

Ulrich Schanda, Markus Schramm

Absorption tieffrequenten Trittschalls durch in Holzbalkendecken integrierte Helmholtzresonatoren

F 2790

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlußberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2011

ISBN 978-3-8167-8620-7

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/tauforschung

Abschlussbericht des Forschungsprojektes

Absorption tieffrequenten Trittschalls durch in Holzbalkendecken integrierte Helmholtzresonatoren

Förderstelle:



Bundesaamt
für Bauwesen und
Raumordnung

Bundesinstitut

für Bau-, Stadt- und Raumforschung

Forschungsinitiative "Zukunft Bau"

Z 6 – 10.08.18.7 – 08.19 / II 2 – F20-08-31 (086)

Forschungsstelle: Hochschule für angewandte Wissenschaften
Rosenheim
Labor für Schallmesstechnik LaSM

Projektleiter:

Prof. Dr. Ulrich Schanda

Projektmitarbeiter:

Dipl.-Ing.(FH) Markus Schramm

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.

Bearbeitungszeitraum: 01.03.2009 bis 31.01.2011

Rosenheim, März 2011

Kurzfassung

Holzbalkendecken sind bekannt für deren hohe Trittschallpegel im tieffrequenten Bereich, insbesondere unter 100 Hz. Auf den Frequenzbereich ab 50 Hz erweiterte Spektrum-Anpassungswerte ($C_{1,50-2500}$) erreichen mitunter Werte bis 20 dB und belegen die schlechte Trittschalldämmung bei tiefen Frequenzen.

Konstruktive Maßnahmen zur Verbesserung sind schwierig und meist mit einer deutlichen Erhöhung der flächenbezogenen Masse verbunden. Als alternative Maßnahme könnten auf den Frequenzbereich zwischen 50 Hz und 100 Hz abgestimmte Helmholtzresonatoren dienen, welche als konstruktive Komponente des Deckenaufbaus den tieffrequenten Trittschall absorbieren. Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurden derartige Resonatoren entwickelt und auf deren verbessernde Wirkung hinsichtlich Trittschalldämmung untersucht.

In einem ersten Arbeitsschritt wurden die Helmholtzresonatoren auf deren vibroakustische Eigenschaften vermessen. Die Helmholtzresonatoren waren ausgebildet als quaderförmige Kästen aus Gipskartonplatten mit einer i.d.R. schlitzförmigen Öffnung (Resonatorhals). Es zeigte sich, dass die aus der Literatur gängigen Dimensionierungsregeln anwendbar sind, jedoch aus material- und fertigungstechnischen Gründen als auch aus anwendungsspezifischen Randbedingungen wie Einbaulage, Einbaugröße, etc. für diesen Anwendungszweck modifiziert werden müssen. Im Einzelnen wurde der Einfluss der Dichtigkeit und der Lagerung des Resonatorkastens, der Bedämpfung des Resonatorhohlraums, der Bedämpfung sowie der Geometrie und der Positionierung des Resonatorhalses untersucht. Die schallabsorbierende Wirkung konnte durch unterschiedliche Versuche zur Messung der Absorptionseigenschaften sowohl im freien Schallfeld als auch in einer Druckkammer als Modell eines Deckenhohlraums nachgewiesen werden.

In einem zweiten Arbeitsschritt wurde die schallabsorbierende Wirkung der Helmholtzresonatoren auf eine Verbesserung der tieffrequenten Trittschalldämmung der gesamten Holzbalkendecke untersucht. Es zeigte sich, dass die Ankopplung des Helmholtzresonators an die Luft des Deckenhohlraums die deutlich besseren Ergebnisse zeigt. Hierzu wurden für viele Varianten von Helmholtzresonatoren hinsichtlich deren Einbaulage, Positionierung, Bedämpfung und Lage des Resonatorhalses, etc. Luft- und Trittschallmessungen gemäß der Normenreihe DIN EN ISO 140 durchgeführt als auch durch Geher erzeugter Trittschall gemessen. Sowohl in den Schalldämm-Maßen als auch in den Norm-Trittschallpegeln im tieffrequenten Bereich konnten deutlich Verbesserungen erzielt werden. Speziell im gewählten Frequenzbereich der Abstimmung der Resonatoren (50 – 100 Hz) zeigten sich Verbesserungen in den durch Geher erzeugten Trittschallpegeln von 5 bis 10 dB pro Terz.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	2
Inhaltsverzeichnis	3
Abbildungsverzeichnis	5
1 Motivation	7
2 Projektübersicht	9
2.1 Projektlaufzeit	9
2.2 Arbeitsgruppe und Mitarbeit der Industrie	9
2.3 Zeitplan.....	10
2.4 Wissenstransfer.....	10
Arbeitspaket I	13
3 Erstellen eines Status Quo	13
3.1 Prüfstandsbeschreibung.....	13
3.2 Einbau einer Norm-Holzbalkendecke in Anlehnung an DIN EN ISO140-11 in den Prüfstand	14
3.3 Einmessen des Prüfstandes und der Holzbalkendecke	15
3.3.1 Nachhallzeit und Absorptionsfläche	15
3.3.2 Tritt- und Luftschallmessungen	16
3.3.3 Messung mit Geher	18
3.3.4 Messung der Schallintensität.....	18
Arbeitspaket II	20
4 Dimensionierung und Prototypenbau	20
4.1 Wirkungsprinzip eines Helmholtzresonators	20
4.2 Mündungskorrektur.....	21
4.3 Äquivalente Schallabsorptionsfläche.....	23
4.4 Anwendungsspezifische Einschränkungen und Besonderheiten	28
4.5 Untersuchung zur Abstimmung von Helmholtzresonatoren mit schlitzförmiger Mündung.....	29
4.6 Verwendete Typen von Helmholtzresonatoren	33
4.6.1 Rohling	33
4.6.2 Einzelresonator.....	35
4.6.3 Zweifach frequenz-kaskadierter Resonator.....	36
4.6.4 Vierfach frequenz-kaskadierter Resonator	36
4.6.5 Einzelresonatoren mit Randmündung	38

4.7	Versuche über die schalltechnische Wirksamkeit - Messung des Absorptionsgrades.....	39
4.7.1	Messung im Impedanzrohr	39
4.7.2	Messung im Hallraum.....	44
4.8	FE Simulation	49
	Arbeitspaket III & IV	52
5	Darstellung der verschiedenen Deckenaufbauten	52
5.1	Deckenaufbau mit Einzelresonator.....	52
5.2	Deckenaufbau mit zweifach frequenz-kaskadierten Resonatoren	53
5.3	Deckenaufbau mit vierfach frequenz-kaskadierten Resonatoren.....	54
5.4	Deckenaufbau mit Resonatoren mit Randmündung.....	55
5.5	Deckenaufbau mit verschiedenen Resonatoren.....	57
5.6	Deckenaufbau mit freihängenden Resonatoren	60
5.7	Deckenaufbau mit dem Gefach als Helmholtzresonator	62
6	Darstellung der Messergebnisse	64
6.1	Übersichtsmatrix der Einzahlwerte	64
6.2	Darstellung der erfolgreichen Varianten	66
6.2.1	Deckenaufbau Nr. 5.5.1.....	66
6.2.2	Deckenaufbau Nr. 5.5.2.....	73
6.2.3	Deckenaufbau Nr. 5.6.1.....	75
6.2.4	Deckenaufbau Nr. 5.6.2.....	78
6.3	Abstrahlverhalten der Unterdecke	81
7	Resümee.....	82
	Literaturverzeichnis.....	84
	Anlage.....	88
	Anlage 1: Mitglieder der Arbeitsgruppe	89
	Anlage 2: Mitarbeiter	91
	Anlage 3: Messergebnisse.....	92
	Trittschallmessungen.....	92
	Luftschallmessungen	108
	Intensitätsmessungen – Scan.....	112
	Geher Messungen	115

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Norm-Trittschallpegel einer Holzdecke	7
Abbildung 2: Prinzip des in einer Holbalkendecke integrierten Helmholtzresonators.....	8
Abbildung 3: Zeitplan I	11
Abbildung 4: Zeitplan II	12
Abbildung 5: Prüfstand LaSM	13
Abbildung 6: Aufbau der Referenzdecke	14
Abbildung 7: Nachhallzeit des Empfangsraums	15
Abbildung 8: A_{eq} des Empfangsraums	15
Abbildung 9: Trittschallpegel Referenzdecke	17
Abbildung 10: Modifizierung des Empfangsraums zur Messung der Schallintensität ..	19
Abbildung 11: Schemazeichnung eines Helmholtzresonators.....	20
Abbildung 12: Mündungskorrektur für schlitzförmige Helmholtzresonatoren	22
Abbildung 13: Elektromechanisches Modell eines Helmholtzresonators	24
Abbildung 14: Zuwachs der äquivalenten Schallabsorptionsfläche und Halbwertsbreite der Absorptionsresonanz.....	26
Abbildung 15: Zuwachs der äquivalenten Schallabsorptionsfläche (normiert) als Funktion der Verstimmung und des Verhältnisses aus Strömungs- und Strahlungsflusswiderstand.....	27
Abbildung 16: Versuchsaufbau zur Messung der Übertragungsfunktion bei Körperschallanregung.	30
Abbildung 17: Übertragungsfunktion in Abhängigkeit der Schlitzlänge bei Körperschall-Anregung.....	30
Abbildung 18: Abstimmfrequenz gemessen vs. berechnet, einschließlich möglicher Korrektur.....	31
Abbildung 19: Links sind die gemessenen Halbwertsbreiten der Resonanzkurven bei Körperschall-Anregung dargestellt, rechts die Proportionalität $A \sim l$	32
Abbildung 20: Eigenform des Resonatorkastens – Links, Schlitzlänge 40,5 cm. Rechts, Schlitzlänge 94,5 cm.	33
Abbildung 21: Rohling für Helmholtzresonatoren	34
Abbildung 22: Rahmen für Mündungs-Bedämpfung.....	34
Abbildung 23: Einzelresonator.....	35
Abbildung 24: zweifach frequenz-kaskadierter Resonator	36
Abbildung 25: vierfach frequenz-kaskadierter Resonator	37
Abbildung 26: Einzelresonator mit Randmündung	38
Abbildung 27: Links Impedanzrohr MBBM; rechts Resonatorprüfling in das Rohr eingesetzt	39
Abbildung 28 Schallabsorptionsgrad für auf 50 Hz, 63 Hz und 80 Hz abgestimmte Resonatoren	40
Abbildung 29: links: Resonatoren verschlossen; rechts: Vergleich offen-verschlossen für 63 Hz	40
Abbildung 30: Glasvlies als Resonatorbedämpfung	42
Abbildung 31: Links, AKF-B1 Filz mit 5mm Abstand zur Mündung; rechts Glasvlies ohne Abstand	42

Abbildung 32: Frequenz-kaskadierter Resonator, abgestimmt auf 40 Hz, 50 Hz, 63 Hz und 80 Hz	43
Abbildung 33: Anordnung der Resonatoren in den Raumkanten (3,3,3,1) und in den Raumecken (4,4,2,2)	45
Abbildung 34: Verschiedene Anordnung der Resonatoren innerhalb der Prüffläche ...	45
Abbildung 35: Links, Absorptiongrad bei unterschiedlichem Bezug; rechts, Einfluss der Plattenmode und des Gipskartons	46
Abbildung 36: Schallabsorptionsgrad der unterschiedlichen Bedämpfungsvarianten ..	47
Abbildung 37: Äquivalente Schallabsorptionsfläche der Anordnungsvarianten.....	48
Abbildung 38: Schalldruckverteilung im Resonator für die Helmholtzresonanz als auch für die erste Eigenmode des Resonator-Luftvolumens	51
Abbildung 39: Aufbau mit Einzelresonatoren.....	52
Abbildung 40: Aufbau zweifach frequenz-kaskadierter Resonatoren	53
Abbildung 41: Aufbau zweifach frequenz-kaskadierter Resonatoren, zusätzlich verschraubt.....	54
Abbildung 42: Aufbau vierfach frequenz-kaskadierter Resonatoren im Gefach	55
Abbildung 43: Aufbau vierfach frequenz-kaskadierte Resonatoren, Anbindung Empfangsraum	55
Abbildung 44: Aufbau Einzelresonator mit Randmündung, gekoppelt	56
Abbildung 45: Aufbau Einzelresonatoren mit Randmündung, entkoppelt	57
Abbildung 46: Aufbau verschiedene Resonatoren, gekoppelt.....	58
Abbildung 47: Aufbau verschiedenen Resonatoren, entkoppelt.....	59
Abbildung 48: Aufbau verschiedene Resonatoren, gekoppelt mit Unterdecke.....	60
Abbildung 49: Aufbau freihängende Resonatoren mit Gefachdämmung	61
Abbildung 50: Aufbau freihängende Resonatoren ohne Gefachdämmung	62
Abbildung 51: Aufbau Gefach als Helmholtzresonator	63
Abbildung 52: Trittschall - Aufbau Nr. 5.5.1 Mündung unbedämpft	67
Abbildung 53: Trittschall - Aufbau Nr. 5.5.1 Mündung bedämpft	68
Abbildung 54: Luftschall - Aufbau Nr. 5.5.1 Mündung unbedämpft	69
Abbildung 55: Scan - Aufbau Nr. 5.5.1 Mündung unbedämpft	70
Abbildung 56: Geher - Aufbau Nr. 5.5.1 Mündung unbedämpft	71
Abbildung 57: Geher - Aufbau Nr. 5.5.1 Mündung bedämpft	72
Abbildung 58: Trittschall - Aufbau Nr. 5.5.2 Mündung unbedämpft	73
Abbildung 59: Luftschall - Aufbau Nr. 5.5.2 Mündung unbedämpft	74
Abbildung 60: Geher - Aufbau Nr. 5.5.2 Mündung unbedämpft	75
Abbildung 61: Freihängende Resonatoren mit Dämmung.....	76
Abbildung 62: freihängende Resonatoren mit Dämmung.....	77
Abbildung 63: freihängende Resonatoren mit Dämmung.....	78
Abbildung 64: freihängende Resonatoren mit und ohne Dämmung.....	79
Abbildung 65: freihängende Resonatoren mit und ohne Dämmung.....	80
Abbildung 66: freihängende Resonatoren mit und ohne Dämmung.....	81
Abbildung 67: Vergleich unterschiedlicher Aufbauten (Referenz versus Aufbau 5.5.1) 83	

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Mündungskorrekturen für verschiedene Öffnungsgeometrien nach Fasold	22
Tabelle 2: Übersichtsmatrix	64

1 Motivation

Holzdecken weisen im Vergleich mit Wohnungsdecken in Massivbauweise bei tiefen Frequenzen, insbesondere unter 100 Hz, ein Defizit in der Trittschalldämmung auf. Akustisch wahrgenommen spricht man oftmals vom sog. "Poltern". Beim Begehen von Geschossdecken erfolgt tatsächlich eine Anregung vornehmlich bei tiefen Frequenzen. Als Beurteilungswert für die Trittschallübertragung durch das Begehen dient die Summe aus bewertetem Norm-Trittschallpegel $L'_{n,w}$ und dem Spektrum-Anpassungswert C_i ; letzterer kann als Maß für den Unterschied der Trittschalldämmung bei Anregung durch das Normhammerwerk gemäß Messung nach DIN EN ISO 140 und bei Anregung durch einen Geher verwendet werden. Abbildung 1 zeigt die Messung des Norm-Trittschallpegels einer Holzdecke. Man erkennt deutlich das Defizit in der Trittschalldämmung unter 100 Hz. Der auf den tiefen Frequenzbereich erweiterte Spektrum-Anpassungswert $C_{1,50-2500}$ beträgt 8 dB.

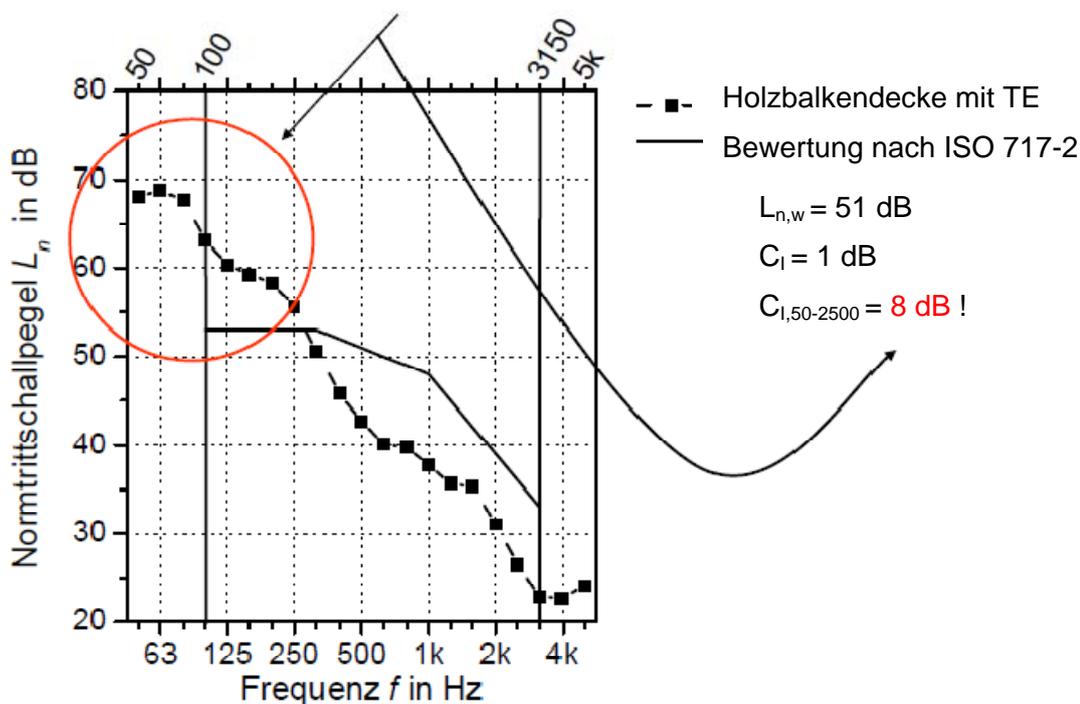


Abbildung 1: Norm-Trittschallpegel einer Holzdecke

Eine denkbare Maßnahme zur Verbesserung dieses Verhaltens bei Holzbalkendecken wäre der Einbau tieffrequent wirkender Absorber als konstruktiver Teil der Holzbalkendecke. Eine Rohdeckenbeschwerung würde im tieffrequenten Bereich die Trittschalldämmung einer Holzbalkendecke auch verbessern. Allerdings ist aus statischen Gründen oft eine Erhöhung der flächenbezogenen Masse des Deckenaufbaus als bauliche Maßnahme nicht möglich.

Abbildung 2 zeigt eine typische Holzbalkendecke, wie sie im Fertighausbau üblicherweise verwendet wird. Die Helmholtzresonatoren wären dabei im meist halbleeren Gefachbereich untergebracht. Innerhalb dieses Vorhabens sollte die Auswirkung eines integrierten Helmholtzabsorbers auf die Trittschalldämmung geprüft werden. Eine Senkung des Norm-Trittschallpegels und besonders der Spektrum-Anpassungswerte werden angestrebt. Im Rahmen dieses Projektes sollen physikalisch relevante Planungsgrößen und konstruktive Planungsgrundlagen für den Einbau von Helmholtz ermittelt werden.

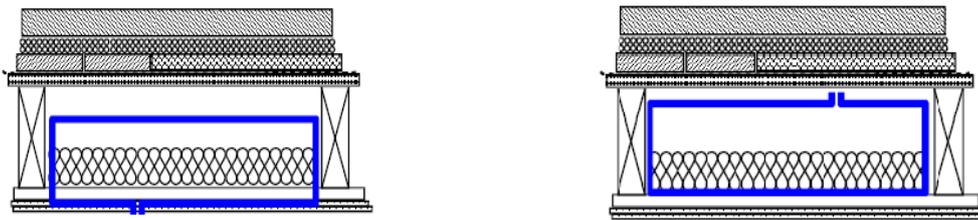


Abbildung 2: Prinzip des in einer Holzbalkendecke integrierten Helmholtzresonators

2 Projektübersicht

2.1 Projektlaufzeit

Die Projektlaufzeit war ursprünglich geplant für den 1.3.2009 bis zum 31.5.2010. Auf Grund des zu Arbeitsbeginns nur teilzeitbeschäftigten Projektingenieurs Dipl.-Ing (FH) Markus Schramm wurde die Projektlaufzeit gestreckt bis zum 31.8.2010. Für die Durchführung weiterer Messungen zu abschließenden Fragestellungen zur Absicherung der Forschungsergebnisse wurde die Projektlaufzeit kostenneutral noch einmal bis zum 31.1.2011 verlängert.

2.2 Arbeitsgruppe und Mitarbeit der Industrie

In Anlage 1 sind die Mitglieder der Arbeitsgruppe aufgelistet.

Überschattet war die Projektdurchführung durch die im November 2009 veröffentlichte Insolvenz der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung als eigentlicher Antragsteller des Forschungsprojektes. Die zeitweilige Unsicherheit in der Weiterfinanzierung veranlasste die Hochschule Rosenheim als die Forschungsstelle des Projektes, die Beteiligung der Arbeitsgruppe auf mündliche Absprachen und Statusreporte des Projektleiters mit den Arbeitsgruppenmitgliedern zu reduzieren.

Eine erste Arbeitsgruppensitzung zur Abklärung der wissenschaftlichen Vorgehensweise und der zu bearbeitenden Inhalte fand innerhalb der ersten vier Monate des F&E-Projektes im Juni 2009 statt.

