonhaltigkeit, berücksichtigt werden. Regelungen zur Schallausbreitungsrechnung, welche die Schallpegelminderung durch Abstand, Abschirmung, Beugung, uvm. rechnerisch berücksichtigt, werden in der TA Lärm nicht explizit getroffen. Hier wird auf die DIN ISO 9613-2 [11] verwiesen. Hierauf wird im Abschnitt 3.1.3 genauer eingegangen.

Die oben bereits angesprochenen Nahversorger stellen ein gutes Beispiel für die Anwendung der TA Lärm zur Prognose von Schallimmissionen im Rahmen des Genehmigungsverfahrens dar. Es wird eine Vielzahl von Nahversorgern geplant und errichtet. Der Grund hierfür ist eine beständig zu verbessernde bequeme Versorgung der Bevölkerung mit dem Bedarf des täglichen Lebens. Es soll eine gute und bequeme Erreichbarkeit bzw. Verfügbarkeit gewährleistet sein. Dies hat zum Einen lange Öffnungszeiten zur Folge und zum Anderen resultiert hieraus häufig eine hohe Verdichtung im innerstädtischen Raum. Genau diese räumliche Dichte zur Nachbarschaft weist ein hohes Konfliktpotenzial in Bezug auf Schallimmissionen auf. Ein Nahversorger besitzt eine Vielzahl von Schallquellen. Dies sind im Einzelnen:

- der Kundenparkplatz mit parkenden Pkw's
- die Einkaufswagenbox
- Rückkühler, Lüfter
- anliefernde Lkw
- die Anlieferzone mit Laderäuschen.

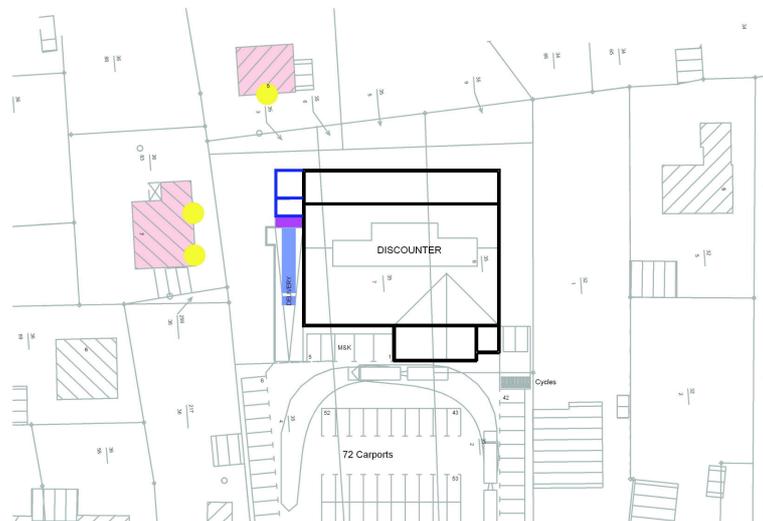


Abbildung 2.1: Beispiel für die Ansiedlung eines Nahversorgers

Zur Ermittlung der gesamten Schallimmissionen durch diese Quellen müssen die einzelnen kennzeichnenden Schalleistungspegel jeder Quelle, die effektiven Einwirkzeiten der jeweiligen Emissionen, die Lage der einzelnen Quellen und die geometrische Beschaffenheit des Umfeldes bekannt sein. Bei Quellen wie Kundenparkplätzen ist die Angabe eines mittleren Schalleistungspegels schwierig, da dieser sich aus einer Summe von Schalleistungspegeln von Einzelvorgängen zusammensetzt, deren Anzahl ebenfalls prognostiziert werden muss. Zu den Schallemissionen von Parkplätzen existiert eine Studie[18], deren Emissionskennwerte (Schalleistungspegel und mittlere Häufigkeiten von Parkvorgängen auf verschiedenen Parkplatztypen) als Stand der Technik bei der Lärmprognose von Parkplätzen angesehen werden können. Die Emissionen werden als flächig über

die gesamte Parkplatzoberfläche verteilt angenommen. Die Schallausbreitung erfolgt meist ungehindert bis zur nächstgelegenen schützenswerten Bebauung. Die mittleren Schalleistungspegel für Einkaufswagenboxen können ebenfalls einer Studie entnommen werden[19]. Der Ort dieser Schallemission kann als punktförmig angenommen werden, die Schallausbreitung erfolgt zu der dem Marktgebäude abgewandten Seite ungehindert. Für Rückkkühler, Lüfter und sonstige ortsfeste Aggregate existieren Datenblätter der Hersteller, in denen die jeweiligen Schalleistungspegel (ggf. für verschiedene Betriebszustände) angegeben werden. Die Quellen sind häufig über Dach oder an einer Fassade angeordnet. Die Schallabstrahlung erfolgt zumindest in eine Richtung ungehindert. Auch die Schalleistungspegel verschiedener Ladevorgänge sind in der o.g. Studie[19] enthalten. Für konkrete Vorgänge können diese auch durch eine Freifeldmessung eines simulierten Vorgangs gewonnen werden.

An Nahversorgungsmärkten erfolgt die Anlieferung der Sortimentwaren durch große Lkw. Diese besitzen häufig Aufieger. Die Waren sind in den Aufiegern in Rollcontainern gelagert. Die Emissionen bei Ladevorgängen setzen sich aus den Abstrahlungen der Ladebordwand am Heck des Lkw beim Überqueren durch Rollcontainer und aus den Abstrahlungen des durch die Rollcontainer angeregten Aufbauten des Aufiegers zusammen. Die Entladung der Lkw erfolgt zumeist von Hand. Eine Besonderheit in Bezug auf die Beurteilung ergibt sich bei Ladevorgängen: sie finden häufig früh morgens in einem Zeitraum mit erhöhtem Ruhebedürfnis statt. Gemäß den Regelungen der TA Lärm wird dieser Sachverhalt bei besonders ruhebedürftigen Gebieten (Allgemeine und Reine Wohngebiete) mit einem Pegelzuschlag berücksichtigt. Hieraus folgt, daß im Nahbereich um die Anlieferzone von Nahversorgungsmärkten die Ladegeräusche den dominanten Beitrag zum Gesamtpegel liefern. Aufgrund ihrer Geräuschcharakteristik sind sie darüber hinaus sehr auffällig und störend. Auch dies wird durch einen entsprechenden Zuschlag gemäß den Regelungen der TA Lärm abgebildet (Bildung des Taktmaximalpegels). Zudem zeigt die Erfahrung, daß die Anliefervorgänge an Nahversorgungsmärkten häufig ein Grund für Beschwerden sind. Hier ist in Rahmen des Genehmigungsverfahrens eine möglichst exakte Prognose erforderlich. Diese setzt zum Einen eine möglichst genaue Kenntnis des zu erwartenden Schalleistungspegels, zum Anderen eine möglichst genaue Berechnung des Schalldruckpegels am Immissionsort voraus. Der Schalleistungspegel kann, wie oben bereits erwähnt, im Prinzip durch hinreichend viele Messungen relativ exakt ermittelt werden. Die für die Prognose durchzuführende Ausbreitungsrechnung hat die geometrische Situation in Bereich der Anlieferzone zu berücksichtigen. Die Ausbreitungsrechnung kann, sollten z.B. Schallschutzmaßnahmen in Form von zusätzlichen Abschirmungen erforderlich werden, jedoch mit zunehmender Komplexität der Geometrie der wesentliche Einflußfaktor auf die Genauigkeit der Prognose werden.

2.1 Beispiele zu Anlieferzonen

Viele Nahversorgungsmärkte, insbesondere die Discounter der bekannten Ketten, weisen standardisierte Grundrissentwürfe auf. Das äußere Erscheinungsbild soll den Wiedererkennungswert erhöhen. Einheitlich Organisation in Internen sorgt für standardisierte rationelle Abläufe (z.B. bei der Warenlagerung). Des Weiteren reduzieren standardisierte Entwürfe die Planungskosten. Aufgrund der im vorangegangenen Abschnitt angesprochenen häufigen immissionsschutztechnischen Probleme an Anlieferzonen sind diese bereits häufig standardmäßig mit einer dreiseitigen Einhausung der Rampentische versehen. Die Standardisierung hat zur Folge, daß die Streuung der Maße der Rampentische relativ gering ist. Grundsätzlich können hierbei zwei „Topologien“ unterschieden werden: flache Rampentische (ca. 5m Breite und 2m Tiefe) und tiefe Rampentische (ca. 5m Breite und 5m Tiefe). Die Einhausungen bestehen aus einer seitlichen und einer Rückwand des Rampentisches. Die Beschickung des Warenlagers erfolgt durch eine Tür im Marktgebäude seitlich des Rampentisches. Als Wetterschutz ist generell bei Einhausungen ein Dach vorgesehen. Diese Geometrie bewirkt bereits eine deutliche Schallreduktion im rückwärtigen Bereich der Anlieferzone. Auch für seitlich gelegene Immissionsorte ohne Sichtverbindung zu den schallemittierenden Bereichen kann eine Schallpegelreduzierung erwartet werden. Die Abbildung 2.2 zeigt ein Beispiel einer solchen standardisierten Anlieferzone.



Abbildung 2.2: Beispiel 1

man so eine teilweise Abschirmung der Geräuschemissionen des Aufliegers. In Abbildung 2.3 ist eine solche weitergeführte Einhausung beispielhaft dargestellt.



Abbildung 2.3: Beispiel 2

Natürlich besteht die Möglichkeit, dass der durch diese geometrische Ausbildung der Anlieferzone bewirkte Schallschutz zum Schutz der angrenzenden Wohnbebauung nicht ausreichend ist. Es existiert immer noch ein Raumwinkelbereich, in den sich der Schall ungehindert ausbreiten kann. Dies ist der Bereich der nicht durch den LKW verdeckten Öffnung der Einhausung. Um hier einen erhöhten Schallschutz zu realisieren wird versucht, diesen Bereich weiter abzuschirmen. D.h. die seitliche Wand der Einhausung und die Dachfläche werden weiter nach vorn gezogen bis der Auflieger des Lkw teilweise in dieser Einhausung steht. Gleichzeitig erzielt

Aus den genannten Beispielen lassen sich vier grundlegende geometrische Ausprägungen abstrahieren, deren akustische „Eigenschaften“ für den Immissionsschutz von Belang sind. Zunächst ergeben sich zwei unterschiedliche Längen für die Einhausung. In einem Fall bildet sich ein Überstand, welcher den Lkw teilweise verdeckt. Jedes dieser Modelle kann noch in je zwei Untervarianten differenziert werden. Diese Untervarianten unterscheiden sich durch die oben genannten Tiefen der Rampentische. Somit können die meisten Situationen vereinfacht durch einen der im folgenden Abschnitt dargestellten vier Fälle beschrieben werden.

2.2 Modellvarianten

Die Geräusche bei der Entladung entstehen durch die Bewegung von Rollcontainern / Hubwagen innerhalb des Lkw, der Überfahrt über die Lkw-eigene Ladebordwand und die Rollgeräusche auf der Laderampe des Markts. Im Vergleich zu den Geräuschen beim Überfahren der Ladebordwand sind die Rollgeräusche auf der Markt-Rampe zu vernachlässigen. Der von der Ladebordwand emittierte Schall wird an den schallharten Oberflächen der baulichen Strukturen mehrfach reflektiert und gelangt auf Umwegen in die Umgebung. Die Geräuschemission in die Umgebung erfolgt im Fall der Geräuscherzeugung der Ladebordwand somit über die Öffnung zwischen der Einhausung und dem Auflieger des Lkw.

Die Rollgeräusche im Innern des Lkw werden über die Wände des Aufliegers des Lkw abgestrahlt. Die Rollcontainer regen den Wagenboden zu Schwingungen an. Die Schwingungen werden auf die Seitenwände und über diese auch auf die Dachfläche übertragen (primärer Luftschall mit Schalldämmung der Auflieger-Aufbauten, Körperschallanregung mit Abstrahlung sekundären Luftschalls). Durch Anprallvorgänge der Rollcontainer an den Seitenwänden des Aufliegers können diese auch direkt zu Schwingungen angeregt werden. Diese Schallabstrahlung der Seitenwände des Lkw erfolgt im Wesentlichen „frei“. Die kennzeichnenden Emissionskennwerte der Geräuschemissionen der Ladebordwand und des Aufliegers werden im Allgemeinen von der jeweiligen Bauart des Aufliegers, der Rollcontainer und vom spezifischen Verhalten der die Rollcontainer bewegenden Personen abhängen. Aufgrund der „freien“ Schallabstrahlung wird diese Schallquelle im Folgenden nicht mehr betrachtet.

Zur Klassifizierung der angesprochenen Möglichkeiten Anlieferzonen in Bezug auf abschirmende Maßnahmen auszubilden, sind die in den Abbildungen 2.4 bis 2.7 dargestellten Fälle festgelegt worden. Diese unterscheiden sich zum Einen hinsichtlich der Tiefe der Rampeneinhausung und zum Anderen in Bezug auf die Überstandslänge zwischen Einhausung und Lkw. Wie oben bereits kurz erläutert kann für seitlich der Einhausung gelegene Immissionsorte ein ausreichender Schallschutz nicht immer gegeben sein. Ein Teil der Schallemissionen wird zwar abgeschirmt, für einige Raum-

winkelsegmente besteht aber ggf. noch Sichtverbindung zwischen Schallquelle und Immissionsort. Hier besteht im Grunde eine freie Schallausbreitung. Zur weitergehenden Schallpegelreduzierung für Immissionsorte seitlich der Einhausung ist eine Unterbrechung der Sichtverbindung erforderlich. Die Einhausung wird in Richtung des Aufliegers verlängert. Nach dem akustischen Prinzip einer Schallschutzwand wird hier eine Pegelminderung über die Einfügungsdämpfung der verlängerten Einhausung erreicht (Umweggesetz). Hierauf soll im Abschnitt 3.1.3 näher eingegangen werden. Wie dort erläutert steigt die Einfügungsdämpfung eines Schallschirms mit zunehmender Höhe an. Ist also an einem seitlich gelegenen Immissionsort ein fest vorgegebener Schalldruckpegel einzuhalten, so erhält man aus der Differenz von Schalldruckpegel ohne zusätzliche Verlängerung der Einhausung und dem einzuhaltenden Pegel am Immissionsort das zu erreichende Einfügungsdämpfungsmaß. Mögliche Mehrfachreflexionen an den schallharten Bauteilen der Einhausung und des SB-Marktes sind hierbei zu berücksichtigen. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass ein Schallstrahl auf „Umwegen“ zum seitlich gelegenen Immissionsort gelangt. Es sollte sich somit eine Überstandslänge der zusätzlichen Schallschutzmaßnahme mit dem Auflieger des Lkw's rechnerisch durch akustische Modellierung der Gesamtsituation ermitteln lassen. Bei einer rein analytischen Ermittlung der Einfügungsdämpfung mit den Methoden der DIN ISO 9613-2 bestehen aufgrund der angesprochenen möglichen Reflexionen nicht zu quantifizierende Unsicherheiten. Bei dieser Art der Dimensionierung von weitergehenden Schallschutzmaßnahmen stellt sich nun das oben bereits dargelegte Problem der korrekten akustischen Modellierung der Situation. Bezogen auf das Zentrum der Schallemission (die Ladebordwand) weisen diese Fälle unterschiedliche akustische Eigenschaften auf. Die unterschiedlichen Überstände zwischen Auflieger und Einhausung werden die Richtcharakteristik der Schallabstrahlung der Öffnung zwischen Auflieger und Einhausung stark beeinflussen. Je länger der Überstand, umso zahlreicher sind die Schallreflexionen zwischen schallharter Seitenwand bzw. schallharter Dachfläche und Auflieger. Aus diesem Grund ist zu erwarten, dass sich bei einem Überstand zwischen Auflieger und Einhausung eine im Vergleich zur Situation ohne Überstand ausgeprägte Richtcharakteristik ausbildet.

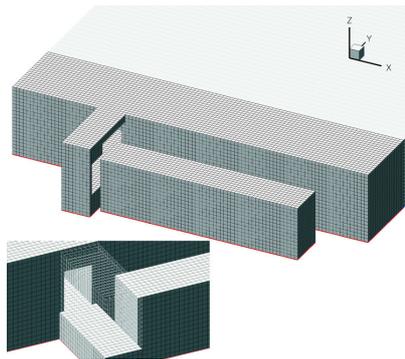


Abbildung 2.4: Fall 1

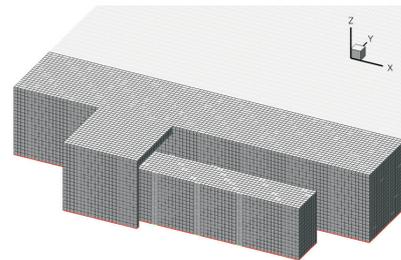


Abbildung 2.5: Fall 2

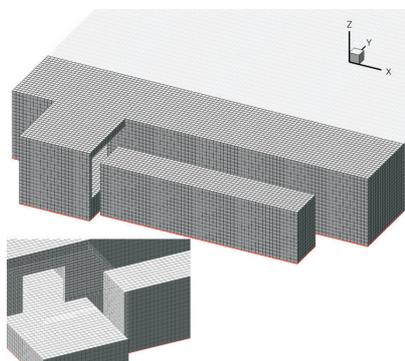


Abbildung 2.6: Fall 3

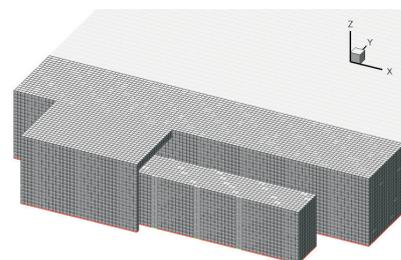


Abbildung 2.7: Fall 4

Je nach Art der geometrischen Ausbildung der Anlieferzone werden sich unterschiedliche Schallfelder im Bereich ausserhalb der Einhausung ausbilden. Die in 2.4 und 2.6 zu erkennende seitlich des Rampentisches in der Fassade des Marktgebäudes gelegene Tür führt direkt ins Lager und ist während der Ladevorgänge permanent geöffnet. Durch die akustische Ankopplung des Lagerraumes an die eingehaute Anlieferrampe bei geöffneter Tür wirkt die Türöffnung schallabsorbierend

und ist daher nicht zu vernachlässigen. Die Abmessungen der einzelnen Elemente der vier angesprochenen Fälle sind in der folgenden Abbildung dargestellt. Die Abmessungen des Gebäudes sind auf 30m x 25,25m mit einer Höhe von 5m festgelegt worden. Die Abmessungen des Rampentisches betragen 2m x 5m resp. 5m x 5m mit einer Höhe von 1,5m. Die Höhe der Einhausung entspricht der des Gebäudes (5m). Die Abmessungen des Lkw werden mit 14m x 2,5m und 3,8m Höhe angesetzt. Die Verlängerung der Einhausung, also der Überlapp von Lkw und zusätzlichem Schallschutz wird auf 3m festgelegt.

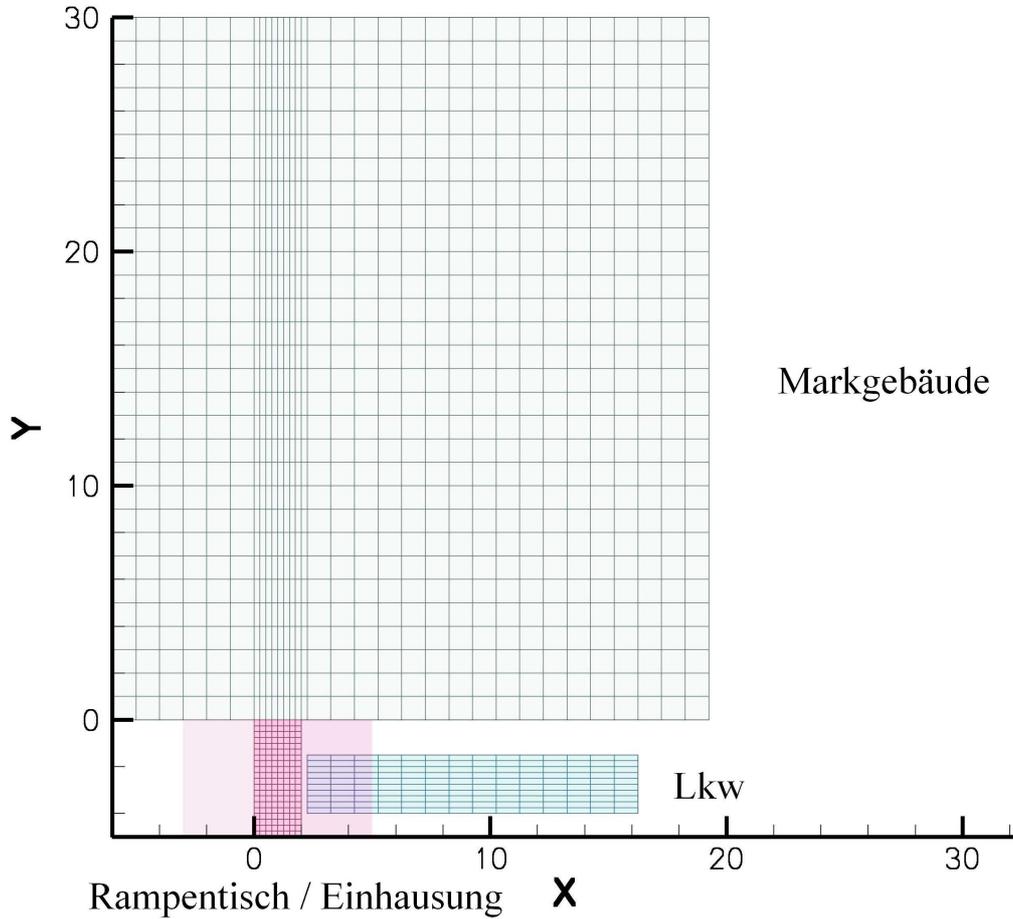


Abbildung 2.8: Abmessungen der Modelle der Fallbeispiele

Kapitel 3

Hauptteil

3.1 Schallimmissionsprognosen

3.1.1 Allgemeine Anforderungen

Da der Bereich des Schallimmissionsschutzes den gesamten Bereich der verschiedenen Lärmarten vom Fluglärm bis zum Geräusch eines einzelnen Lüfters abdeckt, ergeben sich die unterschiedlichsten Arten von Aufgabenstellungen. Allen Lärmarten ist gemeinsam, dass häufig Prognosen für die zu erwartende Geräuschsituation erstellt werden müssen. Prognosen können rechnerisch oder anhand von Erfahrungen mit vergleichbaren Aufgabenstellungen erstellt werden. Aufgrund der Komplexität der meisten Aufgabenstellungen ist ein Vergleich mit anderen Projekten häufig nicht zielführend. Im Fall des vorbeugenden Lärmschutzes bei Verkehrslärm ist dies aus rechtlichen Gründen nicht möglich. Es bleibt daher nur die rechnerische Prognose. Der Fall des Betriebs eines Lüfters in unmittelbarer Nähe eines Wohngebäudes stellt einen äußerst einfachen Fall dar, die Ermittlung der zukünftigen Betroffenheiten der Anwohner an einer 20 km langen geplanten Ausbaustrecke der DB stellt dagegen ein äußerst komplexes Szenario dar. Hier sind die Lärmimmissionen an sämtlichen im sog. „Untersuchungskorridor“ gelegenen Wohneinheiten (z.B. an 1000 Immissionsorten) rechnerisch zu prognostizieren. Die Breite des „Untersuchungskorridors“ kann dabei mehrere hundert Meter betragen. Die Vielfältigkeit der Aufgabenstellungen erfordert eine hohe Leistungsfähigkeit der Berechnungsverfahren. Da die Berechnungen innerhalb von Projekten mit häufig engen Zeitrahmen durchgeführt werden müssen, scheiden Berechnungsverfahren die zu extensiven Rechenzeiten führen, aus. Die Verwendung von Strahlmodellen zur Beschreibung der Schallpropagation hat sich hierbei bewährt. Das Verhalten des Schalls auf einem Schallpfad wird hierbei verhältnismäßig einfach durch einschlägige Richtlinien ([11], [12], [13]) beschrieben. Der Rechenaufwand entsteht bei der Konstruktion der verschiedenen möglichen Schallwege zwischen Quelle und Empfänger. Hierbei müssen sämtliche Raumrichtungen zur Auswertung möglicher Reflexionen und Abschirmungen berücksichtigt werden.

3.1.2 Schallfeldgrößen in der technischen Akustik

Man bedient sich im Schallimmissionsschutz der allgemeinen Definitionen der technischen Akustik. Zunächst kann das Schallfeld als periodische zeitliche Änderung des statischen Luftdrucks analytisch im einfachsten Fall an einem festen Raumpunkt durch eine Sinus-Funktion dargestellt werden

$$\Delta p = \Delta p_{max} \sin(\omega t) \quad (3.1)$$

oder in komplexer Schreibweise mit der Konvention $p = \Re(\hat{p})$

$$\Delta \hat{p} = \Delta \hat{p}_{max} e^{-i\omega t} \quad (3.2)$$

Vereinfachend wird das Δ meistens fortgelassen. Überlagern sich zwei Schallfelder (gleicher Phasenlage), die sich um die Kreisfrequenz $\Delta\omega$ unterscheiden, kommt es zur Interferenz, der ungestörten Überlagerung. Analytisch lässt sich dieser Sachverhalt durch Nutzung der Additionstheoreme für komplexe Zahlen beschreiben

$$\begin{aligned}\hat{p}_1 + \hat{p}_2 &= \hat{p}_{1max}e^{-i\omega t} + \hat{p}_{2max}e^{-i(\omega+\Delta\omega)t} \\ &= (\hat{p}_{1max} + \hat{p}_{2max}e^{-i\Delta\omega t})e^{-i\omega t}\end{aligned}$$

Dieses Ergebnis kann als Schwingung der Kreisfrequenz ω interpretiert werden, deren Amplitude mit $\Delta\omega$ zwischen \hat{p}_{1max} und \hat{p}_{2max} oszilliert (Schwebung). Für den Spezialfall, dass beide Frequenzen identisch sind, gilt

$$\hat{p}_{ges,max} = \hat{p}_{1max} + \hat{p}_{2max}$$

die sog. konstruktive Interferenz. Im Immissionsschutz ist der zeitliche Verlauf des Schalldrucks, wie in 3.1 beschrieben, nicht von Interesse. Vielmehr ist der zeitliche Mittelwert des Schalldrucks von Bedeutung. Beschreiben kann man diese Größe durch Bildung des Effektivwertes des Schalldrucks (vgl. auch [11])

$$p_{eff,T} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_T p^2(t) dt}$$

Für den periodischen Zeitverlauf des Schalldrucks gilt

$$\begin{aligned}p_{eff,T} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_T \hat{p}_{max}^2 e^{-i\omega t} e^{i\omega t} dt} \\ &= \sqrt{\hat{p}_{max}^2 \frac{1}{T} \int_T dt} \\ &= \sqrt{\hat{p}_{max}^2 \frac{1}{2\pi}} \\ &= \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \hat{p}_{max}\end{aligned}\tag{3.3}$$

Der Effektivwert beschreibt den mittleren Energiegehalt eines Schallsignals. Der Effektivwert der Überlagerung zweier Schallfelder ist folglich

$$\begin{aligned}p_{ges,eff} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_T [\hat{p}_{1max}e^{-i\omega t} + \hat{p}_{2max}e^{-i(\omega+\Delta\omega)t}]^2 dt} \\ &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_T [\hat{p}_{1max}^2 + \hat{p}_{1max}e^{-i\omega t}\hat{p}_{2max}e^{i(\omega+\Delta\omega)t} + \hat{p}_{1max}e^{i\omega t}\hat{p}_{2max}e^{-i(\omega+\Delta\omega)t} + \hat{p}_{2max}^2] dt}\end{aligned}$$

In diesem Ausdruck treten Mischterme der beiden Einzelfelder, sogenannte Interferenzterme ($\hat{p}_{1max}e^{-i\omega t}\hat{p}_{2max}e^{i(\omega+\Delta\omega)t}$ und $\hat{p}_{1max}e^{i\omega t}\hat{p}_{2max}e^{-i(\omega+\Delta\omega)t}$), auf. Sie sind der mathematische Ausdruck dessen, was als kohärente Überlagerung bezeichnet wird. Im Gegensatz hierzu spricht man von inkohärenter Überlagerung, wenn die beiden Schallfelder keine Möglichkeit der Überlagerung besitzen. Dies ist der Fall, wenn die beiden Schallfelder an einem festen Raumpunkt zeitlich nacheinander auftreten. Da der Effektivwert eine zeitliche Mittelung umfasst, könnten bei Wahl einer geeigneten Zeitspanne beide zeitlich getrennt auftretenden Schallfelder bei der Effektivwertbildung erfasst werden. In diesem Fall treten die Interferenzterme nicht auf. Bezeichnen T und T' die Zeitintervalle, in denen die beiden Schallfelder jeweils auftreten, so ist für $t \in T : \hat{p}_1 \neq 0$ und sonst 0 sowie für $t' \in T' : \hat{p}_2 \neq 0$ und sonst 0. Bei der Integration über eine Zeitspanne, die T und T' enthält, ist das Produkt $\hat{p}_1 \cdot \hat{p}_2$ stets Null. Für inkohärente Schallquellen gilt somit

$$\hat{p}_{eff,ges}^2 = \hat{p}_{1eff}^2 + \hat{p}_{2eff}^2$$

Da sich die Werte des Effektivschalldrucks im für das menschliche Ohr wahrnehmbaren Frequenzbereich um mehrere Größenordnungen unterscheiden, bezieht man das Quadrat des Effektivwertes des Schalldrucks auf einen Referenzschalldruck ($p_0 = 2 \cdot 10^{-5} Pa$), bildet von diesem dimensionslosen Verhältnis den dekadischen Logarithmus und multipliziert ihn mit dem im Grunde frei wählbaren Faktor 10 („Halbierungsparameter, vgl. z.B. [15]). Diese Größe wird Schalldruckpegel genannt.

$$L_p = 10 \lg \left(\frac{p_{eff}^2}{p_0^2} \right) \quad (3.4)$$

Für den oben angeführten Fall der Überlagerung inkohärenter Schallquellen gilt somit

$$\begin{aligned} L_{p,ges} &= 10 \lg \left(\frac{p_{ges,eff}^2}{p_0^2} \right) \\ &= 10 \lg \left(\frac{1}{p_0^2} \{ \hat{p}_{1eff}^2 + \hat{p}_{2eff}^2 \} \right) \\ &= 10 \lg (10^{0,1 \cdot L_{1p}} + 10^{0,1 \cdot L_{2p}}) \end{aligned} \quad (3.5)$$

Dies stellt das Additionstheorem für Pegel dar und wird „energetische Addition“ genannt. Diese Begriffsbildung ist nachvollziehbar, wenn man bedenkt, dass der Energiegehalt eines Schallsignals proportional dem Quadrat der Amplitude des Schalldrucks ist und das Quadrat des Schalldrucks in die Pegeldefinition einfließt. An dieser Stelle soll hervorgehoben werden, dass die energetische Addition nur für die Überlagerung inkohärenter Schallquellen gilt.

Definitionsgemäß ist der Effektivwert über die Integrationszeit (Integrationsgrenze) eine zeitabhängige Größe. Demnach schwanken im allgemeinen Fall auch die Schalldruckpegel im Zeitverlauf ($L_p(t)$). Dem Immissionsschutz liegen aus Gründen der einfachen Beurteilung nur zeitlich gemittelte Pegel zugrunde. Diese Mittelung bezieht sich auf die bereits in Abschnitt 2 genannten „Beurteilungszeiten“. Die zeitliche Mittelung ist gegeben durch

$$L_{eq,T} = 10 \lg \left(\frac{1}{T} \int_T 10^{0,1 \cdot L_p(t)} dt \right) dB \quad (3.6)$$

Diese Größe hängt nur von der festen Beurteilungszeit T ab und kann als energieäquivalenter Dauerschallpegel verstanden werden.

Als nächstes stellt sich die Frage, wie die Quellstärke als Eigenschaft einer Schallquelle charakterisiert werden kann. Die akustische Leistung in einem Schallfeld ist gegeben durch (vgl. z.B. [16])

$$P = \int_S \frac{p_{eff}^2}{Z_0} dS$$

wobei Z_0 die Kennimpedanz, also der Wellenwiderstand der Luft ist. Die im Schallfeld vorhandene Leistung bzw. die durch eine Schallquelle emittierte Leistung kann ebenfalls als Pegel charakterisiert werden. Diesen Pegel nennt man Schalleistungspegel und bezieht ihn auf die Bezugsschalleistung von $P_0 = 10^{-12}W$.

$$L_w = 10 \lg \left(\frac{P}{P_0} \right) \quad (3.7)$$

Mit Blick auf später verwendete Kenngrößen soll im Folgenden auf die Normierung von Schallpegeln eingegangen werden. Sowohl der Schalldruckpegel als auch der Schalleistungspegel hängen im allgemeinen von der Frequenz ab. Dies bedeutet, dass sich der Energiegehalt des Schallsignals mit der Frequenz ändert. Letzendlich bestimmt diese Abhängigkeit den „Klang“ eines Geräuschs. In der Technischen Akustik werden die einzelnen Frequenzen im hörbaren Bereich (ca. 20 Hz bis 8 kHz) durch Terzfilter zu Gruppen (Terzen) zusammengefasst. Die Breite jeder Frequenzgruppe steigt mit zunehmender Frequenz an. Das Verhältnis von oberer Frequenz zu unterer Frequenz der Gruppe, die Bandbreite $\frac{f_o}{f_u}$, bleibt dabei konstant und beträgt $2^{\frac{1}{3}}$. Der Pegel einer Terz wird dabei aus der energetischen Summe aller Einzelpegel der beinhalteten Frequenzen gebildet. Abbildung 3.1 zeigt beispielhaft einen solchen Frequenzverlauf eines Schalleistungspegels für einen Anliefervorgang (vgl. [19])

Die Darstellung eines Terzspektrums als Kurve ist leicht irreführend, da die Terzen im Gegensatz zum Schmalbandspektrum keine diskreten Frequenzen sondern Frequenzbänder sind. Korrekt wäre eine Darstellung mittels Balkendiagramm. Für die in dieser Untersuchung vorgelegten Ergebnisse ist allerdings die Darstellung mittels Kurven wesentlich übersichtlicher und soll daher in diesem Bericht verwendet werden. Der sich aus dem in 3.1 dargestellten Spektrum gemäß

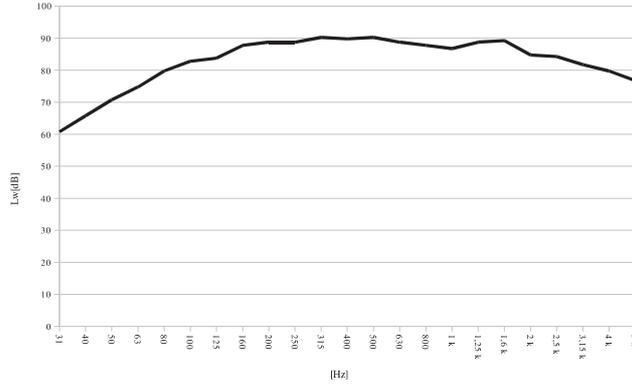


Abbildung 3.1: Spektrum des Schalleistungspegels eines Anliefervorgangs

$$L_w = 10 \lg \left(\sum_i 10^{0,1 \cdot L_{iw}} \right), \quad i \in [31Hz, \dots, 5kHz]$$

errechnende Schalleistungspegel ist eine die jeweilige Schallquelle kennzeichnende Größe. Er beschreibt die „Quellstärke“ und ist eine Eigenschaft der Schallquelle. Normiert man das Spektrum des Schalleistungspegels auf Null, d.h. bildet man

$$L_{iw,norm} = L_{w_i} - L_w, \quad i \in [31Hz, \dots, 5kHz]$$

so ist

$$10 \lg \left(\sum_i 10^{0,1 \cdot (L_{w_i} - L_w)} \right) = 0 \quad i \in [31Hz, \dots, 5kHz]$$

Auf diese Art lässt sich ein Spektrum auf beliebige Schalleistungspegel umrechnen. Die Umrechnung erfolgt mittels energetischer Addition des gewünschten Schalleistungspegels zu jeder Terz. Das auf Null normierte Spektrum charakterisiert somit den Frequenzverlauf einer Quelle und ist unabhängig von der jeweiligen Quellstärke. Eine analoge Vorgehensweise lässt sich auch auf den in Abschnitt 3.1.3 erläuterten Zusammenhang zwischen Schalldruckpegel und Schalleistungspegel in Abhängigkeit vom Abstand anwenden. Es ist

$$L_{p_i} = L_{w_i} - A_i \quad i \in [31Hz, \dots, 5kHz]$$

für alle Terzen. A_i charakterisiert dabei die frequenzabhängigen Eigenschaften der Ausbreitungsdämpfung auf dem Schallausbreitungsweg und kann als auf den Schalleistungspegel jeder Terz normierten Schalldruckpegel gelesen werden

$$-A_i = L_{ip} - L_{iw} \quad i \in [31Hz, \dots, 5kHz]$$

Diese normierten Terzschalldruckpegel spiegeln somit die speziellen frequenzabhängigen Ausbreitungsbedingungen einer geometrischen Situation wieder. Sie werden im Folgenden zur Analyse der akustischen Eigenschaften der zu untersuchenden Situationen verwendet.

3.1.3 Beschreibung der Schallausbreitung nach DIN ISO 9613-2

Bei der Schallausbreitung im Freien führen die verschiedensten Einflußfaktoren zu einer Abnahme des Schalldruckpegels mit der Entfernung. Zum Einen sind die Einflüsse von Hindernissen zu nennen. Zum Anderen existieren neben der offensichtlich geometrisch bedingten Ausbreitungsdämpfung durch Abstandsvergrößerung zusätzliche atmosphärische Effekte. Die DIN ISO 9613-2 geht grundsätzlich von einer Mitwindsituation aus. Durch eine Schichtung der Windgeschwindigkeiten mit der Höhe, bzw. einer Schichtung verschiedener (temperaturabhängiger) Ausbreitungsgeschwindigkeiten des Schalls aufgrund von Inversionswetterlagen ergeben sich abwärts gekrümmte Schallstrahlen, welche den Einfluss von abschirmenden Hindernissen mindern. Die angesprochenen Effekte müssen bei der Ausbreitungsrechnung berücksichtigt werden. In der DIN ISO 9613-2 setzt sich die Ausbreitungsdämpfung aus verschiedenen Termen zusammen

$$A = A_{div} + A_{atm} + A_{gr} + A_{bar} \quad (3.8)$$

Für eine Punktschallquelle ist die geometrische Ausbreitungsdämpfung A_{div} sehr einfach abzuleiten. Ihrer Definition nach ist die Schallintensität die je Zeiteinheit durch eine Fläche senkrecht zur Schallausbreitungsrichtung hindurchtretende Schallenergie. Folglich muss das Produkt aus Schallintensität und Fläche eine Leistung sein. Handelt es sich um eine geschlossene Fläche und ist der Gesamtfluß der Intensität durch diese ungleich Null (Quelle durch Fläche eingeschlossen), so liefert das Produkt aus Intensität und Fläche die durch die Fläche eingeschlossene Schallleistung. Diese ist für Schallquellen, die zeitlich unveränderliche Schallfelder hervorrufen, konstant. Beim Feld der Punktschallquelle muss somit der Fluß der Schallintensität durch eine mit dem Quadrat des Abstands wachsende Kugeloberfläche konstant bleiben. Dies ist der Fall, wenn das Feld in gleichem Maße mit dem Abstand abnimmt wie die Kugeloberfläche wächst, also mit $\frac{1}{4\pi r^2}$. Die Schallintensität ist dem Quadrat des Schalldrucks proportional mit der Kennimpedanz als Proportionalitätskonstante. Also gilt mit P als Schallleistung

$$p^2 = Z_0 \frac{P}{4\pi r^2} \quad (3.9)$$

Für den Schalldruckpegel erhält man hieraus

$$\begin{aligned} L_p &= L_w - 10 \lg \left(4\pi \frac{r^2}{r_0^2} \right) \\ &= L_w - 20 \lg \left(\frac{r}{r_0} + 11 \right) \end{aligned} \quad (3.10)$$

$$= L_w - A_{div} \quad (3.11)$$

Dies ist der, wie oben gezeigt, aus dem Prinzip der Energieerhaltung resultierende Ausdruck für die geometrische Ausbreitungsdämpfung. Bei der Schallausbreitung treten aber noch weitere Dämpfungseffekte auf. Hier wäre als nächstes die Luftabsorption zu nennen. Sie ist gegeben durch

$$A_{atm} = \frac{\alpha r}{1000} \quad (3.12)$$

mit α als frequenzabhängiger Dämpfungskonstante. Als nächster Dämpfungsmechanismus wäre die Bodendämpfung zu nennen. Die Eigenschaften des Bodens, z.B. eine schallharte Oberfläche oder ein poröser absorbierender Boden, beeinflussen das Schallfeld in der Nähe der Erdoberfläche. Ein schallharter Boden führt aufgrund der Schallreflexionen zu einer Pegelerhöhung. Darüber hinaus tritt der reflektierte Schall mit dem Direktschall in Wechselwirkung. Bei der Reflexion an einer schallharten Bodenoberfläche tritt ein Phasensprung auf. Es kommt zu Interferenzphänomenen, die zusätzlich zu einer Abschwächung des Schalls führen können. Zur Beschreibung wird der Bereich zwischen Schallquelle und Empfänger in 3 Zonen unterteilt. Die Zone mit der Bezeichnung s reicht bis zu einer Entfernung von $30h_s$ von der Schallquelle, die eine Höhe h_s über dem Boden besitzt. Sollte der Abstand der Schallquelle zum Empfänger d_p kleiner sein als $30h_s$, so erstreckt sich die erste Zone über den gesamten Bereich. Die Zone r erstreckt sich bis zu einer Entfernung von $30h_r$ um den Empfangsort. h_r ist die Höhe des Empfängers über dem Boden. Falls sich beide Bereiche nicht überlappen, bezeichnet m den Mittelbereich. Die gesamte Bodendämpfung setzt sich in der DIN ISO 9613-2 aus den Beiträgen der einzelnen Zonen zusammen

$$A_{gr} = A_s + A_r + A_m \quad (3.13)$$

Die akustischen Eigenschaften der Zonen werden durch den Parameter G beschrieben. G=0 bezeichnet dabei den vollkommen schallharten Boden, entsprechend gilt G=1 für schallabsorbierende Böden. Die Beiträge der einzelnen Zonen ergeben sich wie folgt

$$\begin{aligned}
& -1,5 \\
& \quad (63 \text{ Hz}) \\
& -1,5 + G_i \left(1,5 + 3e^{-0,12(h-5)^2} (1 - e^{-\frac{d_p}{50}} + 5,7e^{-0,09h^2} (1 - e^{-2,8 \cdot 10^{-6}d_p^2}) \right) \\
& \quad (125 \text{ Hz}) \\
& -1,5 + G_i \left(1,5 + 8,6e^{-0,09h^2} (1 - e^{-\frac{d_p}{50}}) \right) \\
& \quad (250 \text{ Hz}) \\
A_i, i = r, s = & -1,5 + G_i \left(1,5 + 14e^{-0,46h^2} (1 - e^{-\frac{d_p}{50}}) \right) \\
& \quad (500 \text{ Hz}) \\
& -1,5 + G_i \left(1,5 + 5e^{-0,9h^2} (1 - e^{-\frac{d_p}{50}}) \right) \\
& \quad (1000 \text{ Hz}) \\
& -1,5(1 - G - i) \\
& \quad (2000 \text{ Hz}) \\
& -1,5(1 - G_i) \\
& \quad (4000 \text{ Hz}) \\
& -1,5(1 - G_i) \\
& \quad (8000 \text{ Hz}) \\
A_m & = -3q, q = 1 - \frac{30(h_s+h_r)}{d_p} \text{ wenn } d_p > 30(h_s + h_r) \text{ sonst } 0 \\
& \quad (63 \text{ Hz}) \\
& -3q(1 - G_m) \\
& \quad (125 - 8000 \text{ Hz})
\end{aligned}$$

Der schallmindernde Effekt der Abschirmung durch Hindernisse wird in der DIN ISO 9613-2 mit A_{bar} bezeichnet. Ein Objekt wird als abschirmend betrachtet, wenn es mindestens ein Flächengewicht von 10 kg/m^2 besitzt. Dann kann die Schalltransmission durch das Objekt hindurch vernachlässigt werden. Darüber hinaus müssen die Horizontalabmessungen des Objekts senkrecht zur Verbindungslinie Quelle - Empfänger groß gegenüber der Wellenlänge sein. Andernfalls treten extreme Beugungseffekte auf.

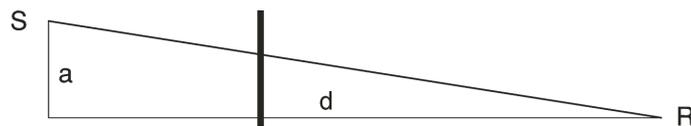


Abbildung 3.2: Einfachbeugung - Aufsicht

Mit den Bezeichnungen aus Abbildung 3.2, 3.3 und 3.4 gilt

$$D_z = 10 \lg \left(3 + \frac{40}{\lambda} C_3 z K_{met} \right) \quad (3.14)$$

$$C_3 = \frac{1 + \frac{5\lambda^2}{e}}{\frac{1}{3} + \frac{5\lambda^2}{e}} \quad (3.15)$$

$$z = \sqrt{(d_{ss} + d_{sr} + e)^2 + a^2} - d \quad (3.16)$$

$$K_{met} = e^{-\frac{1}{2000} \sqrt{\frac{d_{ss} d_{sr} d}{2z}}} \quad (3.17)$$

$$\begin{aligned}
A_{bar} &= D_z - A_{gr} && \text{für horizontale Schirmkanten} \\
A_{bar} &= D_z > 0 && \text{für senkrechte Schirmkanten}
\end{aligned}$$

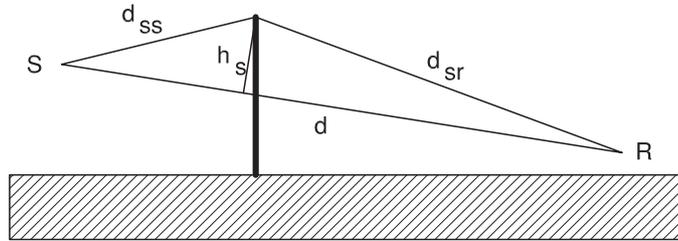


Abbildung 3.3: Einfachbeugung - Ansicht

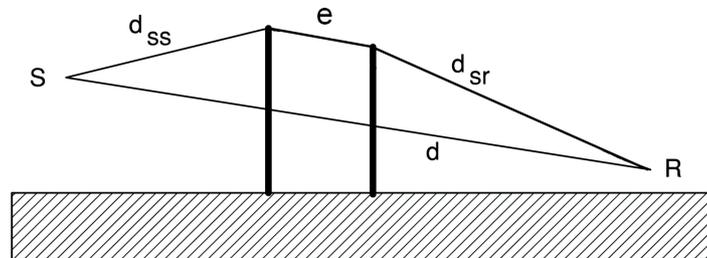


Abbildung 3.4: Doppelbeugung

3.16 wird als „Umweggesetz“ bezeichnet. Das Einfügedämpfungsmaß D_z steigt mit zunehmender Länge des Umwegs $d_{ss} + d_{sr}$ über das Hindernis hinweg an. Mit anderen Worten: Je höher eine Schallschutzwand ist, desto besser ist ihre abschirmende Wirkung. Darüber hinaus werden Punkte im Nahbereich hinter der Wand besser abgeschirmt als weiter entfernt liegende. Die Wirkung einer Schirmkante ist ebenfalls umso besser, je näher sich das abschirmende Hindernis an der Schallquelle befindet. Schallreflexionen treten an reflektierenden / schallharten Oberflächen auf. Sie werden mittels Konstruktion von Spiegelschallquellen berücksichtigt, wenn die Abmessungen der reflektierenden Fläche groß gegenüber der Wellenlänge sind. Das Schallfeld des Direktschalls und das in dem durch die Spiegelschallquelle und die reflektierende Fläche definierten Raumwinkel begrenzte Schallfeld der Spiegelschallquelle werden dann energetisch überlagert.