Folgende Anregungen bzw. Ergänzungen wurden angesprochen:

- Ausbildung der Resonatorwandungen (weich/starr)
- Tests verschiedener geometrischer Resonatorformen
- Variation der Resonatorhalsposition
- Ankopplung der Resonatoren an den Empfangsraum vermeiden, stattdessen
- Ankopplung der Resonatoren an den Gefachbereich
- Befestigung der Resonatoren in der Holzbalkendecke, nicht an der Unterdecke. Die Resonatoren müssen am tragenden Deckenelement befestigt werden (keine Abhängung der Resonatoren über die Unterdecken-Konstruktion).
- Vergleichsmessung der Resonatoren zum ausgedämmten Gefachbereich
- Auswirkung auf die Trittschalldämmung durch Massenzuwachs der Deckenkonstruktion durch eingebaute Helmholtzresonatoren prüfen
- FEM/BEM-Berechnung: Modellierung der Resonatoren zum Abgleich mit den experimentellen Daten

Eine weitere Abklärung der zwischenzeitlichen Ergebnisse erfolgte partiell mit den Mitgliedern der Arbeitsgruppe anlässlich der Jahrestagung der deutschen akustischen Gesellschaft DAGA2010 im März 2010. Zwei weitere Treffen der Arbeitsgruppenmitglieder Dr. Wolfgang Rümmler und Dipl.-Phys. Jochen Seidel (beide KNAUF AG) fanden im Juli 2010 und im September 2010 an der Hochschule Rosenheim statt.

2.3 Zeitplan

In Abbildung 3 und 4 ist der Zeitplan des Projektes mit allen wichtigen Arbeitsschritten aufgeführt.

2.4 Wissenstransfer

Der Wissens- und Technologietransfer fand bzw. findet noch im Rahmen von wissenschaftlichen Vorträgen und Veröffentlichungen statt. Hierzu dienen die Jahrestagungen der deutschen akustischen Gesellschaft DEGA. Sowohl bei der Jahrestagung 2010 als auch 2011 werden die Ergebnisse im Rahmen eines Tagungsvortrages sowie als Kurzveröffentlichung im Tagungsband dargestellt.

Zeitplan			2009																																																			
Nr.	Vorgang	Dauer	März		April				Mai				Juni				Juli				Aug				Sep				Okt				Nov				Dez																	
		KW / Woche	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53								
1	Erstellung eines Status Quo	14																																																				
1.1	Einbau einer Norm-Holzbalkendecke nach DIN EN ISO 140-11	3																																																				
1.2	Einmessung Prüfstand	8																																																				
1.3	Einmessen Empfangsraum/Senderaum	3																																																				
	Nachhallzeitkartierung	1																																																				
	Luftschall	1																																																				
	Trittschall	1																																																				
	Intensitätsmessung	1																																																				
2	Dimensionierung und Prototypenbau	20																																																				
2.1	Dimensionierung und Konstruktion	8																																																				
2.2	Prototypenbau - Prüfung der schalltechnischen Wirksamkeit	13																																																				
2.3	Messungen im Hallraum und im Kundtschen Rohr	1																																																				
2.4	FEM- Simulation	7																																																				
3	Versuche zum Wirkungsprinzip in der Referenzdecke	13																																																				
3.1	Bau von systemtauglichen Helmholtz-Resonatoren (HR)	2																																																				
3.2	Messung der Trittschalldämmung	7																																																				
3.3	Variation diverser Konstruktionsparameter	6																																																				
4	Variation der Einbausituation der HR	28																																																				
4.1	Modifikation und Variation der optimierten HR	3																																																				
4.2	Messung zur Besserung der Trittschalldämmung	16																																																				
4.3	Gefachvariationen	8																																																				
4.4	Ausbildung des Gefachraumes als einzelne HR	8																																																				
5	Dokumentation	11																																																				
5.1	vorläufiger Endbericht																																																					
5.2	Abfassung des Abschlussberichtes	7																																																				
5.3	Technologietransfer	4																																																				

Abbildung 3: Zeitplan I

Arbeitspaket I

3 Erstellen eines Status Quo

3.1 Prüfstandsbeschreibung

Da die Untersuchungen vorwiegend experimentell durchgeführt wurden, mussten die nachfolgend durchgeführten Messungen in einer definierten Messumgebung eines bauakustischen Prüfstandes stattfinden.

Der Prüfstand des Labors für Schallmesstechnik an der Hochschule Rosenheim ist in der folgenden Abbildung 5 dargestellt. Die eingebaute Holzbalkendecke zwischen Send- und Empfangsraum ist die untersuchte Bezugsdecke, die im folgenden Kapitel noch genauer erläutert wird. Im Senderraum rechts oben wurde die prinzipielle Wirkung der Helmholtzresonatoren untersucht.

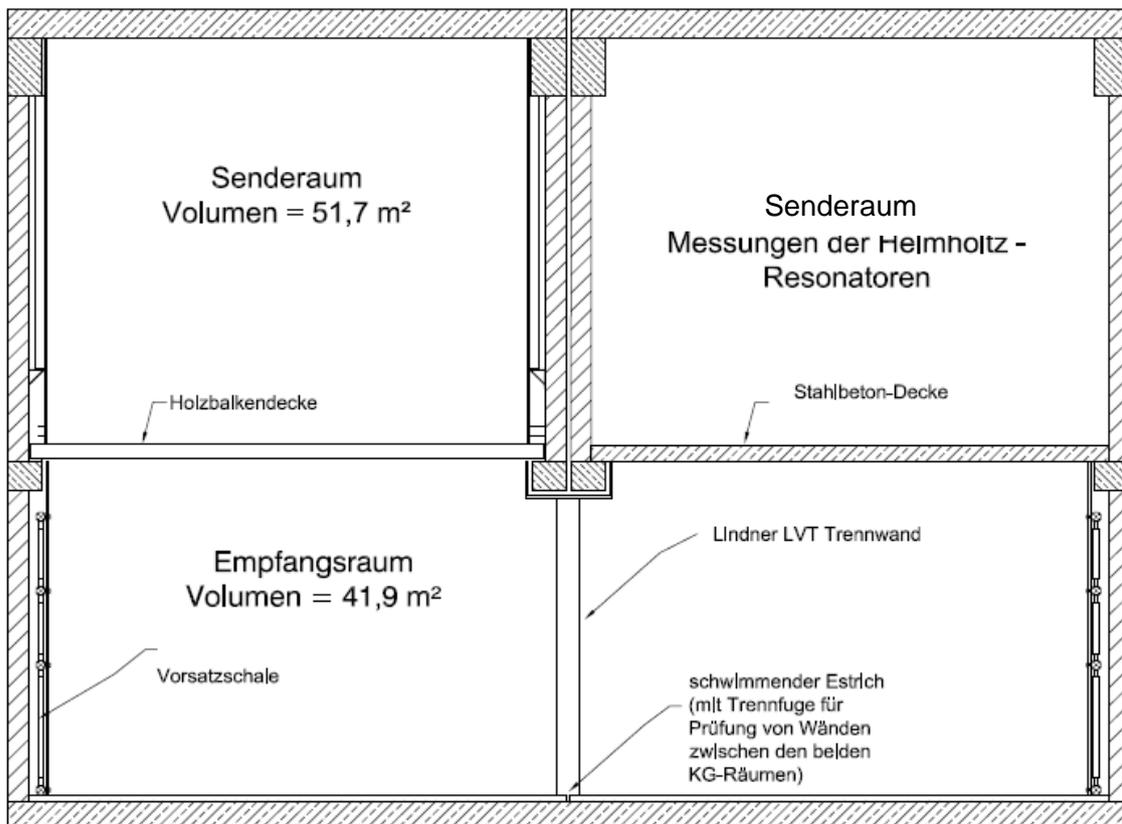


Abbildung 5: Prüfstand LaSM

Bei den Messungen der Luft- und Trittschallpegel, des A-bewerteten Maximalpegels sowie der Nachhallzeit befand sich im Empfangsraum links unten ein Zwischenpodest aus Metallrosten in einer Höhe von ca. 80 cm über dem Rohboden, welches nicht in obiger

Abbildung abgebildet ist. Beim Hinterfüllen des Podestes entsteht eine schallabsorbierende Wand gegenüber der Decke, welche bei der Messung der von der Decke abgestrahlten Schallintensität vorteilhaft ist.

3.2 Einbau einer Norm-Holzbalkendecke in Anlehnung an DIN EN ISO140-11 in den Prüfstand

Der Referenzaufbau ist in nachstehender Abbildung dargestellt. Der Aufbau der Decke wurde dem Holzbauhandbuch entnommen¹ und war mit den Industriepartnern abgestimmt. Der Aufbau ist wie folgt von oben (Senderraum) nach unten (Empfangsraum):

- 1a und 1b: Fertigteilestrich Brio 18 WF von Knauf (18 mm Gipsfaserelement, 10 mm Holzweichfaserplatte)
- 2: 60 mm Knauf Trockenschüttung PA (Flächengewicht 5 kg/m² je cm Höhe)
- 3: 22 mm Verlegespanplatte zur Aussteifung
- 4: Holzbalken 120/180 mm mit einem Balkenabstand von 590 mm
- 5: 100 mm Polyesterfaservlies CARUSO-ISO-BOND® (Flächengew. 4,3 kg/m²) im Gefach
- 6 und 7: Unterdecke mit Knauf Direktschwingabhängern, an denen das CD-Profil 55 mm abgehängt ist
- 8: 12,5 mm Knauf Gipskartonplatten HRAK

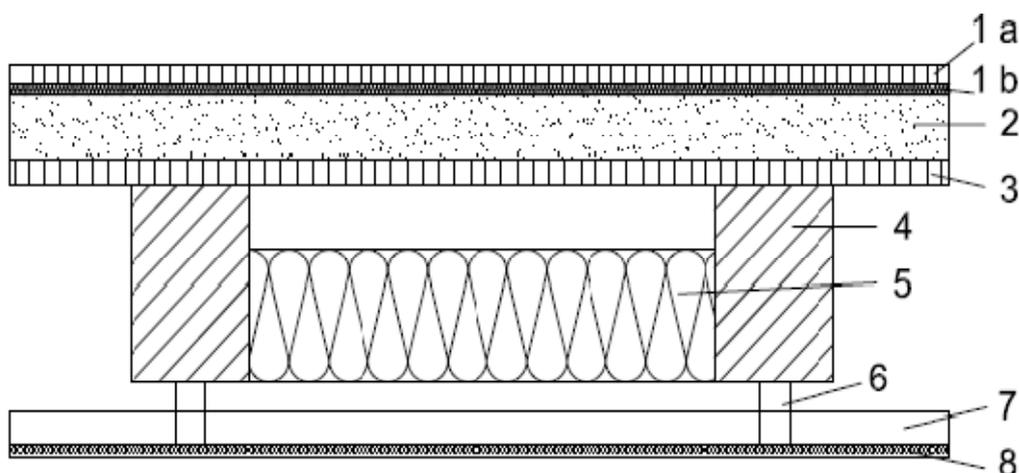


Abbildung 6: Aufbau der Referenzdecke

Die Plattenstöße der Gipskartonplatten wurden mit Silikon oder Acryl ausgespritzt. Die Fuge zwischen Unterdecke und den Seitenwänden des Senderraums wurden mit Fensterkitt vom Typ Perenator abgedichtet. Abweichend von der Norm, wurden die Holzbalken der Decke auf Elastomere der Firma Getzner (Sylomer® T) aufgelagert, um die Körper-

¹vgl.: (Holtz, Hessinger, Rabold, & Buschbacher, Mai 1999)

schallweiterleitung in die Flanken zu minimieren. Anschließend wurde der Hohlraum zwischen der Vorsatzschale des Empfangsraums und der aussteifenden Verlegespanplatte über den Deckenbalken mittels eines hinterdämmten Gipskartonfries abgeschottet.

3.3 Einmessen des Prüfstandes und der Holzbalkendecke

3.3.1 Nachhallzeit und Absorptionsfläche

In der Diplomarbeit von Frau Otto² wurde die Nachhallzeit im Empfangsraum genau untersucht. So wurde die Nachhallzeit z. B. in drei verschiedenen Raumebenen kartiert, um einen Aufschluss über etwaige Raumeigenmoden zu erlangen. Abbildung 7 zeigt die mittlere Nachhallzeitkurve mit Fehlerbalken, welche die Wiederholgenauigkeit einer Nachhallzeitmessung im Empfangsraum angeben. Nebenstehende Abbildung zeigt die vorhandene Schallabsorptionsfläche in diesem Raum.

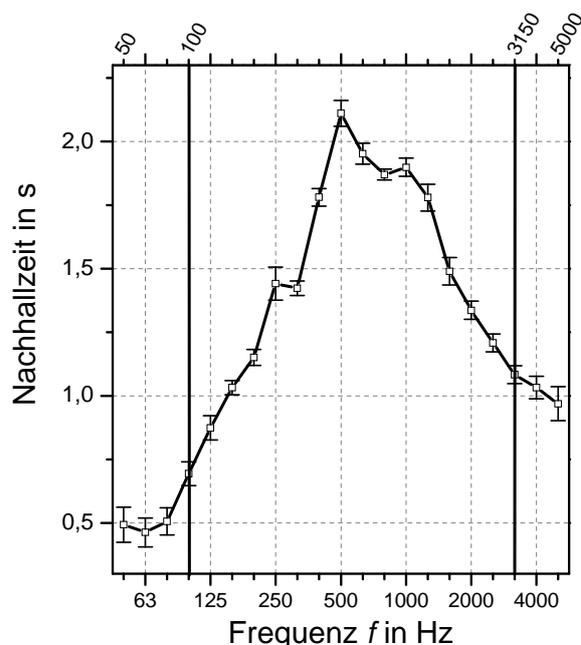


Abbildung 7: Nachhallzeit des Empfangsraums

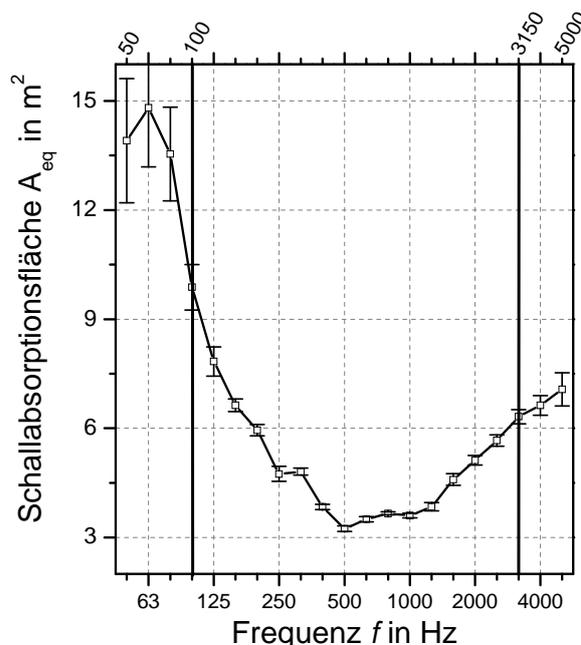


Abbildung 8: A_{eq} des Empfangsraums

Zu beachten ist, dass gerade im Frequenzbereich unter 100 Hz das Maximum der Schallabsorptionsfläche liegt. Die niedrigen Nachhallzeiten sind auf die starke Absorption durch die Vorsatzschalen zurückzuführen. Damit entspricht der Empfangsraum nicht den Anforderungen der DIN EN ISO 140. Vorteilhaft dabei war jedoch, dass sich die Trittschallpegel bei tiefen Frequenzen bei genügend vielen Messpositionen mit hoher Reproduzierbarkeit messen ließen. Geht man überschlägig davon aus, dass 10 auf 63 Hz abgestimmte Resonatoren in den Empfangsraum eingebracht werden - welche nach Hallraummessungen eine Absorptionsfläche von ca. $0,36 \text{ m}^2/\text{Resonator}$ haben (vgl. Kapitel 4.7.2) – erhält man mit ca. $3,6 \text{ m}^2$ nur 20% Zuwachs an Absorptionsfläche im Raum. Dies lässt darauf

² vgl.: (Otto, Diplomarbeit Oktober 2009)

schließen, dass die Wirkung der Resonatoren nicht eindeutig über die Nachhallzeitmessungen zu zeigen ist.

3.3.2 Tritt- und Luftschallmessungen

Trittschallmessung

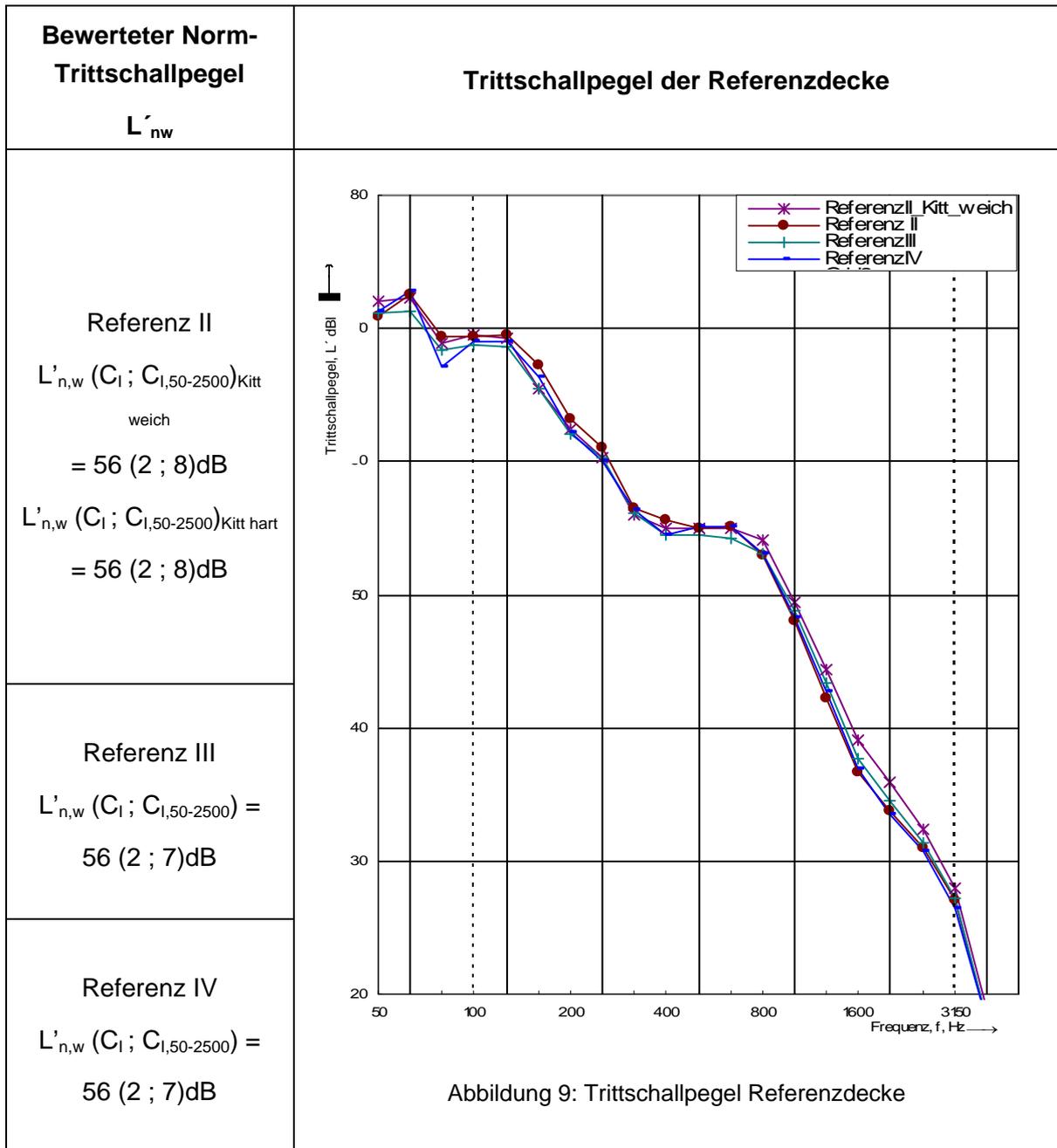
Die Trittschallpegel wurden für alle Messungen in 12tel Oktavbandbreite durchgeführt. Diese wurden anschließend, um die Bewertung nach DIN EN ISO 717-2³ durchzuführen, in Terzbänder umgerechnet.

Um eine hohe Wiederholgenauigkeit der Messungen zu bekommen, wurden zu Beginn 8 Hammerwerkspositionen ausgewählt. Je Hammerwerksposition wurden 12 Messpunkte, die nach DIN EN ISO 140-6 im Raum verteilt wurden, festgelegt. Aus diesen Hammerwerkspositionen und Messpunkten wurden dann vier Anregepositionen und je sechs Messpositionen ausgewählt⁴.

Da die Montage der Unterdecke oftmals einen sehr starken Einfluss auf die Trittschallmesswerte hat, wurden zur Prüfung der Wiederholgenauigkeit vier Wiederholungsmessungen gemacht, wobei zwischen jeder Messung die gesamte Unterdecke ausgetauscht wurde. Die Messungen unterscheiden sich im Frequenzgang kaum und ihre Einzahlwerte sind identisch. Außerdem wurde dabei der Einfluss hart gewordenen Fensterkitts, der zur Fugenabdichtung benutzt wurde, untersucht. Dieser Einfluss ist zu vernachlässigen (vgl. Abbildung 9).

³ vgl.: (DIN EN ISO 717 - 2, 1996 - 06)

⁴ vgl.: (Otto, Diplomarbeit Oktober 2009)



Luftschallmessung

Um die Auswirkung der integrierten Resonatoren auf die Luftschalldämmung herauszuarbeiten, wurde auch das Bauschalldämm-Maß der Referenzdecke gemessen. Es wurde auch hier in 12tel Oktavbandbreite gemessen.

Das Bauschalldämm-Maß nach DIN EN ISO 140-3 für den Referenzaufbau ergab sich wie folgt:

Bauschalldämm-Maß der Referenzdecke

$$R'_w (C; C_{tr}) = 60 (-6 ; -13) \text{ dB}$$

3.3.3 Messung mit Geher

Für die verschiedenen Versuchsaufbauten wurden auch Messungen mit einem realen Geher vollzogen. Dabei unterschied man in der Anregung zwischen Schuhen und Socken. Der Geher lief im Zuge dessen im Senderraum eine weitgezogene „Acht“. Die Anzahl der Schritte betrug ca. 100/min. Im Empfangsraum wurden die Pegel mit vier stationären Mikrofonpositionen aufgezeichnet.

Bei den letzteren Aufbauten gab dann ein Metronom dem Geher die genaue Taktzahl vor. Hierbei stellte man fest, dass in den anfänglichen Messungen zu schnell gelaufen wurde. Demnach sind zu den späteren Messungen Unterschiede in den Pegeln erkennbar. Die Vergleichbarkeit innerhalb einer Variante (A-B-Vergleich) war aber stets gegeben, da sich dort die Gehweise nicht unterschied. Dabei bedeutet der Terminus A-B-Vergleich die Messung jeder Variante mit geöffneten (aktiven) und geschlossenen (inaktiven) Helmholtzresonatoren.