Wie aus Gleichung 3.11 für die geometrische Ausbreitungsdämpfung direkt ablesbar ist, beziehen sich die in der DIN ISO 9613-2 dokumentierten Gesetzmäßigkeiten der Schallausbreitung auf das Schallfeld einer Punktschallquelle. Komplexere Schallquellen müssen somit durch Zerlegung und Approximation durch Punktschallquellen auf diese zurückgeführt werden. Flächenhaft ausgedehnte Schallquellen können z.B. nach [14] durch Punktschallquellen ersetzt werden, wenn der Abstand von Quelle und Empfänger das 0,5-fache der größten Ausdehnung der Schallquelle überschreitet. Ist dieses Kriterium nicht erfüllt, müssen die flächenhaft ausgedehnten Schallquellen in Teilquellen zerlegt werden, für die das genannte Abstandsgesetz erfüllt ist.

3.1.4 Diffuses Schallfeld - Abstrahlung nach VDI 2571

Die VDI Richtlinie 2571 [17] hat die Abschätzung der Schallabstrahlung von Aussen-Bauteilen in die Umgebung bei lärmintensiv genutzten Gebäuden zum Inhalt. Geräusche innerhalb von geschlossenen Räumen erzeugen wie Quellen im Freien zunächst ein Direktschallfeld, welches den bekannten Abstandsgesetzen (Abschnitt 3.1.3) folgt. Eine Besonderheit stellt sich ein, wenn der Raum aus schallharten Oberflächen besteht. Der Primärschall der Schallquelle wird an den Raumboberflächen reflektiert. An einer ideal schallharten Oberfläche tritt theoretisch kein Reflexionsverlust auf. Die um den Anteil der Luftabsorption verminderte Schallenergie wird vollständig reflektiert. Diese Reflexionen treten zwischen den Raumbegrenzungsflächen mehrfach auf. Es entsteht somit zumindest theoretisch ein Schallfeld, in welchem aus allen Raumrichtungen Schalleinträge zu gleichen Teilen stattfinden. Dieser physikalische Sachverhalt definiert das diffuse Schallfeld. Das diffuse Schallfeld besitzt demzufolge keine Schallintensität (durch eine Fläche hindurchtretende Schalleistung). Ein weiteres physikalisches Phänomen bei Schallfeldern in geschlossenen Räumen ist das Auftreten von stehenden Wellen. Durch den Wellencharakter des Schalls überlagern sich Direktschall und reflektierter Schall kohärent. Das Auftreten von stehenden Wellen ist eng an die Raumabmessungen gekoppelt. Stehende Wellen können sich nur ausbilden, wenn die Raumabmessungen ein Vielfaches der halben Wellenlänge betragen. An einer schallharten reflektierenden

Oberfläche muss die Schallschnelle (die Relativbewegung der Luftteilchen) verschwinden. Schalldruck und Schallschnelle sind im Fernfeld um $\frac{\pi}{2}$ phasenverschoben. Folglich hat der Schalldruck an der reflektierenden Oberfläche ein Maximum. Eine dreidimensionale Betrachtung in Verbindung mit den genannten Randbedingungen für einen Raum mit den Abmessungen $l_x \times l_y \times l_z$ führt mit $k = \frac{\omega}{c}$ (ω = Kreisfrequenz der Schallwelle, c Ausbreitungsgeschwindigkeit) auf

$$k = \sqrt{\left(\frac{n_x \pi}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y \pi}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z \pi}{l_z}\right)^2} \quad (3.18)$$

Hieraus ist zu erkennen, dass für einen Raum mit im Vergleich zur Wellenlänge großen Abmessungen äußerst viele dieser Raumresonanzen angeregt werden können. Hieraus ergibt sich eine zweite Definition des diffusen Schallfeldes, welche im Prinzip auf den wellenmechanischen Eigenschaften des Schallfeldes beruht. Ein diffuses Schallfeld liegt vor, wenn die Modendichte, d.h. die Anzahl an sich resonant verstärkenden Schwingungsknoten je Frequenzintervall, ausreichend hoch ist. Aus den genannten Eigenschaften des diffusen Schallfeldes folgt, dass der Schalldruckpegel im Raum an allen Orten den selben Betrag besitzt. Das Vorliegen eines solchen diffusen Schallfeldes wird in der VDI 2571 vorausgesetzt. Der konstante Innenpegel im Raum berechnet sich dann zu (vgl. [15])

$$L_i = L_w - 10 \lg \frac{\frac{A}{4} + mV}{A_0}$$

wobei A die äquivalente Absorptionsfläche, V das Raumvolumen, m die mittlere freie Weglänge und $A_0 = 1\text{m}^2$ eine Bezugsfläche ist. Eine Vereinfachung dieses Ausdruck bildet die Grundlage der VDI 2571 für die Berechnung des Innenpegels. Vernachlässigt man die Streuung des Schalls durch Streukörper (berücksichtigt durch die mittlere freie Weglänge) so gilt

$$L_i = L_w + 6 + 10 \lg \frac{A_0}{A} \quad (3.19)$$

Die Schallpegelminderung durch ein Bauteil wird durch das frequenzabhängige Schalldämm-Maß beschrieben. Es ist definiert über das Verhältnis von auftretender Schalleistung zu transmittierter

$$R_j = 10 \lg \frac{P_j^{ein}}{P_j^{aus}}, \quad j \in [\text{Terzen}]$$

R bezeichnet das im Labor richtliniengerecht ermittelte Schalldämm-Maß eines Bauteils. Für den eingebauten Zustand wird das entsprechende Bau-Schalldämm-Maß, welches die Übertragung durch Nebenwege mit einschließt, mit R' bezeichnet. Für die durch ein Bauteil mit Bau-Schalldämm-Maß R' in den oberen Halbraum abgestrahlte Schalleistung gilt der folgende in der VDI 2571 angegebene Zusammenhang mit dem Innenpegel

$$L''_j = L_{i_j} - R'_j - 6, \quad j \in [\text{Terzen}] \quad (3.20)$$

L'' bezeichnet hierbei den flächenbezogenen Schalleistungspegel ($L'' := L_w - 10 \lg(S)$), wenn S der Flächeninhalt der Flächenschallquelle mit Schalleistungspegel L_w ist. Für den sich am Immissionsort errechnenden Schalldruckpegel L_p nennt die VDI 2571 folgende Ausbreitungsrechnung

$$L_p = L'' - \Delta L_s - \Delta L_z \quad (3.21)$$

Hierbei beinhaltet $L_s = 10 \lg \frac{2\pi r^2}{r_0}$ bereits die Abstrahlung in den Halbraum (Zuschlag von 3 dB gegenüber der Abstrahlung in den Vollraum). DIN 2571 gibt an, dass für senkrechte Flächen der errechnete Schallpegel um weitere 3 dB zu erhöhen ist (Abstrahlung in den Viertelraum). Diese Form der Ausbreitungsrechnung entspricht bis auf 3 dB der in der VDI 2714 [13] angegebenen. Dort ist für den Zusammenhang zwischen Schalleistungspegel und Schalldruckpegel der folgende Zusammenhang genannt

$$L_p = L_w + DI + K_0 - D_s - \sum D \quad (3.22)$$

Dabei bezeichnet $D_s = 10 \lg \frac{4\pi r^2}{r_0}$ die geometrische Ausbreitungsdämpfung für eine Abstrahlung in den Vollraum (4π) und $\sum D_0$ die Dämpfung durch Luftabsorption, Boden- und Meteorologiedämpfung, Abschirmung, ... $\sum D$ enthält keinen Beitrag, der dem in Abschnitt 3.1.3 erläuterten Bodeneffekt entspricht. DI ist das Richtwirkungsmaß. Die Wirkung der Reflexions- und Absorptionseigenschaften des Bodens wird in der VDI 2714 durch das Raumwinkelmaß K_0 pauschal berücksichtigt. Es ist

$$K_0 = 10 \lg \left(\frac{4\pi}{\Omega} \right) \quad (3.23)$$

bei einer Schallabstrahlung in den Raumwinkel Ω . Bei einer Schallabstrahlung in den oberen Halbraum ($\Omega = 2\pi$) beträgt K_0 3 dB. In 3.22 entspricht D_s dem Term ΔL_s der Gleichung 3.21 der VDI 2571 und $\sum D$ dem Term ΔL_z . Der direkte Vergleich von 3.21 mit 3.22 quantifiziert die Aussage der VDI 2571, in L_s sei die Ausbreitung in den Halbraum enthalten. Gemeint ist, dass hier $K_0 = 3$ dB bei der Bildung von L_s bereits berücksichtigt wurde. Auf diese Art werden die quellenahen Bodenreflexionen pauschal durch Addition von 3dB berücksichtigt (vgl. Anmerkung zu Gleichung (10) in [17]). Diesem Ansatz entspricht die verlustfreie Reflexion der gesamten Schallleistung an einer ideal schallharten Bodenfläche. Bei der in dieser Untersuchung angewandten Ausbreitungsrechnung nach DIN ISO 9613-2 wird der Zuschlag $K_0 = 3dB$ nicht berücksichtigt und die Bodeneffekte fließen frequenzabhängig explizit in der in 3.1.3 erläuterten Art und Weise in das Berechnungsergebnis ein.

3.2 Modellbildung bei Anlieferzonen

3.2.1 Schallquellen bei Anlieferprozessen

Die Schallemissionen bei Anliefervorgängen an den hier zu untersuchenden Laderampen setzen sich aus den Emissionen mehrerer Teilschallquellen zusammen. Zunächst ist der Sattelaufieger resp. Anhänger des Lkw als Schallquelle zu nennen. Schallemissionen entstehen hier durch die Rollgeräusche der Rollcontainer auf dem Fahrzeugboden. Die Schallabstrahlung durch den Aufieger erfolgt ungehindert. Typische Emissionskennwerte dieser Geräusche können [19] entnommen werden. Hierin ist für den nach dem Taktmaximalpegelverfahren ermittelten und über eine Stunde gemittelten Schalleistungspegel für 1 Vorgang je Stunde ein Wert von $L_{wATm,1h} = 75dB(A)$ angegeben. Für einen maximal beladenen Lkw ergeben sich 50 Ereignisse für eine vollständige Be- oder Entladung. Der über eine Stunde gemittelte Gesamtschalleistungspegel dieser Vorgänge ergibt sich demzufolge zu $L_{wATm,1h,ges} = 92dB(A)$.

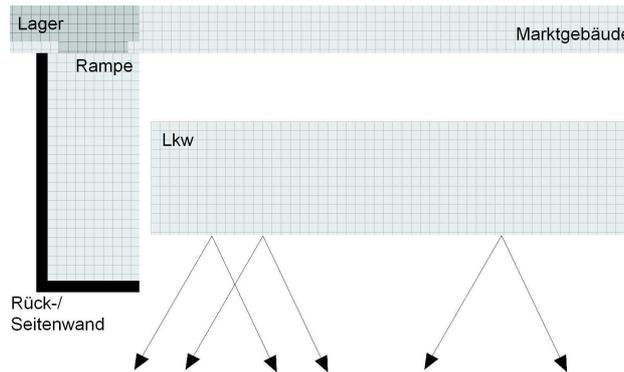


Abbildung 3.5: Abstrahlung des Aufiegers / Anhängers

Die Rollcontainer verlassen den Aufieger im rückwärtigen Bereich über die Lkw-eigene Ladebordwand. Diese besteht in der Regel aus Metall und erzeugt beim Überfahren die dominanten Geräuschemissionen. Der über eine Stunde gemittelte Schalleistungspegel dieses Vorgangs liegt in der Größenordnung von 100 dB(A). Die überfahrene Ladebordwand wird während des Rollvorgangs der Container zu Schwingungen angeregt, die dann durch die Ladebordwand kohärent abgestrahlt werden. Die Kohärenz der Emission wird bei der Modellierung vernachlässigt (vgl. Abschnitt 3.1.2). Die Ladebordwand kann wie allgemein üblich als Punktschallquelle mit Lage im akustischen Zentrum der Emission modelliert werden. Die weiteren Geräusche der Rollcontainer auf der Laderampe können bei den Gesamtemissionen vernachlässigt werden.

3.2.2 Beschreibung der Emission durch eine Punktschallquelle

Soll nun die Abstrahlung der durch die Punktschallquelle modellierten Geräuschemissionen in die Umgebung ermittelt werden, wird die unter 3.1.3 beschriebene Ausbreitungsrechnung durchgeführt. In der Vorstellung des Strahlenmodells gelangt der Schallstrahl auf den unterschiedlichsten Wegen aus der baulichen Struktur der Laderampe heraus. Es gibt Bereiche, in denen der Direkt-schall eine Rolle spielt und andere, bei denen die Abschirmung der baulichen Strukturen wirksam wird. Darüber hinaus kann der Schall an den schallharten Oberflächen der Umfassungsbauteile der Laderampe einfach oder mehrfach reflektiert werden. In den Abbildungen 3.6 bis 3.10 sind mögliche Schallausbreitungswege der Schallstrahlen dargestellt.

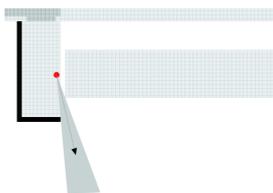


Abbildung 3.6: Direkt-schall

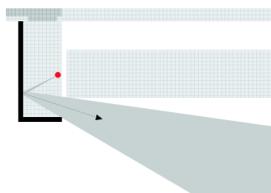


Abbildung 3.7: Einfachreflexionen

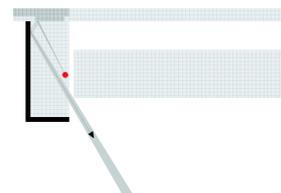


Abbildung 3.8: Zweifachreflexionen

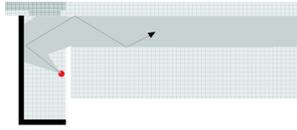


Abbildung 3.9: Mehrfachreflexionen

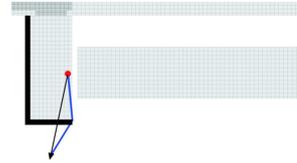


Abbildung 3.10: Abschirmung und Beugung

3.2.3 Ergebnis der Immissionsberechnung

Die Eigenschaften des durch eine Ausbreitungsrechnung simulierten Schallfeldes lassen sich recht anschaulich durch eine flächenhafte Darstellung der Schalldruckpegel auf einer horizontalen Ebene, welche die Situation schneidet, darstellen. In der Abbildung 3.11 ist das Ergebnis einer solchen flächenhaften Auswertung angegeben.

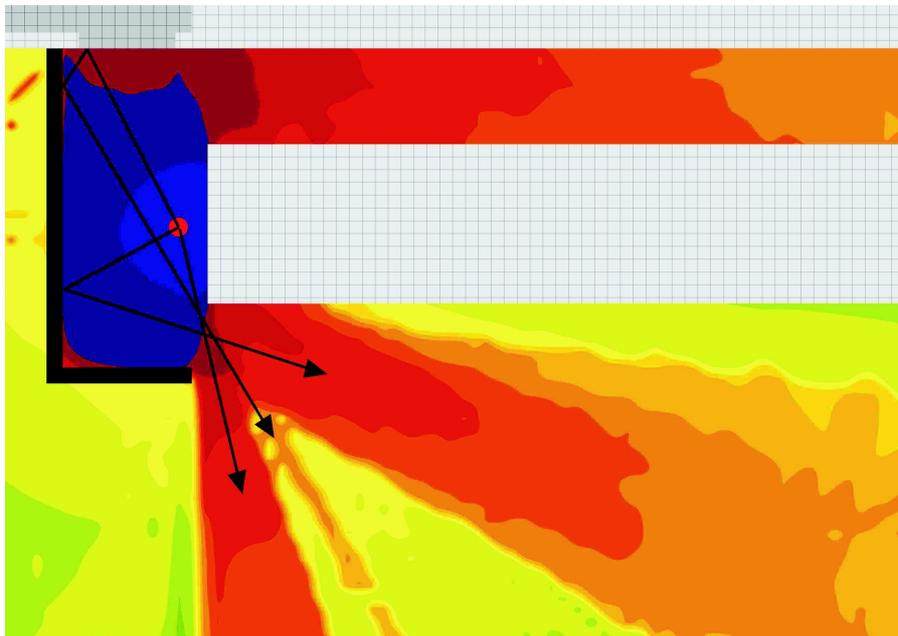


Abbildung 3.11: Schallfeld mit Punktquelle

Man erkennt deutlich die Arbeitsweise des Strahlverfahrens. Die im vorabgegangenen Abschnitt aufgezeigten Bereiche des Direktschalls, der Einfach-, der Zweifach- und der Mehrfachreflexionen sind direkt ablesbar. Aus dieser Darstellung ist auch ersichtlich, dass die Anwendung des Strahlverfahrens für das Emissionsmodell mit einer Punktschallquelle zu einer Schalldruckpegelverteilung führt, welche in relativ engen Raumbereichen starke Sprünge im Schalldruckpegel aufweist. Die „keulenartigen“ Bereiche des Schallfeldes lassen vermuten, dass diese Art Modellierung der Realität nicht sehr nahe kommt. Es ist allerdings möglich, auf Grundlage weiterer Annahmen über das Schallfeld zu einem etwas plausibleren Schallfeld zu gelangen.

3.2.4 Modellanpassung - Beschreibung der Emissionen durch Flächenquelle

Im Rahmen der ingenieurmäßigen Modellbildung gemäß dem Stand der Technik hat man nun die Möglichkeit, ein Ersatzmodell für die Anlieferzone mit der Punktschallquelle zu entwickeln, mit dem man versucht, die Realität besser abzubilden. Anstelle der Modellierung einer Punktquelle am Ort der Geräuschentwicklung soll die Öffnung zwischen Auflieger und den Bauteilen der Einhausung durch eine Flächenschallquelle abgebildet werden. Der Vorteil dieser Modellbildung liegt offensichtlich daran, dass die Schallausbreitung von dieser Quelle ausgehend annähernd eine freie Schallausbreitung ist. Die oben aufgezeigten, auf der geometrischen Konstruktion des Schallweges beruhenden unplausiblen Schalldruckpegelverteilungen, sollten somit überbrückt werden.

Wesentlich für eine quantitative Prognose der Geräuschmissionen in der Umgebung ist nun die Kenntnis des Emissionskennwerts der die Öffnung repräsentierenden Flächenschallquelle. Unter der Annahme ideal schallharter Begrenzungsflächen muss sich für den Schalleistungspegel der Ersatzschallquelle derselbe Emissionskennwert wie für die Punktschallquelle ergeben, da die gesamte emittierte Schalleistung durch Reflexionen vollständig aus der Einhausung gelangen muss. Bei dieser Art der Modellbildung kann der Einfluß der geöffneten Tür nicht direkt durch das geometrische Modell abgebildet werden. Um den schallabsorbierenden Einfluß der Türöffnung in den Simulationen zu berücksichtigen, muss eine weitere Annahme bei der akustischen Modellbildung getroffen werden. Absorptionseigenschaften begrenzender Bauteile können, wie in [17] erläutert, bei diffusen Schallfeldern berücksichtigt werden. Hilfsweise wird somit die Annahme getroffen, es läge innerhalb der Einhausung ein diffuses Schallfeld vor. Die äquivalente Absorptionsfläche entspricht dann der Fläche der Türöffnung. Der unter Einbeziehung der äquivalenten Absorptionsfläche ermittelte „Innenpegel“ wird dann gemäß $L''_{wA,Öffnung} = L_i - 6$ auf die Fläche der Öffnung zwischen Auflieger und Einhausung umgerechnet.

3.2.5 Ergebnis nach Modellanpassung

Das Ergebnis einer Ausbreitungsrechnung mit der oben erläuterten Modellbildung ist qualitativ in der folgenden Abbildung dargestellt.

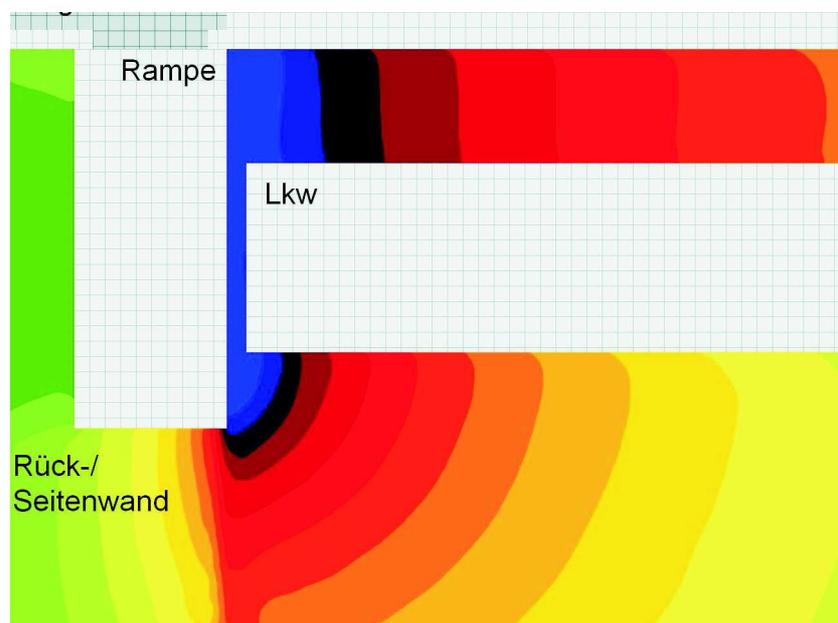


Abbildung 3.12: Von Flächenquelle erzeugtes Schallfeld

Die Verteilung der Schalldruckpegel weist nun keine „Keulen“ mehr auf, der Verlauf ist relativ stetig. Abschließend soll noch einmal darauf hingewiesen werden, dass dieser Modellbildung die Annahme eines diffusen Schallfeldes im Innern der dreiseitig umschlossenen Laderampe zugrunde liegt.

3.2.6 Schlussfolgerung

In einem diffusen Schallfeld ist, wie in Abschnitt 3.1.4 erläutert, der Schalldruckpegel an jedem Raumpunkt gleich. Dies führt dazu, dass der Schalleistungspegel der die Öffnung charakterisierenden Flächenquelle homogen über diese Fläche verteilt ist. Als Folge zeigt das mittels Strahlverfahren berechnete Schallfeld einen stetigen Verlauf. Der Absolutwert des Schalleistungspegels hängt von Art und Größe der in der Einhausung möglicherweise befindlichen schallabsorbierenden Flächen ab. Wenn man sich die Definition bzw. die physikalischen Randbedingungen für das Vorliegen eines diffusen Schallfeldes vor Augen führt, erscheint die Annahme eines räumlich gleichverteilten Schalleintrags aus allen Richtungen zweifelhaft, da im Falle der Einhausung eben kein geschlossener Raum vorliegt. Vielmehr fehlt bei diesem „Raum“ eine komplette Seite. Zumindest aus dieser Richtung werden keine Anteile reflektierten Schalls vorliegen. Aus diesem Grund sollten Modellmessungen, welche die im Rechner modellierte Situation in abstrahierter Weise nachbilden, durchgeführt werden. Der Vorteil von Modellmessungen liegt zunächst in der Schaffung

idealer störungsfreier Messbedingungen. Darüber hinaus ist aufgrund des reduzierten Maßstabs eine umfangreiche Vermessung der gesamten Situation möglich. Zum Vergleich der Ergebnisse der rechnerischen Modellierung mittels Strahlverfahren mit den Messergebnissen wurden die Schalldruckpegel an den einzelnen Messpunkten rechnerisch mit den in diesem Abschnitt erläuterten zwei Modellierungsvarianten ermittelt. Der maßgebliche frei wählbare Parameter bei den Strahlberechnungen, die Anzahl zu berücksichtigender Reflexionen, wurde in Variantenberechnungen so ermittelt, dass der sich nach dem Hüllflächenverfahren aus diesen Rechenergebnissen ergebende Gesamtschallleistungspegel der Situation nur noch in der zweiten Nachkommastelle änderte.

3.3 Modellmessungen

3.3.1 Aufbau

Bei der Physikalisch Technischen Bundesanstalt in Braunschweig wurden die 8 in Abschnitt 2.2 beschriebenen Situationen als Modelle im Maßstab 1:8 gefertigt und im Halbfreifeldraum aufgestellt. Der Halbfreifeldraum besitzt einen schallharten Boden und vollständig absorbierende Wände und Decken. Dadurch wird die Schallabstrahlung im Freien dargestellt. Vermessen wurden die Situationen auf einer den Lkw und die Einhausung vollständig umgebenden zylinderförmigen Hüllfläche bestehend aus 63 in Abbildung 3.13 dargestellten diskreten Mikrofonpositionen.

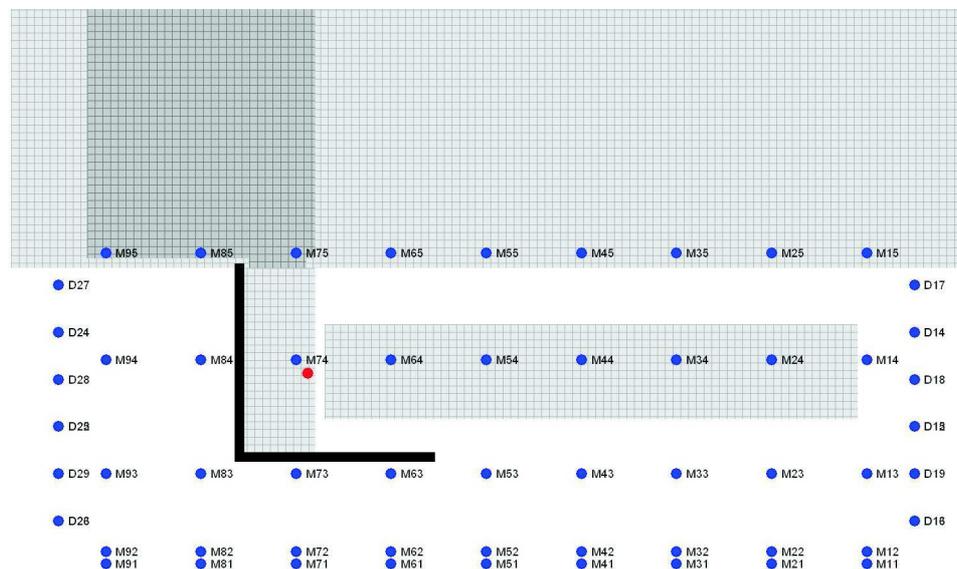


Abbildung 3.13: Hüllfläche mit 63 Messpunkten

3.3.2 Durchführung

Als anregende Schallquelle diente ein Hexaeder der Kantenlänge von 3,8 cm. Dieser wurde im akustischen Zentrum der tatsächlichen Emission aufgestellt. Das Eingangssignal war ein weißes Rauschen. Der Frequenzbereich des Signals war entsprechend dem Modellmaßstab skaliert. Um einen Frequenzbereich von 31 Hz bis 5 kHz in der Realität darzustellen, wurden im verkleinerten Modell entsprechend die achtfache Frequenz, d.h. der Frequenzbereich von 250 Hz bis 40 kHz, verwendet. Das Eingangssignal gelangte über einen Verstärker zur Modellschallquelle. Über ein 16-kanaliges Messsystem wurden die Spannungen an den Kondensatormikrofonen und gleichzeitig die Eingangsspannung an der Modellschallquelle zur späteren Ermittlung der abgestrahlten Schalleistung gemessen. Die Ergebnisse wurden über einen Terzfilter an den Auswerte-PC übergeben.

Zunächst wurde eine Messung des Hintergrundpegels im Halbfreifeldraum vorgenommen. Die Messergebnisse der eigentlichen Modellmessungen wurden dann mit dem Hintergrundpegel korrigiert, wenn der Abstand von Hintergrundpegel zum gemessenen Pegel zwischen 3 dB und 15 dB

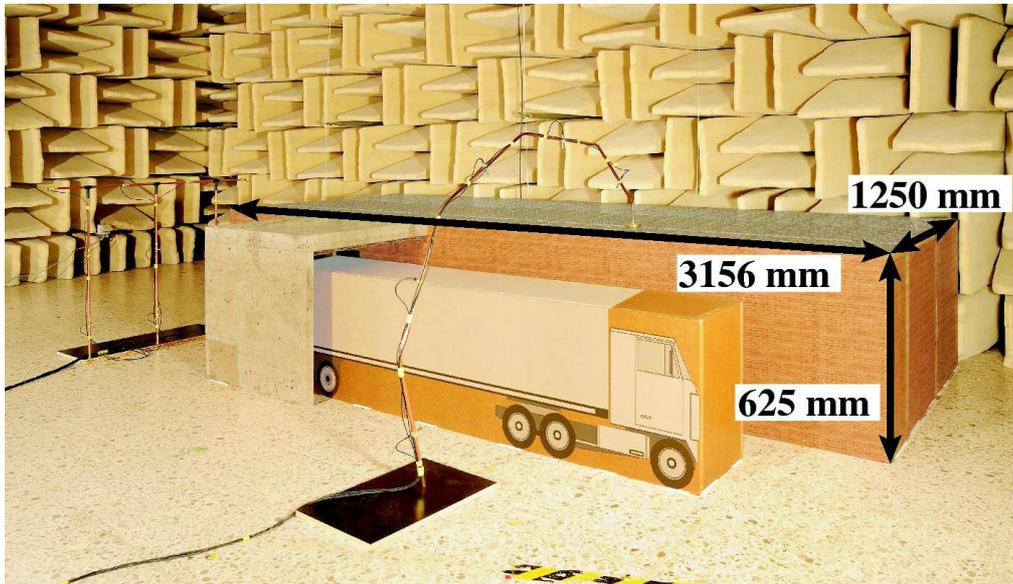


Abbildung 3.14: Ansicht des Modells im Massstab 1 : 8

lag. Bei einem geringeren Abstand als 3 dB wurden die Messergebnisse verworfen, da hier keine ausreichende Genauigkeit des Messergebnisses gegeben ist. Dies war relativ häufig im Bereich der 5 kHz Terz erforderlich. Durch den Sachverhalt, dass der Frequenzbereich um das Achtfache skaliert wurde, liegt bei den Modellmessungen eine im Vergleich zur Realität wesentlich höhere Luftabsorption vor. Hierdurch sind die gewonnenen Messergebnisse nicht direkt auf die reale Situation übertragbar. Darüber hinaus sind die Weglängen um das Achtfache verkürzt. Diese Einflüsse mussten abgeschätzt und die Messergebnisse entsprechend korrigiert werden. Die Luftabsorption wurde dabei gem. DIN ISO 9613-1 [23] ermittelt. Die Weglänge des Schalls kann aufgrund der komplexen nicht bekannten Schallwege nicht exakt ermittelt werden. Als Abschätzung dient hier der direkte Abstand von Modellschallquelle zum jeweiligen Messpunkt. Der dadurch gemachte Fehler bei der Weglängenermittlung wird auf 150 bis 300 Prozent geschätzt. Unter dieser Annahme ergibt ein maximaler Fehler der Korrekturen von 1,86 dB. Des Weiteren war es erforderlich, die von der Modellschallquelle in jeder Terz abgestrahlte Schalleistung messtechnisch zu ermitteln. Dies geschah nach dem Hüllflächenverfahren für eine kubische die Modellschallquelle umgebende Hüllfläche. Die Messergebnisse der Untersuchung der Modellsituationen der Anlieferzone wurden dann in jeder Terz auf die in dieser Terz abgestrahlte Schalleistung normiert. Damit sind die so normierten Messergebnisse unabhängig vom Frequenzgang der Modellschallquelle.

3.3.3 Ergebnisse der Modellmessungen

Im Folgenden sind auszugsweise einige Ergebnisse der Modellmessungen graphisch aufgetragen. Die vollständigen Messergebnisse können in tabellarischer Form Anhang B entnommen werden. Die graphische Darstellung aller Ergebnisse der 8 untersuchten Fälle an jeweils 63 Messpunkten wäre an dieser Stelle zu umfangreich und ist auch nicht notwendig, da alle grundsätzlichen Erkenntnisse anhand der Ergebnisse an ausgewählten Messpunkten qualitativ erläutert werden können. In den Abbildungen 3.17 bis 3.28 sind die auf den jeweiligen Terz-Schalleistungspegel normierten Schalldruckpegel der Modellmessungen an ausgewählten Punkten aufgetragen. Zur Diskussion sind die ebenfalls entsprechend normierten Berechnungsergebnisse der beiden Quellenmodelle (Punktschallquelle und Flächenschallquelle) mit aufgetragen. Auf die Darstellung von Messergebnissen mit eingebrachter Absorptionfläche ist hier vollständig verzichtet worden, da sich hierbei keine grundsätzlich neuen Gesichtspunkte ergeben. Die Wirkung von Absorptionsflächen besteht darin den Pegel zu senken, verändert aber nicht den qualitativen Verlauf der dargestellten Spektren. Die gemessenen Spektren weisen alle bis in den hohen Frequenzbereich einen schwankenden Verlauf auf, der vermutlich aus Interferenzen innerhalb der Einhausung resultiert. Dieser Sachverhalt ist bei hohen Frequenzen nicht zu erwarten gewesen. Da der Schall zu höheren Frequenzen hin ein immer deutlicheres Strahlverhalten besitzt, bestand die Vermutung, dass im Bereich hoher Frequenzen die Frequenzabhängigkeit verschwindet. Bei ausgeprägtem Strahlverhalten spielen Beugungseffekte keine Rolle mehr. Die Wirkung von Abschirmungen und Reflexionen ist dann für alle Frequenzen gleich. Die entsprechenden Spektren an den Messpunkten sollten einen konstanten Verlauf zeigen.

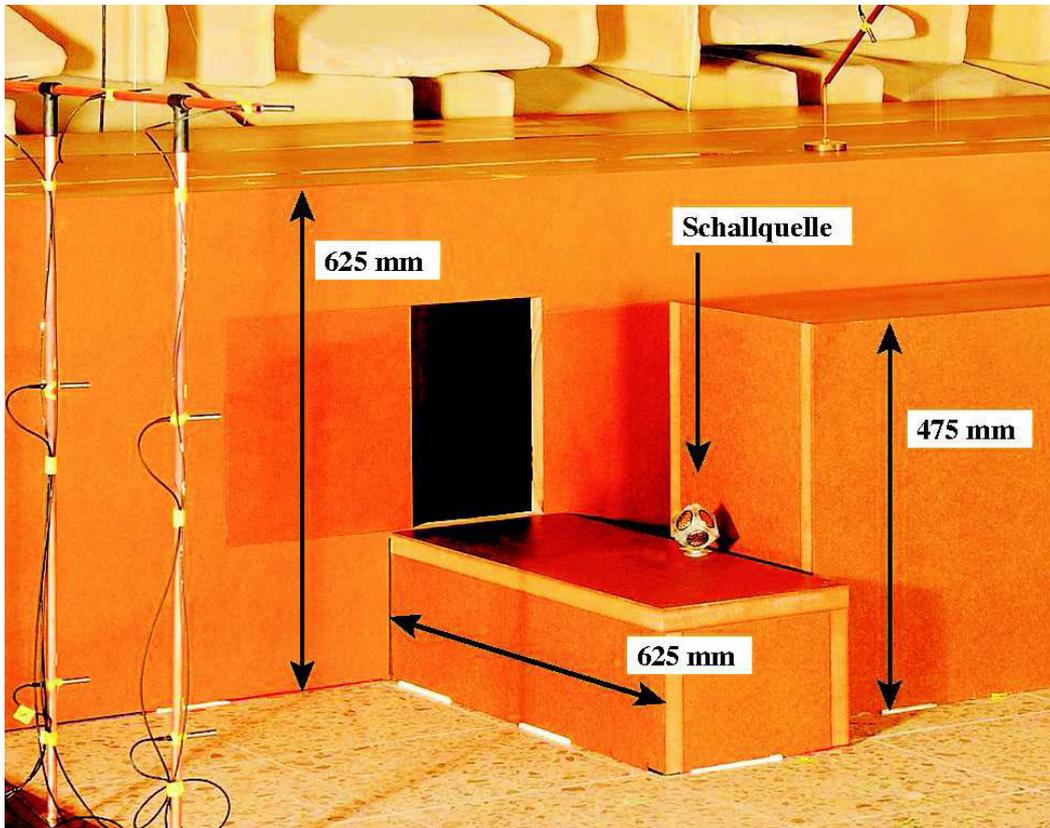


Abbildung 3.15: Anregende Modellschallquelle

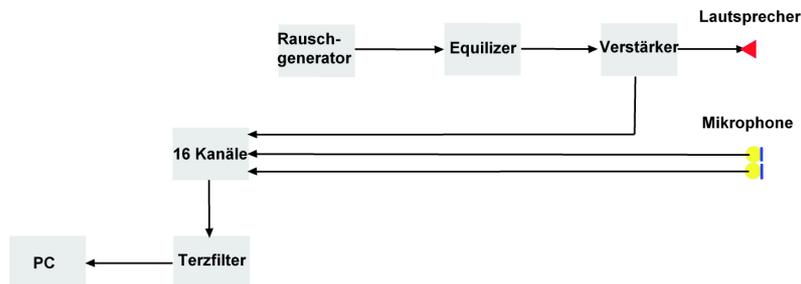


Abbildung 3.16: Prinzipskizze des Messaufbaus

Dies ist aber eindeutig durch die Messergebnisse widerlegt worden.

Aus den Diagrammen 3.17 bis 3.19 kann entnommen werden, dass für den Fall der kurzen Rampe mit einfachem Wetterschutz die Messergebnisse grob vereinfacht gesagt zwischen den Ergebnissen der beiden Berechnungsmodelle liegen. Es ist auch zu erkennen, dass im unteren Frequenzbereich das Berechnungsmodell mit Flächenschallquelle Ergebnisse liefert, die näher an denen der Messung liegen. Im oberen Frequenzbereich ist der Fall umgekehrt. Hier liegen die Ergebnisse mit der Verwendung einer Punktschallquelle zur Emissionsbeschreibung näher an den Messergebnissen. Für Punkte vor dem Lkw zeigt die Darstellung der Abbildung 3.18, dass hier das Berechnungsmodell mit einer Flächenschallquelle im Bereich der Öffnung der Einhausung offenbar ein realistischeres Beschreibungsmodell ist. Für Punkte hinter der Einhausung (Abbildung 3.19 tritt wieder der umgekehrte Fall ein. Die Punktschallquelle beschreibt hier die gemessene „Realität“ deutlich besser. Diese Ergebnisse lassen sich physikalisch interpretieren. Für Punkte vor dem Lkw überschätzt das Berechnungsmodell mit Punktschallquelle die Abschirmung durch den Lkw. Die hierdurch modellierte (und postulierte) Konzentration der Schalleistung im akustischen Zentrum der Emissionen scheint nicht zulässig zu sein. Die vielen Reflexionen an den Umfassungsbauteilen der Laderampe verringern die abschirmende Wirkung des Lkw. Das Strahlverfahren kann offensichtlich diese real vorhandenen komplexen Reflexionen nicht ausreichend genau abbilden. Genau das ist der Ansatz zur Nutzung der Flächenschallquelle als Beschreibungsmodell. Hier ist durch

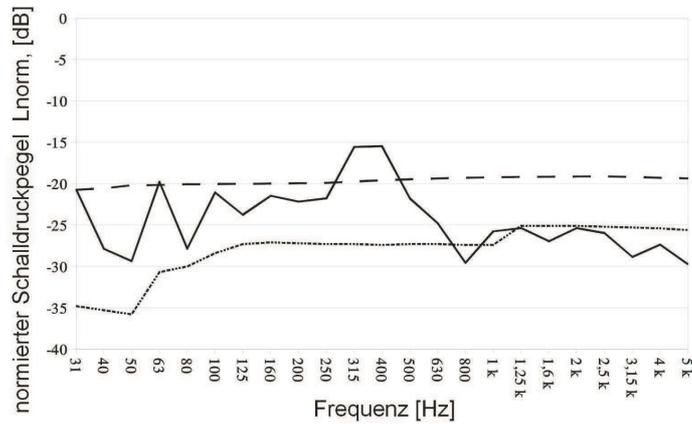
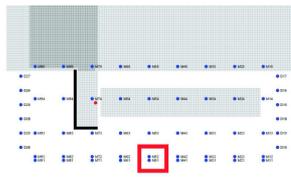


Abbildung 3.17: Vergl. Messung - Flächenquelle - Punktquelle

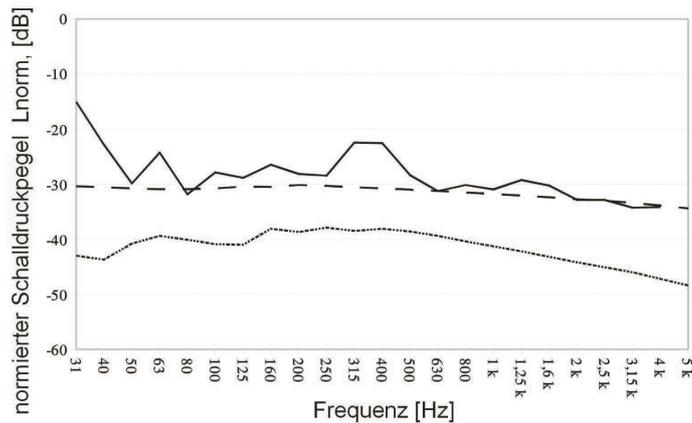
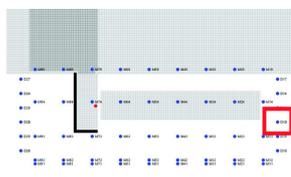


Abbildung 3.18: Vergl. Messung - Flächenquelle - Punktquelle

die Annahme eines diffusen Schallfeldes (hinreichende Bedingung: Vielfachreflexionen) bereits der Großteil der Reflexionen quellseitig in die Modellierung eingeflossen. Für Punkte hinter der Einhausung, also im Bereich starker Abschirmung und großen Beugungseffekten scheint jedoch genau die eben beschriebene Annahme nicht zuzutreffen. Die bessere Übereinstimmung der Messergebnisse mit den Berechnungsergebnissen unter Verwendung einer Punktschallquelle deutet darauf hin, dass hier offensichtlich die Konzentration der Schallemission eine Rolle spielt. Die durch die Flächenschallquelle beschriebene homogene Verteilung der Schalleistung über die abstrahlende Öffnung der Einhausung reduziert die abschirmende Wirkung der baulichen Strukturen für den hinteren Bereich, da in diesem Modell auch die äußeren Randbereiche der Öffnungsfläche Schall emittieren. Diese Randbereiche sind aber weniger stark abgeschirmt als der Bereich der Ladebordwand. Die diskutierten Ergebnisse zeigen, dass im Grunde beide verwendeten Modelle je nach Lage des Immissionsorts bzw. je nach interessierendem Frequenzbereich ihre Berechtigung besitzen. Ein Modell kann in sofern nicht von vornherein ausgeschlossen und das andere favorisiert werden. Will man aber nicht zwei Modelle sondern nur eines zur Modellierung der Immissionssituation verwenden, wäre im Grunde eine Mischform welche die jeweiligen Vorteile vereint, ideal.

Aus den Abbildungen 3.20 bis 3.22 ist ersichtlich, dass für den Fall 2 (kurze Rampe mit verlängerter Einhausung) das Berechnungsmodell mit einer Flächenschallquelle Ergebnisse liefert, die besser mit den Messergebnissen übereinstimmen. Für Punkte vor dem Lkw liegen die Messergebnisse sogar über den Werten der Berechnungsmodelle. Das bedeutet, dass bei der Modellierung der Situation und Berücksichtigung weitergehender Schallschutzmaßnahmen, welche den Schutz seitlich gelegener Immissionsorte zum Ziel haben, die Immissionbelastung für Immissionsorte vor dem Lkw unterschätzt wird. Hinter der Einhausung zeigt sich wieder das bereits bekannte Ergebnis. Das Punktschallquellenmodell beschreibt hier die Modellmessungen besser als das Flächenschallquellenmodell.

Die in den Abbildungen 3.23 bis 3.28 dargestellten Ergebnisse der beiden Situationen mit der tiefen Laderampe (Fall 3 und Fall 4) zeigen keine grundsätzlich neuen Tendenzen.

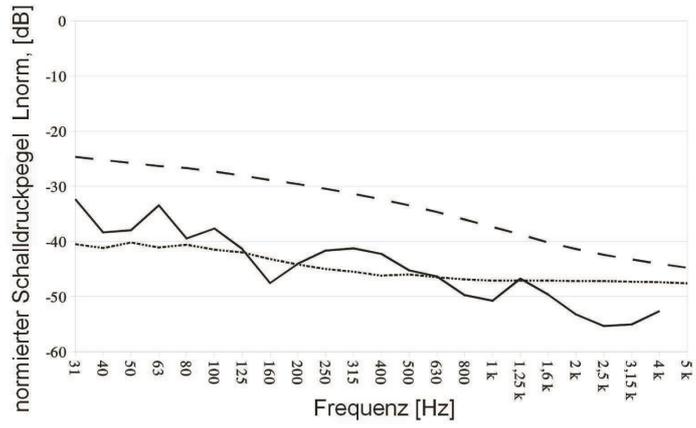
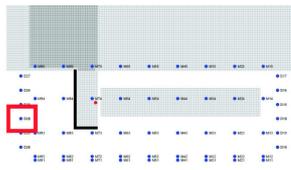


Abbildung 3.19: Vergl. Messung - Flächenquelle - Punktquelle

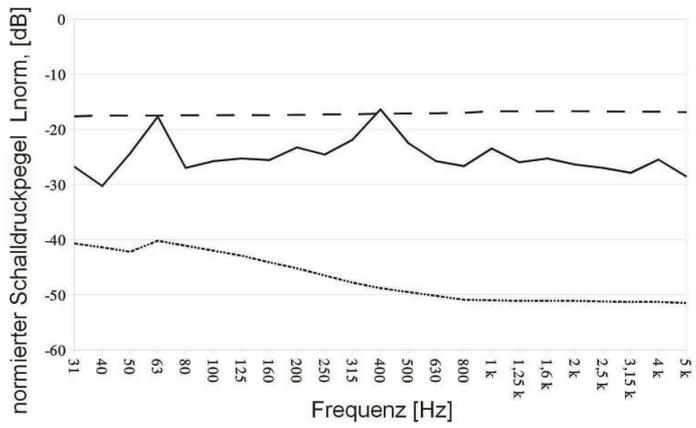
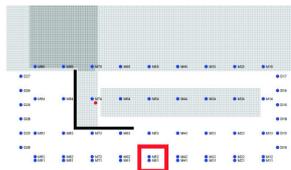


Abbildung 3.20: Vergl. Messung - Flächenquelle - Punktquelle

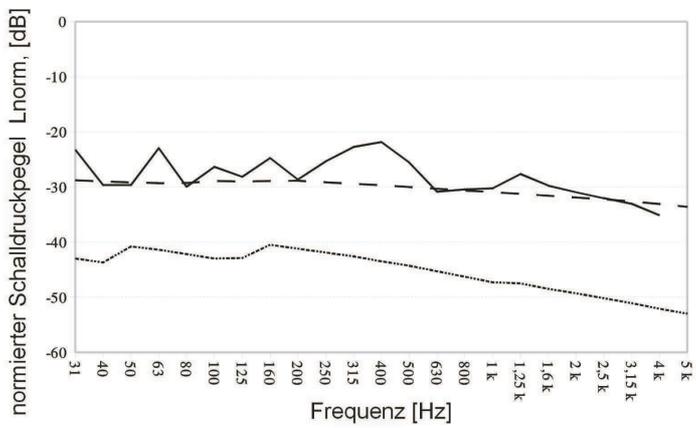
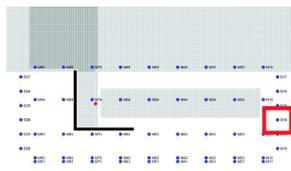


Abbildung 3.21: Vergl. Messung - Flächenquelle - Punktquelle

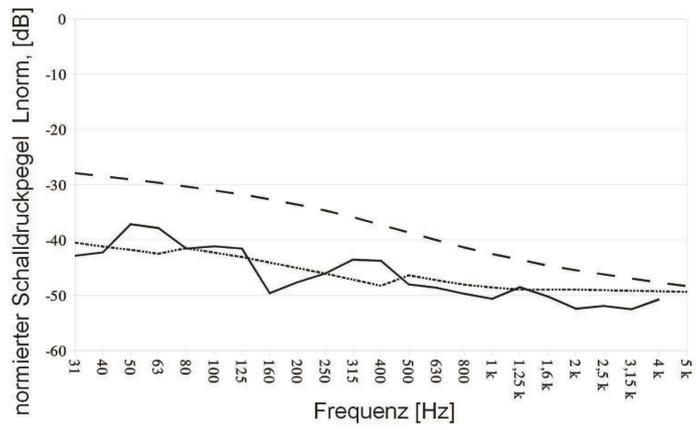
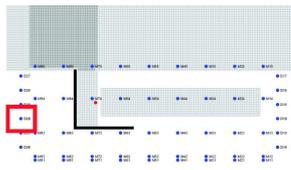


Abbildung 3.22: Vergl. Messung - Flächenquelle - Punktquelle

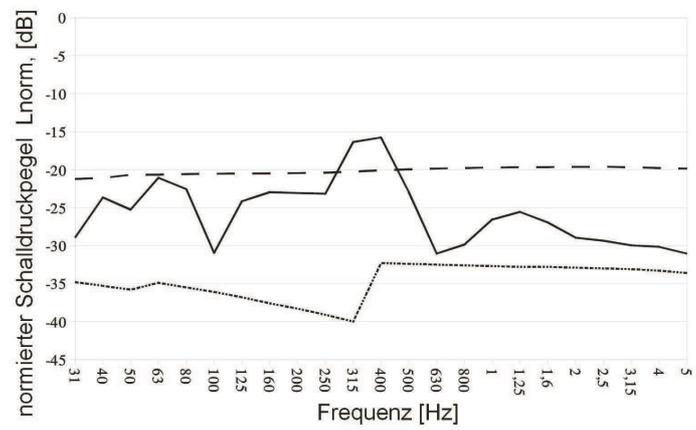
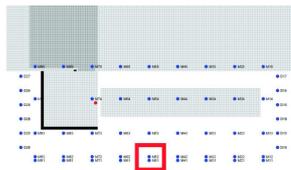


Abbildung 3.23: Vergl. Messung - Flächenquelle - Punktquelle

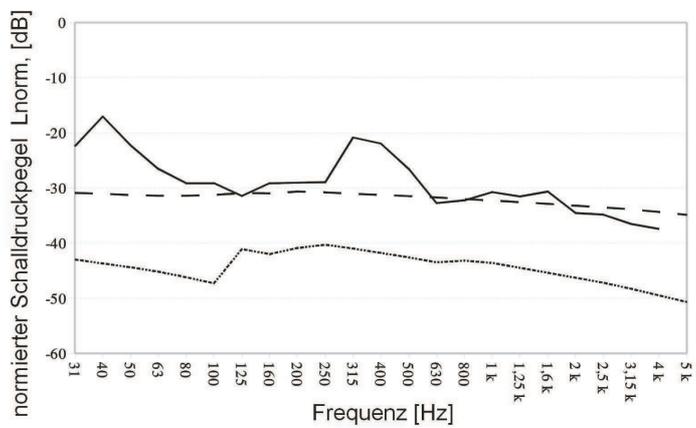
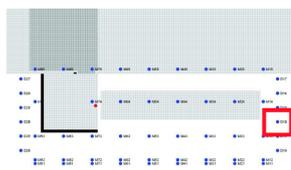


Abbildung 3.24: Vergl. Messung - Flächenquelle - Punktquelle

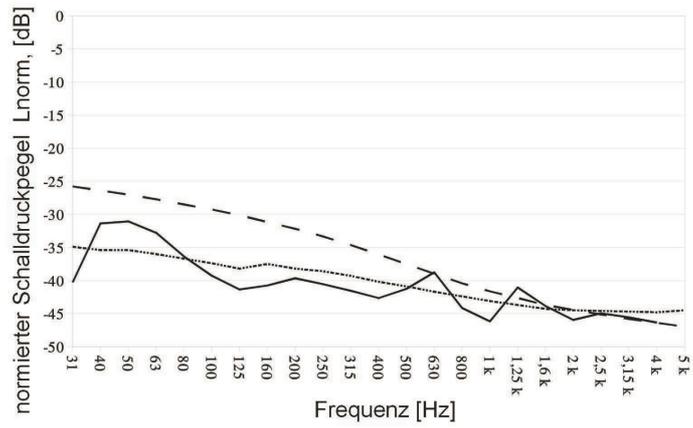
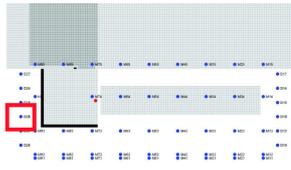


Abbildung 3.25: Vergl. Messung - Flächenquelle - Punktquelle

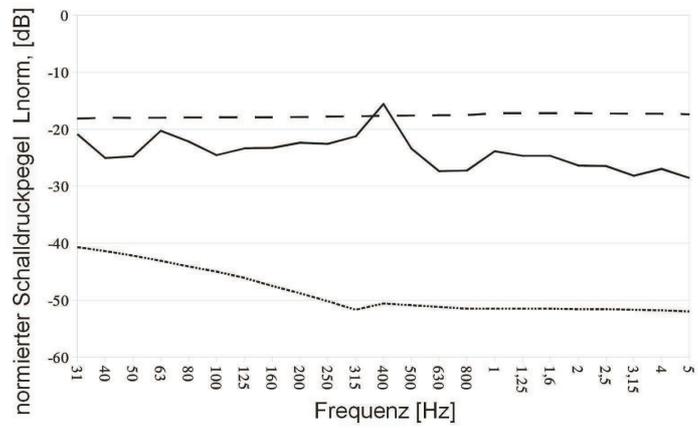
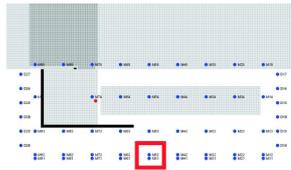


Abbildung 3.26: Vergl. Messung - Flächenquelle - Punktquelle

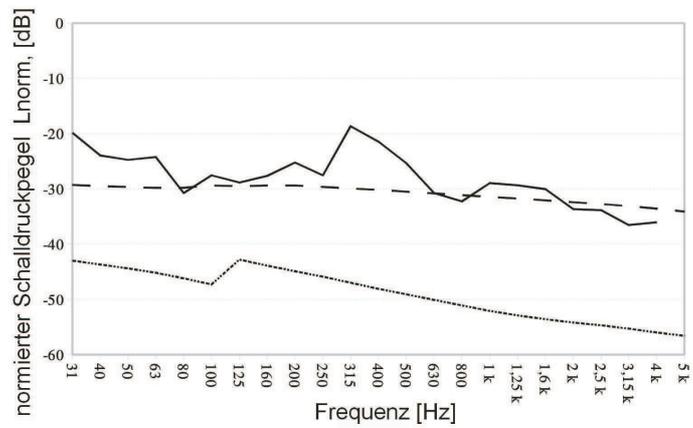
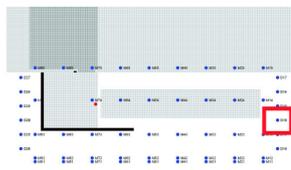


Abbildung 3.27: Vergl. Messung - Flächenquelle - Punktquelle

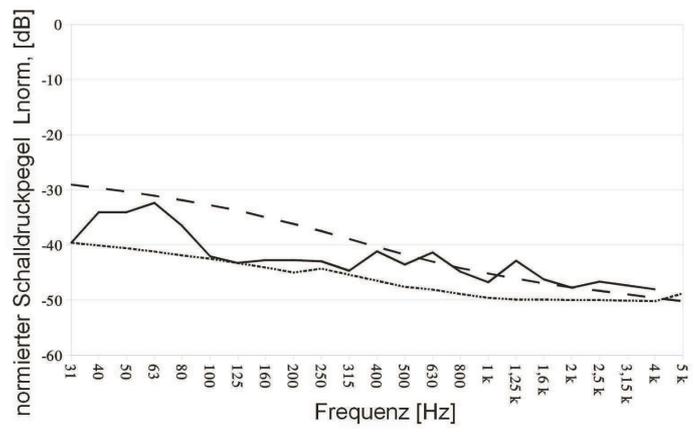
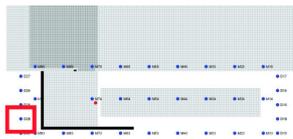


Abbildung 3.28: Vergl. Messung - Flächenquelle - Punktquelle

3.4 Ersatzquellenmodell

3.4.1 Prinzip der Ersatzquelle

Um die grundsätzlichen Möglichkeiten zu untersuchen, die vorgegebenen Schalldruckpegel an den Messpunkten durch eine Ersatzquelle zu reproduzieren, wurden zunächst Studien nur für die Situation „Fall 1“ (vgl. Abbildung 2.4) durchgeführt. Eine Ersatzquelle besteht aus verschiedenen Einzelschallquellen. Diese Einzelschallquellen sind Punktschallquellen. In einem ersten Schritt wurde vor jeden Messpunkt in einem Abstand von 5 cm eine Punktschallquelle angeordnet. Der Schallleistungspegel jeder einzelnen Punktquelle wurde so errechnet, dass der Messwert an dem der Quelle nächstgelegenen Messpunkt reproduziert wird. Aufgrund des geringen Abstandes der Einzelquelle zum nächstgelegenen Messpunkt wird der Schalldruckpegel an diesem nur durch diese eine Schallquelle bestimmt, die Beiträge der deutlich weiter entfernt liegenden Quellen tragen nicht zum Gesamtschalldruckpegel bei.

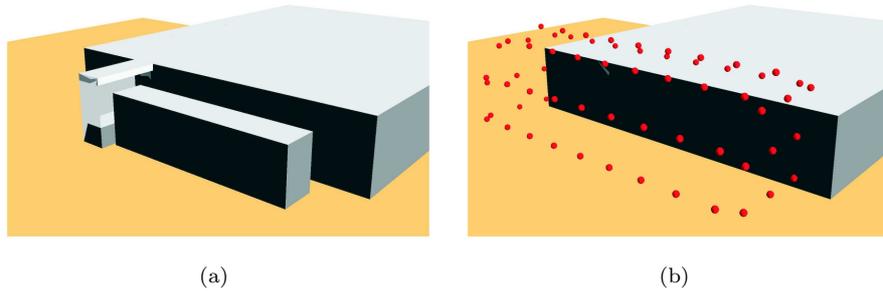


Abbildung 3.29: Ersatzquelle mit 63 Einzelquellen

Eine Ausbreitungsrechnung mit dieser Ersatzschallquelle führt an einem repräsentativen seitlich des Aufliegers gelegenen Messpunkt zu den in den Abbildung 3.30 über die Frequenz aufgetragenen normierten Schalldruckpegeln. Die Ergebnisse sind aus Gründen der Übersichtlichkeit nur für einen ausgewählten Messpunkt dargestellt. Die beiden Kurven der Messergebnisse und der mit der Ersatzschallquelle reproduzierten Pegel liegen direkt aufeinander.

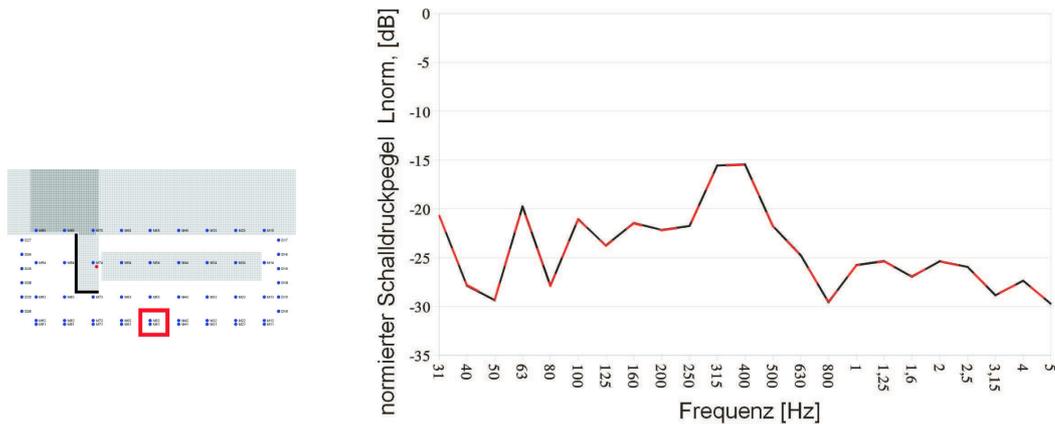


Abbildung 3.30: Vergl. Messung - Ersatzschallquelle an M41 und M42

3.4.2 Qualität der Approximation durch eine Ersatzschallquelle

Um die Qualität der Reproduktion der Messergebnisse durch die Ersatzschallquelle mit einem Einzahlwert zu charakterisieren, ist für das Spektrum aus Abbildung 3.1 die mittlere quadratische Abweichung der Messergebnisse von den mit der Ersatzschallquelle erzeugten A-bewerteten Schalldruckpegel an den einzelnen Messorten (63 Stück) ermittelt worden:

$$s = \sqrt{\frac{1}{63} \sum_{i=1}^{63} (L_{A, \text{Messung an Punkt } i, \text{Terz } j} - L_{A, \text{Ersatzquelle an Punkt } i, \text{Terz } j})^2} \text{ dB} \quad (3.24)$$

Für den im vorangegangenen Abschnitt angegebenen Fall beträgt die mittlere quadratische Abweichung: $s = 0,59 \text{ dB}$. Zur Einordnung soll dieser Wert für die mittlere quadratische Abweichung mit dem der Berechnungsergebnisse für die Modellierung der Situation mit einer Punktschallquelle oder einer Flächenschallquelle verglichen werden.

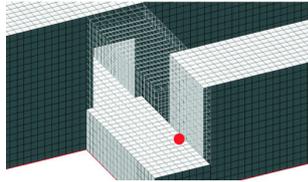


Abbildung 3.31: Modellierung mit Punktschallquelle

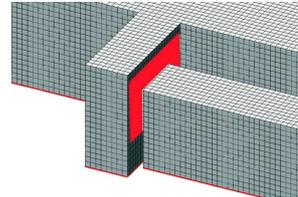


Abbildung 3.32: Modellierung mit Flächenschallquelle

Für die Punktquelle beträgt die mittlere quadratische Abweichung der Messergebnisse von den mit der Punktschallquelle errechneten Schalldruckpegel an den Messpunkten $s = 10,1 \text{ dB}$. Für die Ergebnisse mit Verwendung einer Flächenschallquelle beträgt der entsprechende Wert $s = 5,45 \text{ dB}$.

Aus der Abbildung 3.30 ist ersichtlich, dass die Messergebnisse durch die in Abbildung 3.29 dargestellte Ersatzschallquelle exakt reproduziert werden. Die beiden gegenübergestellten Kurven (gestrichelte und durchgezogene Linie in den Diagrammen) liegen fast überall übereinander. Mit Blick auf die spätere einfache Anwendung der Ersatzschallquelle weist die in 3.29 dargestellte Anordnung von 63 Punktschallquellen entscheidende Nachteile in Bezug auf die einfache Handhabung auf. Darüber hinaus beinhaltet die Quellenanordnung der Abbildung 3.29 keinen Bezug zur ursprünglichen Geometrie der Situation (Situation 1, kurze überdachte Laderampe mit seitlicher Wand). Für geringfügige Variationen in den Abmessungen der Anlieferzone kann grundsätzlich die Gültigkeit der Anwendung dieser speziellen Ersatzschallquelle hinterfragt werden. Aus diesem Grunde war es notwendig, Studien hinsichtlich der Möglichkeit der Reduzierung der Anzahl der einzelnen Punktschallquellen durchzuführen.

Hier lag ein wesentlicher Beitrag von Frau Prof. Dr. Langer von der TU Braunschweig auf diesen Sachverhalt hinzuweisen und Ideen bei den sich anschließenden zahlreichen Untersuchungen von verschiedenen Quellanzahlen und -Anordnungen beizusteuern. Verschiedene Möglichkeiten wurden im regen Austausch gemeinsam diskutiert. Auch die nachfolgend erläuterte Vorgehensweise (MFS, SVD) wurde von Ihr initiiert.

3.4.3 Verringerung der Komplexität

3.4.3.1 Methode der Fundamentallösung

Um den allgemeinen Fall der Approximation eines beliebigen Schallfeldes an diskreten Raumpunkten durch eine zu ermittelnde Quellverteilung zu lösen, bedient man sich der sog. Methode der Fundamentallösungen (MFS). Hierbei wird über die räumliche Schallausbreitung des Feldes einer Punktschallquelle (Fundamentallösung) eine Beziehung zwischen jeder Quelle und jedem diskreten Raumpunkt, an dem ein bestimmter vorgegebener Schalldruckpegel zu erreichen ist, hergestellt. Der freie Parameter ist jeweils die Quellstärke der einzelnen Punktschallquelle der Quellverteilung, im vorliegenden Fall beschrieben durch den Schalleistungspegel L_w . Im allgemeinsten Fall werden Schallfelder durch die inhomogene Wellengleichung

$$\Delta p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = a$$

mit beliebiger Inhomogenität a beschrieben. Für den speziellen Fall einer periodischen Anregung, beschrieben durch ein periodisches Verhalten von a , kann diese periodische Zeitabhängigkeit separiert werden

$$p = \hat{p} e^{-i\omega t}$$

Man erhält die fouriertransformierte Form der Wellengleichung und spricht hierbei vom Übergang in den Frequenzbereich

$$\Delta \hat{p} - k^2 \hat{p}^2 = \hat{a}, \quad k = \frac{\omega}{c}$$

Eine am Ort $\vec{\xi}$ lokalisierte Punktschallquelle lässt sich mit der δ -Funktion als Inhomogenität beschreiben. Die resultierende Helmholtzgleichung

$$\Delta \hat{p} - k^2 \hat{p}^2 = \delta(\vec{x} - \vec{\xi})$$

besitzt als Lösung die sog. Fundamentallösung

$$\begin{aligned} \hat{p}(r) &= \frac{1}{4\pi r} e^{-ikr}, \quad r = |\vec{x} - \vec{\xi}| \\ &=: G(\vec{x}, \vec{\xi}) \end{aligned}$$

Die Fundamentallösung kann als Greensche Funktion der inhomogenen Helmholtzgleichung mit beliebiger Inhomogenität \hat{a} verstanden werden. Somit ergibt sich als allgemeine Lösung der inhomogenen Helmholtzgleichung für beliebige Inhomogenitäten

$$\hat{p}(\vec{\xi}) = \int d^3x G(\vec{x}, \vec{\xi}) \hat{a}(\vec{x})$$

Dieses Ergebnis kann als Prinzip der Superposition gelesen werden. Stellt die Inhomogenität \hat{a} nun eine Quellverteilung einzelner Schallquellen an diskreten Raumpunkten dar, so geht das (kontinuierliche) Integral in eine (diskrete) Summe über

$$\vec{x}_1, \dots, \vec{x}_N : \quad \hat{p}(\vec{\xi}) = \sum_i G(\vec{x}_i, \vec{\xi}) \hat{a}(\vec{x}_i)$$

Dieses Verfahren wird „Methode der Fundamentallösungen“ genannt. Es soll nun auf Pegel angewendet werden. Statt der Fundamentallösung stellt sich in Pegelschreibweise die Ortsabhängigkeit des Schalldruckpegels wie folgt dar. Für den von Quelle j verursachten Schalldruckpegel $L_{p(k,j)}$ an Punkt k gilt

$$L_{p(k,j)} = L_{w(j)} + A_{(k,j)}, \quad A_{(k,j)} < 0$$

Die Summe der Beiträge aller Quellen liefert an Punkt k den Gesamtschalldruckpegel

$$\begin{aligned} L_{p(k)} &= 10 \lg \left(\sum_j 10^{0,1L_{p(k,j)}} \right) \\ &= 10 \lg \left(\sum_j 10^{0,1(L_{w(j)} + A_{(k,j)})} \right) \end{aligned}$$

Wendet man diese Gleichung auf alle diskreten Raumpunkte, an denen das Schallfeld approximiert werden soll an, so erhält man ein lineares Gleichungssystem der Form

$$\begin{aligned} 10^{0,1L_{p(1)}} &= \sum_j 10^{0,1A_{(1,j)}} \quad 10^{0,1L_{w(j)}} \\ &\vdots \\ 10^{0,1L_{p(k)}} &= \sum_j 10^{0,1A_{(k,j)}} \quad 10^{0,1L_{w(j)}} \\ &\vdots \\ 10^{0,1L_{p(N)}} &= \sum_j 10^{0,1A_{(N,j)}} \quad 10^{0,1L_{w(j)}} \\ &\Leftrightarrow \\ \mathbf{L}_p &= \mathbf{A} \cdot \mathbf{L}_w \end{aligned} \tag{3.25}$$

welches im allgemeinen Fall nicht quadratisch und damit nicht zwangsläufig lösbar ist. Jedoch ist eine näherungsweise Lösung durch die sog. Moore-Penrose-Inverse (Pseudoinverse) möglich. Dieses Verfahren basiert auf der Methode der Singulärwertzerlegung.

3.4.3.2 Singulärwertzerlegung - Pseudoinverse

Zur näherungsweisen Lösung nichtquadratischer Gleichungssysteme wird die Matrix \mathbf{A} mittels Singulärwertzerlegung in drei Matrizen zerlegt

$$\mathbf{A} = \mathbf{U} \cdot \mathbf{S} \cdot \mathbf{V}^T \quad (3.26)$$

wobei \mathbf{S} nur in der „Diagonalen“ von Null verschiedene Einträge besitzt. Der Begriff „Diagonale“ ist hier leicht irreführend, da \mathbf{S} im allgemeinen nicht quadratisch ist. Die „Diagonaleinträge“ $(s_{ij}) = \sqrt{\lambda}$ errechnen sich aus den Eigenwerten λ von $\mathbf{A} \cdot \mathbf{A}^T$. Die Pseudoinverse ist dann definiert als

$$\mathbf{A}^+ = \mathbf{V} \cdot \mathbf{S}^+ \cdot \mathbf{U}^T \quad (3.27)$$

wobei $S^+ = (s_{ij}^+)$, $s_{ji}^+ = \frac{1}{s_{ii}}$ wenn $s_{ii} \neq 0$ und andernfalls 0 ist. Die Näherungslösung von 3.25 ergibt dann zu

$$\mathbf{L}_w = \mathbf{A}^+ \cdot \mathbf{L}_p \quad (3.28)$$

Dieses Verfahren der Methode der Fundamentallösungen einschließlich Anwendung der Pseudoinversen kann nun zur Ermittlung der Schallleistungspegel beliebiger Quellverteilungen verwendet werden. Die Güte einer approximativen Lösung eines linearen Gleichungssystems kann über die sog. Konditionszahl der Matrix \mathbf{A} beschrieben werden.

3.4.3.3 Die Konditionszahl

Die Konditionszahl einer Matrix \mathbf{A} kann über (vgl. [25])

$$\kappa = \|\mathbf{A}\| \cdot \|\mathbf{A}^{-1}\| \quad (3.29)$$

mit einer beliebigen Matrixnorm $\|\cdot\|$ definiert werden. Als Matrixnormen kommen z.B. Zeilennorm $\|\mathbf{A}\| = \max_{k=1}^m \sum_{j=1}^n a^k$, Spaltennorm $\|\mathbf{A}\| = \max_{j=1}^n \sum_{k=1}^m a_j$ oder Spektralnorm $\|\mathbf{A}\| = \chi_{max}$, wobei χ_{max} der maximale Eigenwert von \mathbf{A} ist, in Frage.

Diese Konditionszahl ist im vorliegenden Fall frequenzabhängig, da für jede Frequenz ein eigenes Gleichungssystem gelöst werden muss. Um die vollständigen frequenzabhängigen Schallleistungspegel der in 3.29 dargestellten Einzelquellen im Frequenzbereich von 31 Hz bis 4 kHz zu erhalten, müssen somit 22 Gleichungssysteme gelöst werden. In einem nächsten Schritt wurde nun untersucht, wie sich diese Konditionszahl, d.h. die Güte der Approximation der Messergebnisse verändert, wenn der Abstand zwischen den jeweiligen Einzelquellen und den Messpunkten vergrößert wird. Der Hintergrund dieser Untersuchungen ist der fehlende Bezug der in Abbildung 3.29 dargestellten Ersatzquelle zur konkreten Geometrie der Situation. Darüber hinaus ist eine Anzahl von 63 Einzelquellen, welche die Ersatzquelle bilden, nicht bequem verwendbar. Die Idee war mit einer geringst möglichen Anzahl von Einzelquellen auszukommen und den Bezug zur „Topologie“ der jeweils abgebildeten Situation nicht vollständig zu verlieren. Gelingt es, die Positionen der Einzelquellen in Beziehung zur Geometrie zu bringen, so könnten geringfügige Veränderungen der Maße der geometrischen Situation direkt durch eine entsprechende Anpassung der Position der jeweiligen Einzelquellen berücksichtigt werden. Variiert man den Abstand der 3.29 dargestellten Einzelquellen zu den Messpunkten und trägt die Größenordnung der Konditionszahlen über den Abstand auf, so erhält man die in Abbildung 3.33 dargestellten Verlauf.

Aus anderen Untersuchungen [24] ist bekannt, dass die Konditionszahl mit wachsendem Abstand und zunehmender Anzahl von Quellen tendenziell anwächst (nicht zwingend stetig). Aus [24] ist darüber hinaus ableitbar, dass eine Vergrößerung des Abstandes einen wesentlich größeren Einfluss auf die Konditionierung des Gleichungssystems hat, als die Vergrößerung der Quellenanzahl. Grundsätzlich ist auch aus Abbildung 3.33 dieses Verhalten ablesbar. In Bezug auf die angesprochene Vereinfachung der primär erzeugten Ersatzschallquelle muss somit festgestellt werden, dass eine Reduzierung der Anzahl von Ersatzschallquellen zunächst eine positive Auswirkung auf die Qualität der Approximation haben sollte. Will man aber die Einzelquellen im Bereich der einzelnen Bauteile der Situation anordnen, so ist durch die Abstandsvergrößerung ggf. der umgekehrte Effekt zu erwarten. Eine systematische Vorgehensweise zur Ermittlung von Anzahl und

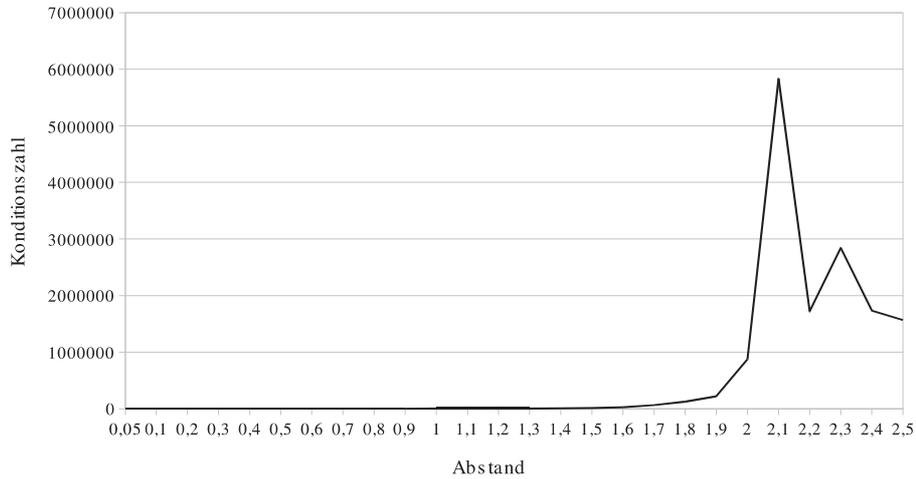


Abbildung 3.33: Verhalten der Konditionszahl mit wachsendem Abstand der Einzelquelle zum Messpunkt

Lage der Einzelquellen kann aus diesem grundsätzlichen Verhalten der Konditionszahlen nicht abgeleitet werden.

3.4.4 Ergebnis: Reduzierte Ersatzquellen

Aufgrund des nicht eindeutigen Zusammenhangs zwischen der Konditionszahl und der Anzahl und Lage der Einzelquellen waren weitere Studien zum Verhalten der Konditionszahlen für die vorliegenden Geometrien erforderlich. Zunächst wurde die Abhängigkeit der Konditionszahl von der Quellenanzahl für die Geometrie-Variante „Fall 1“ (vgl. Abbildung 2.4) ausführlich untersucht. Die folgenden Abbildungen 3.34 bis 3.41 zeigen die Variation der Quellenanzahl absteigend von 125 auf 4 Quellen. Die entsprechende Konditionszahl (κ) ist in den Bildunterschriften mit angegeben.

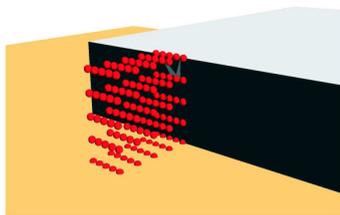


Abbildung 3.34: 125 Quellen - $\kappa \approx 10^{17}$

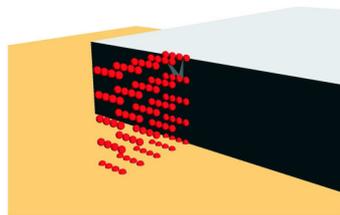


Abbildung 3.35: 100 Quellen - $\kappa \approx 3 \cdot 10^4$

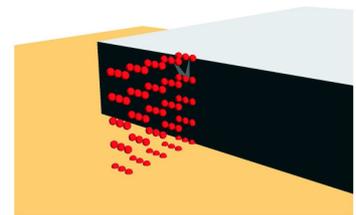


Abbildung 3.36: 75 Quellen - $\kappa \approx 8 \cdot 10^4$

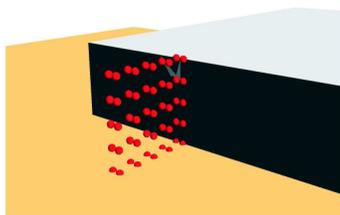


Abbildung 3.37: 50 Quellen - $\kappa \approx 3 \cdot 10^4$

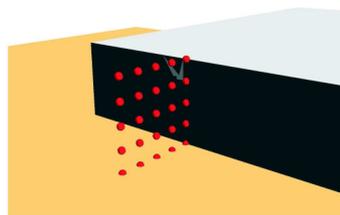


Abbildung 3.38: 25 Quellen - $\kappa \approx 10^3$

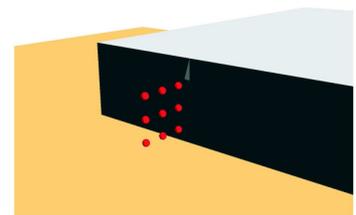


Abbildung 3.39: 9 Quellen - $\kappa \approx 6 \cdot 10^2$

Die ermittelten Konditionszahlen zeigen die erwartete Tendenz. Die Position der Einzelquellen in den angesprochenen Studien liegt in Bereich der baulichen Struktur des Wetterschutzes der Anlieferrampe. Insofern wäre bereits hier ein Bezug zur konkreten Geometrie der Situation 2.4 gegeben. Ermittelt man den Wert der mittleren quadratischen Abweichung nach Gleichung

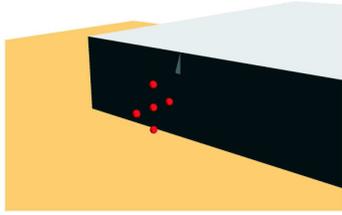


Abbildung 3.40: 5 Quellen - $\kappa \approx 10^2$

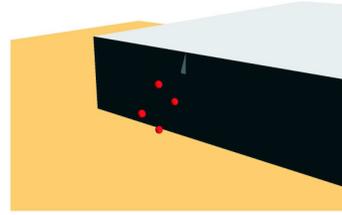


Abbildung 3.41: 4 Quellen - $\kappa \approx 3.5 \cdot 10^1$

3.24, so erhält man für den Fall mit 5 Einzelschallquellen $s = 10,79$. Es ist hieraus ersichtlich, dass sich mit dieser Art von Ersatzschallquelle offenbar keine Verbesserung bei der Approximation des frequenzabhängigen Verlaufs der Messergebnisse erreichen lässt. Daraufhin erfolgten weitere Untersuchungen, wie die Reproduktion der Messergebnisse durch ein Quellenmodell verbessert werden kann. Der Ansatz war, die Geometrie mit ihren abschirmenden und reflektierenden Eigenschaften in die Berechnungen einzubeziehen. Diese Ergebnisse sollen im Folgenden kurz dargestellt werden. Zunächst wurde wieder überprüft, ob das Verhalten der Konditionszahlen dem Erwarteten entspricht. Die Anordnung der Einzelquellen folgte dabei physikalischen Leitbildern. Zunächst wurden verschiedene Anzahlen von Einzelquellen in der Nähe der reflektierenden Wände des Wetterschutzes / Einhausung der Anlieferrampe platziert. Die Idee ist dabei die Vielzahl der Reflexionen des Schalls, die dazu führen, dass der Schall die Einhausung verlässt, durch diese Quellen zu beschreiben. Es wurden 125, 20 und 5 Schallquellen vor den reflektierenden Wänden platziert. Die folgenden Abbildungen sollen einen Eindruck von diesen Anordnungen vermitteln.

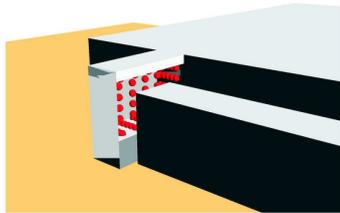


Abbildung 3.42: 125 Quellen - $\kappa \approx 3 \cdot 10^3$

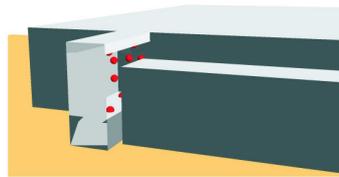


Abbildung 3.43: 20 Quellen - $\kappa \approx 8 \cdot 10^1$

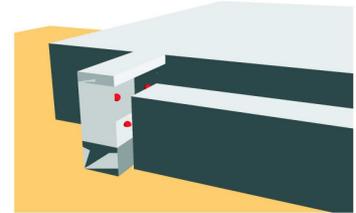


Abbildung 3.44: 5 Quellen - $\kappa \approx 6 \cdot 10^1$

Das Verhalten der Konditionszahlen entspricht dem erwarteten. Der Wert der mittleren quadratischen Abweichung ist für das Modell mit 5 Quellen: $s = 4,36$ dB. Damit wäre ein Wert erreicht, der verglichen mit dem Wert der Approximation mit einer Flächenschallquelle eine Verbesserung der Beschreibung der Messergebnisse darstellt. Bei der Entwicklung einer Anordnung von Einzelquellen kann man auch einem anderen physikalischen Leitbild folgen. Es wäre denkbar, ähnlich der Modellierung durch eine Flächenschallquelle die Öffnung der baulichen Umschließung der Anlieferrampe durch Einzelschallquellen abzubilden. Im Gegensatz zur Flächenschallquelle, welche eine konstante räumliche Verteilung der emittierten Schalleistung über ihre Oberfläche beschreibt, bestünde dann die Möglichkeit, diese Homogenität aufzulösen und ggf. eine bessere Reproduzierbarkeit der Messergebnisse durch eine inhomogene Verteilung der Schalleistung zu erreichen. In den folgenden zwei Anordnungen sind im einen Fall 25 im anderen Fall 5 Einzelquellen vor der Öffnung der Einhausung angeordnet worden.

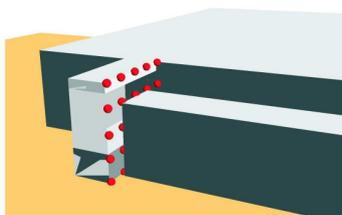


Abbildung 3.45: 25 Quellen - $\kappa \approx 10^3$

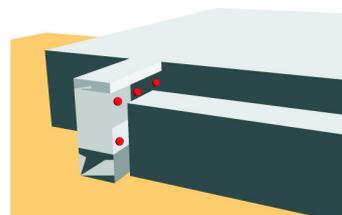


Abbildung 3.46: 5 Quellen - $\kappa \approx 10^1$

Situation	s [dB] für Punktquelle [2]	s [dB] für Flächenquelle [3]	s [dB] für Ersatzquelle [4]	Δ zu [4] [5]
Fall 1	10,10	5,45	4,36	1,09
Fall 2	16,50	5,90	3,61	2,29
Fall 3	12,57	3,79	3,68	0,11
Fall 4	16,99	4,55	3,17	1,38
Fall 1 mit Absorption	13,33	8,01	4,62	3,39
Fall 2 mit Absorption	15,65	10,0	4,32	5,68
Fall 3 mit Absorption	13,64	6,69	3,17	3,52
Fall 4 mit Absorption	13,37	6,38	4,0	2,38

Tabelle 3.1: Ergebnisübersicht mit mittlerer quadratischer Abweichung

Auch hier liefert die größere Anzahl von Einzelquellen die höhere Konditionszahl. Der Wert der mittleren quadratischen Abweichung ist für das Modell mit 5 Quellen: $s = 9,3$ dB. Aus dem Wert der mittleren quadratischen Abweichung ist ersichtlich, dass sich eine genauere Beschreibung der Messergebnisse bei der vorliegenden Situation mit diesem Modell nicht erreichen lässt. Das beste Ergebnis liefert hier die in 3.44 dargestellte Quellenanordnung mit 5 Einzelquellen.

Die oben ausführlich dargestellte Vorgehensweise ist in dieser Art auf die anderen Situationen der Abbildungen 2.5 (Fall 2), 2.6 (Fall 3) und 2.7 (Fall 4) jeweils mit und ohne absorbierende Verkleidung in Innern angewandt worden. Dabei hat sich gezeigt, dass für alle Fälle bis auf Fall 1 und Fall 1 mit absorbierender Innenverkleidung Ersatzquellenmodelle der Abbildung 3.46, also eine Anordnung vor der Öffnung der Einhausung die besten Ergebnisse lieferten.

In den Abbildungen 3.47 bis 3.50 sind die normierten Pegel der Ersatzschallquellen für die Fälle 1 bis 4 in der gewohnten Weise graphisch dargestellt.

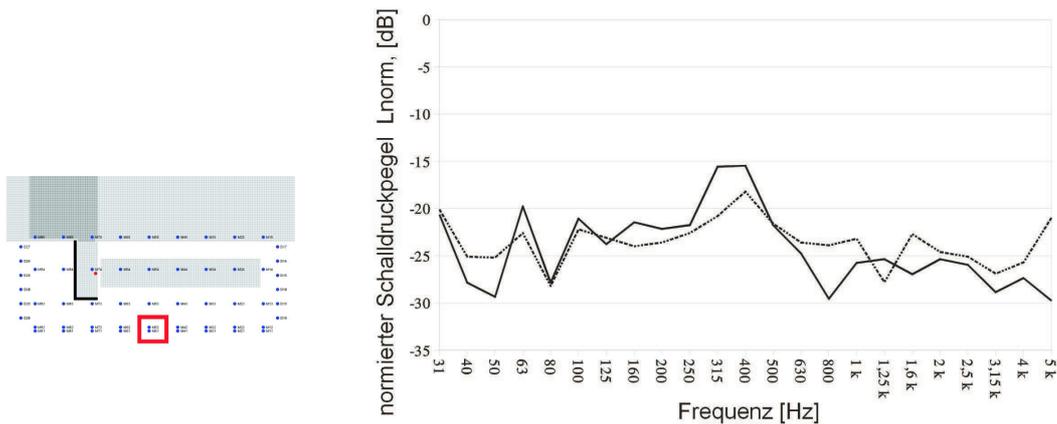


Abbildung 3.47: Vergl. Messung - Ersatzschallquelle an M41 und M42

Einzelheiten zu den jeweiligen Ersatzquellen sind im Anhang angegeben. Die angegebenen Spektren der einzelnen Punktschallquellen sind in der erläuterten Weise normiert. Um einen Anlieferprozess mit Schalleistungspegel L_{wA} abzubilden ist zu jeder Terz dieser Wert zu addieren.

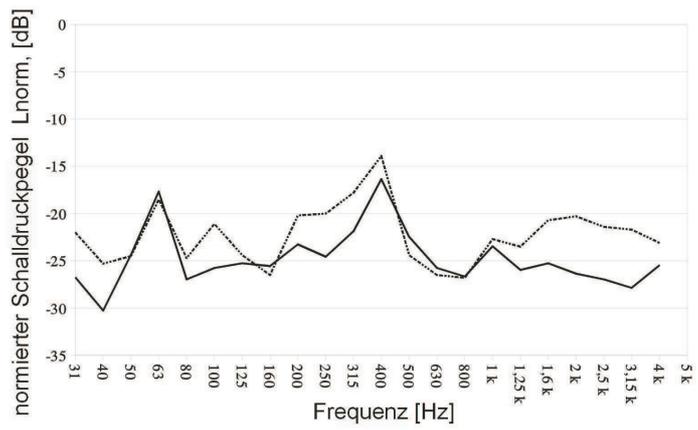
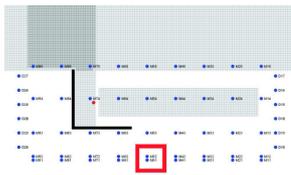


Abbildung 3.48: Vergl. Messung - Ersatzschallquelle an M41 und M42

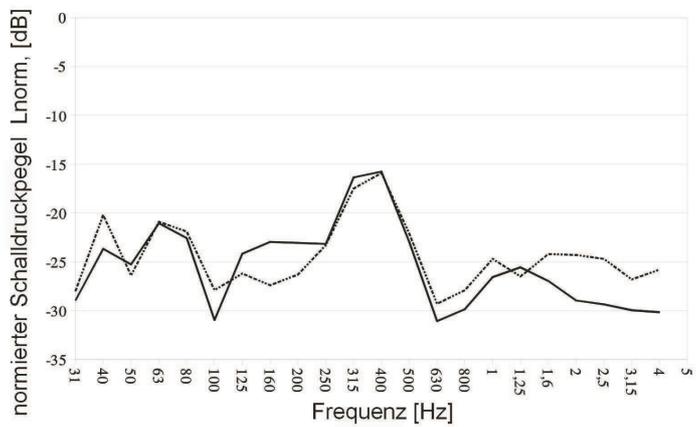
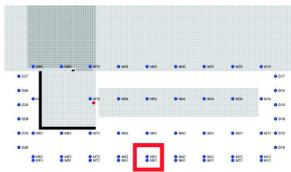


Abbildung 3.49: Vergl. Messung - Ersatzschallquelle an M41 und M42

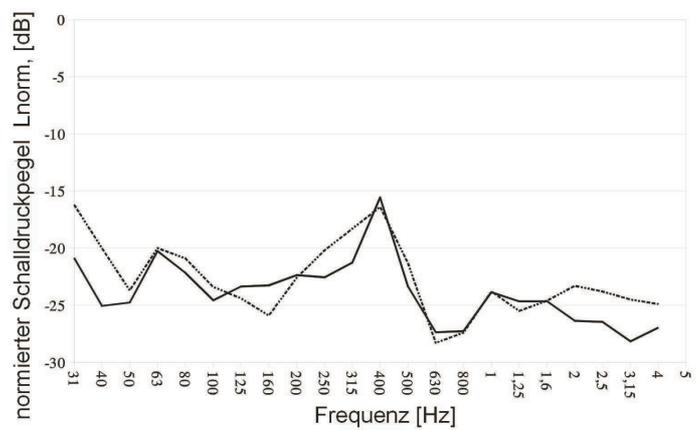
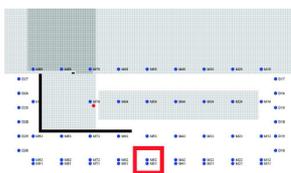


Abbildung 3.50: Vergl. Messung - Ersatzschallquelle an M41 und M42

3.5 Die Randlement-Methode

3.5.1 Grundlagen

Die Schallausbreitung kann allgemein durch die Wellengleichung

$$\Delta p(\vec{x}, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p(\vec{x}, t)}{\partial t^2} = a(\vec{x}, t) \quad (3.30)$$

beschrieben werden. Hierbei bezeichnet $p(\vec{x}, t)$ die Druckänderung gegenüber dem statischen (atmosphärischen) Druck und c die Schallgeschwindigkeit. Die Inhomogenität $a(\vec{x}, t)$ beschreibt die Schallquelle. Erfolgt die Anregung durch die Schallquelle harmonisch, so kann diese allgemein als

$$a(\vec{x}, t) = \bar{a}(\vec{x}) \cdot e^{-i\omega t} \quad (3.31)$$

wobei \bar{a} komplex ist, geschrieben werden. Als Lösung der Wellengleichung 3.30 für harmonische Anregungen bietet sich der Separationsansatz:

$$p(\vec{x}, t) = \bar{p}(\vec{x}) \cdot \bar{p}(t) = \bar{p}(\vec{x}) e^{-i\omega t} \quad (3.32)$$

an. \bar{p} bezeichnet hierbei den Druck als komplexe Größe. Damit ergibt sich für die räumliche Verteilung des Schallfeldes die inhomogene Helmholtzgleichung

$$\Delta \bar{p}(\vec{x}) + \frac{\omega^2}{c^2} \bar{p}(\vec{x}) = \bar{a}(\vec{x}) \quad (3.33)$$

Mit $\frac{\omega}{c} = k$ kann die Wellenzahl k eingeführt werden, welche die Anzahl der Wellenlängen je Längeneinheit ausdrückt. Da der Separationsansatz der Anwendung einer Fouriertransformation auf die Wellengleichung äquivalent ist, spricht man bei der Betrachtung der Helmholtzgleichung für akustische Phänomene auch vom „Frequenzbereich“. Mit der Lösung der Helmholtzgleichung für eine vorgegebene Quellverteilung $\bar{a}(\vec{x})$ ist die räumliche Verteilung des Schallfeldes bekannt. Multiplikation mit $e^{-i\omega t}$ liefert die vollständige Lösung einschließlich der Zeitabhängigkeit. Für den in dieser Arbeit betrachteten Fall einer Anregung durch eine Punktquelle im Punkt $\vec{x} = \vec{b}$ ergibt sich für die Inhomogenität der Helmholtzgleichung

$$\bar{a}(\vec{x}) = -a_0 \delta(\vec{x} - \vec{b}) \quad (3.34)$$

$\delta(\vec{x})$ bezeichnet dabei die DIRAC'sche Deltafunktion. a_0 beschreibt hier die „Quellstärke“. Für die daraus resultierende Differenzialgleichung

$$\Delta \bar{p}(\vec{x}) + k^2 \bar{p}(\vec{x}) = -a_0 \delta(\vec{x} - \vec{b}) \quad (3.35)$$

ist mit $-\frac{1}{4\pi|\vec{x}-\vec{b}|}$ als Greensche Funktion des Laplace-Operators eine Lösung bekannt:

$$\bar{p}(\vec{x}) = a_0 \frac{1}{4\pi} \frac{1}{|\vec{x} - \vec{b}|} e^{-ik|\vec{x}-\vec{b}|} \quad (3.36)$$

Diese Funktion ist die Greensche Funktion $G(\vec{x}, \vec{b})$ der Gleichung 3.33. Allgemein nennt man eine Funktion Greensche Funktion einer inhomogenen Differenzialgleichung, wenn sie die entsprechende Gleichung mit der Diracsche Deltafunktion als Inhomogenität löst. Bei Kenntnis der Greenschen Funktion einer inhomogenen Differenzialgleichung kann sofort die allgemeine Lösung dieser Gleichung angegeben werden. Im Fall von 3.33 lautet diese

$$\bar{p}(\vec{x}) = \int d^3b \bar{a}(\vec{b}) \frac{1}{4\pi} \frac{1}{|\vec{x} - \vec{b}|} e^{-ik|\vec{x}-\vec{b}|} \quad (3.37)$$

Anschaulich bedeutet dies, das Schallfeld einer beliebigen Quellverteilung $\bar{a}(\vec{x})$ ergibt sich durch Superposition ($\int d^3x$) der Felder von Punktschallquellen. Aus 3.36 kann die Bedeutung von a_0 genauer spezifiziert werden. Die Leistung P einer beliebigen Schallquelle, definiert als die in einer Zeiteinheit abgegebene Schallenergie, ist gegeben durch

$$P = \int d\vec{f} \cdot \vec{I} \quad (3.38)$$

wobei \vec{I} die Schallintensität bezeichnet. Für das radialsymmetrische Feld einer Punktschallquelle bietet sich zur Bestimmung der Schalleistung der Quelle eine Kugeloberfläche als Integrationsfläche an. Somit gilt $d\vec{f} = dr r^2 \vec{e}_r$. Für radialsymmetrische Schallfelder gilt $\vec{I} = I(r) \vec{e}_r$. Für die

abgestrahlte Schalleistung ergibt sich somit $P = \int dr r^2 I(r) = 4\pi r^2 I(r)$. Mit $I = \frac{p_{eff}^2}{Z_0} = \frac{|p|^2}{2Z_0}$ folgt $P = 4\pi r^2 \frac{|p^2(r)|}{2Z_0}$. Mit 3.36 folgt $P = \frac{a_0^2}{8\pi Z_0}$, also

$$a_0 = \sqrt{8\pi Z_0 P} \quad (3.39)$$

Für die Lösung von Problemen, bei denen die allgemeine Lösung auf einem Rand vorgegebene Werte erfüllen muss, ist Gleichung 3.37 ungeeignet. Z.B. muss der Schallfluß an schallharten Flächen senkrecht zur Oberfläche verschwinden

$$\bar{q}(\vec{x}) = \frac{\partial \bar{p}(\vec{x})}{\partial \vec{n}} = 0 \quad (3.40)$$

Um zu einer Gleichung zu gelangen, deren Lösung gleichzeitig vorgegebene Randbedingungen erfüllt, wird zunächst 3.35 mit der Greenschen Funktion multipliziert und räumlich integriert

$$\int_V d^3x \{ \Delta \bar{p}(\vec{x}) + k^2 \bar{p}(\vec{x}) \} G(\vec{x}, \vec{a}) = -a_0 \delta(\vec{x} - \vec{b}) G(\vec{x}, \vec{a}) \quad (3.41)$$

Die Anwendung des zweiten GREEN'schen Satzes

$$\begin{aligned} \int_V d^3x G(\vec{x}, \vec{a}) \Delta \bar{p}(\vec{x}) &= \int_V d^3x \bar{p}(\vec{x}) \Delta G(\vec{x}, \vec{a}) \\ &+ \int_{\partial V} d\vec{f} \{ G(\vec{x}, \vec{a}) \nabla \bar{p}(\vec{x}) - \bar{p}(\vec{x}) \nabla G(\vec{x}, \vec{a}) \} \end{aligned} \quad (3.42)$$

und Verwendung von $d\vec{f} \nabla = df \vec{n} \cdot \nabla =: df \frac{\partial}{\partial \vec{n}}$ führt wegen

$$\Delta G(\vec{x}, \vec{a}) + k^2 G(\vec{x}, \vec{a}) = -a_0 \delta(\vec{x} - \vec{a}) \quad (3.43)$$

für alle $\vec{a} \in V$ zu

$$\bar{p}(\vec{a}) = \int_{\partial V} df G(\vec{x}, \vec{a}) \frac{\partial \bar{p}(\vec{x})}{\partial \vec{n}} - \int_{\partial V} df \bar{p}(\vec{x}) \frac{\partial G(\vec{x}, \vec{a})}{\partial \vec{n}} - a_0 G(\vec{b}, \vec{a}) \quad (3.44)$$

Diese Gleichung liefert einen Zusammenhang des Schalldrucks \bar{p} an einem beliebigen Punkt \vec{a} innerhalb eines Volumens V und dem Schalldruck bzw. seiner Normalenableitung auf der Oberfläche des Volumens. Für Punkte \vec{a} auf der Oberfläche treten Singularitäten für $\vec{x} \rightarrow \vec{a}$ durch die Greensche Funktion und deren Ableitung auf. Erweitert man den Rand ∂V an einem singulären Punkt um eine ϵ -Umgebung, so lassen sich die einzelnen singulären Integrale in 3.45 in uneigentliche Integrale, Hauptwertintegrale und einen Term, welcher die Integration der Normalenableitung der Greenschen Funktion über die ϵ -Umgebung enthält, aufteilen. Mit $|\vec{x} - \vec{a}| = r$ erhält man für diesen Term

$$\begin{aligned} \bar{p}(\vec{a}) \int_{\epsilon} df \frac{\partial G(r)}{\partial \vec{n}} &= \bar{p}(\vec{a}) \frac{\partial G(\epsilon)}{\partial \vec{n}} \int_{\epsilon} df \\ &\xrightarrow{\epsilon \rightarrow 0} -\bar{p}(\vec{a}) \frac{1}{4\pi\epsilon^2} \cdot \begin{cases} 2\pi\epsilon^2 & (\vec{a} \in \text{Ebene, Integration über Halbkugel}) \\ \frac{3}{4}4\pi\epsilon^2 & (\vec{a} \in \text{Kante, Integration über } \frac{3}{4} - \text{Kugel}) \\ \frac{7}{8}4\pi\epsilon^2 & (\vec{a} \in \text{Ecke, Integration über } \frac{7}{8} - \text{Kugel}) \end{cases} \end{aligned}$$

Aus 3.44 mit $\bar{q}(\vec{x}) = \frac{\partial \bar{p}(\vec{x})}{\partial \vec{n}}$ ergibt sich dann die Randintegralgleichung

$$\begin{aligned} \bar{p}(\vec{a})c(\vec{a}) &= \bar{p}(\vec{a}) \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{2} \quad (\vec{a} \in \text{Ebene}) \\ \frac{1}{4} \quad (\vec{a} \in \text{Kante}) \\ \frac{1}{8} \quad (\vec{a} \in \text{Ecke}) \end{array} \right\} \\ &= \int_{\partial V} df G(\vec{x}, \vec{a}) \bar{q}(\vec{x}) - \int_{\partial V} df \bar{p}(\vec{x}) \frac{\partial G(\vec{x}, \vec{a})}{\partial \vec{n}} - a_0 G(\vec{b}, \vec{a}) \end{aligned} \quad (3.45)$$

Näheres hierzu findet sich in [21]. Diese Gleichung gilt im Gegensatz zu 3.44 auch auf dem Rand eines Gebiets.