Folgende Pegel wurden in den einzelnen Messungen bestimmt:

L_{AFmax} = A-bewerteter Maximalpegel während der Messdauer von 10 s.

$L_{f,eq,walk}$ = zeitlich gemittelter Schalldruckpegel über die Messdauer von 10 s.

Innerhalb dieser Arbeit wird die Darstellung der Geher-Messergebnisse auf den $L_{f,eq,walk}$ beschränkt, da dieser die Wirkung der Resonatoren der A-B-Vergleiche ausreichend gut beschreibt. Um den Effekt der Helmholtzresonatoren auch bei den Gehermessungen als Einzahlwert ausdrücken zu können, wurde je nach Anregungsart ein Pegel aus den vier Terzen von 50 bis 100 Hz durch energetische Mittellung definiert. So entstanden die Pegel $L_{f,eq,walk,Schuhe,50-100}$ und $L_{f,eq,walk,Socken,50-100}$. Diese Größen sollen die Wirkung der Helmholtzresonatoren für die spezifische Anregung der Holzbalkendecke durch einen Geher im o. g. Frequenzbereich leichter dokumentieren.

3.3.4 Messung der Schallintensität

Um die Schwierigkeit der Messung der Schalldämmung der Decke bei tiefen Frequenzen nach DIN EN ISO 140 zu umgehen, wurde die Schalldämmung der Decke ebenso mittels Intensitätsmesstechnik ermittelt. Zur näheren Beschreibung und Anwendung dieses Messverfahrens sei auf DIN EN ISO 15186-1⁵ und Bretschneider⁶ verwiesen.

Um die direkt abgestrahlte Schallintensität der Decke unbeeinflusst von den Reflexionen der Raumwände und des Bodens zu messen, wurde im Empfangsraum der Boden mit Schallabsorbieren ausgelegt. Die beiden folgenden Abbildungen zeigen den Aufbau im Empfangsraum zur Messung der Schallintensität.

⁵ vgl.: (DIN EN ISO 15186-1,., Dezember 2003)

⁶ vgl.: (Bretschneider, 2001)



Abbildung 10: Modifizierung des Empfangsraums zur Messung der Schallintensität

Zur Messung der Schallintensität wurde die Referenzdecke in sechs Teilfelder unterteilt. Jedes der Felder wurde jeweils längs und quer gescannt. Pro Teilfläche erfolgte die Anregung auf den vier Hammerwerkspositionen, die auch bei der Trittschallmessung verwendet wurden.⁷

⁷ vgl.: (Otto, Diplomarbeit Oktober 2009)

Arbeitspaket II

4 Dimensionierung und Prototypenbau

4.1 Wirkungsprinzip eines Helmholtzresonators

In der Bauakustik versteht man unter Resonanzabsorbern im Allgemeinen resonant wirkende Masse-Feder-Systeme. Bei einem Helmholtzresonator besteht die schwingende Masse aus der Luft in einer Querschnittverengung mit Querschnittsfläche S (z.B. Schlitz oder Bohrung in einer Abdeckplatte) zuzüglich einer mitschwingenden Luftmasse vor und hinter der Öffnung, beschrieben durch die sogenannte Mündungskorrektur Δt . Die Feder wird durch ein angekoppeltes abgeschlossenes Luftvolumen V gebildet⁸ (vgl. Abbildung 11).

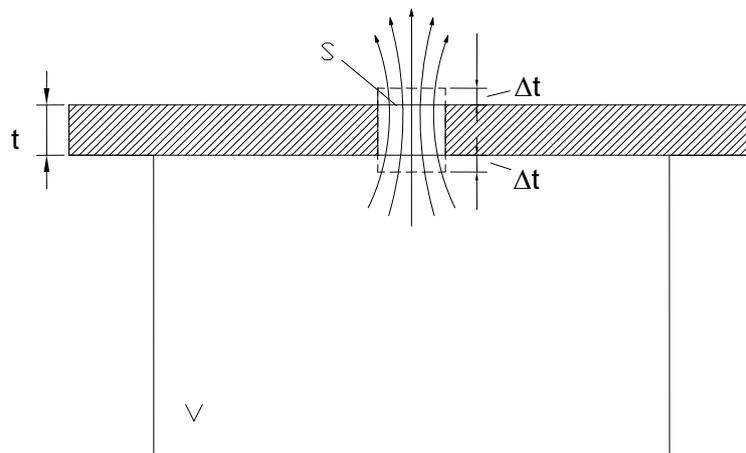


Abbildung 11: Schemazeichnung eines Helmholtzresonators

Die Resonanzfrequenz eines Masse-Feder-Systems ist aus der Mechanik allgemein bekannt.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{D}{m}} \quad (4.1)$$

Die schwingende Masse m des Systems setzt sich zusammen aus der Masse der Luft im Resonatorhals m_h und der mitschwingenden Luftmasse vor und hinter der Mündung m_m .

$$m = m_h + m_m = \rho_0 \cdot S \cdot (t_0 + 2\Delta t) \quad (4.2)$$

⁸ vgl.: (Heckel & Müller, 1975)

Die Federsteife ergibt sich aus einer Betrachtung des Luftvolumens des Resonators als kompressibles Medium zu:

$$D = -S^2 \cdot \frac{dp}{dV} \quad (4.3)$$

Unter der Annahme einer adiabatischen Zustandsänderung bei der Kompression bzw. Dilatation des Hohlraumvolumens sowie unter Verwendung der Schallausbreitungsgeschwindigkeit für Longitudinalwellen aus

$$c_0^2 = \frac{\kappa \cdot p_0}{\rho_0} \quad (4.4)$$

gelangt man durch Einsetzen der Gleichungen (4.2), (4.3) und (4.4) in Gleichung (4.1) zur Resonanzfrequenz des Helmholtzresonators:

$$f_0 = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V \cdot (t_0 + 2\Delta t)}} \quad (4.5)$$

$\rho_0 = 1,20 \text{ kg/m}^3$ Dichte der Luft bei 20°C , $c_0 = 343 \text{ m/s}$ die Schallgeschwindigkeit in Luft bei 20°C und $\kappa = 1,4$ Adiabatenexponent für Luft.

Hier wird eine Besonderheit der Helmholtzresonatoren sichtbar. Bei einem einfachen Einmassenschwinger sinkt die Resonanzfrequenz mit zunehmender Masse. Nicht so beim Helmholtzresonator, denn mit größerer Öffnung – folglich mehr schwingungsfähige Luftmasse – wird die Resonanzfrequenz höher. Dies liegt daran, dass die Federsteifigkeit des Luftvolumens im Hohlraum mit zunehmender Öffnungsfläche quadratisch zunimmt, die Masse der schwingenden Luft im Resonatorhals jedoch nur linear.

Weitere Betrachtungen zur Wirkungsweise von Helmholtzresonatoren finden sich in der vorangegangenen Projektarbeit⁹

4.2 Mündungskorrektur

Die meisten Untersuchungen am Helmholtzresonator wurden mit schlitzförmigen Öffnungen durchgeführt, da andere Öffnungsgeometrien relativ große Öffnungsflächen notwendig machen, um einen Resonator auf z.B. 63 Hz abzustimmen (bei Kreisen sind Durchmesser von mehr als 10 cm notwendig). Dies hätte eine etwaige notwendige Anbindung des Helmholtzresonators an den Empfangsraum aus optischen Gründen für die Praxis ausgeschlossen (s. Abbildung 2 links). Tabelle 1 enthält eine Auflistung von Berechnungsformeln für Mündungskorrekturen von verschiedenen Autoren. In Abbildung 12 ist die Mündungskorrektur der beiden Formeln für schlitzförmige Resonatoröffnungen aus Tabelle 1 grafisch aufgetragen. Typisch ist mit einer Mündungskorrektur von ca. 2 cm zu rechnen, bezogen auf die Schlitzbreite b mit etwa dem 4-fachen.

⁹vgl.: (Schramm, Projektarbeit, 2010)

Öffnungsgeometrie	Mündungskorrektur
Schlitz der Breite b gem. Fasold	$\frac{2\Delta t}{b} = \frac{2 \left(\ln \left(\frac{4 \cdot \lambda}{\pi \cdot b} \right) - 0,58 \right)}{\pi \left[1 + \frac{\pi^2}{4} \left(\frac{b}{\lambda} \right)^2 \right]}$
Schlitz der Breite b gem. Mechel ¹⁰	$\frac{2\Delta t}{b} = \frac{2}{\pi} \cdot \ln \left(\frac{c_0}{f \cdot b} - 0,107 \right)$
Quadrat der Kantenlänge a	$2\Delta t = \frac{\sqrt{\pi}}{2} a \cong 0,9 \cdot a$
Kreis mit Radius r	$2\Delta t = \frac{\pi}{2} r \cong 1,6 \cdot r$
Unregelmäßig geformte Öffnung der Fläche S, jedoch nicht langgestreckt	$2\Delta t \cong 0,9 \cdot \sqrt{S}$

Tabelle 1: Mündungskorrekturen für verschiedene Öffnungsgeometrien nach Fasold¹¹

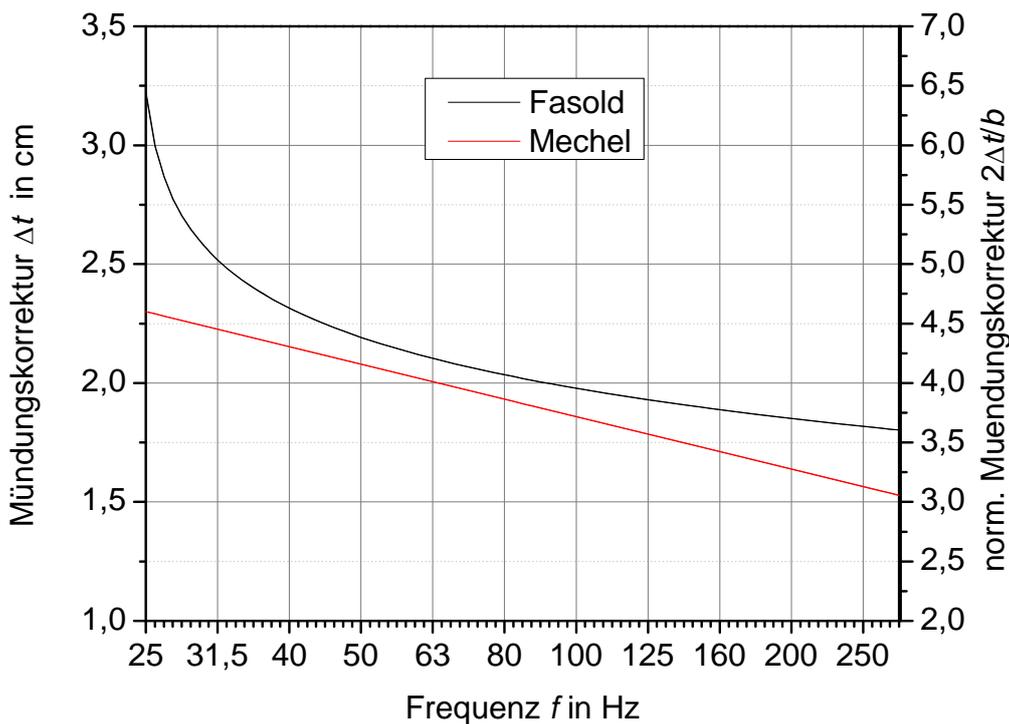


Abbildung 12: Mündungskorrektur für schlitzförmige Helmholtzresonatoren

¹⁰ vgl.: (Mechel, Schallabsorber, Band 2 - Innere Schallfelder, Strukturen, 1995)

¹¹ vgl.: (Fasold & Winkler, 1975)

4.3 Äquivalente Schallabsorptionsfläche

Die Wirksamkeit des Helmholtzresonators kann direkt beurteilt werden durch den von ihm verursachten Zuwachs an Schallabsorptionsfläche. Hierzu ist es hilfreich, das Modell eines Einzelabsorbers in einer unendlich schallharten Wand zu betrachten. Als elektromechanisches Analogon lässt sich der Einzelabsorber in der Kraft-Spannungs-Analogie wie in Abbildung 13 darstellen. Wie es für die Schallausbreitung in Röhren üblich ist, verwendet man anstelle der Schallschnelle v den Schallfluss q als Produkt aus Schallschnelle und Querschnittsfläche S mit der Annahme, dass die Schallschnelle über der Querschnittsfläche konstant ist. Verwendet man nun in Anlehnung an die Herleitung nach Cremer und Müller¹² die Vorstellung, dass der gesamte Schallfluss durch eine Schallquelle direkt an der äußeren Wandung vor der Öffnung des Helmholtzresonators erzeugt wird (z.B. in Form einer masselosen Membran), so hat diese *in Richtung des Helmholtzresonators* eine Flussimpedanz zu überwinden, die sich zusammensetzt aus:

- a) der akustischen Masse M_a der Luft des Resonatorhalses und der innenseitigen Mündungskorrektur (Blindwiderstand)

$$M_a = m / S^2 = m' / S = \rho \cdot S \cdot (t + \Delta t) / S^2 = \rho \cdot (t + \Delta t) / S \quad \text{in Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^3 \quad (4.6)$$

- b) dem Strömungsflusswiderstand R_{Verlust} in $\text{Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^3$, der den Verlust durch Bedämpfung (Reibung) im Resonatorhals (Wirkwiderstand) beschreibt

- c) aus der akustischen Nachgiebigkeit N_a der Luft im Resonatorhohlraum (Blindwiderstand)

$$N_a = D / S^2 = \kappa \cdot p_0 = \rho \cdot c_0^2 / V \quad \text{in Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^3 \quad (4.7)$$

sowie *nach außen* eine Flussimpedanz zu überwinden, die sich zusammensetzt aus:

- a) der akustischen Masse M_a der außenseitigen Mündungskorrektur (Blindwiderstand)

$$M_a = \rho \cdot S \cdot (\Delta t) / S^2 = \rho \cdot \Delta t / S \quad \text{in Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^3 \quad (4.8)$$

dem Strahlungsflusswiderstand $R_{\text{Strahlung}}$ in $\text{Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^3$, den das Schallausbreitungsmedium des Raumes der Schallabstrahlung der Schallquelle entgegenbringt.

¹² vgl.: (Heckel & Müller, 1975)

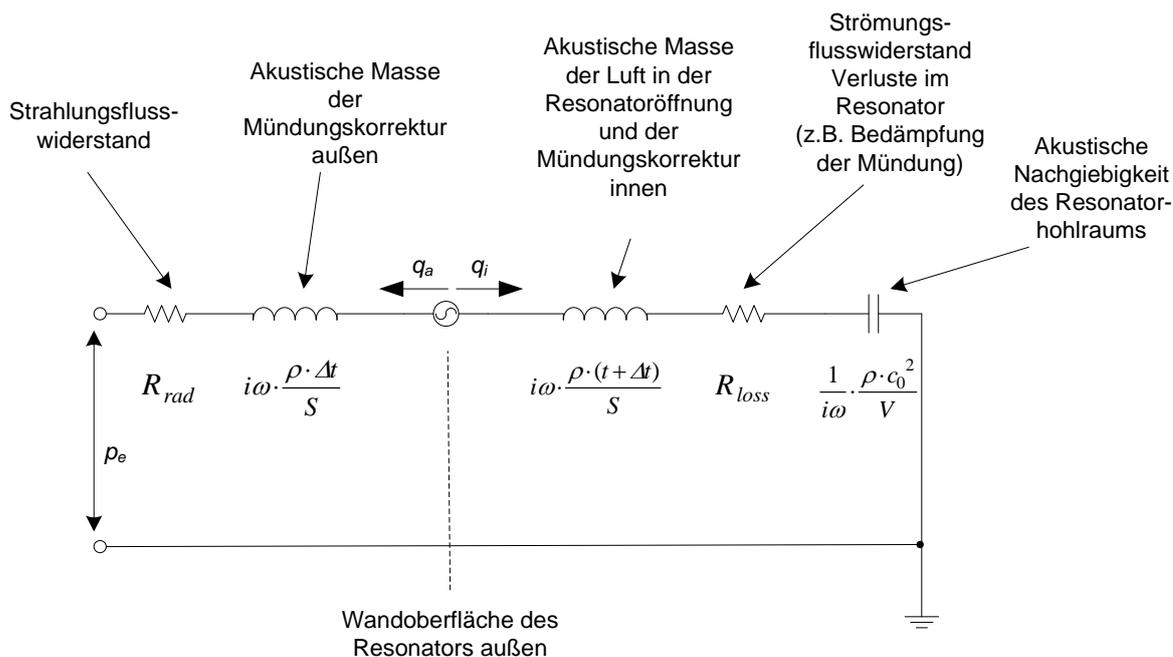


Abbildung 13: Elektromechanisches Modell eines Helmholtzresonators

Die Schallquelle hat dabei beide Schallflüsse zu generieren, weshalb der gesamte Schallfluss sich aus beiden Anteilen additiv zusammensetzt.

Der Zuwachs an Schallabsorptionsfläche ergibt sich aus dem Verhältnis der durch den Resonator absorbierten Schalleistung $P_{Verlust}$ zur einfallenden Schallintensität I_e , welche eine Funktion des Einfallswinkels ϑ ist:

$$\Delta A(\vartheta) = \frac{P_{Verlust}}{I_e(\vartheta)} = \frac{R_{Verlust} \cdot |q|^2}{|p|^2 / Z_0 \cdot \cos \vartheta} \tag{4.9}$$

Fasst man die beiden Bildwiderstände der akustischen Massen zusammen und führt eine Mittelung über alle Einfallswinkel durch, ergibt sich für den Zuwachs an Schallabsorptionsfläche:

$$\overline{\Delta A} = \frac{4 \cdot R_{Verlust} \cdot Z_0}{(R_{Verlust} + R_{Strahlung})^2 + \left(\omega \cdot \frac{\rho \cdot (t + 2\Delta t)}{S} - \frac{1}{\omega} \cdot \frac{\rho \cdot c_0^2}{V} \right)^2} \tag{4.10}$$

Dieser Wert wird maximal im Fall der Helmholtzresonanz (s. Glg. 4.11):

$$\text{für } \omega = \omega_0 = c_0 \cdot \sqrt{\frac{S}{V \cdot (t + 2\Delta)}} \Rightarrow \overline{\Delta A} = \overline{\Delta A}_{\max} = \frac{4 \cdot R_{Verlust} \cdot Z_0}{(R_{Verlust} + R_{Strahlung})^2} \tag{4.11}$$

Letzterer wiederum wird maximal für den Fall der sogenannten Anpassung, nämlich dem Fall, dass der Strömungsflusswiderstand gleich dem Strahlungsflusswiderstand wird:

$$R_{Verlust} = R_{Strahlung} \tag{4.12}$$

Die Zunahme der äquivalenten Schallabsorptionsfläche lässt mit dem Verhältnis β der beiden Flusswiderstände sowie der vollen Halbwertsbreite (FWHM) $\Delta\omega$ wie folgt schreiben:

$$\overline{\Delta A}(\beta) = \frac{\overline{\Delta A}_{\max}(\beta)}{1 + \left(\frac{\omega_0}{\Delta\omega(\beta)} \right) \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}$$

$$\beta = \frac{R_{\text{Verlust}}}{R_{\text{Strahlung}}} \quad (4.13)$$

$$\Delta\omega(\beta) = \frac{1}{\rho_0} \cdot \frac{S}{(t + 2\Delta t)} \cdot R_{\text{Strahlung}} \cdot (1 + \beta)$$

Für die Abstrahlung einer punktförmigen Schallquelle in den Halbfreifeldraum gilt:

$$R_{\text{Strahlung}} = Z_0 \cdot \frac{2\pi}{\lambda^2} \quad (4.14)$$

Abbildung 14 und Abbildung 15 sind beispielhaft für einen auf 63 Hz abgestimmten Helmholtzresonator mit einem typisch verwendeten Volumen von 60 Litern (Schlitzlänge $l = 41$ cm, Schlitzbreite $b = 1$ cm, Schlitztiefe $t = 1,25$ cm) die in Formel (4.13) spezifizierten Zusammenhänge aufgezeigt. Im Falle einer geringen Dämpfung des Resonators ($R_{\text{Verlust}} < R_{\text{Strahlung}}$) wird der maximal mögliche Zuwachs an äquivalenter Absorptionsfläche nicht erreicht, gleichzeitig sind die Halbwertsbreiten der Absorptionsresonanz klein. Im Fall einer zu großen Dämpfung ($R_{\text{Verlust}} > R_{\text{Strahlung}}$) gilt gleiches für den Zuwachs an äquivalenter Absorptionsfläche, die Absorptionsresonanz wird jedoch deutlich größer. In den meisten Anwendungsfällen ist davon auszugehen, dass letzterer Fall vorliegt. Die Halbwertsbreiten betragen wenige Hertz, d.h. die Absorptionsresonanz ist in jedem Fall sehr schmalbandig. Zur Abdeckung eines breiten Frequenzbereiches sind deshalb mehrere, auf unterschiedliche Resonanzfrequenzen abgestimmte Helmholtzresonatoren notwendig. Die Auswirkung eines Abweichens vom sog. Anpassungsfall ($R_{\text{Verlust}} = R_{\text{Strahlung}}$) auf den Zuwachs an äquivalenter Absorptionsfläche ist insbesondere im Fall einer höheren Dämpfung nicht sonderlich groß.