3.5.1.1 Diskretisierung

Die Gleichung 3.45 ist im Allgemeinen nicht analytisch lösbar. Aus diesem Grunde ist eine numerische Auswertung wünschenswert. Die Grundidee hierbei besteht darin, den Gebietsrand in diskrete Punkte zu unterteilen, zwischen denen die Lösung, also der „wahre“ Schalldruck, linear oder durch einfache Polynome interpoliert wird. Die Schalldrücke oder die Schallflüsse an den „Stützstellen“, den Knoten, bilden dabei die Unbekannten. Gleichung 3.45 stellt für Punkte auf dem Gebietsrand die Beziehung der Schalldrücke an den Knoten untereinander dar. Hieraus kann ein lineares Gleichungssystem abgeleitet werden, dessen Lösung die zunächst unbekanntes Schalldrücke oder Schallflüsse an den Knoten liefert. Damit ist der Verlauf des Schalldrucks auf dem Rand bekannt. Nach Gleichung 3.44 kann dann für jeden beliebigen Punkt des Gebiets der Schalldruck berechnet werden. Für die vorliegende Arbeit ist nur der Fall einer Diskretisierung des Randes mit quadratischen Elementen von Bedeutung. Dieser Fall soll hier kurz erläutert werden. Der Rand des Gebiets wird in einzelne Elemente unterteilt. Für jedes Element wird gem. Abbildung 3.51 ein lokales Koordinatensystem eingeführt, in welchem die Punkte auf dem jeweiligen Element parametrisiert werden können.

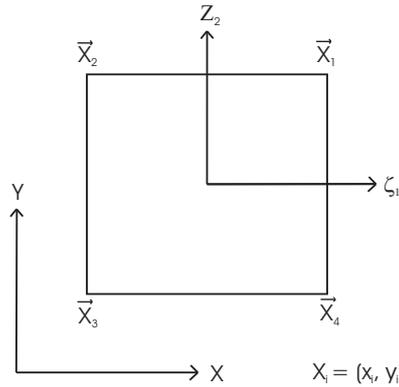


Abbildung 3.51: Lokales Koordinatensystem

Nun läßt sich jeder Punkt in dem quadratischen Flächenelement wie folgt durch die lokalen Koordinaten $(\zeta_1, \zeta_2) \in [-1, 1]$ parametrisieren.

$$\begin{aligned} \vec{x} &= \sum_{m=1}^4 \Psi^m(\zeta_1, \zeta_2) \vec{x}^m \\ &= \frac{1}{4}(1 + \zeta_1)(1 + \zeta_2) \vec{x}^1 + \frac{1}{4}(1 - \zeta_1)(1 + \zeta_2) \vec{x}^2 + \frac{1}{4}(1 - \zeta_1)(1 - \zeta_2) \vec{x}^3 \\ &\quad + \frac{1}{4}(1 + \zeta_1)(1 - \zeta_2) \vec{x}^4 \end{aligned}$$

mit

$$\begin{aligned} \Psi^1(\zeta_1, \zeta_2) &= \frac{1}{4}(1 + \zeta_1)(1 + \zeta_2) \\ \Psi^2(\zeta_1, \zeta_2) &= \frac{1}{4}(1 - \zeta_1)(1 + \zeta_2) \\ \Psi^3(\zeta_1, \zeta_2) &= \frac{1}{4}(1 - \zeta_1)(1 - \zeta_2) \\ \Psi^4(\zeta_1, \zeta_2) &= \frac{1}{4}(1 + \zeta_1)(1 - \zeta_2) \end{aligned}$$

Auf gleiche Art läßt sich der Schalldruck auf dem Element, abhängig von den lokalen Koordinaten, näherungsweise linear aus den Schalldrücken \bar{p}^m an den Knoten $(x_m, y_m), m = 1, \dots, 4$ und den Ansatzfunktionen Ψ darstellen

$$\bar{p}(\zeta_1, \zeta_2) = \sum_{m=1}^4 \Psi^m(\zeta_1, \zeta_2) \bar{p}^m \quad (3.46)$$

Ebenso kann auch die Normalenableitung des Schalldrucks resp. der Schallfluß approximiert werden

$$\bar{q}(\zeta_1, \zeta_2) = \sum_{m=1}^4 \Psi^m(\zeta_1, \zeta_2) \bar{q}^m \quad (3.47)$$

Das Integral in 3.45 läßt sich als Summe der Elementintegrale schreiben. Beim Übergang von globalen zu lokalen Koordinaten muss das differenzielle Flächenelement entsprechend transformiert werden. Mit Hilfe der Jacobideterminante $|J|$, welche aus den Transformationsgleichungen 3.46 und 3.47 gebildet wird, gilt die Beziehung

$$df = |J| d\zeta_1 d\zeta_2 = \left\| \begin{array}{cc} \frac{\partial x}{\partial \zeta_1} & \frac{\partial x}{\partial \zeta_2} \\ \frac{\partial y}{\partial \zeta_1} & \frac{\partial y}{\partial \zeta_2} \end{array} \right\| d\zeta_1 d\zeta_2 \quad (3.48)$$

Aus 3.45 erhält man somit die Gleichung für die N Randelemente

$$\begin{aligned} \bar{p}(\vec{a})c(\vec{a}) &= \sum_{l=1}^N \sum_{m=1}^4 \bar{q}^{lm} \int_{\partial V_l} |J| d\zeta_1 d\zeta_2 G(\zeta_1, \zeta_2, \vec{a}) \Psi^m(\zeta_1, \zeta_2) \\ &\quad - \sum_{l=1}^N \sum_{m=1}^4 \bar{p}^{lm} \int_{\partial V_l} |J| d\zeta_1 d\zeta_2 \Psi^m(\zeta_1, \zeta_2) \frac{\partial G(\zeta_1, \zeta_2, \vec{a})}{\partial \vec{n}} \\ &\quad - a_0 G(\vec{b}, \vec{a}) \end{aligned} \quad (3.49)$$

Hier ist ∂V_l ist das l-te Element. Da die Knotenwerte für Druck und Schallfluß konstant sind, können sie vor das jeweilige Integral gezogen werden. Die Summation der einzelnen Terme wird für alle N-Elemente jeweils über im vorliegenden Fall 4 Knoten je Element durchgeführt. Da diese Gleichung aus 3.45 folgt, gilt sie auch für Punkte \vec{a} auf dem Rand des Gebiets. Stellt man 3.49 nun für jeden Knoten auf, so erhält man N Gleichungen welche die Abhängigkeiten der Schalldrücke an den einzelnen Knoten voneinander beschreiben

$$\begin{aligned} \bar{p}^1 &= \dots \\ &\vdots \\ \bar{p}^j &= \sum_{l=1}^N \sum_{m=1}^4 \bar{q}^{lm} \int_{\partial V_l} |J| d\zeta_1 d\zeta_2 G(\zeta_1, \zeta_2, \vec{x}^j) \Psi^m(\zeta_1, \zeta_2) \\ &\quad - \sum_{l=1}^N \sum_{m=1}^4 \bar{p}^{lm} \int_{\partial V_l} |J| d\zeta_1 d\zeta_2 \Psi^m(\zeta_1, \zeta_2) \frac{\partial G(\zeta_1, \zeta_2, \vec{x}^j)}{\partial \vec{n}} \\ &\quad - a_0 G(\vec{b}, \vec{x}^j) \\ &\vdots \\ \bar{p}^N &= \dots \end{aligned} \quad (3.50)$$

Dieses Gleichungssystem kann in der Form

$$\mathbf{H} \cdot \bar{\mathbf{p}} = \mathbf{G} \cdot \bar{\mathbf{q}} + \mathbf{F} \quad (3.51)$$

geschrieben werden. In der i-ten Spalte und j-ten Zeile der Matrix \mathbf{H} stehen die Ansatzfunktionen und die Normalen-Ableitung der am j-ten Knoten lokalisierten Greenschen Funktion aus Gleichung 3.36 integriert über das i-te Element. Die Diagonale dieser Matrix erhält zusätzlich den für jeden Knoten spezifischen Eintrag $c(\vec{x}^j)$

$$\mathbf{H}_{ij} = \delta_{ij} c(\vec{x}^j) + \sum_{m=1}^4 \int_{\partial V_i} |J| d\zeta_1 d\zeta_2 \Psi^m(\zeta_1, \zeta_2) \frac{\partial G(\zeta_1, \zeta_2, \vec{x}^j)}{\partial \vec{n}} \quad (3.52)$$

mit

$$\frac{\partial G(\vec{x}, \vec{x}^j)}{\partial \vec{n}} = -\frac{1}{4\pi} \frac{1}{|\vec{x} - \vec{x}^j|^2} (1 - ik|\vec{x} - \vec{x}^j|) e^{-ik|\vec{x} - \vec{x}^j|} \frac{\partial |\vec{x} - \vec{x}^j|}{\partial \vec{n}} \quad (3.53)$$

In der i-ten Spalte und j-ten Zeile der Matrix \mathbf{G} stehen entsprechend die Ansatzfunktionen und die am j-ten Knoten lokalisierte Greensfunktion integriert über das i-te Element

$$\mathbf{G}_{ij} = \sum_{m=1}^4 \int_{\partial V_i} |J| d\zeta_1 d\zeta_2 G(\zeta_1, \zeta_2, \vec{x}^j) \Psi^m(\zeta_1, \zeta_2) \quad (3.54)$$

Der Vektor \mathbf{F} in 3.51 beschreibt die Schallquelle und enthält in der j-ten Zeile den Beitrag am Knoten j der am Aufpunkt der Schallquelle \vec{b} lokalisierten Greenschen Funktion. Diese Werte stellen somit den Beitrag des Direktschalls am j-ten Knoten dar.

Gleichung 3.51 in Verbindung mit 3.44 ermöglichen es bei Kenntnis resp. Vorgabe von Schalldrücken oder Schallflüssen an den Knoten den Schalldruck an jedem beliebigen Raumpunkt zu berechnen. Je nach Problemstellung sind somit an einigen Knoten die Schalldrücke (Einträge im Vektor \mathbf{p}) und an anderen Knoten die Schallflüsse (Einträge im Vektor \mathbf{q}) bekannt. Weiterhin kann zwischen Schalldruck und Schallfluß an einigen Knoten eine lineare Abhängigkeit in der Form

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{n}} + a\bar{p} = b \quad (3.55)$$

vorgegeben werden. Eine Randbedingung dieser Form wird als Robinsche Randbedingung bezeichnet. Das Gleichungssystem 3.51 kann nun nach bekannten und unbekanntem Größen sortiert in eine Form

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{b} \quad (3.56)$$

gebracht werden. In der Matrix \mathbf{A} entspricht das Element \mathbf{A}_{ij} dem Element \mathbf{H}_{ij} wenn der Schalldruck unbekannt ist, dem Element \mathbf{G}_{ij} wenn der Schallfluß unbekannt ist und falls die oben genannte lineare Abhängigkeit zwischen Schalldruck und Schallfluß als Randbedingung vorgegeben ist gilt

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{ij} = & \delta_{ij} c(\vec{x}^j) + \sum_{m=1}^4 \int_{\partial V_i} |J| d\zeta_1 d\zeta_2 \Psi^m(\zeta_1, \zeta_2) \frac{\partial G(\zeta_1, \zeta_2, \vec{x}^j)}{\partial \bar{n}} \\ & + a \sum_{m=1}^4 \int_{\partial V_i} |J| d\zeta_1 d\zeta_2 G(\zeta_1, \zeta_2, \vec{x}^j) \Psi^m(\zeta_1, \zeta_2) \end{aligned} \quad (3.57)$$

Die j-te Zeile der Inhomogenität der Gleichung \mathbf{b} enthält bei P bekannten Schalldrücken, K bekannten Schallflüssen und U Robinschen Randbedingungen die folgenden Elemente

$$\begin{aligned} \mathbf{b}_j = & \sum_{l=1}^K \bar{q}^l \sum_{m=1}^4 \int_{\partial V_i} |J| d\zeta_1 d\zeta_2 G(\zeta_1, \zeta_2, \vec{x}^j) \Psi^m(\zeta_1, \zeta_2) \\ & - \sum_{l=1}^P \bar{p}^l \sum_{m=1}^4 \int_{\partial V_i} |J| d\zeta_1 d\zeta_2 \Psi^m(\zeta_1, \zeta_2) \frac{\partial G(\zeta_1, \zeta_2, \vec{x}^j)}{\partial \bar{n}} \\ & + b \sum_{l=1}^U \sum_{m=1}^4 \int_{\partial V_i} |J| d\zeta_1 d\zeta_2 G(\zeta_1, \zeta_2, \vec{x}^j) \Psi^m(\zeta_1, \zeta_2) \\ & - a_0 G(\vec{b}, \vec{x}^j) \end{aligned} \quad (3.58)$$

3.5.1.2 Außenraumprobleme

Bisher wurde gedanklich ein geschlossenes Volumen und dessen Rand sowie Punkte innerhalb des Volumens bzw. auf dem Rand betrachtet. Dieses Volumen kann von beliebig geformten Oberflächen umschlossen werden. Für den in Abbildung 3.52 dargestellte Fall kann nun der „äußere“ Rand ins Unendliche verschoben werden.

Gleichung 3.44 behält ihre Gültigkeit. Die Oberflächenintegrale setzen sich aus der Teilfläche im „Endlichen“ und der Teilfläche im „Unendlichen“ zusammen.

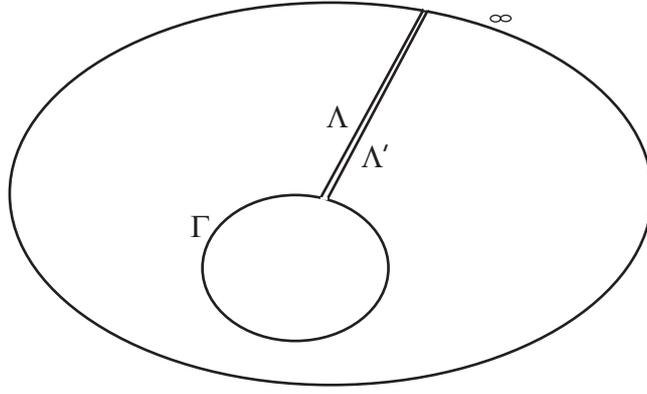


Abbildung 3.52: Gedachtes Volumen für ein Aussenraumproblem

$$\begin{aligned}
\bar{p}(\vec{a}) &= \int_{\partial V_{\Gamma}} df G(\vec{x}, \vec{a}) \frac{\partial \bar{p}(\vec{x})}{\partial \vec{n}} - \int_{\partial V_{\Gamma}} df \bar{p}(\vec{x}) \frac{\partial G(\vec{x}, \vec{a})}{\partial \vec{n}} \\
&+ \int_{\partial V_{\Lambda}} df G(\vec{x}, \vec{a}) \frac{\partial \bar{p}(\vec{x})}{\partial \vec{n}} - \int_{\partial V_{\Lambda}} df \bar{p}(\vec{x}) \frac{\partial G(\vec{x}, \vec{a})}{\partial \vec{n}} \\
&+ \int_{\partial V_{\Lambda'}} df G(\vec{x}, \vec{a}) \frac{\partial \bar{p}(\vec{x})}{\partial \vec{n}} - \int_{\partial V_{\Lambda'}} df \bar{p}(\vec{x}) \frac{\partial G(\vec{x}, \vec{a})}{\partial \vec{n}} \\
&+ \int_{\partial V_{\infty}} df G(\vec{x}, \vec{a}) \frac{\partial \bar{p}(\vec{x})}{\partial \vec{n}} - \int_{\partial V_{\infty}} df \bar{p}(\vec{x}) \frac{\partial G(\vec{x}, \vec{a})}{\partial \vec{n}} \\
&- a_0 G(\vec{b}, \vec{a})
\end{aligned} \tag{3.59}$$

Die Beiträge über ∂V_{Λ} und $\partial V_{\Lambda'}$ heben sich auf, da die Normalenvektoren der Flächenelemente resp. die Normalenableitungen jeweils in entgegengesetzte Richtung zeigen und somit unterschiedliche Vorzeichen liefern. Das Feld des Schalldrucks muss sich im Grenzfall für $r \rightarrow \infty$ mindestens wie $\frac{1}{r}$ verhalten. Dies folgt unmittelbar aus dem Prinzip der Energieerhaltung. Die Leistung P einer beliebigen Schallquelle ist definiert in 3.38. Für eine Kugeloberfläche als Integrationsfläche gilt wieder $d\vec{f} = r^2 dr \vec{e}_r$. Da die Leistung der Schallquelle unabhängig von der Integrationsfläche sein muss, muss gelten $const = \int dr r^2 I(r)$. Also folgt $I(r) \propto \frac{1}{r^2}$. Im Grenzfall $r \rightarrow \infty$ kann jedes Schallfeld hinreichend genau als ebene fortschreitende Welle angesehen werden. Für diese gilt $I = \frac{p^2}{Z_0}$ und somit $p(r) \propto \frac{1}{r}$. Da die Greensche Funktion 3.36 sich für $r \rightarrow \infty$ wie $\frac{1}{r}$ verhält und sich die Ableitung der Greenschen Funktion 3.53 wie $\frac{1}{r^2}$ verhält, gilt $\int_{\partial V_{\infty}} df G(\vec{x}, \vec{a}) \frac{\partial \bar{p}(\vec{x})}{\partial \vec{n}} - \int_{\partial V_{\infty}} df \bar{p}(\vec{x}) \frac{\partial G(\vec{x}, \vec{a})}{\partial \vec{n}} \propto \int_{\partial V_{\infty}} r^2 \frac{1}{r} \frac{1}{r^2} - r^2 \frac{1}{r} \frac{1}{r^2} \propto \frac{1}{r} \rightarrow 0$. Somit verschwinden die Beiträge der Oberflächenintegrale des Randanteils ∂V_{∞} im Unendlichen. Das Schallfeld ist somit eindeutig durch den Rand im „Endlichen“ bestimmt.

3.5.1.3 Innenpunktauswertung

Nachdem durch Lösen des Gleichungssystems 3.56 die Schalldrücke und Schallflüsse auf dem Gebietsrand bekannt sind, lassen sich nach Gleichung 3.44 die Schalldrücke an jedem beliebigen Raumpunkt berechnen. Diese Innenpunktauswertung kann in der gewohnten diskretisierten Form erfolgen

$$\begin{aligned}
\bar{p}(\vec{a}) &= \sum_{l=1}^N \sum_{m=1}^4 \bar{q}^{lm} \int_{\partial V_l} |J| d\zeta_1 d\zeta_2 G(\zeta_1, \zeta_2, \vec{a}) \Psi^m(\zeta_1, \zeta_2) \\
&- \sum_{l=1}^N \sum_{m=1}^4 \bar{p}^{lm} \int_{\partial V_l} |J| d\zeta_1 d\zeta_2 \Psi^m(\zeta_1, \zeta_2) \frac{\partial G(\zeta_1, \zeta_2, \vec{a})}{\partial \vec{n}} \\
&- a_0 G(\vec{b}, \vec{a})
\end{aligned} \tag{3.60}$$

3.5.1.4 Zusammenhang der Quellstärke mit der akustischen Leistung

Für konkrete Berechnungen von Schallabstrahlungen ist es für ein quantitativ korrektes Simulationsergebnis unerlässlich, den Zusammenhang der Quellstärke a_0 mit gebräuchlichen Größen herzustellen. Wie in Abschnitt 3.1.2 erläutert beschreibt der Schalleistungspegel in der Technischen Akustik die Emission einer Schallquelle. Ausgehend von der Beziehung 3.9 in Abschnitt 3.1.3 und der analytischen Beschreibung des Schallfeldes einer Punktschallquelle

$$\hat{p}(r) = \frac{1}{4\pi} \frac{a_0}{r} e^{-ikr}, r = |\vec{x} - \vec{\xi}|$$

folgt mit Gleichung 3.3 aus Abschnitt 3.1.2

$$\begin{aligned} p_{eff} &= \frac{1}{2} \frac{1}{4\pi} \frac{a_0}{r} \\ &= \sqrt{Z_0 \frac{P}{4\pi r^2}} \\ \Rightarrow \\ a_0 &= \sqrt{8\pi Z_0 P} \\ &= \sqrt{8\pi Z_0 10^{0,1 \cdot L_w}} \end{aligned}$$

3.5.2 Anwendung der Randelement-Methode auf Anlieferzonen

Die Untersuchungen zur numerischen Modellierung der acht Situationen der Anlieferzone mittels der Randelementmethode lassen sich in vier Arbeitsschritte einteilen.

- Generierung der Modellgeometrie und Vernetzung mittels Präprozessor (MSC Patran) an Rechnern des Instituts für Angewandte Mechanik der TU Braunschweig
- Export der Geometrie und Import in den Code „swebem“ des Instituts für Angewandte Mechanik der TU Braunschweig
- Ausführen des Codes auf Rechnern des Instituts für Angewandte Mechanik der TU Braunschweig und auf einem Cluster der TU
- Auswertung / Darstellung der Ergebnisse

Zunächst mussten die Geometrien aller zu untersuchenden Fälle erstellt werden. Hierzu diente die kommerzielle Software „MSC-Patran“ mit der aus ebenen Flächenobjekten zusammenhängende Hohlkörper erstellt werden, welche die zu untersuchende Geometrie abbilden. Nach der Fertigstellung dieser Oberflächenstrukturen erfolgt eine Vernetzung. Bei der Festlegung der Netzweite resp. Elementabmessungen ist zu beachten, dass die Wellenlänge der jeweils zu untersuchenden Frequenz durch mindestens sechs Knoten abgebildet wird. Demzufolge steigt die Anzahl der zur numerischen Simulation notwendigen Knoten mit der Frequenz an.

Auf den Oberflächen muss aus physikalischen Gründen das Schallfeld gewisse Randbedingungen erfüllen. Im vorliegenden Fall sind die Geometrieoberflächen akustisch schallhart darzustellen. Für das Schallfeld bedeutet dies einen verschwindenden Schallfluss $\frac{\partial p}{\partial n}$ auf der Oberfläche. Diese Form der Randbedingung wird Neumann-Randbedingung genannt.

Das Institut für Angewandte Mechanik der TU Braunschweig gab Hilfestellung bei der Einarbeitung in das kommerzielle Programm Patran, welches zur Geometrieerstellung benötigt wird, und stellte dies an den Rechnern des Instituts zur Verfügung.

Damit sind alle Informationen zur numerischen Berechnung der einzelnen Integrale aus 3.52 und 3.54 aus Abschnitt 3.5 vorhanden. Die Matrizen der Randelementmethode können nun aus den einzeln berechneten Einträgen aufgebaut werden. Die Geometriedaten werden aus Patran übernommen.

An dieser Stelle konnte beim Import, der Berechnung der Matrixelemente und der Aufstellung des linearen Gleichungssystems auf bestehende Programmteile des swebem-codes des Instituts für Angewandte Mechanik zurückgegriffen werden. Bei Anwendung der Randelementmethode existiert eine Vielzahl von Parametern (Modellabmessungen, Symetrie, Codierung der Elementtypen, Kopplungsparameter für Eindeutigkeit, Gleichungslöser(solver), s.u.), die einen Einfluss auf die Berechnungsergebnisse haben und deren Wirkung jeweils problemangepasst ermittelt werden musste. Das Institut für Angewandte Mechanik der TU Braunschweig stellte nicht nur den Programmcode zur

Verfügung, sondern war bei der Erläuterung der verschiedenen Parameter beratend tätig. Darüber hinaus war eine Implementierung des Terms der Gleichung 3.49 für anregende Punktschallquellen erforderlich. Diese Programmierleistung wurde vollständig durch das Institut für Angewandte Mechanik erbracht.

Nach der Implementierung der Punktschallquelle konnten erste Studien zur Numerischen Simulation der Schallemissionen der Varianten der Anlieferzonen durchgeführt werden. Für eine Auswertung der ersten Simulationsergebnisse mussten verschiedene Programmteile entwickelt werden, welche zum Einen die Visualisierung der Ergebnisse sowie zum Anderen eine graphische Darstellung der Frequenzabhängigkeit ermöglichen. Die Visualisierung von Simulationsergebnissen erfolgte mit der kommerziellen Software „tecplot“.

Das Institut für Angewandte Mechanik erarbeitete hierzu eine Exportschnittstelle, welche die Ergebnisse der numerischen Simulationen in ein zum Import in tecplot geeignetes Format überführt und war beratend tätig bei Fragen zu dem mehrere tausend Zeilen umfassenden Programmcode „swebem“.

Die Simulationsergebnisse liegen „schmalbandig“, d.h. für jede einzelne Frequenz vor. Die in diesem Projekt verwendeten Spektren sind ausschließlich Terzspektren. Aus diesem Grund musste ein Terzfilter implementiert werden. Dieser wurde aus Teilen des Programmcode von „swebem“ erstellt. Das Terzfilter ist zum Einen für die Visualisierung in tecplot und zum Anderen für die graphische Darstellung von Terzspektren wie in Abbildung 3.55 nutzbar.

In Variantenbetrachtungen wurde der Einfluss der Modellgröße auf das Ergebnis und Möglichkeiten der Modellierung einer schallharten Bodenfläche untersucht. Es war zu ermitteln, ob die gesamte Modellgeometrie bei den Berechnungen berücksichtigt werden muss oder ob eine Teilmmodellierung, welche den Speicherplatzbedarf deutlich reduziert, ausreichend ist. Es zeigte sich, dass ab Frequenzen von 25 Hz eine Modellierung des Nahbereichs, wie aus Abbildung 3.53 zu erkennen ist, ausreicht. Die Geometrie des Marktgebäudes hat somit keinen Einfluss auf die Ergebnisse.

Die explizite Modellierung des Bodens durch einen Hohlkörper oder eine Fläche erzeugt unnötig große Datenmengen (Knoten). Um den Speicherplatzbedarf weiter zu reduzieren, wurden für den Fall des schallharten Bodens die Bodenreflexionen dadurch berücksichtigt, dass die Geometrie einschließlich der anregenden Quelle an der Bodenfläche gespiegelt wird. Im Prinzip wird dabei eine Analogie zur Methode der Spiegelschallquelle angewandt.

Darüber hinaus ist die Auswahl verschiedener Gleichungslöser (direkte oder iterative) zur Lösung des linearen Gleichungssystems für gegebene Problemstellungen zu untersuchen. Bei iterativen Gleichungslösern hat die Anzahl der Iterationsschritte einen Einfluss auf die Lösung und auf die benötigte Rechenzeit. Gesteuert wird die Iterationstiefe durch Vorgabe eines Toleranzparameters. In Parameterstudien können so die Simulationsergebnisse mit verschiedenen Parametereinstellungen gegenübergestellt und auf Plausibilität geprüft werden.

Bei der Lösung von reinen Neumann-Aussenraum-Problemen, wie im vorliegenden Fall der Schallabstrahlung in den Aussenraum in Verbindung mit Randbedingungen an schallharten Oberflächen, tritt eine Besonderheit auf. Die Simulationsergebnisse dieser Probleme besitzen fiktive Eigenfrequenzen, welche als Resonanzen des äquivalenten Dirichlet-Innenraum-Problems identifiziert werden können. Zur Konstruktion einer eindeutigen Lösung eines reinen Neumann-Aussenraum-Problems wird eine modifizierte Helmholtzgleichung mit einem fiktiven Kopplungsparameter gelöst. *Dieses Verfahren nach Burton und Miller (Burton-Miller [26]) ist im „swebem“-code implementiert.* Verschiedene Auswirkungen bei der Wahl des Kopplungsparameters konnten somit ebenfalls für den Fall von Anlieferzonen untersucht werden.

Nachdem die unterschiedlichsten Parametereinstellungen in ihrer Wirkung auf die Simulationsergebnisse untersucht werden konnten, gelang eine Simulation der Schallabstrahlungen einer Anlieferzone für den niederfrequenten Bereich. Beispielhaft sind das visualisierte Ergebnis einer monofrequenten Simulation bei 6 Hz und einer spektralen Simulation im Bereich von 31 Hz bis 180 Hz in der Abbildung 3.53 dargestellt.

Aus dem oben erläuterten Zusammenhang zwischen Frequenz und der erforderlichen Knotenanzahl folgt, dass mit steigender Frequenz die Größe der einzelnen Matrizen mit dem Quadrat der Anzahl der Freiheitsgrade anwächst. Während die in Abbildung 3.53 dargestellten Ergebnisse für den monofrequenten Fall bei 6 Hz und einer Netzweite zwischen 25 cm und 5 m (rd. 3000 Knoten) auf einem PC mit 3 Gbyte Arbeitsspeicher bei einer Rechendauer von rd. 4-5 Stunden erzeugt wurden, stösst man bei Simulationen im Bereich höherer Frequenzen schnell an die Grenzen der Leistungsfähigkeit eines PC.

Nachdem die Grenzen eines PC erreicht wurden, sollten die numerischen Berechnungen auf einem leistungsfähigen cluster durchgeführt werden. Um die Leistung des clusters nutzen zu können, musste der bislang seriell arbeitende Programmcode parallelisiert werden. Mit dem parallelisierten Code wurden dann auf dem cluster erneute Variantenberechnungen durchgeführt, um

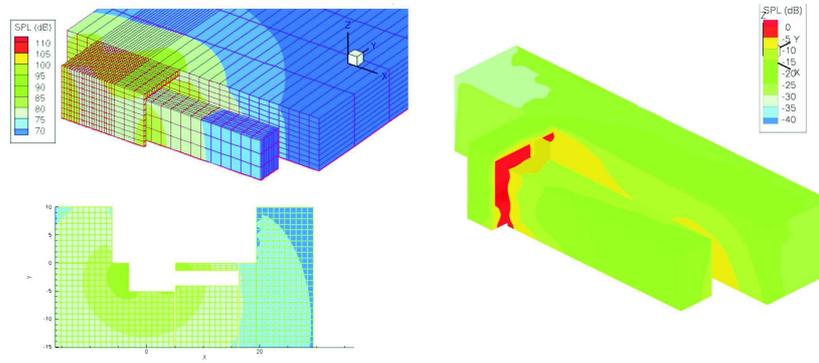


Abbildung 3.53: Numerische Simulation im niederfrequenten Bereich

den Einfluss des nun parallel arbeitenden Gleichungslösers auf die Lauffähigkeit des Programms zu untersuchen. Es zeigte sich, dass Ergebnisse ausschließlich mit dem package PLAPACK für dense-Matrizen und einem LU preconditioner zu erzielen waren. Mit Blick auf den im Idealfall zu erreichenden Frequenzbereich bis 4 kHz waren Studien erforderlich, in welcher Art und Weise der tatsächlich benötigte Arbeitsspeicher mit der zu behandelnden Problemgröße zusammenhängt. Es wurde schrittweise die Anzahl der Knoten erhöht und der Speicherbedarf ermittelt. Anhand der empirisch gewonnenen Daten konnte grob der Speicherbedarf für eine numerische Simulation der Abstrahlungen der Anlieferzone bis zu einer Frequenz von 4 kHz aus der in 3.54 dargestellten empirisch ermittelten Kurve extrapoliert werden. Es ergaben sich rd. $4 \cdot 10^2$ Tbyte Arbeitsspeicher. Aufgrund der Limitierung des Arbeitsspeicher des clusters konnten die numerischen Simulationen nur bis zu einer Frequenz von rd. 200 Hz (rd. 25000 Knoten) durchgeführt werden. Die Rechenzeit für 200 Frequenzen auf dem Cluster unter Belegung eines Arbeitsspeichers von 20 GByte (8 GByte für das Gleichungssystem) betrug mehrere Tage. Das Ergebniss der Simulation der Abstrahlung für den „Fall 1“ ist in der Abbildung 3.55 für einen repräsentativen Punkt seitlich des Auffliegers angegeben.

Die Nutzung des erwähnten aman-Clusters des Fachbereichs Bauingenieurwesen der TU Braunschweig wurde durch das Institut für Angewandte Mechanik ermöglicht. Es war eine Einweisung auf diesem Unix-System und in das verwendete Queue-System erforderlich. Darüber hinaus wurde die Parallelisierung des Programmcodes vollständig durch das Institut für Angewandte Mechanik durchgeführt.

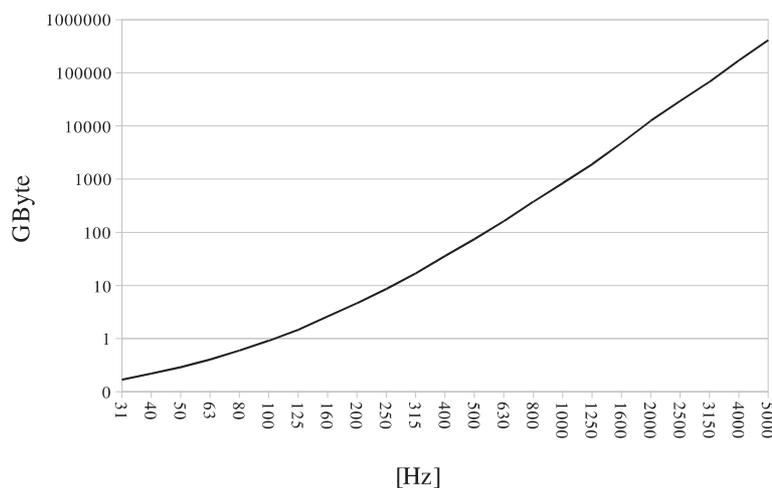


Abbildung 3.54: Entwicklung des Speicherbedarfs für das Gleichungssystem in Abhängigkeit von der Frequenz

Die oben beschriebene Anwendung der Ranelementmethode gestattet beim derzeitigen Stand der DV-Technik trotz Nutzung eines parallelisierten Programmcodes eine schalltechnische Simulation realer Situationen mit den Abmessungen der untersuchten Anlieferzonen im niederfrequenten Bereich bis zu Frequenzen von rd. 200 Hz. Bei begrenzten Ressourcen hinsichtlich der Speicherplatzlimitierung müssen zur vollständigen Simulation von Schallabstrahlungen numerische Ver-

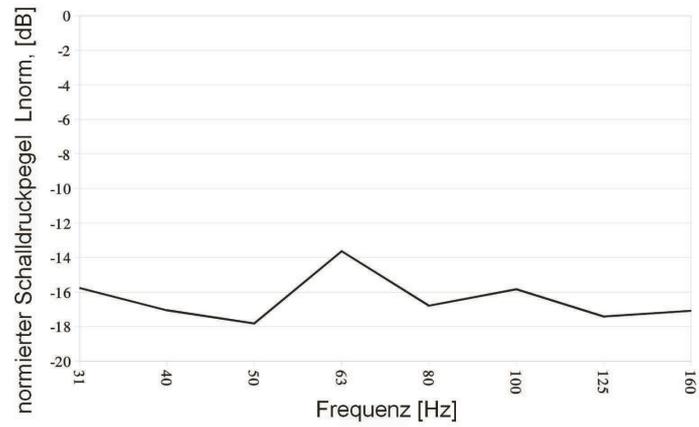
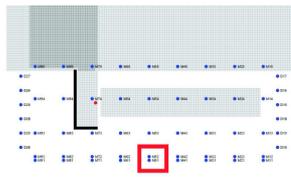


Abbildung 3.55: Simulationsergebnis

fahren angewandt werden, welche geringere Anforderungen an die Speichergröße der verwendeten Hardware stellen. Hier sind z.B. die Methoden der „Fast Multipole BEM“ zu nennen. Zu diesem Verfahren existieren zahlreiche Veröffentlichungen welche die Leistungsfähigkeit dieses Simulationsverfahrens zeigen. Es ist zu vermuten, dass unter Anwendung der Fast Multipole BEM eine vollständige Simulation der Abstrahlungen von Anlieferzonen bis zu 4 kHz gelingen kann. Die Implementierung dieser Methode ist jedoch äußerst umfangreich und ist nicht Bestandteil des hier bearbeiteten Projekts gewesen. Für die Umsetzung des Projekts war die Nutzung eines bereits bestehenden Programmcodes wie die hier vorgestellte „klassische“ Randelementmethode erforderlich.

Kapitel 4

Fazit

Die übliche, physikalisch plausible Modellierung der Schallabstrahlung von Anlieferzonen setzt das Vorliegen eines diffusen Schallfeldes im Innern der dreiseitig umschlossenen Laderampe voraus. Aus dieser homogenen Verteilung der Schallenergie wird über eine strahlbasierte Ausbreitungsrechnung die Schallfeldverteilung ausserhalb der Anlieferzone ermittelt. Aufgrund der Größe der (schallabsorbierenden) Öffnung der dreiseitig umschlossenen Laderampe ist die Gültigkeit der Annahme eines diffusen Schallfeldes, welches Vielfachreflexionen durch die Begrenzungsflächen eines geschlossenen Raums voraussetzt, zu hinterfragen. Es ist vielmehr davon auszugehen, dass kein exakt diffuses Schallfeld vorliegt und als Folge wellenmechanischer Effekte eine inhomogene Schallenergieverteilung im Bereich der dreiseitig umschlossenen Laderampe anzutreffen ist. Diese kann maßgeblichen Einfluss auf die immissionsseitig errechneten Schalldruckpegel besitzen.

Die messtechnischen Untersuchungen zu diesem Projekt haben gezeigt, dass die oben genannten Vermutungen bzgl. des Schallfelds innerhalb der dreiseitig umschlossenen Einhausung zutreffen. Es zeigt in der Tat weder einen ausgeprägt diffusen Charakter noch ist es durch ein freies Schallfeld zu approximieren. Die Vermutung, dass dennoch Raumresonanzen in dieser geometrischen Situation auftreten, war korrekt. Es zeigte sich darüber hinaus, dass Resonanzen sogar bis zum oberen Ende des messtechnisch untersuchten Frequenzbereichs auftreten.

Auf Grundlage der gewonnenen Messergebnisse kann ohne Weiteres eine räumliche Verteilung von Punktschallquellen (Ersatzquelle) gefunden werden, welche die Messergebnisse reproduziert. In Bezug auf einen späteren Einsatz in Immissionsprognosen weist diese Ersatzquelle Nachteile hinsichtlich der Handhabung auf. Sie abstrahiert die geometrische Situation zu stark und kann nicht an geringfügig abweichende Modellgeometrien angepasst werden. Eine Reduktion des Umfangs der Ersatzquelle bei gleichzeitiger Bezugnahme zur Geometrie führt zu Ungenauigkeiten bei der Reproduktion der Messergebnisse. Hier systematisch den bestmöglichen Kompromiss zu finden ist aufgrund des Verhaltens der Konditionszahl nicht möglich. Es resultieren Einzelfalllösungen mit Ersatzquellen bestehend aus 5 Einzelquellen. Diese Modelle lassen Anpassungen hinsichtlich variierender Modellgeometrien zu und stellen gegenüber den bisher verwendeten Modellen eine realere Beschreibung der Abstrahlungen der Anlieferzonen dar. Aufgrund der fehlenden Systematik bei der Auffindung der Ersatzquellen ist die hier verfolgte Vorgehensweise nicht von vornherein auf andere Projekte übertragbar.

Die Messergebnisse konnten darüber hinaus nicht vollständig durch eine numerische Simulation nachvollzogen werden. Der Grund lag bei dem verwendeten Simulationsverfahren in nicht ausreichenden Rechnerkapazitäten. Es existieren derzeit Ansätze, den Umfang der vollbesetzten Matrizen der Randelementmethode zu reduzieren. Hier könnten sich ggf. zukünftig Möglichkeiten ergeben die angesprochenen Situationen vollständig numerisch zu simulieren. Desweiteren existieren weitere numerische Verfahren zur Methode der Randelemente, welche sich für Modelle mit vielen Freiheitsgraden besser eignen. Zu nennen wäre hier die Fast-Multipole-BEM. Um die hier verwendete „klassische“ Randelementmethode auch im mittleren Frequenzbereich zu verwenden, muss abgewartet werden, wie sich die Verfahren zur Reduzierung des Speicher- und Rechenaufwands zukünftig entwickeln.

Literaturverzeichnis

- [1] Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz - BImSchG) Ausfertigungsdatum: 15.03.1974
- [2] Sechzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verkehrslärmschutzverordnung - 16. BImSchV) vom 12. Juni 1990
- [3] Achtzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Sportanlagenlärmschutzverordnung - 18. BImSchV) vom 18. Juli 1991
- [4] 32. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Geräte- und Maschinenlärmschutzverordnung - 32. BImSchV) vom 29. August 2002
- [5] Vierunddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über die Lärmkartierung) (34. BImSchV) vom 6. März 2006
- [6] Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm - TA Lärm) vom 26. August 1998
- [7] Verordnung über die bauliche Nutzung der Grundstücke
- [8] DIN 4109 - Schallschutz im Hochbau, Beuth-Verlag
- [9] DIN 45641 - Mittelung von Schallpegeln, Ausgabe Juni 1990
- [10] DIN EN 60651 - Schallpegelmesser, Ausgabe Mai 1994
- [11] DIN ISO 9613-2 Akustik - Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien - Teil 2: Allgemeines Berechnungsverfahren (ISO 9613-2:1996), Oktober 1990, Beuth-Verlag
- [12] VDI Richtlinie 2720 - Schallschutz durch Abschirmung im Freien, Beuth-Verlag 1997
- [13] VDI Richtlinie 27214- Schallausbreitung im Freien, Beuth-Verlag 1999
- [14] DIN 18005 Teil 1, Schallschutz im Städtebau - Grundlagen und Hinweise für die Planung, Beuth-Verlag 2002
- [15] W. Schirmer, Technischer Lärmschutz, 2. bearbeitete und erweiterte Auflage, Springer Verlag 2006
- [16] Dega Empfehlung Nr. 101, Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., März 2006, www.dega-akustik.de
- [17] VDI 2571 Schallabstrahlung von Industriebauten, Beuth-Verlag 1976
- [18] Parkplatzlärmstudie 6. Aufl., Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg 2007

- [19] Lenkewitz, K. u. Müller, J.: Technischer Bericht zur Untersuchung der Geräuschemissionen durch Lastkraftwagen auf Betriebsgeländen von Frachtzentren, Auslieferungslagern, Speditionen und Verbrauchermärkten sowie weitere typische Geräusche insbesondere von Verbrauchermärkten, im Auftrag des hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie
- [20] Michael Möser, technische Akustik, 7.Auflage, Springer Verlag 2007, S. 324 ff.
- [21] Rolf Bausinger, Günther Kuhn, Die Boundary-Element-Methode, expert-Verlag 1987
- [22] Heckl, Manfred und Müller, Helmut, Taschenbuch der technischen Akustik, S. 59, 2. Aufl., Springer-Verlag 1994
- [23] Akustik - Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien - Teil 1:
- [24] Sebastian Hampel, Numerische Simulation der Schallausbreitung unter Berücksichtigung meteorologischer Einflüsse, Diss., Mechanik Zentrum, Technische Universität Braunschweig, No 61-2006, 2006
- [25] R. Zurmühl, S. Falk, Matrizen und ihre Anwendungen, 5. überarbeitete Auflage, Teil 2: Numerische Methoden, Springer Verlag 1986
- [26] Burton, A.J.; Miller, G.F.: The application of the Integral Equation Methods for Acoustic Radiation Valid for All Wavenumbers. Proc. Roy. Soc. Lond. A., 323(201-210), 1971

Anhang A

Ersatzquelle Fall 1

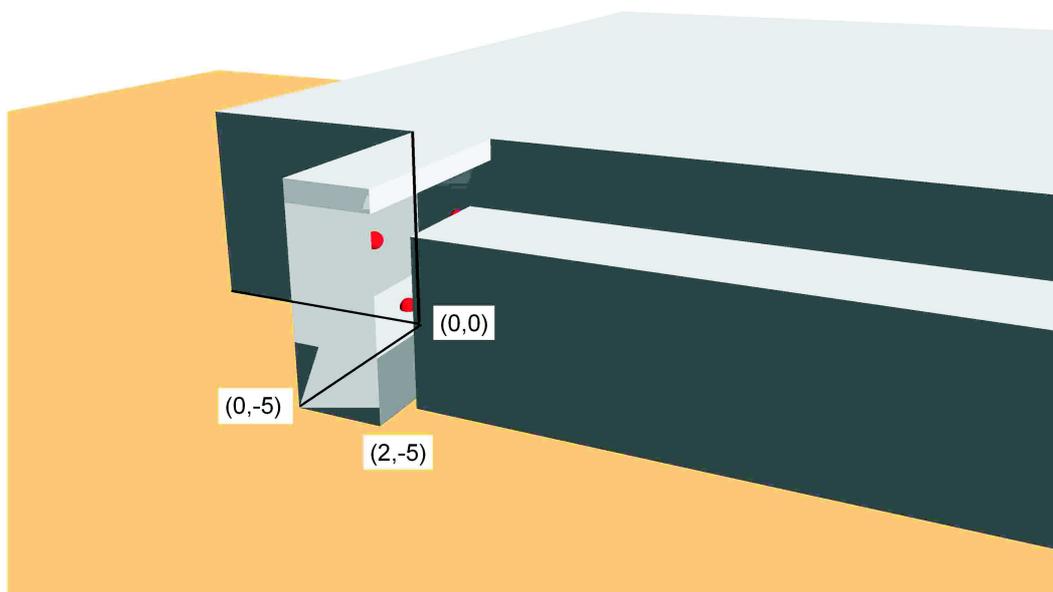


Abbildung A.1: Fall 1

Die Lage des Koordinatenursprungs kann Abbildung 2.2 entnommen werden. Die Koordinaten der einzelnen Punktschallquellen sind der folgenden Tabelle zu entnehmen.

Quelle	x[m]	y[m]	z[m]
1	0,3	-2,37	3
2	1,13	-0,05	3
3	1,13	-4,7	3
4	1,13	-2,37	1,55
5	1,13	-2,37	4,45

Tabelle A.1: Koordinaten der Einzelquellen - Fall 1

Quelle	31Hz	40Hz	50Hz	63Hz	80Hz	100Hz	125Hz	160Hz	200Hz
1	-20	-20	-20	-11,15	-14,77	-9,26	-20	-20	-20
2	3,01	-1,45	1,43	5,3	0,96	4,12	2,55	-3,71	0,79
3	-20	-6,73	-3,65	-3,19	-8,34	-13,35	-3,29	-3,74	-1,54
4	14,03	5,45	5,36	-13,18	-20	3	-1,95	1,01	-2,82
5	-20	-20	-20	2,54	-2,65	-20	-2,32	-5,22	-11,88

Tabelle A.2: Frequenzen 31Hz bis 200Hz

Quelle	250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1kHz	1.25kHz	1.6kHz
1	-20	-0,46	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20
2	-2,39	-1,7	-9,3	-20	-18,15	-20	-18,21	-20	-13,71
3	-2,88	-20	-20	-20	-17,74	-16,2	-13,15	-20	-13,87
4	-0,31	-2,82	2,71	-0,4	-8,04	-9,92	-7	-20	-7,18
5	-1,37	7,44	9,42	3,14	-4,08	-2,25	-20	-20	0,51

Tabelle A.3: Frequenzen 250Hz bis 1.6kHz

Quelle	2kHz	2.5kHz	3.15kHz	4kHz
1	-16,48	-15,33	-20	-20
2	-8,98	-9,99	-7,14	-9,25
3	-10,59	-10,53	-8,32	-8,25
4	-9,95	-9,17	-16,06	-13,03
5	-5,66	-6,32	-6,68	-6,21

Tabelle A.4: Frequenzen 2kHz bis 4kHz

Anhang B

Ersatzquelle Fall 2

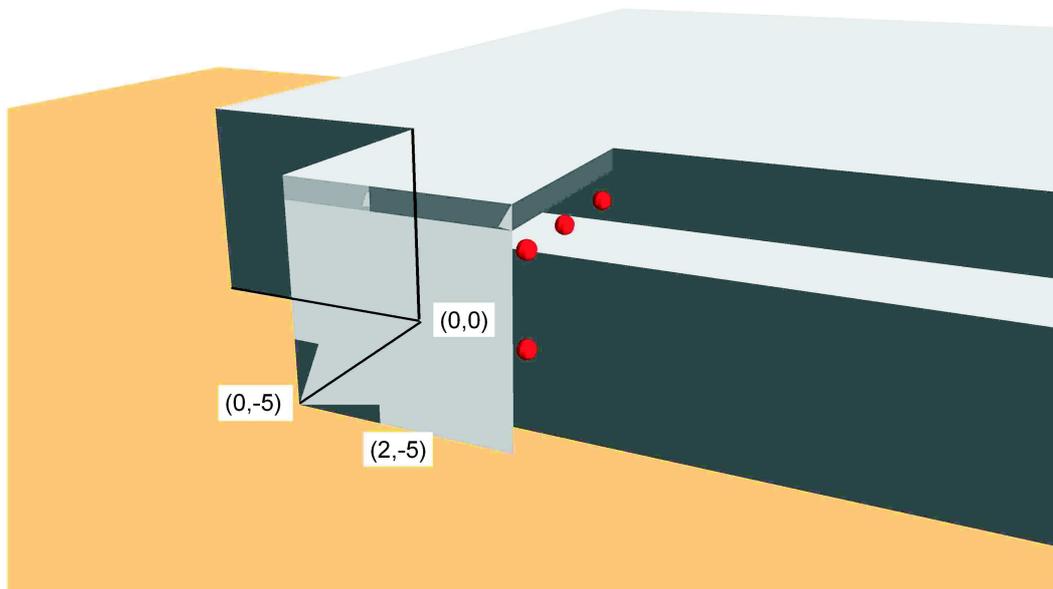


Abbildung B.1: Fall 1

Die Lage des Koordinatenursprungs kann Abbildung 2.2 entnommen werden. Die Koordinaten der einzelnen Punktschallquellen sind der folgenden Tabelle zu entnehmen.

Quelle	x[m]	y[m]	z[m]
1	0,3	-2,37	3
2	1,13	-0,05	3
3	1,13	-4,7	3
4	1,13	-2,37	1,55
5	1,13	-2,37	4,45

Tabelle B.1: Koordinaten der Einzelquellen - Fall 2

Quelle	31Hz	40Hz	50Hz	63Hz	80Hz	100Hz	125Hz	160Hz	200Hz
1	-20	-20	-20	-11,15	-14,77	-9,26	-20	-20	-20
2	3,01	-1,45	1,43	5,3	0,96	4,12	2,55	-3,71	0,79
3	-20	-6,73	-3,65	-3,19	-8,34	-13,35	-3,29	-3,74	-1,54
4	14,03	5,45	5,36	-13,18	-20	3	-1,95	1,01	-2,82
5	-20	-20	-20	2,54	-2,65	-20	-2,32	-5,22	-11,88

Tabelle B.2: Frequenzen 31Hz bis 200Hz

Quelle	250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1kHz	1.25kHz	1.6kHz
1	-20	-0,46	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20
2	-2,39	-1,7	-9,3	-20	-18,15	-20	-18,21	-20	-13,71
3	-2,88	-20	-20	-20	-17,74	-16,2	-13,15	-20	-13,87
4	-0,31	-2,82	2,71	-0,4	-8,04	-9,92	-7	-20	-7,18
5	-1,37	7,44	9,42	3,14	-4,08	-2,25	-20	-20	0,51

Tabelle B.3: Frequenzen 250Hz bis 1.6kHz

Quelle	2kHz	2.5kHz	3.15kHz	4kHz
1	-16,48	-15,33	-20	-20
2	-8,98	-9,99	-7,14	-9,25
3	-10,59	-10,53	-8,32	-8,25
4	-9,95	-9,17	-16,06	-13,03
5	-5,66	-6,32	-6,68	-6,21

Tabelle B.4: Frequenzen 2kHz bis 4kHz

Anhang C

Ersatzquelle Fall 3

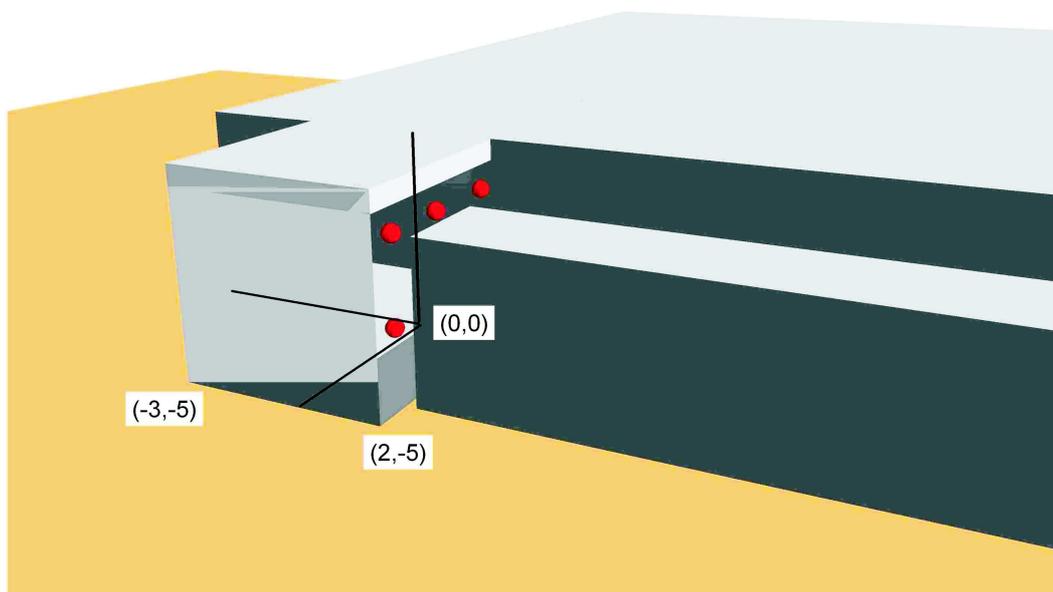


Abbildung C.1: Fall 1

Die Lage des Koordinatenursprungs kann Abbildung 2.2 entnommen werden. Die Koordinaten der einzelnen Punktschallquellen sind der folgenden Tabelle zu entnehmen.

Quelle	x[m]	y[m]	z[m]
1	2,05	-0,75	2
2	2,05	-0,75	4
3	2,05	-2,75	4
4	2,05	-4,5	2
5	2,05	-4,5	4

Tabelle C.1: Koordinaten der Einzelquellen - Fall 3

Quelle	31Hz	40Hz	50Hz	63Hz	80Hz	100Hz	125Hz	160Hz	200Hz
1	4,87	9,35	5,77	5,03	1,01	3,28	3,21	-1,5	-0,49
2	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20
3	-4,24	4,89	3,65	1,22	1	-0,76	-20	-5,75	-3,51
4	-9,01	-1,13	-13,61	-1,3	-2,5	-11,45	-11,08	-8	-7,14
5	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-5,93	-20	-20

Tabelle C.2: Frequenzen 31Hz bis 200Hz

Quelle	250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1kHz	1.25kHz	1.6kHz
1	1,06	4,7	5,76	-20	-3,92	-3,65	-20	0,58	-1,07
2	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20
3	-0,27	4,45	3,78	-1,18	-8,95	-7,43	-4,6	-4,03	-5,12
4	-4,17	1,93	3,83	-2,83	-10,53	-10,15	-7,49	-20	-6,63
5	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20

Tabelle C.3: Frequenzen 250Hz bis 1.6kHz

Quelle	2kHz	2.5kHz	3.15kHz	4kHz
1	-2,19	-3,3	-5,11	-4,24
2	-20	-20	-20	-20
3	-3,95	-4,17	-5,87	-4,65
4	-8,28	-8,95	-11,89	-11,24
5	-20	-20	-20	-17,19

Tabelle C.4: Frequenzen 2kHz bis 4kHz

Anhang D

Ersatzquelle Fall 4

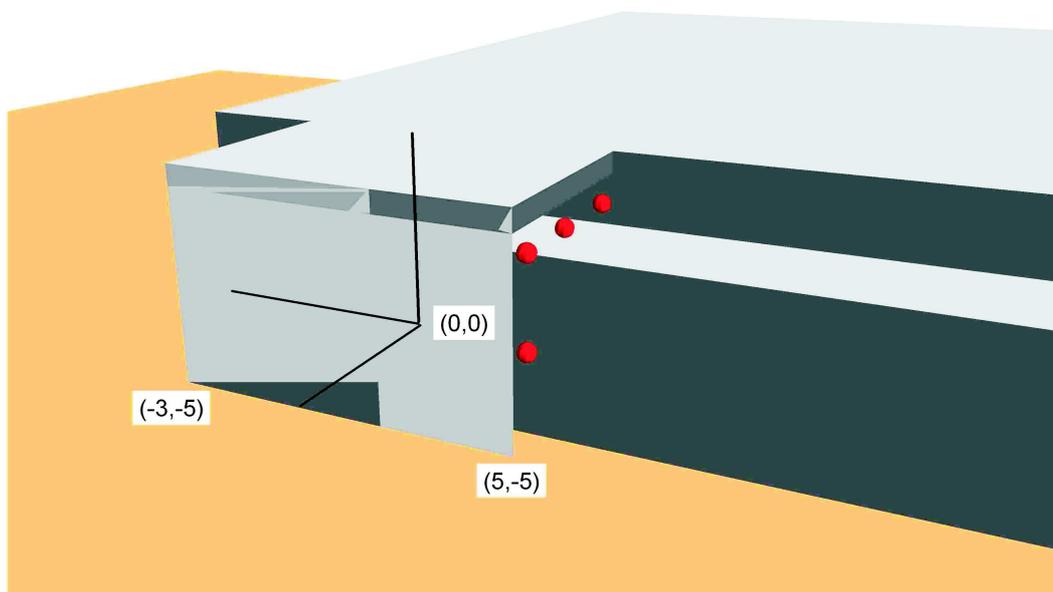


Abbildung D.1: Fall 1

Die Lage des Koordinatenursprungs kann Abbildung 2.2 entnommen werden. Die Koordinaten der einzelnen Punktschallquellen sind der folgenden Tabelle zu entnehmen.

Quelle	x[m]	y[m]	z[m]
1	5,05	-0,75	2
2	5,05	-0,75	4
3	5,05	-2,75	4
4	5,05	-4,5	2
5	5,05	-4,5	4

Tabelle D.1: Koordinaten der Einzelquellen - Fall 4

Quelle	31Hz	40Hz	50Hz	63Hz	80Hz	100Hz	125Hz	160Hz	200Hz
1	8,43	3,12	4,15	2,93	1,03	-0,53	-1,67	-3,79	-1
2	-22,8	-22,8	-22,8	-22,8	-22,8	-22,8	-22,8	-22,8	-22,8
3	-22,8	-22,8	-22,8	-22,8	-22,8	-13,3	-7,8	-7,68	-7,32
4	-0,47	-3,58	-18,05	-22,8	-6,78	-7,21	-8,57	-15,37	-6,55
5	-22,8	-22,8	-12,55	-3,55	-7,99	-22,8	-22,8	-11,66	-22,8

Tabelle D.2: Frequenzen 31Hz bis 200Hz

Quelle	250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1kHz	1.25kHz	1.6kHz
1	-1,77	3,23	3,84	-22,8	-6,37	-6,83	-22,8	-2,24	-3,76
2	-22,8	-22,8	-22,8	-22,8	-22,8	-22,8	-22,8	-22,8	-22,8
3	-4,1	0,54	-0,29	-3,4	-10,12	-9,8	-6,39	-6,23	-7,91
4	-3,66	-2,83	-0,24	-5,1	-16,4	-14,35	-9,16	-22,8	-10,72
5	-22,8	-22,8	-22,8	-22,8	-21,96	-22,8	-22,8	-22,8	-22,8

Tabelle D.3: Frequenzen 250Hz bis 1.6kHz

Quelle	2kHz	2.5kHz	3.15kHz	4kHz
1	-4,48	-5,19	-6,9	-6,37
2	-22,8	-22,8	-22,8	-22,8
3	-7,2	-6,92	-8,39	-7,65
4	-8,37	-9,36	-9,36	-10,71
5	-22,8	-22,8	-22,8	-22,8

Tabelle D.4: Frequenzen 2kHz bis 4kHz

Anhang E

Ersatzquelle Fall 1 mit Absorption

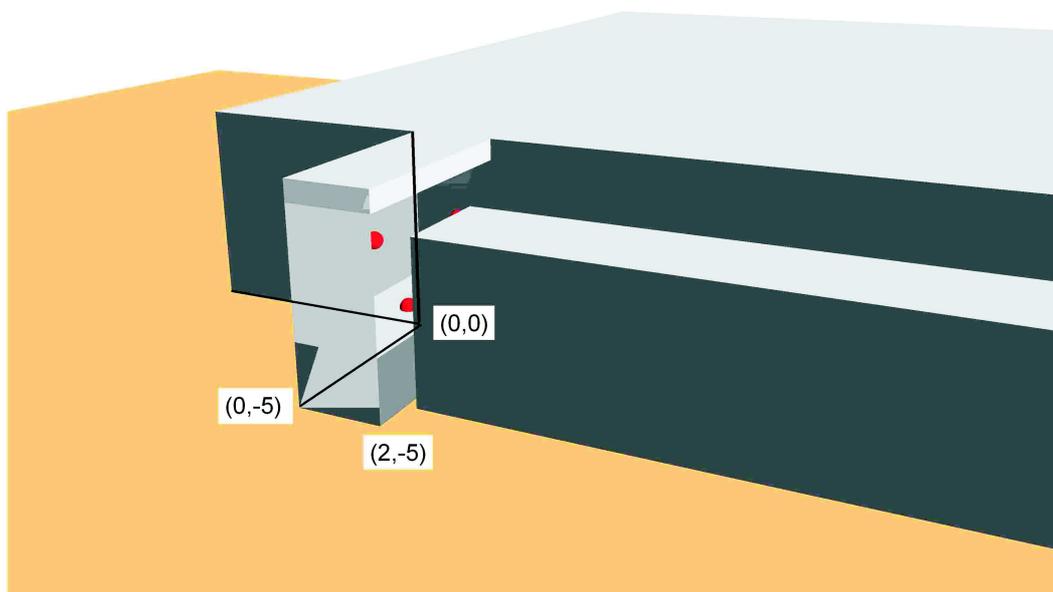


Abbildung E.1: Fall 1

Die Lage des Koordinatenursprungs kann Abbildung 2.2 entnommen werden. Die Koordinaten der einzelnen Punktschallquellen sind der folgenden Tabelle zu entnehmen.

Quelle	x[m]	y[m]	z[m]
1	0,3	-2,37	3
2	1,13	-0,05	3
3	1,13	-4,7	3
4	1,13	-2,37	1,55
5	1,13	-2,37	4,45

Tabelle E.1: Koordinaten der Einzelquellen - Fall 1 mit Absorption

Quelle	31Hz	40Hz	50Hz	63Hz	80Hz	100Hz	125Hz	160Hz	200Hz
1	-20	-20	-20	-11,15	-14,77	-9,26	-20	-20	-20
2	3,01	-1,45	1,43	5,3	0,96	4,12	2,55	-3,71	0,79
3	-20	-6,73	-3,65	-3,19	-8,34	-13,35	-3,29	-3,74	-1,54
4	14,03	5,45	5,36	-13,18	-20	3	-1,95	1,01	-2,82
5	-20	-20	-20	2,54	-2,65	-20	-2,32	-5,22	-11,88

Tabelle E.2: Frequenzen 31Hz bis 200Hz

Quelle	250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1kHz	1.25kHz	1.6kHz
1	-20	-0,46	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20
2	-2,39	-1,7	-9,3	-20	-18,15	-20	-18,21	-20	-13,71
3	-2,88	-20	-20	-20	-17,74	-16,2	-13,15	-20	-13,87
4	-0,31	-2,82	2,71	-0,4	-8,04	-9,92	-7	-20	-7,18
5	-1,37	7,44	9,42	3,14	-4,08	-2,25	-20	-20	0,51

Tabelle E.3: Frequenzen 250Hz bis 1.6kHz

Quelle	2kHz	2.5kHz	3.15kHz	4kHz
1	-16,48	-15,33	-20	-20
2	-8,98	-9,99	-7,14	-9,25
3	-10,59	-10,53	-8,32	-8,25
4	-9,95	-9,17	-16,06	-13,03
5	-5,66	-6,32	-6,68	-6,21

Tabelle E.4: Frequenzen 2kHz bis 4kHz

Anhang F

Ersatzquelle Fall 2 mit Absorption

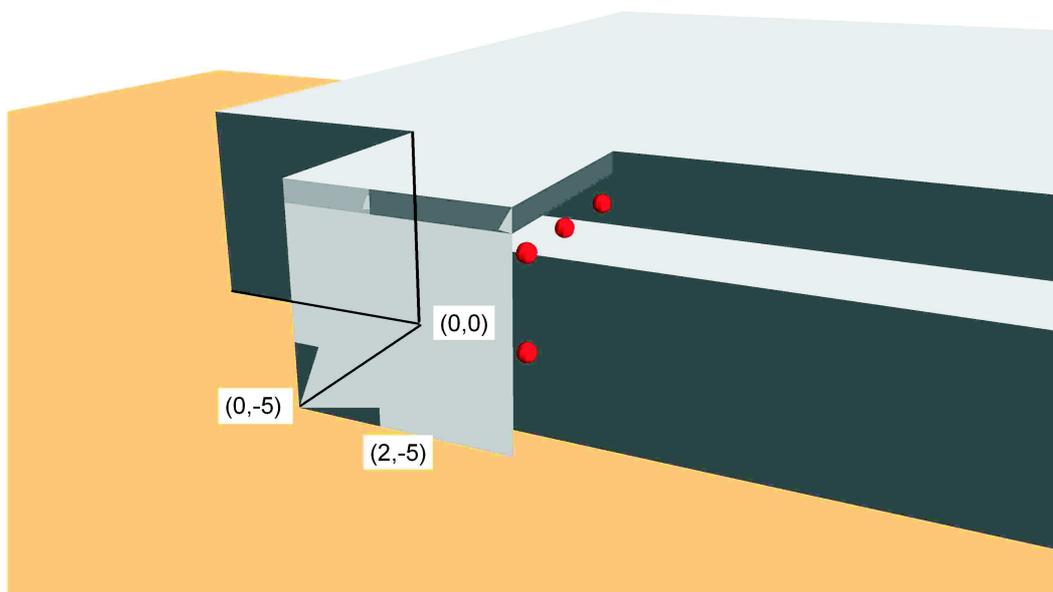


Abbildung F.1: Fall 1

Die Lage des Koordinatenursprungs kann Abbildung 2.2 entnommen werden. Die Koordinaten der einzelnen Punktschallquellen sind der folgenden Tabelle zu entnehmen.

Quelle	x[m]	y[m]	z[m]
1	5,05	-0,75	2
2	5,05	-0,75	4
3	5,05	-2,75	4
4	5,05	-4,5	2
5	5,05	-4,5	4

Tabelle F.1: Koordinaten der Einzelquellen - Fall 2 mit Absorption

Quelle	31Hz	40Hz	50Hz	63Hz	80Hz	100Hz	125Hz	160Hz	200Hz
1	3,26	0,19	2,07	2,24	-1,44	-0,83	-2,37	-4,34	-3,5
2	-22,8	-22,8	-22,8	-22,8	-22,8	-22,8	-22,8	-22,8	-14,55
3	-22,8	-6,01	-9,26	-22,8	-22,8	-12,39	-22,8	-9,76	-22,8
4	-8,16	-12,97	-22,8	-22,8	-13,8	-15,67	-22,8	-22,8	-6,54
5	-22,8	-22,8	-11,58	-6,37	-14,74	-22,8	-11,38	-11,38	-22,8

Tabelle F.2: Frequenzen 31Hz bis 200Hz

Quelle	250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1kHz	1.25kHz	1.6kHz
1	-4,06	-1,45	-2,85	-22,8	-15,3	-13,16	-22,8	-11,78	-12,17
2	-22,8	-22,8	-22,8	-22,8	-22,8	-22,8	-22,8	-22,8	-22,8
3	-10,64	-4,99	-4,39	-10,86	-17,16	-14,73	-12,35	-11,42	-14,18
4	-8,95	-4,12	-2,91	-11,12	-16,87	-14,08	-10,48	-22,8	-11,77
5	-22,8	-22,8	-22,8	-22,8	-22,8	-22,8	-22,8	-22,8	-22,8

Tabelle F.3: Frequenzen 250Hz bis 1.6kHz

Quelle	2kHz	2.5kHz	3.15kHz	4kHz
1	-15,13	-15,15	-13,11	-15,99
2	-22,8	-22,8	-22,8	-22,8
3	-13,24	-13,11	-13,24	-15,08
4	-11,73	-12,23	-13,14	-13,54
5	-22,8	-22,8	-22,8	-22,8

Tabelle F.4: Frequenzen 2kHz bis 4kHz

Anhang G

Ersatzquelle Fall 3 mit Absorption

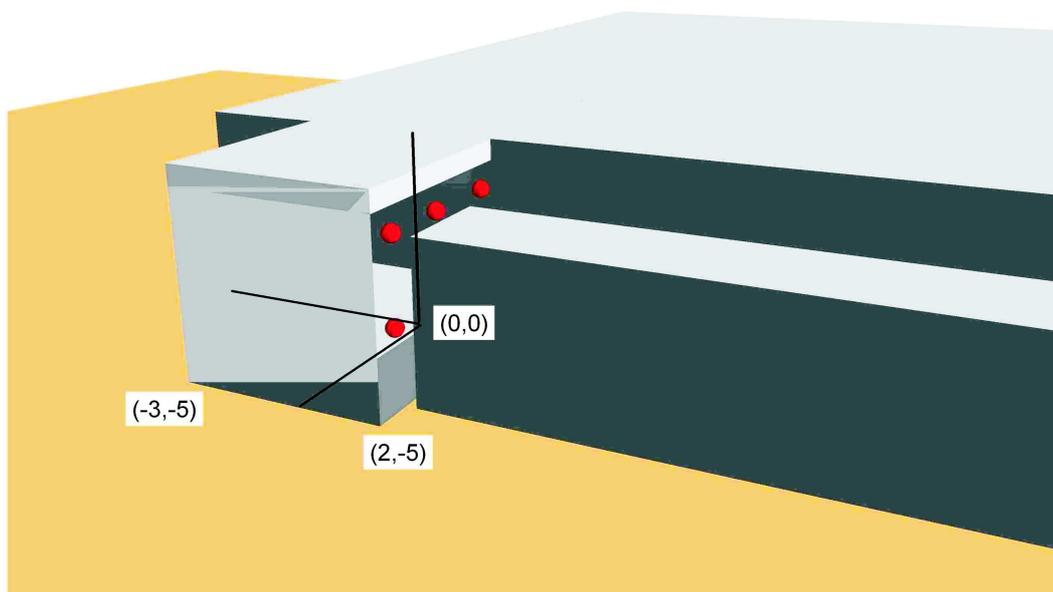


Abbildung G.1: Fall 1

Die Lage des Koordinatenursprungs kann Abbildung 2.2 entnommen werden. Die Koordinaten der einzelnen Punktschallquellen sind der folgenden Tabelle zu entnehmen.

Quelle	x[m]	y[m]	z[m]
1	2,05	-0,75	2
2	2,05	-0,75	4
3	2,05	-2,75	4
4	2,05	-4,5	2
5	2,05	-4,5	4

Tabelle G.1: Koordinaten der Einzelquellen - Fall 3 mit Absorption

Quelle	31Hz	40Hz	50Hz	63Hz	80Hz	100Hz	125Hz	160Hz	200Hz
1	5,12	9,47	5,19	3,67	-0,35	0,7	0,34	-4,38	-2,48
2	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-10,5	-15,35	-20
3	-3,39	4,88	2,81	1,57	0,64	-1,25	-20	-9,67	-7,51
4	-8,66	-1,68	-19,36	-0,63	-3,84	-14,23	-14,24	-8,71	-8,19
5	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-5,61	-20	-20

Tabelle G.2: Frequenzen 31Hz bis 200Hz

Quelle	250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1kHz	1.25kHz	1.6kHz
1	-2,25	-0,38	-1,16	-20	-19,34	-16,35	-20	-7,78	-8,96
2	-20	-20	-20	-20	-11,59	-13,85	-20	-20	-20
3	-2,57	0,54	-1,53	-5,5	-19,08	-18,31	-9,92	-20	-13,24
4	-6,29	0,84	2,94	-4,53	-10,32	-9,72	-8,99	-20	-7,56
5	-17,7	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20

Tabelle G.3: Frequenzen 250Hz bis 1.6kHz

Quelle	2kHz	2.5kHz	3.15kHz	4kHz
1	-20	-20	-20	-20
2	-12,77	-12,51	-17,48	-14,46
3	-9,16	-8,84	-9,46	-9,8
4	-10,77	-10,9	-15,01	-20
5	-20	-16,94	-13,59	-10

Tabelle G.4: Frequenzen 2kHz bis 4kHz

Anhang H

Ersatzquelle Fall 4 mit Absorption

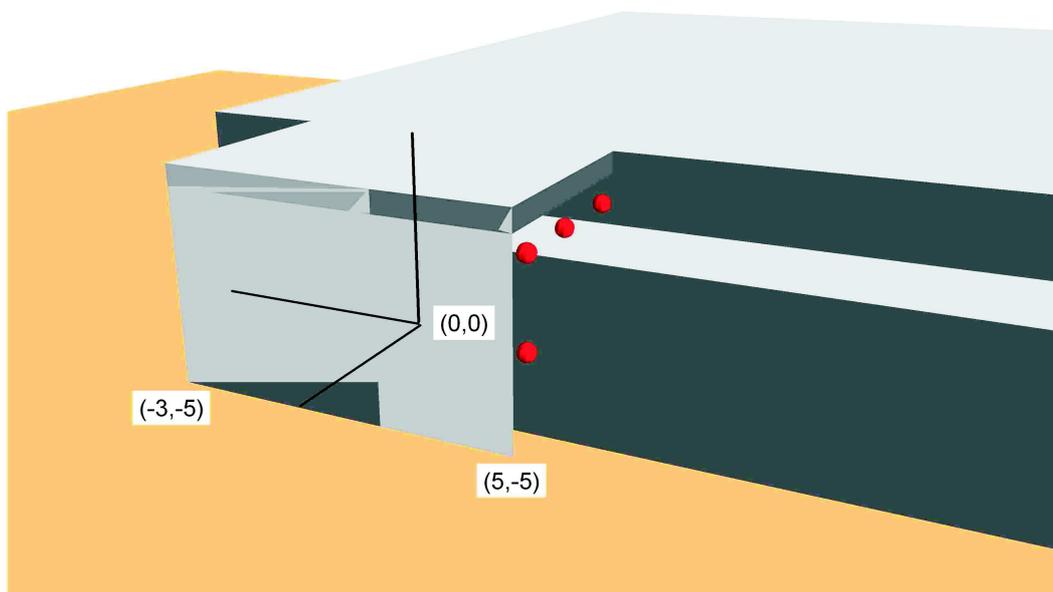


Abbildung H.1: Fall 1

Die Lage des Koordinatenursprungs kann Abbildung 2.2 entnommen werden. Die Koordinaten der einzelnen Punktschallquellen sind der folgenden Tabelle zu entnehmen.

Quelle	x[m]	y[m]	z[m]
1	5,05	-0,75	2
2	5,05	-0,75	4
3	5,05	-2,75	4
4	5,05	-4,5	2
5	5,05	-4,5	4

Tabelle H.1: Koordinaten der Einzelquellen - Fall 4 mit Absorption

Quelle	31Hz	40Hz	50Hz	63Hz	80Hz	100Hz	125Hz	160Hz	200Hz
1	7,61	3	3,02	2,22	-1,07	-3,8	-5,43	-6,11	-4,21
2	-22,8	-22,8	-22,8	-22,8	-22,8	-22,8	-22,8	-22,8	-9,66
3	-22,8	-22,8	-22,8	-22,8	-22,8	-14,98	-15,62	-22,8	-22,8
4	-0,82	-5,25	-14,67	-22,8	-8,28	-9,72	-13,91	-22,8	-7,34
5	-22,8	-22,8	-18,19	-5,32	-10,42	-22,8	-20,31	-10,74	-22,8

Tabelle H.2: Frequenzen 31Hz bis 200Hz

Quelle	250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1kHz	1.25kHz	1.6kHz
1	-4,78	-2,67	-2,78	-22,8	-13,85	-12,92	-22,8	-10,55	-12,43
2	-22,8	-22,8	-22,8	-22,8	-22,8	-22,8	-22,8	-22,8	-22,8
3	-14,23	-8,03	-6,85	-9,76	-17,15	-15	-11,99	-10,86	-12,48
4	-10,54	-6,66	-5,02	-11,19	-19,54	-14,52	-10,56	-22,8	-11,59
5	-22,8	-22,8	-22,8	-22,8	-19,92	-22,8	-22,8	-22,8	-22,8

Tabelle H.3: Frequenzen 250Hz bis 1.6kHz

Quelle	2kHz	2.5kHz	3.15kHz	4kHz
1	-13,99	-14,33	-15,04	-8,37
2	-22,8	-22,8	-22,8	-22,8
3	-12,66	-13,77	-13,79	-9,65
4	-11,94	-12,49	-12,51	-11,77
5	-22,8	-22,8	-22,8	-22,8

Tabelle H.4: Frequenzen 2kHz bis 4kHz

Anhang I

Messergebnisse Fall 1

Frequenz	250,0	315,0	400,0	500,0	630,0	800,0	1000,0	1250,0	1600,0
D11	6,3	0,1	-7,2	-1	-6,6	-6,6	-10,2	-6,1	-5,2
D12	3,9	-2,5	-10,9	-6,4	-15,4	-16,2	-11	-6,9	-6,6
D13	-1	-12,9	-12,9	-4,8	-10,3	-13,6	-10,9	-7,3	-7,1
D14	4	-2,9	-9,9	-2	-8,2	-13,1	-7,5	-8,3	-6,9
D15	2,2	-5,5	-12,5	-7	-14,6	-10,5	-11,5	-9,2	-10,9
D16	-2,4	-16,2	-18	-15,3	-13,5	-9,8	-10,6	-10,1	-11,7
D17	-1,5	-9,8	-13,6	-3,8	-10,6	-10,8	-9,1	-11,9	-9,1
D18	-0,5	-9,4	-12,5	-3,1	-9,1	-4,2	-8,9	-11,1	-10,9
D19	-3	-15	-14,1	-5,4	-11,4	-8,5	-8,1	-14,1	-10,6
D21	-9,3	-11,6	-16,3	-18,1	-26,1	-28,1	-29,2	-26,2	-23,1
D22	-12,8	-16,5	-22,4	-15,8	-21,1	-24,7	-25,1	-26,5	-21,6
D23	-14,1	-22,1	-24,2	-18,1	-19,8	-19,5	-21,5	-22,5	-24,1
D24	-13,5	-17,3	-18,4	-9,5	-17,1	-24,8	-24,1	-24,9	-24,3
D25	-15,1	-21	-20,6	-16,2	-22,1	-20,3	-24	-30,3	-26,8
D26	-13,1	-19,1	-21,3	-16,9	-20,5	-15,9	-22,1	-23,3	-19
D27	-15,8	-17,6	-16,6	-15,6	-22	-25	-28,1	-23,2	-20,1
D28	-15,1	-17,2	-16,7	-16,8	-19,3	-19,6	-21,3	-24,3	-22,6
D29	-13,3	-17	-18,6	-11,9	-19,6	-19,2	-18,9	-19,1	-19,3
M11	-8,6	-10,9	-15	-10,8	-14,3	-12,6	-11,4	-8,2	-11,5
M12	-10,4	-14,8	-16,3	-13,4	-13,5	-12,6	-10,1	-11,8	-11,3
M13	-4,5	-16,5	-11,6	-3	-9,9	-8,1	-9,4	-14,4	-11,3
M14	-1,4	-11,6	-11,3	-0,9	-8,3	-4,1	-9,7	-10,4	-10,3
M15	-1,4	-10,4	-13,5	-3,9	-12,2	-11,2	-10,1	-16,3	-12,6
M21	-5,6	-7	-16,5	-6,5	-11,3	-11,9	-9,6	-11,1	-11,1
M22	-7,3	-11	-15,9	-15,5	-14,5	-12	-11,9	-14	-8,6
M23	-5,5	-15	-10	-5,1	-10,2	-7,8	-9,1	-11,9	-9,1
M24	-2,4	-13,9	-9,4	-1,4	-7,8	-3	-6,2	-9,4	-7,5
M25	-2	-12,8	-12,5	-4,2	-12,9	-8,7	-13,5	-14,1	-14,5
M31	-3	-13,3	-19,4	-7,1	-10	-10,6	-8,8	-10,7	-10,2
M32	-4,6	-14,3	-15,2	-9,3	-14,1	-9	-15,5	-13,8	-7,4
M33	-5,6	-13,7	-8,7	-5,3	-9,1	-5,8	-10,1	-12,6	-2,6
M34	-4,5	-12,8	-7,2	-0,7	-6,5	-3,7	-2,9	-6,6	-7,2
M35	-4,3	-12,1	-10,1	-3	-11,9	-7,9	-12,4	-13,1	-7,4
M41	-4,9	-7,2	-18	-5,6	-8,7	-10,2	-7,9	-10,1	-10,6
M42	-6,4	-9,8	-15,9	-5	-12,3	-6,5	-11,1	-7,5	-5,7
M43	-6	-10,3	-7,8	-5,9	-8,4	-5	-6,2	-3,5	-3,3
M44	-3,6	-10,1	-5,1	-1,4	-5,8	-3	-1,3	-5,4	-8
M45	-2,8	-11	-8	-2,9	-11,8	-9,6	-9	-9,9	-8,5
M51	-0,2	-9,2	-16,8	-2,9	-7,7	-10,5	-7,2	-7,6	-7,5
M52	-3,4	-10,5	-12	-2,5	-10,5	-3,7	-6,4	-4,2	-4,9
M53	-5	-7,1	-7,7	-4	-7,7	-7,7	-2,1	-2,2	-7,4
M54	-3,3	-6	-4	-2,9	-6,5	-0,4	-0,9	-4,9	-3,5
M55	-3	-8,3	-6,6	-4,6	-14,5	-11,3	-8,4	-7,1	-4,5
M61	0,8	-7,6	-14,7	-1,9	-7,9	-11	-11,3	-9,4	-10,8
M62	-2,6	-8,2	-7,5	-2,8	-9,9	-2,3	-2,3	-5	-7,5
M63	-3,5	-5,2	-7,7	-3,6	-9,3	-6,7	-2,4	-5,1	-1,3
M64	-2,5	-3,7	-4,2	-2,5	-6,6	-1,3	-4,6	-7,2	-3,3
M65	-3,6	-6,3	-6,9	-9,3	-14,1	-9,5	-8,4	-6,2	-6
M71	-1,2	-9,6	-15	-3,7	-10,3	-15,4	-17,2	-16,4	-14
M72	-4,2	-11,2	-8,7	-5	-11,7	-6,8	-5,9	-10,3	-11,4
M73	-4	-7,8	-9,4	-6,3	-13	-11,6	-9,7	-10,6	-6,9
M74	-2,6	-5,7	-6,8	-3,5	-9,3	-6,8	-12	-14,9	-7,5
M75	-4,8	-8,7	-10,4	-12,1	-14,7	-14,2	-18,7	-14,3	-12,7

Tabelle I.1: Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse Fall 1 - 250Hz-1,6kHz

Frequenz	2000,0	2500,0	3150,0	4000,0	5000,0	6300,0	8000,0	10000,0	12500,0
M81	-4,9	-13,1	-18,9	-7,5	-14,3	-17,1	-16,9	-18	-16
M82	-6,8	-14,7	-15,3	-10,1	-16,2	-11,1	-12,3	-13,8	-11
M83	-7,3	-12,4	-13,4	-10,2	-16,8	-15,1	-12,9	-15,5	-14,1
M84	-7,3	-11	-12,8	-9,1	-15,3	-13,7	-15	-18,1	-14
M85	-10,2	-13,5	-16,3	-16,1	-21,1	-18,6	-21,7	-18,6	-17,2
M91	-9,8	-16,4	-23,7	-10,8	-17,5	-18,9	-19,8	-21,2	-19,4
M92	-10,3	-16,1	-20,7	-14,8	-18,2	-14,9	-21,7	-19,7	-16,4
M93	-11,3	-15,3	-17,4	-10,9	-19	-18,4	-16,6	-18,5	-17,9
M94	-12,5	-14,9	-16,8	-14,3	-18,9	-15,6	-19,1	-22,7	-19,4
M95	-14,2	-16,7	-17,5	-22	-22,5	-22,4	-23,1	-20,9	-20,5

Tabelle I.2: Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse Fall 1 - 250Hz-1,6kHz

Frequenz	2000,0	2500,0	3150,0	4000,0	5000,0	6300,0	8000,0	10000,0	12500,0
D11	-6,6	-0,9	2,6	-10	-13,8	-16,1	-11,8	-7,1	-8,7
D12	-7,8	-4,7	-1,6	-8,8	-17,9	-15,5	-19,6	-14,9	-17,4
D13	-6,8	-5,3	-3,8	-11,6	-18	-16,8	-18,6	-12,8	-16,6
D14	-5,5	-0,5	3	-7,3	-10,6	-11	-6,7	-4,1	-6,9
D15	-11,1	-5,2	-5,3	-11	-13,9	-13	-13,8	-12,1	-13,3
D16	-13,3	-5,4	-1,2	-10,9	-15,3	-12,5	-14,5	-10,7	-13,6
D17	-11,3	-5,7	-3,1	-10,6	-11	-14,8	-16,9	-13,3	-15
D18	-6,6	0,9	-0,4	-8,8	-8,7	-9,7	-10,7	-10,2	-11,9
D19	-3,8	-2,4	1,7	-8,8	-12	-12	-14,9	-9,7	-10,4
D21	-23	-22,2	-28,7	-30,5	-34	-32,5	-28,3	-32,6	-33,7
D22	-25,4	-27,9	-26,5	-29,9	-31,9	-30,3	-30,1	-31,2	-33,2
D23	-24,9	-24,5	-23,4	-24,3	-26	-27	-29,6	-26,6	-29,9
D24	-24,8	-25,2	-25,5	-27,7	-28,4	-30,5	-32,7	-31,3	-33,7
D25	-24,3	-24	-25	-28	-29	-32,5	-33,6	-29,5	-32,6
D26	-19,3	-19,6	-19	-21,5	-25,2	-25	-29	-26,1	-29,7
D27	-22,7	-24,6	-22,1	-27,5	-26,9	-26,7	-30,5	-27,2	-29,8
D28	-25,4	-20,8	-19,4	-22,1	-23,9	-25,3	-28,6	-22,9	-26,8
D29	-24,6	-19,2	-19,7	-23	-24,3	-26,6	-28,5	-24,7	-29
M11	-9,4	-8	-8,7	-16,8	-17,9	-16,9	-17,7	-16,9	-17,7
M12	-5,9	-2,4	-2,5	-9	-11,9	-12,7	-14,1	-10,3	-12,6
M13	-7,3	-5,6	-2,3	-4	-11,6	-12,1	-12	-8,7	-10,8
M14	-9	-3,9	-1,2	-8,4	-10,7	-12,2	-12,9	-11,7	-11,7
M15	-10,9	-8	-2,1	-10	-18,2	-15	-18,1	-13,8	-19,6
M21	-12	-8,5	-10,3	-15,5	-14,4	-13,7	-16,2	-15,2	-15,3
M22	-4,1	-4,3	-3,6	-7,9	-11,8	-11,1	-11,8	-9,1	-12
M23	-3,5	-4,9	-1,9	-3,1	-13,1	-14,8	-8,2	-5,2	-8,6
M24	-6,9	-0,6	-3,3	-7,3	-9,7	-11,6	-12	-8,2	-9,9
M25	-5,8	-5,2	-2,5	-8,1	-17,1	-14,2	-14,5	-16,5	-16,4
M31	-13,2	-11,2	-12,4	-11,9	-11	-11,4	-16	-12,8	-9,7
M32	-7,4	-4,5	-0,3	-8,3	-10,7	-11,7	-11,4	-8	-10,2
M33	-4,8	-3,5	0,1	-5,8	-9,1	-14,2	-6,7	-4,4	-7,7
M34	-5,6	-1,3	-2,6	-4,7	-9,8	-11,5	-10,7	-7,6	-9,4
M35	-7,8	-3,5	-2,1	-9,5	-11,1	-15,2	-14,1	-12	-13,5
M41	-11,6	-9,8	-6,9	-8,6	-10,6	-11,4	-13,8	-9,6	-10,9
M42	-3,3	-4,4	-0,8	-6,5	-6,9	-10,2	-9,9	-7,9	-7,2
M43	-3,5	1	0,1	-4,2	-11,2	-10,6	-5,3	-5,1	-8
M44	-3,7	-3,4	-0,9	-4,1	-7,6	-8,4	-9,5	-7,2	-8,3
M45	-5,2	-1,1	-1,2	-5,1	-10,9	-15,4	-11,2	-9,5	-9,8
M51	-9,4	-4,2	-4,7	-8,1	-14,1	-11,8	-8,9	-6,4	-7,2
M52	-4,4	1,7	1,8	-4,4	-7,4	-12,3	-8,6	-8,2	-9,9
M53	-3	-0,5	1,5	-3,5	-9,5	-8,5	-5,2	-5	-6,9
M54	-6,1	-4,7	1,9	-4,1	-4,7	-8,1	-4,7	-3,5	-5,9
M55	-8,6	-4	1,6	-6,5	-10,2	-11,1	-7,8	-6,1	-9,2
M61	-7,9	1,4	-0,3	-5,2	-5,1	-8,1	-4,3	-4,6	-1,9
M62	-4,5	-1,6	-5	-3,8	-10,2	-13,1	-8	-9	-9,4
M63	-3,2	-2,5	1,9	-3,8	-7,9	-5,7	-4,9	-6	-4,6
M64	-1,7	-3,2	0,7	-4,1	-6,2	-3,9	-3,8	-5,8	-4,6
M65	-2,7	-4,4	-4,4	-3,6	-9,7	-8,7	-5,8	-8,8	-6,7
M71	-10,6	-5,6	-4,9	-13,1	-13	-15,3	-13,6	-13,7	-14,9
M72	-9,3	-8,9	-6,1	-11	-18,1	-18,6	-15,1	-16,3	-15,8
M73	-8,5	-8,3	-8	-12	-15,1	-13,3	-13,5	-15,8	-12,9
M74	-7,4	-8,3	-8,1	-11,4	-12	-10,7	-13,3	-10	-10,7
M75	-11	-12,4	-13,1	-15,6	-20,4	-17,7	-15,4	-19,6	-17,2