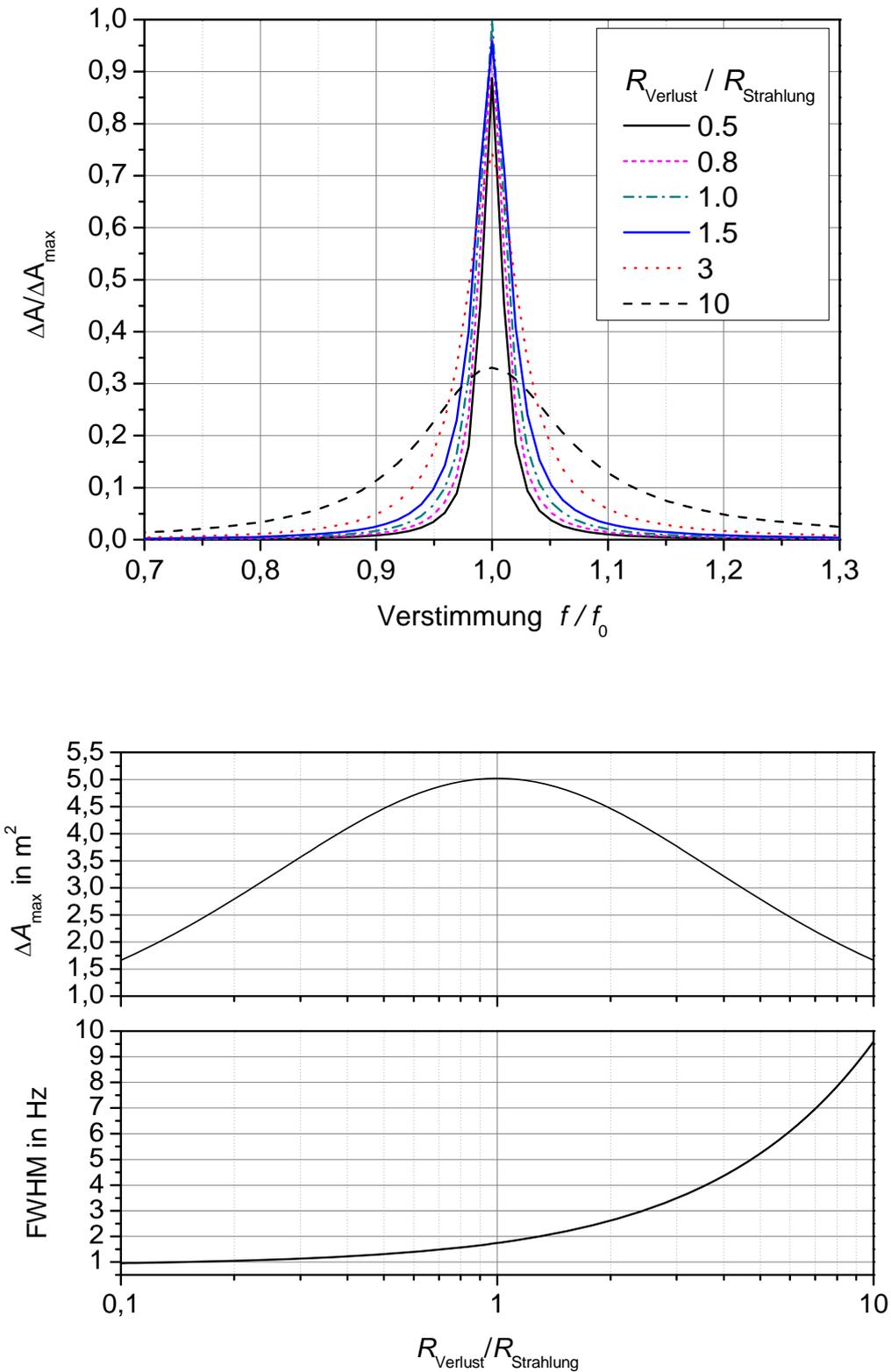


Abbildung 14: Zuwachs der äquivalenten Schallabsorptionsfläche und Halbwertsbreite der Absorptionsresonanz

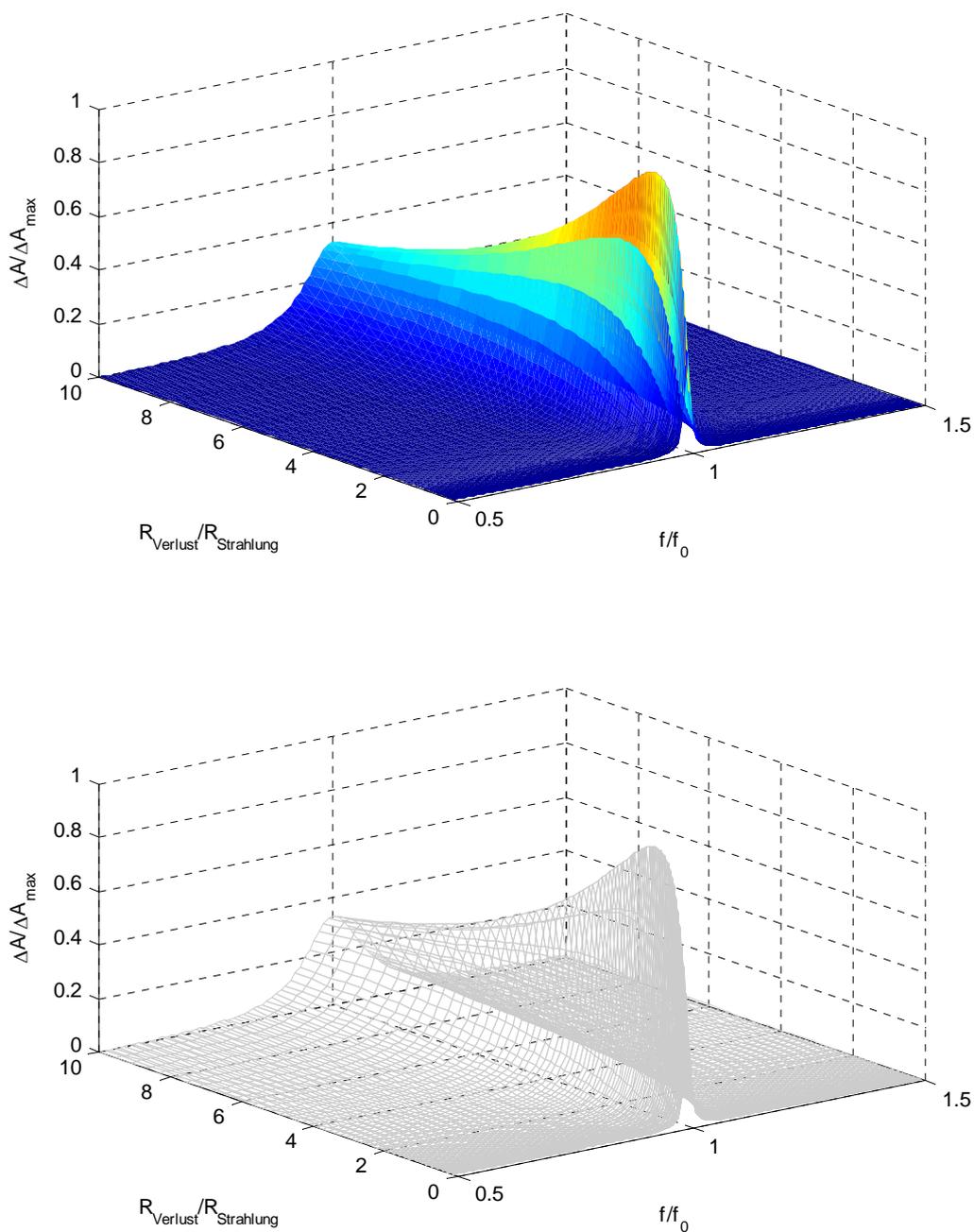


Abbildung 15: Zuwachs der äquivalenten Schallabsorptionsfläche (normiert) als Funktion der Verstimmung und des Verhältnisses aus Strömungs- und Strahlungsflusswiderstand

4.4 Anwendungsspezifische Einschränkungen und Besonderheiten

Der untersuchte Frequenzbereich wurde auf 50 Hz bis 100 Hz eingeschränkt. Bei Raumtemperatur bedeutet dies Luftschallwellenlängen von 6,8 m bei 50 Hz bzw. 3,4 m bei 100 Hz.

Bei den theoretischen Herleitungen aus Kap 4.1 und 4.2 wird von Voraussetzungen ausgegangen, die so für die Untersuchungen im Rahmen dieses Forschungsprojektes und insbesondere für den in diesem Forschungsprojekt anvisierten Einsatzzweck nicht zutreffen.

Folgende Voraussetzungen werden i.d.R. bei der Herleitung der Dimensionierungsformeln getroffen:

1) Dimensionen des Helmholtzresonators

Die Dimensionen des Lufthohlraums (Breite B, Höhe H, Länge L) sind klein gegen die Wellenlänge, d.h.

$$B, H, L \ll \lambda \quad \text{mit } V = B \cdot L \cdot H.$$

Gleichzeitig wächst die äquivalente Schallabsorptionsfläche mit dem Volumen, d.h. ein möglichst großes Volumen ist wünschenswert. Als Randbedingung des im Forschungsprojekt untersuchten Anwendungsfalles ist festzuhalten, dass die maximale Höhe H_{\max} auf ca. 14 cm, die maximale Breite H_{\max} auf ca. 40 cm, die maximale Länge auf ca. 1 m dimensioniert werden sollte. Damit verstößt zumindest die Länge des Resonators gegen die oben gemachte Dimensionierungsregel.

2) Schlitzlänge

Ebenso soll die Schlitzlänge l der Resonatoröffnung klein gegen die Wellenlänge sein, d.h. $l \ll \lambda$.

Gemäß Formel (4.5) ist die Schlitzlänge für Resonanzfrequenzen hin zur Frequenzobergrenze (und damit zu kleineren Wellenlängen) groß zu wählen. Auf Grund des unter 1) gewählten Volumens wird die Schlitzlänge dann aber so groß, dass die geforderte Bedingung nicht mehr gilt.

3) Abstand der Resonatoren untereinander

Zur Herleitung der Dimensionierungsgleichungen wird vorausgesetzt, dass es sich um einen Einzelresonator handelt, d.h. dass benachbarte Resonatoren mindestens um eine halbe Wellenlänge entfernt sein sollten. Beim Einbau mehrerer Helmholtzresonatoren ins Gefach einer Holzbalkendecke ist diese Bedingung nicht erfüllbar.

4) Modellvorstellung des Helmholtzresonators in der unendlich ausgedehnten Schallwand contra Druckkammer

Die Berechnungsformeln gehen davon aus, dass der Helmholtzresonator in einer unendlich ausgedehnten schallharten Wand eingebaut ist. Tatsächlich ist der Helmholtzresonator eingebaut im Gefach einer Holzbalkendecke, welches als Luftraum selbst sehr klein gegen die betrachteten Wellenlängen ist; es ist anzunehmen, dass der Gefachbereich damit als Druckkammer wirkt. Zusammen mit dem

Helmholtzresonator bildet der Gefachbereich einen sog. Tonraum, nämlich die Kopplung zweier Luftvolumina über eine Öffnung. Die Auswirkung auf die Resonanzfrequenz kann wie folgt beschrieben werden¹³ und äußert sich i.d.R. durch eine Verschiebung der Resonanzfrequenz zu höheren Werten. Im vorliegenden Anwendungsfall kann durchaus eine Verschiebung um eine Terz entstehen.

$$f_0 = \frac{c_0}{2\pi} \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{V_{\text{Gefach}}} + \frac{1}{V_{\text{Resonator}}} \right) \cdot \frac{S}{(t_0 + 2\Delta t)}} \quad (4.15)$$

4.5 Untersuchung zur Abstimmung von Helmholtzresonatoren mit schlitzförmiger Mündung

In vorherigen Arbeiten¹⁴ hat sich gezeigt, dass es teils zu deutlichen Abweichungen zwischen Theorie und Praxis hinsichtlich der Frequenzabstimmung kam. Verursacht ist dies durch die Tatsache, dass die in den theoretischen Herleitungen gemachte Annahme, wonach die Schlitzlänge klein gegen die Wellenlänge sein soll, bei den höheren Frequenzen nicht mehr erfüllt ist, zumal ja die Schlitzlänge zu höheren Frequenzen sogar zunimmt. Um eine Korrektur der Gleichung (4.5) für die Resonanzfrequenz zu bestimmen, wurden die Helmholtzresonatoren hinsichtlich der Mündungsgeometrie nochmals genauer untersucht. Durch sukzessive Verlängerung des Mündungsschlitzes wurde die Abweichung zwischen errechneter und gemessener Frequenzlage genau bestimmt werden.

Anfangs erfolgte hierzu die Anregung der Helmholtzresonatoren durch ein Luftschallfeld. Hierbei besteht jedoch die Gefahr, dass auf Grund des zu kleinen Prüfraumes die Positionierung eine Rolle spielt, da noch ein modales Schallfeld vorliegt. Deshalb erfolgte in einer zweiten Versuchsreihe die Anregung mit Körperschall.

Die Anregung erfolgte mittels eines elektrodynamischen Schwingerregers. Der Resonator war vollflächig auf einem porösen Absorber gelagert. Das Anregesignal wurde direkt neben dem Einspeisungspunkt mittels Beschleunigungsaufnehmern abgegriffen (vgl. Abbildung 16 links). Als Antwortsignal wurde der Schalldruck im Resonator gemessen. Aus diesen beiden Signalen wurde die Übertragungsfunktion gebildet.

¹³ vgl.: (Fasold & Winkler, 1975), (Veit, 2005)

¹⁴ vgl.: (Otto, Diplomarbeit Oktober 2009), (Schramm, Projektarbeit, 2010)

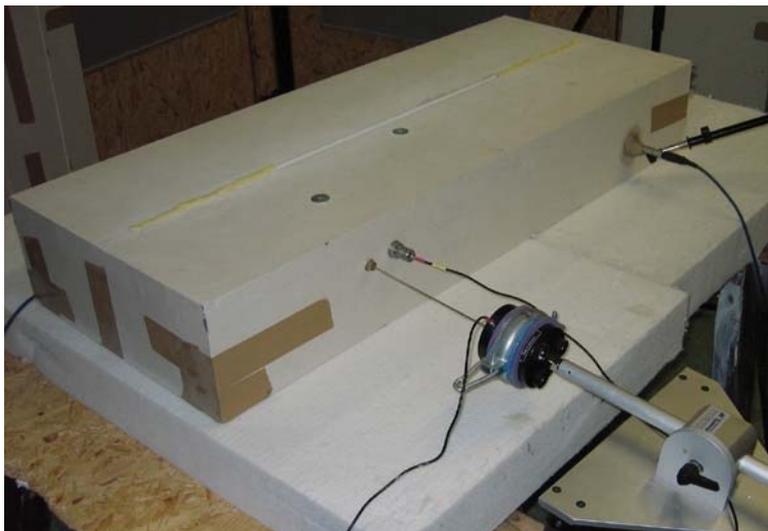


Abbildung 16: Versuchsaufbau zur Messung der Übertragungsfunktion bei Körperschallanregung.

Das Messergebnis ist im folgenden Diagramm dargestellt.

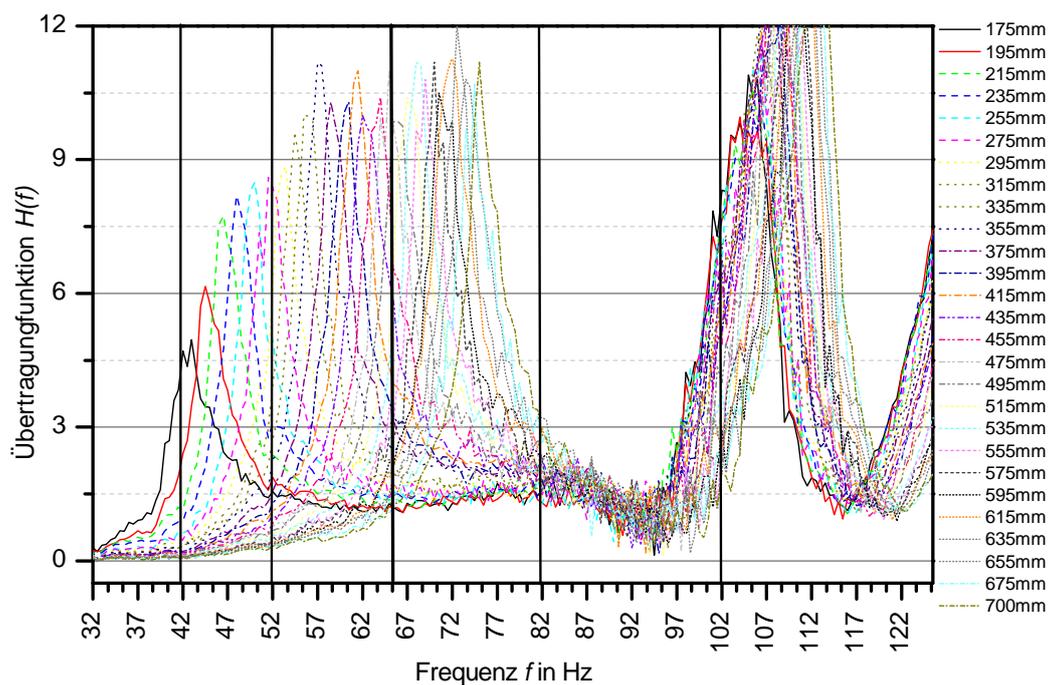


Abbildung 17: Übertragungsfunktion in Abhängigkeit der Schlitzlänge bei Körperschall-Anregung

Man erkennt mit zunehmender Schlitzlänge ein stetiges Ansteigen der Scheitelwerte der Helmholtzresonanz als auch der Resonanzfrequenz selbst. Ebenso ist auch die erste Strukturmode des Resonatorkastens bei ca. 105 Hz zu erkennen. Interessant ist dabei,

dass diese eine gewisse Abhängigkeit zur Frequenz der Helmholtzresonanz zeigt. Diese Kopplung konnte auch bei Absorptionsmessungen im Impedanzrohr¹⁵ festgestellt werden.

In Abbildung 18 sind die errechnete bzw. gemessene Abstimmfrequenz in Abhängigkeit der Schlitzlänge aufgetragen. Man erkennt deutlich, dass sich mit zunehmender Schlitzlänge der Messwert immer stärker vom Berechnungswert unterscheidet.

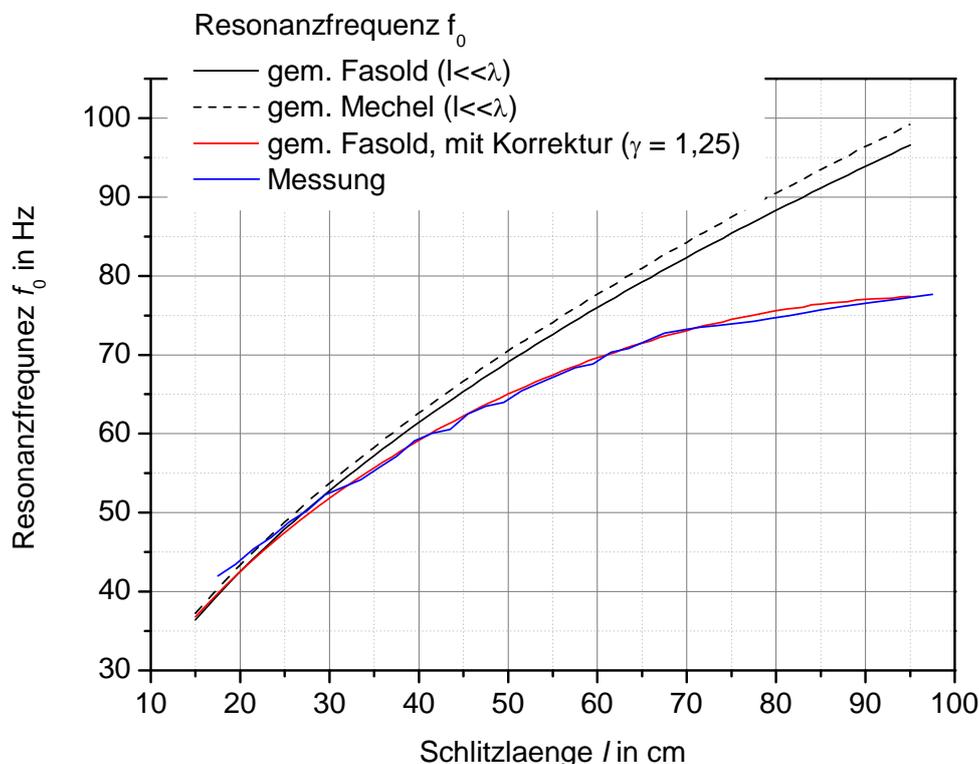


Abbildung 18: Abstimmfrequenz gemessen vs. berechnet, einschließlich möglicher Korrektur

Grund für diese Abweichung ist die Tatsache, dass bei längerem Schlitz gleichzeitig die Wellenlänge bei Resonanz kürzer wird und damit die Vereinfachung, dass die Schlitzlänge klein gegen die Wellenlänge sein muss, nicht mehr erfüllt ist. Durch eine Korrektur in der Berechnungsformel (s. Gleichung 4.16), die das Verhältnis aus Schlitzlänge zur Wellenlänge bei Resonanz mit einem empirischen Anpassungsfaktor γ beinhaltet, kann eine sehr gute Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen erreicht werden (s. Abbildung 18).

$$f_0 = \frac{c_0}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{S}{V \cdot (t_0 + 2\Delta t)}} \cdot \left(1 - \gamma \cdot \frac{l}{\lambda}\right) \quad (4.16)$$

Die Formel liefert auch brauchbare Ergebnisse für Resonatoren, deren Mündung stirnseitig am Resonatorrand positioniert ist (vgl. Kapitel 4.6.5).

¹⁵ vgl.: (Schramm, Projektarbeit, 2010)

Laut Fasold¹⁶ lässt sich das Maximum der äquivalenten Absorptionsfläche eines Helmholtzresonators nach folgender Formel abschätzen:

$$\frac{\overline{\Delta A}_{\max}}{m^2} = 0,01 \cdot \sqrt{\frac{S/cm^2 \cdot V/dm^3}{(t + 2 \cdot \Delta t)/cm}} \cdot k \quad (4.17)$$

k = geometrischer Anordnungsfaktor im Raum

Beim vorliegenden Versuch wurde bis auf die Schlitzlänge kein weiterer Parameter des Helmholtzresonators verändert. Daraus folgt, dass die Absorptionsfläche proportional zur Schlitzlänge sein muss:

$$\overline{\Delta A}_{\max} \propto l \quad (4.18)$$

Geht man davon aus, dass die Fläche unter den Resonanzkurven in Abbildung 17 ein Maß für die Absorptionsfläche der Helmholtzresonatoren ist, müsste auch hier ein proportionaler Zusammenhang zwischen dieser Fläche und der Schlitzlänge zu erkennen sein.

Geschätzt wurde die Fläche, indem die Resonanzkurven aus Abbildung 17 mittels Gausskurven nachgebildet und integriert wurden.

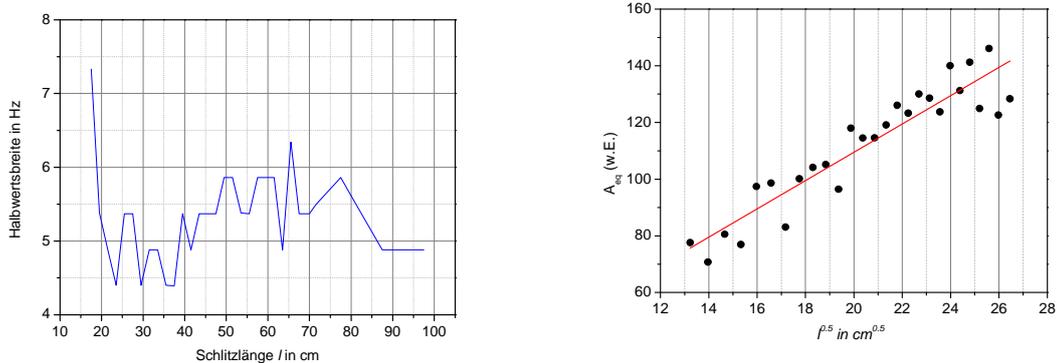


Abbildung 19: Links sind die gemessenen Halbwertsbreiten der Resonanzkurven bei Körperschall-Anregung dargestellt, rechts die Proportionalität $A \sim \sqrt{l}$

Trägt man die so approximierten Fläche über \sqrt{l} auf, zeigt Abbildung 19 rechts eine gute Übereinstimmung des Zusammenhangs aus Gleichung (4.18). Dies bedeutet, dass die gemessenen Übertragungsfunktionen herangezogen werden können, um eine Abschätzung der Absorptionsfläche eines Helmholtzresonators gemäß Gleichung (4.17) treffen zu können. Die aus diesen Kurven errechneten Halbwertsbreiten liegen mit ca. 5 Hz sehr hoch und lassen auf eine starke Bedämpfung des Resonators schließen (s. Abbildung 14). Andererseits sind diese Werte durchaus erfreulich, um zur Abdeckung des Frequenzbereiches von 50 Hz bis 100 Hz nicht zu viele unterschiedlich abgestimmte Resonatoren verwenden zu müssen. Diese Proportionalität ist gut erfüllt für Schlitzlängen bis ca.

¹⁶ vgl.: (Fasold & Veres, 2003)

700 mm, was einer Resonanzfrequenz von ca. 72 Hz entspricht (s. Abbildung 18). Bei sehr langen Schlitzten gehen die Scheitelwerte immer stärker zurück, die äquivalente Schallabsorptionsfläche nimmt nicht mehr zu. Dies bedeutet, dass für höhere Resonanzfrequenzen bevorzugt kleinere Resonatorvolumina geeignet sind.

Im Rahmen des Projektes wurde auch eine FEM-Analyse des Resonatorkastens durchgeführt. Bei sehr langem Schlitz wird die Deckplatte des Resonatorkastens sehr weich und die Strukturmoden verschieben sich immer weiter zu den tiefen Frequenzen hin. Besonders anschaulich wird dies für die schlitzbedingte Eigenschwingform, bei welcher die Deckelplatten gegenphasig schwingen (vgl. Abbildung 20).

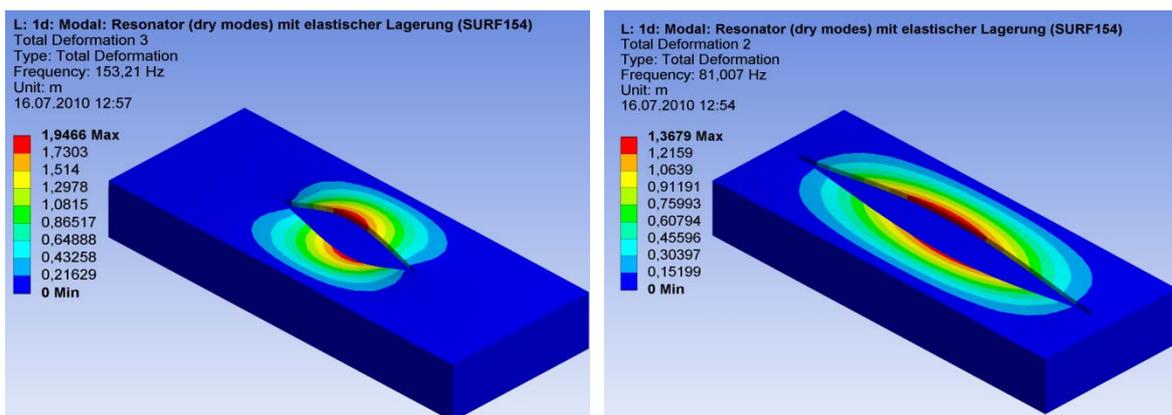


Abbildung 20: Eigenform des Resonatorkastens – Links, Schlitzlänge 40,5 cm. Rechts, Schlitzlänge 94,5 cm.

Man erkennt, dass bei langen Schlitzten die Eigenfrequenz der Deckelplatte immer mehr in den Frequenzbereich der Helmholtzresonanz verlagert (bei 40,5 cm ist die Eigenfrequenz obiger Schwingform bei 153 Hz, bei 94,5 cm Schlitzlänge nur noch bei 81 Hz). Zur Vermeidung einer gegenseitigen Beeinflussung der Resonanzen sollte also auch aus diesem Grund die Schlitzlänge nicht zu lang werden.

4.6 Verwendete Typen von Helmholtzresonatoren

Wesentliche Kriterien bei der Konstruktion der Helmholtzresonatoren waren die Handhabbarkeit und die problemlose Integration der Resonatoren in den Balkenzwischenraum (Gefach) der Prüfdecke. Da es für die Absorption tiefer Frequenzen hin vorteilhaft ist, das Resonatorvolumen möglichst groß zu machen, bietet sich nur die Möglichkeit, die Boxen entsprechend lang zu machen, da die Gefachbreite und –tiefe für typische Holzdeckenkonstruktionen vorgegeben ist. In Absprache mit der am Forschungsvorhaben beteiligten Industrie wurden die im Folgenden geschilderten Abmessungen festgelegt.

4.6.1 Rohling

Ausgangsmaterial für den Bau der Helmholtzresonatoren waren vorgefräste Gipskartonplatten (GKB 12,5 mm). Durch die V-Fräsung konnte die unterteilte Platte zu einem Kas-

ten einfach zusammengeklappt werden. Über eine Verklebung (Polyurethan-Klebstoff) wurde eine dauerhaft feste Verbindung gewährleistet. Der somit entstandene Resonator-Rohling hat ein Eigengewicht von 14,1 kg. Die Resonatoröffnung wurde anschließend mit Hilfe einer Oberfräse entsprechend der festgelegten Abstimmfrequenz und des Volumens gefräst. Die Breite des Fräasers und somit die Mindestbreite der Mündung beträgt 10 mm.

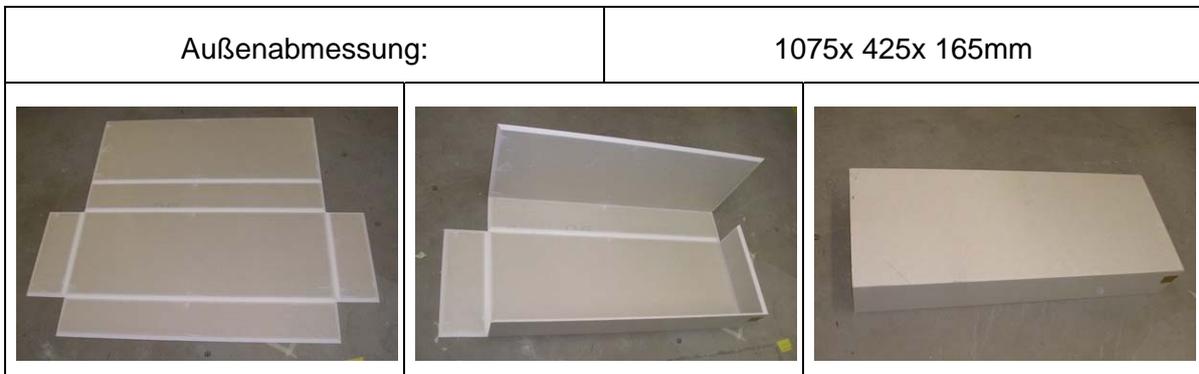


Abbildung 21: Rohling für Helmholtzresonatoren

Aus Untersuchungen zu den Helmholtzresonatoren im Impedanzrohr (vgl. Kapitel 4.7.1) hatte sich gezeigt, dass die Mündungsbedämpfung förderlich zur Verbreiterung der Absorptionskurven ist. Die besten Resultate erzielt man, wenn die Ebene der Bedämpfung mit geringem Abstand von der Mündung (bzw. Resonatoraußenfläche) entfernt positioniert ist.

Je nach Aufbau befindet sich die Bedämpfung meist direkt am Resonator mittels eines Holzrahmens. Dabei wurden vorgefertigte 10 mm starke Rahmen mit einem Glasflies versehen. Das Produktdatenblatt findet sich im Anhang dieser Arbeit. Die somit entstandenen Spannrahmen mit Akustikvlies (siehe Abbildung 22) konnten sehr flexibel durch punktweises Aufkleben auf die Resonatoren angebracht werden.



Abbildung 22: Rahmen für Mündungs-Bedämpfung

4.6.2 Einzelresonator

Bei diesem Resonatortyp wurde im Inneren eine 5 cm dicke Schicht Mineralwolle auf der gegenüberliegenden Seite der Resonatoröffnung angebracht¹⁷. Die Mineralwolle war als Bedämpfung des Systems gedacht. Bei weiteren Untersuchungen stellte sich heraus, dass diese Mineralwollschicht keine Funktionsverbesserung bringt.

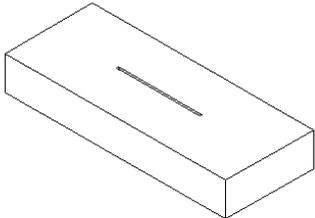
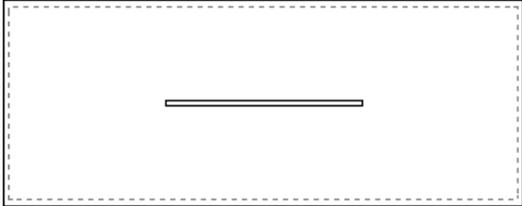
Einzelresonator	
Ist-Frequenz (gemessen):	66 Hz
Soll-Frequenz (errechnet):	62 Hz
Resonatorvolumen:	59 l
Mündungsgeometrie:	405x 10mm
	

Abbildung 23: Einzelresonator

¹⁷ vgl.: (Otto, Diplomarbeit Oktober 2009)

4.6.3 Zweifach frequenz-kaskadierter Resonator

Dieser frequenz-kaskadierte Resonator wurde durch ein Stellbrett, das ebenfalls aus Gipskarton besteht, unterteilt. Es ist darauf zu achten, dass die Abgrenzung der beiden Resonatorvolumina luftdicht ausgeführt wird, um eine gegenseitige direkte Kopplung auszuschließen.

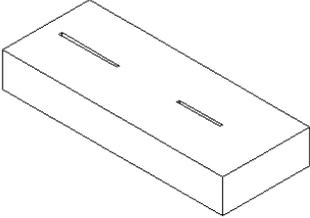
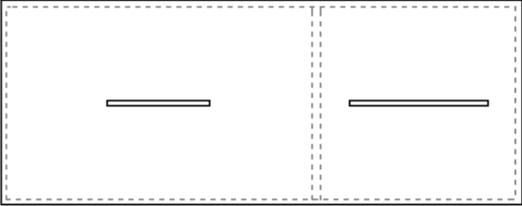
Zweifach kaskadierter Resonator		
Ist-Frequenz (gemessen):	60 Hz	93Hz
Soll-Frequenz (errechnet):	57 Hz	85 Hz
Resonatorvolumen:	35,2 l	22,6 l
Mündungsgeometrie:	210 x10 mm	283 x10 mm
		

Abbildung 24: zweifach frequenz-kaskadierter Resonator

4.6.4 Vierfach frequenz-kaskadierter Resonator

Ähnlich dem Resonator unter 4.6.3 wurde der vierfach frequenz-kaskadierte Resonator in vier Bereiche aufgeteilt. Auch die Stellbretter zur Unterteilung bestehen aus Gipskartonplatten. Zur exakten Positionierung wurden beide Teile mit einer Kreuzüberblattung fixiert, wie in Abbildung 25 unten zu erkennen ist.

Mit einer Frequenz-Kaskadierung wird eine breitbandigere Wirkung erzielt¹⁸. Auffällig ist, dass mit kleinerem Volumen eines Helmholtzresonators die Abweichung der Soll- zur Ist-Frequenz größer zu werden scheint. Dieser Frage wurde jedoch nicht weiter nachgegangen, da die frequenz-kaskadierten Resonatortypen aus Fertigungsgründen vermieden werden sollten. Die in Formel (4.16) vorgeschlagene Korrektur zur Berücksichtigung des endlichen Verhältnisses der Schlitzlänge zur Resonanzwellenlänge spielt bei diesen Resonatoren auf Grund der kleinen Schlitzlängen keine Rolle.

¹⁸ vgl.: (Otto, Diplomarbeit Oktober 2009)

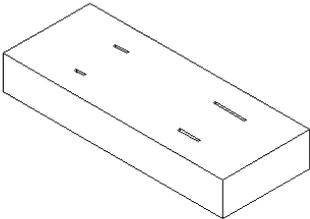
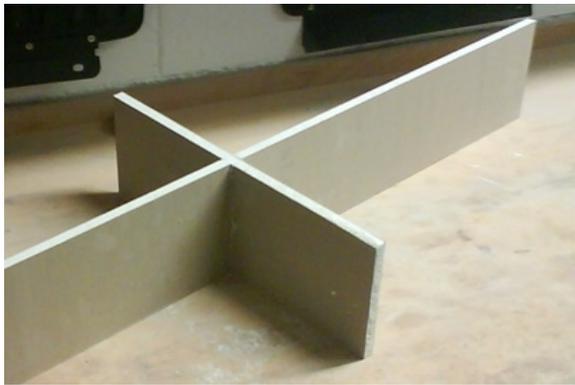
Vierfach kaskadierter Resonator				
Ist-Frequenz (gemessen):	53 Hz	65 Hz	78 Hz	94 Hz
Soll-Frequenz (errechnet):	39 Hz	47 Hz	62 Hz	76 Hz
Resonatorvolumen:	14,4 l	15,3 l	14,1 l	15,0 l
Mündungsgeometrie:	41 x10 mm	63 x10 mm	98 x10 mm	153 x10 mm
				
				

Abbildung 25: vierfach frequenz-kaskadierter Resonator

4.6.5 Einzelresonatoren mit Randmündung

Für eine eventuelle Anbindung der Resonatoren an den Empfangsraum sollte mit diesem Resonatortyp untersucht werden, inwieweit die erhöhte Absorption in den Raumkanten dem Anwendungszweck einen Vorteil verschaffen würde. Hier erwies sich die Abstimmung der Resonatoren auf ca. 60 Hz als schwierig, da in diesem Fall die Mündungslänge durch die Resonatorbreite begrenzt ist. Aus diesem Grund wurde die Mündungsbreite von 10 mm auf 15 mm erweitert. Ebenso musste das Volumen reduziert werden. Aufgrund der Abmessungen der Resonator-Rohlinge ergab sich somit ein zusätzliches unwirksames Volumen. Im Vergleich zu den anderen Resonatortypen ist hier festzuhalten, dass die gemessene Resonanzfrequenz kleiner als die berechnete ist. Deshalb ist davon auszugehen, dass eine weitere Korrektur der Berechnungsformeln für die Resonanzfrequenz notwendig ist. Der hier festgestellte Fall könnte ein Indiz sein, dass nämlich die Dämpfung der Grenzschicht im Resonatorhals für eine Korrektur der Resonanzfrequenz einbezogen werden muss¹⁹, da im Gegensatz zu den anderen Resonatoren die Schlitzbreite bei diesem Resonatortyp 15 mm und nicht nur 10 mm betrug.

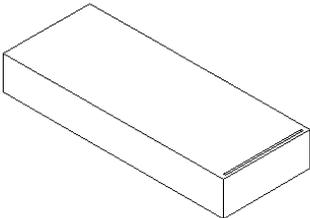
Einzelresonator mit Randmündung	
Ist-Frequenz (gemessen):	61 Hz
Soll-Frequenz (errechnet):	73 Hz
Resonatorvolumen:	47 l
Mündungsgeometrie:	380 x15 mm
	

Abbildung 26: Einzelresonator mit Randmündung

¹⁹ vgl.: (Krnak, Acustica Vol. 16, Heft 6)

4.7 Versuche über die schalltechnische Wirksamkeit - Messung des Absorptionsgrades

Zur quantitativen Analyse der absorbierenden Eigenschaften der Helmholtzresonatoren wurde Messungen des Schallabsorptionsgrades bzw. der äquivalenten Schallabsorptionsfläche mittels zweier unterschiedlicher Verfahren durchgeführt zum einen im Impedanzrohr der Firma Müller BBM, welche ein speziell für tiefe Frequenzen ausgelegtes Impedanzrohr besitzt und zum andern im Hallraum der Firma Knauf.

4.7.1 Messung im Impedanzrohr

Da durch das Impedanzrohr feste Vorgaben für Länge und Breite der zu untersuchenden Resonatoren festgelegt waren, musste von der ursprünglichen Form abgewichen werden (vgl. Abbildung 21). Die Tiefe der Prüflinge wurde so gewählt, dass das Volumen gleich der bisher untersuchten Resonatoren war und die Schlitzlängen für die Abstimmfrequenzen 50 Hz, 63 Hz und 80 Hz gleich blieben.

Die Prüflinge (vgl. Abbildung 27 rechts) wurden mit 2 cm Untermaß zu den Rohrwandungen angefertigt. Die dadurch entstehenden Randzwischenräume wurden vollständig mit Melaminharzschaum ausgefüllt. Außerdem wurden die Fugen mit dauerelastischem Kitt der Marke Terostat verschlossen. Die Rohröffnung zum Einsetzen des Prüflings wurde mit einer Stahlplatte verschlossen und anschließend beschwert.



Abbildung 27: Links Impedanzrohr MBBM; rechts Resonatorprüfling in das Rohr eingesetzt

Gemessen und ausgewertet wurde nach dem Einmikrofonverfahren nach DIN EN ISO 10534-2²⁰ durch Rückwärtsintegration der Impulsantworten.

Ziel dieser Messung war die Untersuchung der Wirkung einer Bedämpfung der Resonatoröffnung auf das Resonanzverhalten der Resonatoren.

Abbildung 28 zeigt den Verlauf des Schallabsorptionsgrades für auf 50 Hz, 63 Hz und 80 Hz abgestimmte Resonatoren so wie als Referenz den reflektierenden Rohrabschluss. Man erkennt für jeden einzelnen Resonator zwei Resonanz-Peaks. Allen dreien eigen ist eine hohe Absorption bei ca. 100 Hz. Die anderen drei Absorptionsspitzen bei ca. 57 Hz,

²⁰ vgl.: (DIN EN ISO 10534-2, Oktober 2001)

68 Hz und 77 Hz zeigen die Helmholtzresonanz. Die Ausprägung des starren Rohrabschlusses bei ca. 46 Hz ist nach Betreiberangaben die erste Längsmode des Rohres.

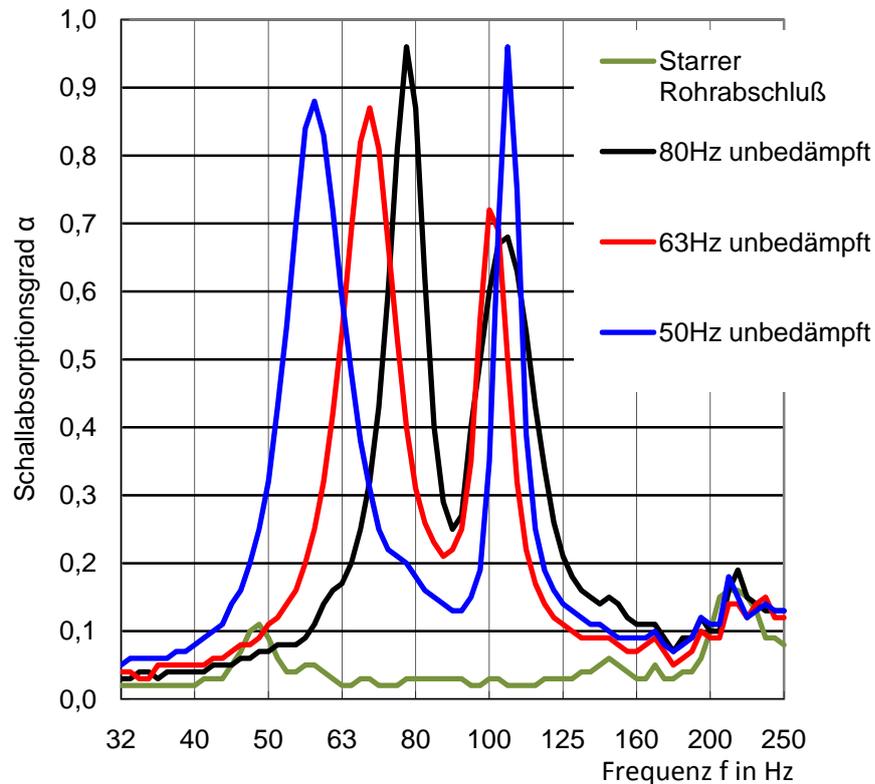


Abbildung 28 Schallabsorptionsgrad für auf 50 Hz, 63 Hz und 80 Hz abgestimmte Resonatoren

Durch Verschließen der Mündung mit Klebeband konnte die Helmholtzresonanz einfach gezeigt werden (vgl. Abbildung 29 rechts). Durch Massenerhöhung konnte weiterhin gezeigt werden, dass die Absorption bei ca. 100 Hz eine Plattenmode des Prüflings darstellt, da sich der Peak erwartungsgemäß nach unten verschiebt (vgl. Abbildung 29 links).