Tabelle I.3: Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse Fall 1 - 2kHz-12,5kHz

Frequenz	2000,0	2500,0	3150,0	4000,0	5000,0	6300,0	8000,0	10000,0	12500,0
M81	-16,7	-13,5	-11	-18,5	-23,2	-22,5	-24	-22	-24,2
M82	-15,1	-11,2	-13,2	-17,4	-23,4	-25,1	-24,1	-22,4	-25,6
M83	-12,3	-15,2	-12,4	-16,4	-20,2	-22,6	-21,9	-20,8	-26,4
M84	-15,7	-17	-16,6	-18,5	-20,6	-22,6	-22,5	-20,6	-24,3
M85	-16,6	-17	-18,5	-22	-24,5	-24,5	-25	-26	-26,6
M91	-20,5	-19,1	-16,6	-19,3	-24,1	-28,9	-26,5	-27,7	-28,2
M92	-16,1	-17,9	-11,4	-19,9	-22,6	-27,3	-27,4	-25,3	-27,9
M93	-17,9	-16,2	-15,6	-19,1	-24,2	-25,6	-27	-24,4	-28,2
M94	-18,9	-17,9	-21,1	-21,8	-23,6	-27,1	-27,9	-23,9	-27,5
M95	-20,1	-20,3	-22,1	-25	-27,8	-28,6	-30,5	-28,9	-28,4

Tabelle I.4: Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse Fall 1 - 2kHz-12,5kHz

Frequenz	16000,0	20000,0	25000,0	31500,0	40000,0
D11	-10,5	-12,8	-12	-11,7	-12,9
D12	-21,6	-21,5	-22,9	-22,2	-26,2
D13	-19,2	-18,1	-21,3	-19,5	-19,3
D14	-9,2	-9,8	-10,7	-10,3	-9,9
D15	-16,1	-16,3	-18,1	-18,3	-21,4
D16	-15,5	-15,9	-17,3	-17,8	-18,3
D17	-15,2	-12,8	-17,8	-15,2	-15,1
D18	-12	-11,4	-12,3	-12,2	-11
D19	-10,9	-9,9	-11	-10,2	-12,2
D21	-36,1	-38,6	-40,6	-42,2	?
D22	-35,9	-38,2	-40,7	-40,5	?
D23	-31,2	-32,1	-31,8	-31,9	-35,5
D24	-36,3	-38,6	-41,3	-40,6	?
D25	-36,3	-38,4	-38,2	-36	-29,9
D26	-33,7	-31,9	-32,6	-33,9	-35,5
D27	-32,3	-35,4	-36,3	-33,2	-28,9
D28	-29,6	-33,9	-34,6	-31,8	-31,5
D29	-30,2	-32,3	-33,7	-32,7	-32,6
M11	-18,6	-19,4	-19,7	-19,7	-24,4
M12	-14,5	-15,7	-16,1	-16,2	-18,5
M13	-12,1	-11,6	-13,4	-14,4	-15
M14	-14,4	-14,6	-16,7	-16,1	-20,6
M15	-18,6	-19,1	-21	-19,1	-23
M21	-17,3	-16,9	-19,4	-18,7	-21,6
M22	-12,9	-13,6	-15,3	-15,9	-19,5
M23	-10,3	-9,3	-12,2	-12	-14
M24	-11,4	-12,7	-13,8	-16	-18,8
M25	-17,5	-16,1	-17,1	-17,5	-21,1
M31	-15,9	-13,3	-16,4	-17,5	-19,6
M32	-11,4	-11,4	-13,8	-13,4	-16,9
M33	-7,4	-8,8	-10,7	-11,8	-12,7
M34	-10,5	-10,3	-11,3	-12,9	-15,9
M35	-13,9	-14,3	-15,9	-14,9	-16,9
M41	-11,2	-11,1	-14,3	-13,2	-15
M42	-8,4	-8,7	-10,8	-7,7	-12,4
M43	-5,5	-6,4	-9,2	-9,1	-10,8
M44	-8,7	-9,1	-8,8	-9,8	-13,8
M45	-10,4	-11,8	-12,6	-11,8	-14,2
M51	-10,5	-11,9	-13	-13,7	-13,7
M52	-8,3	-9	-12	-10,6	-13,3
M53	-3,5	-5,3	-4,3	-7,2	-7,5
M54	-5,7	-5,5	-6,3	-5,5	-8,9
M55	-10,5	-7,8	-8,9	-8,7	-11
M61	-6,3	-8,2	-9,8	-10	-10,5
M62	-8,2	-7,2	-10	-10,2	-10,4
M63	-5	-6,1	-6,6	-6,3	-5,9
M64	-6,9	-6	-6,7	-6,3	-9,1
M65	-7	-7,4	-8,9	-8,5	-9,6
M71	-18,1	-17,5	-20	-19,5	-19,6
M72	-15,3	-15,7	-16,1	-18,5	-17,2
M73	-17,5	-17,6	-20,8	-20,4	-19,6
M74	-13,7	-15,8	-19,8	-17,5	-14,8
M75	-18,6	-20,1	-24,9	-24,9	-23,5

Tabelle I.5: Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse Fall 1 - 16kHz-40kHz

Frequenz	2000,0	2500,0	3150,0	4000,0	5000,0	6300,0	8000,0	10000,0	12500,0
M81	-29,2	-29,1	-31,7	-33,5	-34				
M82	-25,5	-25,2	-28,2	-31,2	-34,3				
M83	-29,7	-30,5	-34,8	-35	-34,2				
M84	-25,4	-29,8	-31,8	-32,6	-32,2				
M85	-30,1	-30,4	-35	-37,4	-37,3				
M91	-32,3	-34,4	-37,4	-37,8	?				
M92	-32,1	-32,2	-33,7	-36,7	?				
M93	-32,3	-34,3	-36,8	-37,1	?				
M94	-31,2	-33,5	-35	-37	-38,2				
M95	-34,1	-34,7	-40,5	-41	?				

Tabelle I.6: Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse Fall 1 - 16kHz-40kHz

Anhang J

Messergebnisse Fall 2

Frequenz	250,0	315,0	400,0	500,0	630,0	800,0	1000,0	1250,0	1600,0
D11	0,6	-4,7	-3,2	-5,5	-9,6	-7,5	-10,5	-4,7	-2
D12	-3,9	-8,6	-4	-9,2	-17,9	-13,6	-10,6	-5,9	-4,8
D13	-13,1	-18,9	-14,8	-8,7	-9,1	-10,8	-10	-7,7	-5,7
D14	-2,4	-8,8	-7,5	-3,9	-8,7	-10,8	-4,6	-7,7	-7,9
D15	-6	-12,3	-12,3	-5,7	-12,6	-9	-10,8	-7,5	-11,4
D16	-15	-20	-12,6	-12,3	-14,7	-8,7	-7,4	-8,5	-12,1
D17	-9,2	-16,6	-8,9	-3,6	-8,6	-9,3	-7,5	-12,6	-7,1
D18	-8,5	-15,9	-10	-2,2	-7,2	-2,9	-8,4	-8,2	-9
D19	-13,5	-18	-9,5	-5,1	-10	-6,7	-5,6	-12	-9,8
D21	-19	-17	-14,8	-14,9	-26,3	-26,2	-25,5	-28,1	-26
D22	-24,6	-21,9	-24,4	-24,1	-19,9	-24,3	-31,2	-30	-30,2
D23	-21,6	-21,1	-24,7	-19,5	-22,9	-21,7	-28,6	-28,9	-31,6
D24	-22,2	-25,6	-20,7	-14,4	-21,5	-21,9	-24,9	-30	-28,6
D25	-25,6	-24,9	-19,8	-20,6	-24,2	-23,8	-24,2	-32,4	-30,4
D26	-21,1	-20,4	-19,5	-27,1	-21	-21,6	-25,2	-28,2	-28,9
D27	-29,5	-22,1	-16,3	-16	-22,7	-22,1	-23,7	-28,6	-29,4
D28	-26,7	-21,8	-16,7	-19,2	-20,2	-17,7	-23	-28	-27,4
D29	-24	-20,6	-17,9	-17,7	-23,7	-21,7	-27,4	-30	-24,9
M11	-10,8	-10,2	-9,2	-14,5	-12,3	-12,4	-10,4	-10,2	-9,2
M12	-16,8	-14	-8,6	-12,2	-11,9	-12,8	-7,4	-9,9	-11,7
M13	-16,6	-16,3	-7,1	-3,4	-9	-7,3	-7,5	-14	-10,2
M14	-10,5	-16,2	-7,3	-0,5	-7,1	-3,3	-7,6	-9,3	-8
M15	-9,8	-17,2	-9	-3,9	-10,5	-9,8	-10,4	-14,9	-9,5
M21	-6	-7,5	-9,1	-11,5	-9,8	-11,2	-7,7	-8,8	-11,2
M22	-11,1	-12,7	-9,4	-11,7	-12,6	-13,6	-8	-11,6	-8,8
M23	-17,5	-13,2	-5,1	-4,6	-9,1	-4,6	-6,5	-9,7	-8,8
M24	-11,8	-13,3	-4	-0,6	-6,1	-1,7	-3,3	-8	-5,1
M25	-10,6	-16,4	-6,5	-3,8	-10,5	-6,2	-10,2	-10,5	-10
M31	-8,3	-10,8	-11,5	-10,6	-8,9	-11,9	-6,4	-11,4	-8,4
M32	-13,1	-13,1	-8,4	-5,9	-10,6	-14,3	-10,2	-11,5	-5,1
M33	-19,2	-10,4	-3,9	-4,8	-8	-2,5	-5,8	-9,7	-3,1
M34	-16,1	-10,2	-1,4	-0,2	-4,3	-2,2	-2,8	-5,8	-4,1
M35	-14,7	-13,7	-3,5	-3	-9,7	-5,7	-10,1	-8,1	-6,7
M41	-7,2	-7,3	-11,2	-7,8	-7,8	-10,8	-5,1	-10	-9,3
M42	-12,2	-11,4	-9,2	-1,8	-9,9	-10,1	-7,7	-10,8	-3,5
M43	-18,6	-8,6	-3,8	-4,1	-6,6	-3	-8,3	-5,8	-2,7
M44	-17,6	-7,3	0,3	-1,5	-3,3	-1	-2,6	-3,5	-4
M45	-15,3	-10,8	-1,7	-3,9	-9,8	-7,9	-9,4	-6,2	-6,9
M51	-4,2	-8,2	-8,6	-6,8	-8,6	-11,9	-8,3	-13,4	-14,4
M52	-9,5	-12,9	-7	-0,4	-9,6	-8,4	-7,9	-8,3	-6
M53	-15,6	-8	-4,8	-4	-7,3	-7,9	-9,1	-6	-6,3
M54	-16,2	-5,8	-0,1	-3,2	-4,3	-1,8	-3,8	-6,8	-8
M55	-15,5	-9,3	-2,3	-6,8	-13,4	-8,8	-4,4	-9,3	-7,5
M61	-5,8	-10,7	-11,2	-9,3	-12,8	-16,8	-13,5	-17,7	-18,2
M62	-11,1	-16,4	-9,8	-3,7	-12,1	-12,5	-13,9	-14,7	-13,8
M63	-17,6	-10,7	-8,3	-7,5	-12,2	-13,7	-13,8	-13,3	-14,5
M64	-17,6	-8,3	-4,2	-6,9	-9	-6,8	-10	-14,2	-16
M65	-18,7	-11,8	-7,1	-11,1	-17,2	-13,5	-10,8	-16	-17,5
M71	-9,3	-13,2	-14,4	-13,6	-16,1	-19,4	-15,7	-22,6	-24,7
M72	-13,4	-17,4	-14,7	-8,4	-17,2	-16,6	-17,3	-19,4	-16,5
M73	-20,7	-14,4	-10,5	-8,8	-15,5	-14,3	-21,7	-19	-18,3
M74	-22,4	-12,2	-7,6	-11,1	-13,6	-13	-14,7	-19,5	-20,2
M75	-23,1	-14,3	-9,7	-13,8	-16,6	-15,9	-18,2	-20,3	-20,5

Tabelle J.1: Auf Eingangsschallleistung normierte Messergebnisse Fall 2 - 250Hz-1,6kHz

Frequenz	2000,0	2500,0	3150,0	4000,0	5000,0	6300,0	8000,0	10000,0	12500,0
M81	-13	-16,6	-17,4	-16,8	-19	-19,8	-19,9	-24,8	-23,7
M82	-15,4	-18,6	-18,9	-13,7	-21,5	-17,4	-23,2	-21,8	-22,7
M83	-21	-19,3	-14,5	-13,1	-17,1	-14,4	-22,7	-26	-21,6
M84	-26,4	-17,5	-11,9	-13,6	-16,2	-15,4	-18,5	-20,8	-22,9
M85	-28,9	-18,6	-13,4	-18,6	-19,4	-18,4	-24,5	-23,3	-21,2
M91	-16,2	-18,1	-22,9	-19,8	-20,8	-24,9	-24,2	-26,4	-25,7
M92	-17,5	-18,6	-19,6	-23,5	-24,4	-25,8	-23,5	-26,2	-25,2
M93	-22,4	-19,6	-17,7	-15,2	-22,1	-19,3	-25,2	-28,2	-22,4
M94	-26,6	-19,6	-16,1	-16,8	-18	-18,5	-19,4	-22,2	-22,4
M95	-26,6	-20,2	-16	-18,3	-21,3	-23,2	-26	-27	-26,4

Tabelle J.2: Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse Fall 2 - 250Hz-1,6kHz

Frequenz	2000,0	2500,0	3150,0	4000,0	5000,0	6300,0	8000,0	10000,0	12500,0
D11	-4,9	-0,6	2,9	-6,2	-12,3	-14,1	-9	-5,3	-5,8
D12	-6,7	-4,8	-2,6	-9,3	-14,1	-13,7	-16,4	-14,3	-15,9
D13	-5,5	-4,4	-3,7	-11,8	-17,4	-16,7	-16,3	-11,9	-12,2
D14	-5	0,6	3,2	-5,8	-8	-9,9	-5,8	-2,1	-4,4
D15	-8	-5,5	-4,7	-8,3	-13,6	-13,3	-13,2	-10,5	-12,9
D16	-11,2	-4,5	0,9	-11,4	-15,2	-13,4	-12,7	-9	-11,7
D17	-11,3	-5	-3,6	-9,1	-10,3	-10,2	-14,5	-8,3	-12,4
D18	-5,5	0,6	3,7	-6,5	-10,1	-8,7	-7	-7,1	-7,4
D19	-4,3	-2,9	-0,2	-8,7	-11,1	-12,2	-12	-9,4	-10,6
D21	-27,9	-26,1	-25,9	-27,1	-33,3	-31,3	-27,4	-30,8	-31,1
D22	-25,6	-28,5	-28,2	-28	-35,3	-32,4	-30,1	-30,4	-32,3
D23	-27	-22	-24,3	-28,7	-31,4	-31,3	-28,9	-30,5	-29,3
D24	-28	-26,9	-25,5	-27,8	-32,3	-33,1	-32,8	-31,4	-32,3
D25	-28,7	-26,3	-26,5	-30,7	-31,4	-32,5	-33,4	-31,4	-33,1
D26	-24,9	-24,2	-20	-27,1	-32	-31,1	-30,7	-28,7	-30,7
D27	-30,3	-25,8	-26	-28,2	-34,3	-32,4	-35,4	-31,1	-34,5
D28	-25,3	-22,6	-24,9	-26,6	-28,8	-29,3	-31,1	-28,2	-30,8
D29	-24,6	-23,7	-23,4	-27	-27,7	-29,2	-31,4	-28,6	-32
M11	-8	-5,8	-3,9	-15,1	-19,7	-15,1	-15,5	-12,3	-15,8
M12	-6,4	-0,3	-2,2	-10,9	-15,9	-12,7	-11,2	-8,7	-10,4
M13	-4,2	-4,7	-0,7	-6	-16,2	-13,7	-10,5	-6,4	-8,8
M14	-7,8	-3,7	-0,8	-5,3	-12,2	-13	-8,3	-9,4	-9,3
M15	-8,7	-5,9	-2,7	-10,5	-16,4	-16,5	-14,1	-13,7	-15,6
M21	-8,7	-4	-3,1	-15,5	-15,4	-14,3	-13,2	-10,9	-10,8
M22	-4,8	-2,2	0,7	-7	-13,3	-10,4	-10,5	-6,6	-7,6
M23	-3,4	-4,2	-0,6	-4,6	-13,8	-13,9	-9,5	-6,9	-7,5
M24	-5,9	-1,5	-2,4	-7	-10	-9,3	-9,9	-6,7	-9
M25	-6	-5,5	-3,2	-10,3	-14,1	-14,1	-9,7	-11,9	-10,9
M31	-9,7	-3,6	-7	-9,8	-12,2	-10,4	-14,4	-13,5	-8,5
M32	-4,5	-1,2	-0,9	-6,6	-10,6	-12,1	-8,9	-6	-7
M33	-5,1	-1,9	-2,1	-6,8	-10,4	-12,5	-6,7	-5,8	-8,9
M34	-1,3	1	-1,9	-0,9	-8,1	-9,5	-7,4	-5,7	-8,9
M35	-6,6	-5,1	-4,5	-9,9	-9,9	-12,5	-12,8	-9,6	-11,8
M41	-9,7	-8,6	-5,4	-8,2	-11,5	-15,1	-12	-8,3	-12,4
M42	-6,9	-4	0,3	-5,9	-10	-9,8	-6,9	-6,5	-6,6
M43	-3,6	-0,8	3,2	-6,7	-11,1	-10,2	-5,8	-5,9	-6,9
M44	-7,4	-2,8	-4,8	-4,2	-8,8	-6,6	-4,3	-2,8	-6,6
M45	-4,9	-4,5	-1,6	-5,8	-10,7	-13	-10	-12,3	-10,8
M51	-8,3	-7,8	-2,4	-7,8	-10,7	-9,6	-9,3	-8,4	-7,3
M52	-7,2	-4,6	0,9	-5,1	-8,5	-9,5	-6,3	-8,7	-8,2
M53	-7,4	-3,3	-1,6	-5,3	-9,7	-7,4	-4,5	-8,6	-8
M54	-5,8	-1,2	-0,8	-4,9	-6	-5,4	-5,6	-5,4	-4,5
M55	-8,9	-5	-3,3	-7,6	-10,6	-12,1	-8,1	-10,8	-8
M61	-13,2	-13,4	-9,3	-15,8	-19,8	-20,4	-21,5	-19,7	-20,3
M62	-15	-11,9	-8,5	-15,2	-20,2	-20,2	-19,7	-20,1	-22,2
M63	-14,1	-11,6	-12,4	-16,5	-24,1	-23,2	-21,4	-23	-24,7
M64	-13,8	-10,6	-11,3	-17,1	-19,6	-20,7	-19,7	-20,5	-22,1
M65	-17,8	-16,9	-13,8	-18	-25,1	-26,1	-23,8	-24,9	-26,9
M71	-19,6	-19,6	-17,2	-20,6	-26,9	-29,1	-28,8	-26,8	-28,2
M72	-20,6	-16,8	-15,2	-20,9	-27,7	-26,9	-26,1	-25,1	-28,5
M73	-21,6	-19,5	-16,4	-22,3	-28,3	-29,8	-27,9	-27,8	-29,4
M74	-19,4	-16,4	-15,5	-21,2	-24,8	-26,1	-26,4	-25,9	-29,4
M75	-25,8	-22,7	-20,5	-23,4	-25,5	-30,7	-31,3	-30,1	-30,9

Tabelle J.3: Auf Eingangsschallleistung normierte Messergebnisse Fall 2 - 2kHz-12,5kHz

Frequenz	2000,0	2500,0	3150,0	4000,0	5000,0	6300,0	8000,0	10000,0	12500,0
M81	-22,9	-20,4	-19,5	-24	-27,6	-27,7	-27,8	-27	-28,7
M82	-23,8	-22,8	-20,9	-23,7	-27,9	-28	-28,4	-26,2	-28,9
M83	-22	-18,9	-19,2	-24	-29,4	-29,7	-28,8	-29,1	-30,9
M84	-22,1	-18,9	-19,2	-23,8	-28,1	-28,6	-27,8	-27,2	-29,9
M85	-24,3	-24,3	-22,8	-25,5	-29,2	-31,5	-32	-32,8	-34
M91	-23,3	-20,3	-22,1	-27	-30,6	-31,9	-31	-29,9	-31
M92	-24,8	-20,1	-17,7	-25,5	-30,7	-33,2	-30,8	-28,9	-31
M93	-25,4	-22,4	-20,4	-24,7	-30,1	-32,8	-32,2	-30,6	-31,5
M94	-20,4	-21	-20,2	-24,6	-29,5	-29,7	-29,4	-28,3	-31,2
M95	-28,2	-25,5	-24,9	-27,4	-32,7	-33,9	-35,8	-33,5	-34,9

Tabelle J.4: Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse Fall 2 - 2kHz-12,5kHz

Frequenz	16000,0	20000,0	25000,0	31500,0	40000,0
D11	-7,9	-9,2	-10,8	-12,1	-11,5
D12	-18,5	-19,6	-22	-22,3	-25,8
D13	-15,6	-14	-14,9	-15,2	-15,1
D14	-4,6	-5,8	-6,3	-9,1	-8,9
D15	-14,3	-15,6	-16,8	-19,3	-20,9
D16	-13,8	-13,8	-15,3	-14,6	-15,5
D17	-12,5	-10,9	-13,5	-13,9	-13,4
D18	-11,3	-9,4	-10	-10	-9,5
D19	-12	-9,7	-11,2	-12,4	-10,3
D21	-32,2	-35,2	-36,6	-33,5	-35,4
D22	-32	-34,6	-35,3	-33,8	-31,3
D23	-31,6	-32,9	-33,9	-33,9	-35,8
D24	-34,3	-35,4	-37,5	-36,8	?
D25	-35,5	-35	-35,7	-34,1	-27,1
D26	-32,8	-33	-35,8	-35,2	-35,5
D27	-36,1	-36,4	-35,4	-33,9	-29,3
D28	-31,6	-33	-32,9	-32,1	-33,5
D29	-32,6	-33	-34,8	-33,6	-35,4
M11	-16	-16,6	-18,6	-18,9	-23
M12	-12	-12,5	-12,6	-16,8	-18,7
M13	-11,5	-11,2	-12,6	-12,8	-15,6
M14	-12,5	-10,7	-16,5	-17	-19
M15	-15,1	-14,8	-15,6	-18,3	-19
M21	-13,9	-12,5	-14	-16,3	-20,4
M22	-10,4	-10	-13,3	-13,7	-13,3
M23	-9,7	-9,2	-10,2	-11,4	-14,7
M24	-10,2	-9,3	-12,6	-14,2	-17
M25	-14	-12,5	-16,5	-13,6	-16,6
M31	-11,4	-11,2	-13,5	-15,8	-17,6
M32	-6,5	-7,4	-12,4	-10,4	-12,3
M33	-6,9	-8,1	-10	-9,8	-12,6
M34	-7,7	-7,5	-11,3	-11,5	-14,4
M35	-11,2	-12,6	-12,4	-13,2	-15,4
M41	-12,3	-11,7	-13,2	-14,9	-16
M42	-6,8	-10,1	-10,5	-10	-11,5
M43	-6,6	-8	-7,8	-8,6	-9,6
M44	-5,4	-7,4	-9,1	-9,3	-11,4
M45	-7,7	-8,4	-9,9	-10,5	-12,1
M51	-9	-7,9	-8,4	-9,9	-11,1
M52	-9,4	-10	-11,1	-8,8	-12
M53	-7,8	-7,8	-9,6	-8,3	-8,7
M54	-6,6	-7	-8,2	-6,2	-10,3
M55	-10,1	-9,6	-9,9	-9,3	-11,7
M61	-21	-22,6	-23,7	-25,6	-27
M62	-23,5	-25,1	-26,4	-27,9	-30,7
M63	-25,8	-27,8	-30,3	-31,1	-33,9
M64	-23,6	-26,5	-28	-30	-32,9
M65	-28,6	-29,5	-31,7	-33,9	-35,4
M71	-30,5	-32,2	-34,5	-36	-38,1
M72	-30	-30,7	-33,8	-35,3	-37,4
M73	-32,6	-33,7	-36,1	-38,5	?
M74	-31,3	-33,9	-34,6	-36,6	?
M75	-35,9	-36,3	-37,8	-39,9	?

Tabelle J.5: Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse Fall 2 - 16kHz-40kHz

Frequenz	2000,0	2500,0	3150,0	4000,0	5000,0	6300,0	8000,0	10000,0	12500,0
M81	-31,6	-33,3	-34,8	-35,7	-37,8				
M82	-32,1	-32,4	-34,9	-35,4	-37,9				
M83	-32,3	-33,7	-34,1	-33,8	-35,9				
M84	-31,8	-31,1	-32,6	-33,2	-35,9				
M85	-37,5	-37,3	-40,6	-40,2	?				
M91	-32,9	-35	-36,1	-36,2	?				
M92	-33,4	-34,3	-37	-36,4	?				
M93	-32,3	-34,8	-35,3	-36,4	-37,4				
M94	-30,8	-31	-32,9	-34,3	-37,6				
M95	-38,9	-41	-43,1	-42,6	?				

Tabelle J.6: Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse Fall 2 - 16kHz-40kHz

Anhang K

Messergebnisse Fall 3

Frequenz	250,0	315,0	400,0	500,0	630,0	800,0	1000,0	1250,0	1600,0
D11	6,3	0,1	-7,2	-1	-6,6	-6,6	-10,2	-6,1	-5,2
D12	3,9	-2,5	-10,9	-6,4	-15,4	-16,2	-11	-6,9	-6,6
D13	-1	-12,9	-12,9	-4,8	-10,3	-13,6	-10,9	-7,3	-7,1
D14	4	-2,9	-9,9	-2	-8,2	-13,1	-7,5	-8,3	-6,9
D15	2,2	-5,5	-12,5	-7	-14,6	-10,5	-11,5	-9,2	-10,9
D16	-2,4	-16,2	-18	-15,3	-13,5	-9,8	-10,6	-10,1	-11,7
D17	-1,5	-9,8	-13,6	-3,8	-10,6	-10,8	-9,1	-11,9	-9,1
D18	-0,5	-9,4	-12,5	-3,1	-9,1	-4,2	-8,9	-11,1	-10,9
D19	-3	-15	-14,1	-5,4	-11,4	-8,5	-8,1	-14,1	-10,6
D21	-9,3	-11,6	-16,3	-18,1	-26,1	-28,1	-29,2	-26,2	-23,1
D22	-12,8	-16,5	-22,4	-15,8	-21,1	-24,7	-25,1	-26,5	-21,6
D23	-14,1	-22,1	-24,2	-18,1	-19,8	-19,5	-21,5	-22,5	-24,1
D24	-13,5	-17,3	-18,4	-9,5	-17,1	-24,8	-24,1	-24,9	-24,3
D25	-15,1	-21	-20,6	-16,2	-22,1	-20,3	-24	-30,3	-26,8
D26	-13,1	-19,1	-21,3	-16,9	-20,5	-15,9	-22,1	-23,3	-19
D27	-15,8	-17,6	-16,6	-15,6	-22	-25	-28,1	-23,2	-20,1
D28	-15,1	-17,2	-16,7	-16,8	-19,3	-19,6	-21,3	-24,3	-22,6
D29	-13,3	-17	-18,6	-11,9	-19,6	-19,2	-18,9	-19,1	-19,3
M11	-8,6	-10,9	-15	-10,8	-14,3	-12,6	-11,4	-8,2	-11,5
M12	-10,4	-14,8	-16,3	-13,4	-13,5	-12,6	-10,1	-11,8	-11,3
M13	-4,5	-16,5	-11,6	-3	-9,9	-8,1	-9,4	-14,4	-11,3
M14	-1,4	-11,6	-11,3	-0,9	-8,3	-4,1	-9,7	-10,4	-10,3
M15	-1,4	-10,4	-13,5	-3,9	-12,2	-11,2	-10,1	-16,3	-12,6
M21	-5,6	-7	-16,5	-6,5	-11,3	-11,9	-9,6	-11,1	-11,1
M22	-7,3	-11	-15,9	-15,5	-14,5	-12	-11,9	-14	-8,6
M23	-5,5	-15	-10	-5,1	-10,2	-7,8	-9,1	-11,9	-9,1
M24	-2,4	-13,9	-9,4	-1,4	-7,8	-3	-6,2	-9,4	-7,5
M25	-2	-12,8	-12,5	-4,2	-12,9	-8,7	-13,5	-14,1	-14,5
M31	-3	-13,3	-19,4	-7,1	-10	-10,6	-8,8	-10,7	-10,2
M32	-4,6	-14,3	-15,2	-9,3	-14,1	-9	-15,5	-13,8	-7,4
M33	-5,6	-13,7	-8,7	-5,3	-9,1	-5,8	-10,1	-12,6	-2,6
M34	-4,5	-12,8	-7,2	-0,7	-6,5	-3,7	-2,9	-6,6	-7,2
M35	-4,3	-12,1	-10,1	-3	-11,9	-7,9	-12,4	-13,1	-7,4
M41	-4,9	-7,2	-18	-5,6	-8,7	-10,2	-7,9	-10,1	-10,6
M42	-6,4	-9,8	-15,9	-5	-12,3	-6,5	-11,1	-7,5	-5,7
M43	-6	-10,3	-7,8	-5,9	-8,4	-5	-6,2	-3,5	-3,3
M44	-3,6	-10,1	-5,1	-1,4	-5,8	-3	-1,3	-5,4	-8
M45	-2,8	-11	-8	-2,9	-11,8	-9,6	-9	-9,9	-8,5
M51	-0,2	-9,2	-16,8	-2,9	-7,7	-10,5	-7,2	-7,6	-7,5
M52	-3,4	-10,5	-12	-2,5	-10,5	-3,7	-6,4	-4,2	-4,9
M53	-5	-7,1	-7,7	-4	-7,7	-7,7	-2,1	-2,2	-7,4
M54	-3,3	-6	-4	-2,9	-6,5	-0,4	-0,9	-4,9	-3,5
M55	-3	-8,3	-6,6	-4,6	-14,5	-11,3	-8,4	-7,1	-4,5
M61	0,8	-7,6	-14,7	-1,9	-7,9	-11	-11,3	-9,4	-10,8
M62	-2,6	-8,2	-7,5	-2,8	-9,9	-2,3	-2,3	-5	-7,5
M63	-3,5	-5,2	-7,7	-3,6	-9,3	-6,7	-2,4	-5,1	-1,3
M64	-2,5	-3,7	-4,2	-2,5	-6,6	-1,3	-4,6	-7,2	-3,3
M65	-3,6	-6,3	-6,9	-9,3	-14,1	-9,5	-8,4	-6,2	-6
M71	-1,2	-9,6	-15	-3,7	-10,3	-15,4	-17,2	-16,4	-14
M72	-4,2	-11,2	-8,7	-5	-11,7	-6,8	-5,9	-10,3	-11,4
M73	-4	-7,8	-9,4	-6,3	-13	-11,6	-9,7	-10,6	-6,9
M74	-2,6	-5,7	-6,8	-3,5	-9,3	-6,8	-12	-14,9	-7,5
M75	-4,8	-8,7	-10,4	-12,1	-14,7	-14,2	-18,7	-14,3	-12,7

Tabelle K.1: Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse Fall 3 - 250Hz-1,6kHz

Frequenz	2000,0	2500,0	3150,0	4000,0	5000,0	6300,0	8000,0	10000,0	12500,0
M81	-4,9	-13,1	-18,9	-7,5	-14,3	-17,1	-16,9	-18	-16
M82	-6,8	-14,7	-15,3	-10,1	-16,2	-11,1	-12,3	-13,8	-11
M83	-7,3	-12,4	-13,4	-10,2	-16,8	-15,1	-12,9	-15,5	-14,1
M84	-7,3	-11	-12,8	-9,1	-15,3	-13,7	-15	-18,1	-14
M85	-10,2	-13,5	-16,3	-16,1	-21,1	-18,6	-21,7	-18,6	-17,2
M91	-9,8	-16,4	-23,7	-10,8	-17,5	-18,9	-19,8	-21,2	-19,4
M92	-10,3	-16,1	-20,7	-14,8	-18,2	-14,9	-21,7	-19,7	-16,4
M93	-11,3	-15,3	-17,4	-10,9	-19	-18,4	-16,6	-18,5	-17,9
M94	-12,5	-14,9	-16,8	-14,3	-18,9	-15,6	-19,1	-22,7	-19,4
M95	-14,2	-16,7	-17,5	-22	-22,5	-22,4	-23,1	-20,9	-20,5

Tabelle K.2: Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse Fall 3 - 250Hz-1,6kHz

Frequenz	2000,0	2500,0	3150,0	4000,0	5000,0	6300,0	8000,0	10000,0	12500,0
D11	-6,6	-0,9	2,6	-10	-13,8	-16,1	-11,8	-7,1	-8,7
D12	-7,8	-4,7	-1,6	-8,8	-17,9	-15,5	-19,6	-14,9	-17,4
D13	-6,8	-5,3	-3,8	-11,6	-18	-16,8	-18,6	-12,8	-16,6
D14	-5,5	-0,5	3	-7,3	-10,6	-11	-6,7	-4,1	-6,9
D15	-11,1	-5,2	-5,3	-11	-13,9	-13	-13,8	-12,1	-13,3
D16	-13,3	-5,4	-1,2	-10,9	-15,3	-12,5	-14,5	-10,7	-13,6
D17	-11,3	-5,7	-3,1	-10,6	-11	-14,8	-16,9	-13,3	-15
D18	-6,6	0,9	-0,4	-8,8	-8,7	-9,7	-10,7	-10,2	-11,9
D19	-3,8	-2,4	1,7	-8,8	-12	-12	-14,9	-9,7	-10,4
D21	-23	-22,2	-28,7	-30,5	-34	-32,5	-28,3	-32,6	-33,7
D22	-25,4	-27,9	-26,5	-29,9	-31,9	-30,3	-30,1	-31,2	-33,2
D23	-24,9	-24,5	-23,4	-24,3	-26	-27	-29,6	-26,6	-29,9
D24	-24,8	-25,2	-25,5	-27,7	-28,4	-30,5	-32,7	-31,3	-33,7
D25	-24,3	-24	-25	-28	-29	-32,5	-33,6	-29,5	-32,6
D26	-19,3	-19,6	-19	-21,5	-25,2	-25	-29	-26,1	-29,7
D27	-22,7	-24,6	-22,1	-27,5	-26,9	-26,7	-30,5	-27,2	-29,8
D28	-25,4	-20,8	-19,4	-22,1	-23,9	-25,3	-28,6	-22,9	-26,8
D29	-24,6	-19,2	-19,7	-23	-24,3	-26,6	-28,5	-24,7	-29
M11	-9,4	-8	-8,7	-16,8	-17,9	-16,9	-17,7	-16,9	-17,7
M12	-5,9	-2,4	-2,5	-9	-11,9	-12,7	-14,1	-10,3	-12,6
M13	-7,3	-5,6	-2,3	-4	-11,6	-12,1	-12	-8,7	-10,8
M14	-9	-3,9	-1,2	-8,4	-10,7	-12,2	-12,9	-11,7	-11,7
M15	-10,9	-8	-2,1	-10	-18,2	-15	-18,1	-13,8	-19,6
M21	-12	-8,5	-10,3	-15,5	-14,4	-13,7	-16,2	-15,2	-15,3
M22	-4,1	-4,3	-3,6	-7,9	-11,8	-11,1	-11,8	-9,1	-12
M23	-3,5	-4,9	-1,9	-3,1	-13,1	-14,8	-8,2	-5,2	-8,6
M24	-6,9	-0,6	-3,3	-7,3	-9,7	-11,6	-12	-8,2	-9,9
M25	-5,8	-5,2	-2,5	-8,1	-17,1	-14,2	-14,5	-16,5	-16,4
M31	-13,2	-11,2	-12,4	-11,9	-11	-11,4	-16	-12,8	-9,7
M32	-7,4	-4,5	-0,3	-8,3	-10,7	-11,7	-11,4	-8	-10,2
M33	-4,8	-3,5	0,1	-5,8	-9,1	-14,2	-6,7	-4,4	-7,7
M34	-5,6	-1,3	-2,6	-4,7	-9,8	-11,5	-10,7	-7,6	-9,4
M35	-7,8	-3,5	-2,1	-9,5	-11,1	-15,2	-14,1	-12	-13,5
M41	-11,6	-9,8	-6,9	-8,6	-10,6	-11,4	-13,8	-9,6	-10,9
M42	-3,3	-4,4	-0,8	-6,5	-6,9	-10,2	-9,9	-7,9	-7,2
M43	-3,5	1	0,1	-4,2	-11,2	-10,6	-5,3	-5,1	-8
M44	-3,7	-3,4	-0,9	-4,1	-7,6	-8,4	-9,5	-7,2	-8,3
M45	-5,2	-1,1	-1,2	-5,1	-10,9	-15,4	-11,2	-9,5	-9,8
M51	-9,4	-4,2	-4,7	-8,1	-14,1	-11,8	-8,9	-6,4	-7,2
M52	-4,4	1,7	1,8	-4,4	-7,4	-12,3	-8,6	-8,2	-9,9
M53	-3	-0,5	1,5	-3,5	-9,5	-8,5	-5,2	-5	-6,9
M54	-6,1	-4,7	1,9	-4,1	-4,7	-8,1	-4,7	-3,5	-5,9
M55	-8,6	-4	1,6	-6,5	-10,2	-11,1	-7,8	-6,1	-9,2
M61	-7,9	1,4	-0,3	-5,2	-5,1	-8,1	-4,3	-4,6	-1,9
M62	-4,5	-1,6	-5	-3,8	-10,2	-13,1	-8	-9	-9,4
M63	-3,2	-2,5	1,9	-3,8	-7,9	-5,7	-4,9	-6	-4,6
M64	-1,7	-3,2	0,7	-4,1	-6,2	-3,9	-3,8	-5,8	-4,6
M65	-2,7	-4,4	-4,4	-3,6	-9,7	-8,7	-5,8	-8,8	-6,7
M71	-10,6	-5,6	-4,9	-13,1	-13	-15,3	-13,6	-13,7	-14,9
M72	-9,3	-8,9	-6,1	-11	-18,1	-18,6	-15,1	-16,3	-15,8
M73	-8,5	-8,3	-8	-12	-15,1	-13,3	-13,5	-15,8	-12,9
M74	-7,4	-8,3	-8,1	-11,4	-12	-10,7	-13,3	-10	-10,7
M75	-11	-12,4	-13,1	-15,6	-20,4	-17,7	-15,4	-19,6	-17,2

Tabelle K.3: Auf Eingangsschallleistung normierte Messergebnisse Fall 3 - 2kHz-12,5kHz

Frequenz	2000,0	2500,0	3150,0	4000,0	5000,0	6300,0	8000,0	10000,0	12500,0
M81	-16,7	-13,5	-11	-18,5	-23,2	-22,5	-24	-22	-24,2
M82	-15,1	-11,2	-13,2	-17,4	-23,4	-25,1	-24,1	-22,4	-25,6
M83	-12,3	-15,2	-12,4	-16,4	-20,2	-22,6	-21,9	-20,8	-26,4
M84	-15,7	-17	-16,6	-18,5	-20,6	-22,6	-22,5	-20,6	-24,3
M85	-16,6	-17	-18,5	-22	-24,5	-24,5	-25	-26	-26,6
M91	-20,5	-19,1	-16,6	-19,3	-24,1	-28,9	-26,5	-27,7	-28,2
M92	-16,1	-17,9	-11,4	-19,9	-22,6	-27,3	-27,4	-25,3	-27,9
M93	-17,9	-16,2	-15,6	-19,1	-24,2	-25,6	-27	-24,4	-28,2
M94	-18,9	-17,9	-21,1	-21,8	-23,6	-27,1	-27,9	-23,9	-27,5
M95	-20,1	-20,3	-22,1	-25	-27,8	-28,6	-30,5	-28,9	-28,4

Tabelle K.4: Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse Fall 3 - 2kHz-12,5kHz

Frequenz	16000,0	20000,0	25000,0	31500,0	40000,0
D11	-10,5	-12,8	-12	-11,7	-12,9
D12	-21,6	-21,5	-22,9	-22,2	-26,2
D13	-19,2	-18,1	-21,3	-19,5	-19,3
D14	-9,2	-9,8	-10,7	-10,3	-9,9
D15	-16,1	-16,3	-18,1	-18,3	-21,4
D16	-15,5	-15,9	-17,3	-17,8	-18,3
D17	-15,2	-12,8	-17,8	-15,2	-15,1
D18	-12	-11,4	-12,3	-12,2	-11
D19	-10,9	-9,9	-11	-10,2	-12,2
D21	-36,1	-38,6	-40,6	-42,2	?
D22	-35,9	-38,2	-40,7	-40,5	?
D23	-31,2	-32,1	-31,8	-31,9	-35,5
D24	-36,3	-38,6	-41,3	-40,6	?
D25	-36,3	-38,4	-38,2	-36	-29,9
D26	-33,7	-31,9	-32,6	-33,9	-35,5
D27	-32,3	-35,4	-36,3	-33,2	-28,9
D28	-29,6	-33,9	-34,6	-31,8	-31,5
D29	-30,2	-32,3	-33,7	-32,7	-32,6
M11	-18,6	-19,4	-19,7	-19,7	-24,4
M12	-14,5	-15,7	-16,1	-16,2	-18,5
M13	-12,1	-11,6	-13,4	-14,4	-15
M14	-14,4	-14,6	-16,7	-16,1	-20,6
M15	-18,6	-19,1	-21	-19,1	-23
M21	-17,3	-16,9	-19,4	-18,7	-21,6
M22	-12,9	-13,6	-15,3	-15,9	-19,5
M23	-10,3	-9,3	-12,2	-12	-14
M24	-11,4	-12,7	-13,8	-16	-18,8
M25	-17,5	-16,1	-17,1	-17,5	-21,1
M31	-15,9	-13,3	-16,4	-17,5	-19,6
M32	-11,4	-11,4	-13,8	-13,4	-16,9
M33	-7,4	-8,8	-10,7	-11,8	-12,7
M34	-10,5	-10,3	-11,3	-12,9	-15,9
M35	-13,9	-14,3	-15,9	-14,9	-16,9
M41	-11,2	-11,1	-14,3	-13,2	-15
M42	-8,4	-8,7	-10,8	-7,7	-12,4
M43	-5,5	-6,4	-9,2	-9,1	-10,8
M44	-8,7	-9,1	-8,8	-9,8	-13,8
M45	-10,4	-11,8	-12,6	-11,8	-14,2
M51	-10,5	-11,9	-13	-13,7	-13,7
M52	-8,3	-9	-12	-10,6	-13,3
M53	-3,5	-5,3	-4,3	-7,2	-7,5
M54	-5,7	-5,5	-6,3	-5,5	-8,9
M55	-10,5	-7,8	-8,9	-8,7	-11
M61	-6,3	-8,2	-9,8	-10	-10,5
M62	-8,2	-7,2	-10	-10,2	-10,4
M63	-5	-6,1	-6,6	-6,3	-5,9
M64	-6,9	-6	-6,7	-6,3	-9,1
M65	-7	-7,4	-8,9	-8,5	-9,6
M71	-18,1	-17,5	-20	-19,5	-19,6
M72	-15,3	-15,7	-16,1	-18,5	-17,2
M73	-17,5	-17,6	-20,8	-20,4	-19,6
M74	-13,7	-15,8	-19,8	-17,5	-14,8
M75	-18,6	-20,1	-24,9	-24,9	-23,5

Tabelle K.5: Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse Fall 3 - 16kHz-40kHz

Frequenz	2000,0	2500,0	3150,0	4000,0	5000,0	6300,0	8000,0	10000,0	12500,0
M81	-29,2	-29,1	-31,7	-33,5	-34				
M82	-25,5	-25,2	-28,2	-31,2	-34,3				
M83	-29,7	-30,5	-34,8	-35	-34,2				
M84	-25,4	-29,8	-31,8	-32,6	-32,2				
M85	-30,1	-30,4	-35	-37,4	-37,3				
M91	-32,3	-34,4	-37,4	-37,8	?				
M92	-32,1	-32,2	-33,7	-36,7	?				
M93	-32,3	-34,3	-36,8	-37,1	?				
M94	-31,2	-33,5	-35	-37	-38,2				
M95	-34,1	-34,7	-40,5	-41	?				