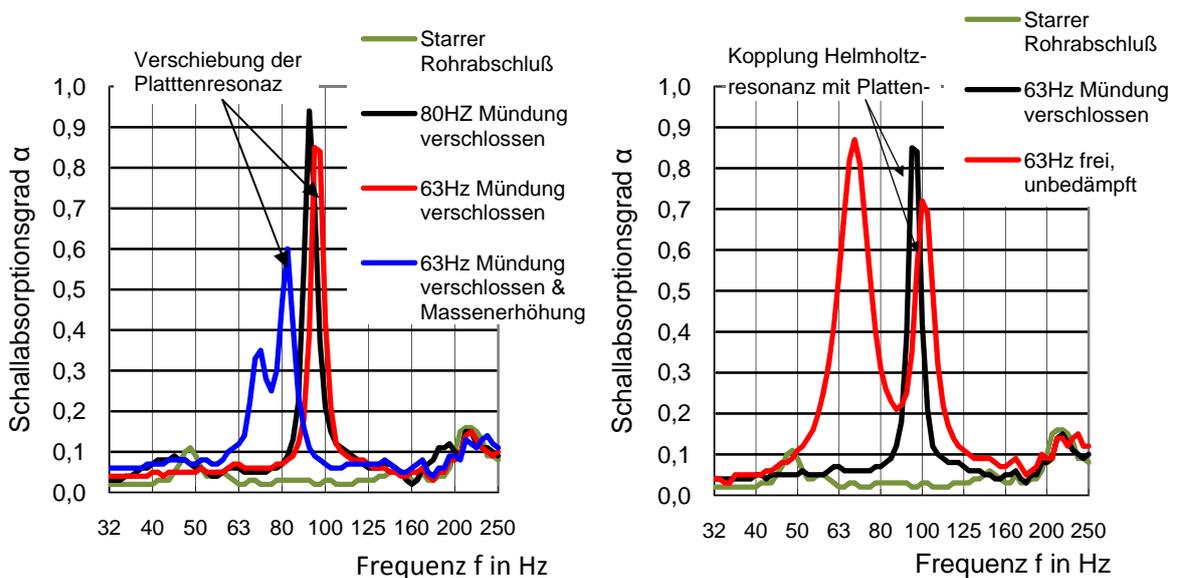


Abbildung 29: links: Resonatoren verschlossen; rechts: Vergleich offen-verschlossen für 63 Hz

Ein weiterer interessanter Aspekt, wie er auch bei den Prinzipversuchen im Labor aufgetreten war²¹, ist die Kopplung zwischen der Helmholtzresonanz mit der Plattenresonanz. Die Platteneigenmode verschiebt sich etwas, je nachdem ob der Resonator aktiv oder inaktiv ist (vgl. Abbildung 29 rechts).

Abbildung 30 zeigt den Verlauf des Schallabsorptionsgrades des auf 63 Hz abgestimmten Resonators im Falle einer Mündungsbedämpfung mit Glasvlies. Dieses Vlies GV 60/A2 der Firma Kettinger wurde mit einem Abstand von min. 5 mm zur Mündung angebracht, indem es auf einen Rahmen geleimt wurde, der anschließend um die Mündung (Abstand 5 cm allseits zur Öffnung) geklebt wurde (vgl. Abbildung 34).

Man erkennt deutlich, dass im Bedämpfungsfall die Absorptionskurven breiter als auch im Maximum höher werden. Dies bedeutet, dass im Falle des senkrechten Schalleinfalls die freie unbedämpfte Variante unterhalb der Anpassung (s. Kap. 4.3) des Strömungsflusswiderstandes an den Strahlungsflusswiderstand liegt. Im Fall der Anbringung der Bedämpfung auf der Innenseite der Resonatoröffnung scheint es, dass der Anpassungsfall nahezu getroffen wurde, da der Schallabsorptionsgrad annähernd die 1,0 annimmt. Es ist dabei festzuhalten, dass die Halbwertsbreite mit über 30 Hz weit über den Berechnungen liegen (s. 4.3); dies ist für die Anwendung natürlich sehr erfreulich! In Abbildung 31 wurde nun, statt dem hauchdünnen Glasvlies, ein 5 mm starkes Akustikfilz der Firma Kettinger mit größerem Strömungsflusswiderstand verwendet. Man erkennt, dass die Absorptionskurven noch breiter werden, aber auch im Maximalwert zurückgehen²². Der Anpassungsfall ist somit überschritten. Klebt man nun, wie in Abbildung 31 rechts zu sehen, das Glasvlies ohne Abstand direkt auf die Mündung, verbreitert sich die Absorptionskurve noch mehr, nimmt aber im Absolutwert so stark ab, dass diese Art der Bedämpfung zumindest bei senkrechtem Schalleinfall nicht sinnvoll ist.

²¹ vgl.: (Otto, Diplomarbeit Oktober 2009) und (Schramm, Projektarbeit, 2010)

²² vgl.: (Cremer & Müller, 1976)

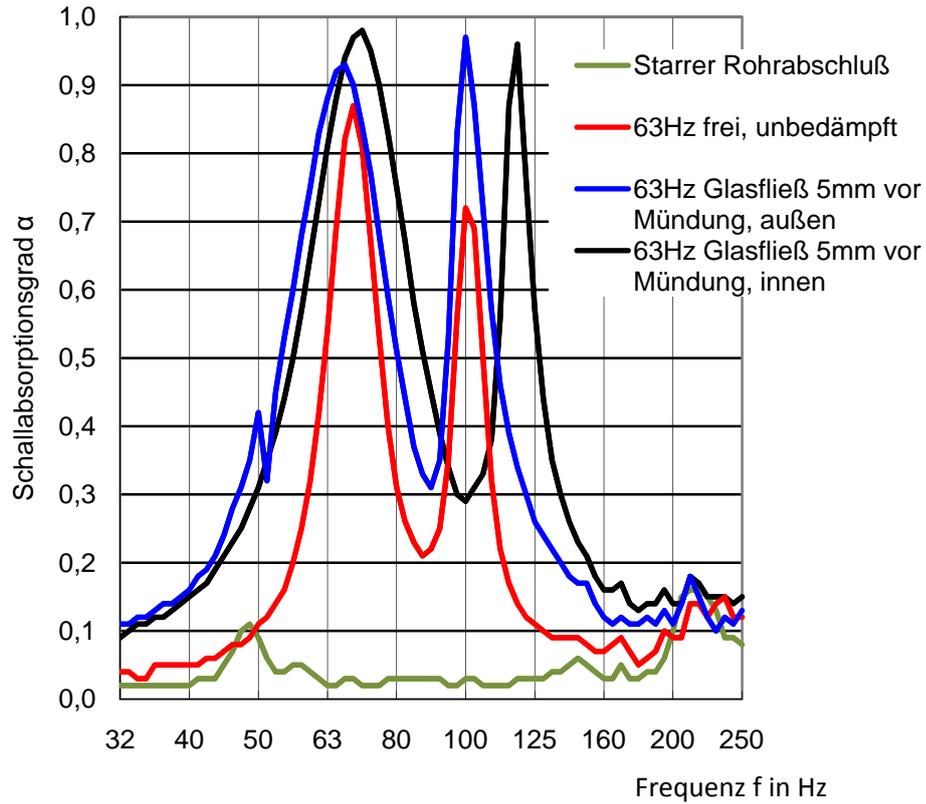


Abbildung 30: Glasvlies als Resonatorbedämpfung

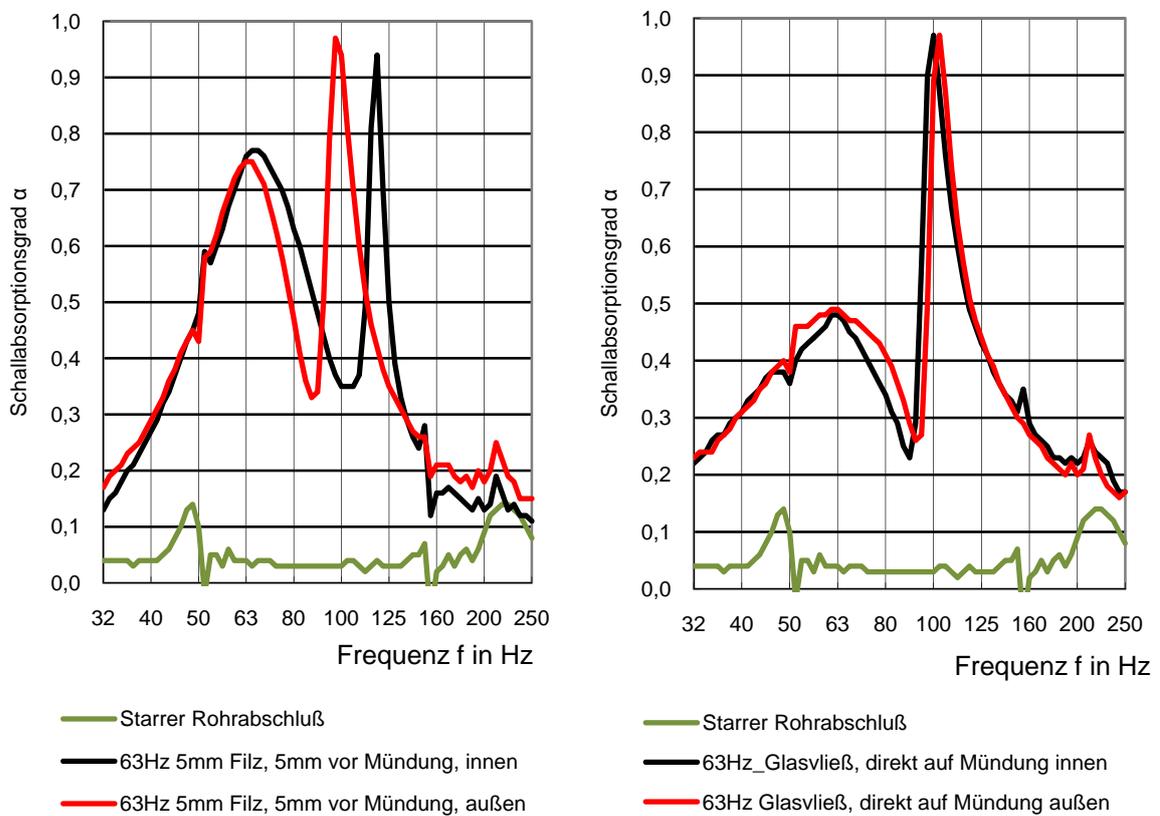


Abbildung 31: Links, AKF-B1 Filz mit 5mm Abstand zur Mündung; rechts Glasvlies ohne Abstand

In Abbildung 30 und Abbildung 31 links sieht man weiterhin, dass sich die Plattenmode, je nach Anordnung der Bedämpfung innen oder außen verschiebt. Das liegt daran, dass der Rahmen, auf dem das Vlies gespannt wurde, im Bedämpfungsfall „innen“ mit Heißleim auf den Gipskarton geklebt und im Bedämpfungsfall „außen“ nur mit doppelseitigem Klebeband aufgesetzt wurde. Im Fall der Klebung wird die Deckenplatte natürlich steifer und der Peak wandert zu hohen Frequenzen.

Der unterschiedliche Verlauf des Schallabsorptionsgrads beim reflektierenden Rohrabschluss und der Peak bei ca. 50 Hz rührt daher, dass an zwei unterschiedlichen Tagen gemessen wurde und beim zweiten Mal auf die zusätzliche Abdichtung der „Öffnungs-Stahlplatte“ zum Einbringen des Prüflings verzichtet wurde.

Wie im Kapitel 4.6.4 beschrieben, zeigt Abbildung 32 den Schallabsorptionsgrad eines unbedämpften frequenz-kaskadierten Resonators (vgl. Abbildung 25). Man erkennt, dass die Absorptionskurve deutlich breiter wird als bei den Einzelresonatoren. Jedoch lassen sich keine separierten Resonanzen bei 40 Hz, 50 Hz, 63 Hz, oder 80 Hz erkennen. Daraus lässt sich folgern, dass sich die vier kleineren Resonatoren gegenseitig beeinflussen bzw. die Abstimmfrequenzen zu nah beieinander liegen.

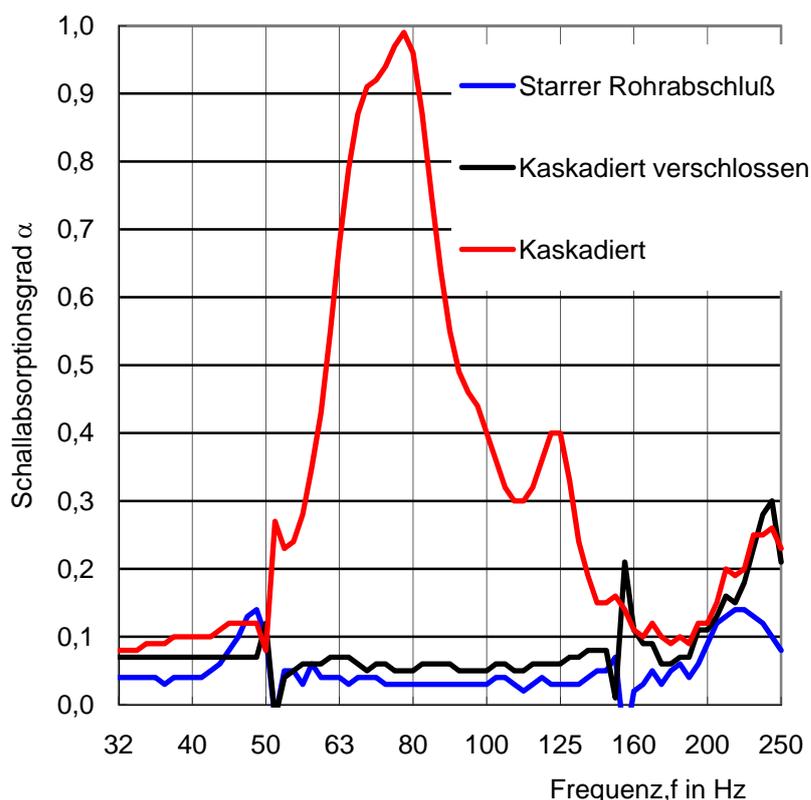


Abbildung 32: Frequenz-kaskadierter Resonator, abgestimmt auf 40 Hz, 50 Hz, 63 Hz und 80 Hz

Abschließend sei noch erwähnt, dass auch versucht wurde, den Einfluss der Dichtigkeit der Resonatorkästen zu überprüfen. Hierfür wurde ein Resonator an den Seiten mit ca. 20 Löchern mit einem Durchmesser 10 mm angebohrt. Dies hatte jedoch keine Auswirkung auf den Absorptionsgrad des Resonators. Dies kann jedoch daran liegen, dass das umlaufende Luftvolumen vermutlich zu gering war (+/- 2cm Untermaß des Prüflings zu

den Rohrabmessungen - vgl. auch Abbildung 27.). Dies muss demnach noch weiter untersucht werden.

Auch sei noch erwähnt, dass eine Bedämpfung der Helmholtzresonatoren mit einer 5 cm dicken Mineralwolle-Schicht im Resonatorvolumen zu keiner wesentlichen Verbreiterung des Schallabsorptionsgrades geführt hat. Der Verlauf unterschied sich nur unmerklich von dem der unbedämpften Varianten.

4.7.2 Messung im Hallraum

Die Messungen des Schallabsorptionsgrades im Hallraum wurden nach DIN EN ISO 354²³ Kapitel 7.3 durch Rückwärtsintegration der Impulsantwort durchgeführt. Als Anregungssignal wurde ein Sinus-Sweep verwendet, um einen höheren Störabstand zu gewährleisten. Untersucht wurden immer 10 baugleiche Resonatoren, die zum einen unterschiedlich bedämpft und zum anderen verschieden im Hallraum angeordnet waren.

Die gewählten Mess- und Anregungspunkte sowie die Abmessungen des Hallraums finden sich im Anhang der Projektarbeit von M. Schramm²⁴.

Die äquivalente Schallabsorptionsfläche des Prüfobjekts A_T errechnet sich nach DIN EN ISO 354 wie folgt:

$$A_T = A_2 - A_1 = 55,3V \left(\frac{1}{c_2 T_2} - \frac{1}{c_1 T_1} \right) - 4V(m_2 - m_1) \quad (4.19)$$

V : Volumen des leeren Hallraumes

A_1 : äquivalente Schallabsorptionsfläche des leeren Hallraums

A_2 : äquivalente Schallabsorptionsfläche Hallraums mit Prüflingen

c_1, T_1, m_1 : Schallgeschwindigkeit, Nachhallzeit und Luftabsorptionskoeffizient (nach ISO 9613-1) bei der Messung im leeren Hallraum

c_2, T_2 und m_2 : Schallgeschwindigkeit, Nachhallzeit und Luftabsorptionskoeffizient (nach ISO 9613-1²⁵) bei der Messung mit Prüflingen

Damit folgt für den Schallabsorptionsgrad des Prüfobjekts:

$$\alpha_s = \frac{A_T}{S} \quad (4.20)$$

S : die vom Prüfobjekt überdeckte Fläche

In Abbildung 33 und Abbildung 34 sind die unterschiedlichen Anordnungsvarianten des mit Glasvlies GV 60/A2 bedämpften Resonators dargestellt. Bei der Anordnung der Reso-

²³ vgl.: (DIN EN ISO 354, Dezember 2003)

²⁴ vgl.: (Schramm, Projektarbeit, 2010)

²⁵ vgl.: (ISO 9613-1, June, 1993)

natoren in den Raumkanten bzw. -ecken wurde eine deutliche Erhöhung des Schallabsorptionsgrades erwartet., da wie aus der Theorie bekannt, ein Helmholtzresonator, als Druckabsorber wirkend, in den Raumkanten 4 mal und in den Ecken sogar bis zu 8 mal so effektiv ist wie frei im Raum.²⁶

Ähnlich wie bei einem Streifenabsorber wurde durch die periodische Anordnung der Resonatoren ebenfalls ein Ansteigen des Schallabsorptionsgrads erwartet (vgl. Abbildung 34 Mitte, Abstand von Mündung zu Mündung, hintereinander ca. 0,8 m entspricht einer Wellenlänge mit $f \sim 430$ Hz; nebeneinander ca. 2,0 m entspricht einer Wellenlänge mit $f \sim 170$ Hz).



Abbildung 33: Anordnung der Resonatoren in den Raumkanten (3,3,3,1) und in den Raumecken (4,4,2,2)



Abbildung 34: Verschiedene Anordnung der Resonatoren innerhalb der Prüffläche

Als Bedämpfungsvarianten wurden untersucht:

- Bedämpfung der Mündung mit Glasvlies, das außen ca. 8 mm vor der Mündung angebracht wurde
- Bedämpfung der Resonatoren mit 50 mm Mineralwolle innerhalb des Resonators
- Frequenz-kaskadierte Resonatoren nach Kapitel 4.6.4, ebenfalls mit Glasvlies bedämpft

In Abbildung 35 sind die Absorptionsgrade mit verschiedenen Bezugswerten dargestellt. Als Bezug wurde zum einen die Nachhallzeit des leeren Raumes (vgl. Gleichung (4.19)) und zum andern die Nachhallzeit des Raumes samt den verschlossenen

²⁶ vgl.: z.B. (Fasold & Veres, 2003)

Resonatoren bei gleicher Anordnung gewählt. Durch den Bezug auf die verschlossene Variante isoliert man die Helmholtzresonanz, da sowohl Hohlraum- als auch Plattenmoden sowie die Absorption des Gipskartons (die bei beiden Messungen vorhanden sind) verschwinden. Bildet man nun die Differenz der beiden Kurven aus Abbildung 35 links, sieht man den reinen Einfluss der Plattenresonanz und des Gipskartons (vgl. Abbildung 35 rechts). Als geometrische Bezugsfläche wurde $4,35 \text{ m}^2$ gewählt, das entspricht der überdeckten Fläche durch die Prüflinge.

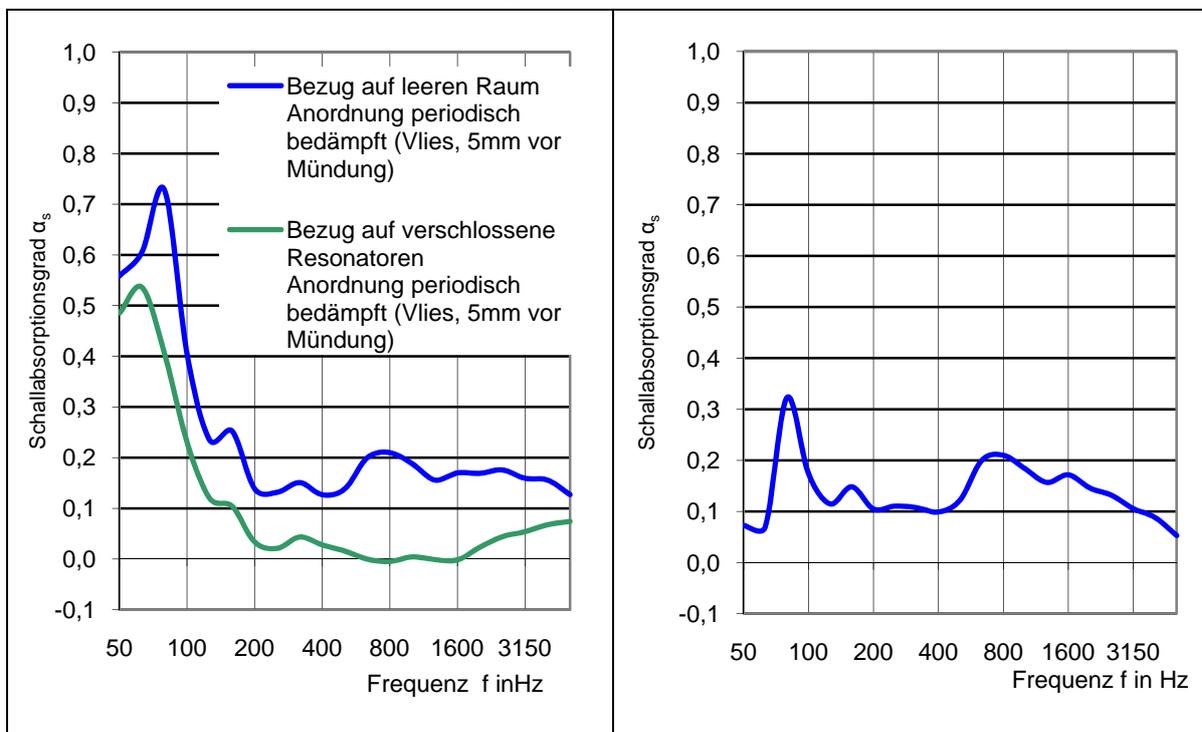


Abbildung 35: Links, Absorptiongrad bei unterschiedlichem Bezug; rechts, Einfluss der Plattenmode und des Gipskartons

Um die unterschiedlichen Bedämpfungsvarianten zu vergleichen, ist wie in Abbildung 36 zu sehen, der Schallabsorptionsgrad angegeben. Als Referenz-Nachhallzeit wurde immer die inaktive Variante (Mündungen der Helmholtzresonatoren mit Klebeband verschlossen) bei gleicher Anordnung gewählt. Außerdem wurde auf die Überdeckungsfläche von $4,35 \text{ m}^2$ bezogen.