Tabelle K.6: Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse Fall 3 - 16kHz-40kHz

Anhang L

Messergebnisse Fall 4

Frequenz	250,0	315,0	400,0	500,0	630,0	800,0	1000,0	1250,0	1600,0
D11	6,3	0,1	-7,2	-1	-6,6	-6,6	-10,2	-6,1	-5,2
D12	3,9	-2,5	-10,9	-6,4	-15,4	-16,2	-11	-6,9	-6,6
D13	-1	-12,9	-12,9	-4,8	-10,3	-13,6	-10,9	-7,3	-7,1
D14	4	-2,9	-9,9	-2	-8,2	-13,1	-7,5	-8,3	-6,9
D15	2,2	-5,5	-12,5	-7	-14,6	-10,5	-11,5	-9,2	-10,9
D16	-2,4	-16,2	-18	-15,3	-13,5	-9,8	-10,6	-10,1	-11,7
D17	-1,5	-9,8	-13,6	-3,8	-10,6	-10,8	-9,1	-11,9	-9,1
D18	-0,5	-9,4	-12,5	-3,1	-9,1	-4,2	-8,9	-11,1	-10,9
D19	-3	-15	-14,1	-5,4	-11,4	-8,5	-8,1	-14,1	-10,6
D21	-9,3	-11,6	-16,3	-18,1	-26,1	-28,1	-29,2	-26,2	-23,1
D22	-12,8	-16,5	-22,4	-15,8	-21,1	-24,7	-25,1	-26,5	-21,6
D23	-14,1	-22,1	-24,2	-18,1	-19,8	-19,5	-21,5	-22,5	-24,1
D24	-13,5	-17,3	-18,4	-9,5	-17,1	-24,8	-24,1	-24,9	-24,3
D25	-15,1	-21	-20,6	-16,2	-22,1	-20,3	-24	-30,3	-26,8
D26	-13,1	-19,1	-21,3	-16,9	-20,5	-15,9	-22,1	-23,3	-19
D27	-15,8	-17,6	-16,6	-15,6	-22	-25	-28,1	-23,2	-20,1
D28	-15,1	-17,2	-16,7	-16,8	-19,3	-19,6	-21,3	-24,3	-22,6
D29	-13,3	-17	-18,6	-11,9	-19,6	-19,2	-18,9	-19,1	-19,3
M11	-8,6	-10,9	-15	-10,8	-14,3	-12,6	-11,4	-8,2	-11,5
M12	-10,4	-14,8	-16,3	-13,4	-13,5	-12,6	-10,1	-11,8	-11,3
M13	-4,5	-16,5	-11,6	-3	-9,9	-8,1	-9,4	-14,4	-11,3
M14	-1,4	-11,6	-11,3	-0,9	-8,3	-4,1	-9,7	-10,4	-10,3
M15	-1,4	-10,4	-13,5	-3,9	-12,2	-11,2	-10,1	-16,3	-12,6
M21	-5,6	-7	-16,5	-6,5	-11,3	-11,9	-9,6	-11,1	-11,1
M22	-7,3	-11	-15,9	-15,5	-14,5	-12	-11,9	-14	-8,6
M23	-5,5	-15	-10	-5,1	-10,2	-7,8	-9,1	-11,9	-9,1
M24	-2,4	-13,9	-9,4	-1,4	-7,8	-3	-6,2	-9,4	-7,5
M25	-2	-12,8	-12,5	-4,2	-12,9	-8,7	-13,5	-14,1	-14,5
M31	-3	-13,3	-19,4	-7,1	-10	-10,6	-8,8	-10,7	-10,2
M32	-4,6	-14,3	-15,2	-9,3	-14,1	-9	-15,5	-13,8	-7,4
M33	-5,6	-13,7	-8,7	-5,3	-9,1	-5,8	-10,1	-12,6	-2,6
M34	-4,5	-12,8	-7,2	-0,7	-6,5	-3,7	-2,9	-6,6	-7,2
M35	-4,3	-12,1	-10,1	-3	-11,9	-7,9	-12,4	-13,1	-7,4
M41	-4,9	-7,2	-18	-5,6	-8,7	-10,2	-7,9	-10,1	-10,6
M42	-6,4	-9,8	-15,9	-5	-12,3	-6,5	-11,1	-7,5	-5,7
M43	-6	-10,3	-7,8	-5,9	-8,4	-5	-6,2	-3,5	-3,3
M44	-3,6	-10,1	-5,1	-1,4	-5,8	-3	-1,3	-5,4	-8
M45	-2,8	-11	-8	-2,9	-11,8	-9,6	-9	-9,9	-8,5
M51	-0,2	-9,2	-16,8	-2,9	-7,7	-10,5	-7,2	-7,6	-7,5
M52	-3,4	-10,5	-12	-2,5	-10,5	-3,7	-6,4	-4,2	-4,9
M53	-5	-7,1	-7,7	-4	-7,7	-7,7	-2,1	-2,2	-7,4
M54	-3,3	-6	-4	-2,9	-6,5	-0,4	-0,9	-4,9	-3,5
M55	-3	-8,3	-6,6	-4,6	-14,5	-11,3	-8,4	-7,1	-4,5
M61	0,8	-7,6	-14,7	-1,9	-7,9	-11	-11,3	-9,4	-10,8
M62	-2,6	-8,2	-7,5	-2,8	-9,9	-2,3	-2,3	-5	-7,5
M63	-3,5	-5,2	-7,7	-3,6	-9,3	-6,7	-2,4	-5,1	-1,3
M64	-2,5	-3,7	-4,2	-2,5	-6,6	-1,3	-4,6	-7,2	-3,3
M65	-3,6	-6,3	-6,9	-9,3	-14,1	-9,5	-8,4	-6,2	-6
M71	-1,2	-9,6	-15	-3,7	-10,3	-15,4	-17,2	-16,4	-14
M72	-4,2	-11,2	-8,7	-5	-11,7	-6,8	-5,9	-10,3	-11,4
M73	-4	-7,8	-9,4	-6,3	-13	-11,6	-9,7	-10,6	-6,9
M74	-2,6	-5,7	-6,8	-3,5	-9,3	-6,8	-12	-14,9	-7,5
M75	-4,8	-8,7	-10,4	-12,1	-14,7	-14,2	-18,7	-14,3	-12,7

Tabelle L.1: Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse Fall 4 - 250Hz-1,6kHz

Frequenz	2000,0	2500,0	3150,0	4000,0	5000,0	6300,0	8000,0	10000,0	12500,0
M81	-4,9	-13,1	-18,9	-7,5	-14,3	-17,1	-16,9	-18	-16
M82	-6,8	-14,7	-15,3	-10,1	-16,2	-11,1	-12,3	-13,8	-11
M83	-7,3	-12,4	-13,4	-10,2	-16,8	-15,1	-12,9	-15,5	-14,1
M84	-7,3	-11	-12,8	-9,1	-15,3	-13,7	-15	-18,1	-14
M85	-10,2	-13,5	-16,3	-16,1	-21,1	-18,6	-21,7	-18,6	-17,2
M91	-9,8	-16,4	-23,7	-10,8	-17,5	-18,9	-19,8	-21,2	-19,4
M92	-10,3	-16,1	-20,7	-14,8	-18,2	-14,9	-21,7	-19,7	-16,4
M93	-11,3	-15,3	-17,4	-10,9	-19	-18,4	-16,6	-18,5	-17,9
M94	-12,5	-14,9	-16,8	-14,3	-18,9	-15,6	-19,1	-22,7	-19,4
M95	-14,2	-16,7	-17,5	-22	-22,5	-22,4	-23,1	-20,9	-20,5

Tabelle L.2: Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse Fall 4 - 250Hz-1,6kHz

Frequenz	2000,0	2500,0	3150,0	4000,0	5000,0	6300,0	8000,0	10000,0	12500,0
D11	-6,6	-0,9	2,6	-10	-13,8	-16,1	-11,8	-7,1	-8,7
D12	-7,8	-4,7	-1,6	-8,8	-17,9	-15,5	-19,6	-14,9	-17,4
D13	-6,8	-5,3	-3,8	-11,6	-18	-16,8	-18,6	-12,8	-16,6
D14	-5,5	-0,5	3	-7,3	-10,6	-11	-6,7	-4,1	-6,9
D15	-11,1	-5,2	-5,3	-11	-13,9	-13	-13,8	-12,1	-13,3
D16	-13,3	-5,4	-1,2	-10,9	-15,3	-12,5	-14,5	-10,7	-13,6
D17	-11,3	-5,7	-3,1	-10,6	-11	-14,8	-16,9	-13,3	-15
D18	-6,6	0,9	-0,4	-8,8	-8,7	-9,7	-10,7	-10,2	-11,9
D19	-3,8	-2,4	1,7	-8,8	-12	-12	-14,9	-9,7	-10,4
D21	-23	-22,2	-28,7	-30,5	-34	-32,5	-28,3	-32,6	-33,7
D22	-25,4	-27,9	-26,5	-29,9	-31,9	-30,3	-30,1	-31,2	-33,2
D23	-24,9	-24,5	-23,4	-24,3	-26	-27	-29,6	-26,6	-29,9
D24	-24,8	-25,2	-25,5	-27,7	-28,4	-30,5	-32,7	-31,3	-33,7
D25	-24,3	-24	-25	-28	-29	-32,5	-33,6	-29,5	-32,6
D26	-19,3	-19,6	-19	-21,5	-25,2	-25	-29	-26,1	-29,7
D27	-22,7	-24,6	-22,1	-27,5	-26,9	-26,7	-30,5	-27,2	-29,8
D28	-25,4	-20,8	-19,4	-22,1	-23,9	-25,3	-28,6	-22,9	-26,8
D29	-24,6	-19,2	-19,7	-23	-24,3	-26,6	-28,5	-24,7	-29
M11	-9,4	-8	-8,7	-16,8	-17,9	-16,9	-17,7	-16,9	-17,7
M12	-5,9	-2,4	-2,5	-9	-11,9	-12,7	-14,1	-10,3	-12,6
M13	-7,3	-5,6	-2,3	-4	-11,6	-12,1	-12	-8,7	-10,8
M14	-9	-3,9	-1,2	-8,4	-10,7	-12,2	-12,9	-11,7	-11,7
M15	-10,9	-8	-2,1	-10	-18,2	-15	-18,1	-13,8	-19,6
M21	-12	-8,5	-10,3	-15,5	-14,4	-13,7	-16,2	-15,2	-15,3
M22	-4,1	-4,3	-3,6	-7,9	-11,8	-11,1	-11,8	-9,1	-12
M23	-3,5	-4,9	-1,9	-3,1	-13,1	-14,8	-8,2	-5,2	-8,6
M24	-6,9	-0,6	-3,3	-7,3	-9,7	-11,6	-12	-8,2	-9,9
M25	-5,8	-5,2	-2,5	-8,1	-17,1	-14,2	-14,5	-16,5	-16,4
M31	-13,2	-11,2	-12,4	-11,9	-11	-11,4	-16	-12,8	-9,7
M32	-7,4	-4,5	-0,3	-8,3	-10,7	-11,7	-11,4	-8	-10,2
M33	-4,8	-3,5	0,1	-5,8	-9,1	-14,2	-6,7	-4,4	-7,7
M34	-5,6	-1,3	-2,6	-4,7	-9,8	-11,5	-10,7	-7,6	-9,4
M35	-7,8	-3,5	-2,1	-9,5	-11,1	-15,2	-14,1	-12	-13,5
M41	-11,6	-9,8	-6,9	-8,6	-10,6	-11,4	-13,8	-9,6	-10,9
M42	-3,3	-4,4	-0,8	-6,5	-6,9	-10,2	-9,9	-7,9	-7,2
M43	-3,5	1	0,1	-4,2	-11,2	-10,6	-5,3	-5,1	-8
M44	-3,7	-3,4	-0,9	-4,1	-7,6	-8,4	-9,5	-7,2	-8,3
M45	-5,2	-1,1	-1,2	-5,1	-10,9	-15,4	-11,2	-9,5	-9,8
M51	-9,4	-4,2	-4,7	-8,1	-14,1	-11,8	-8,9	-6,4	-7,2
M52	-4,4	1,7	1,8	-4,4	-7,4	-12,3	-8,6	-8,2	-9,9
M53	-3	-0,5	1,5	-3,5	-9,5	-8,5	-5,2	-5	-6,9
M54	-6,1	-4,7	1,9	-4,1	-4,7	-8,1	-4,7	-3,5	-5,9
M55	-8,6	-4	1,6	-6,5	-10,2	-11,1	-7,8	-6,1	-9,2
M61	-7,9	1,4	-0,3	-5,2	-5,1	-8,1	-4,3	-4,6	-1,9
M62	-4,5	-1,6	-5	-3,8	-10,2	-13,1	-8	-9	-9,4
M63	-3,2	-2,5	1,9	-3,8	-7,9	-5,7	-4,9	-6	-4,6
M64	-1,7	-3,2	0,7	-4,1	-6,2	-3,9	-3,8	-5,8	-4,6
M65	-2,7	-4,4	-4,4	-3,6	-9,7	-8,7	-5,8	-8,8	-6,7
M71	-10,6	-5,6	-4,9	-13,1	-13	-15,3	-13,6	-13,7	-14,9
M72	-9,3	-8,9	-6,1	-11	-18,1	-18,6	-15,1	-16,3	-15,8
M73	-8,5	-8,3	-8	-12	-15,1	-13,3	-13,5	-15,8	-12,9
M74	-7,4	-8,3	-8,1	-11,4	-12	-10,7	-13,3	-10	-10,7
M75	-11	-12,4	-13,1	-15,6	-20,4	-17,7	-15,4	-19,6	-17,2

Tabelle L.3: Auf Eingangsschallleistung normierte Messergebnisse Fall 4 - 2kHz-12,5kHz

Frequenz	2000,0	2500,0	3150,0	4000,0	5000,0	6300,0	8000,0	10000,0	12500,0
M81	-16,7	-13,5	-11	-18,5	-23,2	-22,5	-24	-22	-24,2
M82	-15,1	-11,2	-13,2	-17,4	-23,4	-25,1	-24,1	-22,4	-25,6
M83	-12,3	-15,2	-12,4	-16,4	-20,2	-22,6	-21,9	-20,8	-26,4
M84	-15,7	-17	-16,6	-18,5	-20,6	-22,6	-22,5	-20,6	-24,3
M85	-16,6	-17	-18,5	-22	-24,5	-24,5	-25	-26	-26,6
M91	-20,5	-19,1	-16,6	-19,3	-24,1	-28,9	-26,5	-27,7	-28,2
M92	-16,1	-17,9	-11,4	-19,9	-22,6	-27,3	-27,4	-25,3	-27,9
M93	-17,9	-16,2	-15,6	-19,1	-24,2	-25,6	-27	-24,4	-28,2
M94	-18,9	-17,9	-21,1	-21,8	-23,6	-27,1	-27,9	-23,9	-27,5
M95	-20,1	-20,3	-22,1	-25	-27,8	-28,6	-30,5	-28,9	-28,4

Tabelle L.4: Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse Fall 4 - 2kHz-12,5kHz

Frequenz	16000,0	20000,0	25000,0	31500,0	40000,0
D11	-10,5	-12,8	-12	-11,7	-12,9
D12	-21,6	-21,5	-22,9	-22,2	-26,2
D13	-19,2	-18,1	-21,3	-19,5	-19,3
D14	-9,2	-9,8	-10,7	-10,3	-9,9
D15	-16,1	-16,3	-18,1	-18,3	-21,4
D16	-15,5	-15,9	-17,3	-17,8	-18,3
D17	-15,2	-12,8	-17,8	-15,2	-15,1
D18	-12	-11,4	-12,3	-12,2	-11
D19	-10,9	-9,9	-11	-10,2	-12,2
D21	-36,1	-38,6	-40,6	-42,2	?
D22	-35,9	-38,2	-40,7	-40,5	?
D23	-31,2	-32,1	-31,8	-31,9	-35,5
D24	-36,3	-38,6	-41,3	-40,6	?
D25	-36,3	-38,4	-38,2	-36	-29,9
D26	-33,7	-31,9	-32,6	-33,9	-35,5
D27	-32,3	-35,4	-36,3	-33,2	-28,9
D28	-29,6	-33,9	-34,6	-31,8	-31,5
D29	-30,2	-32,3	-33,7	-32,7	-32,6
M11	-18,6	-19,4	-19,7	-19,7	-24,4
M12	-14,5	-15,7	-16,1	-16,2	-18,5
M13	-12,1	-11,6	-13,4	-14,4	-15
M14	-14,4	-14,6	-16,7	-16,1	-20,6
M15	-18,6	-19,1	-21	-19,1	-23
M21	-17,3	-16,9	-19,4	-18,7	-21,6
M22	-12,9	-13,6	-15,3	-15,9	-19,5
M23	-10,3	-9,3	-12,2	-12	-14
M24	-11,4	-12,7	-13,8	-16	-18,8
M25	-17,5	-16,1	-17,1	-17,5	-21,1
M31	-15,9	-13,3	-16,4	-17,5	-19,6
M32	-11,4	-11,4	-13,8	-13,4	-16,9
M33	-7,4	-8,8	-10,7	-11,8	-12,7
M34	-10,5	-10,3	-11,3	-12,9	-15,9
M35	-13,9	-14,3	-15,9	-14,9	-16,9
M41	-11,2	-11,1	-14,3	-13,2	-15
M42	-8,4	-8,7	-10,8	-7,7	-12,4
M43	-5,5	-6,4	-9,2	-9,1	-10,8
M44	-8,7	-9,1	-8,8	-9,8	-13,8
M45	-10,4	-11,8	-12,6	-11,8	-14,2
M51	-10,5	-11,9	-13	-13,7	-13,7
M52	-8,3	-9	-12	-10,6	-13,3
M53	-3,5	-5,3	-4,3	-7,2	-7,5
M54	-5,7	-5,5	-6,3	-5,5	-8,9
M55	-10,5	-7,8	-8,9	-8,7	-11
M61	-6,3	-8,2	-9,8	-10	-10,5
M62	-8,2	-7,2	-10	-10,2	-10,4
M63	-5	-6,1	-6,6	-6,3	-5,9
M64	-6,9	-6	-6,7	-6,3	-9,1
M65	-7	-7,4	-8,9	-8,5	-9,6
M71	-18,1	-17,5	-20	-19,5	-19,6
M72	-15,3	-15,7	-16,1	-18,5	-17,2
M73	-17,5	-17,6	-20,8	-20,4	-19,6
M74	-13,7	-15,8	-19,8	-17,5	-14,8
M75	-18,6	-20,1	-24,9	-24,9	-23,5

Tabelle L.5: Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse Fall 4 - 16kHz-40kHz

Frequenz	2000,0	2500,0	3150,0	4000,0	5000,0	6300,0	8000,0	10000,0	12500,0
M81	-29,2	-29,1	-31,7	-33,5	-34				
M82	-25,5	-25,2	-28,2	-31,2	-34,3				
M83	-29,7	-30,5	-34,8	-35	-34,2				
M84	-25,4	-29,8	-31,8	-32,6	-32,2				
M85	-30,1	-30,4	-35	-37,4	-37,3				
M91	-32,3	-34,4	-37,4	-37,8	?				
M92	-32,1	-32,2	-33,7	-36,7	?				
M93	-32,3	-34,3	-36,8	-37,1	?				
M94	-31,2	-33,5	-35	-37	-38,2				
M95	-34,1	-34,7	-40,5	-41	?				

Tabelle L.6: Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse Fall 4 - 16kHz-40kHz

Anhang M

Messergebnisse Fall 1 mit Absorption

Frequenz	250,0	315,0	400,0	500,0	630,0	800,0	1000,0	1250,0	1600,0
D11	6,3	0,3	-5,6	-0,7	-6,5	-9,9	-13,6	-7,2	-4,8
D12	3,9	-2,4	-9,3	-5,7	-14,7	-18,6	-10,4	-7,3	-6,9
D13	-0,7	-11,6	-11,1	-4,1	-9,8	-15,3	-10,5	-8,9	-8,8
D14	4	-2,8	-7,5	-1,9	-9,5	-11,4	-10,8	-10,2	-9,7
D15	2,2	-5,4	-10,5	-7,1	-16,2	-13,7	-12,5	-9,6	-12,6
D16	-2,1	-15,1	-17,7	-15	-17,5	-11,2	-10,6	-10,5	-14,8
D17	-1,4	-9,5	-11,5	-4,8	-11,9	-11,1	-12,7	-15,1	-14
D18	-0,4	-9,3	-10,5	-4,4	-10,3	-7,6	-12,4	-13,9	-13,1
D19	-2,9	-14,9	-12,9	-7,2	-13,2	-9,9	-9,2	-14,4	-13,1
D21	-6,3	-10,7	-15,8	-19,7	-23,8	-24,9	-29	-29,4	-23,7
D22	-9,8	-16	-18,9	-15,6	-20,5	-26,5	-24,9	-26,7	-21,2
D23	-17,3	-23,6	-20,5	-20,3	-18	-22,1	-20,6	-22,3	-23,9
D24	-10,1	-17,6	-16,8	-11,1	-19,8	-22,7	-24,6	-26,8	-24,3
D25	-13,8	-23,7	-20	-17,3	-23,6	-23,4	-26,3	-34,1	-28,2
D26	-16,9	-20,3	-19,9	-17,7	-17,3	-19,6	-25,2	-24,6	-19,7
D27	-16,1	-17,6	-15,6	-16,4	-22,1	-24	-29	-25,3	-20,5
D28	-16,8	-17,5	-16	-17,7	-17,8	-19,6	-22,1	-26	-25,4
D29	-16,5	-17,4	-17,8	-13,7	-21,5	-19,6	-19,5	-19,7	-18,9
M11	-6,7	-11,8	-14	-10	-13,4	-15,7	-10,5	-9,8	-12,8
M12	-9,3	-16,5	-16,1	-12,8	-16	-14,1	-12,4	-12,7	-14
M13	-4,1	-16,7	-10,3	-4,4	-11,3	-9	-10,1	-15,8	-13
M14	-1,1	-11,4	-9,6	-2,5	-9,2	-7,4	-10,7	-12,6	-11,4
M15	-1,1	-10,1	-11,7	-5	-13,8	-12,2	-13,9	-20,2	-15,4
M21	-6	-7,3	-15,3	-6	-11,5	-14,4	-8,7	-11	-10,5
M22	-7,6	-11,4	-15,3	-17,3	-14,8	-15,7	-12,7	-14,6	-11
M23	-4,8	-14,8	-8,4	-5,6	-11,6	-7,7	-11,2	-13,9	-9,6
M24	-1,7	-13,2	-7,7	-2,4	-7,9	-5,4	-6,8	-10,8	-8,7
M25	-1,4	-12,1	-10,6	-5,1	-13,6	-10,5	-15,7	-16,9	-19,7
M31	-3	-14,7	-16,5	-7,6	-11,2	-12,6	-8,4	-10,9	-9,2
M32	-4,4	-15,5	-15,3	-11,7	-12,2	-15,8	-20,1	-18,8	-8
M33	-5,2	-13,8	-7,4	-6,2	-11,1	-7,3	-15,3	-10,6	-2,9
M34	-3,9	-12,4	-5,7	-1,6	-6,6	-4,3	-4,1	-7,2	-7,9
M35	-3,9	-11,5	-8,5	-4	-12,8	-10,1	-13,5	-14,1	-11,8
M41	-5,8	-8,2	-14	-5,7	-10,3	-11,3	-8	-8,5	-11,9
M42	-6,8	-10,5	-15,4	-6,8	-10,4	-10,5	-15,9	-9	-6,2
M43	-5,7	-10,4	-6,9	-7,1	-11	-8,4	-8,7	-3,4	-3,3
M44	-3,1	-10	-4	-2,3	-6,3	-2,1	-2,8	-6,7	-10,4
M45	-2,5	-10,7	-6,9	-4,1	-12,5	-11,4	-12,6	-11,5	-10,1
M51	-0,7	-10,4	-13,5	-3,3	-8,7	-10,4	-6,7	-8,8	-11
M52	-3,8	-11,4	-11,2	-3,9	-9,1	-6	-9,5	-2,5	-5,6
M53	-4,9	-7,3	-7	-6	-10,8	-6,7	-2,4	-3,3	-11,6
M54	-2,8	-6	-3,2	-3,8	-7,1	-0,5	-3,2	-5,4	-6,3
M55	-2,4	-8,1	-5,9	-5,8	-15,4	-10,5	-8,8	-8,5	-6,3
M61	0,7	-8,7	-11,4	-2,3	-8,1	-10,8	-9,8	-10,4	-14,5
M62	-2,8	-8,7	-6,7	-4,2	-8,5	-3,4	-4,1	-4	-7,1
M63	-3,8	-5,3	-7,4	-5,6	-13,7	-4,1	-2,5	-5,4	-2,6
M64	-2,6	-3,6	-3,5	-4,1	-7,8	-2,4	-9,5	-7,3	-4,2
M65	-3,4	-6,1	-6,1	-10,2	-20	-8,8	-7,2	-6,8	-9,7
M71	-1	-9,7	-11,7	-3,8	-10,1	-15,3	-15,8	-17,4	-15,4
M72	-4,2	-10,8	-7,4	-5,9	-10,2	-6,1	-7,3	-9,6	-11,3
M73	-4,2	-7,6	-9	-7,8	-17,4	-9,6	-10,4	-10,8	-7,4
M74	-2,9	-5,5	-6,2	-5,2	-11,1	-8,2	-17,3	-14,6	-7,8
M75	-5	-8,4	-9,7	-12,7	-17,9	-16,3	-15,4	-14,6	-15,6

Tabelle M.1: Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse Fall 1 abs - 250Hz-1,6kHz

Frequenz	2000,0	2500,0	3150,0	4000,0	5000,0	6300,0	8000,0	10000,0	12500,0
M81	-5,3	-12,9	-15,7	-7,5	-14,6	-17	-17,2	-17	-20,7
M82	-7,4	-14,7	-13,9	-11,1	-15	-12,6	-12,5	-12,4	-11,7
M83	-8	-12,2	-12,9	-11,6	-19,4	-13,2	-12,4	-15,8	-13,8
M84	-8,2	-10,9	-12,2	-11	-17,1	-14,6	-19,1	-20,7	-15
M85	-11,3	-13,6	-15,5	-17,7	-23,5	-16,5	-20,2	-20,2	-17,8
M91	-12,4	-16,7	-22	-12	-17,8	-20,3	-19,4	-20,4	-20,2
M92	-12,4	-16,3	-19,7	-16	-16	-19,7	-22,2	-19,2	-15,8
M93	-13,1	-15,3	-16,5	-12,6	-20,1	-16,5	-16,9	-18,7	-18,4
M94	-14,2	-14,9	-16,1	-15,7	-18	-16,7	-26	-24	-20,5
M95	-15,3	-16,6	-16,7	-22,2	-23,1	-21	-23,6	-21,5	-22

Tabelle M.2: Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse Fall 1 abs - 250Hz-1,6kHz

Frequenz	2000,0	2500,0	3150,0	4000,0	5000,0	6300,0	8000,0	10000,0	12500,0
D11	-7,7	-3,3	-4,5	-14,8	-17,5	-19,1	-18,3	-14	-16,5
D12	-8,1	-6,2	-4,8	-15,2	-17,6	-18,7	-19,5	-17,5	-19,2
D13	-7,3	-7,1	-5,1	-18,4	-20,9	-21,6	-21,7	-19	-20,1
D14	-9,6	-7,9	-9,5	-15	-18,8	-16	-14,2	-13,5	-13
D15	-14,8	-6,1	-8,4	-17,2	-19,3	-20,2	-17,6	-16,3	-17,4
D16	-12,1	-8,1	-4,3	-16,8	-19,8	-17,6	-20,3	-17,5	-20,5
D17	-15,5	-11,1	-8,5	-19	-20,9	-18,5	-21,6	-18	-21,1
D18	-6,7	-2,6	-10,2	-16	-21	-15,8	-17,8	-19	-16,3
D19	-6,3	-5,3	-6,3	-17,2	-19,4	-17,2	-16,6	-15,8	-16,6
D21	-25,7	-29,1	-28,3	-32,3	-32,1	-33,1	-36,2	-34,4	-35,4
D22	-31	-31	-25,7	-32,8	-35,4	-32,3	-34,8	-33,3	-35,2
D23	-24,3	-26,3	-25,4	-25,5	-26,7	-25	-31,6	-27,8	-31,4
D24	-26,3	-28,9	-27,3	-30,8	-33,4	-33,8	-35,7	-34,3	-35,2
D25	-25	-24,4	-26,8	-29,4	-30,4	-30,4	-34,7	-31,1	-34,4
D26	-18,2	-21,5	-20,5	-23,3	-27,4	-25,5	-28,4	-28,5	-32,1
D27	-25,1	-26,9	-22,2	-28,9	-29,3	-28,8	-33,5	-27,8	-31,3
D28	-32,9	-26,4	-21,8	-28	-27,6	-27,4	-32,5	-25,7	-31,2
D29	-24,9	-21,2	-16,9	-28,7	-31	-28,4	-30,7	-26,6	-31,2
M11	-12,1	-8,9	-10,5	-23,1	-26,4	-21,1	-21,5	-21,8	-22,5
M12	-9,8	-4,2	-6,7	-16	-21,3	-17,9	-18,5	-16,8	-17,4
M13	-8,3	-9,2	-8,3	-13,6	-18	-17,4	-13,1	-14	-16,8
M14	-10,5	-8,1	-6,4	-17,6	-23,3	-22,2	-19,3	-19,1	-19,7
M15	-17,5	-14,1	-9,3	-19,7	-21,1	-24,1	-23,6	-23,6	-22,5
M21	-13,9	-9,5	-13,1	-22,6	-26,3	-19,7	-19,9	-20,5	-22,3
M22	-6,5	-5	-7,7	-15,4	-19,9	-20,1	-16,1	-16,5	-14,7
M23	-6,3	-10,2	-6,2	-10,7	-21,3	-19,5	-13,1	-12,4	-15,6
M24	-8,6	-4,5	-8,1	-16,3	-21,9	-21,3	-17	-17,8	-19,7
M25	-11	-9,1	-14,2	-22,1	-21,7	-24,1	-19,6	-22	-22,5
M31	-14,2	-12,2	-13,9	-20	-26,1	-17,3	-17,9	-18,2	-18,4
M32	-7,2	-5	-5,4	-12,3	-18,6	-15,8	-15,2	-14,6	-15,2
M33	-7,8	-4,8	-6,3	-13,4	-21,1	-17,4	-12	-9,5	-13,9
M34	-6,3	-3,9	-7,4	-16,2	-23,4	-24,1	-20,9	-15,4	-18,4
M35	-9,4	-7	-9,7	-16,7	-22,9	-22,2	-21,3	-18,2	-21,5
M41	-17,8	-19,2	-11,6	-14,5	-22	-17,1	-17,7	-16,9	-13,4
M42	-9	-8	-5,6	-13,9	-17,1	-19,2	-12,7	-11,6	-14,1
M43	-6,5	-0,2	-1,7	-7,8	-16,1	-16,3	-13,4	-9,2	-11,9
M44	-7,3	-9,9	-7	-10,8	-18,7	-23,7	-21,3	-16,1	-14,9
M45	-8	-2,9	-7,6	-15,1	-22,6	-24,1	-19,2	-17,9	-19,8
M51	-14,3	-3,3	-3,6	-7,4	-16,4	-12,3	-9,5	-9,4	-10,1
M52	-6,5	2,7	2,7	-6,2	-17	-15,9	-13,1	-12,4	-14,2
M53	-4,5	-4,2	0,6	-4,7	-14,5	-15,7	-10,3	-11,8	-10,1
M54	-8,5	-8,1	-4,7	-9,2	-15,5	-17,3	-15,8	-14,8	-14,4
M55	-11,5	-8,4	-2,5	-12,5	-17,9	-20,9	-17,5	-15,5	-15,7
M61	-6	3,3	5,1	-1,4	-8,3	-6,4	-6,3	-2	-2,7
M62	-4,5	0,1	-1,1	-5,8	-14,5	-14,4	-10	-11,3	-10,6
M63	-4,9	0,6	1,3	-7	-13,8	-10,6	-7,9	-9,6	-7,8
M64	-3,4	-10,6	-1,6	-3,7	-11,1	-13	-11,1	-8,9	-11
M65	-4,3	-5,2	-6,6	-7,7	-15,2	-14,6	-11,7	-15,5	-12,8
M71	-8,5	-1,3	1	-8,6	-10,8	-12	-11,5	-13,6	-16,2
M72	-6,9	-8,7	-2	-11,4	-18,2	-18,4	-13,7	-14,7	-14,8
M73	-11,6	-8,6	-8,9	-15,6	-18,8	-13,2	-13,6	-17,8	-12,7
M74	-9	-16,2	-8	-13,3	-14	-12,1	-16,7	-10,7	-12,3
M75	-11,8	-13,5	-13,3	-14,5	-17,2	-18,1	-16,8	-21,6	-19

Tabelle M.3: Auf Eingangsschallleistung normierte Messergebnisse Fall 1 abs - 2kHz-12,5kHz

Frequenz	2000,0	2500,0	3150,0	4000,0	5000,0	6300,0	8000,0	10000,0	12500,0
M81	-19,3	-10,6	-6,4	-13,5	-24,3	-20,5	-23,4	-23,2	-27,3
M82	-16,8	-9,5	-13,3	-14,5	-24,9	-29,5	-24,6	-22,7	-27,5
M83	-12,9	-14,5	-14,8	-17,6	-25,8	-25,8	-26,5	-24,7	-29
M84	-16,2	-20,8	-17,5	-21,2	-24,7	-24,9	-27	-22,7	-28,2
M85	-20,3	-20	-18,8	-21,9	-24	-25,7	-29	-30	-30,3
M91	-24,5	-19,8	-13,6	-18,1	-25,6	-27	-28,4	-32,1	-31,8
M92	-16,2	-17,6	-9,4	-21,6	-26,3	-29,9	-27,9	-30,9	-32,2
M93	-18,2	-18,2	-14,8	-21,4	-28,9	-31,3	-30,7	-27,6	-31,2
M94	-20,4	-21	-23,3	-22,2	-27,9	-29	-31	-26,5	-31,3
M95	-26,2	-24,6	-21,9	-26,7	-29,3	-29,2	-34,7	-32,5	-31

Tabelle M.4: Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse Fall 1 abs - 2kHz-12,5kHz

Frequenz	16000,0	20000,0	25000,0	31500,0	40000,0
D11	-15,9	-18,2	-17,9	-19,8	-21,3
D12	-24,2	-24,2	-26,5	-25	-28,1
D13	-23,5	-24,3	-26	-24,2	-27,1
D14	-16,7	-16,6	-14,1	-16,5	-19,1
D15	-20,6	-22,1	-24,6	-22,3	-23,9
D16	-21,3	-23	-25,6	-24	-24
D17	-21	-22,4	-22,4	-23,4	-22,7
D18	-20,6	-17,3	-18,4	-18,3	-21
D19	-20,6	-17,5	-19,1	-18,6	-17,7
D21	-38,9	-40,7	-42,3	-40,9	?
D22	-37,7	-40,5	-41,7	-40,3	?
D23	-30,6	-31,9	-33	-35,3	-34,7
D24	-38,9	-39,6	-42,3	-37,9	?
D25	-37,3	-38,6	-37,3	-34,3	-28,4
D26	-32	-30,3	-30,3	-34,2	-35,6
D27	-37	-38,8	-37,9	-32,1	-27,5
D28	-34	-35,3	-34	-27,7	-32,6
D29	-33,7	-34,9	-34,1	-31,5	-30,1
M11	-24,6	-27,2	-26,7	-28,7	-31,2
M12	-20,1	-21,4	-23,8	-23,4	-24,6
M13	-16	-17,3	-19,6	-18,4	-21,5
M14	-23,3	-21,1	-26,6	-25,5	-29,6
M15	-26	-25,8	-28,7	-26,9	-30,1
M21	-24,1	-24	-24,6	-28,1	-28,9
M22	-19,9	-19,3	-21,2	-21	-23,9
M23	-15,7	-15,2	-16,3	-17,9	-17,5
M24	-22	-21	-22,4	-25,8	-27,6
M25	-24,4	-23,1	-27,8	-24,8	-27,3
M31	-21,5	-22,8	-24	-25,5	-26,1
M32	-18,3	-17,7	-19,8	-17,8	-22,2
M33	-12,3	-15,1	-13,9	-16	-17,1
M34	-18,6	-18,2	-21	-22,5	-24,1
M35	-22	-21,7	-23,4	-24	-23,4
M41	-20,2	-17	-18,6	-21,7	-20,4
M42	-14,6	-14,8	-16,3	-16,6	-18,4
M43	-11,3	-15,5	-14,2	-17,1	-16,4
M44	-17,8	-17,2	-18,1	-20,2	-22,6
M45	-20,4	-22,1	-21,1	-18,8	-21,3
M51	-15,7	-14,2	-14,3	-16,2	-14,4
M52	-13,4	-13,1	-14,5	-14,4	-16,8
M53	-10,3	-12,3	-13,1	-14,4	-14,8
M54	-17,2	-15,1	-17	-18,7	-21,5
M55	-17,8	-18,8	-19,7	-17,2	-18,4
M61	-7,8	-9,6	-9,8	-9,4	-9,3
M62	-8,5	-6,5	-11	-10,1	-10,3
M63	-6,7	-6,5	-5,7	-5,8	-5,1
M64	-13,7	-11,6	-14,2	-13,1	-15,3
M65	-16,7	-12,6	-14,6	-14,2	-15,9
M71	-15	-13	-15	-16,9	-16,6
M72	-14,5	-11,6	-13	-10,1	-15,7
M73	-16,1	-19,6	-18,1	-14,9	-15,5
M74	-14,9	-19,3	-19	-13,8	-15,4
M75	-25,6	-23,3	-23,8	-19,8	-20,3

Tabelle M.5: Auf Eingangsschallleistung normierte Messergebnisse Fall 1 abs - 16kHz-40kHz

Frequenz	2000,0	2500,0	3150,0	4000,0	5000,0	6300,0	8000,0	10000,0	12500,0
M81	-26,8	-28,4	-29,4	-33,4	-33,3				
M82	-26,4	-25,2	-25,9	-30	-33,6				
M83	-29,7	-31,2	-33,7	-32,2	-34,2				
M84	-30	-33,7	-32,9	-29,1	-33,8				
M85	-33,3	-37,2	-37,5	-33,3	?				
M91	-33,2	-32,7	-36,5	-39,5	?				
M92	-32,5	-31,9	-36	-35,4	?				
M93	-36	-37,1	-38,7	-36,1	?				
M94	-34,4	-37,5	-37	-35,3	?				
M95	-38,7	-39,2	-43,3	-37,4	?				

Tabelle M.6: Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse Fall 1 abs - 16kHz-40kHz

Anhang N

Messergebnisse Fall 2 mit Absorption

Frequenz	250,0	315,0	400,0	500,0	630,0	800,0	1000,0	1250,0	1600,0
D11	0,6	-4,8	-5,5	-5,1	-6,9	-9,1	-16,3	-5,8	-1,8
D12	-4	-9,3	-6,2	-9,8	-17,4	-16,7	-11,6	-5,8	-4,9
D13	-12,7	-17,8	-15,3	-7	-7	-12,6	-9,4	-7,5	-7
D14	-2,3	-9,2	-9	-4	-10,7	-8,9	-9,7	-11,6	-9,1
D15	-6,1	-13,5	-12,7	-6,3	-16,1	-14,5	-12,1	-9,3	-12,9
D16	-14,8	-18,4	-13,6	-16,9	-17,4	-10,9	-9	-10,7	-17,4
D17	-9,3	-16,2	-9,3	-5,3	-12,4	-12,4	-13	-16,6	-10,4
D18	-8,6	-16,2	-9,7	-4	-10,6	-8,5	-14,3	-10,9	-11,5
D19	-13,6	-17,4	-9,6	-7,1	-13,2	-10,8	-8,2	-14,2	-12,4
D21	-19,9	-17,2	-18	-19,8	-22,2	-25,9	-29,7	-31,6	-29,4
D22	-26,6	-21,8	-25,4	-23,1	-17,1	-24,2	-28,4	-32,4	-32,7
D23	-20,5	-22,4	-24,9	-25,5	-20,9	-25,1	-27,1	-30,4	-31,6
D24	-22,9	-25,2	-19,7	-16,7	-16,6	-21,2	-28,7	-35,3	-33,5
D25	-25,9	-22,8	-19,8	-23,4	-26,1	-23,2	-28	-34,1	-31,5
D26	-20,3	-20	-20,2	-26,8	-22	-24,5	-29,6	-31,1	-30,7
D27	-28,2	-21	-16,8	-18,1	-23,3	-23,6	-26,4	-31,5	-31,8
D28	-25,8	-19,7	-17,3	-21,1	-21,2	-21,6	-25,2	-29,6	-27
D29	-23,3	-18,5	-18,2	-19,3	-25,9	-24,4	-31,2	-33,1	-28,7
M11	-10,1	-9,8	-11,6	-12	-10	-16	-9,5	-9,6	-10,1
M12	-16,4	-12,9	-10	-14,3	-16,1	-12,7	-9,7	-11,1	-15,6
M13	-16,7	-14,9	-7,3	-5,1	-11,4	-11,1	-9,4	-15,8	-13,7
M14	-10,4	-15,3	-7,3	-2,5	-9,8	-8,6	-10,9	-12,4	-10,9
M15	-9,8	-16,1	-9,2	-5,5	-14,4	-12,6	-16,6	-17,6	-11,6
M21	-6	-8,1	-10,7	-9,6	-8,1	-13,9	-7,6	-9,6	-10,9
M22	-11,2	-12,4	-10,8	-14,4	-14,3	-13	-11	-14,9	-12,5
M23	-17,9	-12	-5,5	-6	-11,9	-7,9	-10,3	-16,3	-9,3
M24	-11,8	-12,1	-4,4	-2,4	-8,1	-6,8	-6,6	-10,8	-7,5
M25	-10,6	-14,8	-7,1	-5,4	-14,4	-9,4	-14,9	-13,8	-14
M31	-8,3	-12	-14,4	-9,7	-8	-12,6	-7	-10,9	-8,9
M32	-13,3	-12,2	-9,6	-8,8	-11	-15,9	-17,7	-14,2	-6,5
M33	-19,3	-9	-4,4	-6,2	-10,7	-6,3	-14,2	-11,6	-5,1
M34	-16,2	-8,8	-1,9	-2	-6,1	-5,2	-5,4	-6,8	-5,8
M35	-14,7	-12,2	-4,2	-4,7	-13,1	-9,5	-12,9	-10,5	-11,6
M41	-7,5	-8,4	-12,8	-7,3	-7,5	-11,3	-7,1	-10,3	-11,8
M42	-12,6	-10,9	-9,5	-4,5	-9,8	-12,9	-17,8	-11,6	-4,7
M43	-18,5	-7,6	-4,5	-5,5	-10	-9,3	-15,5	-5,7	-5,8
M44	-17,4	-6,3	-0,5	-2,9	-5,5	-2,3	-5,8	-6,3	-5,7
M45	-15,1	-9,7	-2,6	-5,6	-12,5	-12,4	-14,1	-8,3	-11,1
M51	-4,3	-9,5	-10,6	-6,3	-7,9	-12,5	-10,5	-13,2	-14
M52	-9,7	-11,9	-6,9	-3,3	-9,6	-10,2	-14,6	-6,7	-8,5
M53	-15,5	-7,1	-5,2	-5,7	-10,7	-13,4	-13,7	-8,1	-10,9
M54	-15,8	-5	-0,8	-4,2	-6,6	-3,2	-6,4	-9,5	-10
M55	-15,2	-8,6	-3,2	-8,3	-16	-11,9	-9,7	-10,5	-16
M61	-5,8	-11,7	-12,6	-9,1	-13,4	-17,5	-16,5	-18,8	-18,9
M62	-11,3	-15,2	-9,2	-6,2	-13	-13,2	-18,1	-12,4	-15,9
M63	-17,4	-9,5	-8,7	-8,7	-15,4	-17,9	-17,7	-16,2	-18,5
M64	-17,2	-7,3	-4,8	-7,9	-11,6	-8,6	-11,7	-16,1	-17
M65	-18,5	-10,9	-7,8	-11,7	-19,3	-16,7	-15,2	-16,6	-25,6
M71	-9,5	-14	-14,2	-13,7	-16,4	-19,5	-17,8	-22,5	-27
M72	-13,7	-15,7	-13,9	-10,1	-16,3	-19,9	-23,8	-19,9	-19,7
M73	-20,5	-12,7	-11,1	-10,7	-17,8	-17,8	-24,8	-21,3	-21,1
M74	-22,2	-11,3	-8,1	-11,6	-15,7	-14,2	-16,4	-21,7	-22,6
M75	-24	-13,8	-10,7	-15,3	-18	-20,2	-24,1	-23,6	-26

Tabelle N.1: Auf Eingangsschallleistung normierte Messergebnisse Fall 2 abs - 250Hz-1,6kHz

Frequenz	2000,0	2500,0	3150,0	4000,0	5000,0	6300,0	8000,0	10000,0	12500,0
M81	-12,8	-17,7	-16,7	-15,5	-19,4	-24	-21,1	-23,6	-31,3
M82	-15,4	-18	-18,4	-16,2	-19,5	-22,2	-24,2	-23,9	-27,1
M83	-20,6	-17,2	-15,1	-13,7	-17,4	-20	-26,5	-25,4	-22,5
M84	-25,1	-16,5	-12,3	-13,3	-18,7	-15,3	-20,3	-23,5	-24,7
M85	-27,3	-17,6	-13,8	-18,7	-21,6	-20,9	-27,3	-26,8	-27,2
M91	-15,9	-19,9	-22,7	-18,1	-20,7	-27	-23,6	-25,9	-31
M92	-17,3	-18,5	-19,7	-24,5	-22,7	-26,2	-26,7	-28,2	-27,5
M93	-21,9	-17,9	-18,1	-16,3	-21,3	-20,9	-29,1	-29,9	-27,5
M94	-25,3	-18,1	-16,9	-17	-19,4	-20,9	-22,7	-24,4	-25
M95	-27,9	-19,1	-16,7	-19,8	-21,5	-23,5	-30	-33,8	-30,3

Tabelle N.2: Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse Fall 2 abs - 250Hz-1,6kHz