Im Unterschied zur Messung im Impedanzrohr erkennt man, dass die mit Glasvlies bedämpfte Variante nun vom Maximalwert kleiner, die Halbwertsbreite dafür aber größer als bei der unbedämpften Variante ist. Das würde nun wiederum dafür sprechen, dass man in diesem Fall über der Anpassung liegt (vgl. nochmal Kapitel 4.7.1). Daraus lässt sich schließen, dass sich die Helmholtzresonatoren bei diffusem Schalleinfall anders verhalten als bei senkrechtem.

Vergleichbar jedoch ist das Ergebnis der innen am Resonatorboden mit Mineralwolle ausgekleideten Resonatoren. Ähnlich wie bei der Impedanzrohrmessung war kein wesentlicher Unterschied zur unbedämpften Variante zu erkennen. Erfreulich ist das Ergebnis der frequenz-kaskadierten Variante. So wird die Schallabsorption durch die Frequenz-Kaskadierung nicht nur breiter, sondern nimmt bei 80 Hz einen Wert von fast 1,0 an.

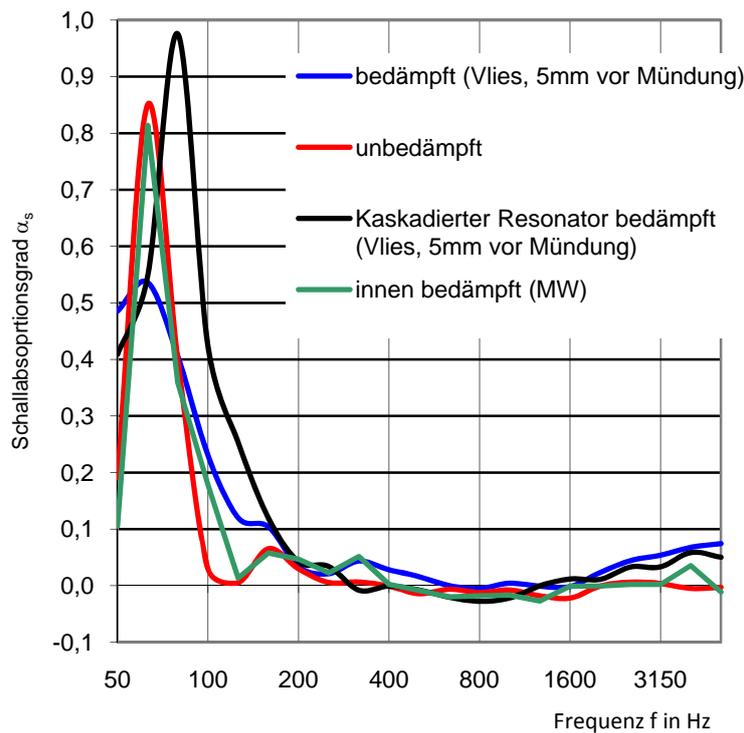


Abbildung 36: Schallabsorptionsgrad der unterschiedlichen Bedämpfungsvarianten

Weiterhin sei noch angemerkt, dass der Anstieg des Schallabsorptionsgrades ab 1600 Hz nachweislich der unterschiedlichen Luftfeuchte bei den jeweiligen Messungen geschuldet ist.

Abbildung 37 zeigt den Einfluss der unterschiedlichen Anordnungsvarianten. Angegeben ist jetzt jedoch die äquivalente Schallabsorptionsfläche pro Helmholtzresonator, bezogen auf die Nachhallzeit des leeren Hallraumes, wobei auf die Absorption des Gipskartons und durch die Platteneigenmoden korrigiert wurde (vgl. Abbildung 35 rechts). Wie erwartet steigt der Absorptionsgrad bei der Anordnung in den Raumecken im Vergleich zur periodischen Anordnung fast um das 4-fache an. Dass die Auswirkung bei der Anordnung in den Ecken deutlich geringer ausfällt als erwartet, mag daran liegen, dass die Resonatoren sich gegenseitig beeinflussen, wenn sie zu nah beieinander liegen. Außerdem waren nicht in jeder Raumecke gleich viel Absorber angeordnet (vgl. Abbildung 33 links).

Auch bei der periodischen Anordnung ist der Schallabsorptionsgrad größer als bei der statistischen bzw. Blockanordnung.

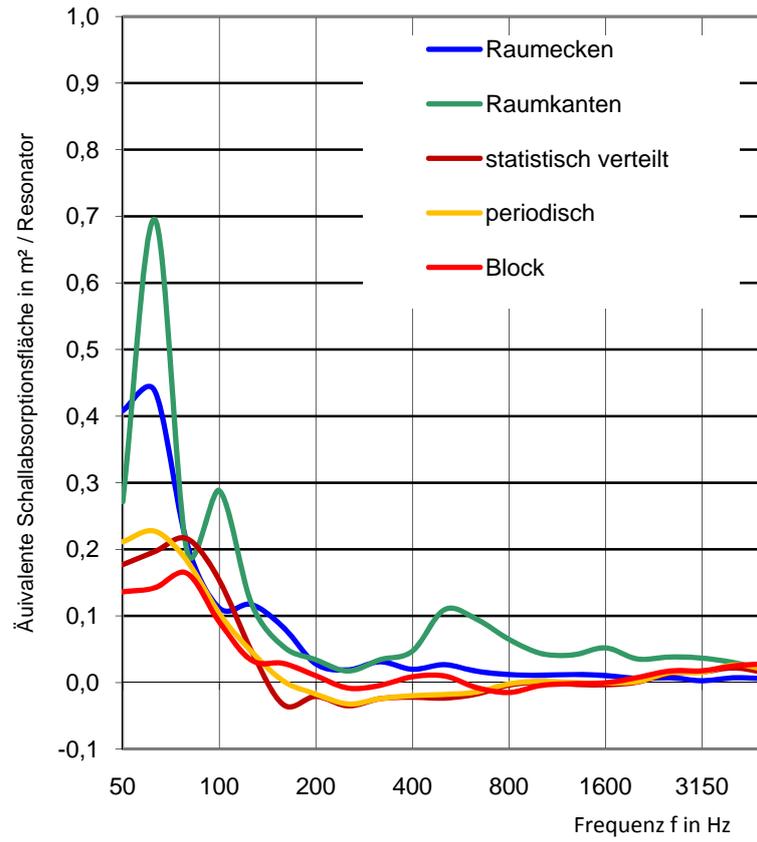


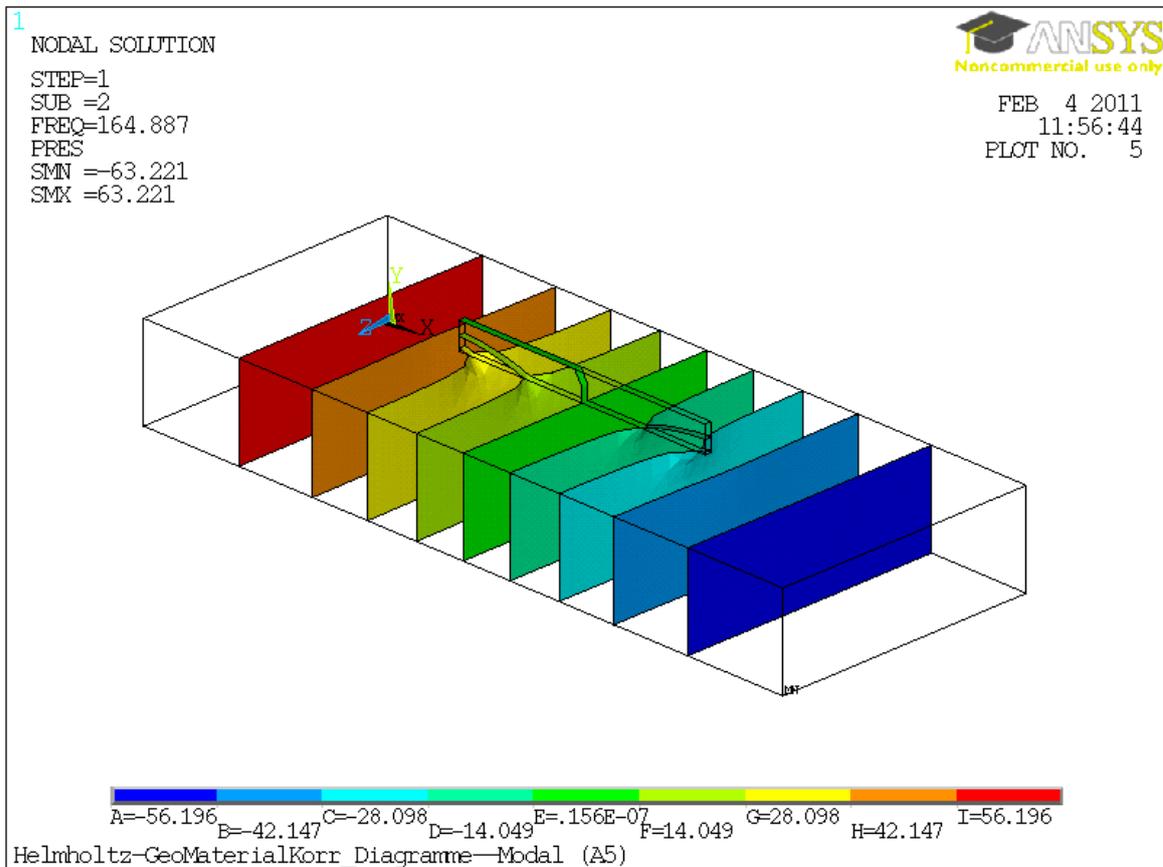
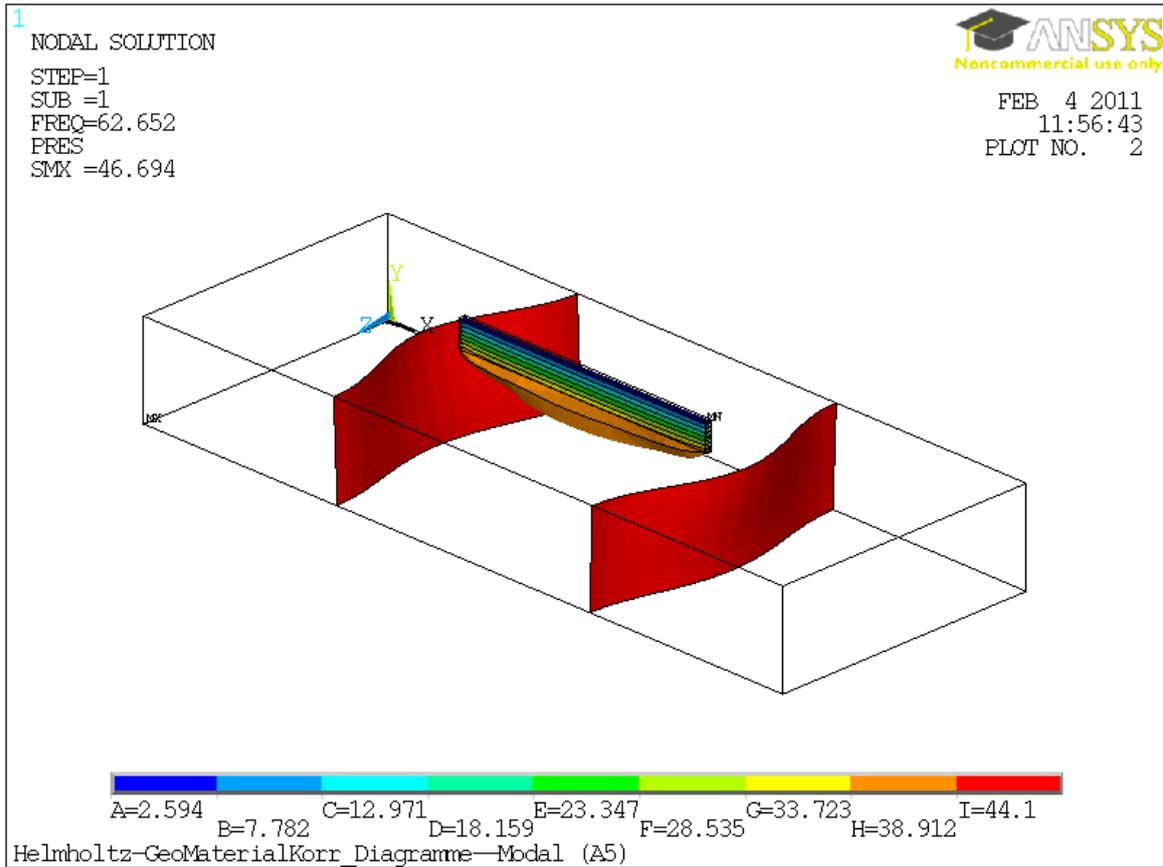
Abbildung 37: Äquivalente Schallabsorptionsfläche der Anordnungsvarianten

4.8 FE Simulation

Als begleitende Untersuchung für das Verständnis der Helmholtzresonatoren wurden FE-Simulationen des Resonators in ANSYS durchgeführt. Eine erste Modellerstellung erfolgte durch die Fa. CADFEM. In der Simulation wird die Mündungskorrektur des Resonators als zusätzliche Luftmasse modelliert. Die Höhe dieser zusätzlichen Schlitzmasse wurde auf den zweifachen Wert des aus Abbildung 12 ablesbaren Wertes gesetzt. Im folgenden werden ausschließlich die Ergebnisse für die Modellierung der Luft des Helmholtzresonators in einem als starr angenommenen Resonatorkasten gezeigt. Weitere Modelle, die die Kopplung des Luftvolumens mit den elastischen Wänden in Form einer Fluid-Struktur-Wechselwirkung einbeziehen als auch die Modellierung des Helmholtzresonators in einem nachgebildeten Gefachbereich wurden erstellt, würden aber den Rahmen des Abschlussberichtes sprengen und sind für die Ergebnisse des Forschungsprojektes auch nur von nachrangiger Bedeutung.

Die folgenden Bilder stellen die Schalldruckverteilung im Helmholtzresonator dar. Beim Vergleich ist unbedingt auf die Farbskala zu achten. In den ersten beiden Bildern bedeutet „blau“ einen ganz geringen Schalldruck, während in den beiden letzten Bildern „blau“ und „rot“ maximalen bzw. minimalen Schalldruck symbolisieren, geringer Schalldruck durch die Farbe „grün“ abgebildet ist.

Die Modellierung erfordert als Randbedingung, dass der Schalldruck identisch Null auf der als zusätzlichem Luftquader über der Resonatoröffnung modellierten Mündungskorrektur ist. In den ersten beiden Bildern sieht man Flächen gleichen Luftdrucks quer zur Längsachse des Resonators. Das obere Bild zeigt die Druckverteilung in der Helmholtzresonanz, das untere für die erste Eigenmode des Lufthohlraums. Während in der Helmholtzresonanz es auf Grund einer Bewegung der Luftmasse in der Resonatoröffnung incl. Mündungskorrektur zu einer quasi gleichmäßigen Druckerhöhung im gesamten Resonatorkasten kommt, sieht man bei der ersten Eigenschwingung die Druckverteilung einer stehenden Welle, bei der die Resonatorlänge einer halben Wellenlänge entspricht. Die berechneten Resonanzfrequenzen stimmen sehr gut mit den Messungen überein. Die beiden letzten Bilder zeigen den gleichen Sachverhalt, nur als Schnitt parallel zur sowie in der Längsachse des Helmholtzresonators.



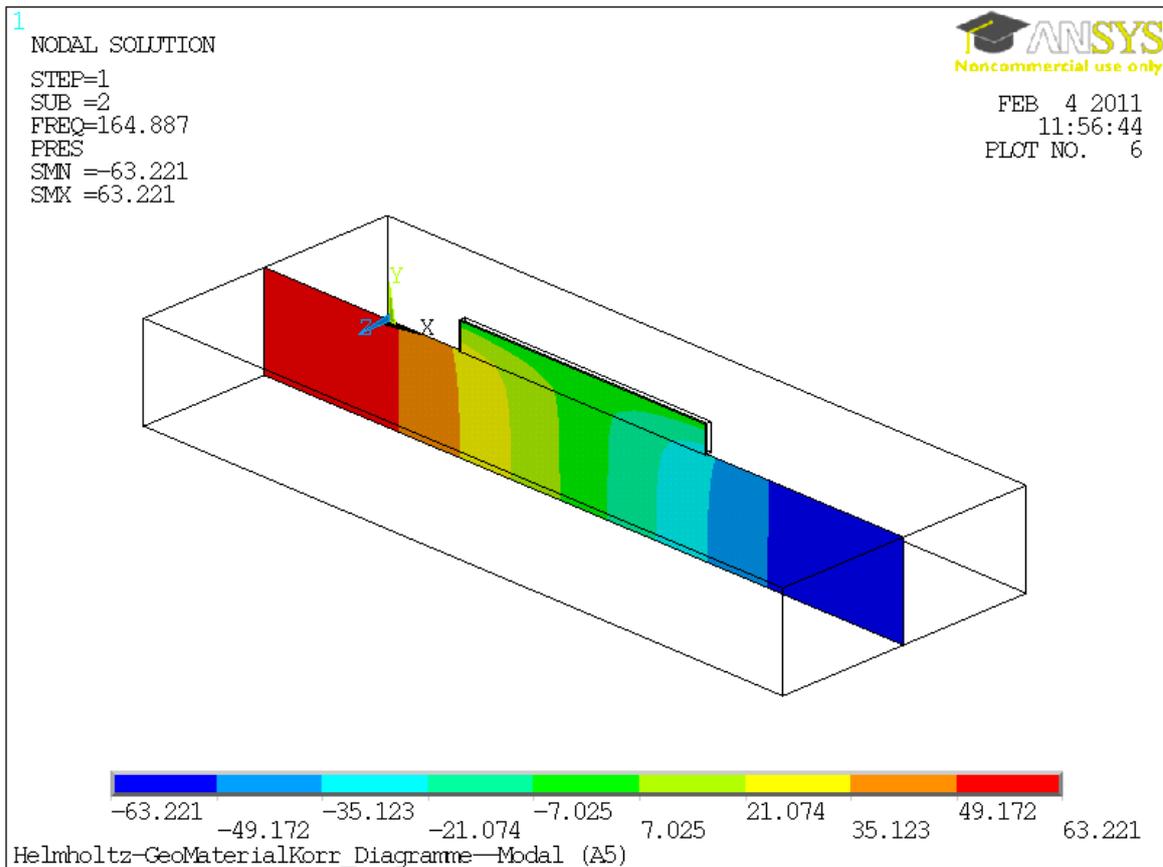
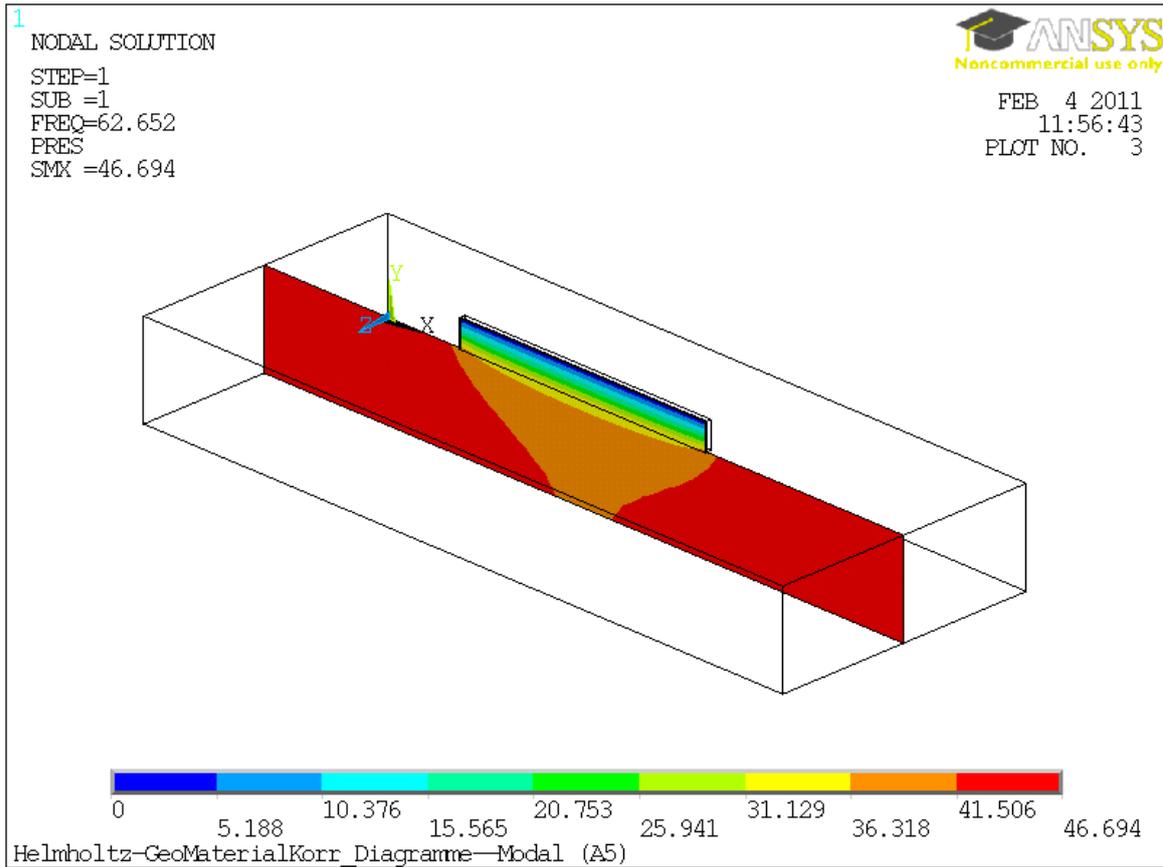


Abbildung 38: Schalldruckverteilung im Resonator für die Helmholtzresonanz als auch für die erste Eigenmode des Resonator-Luftvolumens

Arbeitspaket III & IV

5 Darstellung der verschiedenen Deckenaufbauten

5.1 Deckenaufbau mit Einzelresonator

Anfangs wurde der Gefach mit Polyesterfliesabsorbern ausgekleidet (siehe Abbildung 6). Ebenso wurde seitlich zwischen den Resonatoren und den Holzbalken Mineralwolle eingebracht. Die Anordnung der zehn Resonatoren erfolgte wahllos bzw. unregelmäßig; sie wurden mit der Mündung nach unten (zur Unterdecke) hin zeigend auf Holzklötzchen mit Elastomeren aufgelagert. Die Unterdecke blieb bei diesem Aufbau vollständig geschlossen.