Frequenz	2000,0	2500,0	3150,0	4000,0	5000,0	6300,0	8000,0	10000,0	12500,0
D11	-6,7	-2,3	-2,4	-12,8	-17	-19,7	-18,9	-13,6	-16,8
D12	-7,3	-5,1	-3,1	-14	-16,9	-17,5	-19	-17,6	-19,1
D13	-6,4	-5,3	-3,9	-16,7	-20	-20,9	-20,7	-17,7	-20,5
D14	-10,7	-5,6	-6,9	-12,6	-18,4	-15,4	-14	-12,8	-12,6
D15	-13,4	-4,5	-8,3	-16,2	-18,9	-20	-17,6	-16,3	-17,5
D16	-12,6	-6,8	-3,6	-18,2	-21,3	-19,1	-20,5	-16,5	-19,9
D17	-16,2	-15,5	-12	-16,7	-22,7	-19	-22,5	-17,2	-20,1
D18	-6,6	-3,7	-7	-13,7	-23,3	-15,5	-17,3	-19	-16,5
D19	-7,6	-7,4	-8,2	-17,2	-20	-17,4	-17,5	-15,7	-16,5
D21	-29,6	-30,2	-31,4	-30,8	-33,5	-34,1	-38,3	-35,5	-37,5
D22	-33,7	-32,1	-29,1	-32	-31,8	-33,2	-37,2	-33,3	-37,9
D23	-26,1	-22,8	-25,5	-32	-32,5	-36,3	-34,8	-32,6	-35,6
D24	-31,7	-29,7	-31,2	-32,1	-30,3	-35,2	-38,7	-37,1	-38,2
D25	-30	-28,8	-29,6	-32,9	-31,9	-34,8	-38	-33	-36,5
D26	-27,4	-22,4	-21,6	-29,8	-31,9	-32,8	-34,2	-33,4	-36,3
D27	-31,5	-29,7	-31,9	-35,5	-36,5	-39	-39,3	-37,2	-39,6
D28	-31,9	-30,3	-28,3	-33,9	-36,5	-38,7	-38,5	-34,3	-36,9
D29	-29,9	-26,8	-29,6	-33,6	-38,8	-37	-36,7	-35,5	-37,9
M11	-12	-6,6	-9,2	-21,4	-26	-19,7	-21	-23,6	-20,8
M12	-9,5	-3	-9,4	-16,9	-22,8	-19,1	-17,6	-17,7	-19
M13	-7,5	-8,4	-7,5	-13,5	-21,2	-19,1	-14,3	-13,9	-16,3
M14	-9,6	-9,7	-5,7	-17,8	-24,8	-22,6	-19,9	-18,3	-19,8
M15	-16,8	-12,2	-13,7	-17,9	-24	-26	-23,9	-23,4	-22,6
M21	-11,4	-5	-11,6	-19,8	-25,1	-18,4	-20,1	-17,9	-20,3
M22	-6,5	-3,5	-3	-14,5	-21,6	-18,8	-15,5	-15,7	-14,1
M23	-6,8	-12,2	-4,3	-11,4	-20,2	-20,3	-14,2	-12,9	-15,4
M24	-8,1	-7,5	-9,4	-16,7	-24,9	-21,4	-18,5	-20,1	-18
M25	-12,1	-9,7	-11	-19,1	-21,9	-26,1	-20,3	-22,9	-23,1
M31	-12,3	-6	-11,7	-18,5	-23,4	-15,5	-18	-14,2	-16,5
M32	-6,6	-2,8	-3,9	-10,1	-17,8	-14,6	-13	-12,8	-13,1
M33	-8,6	-6,2	-5,9	-13,8	-21,9	-16,7	-13,2	-10	-15
M34	-3,5	-3,6	-12,9	-13,8	-24,1	-21,4	-20,7	-16,6	-19,7
M35	-10	-11	-10,9	-16,5	-22,3	-23,2	-22,2	-19,7	-21,6
M41	-11,6	-9,5	-9,4	-12,3	-19,2	-16,2	-15,8	-14,3	-13
M42	-10,2	-5,1	-4	-8,8	-14,4	-12,9	-12,4	-11,1	-15,4
M43	-8,4	-2	-1	-11	-20,3	-18,2	-12	-10,4	-12,4
M44	-7,3	-3,4	-10,3	-10,2	-22,5	-22,3	-21,1	-15	-16,3
M45	-9,4	-6,4	-7,8	-12,2	-24,1	-24,6	-19,5	-19,7	-19,3
M51	-9,7	-8,5	-5	-11,9	-18,8	-13,6	-9,2	-10	-8,6
M52	-7,4	-7,9	-1	-11,4	-15,8	-13,8	-10,3	-9,2	-8,7
M53	-9,9	-9,4	-6,9	-14,6	-25	-19,2	-18,7	-19,8	-14,4
M54	-11	-8	-11	-11,3	-19,6	-22,3	-21,9	-21,9	-20,5
M55	-15,5	-9,4	-8,6	-14,4	-21,5	-20	-20,1	-22,1	-18,8
M61	-15,2	-14,8	-12,9	-21,3	-29,7	-25,4	-21	-24,5	-24,2
M62	-16,3	-14,8	-10,7	-20,7	-26,6	-25,8	-25,7	-24,1	-25,6
M63	-18,5	-17	-18	-26,5	-36,5	-32,7	-32,1	-32	-32,5
M64	-19,6	-17,6	-18,5	-22,6	-32,3	-34,1	-33,4	-33,4	-35,1
M65	-26,5	-22,2	-18,8	-26	-34,7	-34,6	-34,2	-34,9	-36,6
M71	-19,9	-19,9	-20,5	-28,2	-34,5	-29,4	-27	-28,4	-30,8
M72	-23,5	-21,5	-16,6	-26	-33,2	-31,7	-29,9	-28,4	-33,2
M73	-24,7	-21,6	-17,4	-27,8	-35,9	-36	-34,6	-34,9	-35,9
M74	-27,8	-26,8	-26,1	-31,9	-38,2	-39,4	-36	-34	-35,2
M75	-31,7	-25,3	-25,5	-29,3	-33,3	-34,3	-30	-35,3	-33

Tabelle N.3: Auf Eingangsschallleistung normierte Messergebnisse Fall 2 abs - 2kHz-12,5kHz

Frequenz	2000,0	2500,0	3150,0	4000,0	5000,0	6300,0	8000,0	10000,0	12500,0
M81	-27,1	-18,6	-24	-29,2	-32,7	-32,2	-30,8	-29,7	-33,4
M82	-25,3	-20,2	-22,4	-28,1	-29,9	-31,9	-33,4	-31,2	-34,6
M83	-26,3	-24,6	-20,9	-31,3	-37,6	-38,2	-36,9	-34,1	-36,6
M84	-30,2	-28,3	-28,8	-31,2	-34,4	-38	-35,4	-36,3	-37,8
M85	-29,3	-28,6	-28,4	-32,9	-37,6	-38,4	-39,8	-40,1	-41,8
M91	-25,4	-21,6	-27,1	-30,6	-34,9	-33,9	-33	-31,6	-36,5
M92	-27,1	-22,3	-18,5	-30,1	-32	-33,8	-34,9	-34,8	-36
M93	-30,1	-27,6	-25,8	-33,4	-37,6	-39,6	-37,7	-35,5	-38,7
M94	-27,2	-29,1	-29,4	-35,1	-38	-39,8	-39	-36,5	-36,9
M95	-32,8	-33,1	-32,4	-35,9	-40	-41,9	-41,9	-41,9	-43,7

Tabelle N.4: Auf Eingangsschallleistung normierte Messergebnisse Fall 2 abs - 2kHz-12,5kHz

Frequenz	16000,0	20000,0	25000,0	31500,0	40000,0
D11	-16,6	-18,7	-17,2	-19,7	-21,8
D12	-23,9	-23,6	-25,3	-24,6	-27,1
D13	-23,9	-22,2	-26,8	-23,4	-25,5
D14	-17,1	-15,6	-12,7	-17,4	-18,3
D15	-20,2	-21,3	-23,7	-21,9	-23,7
D16	-21,5	-21,4	-25,6	-22,5	-22,7
D17	-22,3	-23,2	-23,5	-23,6	-23,3
D18	-21,2	-18,4	-19	-18,6	-21
D19	-19,9	-17,8	-19,1	-18,3	-17,3
D21	-39,4	-39,8	-39,1	-39,5	?
D22	-40,3	-40,1	-40,2	-40,3	?
D23	-36,8	-37	-38,4	-39,7	?
D24	-38,6	-38,8	-37,8	-34,1	?
D25	-38	-37,3	-37,2	-34,9	-28,4
D26	-38	-37,8	-39,3	-40,2	?
D27	-40,7	-40,6	-39	-35,1	-28,2
D28	-38	-38,7	-38,2	-37	?
D29	-37,3	-40,3	-39,9	-37,6	?
M11	-24,3	-25,9	-29,6	-28,2	-29,5
M12	-19,3	-21,1	-23	-22,5	-23
M13	-16,8	-17,9	-19,7	-18,9	-21,5
M14	-23,9	-21,6	-26,6	-25,9	-29,1
M15	-26,6	-26	-28,2	-26,6	-30,1
M21	-22,9	-23,4	-25,9	-24,9	-26,8
M22	-18,7	-17,6	-20,2	-20,1	-21,6
M23	-14,9	-15,8	-16,6	-18,9	-18
M24	-21,5	-21	-23,5	-25,9	-28,4
M25	-23,4	-23,2	-24,7	-25,6	-26,9
M31	-18,9	-20,6	-21,5	-21,1	-22
M32	-16,4	-15,7	-18	-18,1	-19,9
M33	-13,7	-15,1	-14,3	-16,9	-18,4
M34	-20,5	-18,2	-21,8	-22,2	-24,1
M35	-20,9	-22,4	-22,9	-24,2	-24,3
M41	-15,9	-16,8	-16,2	-17,6	-15,4
M42	-13,8	-12	-13,8	-14,2	-17,3
M43	-11,5	-15	-15,1	-17,8	-16,2
M44	-19,3	-18,2	-19,8	-21,6	-23
M45	-19,4	-19,4	-20,1	-20,8	-21
M51	-11,2	-11,4	-13,8	-11,5	-10,6
M52	-10,2	-9,9	-10,8	-11,5	-13
M53	-17,5	-20,5	-21,5	-20,1	-22,1
M54	-21	-23,2	-22,7	-23,4	-24,9
M55	-20,3	-19,8	-21,8	-19,5	-18,7
M61	-25,9	-27,2	-29,6	-29	-30,8
M62	-29,6	-29,7	-32,2	-34,4	-36,1
M63	-35,4	-37,6	-40,2	-40,5	?
M64	-36,2	-38,8	-41	-41	?
M65	-38,4	-40,9	-43,9	-43,7	?
M71	-34,2	-34,2	-36,6	-36,6	?
M72	-34,1	-33,9	-37	-38,9	?
M73	-39,3	-40,8	-43,3	-44,3	?
M74	-38,8	-39,6	-44,6	-43,1	?
M75	-35,9	-35,2	-39,2	-37,2	?

Tabelle N.5: Auf Eingangsschallleistung normierte Messergebnisse Fall 2 abs - 16kHz-40kHz

Frequenz	2000,0	2500,0	3150,0	4000,0	5000,0	6300,0	8000,0	10000,0	12500,0
M81	-34,4	-36,2	-37,5	-37,3	?				
M82	-36,5	-36,5	-37,4	-35,7	?				
M83	-33,4	-34,2	-36,6	-39,4	?				
M84	-38,9	-36,7	-41	-38,8	?				
M85	-40,2	-42,5	-44,9	?	?				
M91	-38,9	-38	-40,1	-40,5	?				
M92	-39,3	-39,5	-41	-38,3	?				
M93	-37,1	-39,5	-39,8	-40,9	?				
M94	-36,8	-38,5	-41,7	-40,3	?				
M95	-47,2	-47,7	-49,3	?	?				

Tabelle N.6: Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse Fall 2 abs - 16kHz-40kHz

Anhang O

Messergebnisse Fall 3 mit Absorption

Frequenz	250,0	315,0	400,0	500,0	630,0	800,0	1000,0	1250,0	1600,0
D11	0,5	6,3	1,3	1,1	-0,9	-11,5	-10,3	-6,5	-4
D12	-2,3	3,8	-1,1	-7,7	-11,3	-17,5	-12,5	-6,8	-7,7
D13	-8,3	-5,7	-10	-2	-3,9	-13,5	-11	-8,8	-10,5
D14	-1,9	3,6	-1,7	-1,9	-4,6	-6,3	-15,8	-13,4	-11
D15	-4,2	1	-5,4	-8,5	-13,6	-15,6	-13,7	-11,8	-13,1
D16	-10,2	-10,5	-15,1	-10,5	-9,7	-12,2	-12,4	-14,8	-18,3
D17	-7,5	-2,5	-7,5	-5,7	-10,6	-10,3	-15,7	-21	-12,7
D18	-6,6	-2,1	-8,4	-5,4	-8,8	-10,1	-11,3	-14	-13,2
D19	-10	-7,8	-13,1	-8,8	-14,3	-14,7	-12,4	-13,7	-11,7
D21	-16,1	-12,9	-17,8	-19,7	-22,9	-25,9	-25,6	-26,6	-23,2
D22	-20,1	-14,9	-16,2	-16,2	-19,5	-23,8	-25,4	-28,4	-28,2
D23	-15,6	-9,6	-16,2	-11	-14,9	-20,6	-21	-22,2	-19,6
D24	-21	-17	-18,1	-16,1	-24,3	-24	-24,5	-27,1	-26,6
D25	-20,9	-14,6	-14,9	-14,4	-22,1	-22,6	-26,8	-27,5	-27
D26	-16,4	-10,3	-15,8	-15,2	-18,9	-20,1	-25,7	-22,7	-16,6
D27	-23,5	-18,5	-16,3	-18,8	-23,1	-23	-25,2	-24,7	-22,8
D28	-21,5	-17,1	-15,1	-22,2	-23,2	-18,2	-19,4	-26,8	-25,2
D29	-19,2	-13,6	-15,1	-17,8	-22,8	-23,8	-20,7	-21	-18,6
M11	-12,5	-4,3	-7,1	-6,2	-8,7	-15,6	-11,5	-11,1	-11,9
M12	-19,2	-9,4	-10,2	-13,6	-13,2	-12,7	-14,4	-17,8	-21,5
M13	-11,1	-8,8	-10,4	-6,4	-14,3	-16,3	-12,2	-14,4	-12,7
M14	-7,3	-4,1	-9,2	-3,9	-9,5	-12,8	-12,3	-13,8	-10,6
M15	-7,5	-3,4	-8,4	-6,9	-12,4	-11,8	-13,3	-17,8	-15,3
M21	-9,7	-1,4	-8,3	-3,4	-5,5	-14,6	-10,4	-15	-11,4
M22	-12,9	-4,6	-11,7	-10,4	-9,9	-10,3	-14,4	-18,4	-10,9
M23	-11,3	-6,9	-8,7	-8,9	-17	-12,8	-9,6	-17,3	-9,2
M24	-8,2	-5,7	-8,1	-4,5	-11,3	-15,5	-11,1	-10,7	-9,4
M25	-8,3	-5,3	-9,1	-7,8	-12,5	-12,1	-13,3	-17,1	-16,7
M31	-11,6	-8,2	-8,9	-4	-4,7	-12,6	-9,9	-12,6	-9,3
M32	-12,5	-9,5	-10	-7,2	-8,9	-9,5	-16,1	-18,7	-8,1
M33	-11,5	-9,1	-6,8	-10,4	-17	-10,8	-10,2	-14,2	-5,2
M34	-10	-6,3	-5,6	-4	-12,8	-12,6	-9,5	-9,8	-8,2
M35	-10,4	-5,4	-7,2	-6,6	-12,7	-13	-11	-12	-14
M41	-9,9	-0,6	-7,9	-2,7	-3,7	-10,4	-8,7	-11,4	-11,2
M42	-13,5	-4,4	-10,9	-4,6	-8,3	-11,4	-12,9	-10,6	-7,8
M43	-12,3	-8,1	-5,9	-13	-14,3	-11,5	-10	-6,4	-5,8
M44	-9,4	-7	-3,6	-4,4	-11,8	-6	-4,2	-9,8	-8,6
M45	-9,3	-6,6	-5,8	-6,5	-12,7	-13,2	-12,6	-13,3	-9,9
M51	-6	-2	-6,1	-0,8	-2,7	-8,6	-6,2	-11,2	-10,9
M52	-10,7	-5,8	-8,3	-3,8	-8,4	-17,6	-8,4	-5	-6,2
M53	-13,1	-6,3	-5,3	-14,8	-9,9	-9,4	-4,1	-4,9	-12,4
M54	-10,8	-4,8	-1,9	-6,7	-9,3	-3	-2,1	-8,2	-8
M55	-10,8	-5,4	-3,9	-7,3	-12	-10,7	-9	-11,2	-9,4
M61	-5,6	0,8	-6	0	-3	-8,4	-7,9	-12,8	-12,8
M62	-11	-3,8	-7,1	-4,8	-9,1	-11,9	-3,1	-5,8	-8,2
M63	-14,9	-4,9	-6	-13,7	-6,8	-5,1	-4,2	-6,5	-4,5
M64	-12,9	-3,5	-1,6	-9,7	-9,6	-5,6	-8,1	-7,1	-6,9
M65	-12,8	-5,6	-3,7	-10,1	-11,2	-8	-4,4	-9,6	-10,6
M71	-6,7	-1,2	-7,5	-2	-6,2	-12,7	-12,6	-17,6	-12,7
M72	-11,9	-7	-8,1	-7,4	-12,7	-12	-6,3	-10	-13,2
M73	-15,8	-7,7	-8,2	-16,2	-9,7	-7,7	-9,8	-11,3	-9,2
M74	-14,6	-5,7	-4,6	-12,8	-12,7	-12,4	-16,2	-12,2	-9,5
M75	-15,3	-9	-7,7	-14,9	-15,8	-12,9	-10,2	-16,5	-15,6

Tabelle O.1: Auf Eingangsschallleistung normierte Messergebnisse Fall 3 abs - 250Hz-1,6kHz

Frequenz	2000,0	2500,0	3150,0	4000,0	5000,0	6300,0	8000,0	10000,0	12500,0
M81	-8,6	-4,2	-9,6	-5,8	-10,1	-16,2	-16,9	-20,1	-20,3
M82	-12,3	-8,9	-12,1	-10	-17,8	-19,5	-12,9	-14,7	-13
M83	-16,2	-10,8	-11	-17,6	-15,1	-13,1	-11,1	-17,1	-14,5
M84	-17,3	-8,9	-8,3	-16,8	-17,4	-17,2	-22,3	-19,4	-17,2
M85	-18,4	-11,3	-10,7	-20,4	-19,5	-18,1	-17,1	-23,3	-21,9
M91	-11,6	-7,3	-12,3	-8,6	-11,9	-17,5	-19,2	-20	-20,8
M92	-14,4	-10,1	-15,4	-10,9	-17,9	-18,1	-18,5	-18,9	-15,6
M93	-18,2	-13,4	-13,9	-18,5	-21,7	-19,1	-14,6	-20,2	-20,4
M94	-20,4	-13,3	-11,5	-19,4	-20,2	-17,7	-22,5	-22,9	-22,5
M95	-21,6	-15,1	-14	-20,3	-24,2	-24,1	-21,5	-24,3	-22,2

Tabelle O.2: Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse Fall 3 abs - 250Hz-1,6kHz

Frequenz	2000,0	2500,0	3150,0	4000,0	5000,0	6300,0	8000,0	10000,0	12500,0
D11	-7,9	-3,7	-5,4	-16,1	-20,7	-19,8	-18	-15,4	-17,1
D12	-9,5	-9,7	-5,1	-15,1	-20,2	-19,7	-21,2	-19,6	-18,7
D13	-10,8	-9,6	-5,3	-17,5	-21,5	-21,5	-22,2	-19,3	-19,3
D14	-10,5	-5,3	-4,8	-11,2	-16,9	-15,9	-14,4	-11,9	-12,9
D15	-14,6	-7,6	-8,9	-15,8	-20	-20,5	-18,9	-17,2	-17,2
D16	-12,1	-7,5	-5,8	-16,7	-19,7	-17	-20,5	-16,8	-18,4
D17	-14,9	-14,8	-13,6	-15,2	-20,4	-18,7	-22,8	-19,9	-20,9
D18	-8,7	-6,7	-9,6	-15,6	-21,9	-15,8	-18	-17,4	-18,2
D19	-9,4	-8,6	-6,7	-15,5	-18,9	-15,1	-19,3	-17,6	-16,2
D21	-27,8	-27	-28,9	-32,5	-35,4	-34,9	-33	-29,4	-35,8
D22	-31,8	-26,6	-30,3	-33,4	-36,4	-33,7	-34,2	-32,3	-34,6
D23	-23,5	-22,6	-22,7	-22,8	-23,5	-22,5	-30,7	-27,8	-33,3
D24	-29,6	-25,8	-24,4	-26,1	-25,2	-32,2	-35,5	-26,3	-33,6
D25	-24,8	-25,1	-24,7	-28,6	-31	-36,7	-35,2	-32,2	-34,3
D26	-15,9	-15,4	-17,1	-19,5	-24,5	-24,2	-27,3	-26,7	-30,5
D27	-24,9	-22,6	-19,6	-25,5	-26,8	-26,7	-33,5	-27,6	-30,1
D28	-26,6	-25,2	-21,9	-23,8	-29,8	-30,3	-31,7	-24,3	-27,1
D29	-21,8	-21,7	-18,3	-25,3	-28,2	-27,4	-29,9	-26,3	-29,9
M11	-12,4	-9	-8,4	-20,9	-26,3	-23,2	-21,7	-20,9	-20,6
M12	-13,8	-5,3	-6,3	-16,8	-19,2	-19,8	-18,4	-18,6	-17,1
M13	-7,9	-8,8	-6,8	-12,9	-18,4	-17,4	-16,5	-14,2	-16,6
M14	-10,2	-9,9	-7,1	-16,4	-25,8	-24,1	-22	-19,2	-19
M15	-16,7	-12,9	-12,6	-18,4	-22,6	-22,9	-23,6	-20,8	-21,5
M21	-16,5	-9,7	-11,4	-22,2	-25,5	-22,7	-19,6	-21,2	-20,1
M22	-9,5	-5,6	-6,7	-16,7	-22,1	-17,8	-16,8	-16,5	-16,3
M23	-6,4	-12,5	-5,4	-11,2	-21,9	-19,6	-14,5	-12,7	-14,8
M24	-8,8	-8,4	-9,8	-18,6	-24,9	-22	-21,1	-19,9	-19,5
M25	-15,9	-10,9	-11,5	-19,3	-22,8	-23,1	-23,4	-20,8	-21,6
M31	-15,4	-10,2	-10,5	-20,3	-26,1	-19,7	-17,6	-21	-18,5
M32	-10,3	-7,5	-6,4	-13,2	-17,4	-18,1	-15,3	-14,9	-15,1
M33	-8,3	-6,3	-3,8	-14	-21	-20,1	-13	-10,6	-13,4
M34	-7,4	-6,9	-10,5	-18,9	-21,1	-23,6	-22,9	-16,3	-19,3
M35	-11,7	-10,6	-8,1	-16,2	-26	-25,1	-24,9	-19,1	-20,2
M41	-14,2	-9,6	-10,6	-14,3	-19,2	-16,6	-18	-16,3	-12,4
M42	-9,2	-7,5	-5	-14,3	-18,1	-17,9	-12,4	-12,1	-14,1
M43	-8	-2,6	-3,9	-7,1	-17,8	-17,1	-13,3	-10,4	-10,2
M44	-7,9	-8,9	-12,9	-11,3	-18	-24,3	-19,4	-16,6	-17,9
M45	-8,7	-6,2	-7,2	-16,9	-25	-24,2	-20,8	-20,8	-19,7
M51	-13,4	-5,1	-2,1	-8,1	-17,7	-12,5	-9,9	-10,3	-8,7
M52	-7,9	0,3	0,4	-7,9	-18,8	-16	-11,8	-10,7	-12,5
M53	-3,3	-1	-1,5	-5,2	-15,5	-15,4	-10,6	-12,8	-12,2
M54	-7,8	-4,4	-7,6	-10,2	-18,7	-19,5	-17,4	-15,8	-17,2
M55	-8,5	-5,1	-6,7	-14,9	-22,8	-23,2	-20,9	-21,9	-19,7
M61	-4,9	1,5	5,3	-2,1	-8,5	-7,2	-6,1	-3	-3,8
M62	-2,1	0,4	0,2	-5,1	-13,1	-14,9	-10,5	-9,9	-10,9
M63	-4,3	0,5	0,3	-8,6	-14,6	-11,3	-8,1	-10,8	-6,7
M64	-6,4	-6,2	-1,2	-6	-10,7	-13,4	-11,9	-9,5	-10,5
M65	-5,6	-5,9	-6,8	-7,3	-16,6	-14,7	-11,3	-16,9	-13,3
M71	-6,6	-2,4	0,2	-9,8	-10,9	-12	-11,4	-13	-16,5
M72	-6	-6	-2,6	-11,4	-18,5	-17,7	-12	-13,2	-12
M73	-11,1	-8,4	-8,9	-15,7	-17,8	-13,5	-12	-16	-11,5
M74	-11,5	-10,6	-7,3	-14,4	-14	-12,2	-15,8	-9,9	-10,8
M75	-13,6	-13,8	-13,5	-13,8	-16,7	-17,4	-16,3	-21,2	-18,1

Tabelle O.3: Auf Eingangsschallleistung normierte Messergebnisse Fall 3 abs - 2kHz-12,5kHz

Frequenz	2000,0	2500,0	3150,0	4000,0	5000,0	6300,0	8000,0	10000,0	12500,0
M81	-16,8	-11,5	-6,6	-13,9	-24,3	-20,3	-22,8	-22,7	-27
M82	-15	-8,9	-13	-13,5	-23,5	-27,7	-24,8	-22	-26,3
M83	-14,6	-14,2	-14,3	-17,9	-25,3	-25,6	-25,5	-25,7	-26,9
M84	-18,6	-17,9	-16,6	-22,2	-24,4	-25	-26,5	-22	-27,5
M85	-23,4	-18,8	-18,3	-22,3	-22,5	-24,7	-28,1	-28,6	-29,7
M91	-25	-20,6	-14,8	-17,6	-26,7	-29,5	-27,4	-29,9	-30,8
M92	-17,9	-17	-10,5	-22,3	-26,8	-30,3	-27,8	-27,3	-30,8
M93	-19,4	-15,9	-15,7	-22,7	-30,2	-32,3	-32,1	-25,4	-30
M94	-21,3	-21,7	-25	-25,3	-30,3	-29,6	-29,9	-24,5	-31,1
M95	-30,1	-24,4	-22,7	-25,4	-26,7	-28,7	-31,5	-30,3	-30,3

Tabelle O.4: Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse Fall 3 abs - 2kHz-12,5kHz

Frequenz	16000,0	20000,0	25000,0	31500,0	40000,0
D11	-18,2	-17,6	-20,1	-20,1	-21,4
D12	-23,2	-25,5	-26,8	-24,8	-27,8
D13	-23,9	-25,9	-27,8	-24,7	-26
D14	-16,2	-16,1	-16,7	-17,5	-18,1
D15	-20,8	-23,2	-23,6	-22,5	-23,9
D16	-21,1	-21,7	-23,6	-23,3	-21,4
D17	-21,5	-23,7	-22,9	-24,2	-22,8
D18	-17,7	-17,4	-19	-20,2	-18,7
D19	-18,5	-17,2	-17	-18,9	-20,1
D21	-39,7	-39,9	-42,5	-42	?
D22	-36,1	-38,3	-40,2	-39,1	?
D23	-30,9	-31,7	-34,6	-37,7	?
D24	-32,6	-30,8	-32,9	-32	-35,4
D25	-37	-35,9	-36,6	-34,3	-28,4
D26	-33,1	-32	-30,2	-32,7	-35,1
D27	-34	-36	-36,5	-32,4	-27,1
D28	-30,2	-32,8	-34	-31,4	-32,6
D29	-30,6	-34	-32,1	-31,9	-29,9
M11	-25,6	-27,2	-28,4	-28,7	-30,6
M12	-20,6	-21,7	-22,6	-21,9	-24,4
M13	-17,6	-17,5	-17,5	-19,8	-21,6
M14	-23,1	-23,3	-23,2	-26,6	-28,9
M15	-25,7	-26,1	-23,4	-27,5	-29,3
M21	-24,7	-25,6	-27,8	-27,5	-29,2
M22	-18,8	-20,8	-20,9	-20	-22,8
M23	-15,3	-16,7	-15,6	-18,5	-20,2
M24	-22,7	-22,9	-23,9	-25,1	-28,2
M25	-21,8	-24,8	-23,1	-26,6	-27,8
M31	-23,1	-24,5	-24,5	-27,4	-27,1
M32	-17,7	-17,8	-19,3	-17,8	-21,5
M33	-14	-15,2	-16,1	-17	-17,2
M34	-20,6	-18,7	-24,6	-24,7	-24,8
M35	-21,4	-21,7	-23,4	-22,6	-23,6
M41	-19,8	-18,6	-21,4	-23,3	-19,9
M42	-15,3	-15,3	-17,9	-15,6	-20,4
M43	-12,1	-14,7	-15,1	-16	-16,8
M44	-21	-19	-20,1	-22	-22,4
M45	-19,1	-20,5	-20,6	-22,7	-21,6
M51	-13,8	-11,3	-12,1	-14,9	-15,6
M52	-13,2	-13,3	-14,4	-14,3	-15,2
M53	-11,2	-12,5	-15,5	-15,7	-14,4
M54	-16,7	-15,7	-18,7	-18,5	-20
M55	-18,2	-20,3	-22,2	-19,8	-21,2
M61	-8,5	-9	-13,9	-10	-9,9
M62	-9,6	-6,5	-10,6	-9,3	-12,8
M63	-5,2	-6,8	-5,9	-5,4	-3,8
M64	-13,2	-12	-15,6	-13,1	-15,7
M65	-17,6	-13,2	-15,4	-14	-16,8
M71	-16	-13,8	-14,6	-15,1	-17,9
M72	-12,8	-12,5	-12,1	-9,2	-14
M73	-13,4	-16,5	-16,2	-15,9	-15,7
M74	-13,6	-18,4	-18,6	-13,8	-14
M75	-24,7	-21,8	-22,9	-19,6	-19,5

Tabelle O.5: Auf Eingangsschallleistung normierte Messergebnisse Fall 3 abs - 16kHz-40kHz

Frequenz	2000,0	2500,0	3150,0	4000,0	5000,0	6300,0	8000,0	10000,0	12500,0
M81	-28,3	-28,6	-29,7	-34	-34,9				
M82	-25	-26	-24,5	-27,9	-33,6				
M83	-29,7	-32,8	-34	-34,3	-34,6				
M84	-28,5	-35,1	-33,6	-29,1	-32,9				
M85	-33,1	-34,7	-36,2	-33,3	-36,1				
M91	-33,3	-32,3	-35,5	-38,5	?				
M92	-31,2	-31	-34,7	-32,7	?				
M93	-32,5	-36,4	-37,6	-35,6	?				
M94	-32,7	-36,1	-37,3	-35,3	?				
M95	-35,5	-32,6	-35,3	-35,7	?				

Tabelle O.6: Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse Fall 3 abs - 16kHz-40kHz

Anhang P

Messergebnisse Fall 4 mit Absorption

Frequenz	250,0	315,0	400,0	500,0	630,0	800,0	1000,0	1250,0	1600,0
D11	4,5	-0,2	0,9	0,1	-0,9	-8,9	-9,1	-5,4	-1,4
D12	-0,6	-3,4	-1,4	-9	-11,9	-15,9	-11,8	-5,4	-5,8
D13	-11,4	-19,8	-13,9	-2,4	-2	-10,7	-9,3	-7	-7,8
D14	1,7	-3,6	-2,8	-1,7	-5,1	-4,7	-14	-13,7	-10,8
D15	-2,7	-6,7	-8,1	-6,4	-14,1	-13,6	-11,7	-12,3	-10,6
D16	-15,5	-18,1	-12,7	-10,3	-7,7	-11,1	-10,3	-14,6	-19,8
D17	-5,2	-11,2	-7,8	-5,1	-9,9	-9,1	-15,3	-21	-11
D18	-4,7	-10,7	-9,8	-4,4	-7,6	-8	-15,6	-14	-11,6
D19	-11,2	-15,9	-10,6	-7,9	-13	-15,2	-10,6	-13,6	-11,9
D21	-15,6	-14,7	-16,3	-19,7	-24,4	-28,1	-28	-29,6	-24,4
D22	-19,3	-20,3	-22,9	-17,8	-23,7	-27,1	-31,3	-28,9	-32,6
D23	-11,4	-13,4	-20,3	-14,2	-16,5	-25,5	-24,3	-25,8	-28
D24	-19	-21,2	-17,9	-16,5	-26,5	-27,6	-28,3	-29,5	-27,1
D25	-19,4	-18	-16,3	-16,4	-22,6	-25,7	-29,6	-29,6	-31,6
D26	-12,2	-13,6	-18,6	-19,8	-19,9	-27,7	-29,7	-26,6	-29
D27	-24,3	-20,3	-17,1	-20,9	-25,5	-23,9	-23,1	-28,1	-28,8
D28	-22,3	-19,4	-17,5	-20,5	-26,2	-24,6	-23	-31,6	-25,3
D29	-16	-16,3	-17,8	-20,2	-26	-24,6	-27,3	-28,7	-30,7
M11	-3,3	-5,3	-5,6	-5,8	-6,6	-13,7	-9,6	-9,9	-10,9
M12	-8,7	-8,8	-6,9	-12,5	-10,7	-11	-12,7	-16,8	-19,8
M13	-13	-14,5	-7,4	-6	-13	-16,4	-11,9	-16,3	-12
M14	-6,2	-13,5	-8,3	-3,3	-8,5	-10,9	-15,2	-14,7	-9,9
M15	-5,7	-12,6	-8,6	-6,2	-12,2	-11,7	-16,8	-18,9	-13,9
M21	-0,1	-3	-8,8	-3,4	-3,5	-13,2	-8,3	-13,5	-10,6
M22	-4,5	-7,1	-9,3	-10,4	-8	-7,6	-12,7	-19,8	-12,5
M23	-11,1	-12,1	-5,8	-7,8	-15,3	-12,7	-9,9	-16,1	-8,2
M24	-8,1	-13,6	-5,3	-3,7	-10	-14,5	-10,3	-11,8	-8,5
M25	-7,3	-14,3	-7,6	-7,4	-12,7	-11,8	-18,1	-17,6	-14,3
M31	-2,8	-5,7	-7,6	-3,7	-2,8	-13,1	-7,8	-12,4	-8,8
M32	-7	-8,5	-7,1	-7,1	-6,3	-5,5	-14,8	-17,8	-7,5
M33	-12,4	-10,3	-4,2	-8,7	-15,4	-10,6	-13,7	-15	-5,7
M34	-11,6	-10,8	-2,5	-3,4	-11,5	-15,2	-10,3	-8,8	-7,8
M35	-11,1	-12,8	-4,8	-6,6	-12,7	-11,6	-8,8	-11,9	-14,7
M41	-0,1	-1,8	-8,1	-2,7	-2,5	-11,6	-8,2	-12	-12,8
M42	-4,8	-6	-9,5	-4,4	-5,5	-6	-13	-11,2	-6,4
M43	-11,4	-8,3	-4,7	-9,8	-15,8	-11,4	-9,8	-8,4	-8,4
M44	-11,1	-7,9	-0,8	-3,6	-11,4	-8,2	-8,8	-8,4	-6,8
M45	-9,8	-10,8	-2,7	-7	-12,6	-12,4	-5,9	-10,6	-12,3
M51	2,1	-2,4	-5,4	-2,8	-3,5	-11,3	-10,5	-14,7	-15,2
M52	-3	-7,7	-7,7	-3,8	-7,3	-10,2	-11,5	-8	-10,1
M53	-10,3	-7,6	-5,7	-10,7	-16,5	-15,7	-13,3	-10,3	-15,4
M54	-11,9	-5,7	-1	-5,8	-11,2	-7,5	-6,8	-12,2	-10,6
M55	-11,8	-8,8	-3,3	-9,7	-14,8	-16,3	-6,2	-12,7	-15,1
M61	-0,1	-4,5	-8,2	-6,2	-7,7	-15,6	-16	-19,9	-19,8
M62	-5,2	-9,6	-10,6	-6,3	-10,4	-14,7	-18	-14,2	-17,5
M63	-12,7	-9,4	-8,9	-13,7	-19,1	-19,9	-18	-17,3	-22,9
M64	-14,8	-7,3	-4,7	-9,7	-15,3	-11,5	-12,5	-18,2	-17,4
M65	-16,3	-10,7	-7,9	-14,1	-21,4	-19,4	-13,6	-18,1	-24,3
M71	-4,7	-8	-11,6	-9,9	-10,4	-21	-17,9	-23	-27,9
M72	-8,5	-11	-15,2	-9,9	-12,8	-14,7	-22,9	-21,2	-23,5
M73	-15,2	-13,2	-12,1	-15,6	-24,4	-21	-18,8	-19,7	-23,2
M74	-18,6	-12,4	-8,8	-14,1	-18,8	-15,9	-17,1	-23,9	-23,4
M75	-20,3	-14,3	-11,3	-16,6	-22,7	-23,7	-23,6	-23,8	-27,8

Tabelle P.1: Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse Fall 4 abs - 250Hz-1,6kHz

Frequenz	2000,0	2500,0	3150,0	4000,0	5000,0	6300,0	8000,0	10000,0	12500,0
M81	-7,2	-10,1	-14,5	-11,5	-13,5	-24,5	-22,2	-26,4	-31,3
M82	-10,4	-12,3	-16	-14,2	-17,7	-18,1	-25,1	-27,5	-28,1
M83	-15,5	-14,6	-13,9	-16,9	-24,3	-22,8	-20,5	-25,7	-26,1
M84	-20,4	-15	-11,6	-16,8	-21,9	-19	-22,8	-24,7	-26,2
M85	-24,5	-16	-12,9	-20,4	-22,6	-21,9	-31,8	-30,4	-29,1
M91	-9,3	-11,7	-16,1	-14,1	-14,6	-23,6	-23,8	-28,4	-30
M92	-11,7	-13,5	-18	-15	-17,6	-23,6	-28	-29,9	-27,3
M93	-16,2	-16,4	-16,7	-19,8	-23,7	-23,7	-24,8	-34,1	-29,1
M94	-23,4	-17,6	-14,4	-17,6	-25	-22,6	-26,2	-28,6	-27,3
M95	-26,9	-18,1	-15,5	-21,3	-25,5	-20,3	-26,4	-30,5	-29,2

Tabelle P.2: Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse Fall 4 abs - 250Hz-1,6kHz

Frequenz	2000,0	2500,0	3150,0	4000,0	5000,0	6300,0	8000,0	10000,0	12500,0
D11	-6,3	-2,7	-3,6	-12,9	-18,3	-18,4	-17,1	-14,5	-17,3
D12	-7,9	-9,1	-3,6	-13,6	-17,7	-17,7	-18,8	-18,2	-17,8
D13	-10,2	-8,5	-4,5	-16,4	-19,7	-20,9	-19,5	-17	-18,6
D14	-8,3	-5,9	-5,2	-9,6	-16,3	-14,4	-13,9	-11	-11,9
D15	-14,1	-6,1	-7,7	-14,1	-17,3	-19,4	-17,7	-16,9	-17
D16	-11,9	-5,8	-5,8	-16,5	-18,5	-17,8	-19,5	-15,1	-17,3
D17	-17,6	-16,7	-14,9	-15,3	-18,9	-17,9	-22,6	-19,9	-21,8
D18	-8,4	-7,9	-7,8	-13,2	-22,1	-16,9	-17,1	-18,3	-18
D19	-10,8	-10,2	-6,3	-15,2	-18,7	-15,3	-18,7	-17,5	-16
D21	-27,6	-28,4	-30,1	-32,5	-36,7	-36,4	-33,1	-29,6	-35,4
D22	-32,6	-30,5	-28	-34,5	-37,4	-36,2	-35,6	-33	-35,7
D23	-23	-23,2	-22,8	-31,7	-35,1	-33,8	-35,6	-30,9	-35,6
D24	-29,8	-31	-24,3	-26,4	-25,4	-31,6	-36,3	-26,4	-33,2
D25	-29,8	-30,5	-26,5	-30,9	-30,9	-36,1	-36,7	-34,8	-34,9
D26	-24,3	-20,6	-17,8	-26,9	-32,7	-32,8	-34,4	-30,4	-33,8
D27	-32,3	-27,5	-27,4	-32,4	-36,8	-35,9	-35,9	-29,8	-34,6
D28	-29,1	-27,2	-26,9	-30,2	-34,4	-31,6	-30,6	-25,4	-29,5
D29	-23,8	-25,3	-28,4	-30,7	-33,1	-34,2	-36,9	-29,5	-33,8
M11	-11	-8,7	-8,2	-19,1	-26,2	-23,3	-20,7	-23,6	-19,8
M12	-15,1	-5,1	-5,9	-17,9	-20,2	-20,4	-16,4	-17,7	-16,5
M13	-9,2	-10,7	-8,4	-11,6	-20	-19,6	-16,6	-14,8	-17,7
M14	-9,3	-8,7	-8,7	-18,5	-25	-24,4	-21	-18,4	-20,3
M15	-15,9	-13	-15,7	-17,9	-24,6	-24,3	-22,9	-21,6	-23,9
M21	-13,4	-7,7	-10,9	-20	-23,1	-20,8	-21,5	-18,6	-18,2
M22	-9,2	-4,5	-6,6	-15,2	-21,5	-17,4	-16,2	-18,4	-14,5
M23	-6	-11,5	-5,4	-11,7	-22,3	-21,1	-15,2	-12,6	-15,5
M24	-9,5	-9,2	-7,2	-17	-25,5	-23,8	-19,9	-19,7	-20,5
M25	-17,7	-10,8	-14,6	-17,3	-23,3	-25,7	-22,5	-22,8	-23,2
M31	-12,7	-6,3	-12,3	-18,2	-21,5	-19,5	-20	-14,6	-17,6
M32	-8,8	-5,3	-8,8	-12	-17,4	-15,3	-12,8	-12,8	-13,9
M33	-9,3	-7,7	-4,9	-13,5	-21,6	-20,2	-14,4	-10,5	-14,4
M34	-7,7	-8,1	-10,9	-14,4	-21,3	-22,7	-22,7	-17,8	-18,7
M35	-10,5	-12,6	-13,8	-17,8	-22,6	-24,5	-23,4	-18,9	-23
M41	-9,5	-8,7	-6,2	-13,1	-17,9	-19,2	-16,1	-15,2	-13,4
M42	-11,8	-6	-4,4	-10,9	-16,4	-14,6	-11,2	-10,4	-13,8
M43	-9,3	-4,3	-3,3	-9,9	-21,5	-18,2	-11,2	-10	-11,2
M44	-8,2	-4	-10,9	-10	-20,9	-21,7	-18,9	-13,8	-19,3
M45	-11,5	-8,9	-9,8	-11	-22,3	-23,3	-20,6	-21,4	-18,9
M51	-8,7	-9,3	-4,8	-11,1	-18,5	-12,8	-9,2	-9,5	-9,8
M52	-5,9	-6,4	-1,6	-11	-13,1	-12,1	-8,9	-10,5	-7,7
M53	-11,2	-9,2	-7,3	-13,7	-23,4	-19,3	-14,6	-18,2	-16,3
M54	-11,7	-8,2	-10,5	-11,1	-18,8	-20,9	-19,7	-19,1	-20
M55	-13,3	-8,4	-8,3	-13,5	-20,3	-22	-18,1	-21,7	-18
M61	-14	-15,6	-12,3	-20,3	-28,6	-23,6	-21,6	-23,5	-25,4
M62	-13,5	-15,1	-10,3	-19,8	-24,6	-24,3	-23,5	-24,9	-25,8
M63	-18,9	-17,6	-17,6	-25,1	-36	-32,9	-30,6	-32,2	-34
M64	-20,6	-18,7	-18,6	-22,8	-31,9	-33,7	-32,5	-34	-35,7
M65	-23,7	-20,4	-19,6	-25,2	-32,7	-34,3	-32,8	-36,2	-35,5
M71	-19,9	-20,1	-17,1	-25,3	-32,2	-29,3	-28	-28,3	-30,9
M72	-20,2	-17,9	-16,7	-24,3	-33,1	-31,8	-30,4	-27,7	-31,9
M73	-25,4	-21,4	-19,1	-29,7	-35,1	-36,3	-35,3	-35,3	-38,7
M74	-26,5	-25,2	-28,5	-32	-38,5	-38,8	-37,5	-34,9	-38,6
M75	-31,5	-23,3	-25	-28,6	-35,1	-37,5	-38	-37,9	-40,3

Tabelle P.3: Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse Fall 4 abs - 2kHz-12,5kHz

Frequenz	2000,0	2500,0	3150,0	4000,0	5000,0	6300,0	8000,0	10000,0	12500,0
M81	-22,8	-17,8	-19,9	-26,8	-35,8	-31,1	-30,2	-30,9	-35,8
M82	-19,2	-17,6	-21,4	-27,1	-34,8	-34,6	-33,2	-32,3	-35,8
M83	-25,7	-24,7	-21,9	-30,6	-38,4	-38,8	-37,4	-36,7	-40,3
M84	-26,3	-26,2	-28,7	-33,2	-39,5	-38,9	-38	-36,6	-39,5
M85	-27,6	-26,7	-29,6	-32,2	-32,4	-36,1	-38,6	-36,5	-40
M91	-23,8	-21,5	-22,9	-29,1	-36,7	-34,4	-32,7	-31,1	-35,9
M92	-23,6	-22,3	-20,1	-28,3	-33,5	-33,9	-33,8	-32,5	-35,7
M93	-26,1	-25,1	-26,7	-34,4	-37,9	-37,6	-35,8	-32,1	-36,2
M94	-30	-29,2	-28,9	-33,7	-38,6	-39,5	-38,1	-35,9	-39,1
M95	-29,3	-29,5	-29,6	-29,2	-34,8	-34,8	-33,2	-34,9	-35,5

Tabelle P.4: Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse Fall 4 abs - 2kHz-12,5kHz

Frequenz	16000,0	20000,0	25000,0	31500,0	40000,0
D11	-16,4	-17	-18,8	-19,4	-21,4
D12	-22,6	-23,9	-25,9	-23,7	-27,9
D13	-22,9	-24,3	-27,2	-23,9	-24,4
D14	-15,5	-15,2	-15,9	-17,1	-17,7
D15	-20,1	-22	-22,9	-21,4	-23,7
D16	-20,5	-20,6	-23,9	-22,8	-21,7
D17	-22	-23,3	-22,7	-23,3	-22,6
D18	-16,6	-17	-17,8	-19,7	-17,9
D19	-18,1	-19,2	-17,2	-17,7	-19,6
D21	-39,8	-40,4	-44	-44,8	?
D22	-37,4	-40,2	-42,3	-42,9	?
D23	-39,3	-38,3	-39,3	-42	?
D24	-32,7	-30,8	-33	-32,1	-35,8
D25	-37,6	-36,6	-37,6	-34,8	-28,4
D26	-37,5	-39	-39,6	-40,5	?
D27	-36,8	-38,8	-36,9	-34,8	-28,2
D28	-30,2	-34,1	-34,1	-39,5	?
D29	-33,7	-37,9	-36,4	-39,1	?
M11	-27,4	-26,3	-28,1	-28,9	-31
M12	-20,4	-21,7	-22,3	-21,3	-23,6
M13	-16,9	-17,3	-17,4	-20	-22,8
M14	-22,6	-22,8	-22,8	-26	-28,6
M15	-27,5	-26,9	-23,5	-27,5	-28,8
M21	-24,3	-22,5	-26	-27,8	-27,6
M22	-18,4	-19,1	-20	-19,6	-20,8
M23	-14,8	-17	-16,3	-18,8	-21,2
M24	-22,7	-22,3	-24,6	-25	-28,5
M25	-20,8	-25,7	-23,2	-27,4	-28,3
M31	-20,6	-21,4	-20,8	-25,7	-24,5
M32	-17,1	-16,5	-18,5	-18	-19,7
M33	-13,8	-15,1	-16,3	-16,9	-18,1
M34	-19,8	-20,1	-24,1	-24	-25,2
M35	-20,9	-23	-24,7	-24,8	-24,1
M41	-16,5	-15,9	-15	-16,8	-16,2
M42	-13,2	-13	-12,3	-14,5	-15,8
M43	-13,2	-14,8	-15,3	-15,8	-16,2
M44	-20,7	-19,9	-21,5	-21,9	-23,3
M45	-20,7	-18,7	-18,2	-21,9	-20,1
M51	-13	-11,9	-11,9	-13,1	-12
M52	-11,9	-11,4	-11,7	-11,3	-12,4
M53	-17,2	-20,1	-21,1	-21,9	-19,9
M54	-22,5	-22,2	-23,1	-22,4	-24,5
M55	-20,6	-22,4	-22,7	-20,2	-20
M61	-26,3	-27,3	-28,4	-29,4	-30,3
M62	-30,1	-31,3	-32,3	-33,7	-34,7
M63	-35,7	-39,4	-40,3	-42	?
M64	-37,3	-36,2	-40,8	-42,6	?
M65	-36,9	-38,8	-42,6	-43,3	?
M71	-33,2	-35,4	-36,4	-38,7	?
M72	-34,6	-33,9	-36,3	-38,1	?
M73	-42,2	-42,4	-44,8	?	?
M74	-42,3	-42,9	-44,9	?	?
M75	-44,8	-43,5	-46,3	?	?

Tabelle P.5: Auf Eingangsschallleistung normierte Messergebnisse Fall 4 abs - 16kHz-40kHz

Frequenz	2000,0	2500,0	3150,0	4000,0	5000,0	6300,0	8000,0	10000,0	12500,0
M81	-37,7	-39,6	-40,4	-43	?				
M82	-38,6	-38,3	-38,6	-41,8	?				
M83	-41,6	-43,8	-44,8	?	?				
M84	-44,6	-43,1	-46,2	?	?				
M85	-39,6	-40,9	-42,9	-41,1	?				
M91	-40,5	-39,4	-42,2	-44	?				
M92	-37	-36,3	-37,8	-38,4	?				
M93	-35,8	-39,1	-38,6	-42,3	?				
M94	-41,1	-39,6	-40,7	-43	?				
M95	-36,6	-33,1	-35,6	-39,9	?				

Tabelle P.6: Auf Eingangsschalleistung normierte Messergebnisse Fall 4 abs - 16kHz-40kHz