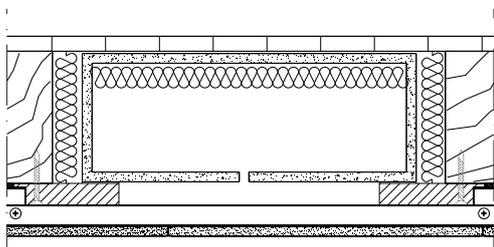
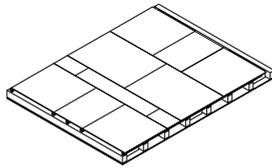
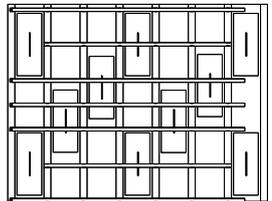
<u>Nr.</u>	<u>Ist-Frequenz</u>	<u>Anzahl</u>	<u>Spannrichtung UK</u>	<u>Gefachdämmung</u>	<u>Anbindung</u>
5.1.1	66 Hz	10	Quer zur Balkenlage	Alle Hohlräume + seitlich	Gefach
					
					

Abbildung 39: Aufbau mit Einzelresonatoren

5.2 Deckenaufbau mit zweifach frequenz-kaskadierten Resonatoren

Auch bei diesem Aufbau fand eine Auskleidung des Gefachs wie bei Deckenaufbau unter Kap. 5.1 mit Absorbieren und Mineralwolle statt. Im Gegensatz jedoch wurden die Helmholtzresonatoren an den Empfangsraum angekoppelt.

Um dies zu realisieren, war eine entsprechende Aussparung der Unterdecke an den Mündungen nötig. Die zusätzlich entstandenen Fugen wurden mit Silikon abgedichtet. Wiederum waren die Resonatoren auf Holzklötzchen gelagert. Zwischen den Auflageflächen wurde eine Dämm- bzw. Entkopplungsschicht eingelegt.

Um Messergebnisse des gleichen Aufbaus mit bedämpften Mündungen der Helmholtzresonatoren zu erhalten, wurde je Resonator ein Glasflies angebracht. Dieses ist auf der unteren Kante der Gipskartondecke befestigt worden, so dass die Bedämpfung einen Abstand von ca. 12,5 mm (=Plattenstärke) zur Mündung einhält (siehe Abbildung 41, Zeichnung links unten).

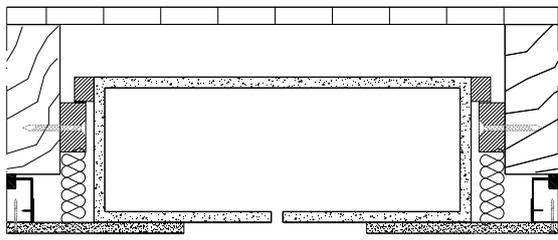
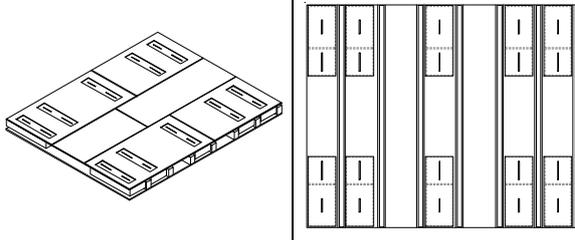
<u>Nr.</u>	<u>Ist-Frequenz</u>	<u>Anzahl</u>	<u>Spannrichtung UK</u>	<u>Gefachdämmung</u>	<u>Anbindung</u>
5.2.1	60 Hz , 93 Hz	10	längs zur Balkenlage	Alle Hohlräume + seitlich	Empfangsraum
					
					

Abbildung 40: Aufbau zweifach frequenz-kaskadierter Resonatoren

Für eine möglichst gleichmäßige körperschalltechnische Verbindung der Resonatoren zur Gipskartonunterdecke wurden in einem weiteren Aufbau zusätzlich Schrauben eingedreht

(s. Abbildung 41 links unten). Diese sollten einen definierten Kontakt beider Bauteile herstellen.

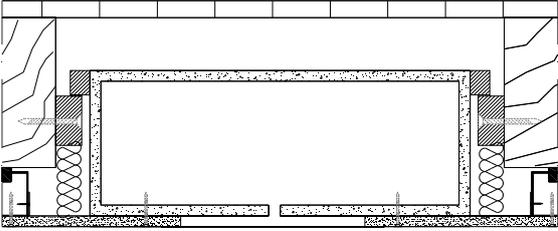
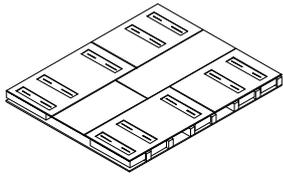
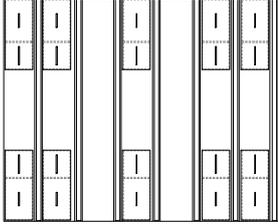
<u>Nr.</u>	<u>Ist-Frequenz</u>	<u>Anzahl</u>	<u>Spannrichtung UK</u>	<u>Gefachdämmung</u>	<u>Anbindung</u>
5.2.2	60 , 93 Hz	10	längs zur Balkenlage	Alle Hohlräume + seitlich	Empfangsraum
					

Abbildung 41: Aufbau zweifach frequenz-kaskadierter Resonatoren, zusätzlich verschraubt

5.3 Deckenaufbau mit vierfach frequenz-kaskadierten Resonatoren

Der hier geschilderte Deckenaufbau mit den vierfach frequenz-kaskadierten Resonatoren war hinsichtlich Lagerung und Positionierung der Resonatoren gleich dem unter Kap. 5.1 beschriebenen. Untersucht wurde die Ausrichtung der Mündung im Gefachbereich, indem die zehn Helmholtzresonatoren einmal mit ihren Mündungen nach oben und einmal nach unten zeigend positioniert waren.

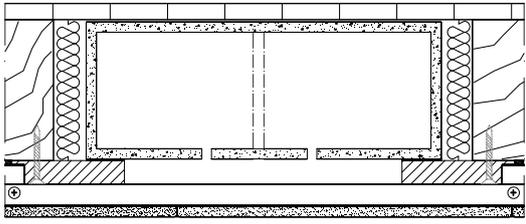
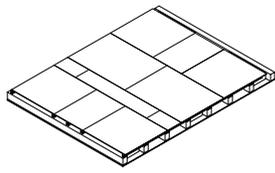
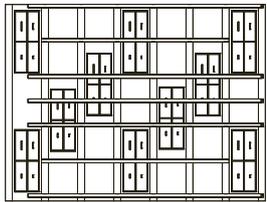
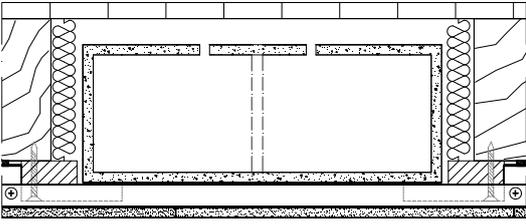
<u>Nr.</u>	<u>Mündungspos.</u>	<u>Ist-Frequenz</u>	<u>Anzahl</u>	<u>Spannrichtung UK</u>	<u>Gefachdämmung</u>	<u>Anbindung</u>
5.3.1	Unten	53, 65, 78, 94 Hz	10	quer zur Balkenlage	Alle Hohlräume + seitlich	Gefach
5.3.2	Oben					
						
						

Abbildung 42: Aufbau vierfach frequenz-kaskadierter Resonatoren im Gefach

Auch die vierfach frequenz-kaskadierten Resonatoren wurden an den Empfangsraum angebunden, siehe Abbildung 43. Der Deckenaufbau selbst war nahezu gleich wie der in Kap. 5.2 beschriebene.

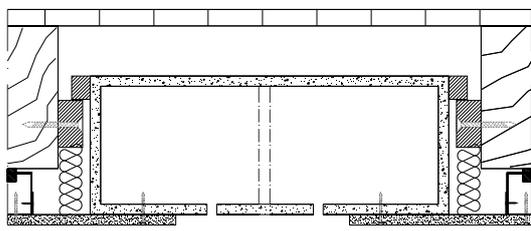
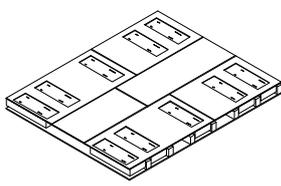
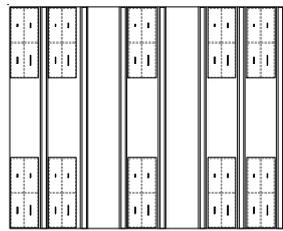
<i>Nr.</i>	<i>Ist-Frequenz</i>	<i>Anzahl</i>	<i>Spannrichtung UK</i>	<i>Gefachdämmung</i>	<i>Anbindung</i>
5.3.3	53, 65, 78, 94 Hz	14	längs zur Balkenlage	Alle Hohlräume + seitlich	Empfangsraum
					
					

Abbildung 43: Aufbau vierfach frequenz-kaskadierte Resonatoren, Anbindung Empfangsraum

5.4 Deckenaufbau mit Resonatoren mit Randmündung

Zur Ausnutzung der erhöhten Schallabsorption in den Raumkanten wurde die Mündung möglichst nahe in diesem Bereich positioniert. Zum Einsatz kamen dabei die Einzelresonatoren mit Randmündung, siehe 4.6.5. Der Deckenaufbau wurde so konstruiert, dass mit geringem Änderungsaufwand alle Varianten der Ankopplung realisierbar waren. Sowohl die Luftschallkopplung an den Empfangsraum bzw. das Gefach als auch die Körperschallkopplung an die Unterdecke konnten somit untersucht werden. Dazu wurden die Resonatoren mit jeweils vier Schnüren versehen, welche zur Höhenjustierung und Ausrichtung dienten. Die Schnüre wurden durch Haken, die in die Verlegespanplatte gedreht waren, umgelenkt und konnten dadurch im Empfangsraum befestigt und bedient bzw. eingestellt werden, was in Abbildung 44 und Abbildung 45 deutlich wird.

Zur Anbindung an den Empfangsraum (siehe Abbildung 44) wurden die Bereiche der einzelnen Mündungen in der Unterdecke ausgespart, wie im Bild links unten zu erkennen ist. Die Fugen zwischen Resonatoren und Unterdecke wurden mit Fensterkitt abgedichtet.

<u>Nr.</u>	<u>Kopplung zur Unterdecke</u>	<u>Ist-Frequenz</u>	<u>Anzahl</u>	<u>Spannrichtung UK</u>	<u>Gefachdämmung</u>	<u>Anbindung</u>
5.4.1	Ja	61 Hz	14	längs zur Balkenlage	ohne	Empfangsraum
5.4.2	Nein					

Abbildung 44: Aufbau Einzelresonator mit Randmündung, gekoppelt

Für den in Abbildung 45 dargestellten Versuchsaufbau hob man die Resonatoren mit Hilfe der Schnüre an. Somit waren diese im Gefach frei schwebend, wodurch der Körperschallanteil minimiert wurde. Die Unterdecke war dabei vollständig geschlossen. Die seitlich angeordneten schmalen Gipskartonstreifen dienten als eine Art Revisionsöffnung, um die Resonatoren über ihre Mündung zu deaktivieren (vgl. Abbildung 45 unten).

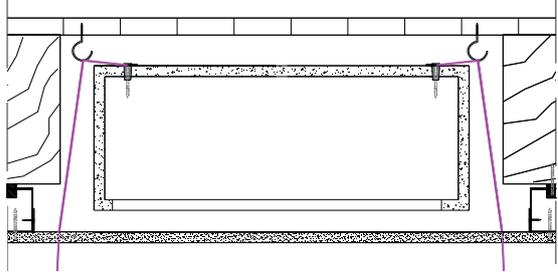
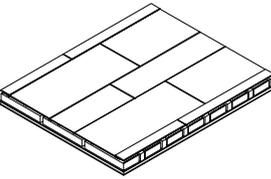
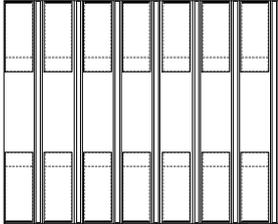
<u>Nr.</u>	<u>Kopplung</u>	<u>Ist-Frequenz</u>	<u>Anzahl</u>	<u>Spannrichtung UK</u>	<u>Gefachdämmung</u>	<u>Anbindung</u>
5.4.3	entkoppelt	61 Hz	14	längs zur Balkenlage	ohne	Gefach
						
						

Abbildung 45: Aufbau Einzelresonatoren mit Randmündung, entkoppelt

5.5 Deckenaufbau mit verschiedenen Resonatoren

Für die in diesem Unterkapitel beschriebene Deckenkonstruktion wurden die Einzelresonatoren mit Randmündung und die vierfach frequenz-kaskadierten Resonatoren, deren Mündungen alle zur Unterdecke zeigten, kombiniert. Die Holzbalkendecke enthielt somit das Maximum an mit dieser Bauart realisierbaren Helmholtzresonatoren. Die Anordnung der Einzelresonatoren im Randbereich war gleich der in Kap. 5.4 beschriebenen. In der Mitte der einzelnen Gefache wurde jeweils ein vierfach frequenz-kaskadierten Helmholtzresonator angeordnet.

Auf Unregelmäßigkeit wurde auch bei den Abständen der CD-Profile innerhalb der Unterkonstruktion Wert gelegt, um mögliche mechanische Resonanzen nicht zu begünstigen. Bei dem in Abbildung 46 dargestellten Aufbau wurden die Resonatoren hinsichtlich Körperschallkopplung durch Verschraubung an die Verlegespanplatte mittels vier Spanplattenschrauben mit der Abmessung 6 x 200 mm montiert. Zur besseren Übertragung des von der Schraube ausgehenden Anpressdrucks in den Resonator wurden zusätzlich Unterlegscheiben verwendet. Somit war eine kraftschlüssige und idealerweise flächige Ankopplung gewährleistet.

Um Veränderungen an der Mündung vorzunehmen, wie z.B. das Verschließen oder die Bedämpfung, reichte es aus, den mittleren und die äußeren beiden Gipskartonstreifen zu demontieren (siehe Abbildung 46 unten links).

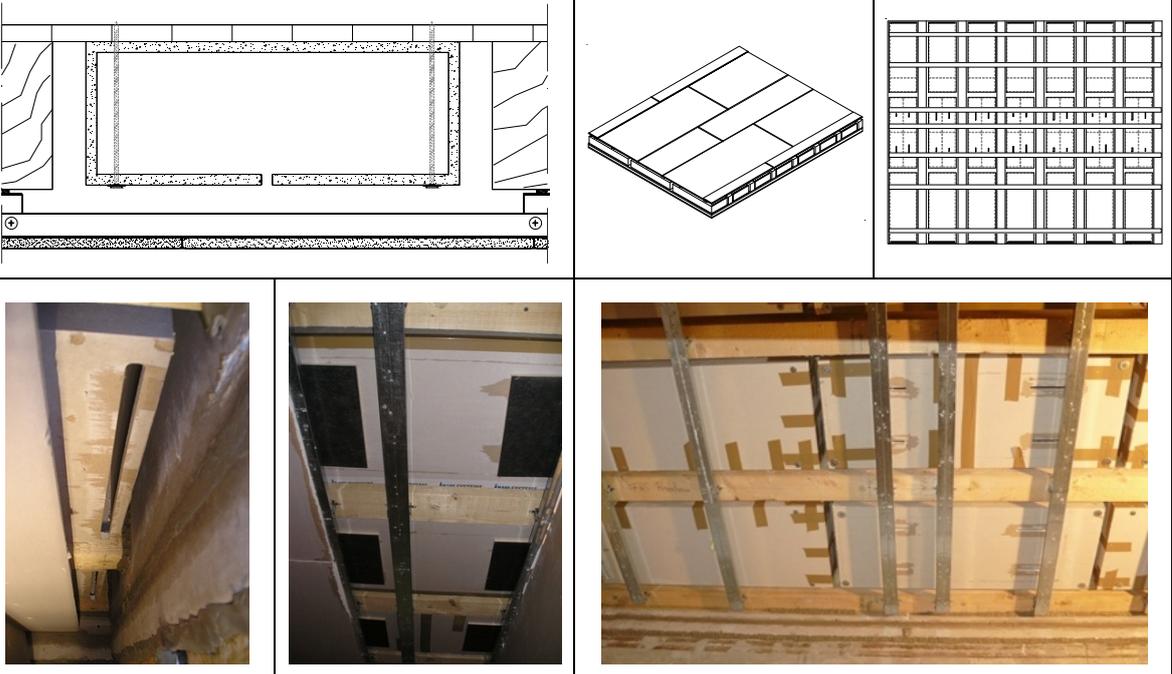
<u>Nr.</u>	<u>Kopplung</u>	<u>Ist-Frequenz</u>	<u>Anzahl</u>	<u>Spannrichtung</u> <u>UK</u>	<u>Gefachdämmung</u>	<u>Anbindung</u>
5.5.1	an Verlegespanplatte	61 Hz & 53, 65, 78, 94 Hz	21 7 x 4-fach 14 x Randres.	quer zur Balkenlage	ohne	Gefach
						

Abbildung 46: Aufbau verschiedene Resonatoren, gekoppelt

Analog zu dem Aufbau Nr. 5.5.1 sollte nun eine körperschallentkoppelte Montagevariante untersucht werden. Hierzu entfernte man die zuvor beschriebenen Schrauben und befestigte stattdessen Polypropylen-Schnüre an die Holzbalken. Wie in Abbildung 47 zu sehen ist, wurden die Resonatoren auf den Schnüren hängend aufgelagert.

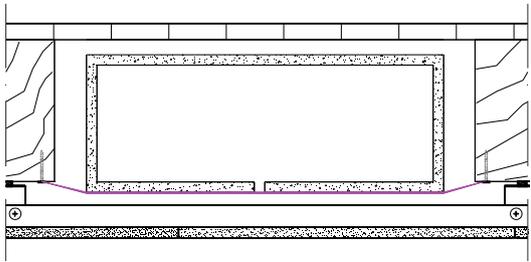
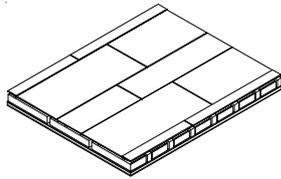
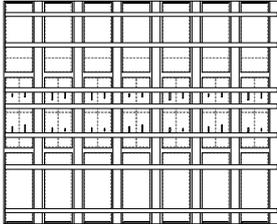
<u>Nr.</u>	<u>Kopplung</u>	<u>Ist-Frequenz</u>	<u>Anzahl</u>	<u>Spannrichtung UK</u>	<u>Gefachdämmung</u>	<u>Anbindung</u>
5.5.2	entkoppelt	61 Hz & 53, 65, 78, 94 Hz	21 7 x 4-Fach 14 x Randres	quer zur Balkenlage	ohne	Gefach
						
						

Abbildung 47: Aufbau verschiedenen Resonatoren, entkoppelt

Die Positionierung der 21 Resonatoren war im folgenden Aufbau gleich wie in Aufbau Nr. 5.5.1 und 5.5.2, mit dem Unterschied, dass nun alle Mündungen in die umgekehrte Richtung nach oben zeigten. Die Spannrichtung der Unterkonstruktion verlief wieder parallel zu den Holzbalken. Dies war nötig, da bei diesem Aufbau die Ankopplung der Resonatoren an die Unterdecke untersucht wurde. Um den Kontakt zwischen Deckenbeplankung und Helmholtzresonatoren zu optimieren, wurden die Stoßflächen mit Spachtelmasse und zusätzlichen Schnellbauschrauben verbunden (siehe Abbildung 48).

Die Schwierigkeit bei diesem Prüfaufbau bestand in der Messung des A/B-Vergleichs (aktive bzw. inaktive Helmholtzresonatoren) ohne die gesamte Unterdecke zu demontieren, zumal alle Mündungen nach oben gerichtet waren. Deshalb führte man zuerst alle Messungen mit geschlossener Mündung durch. Das Klebeband, welches die Mündung verschloss, wie in Abbildung 48 unten links dargestellt, wurde mit einer Schnur verlängert. Durch die Demontage von drei schmalen Gipskartonstreifen der Unterdecke war es nun möglich, das Klebeband mit Hilfe der Schnüre abziehen und die Resonatoren somit aktiv zu schalten.

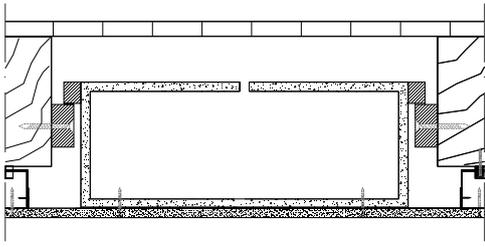
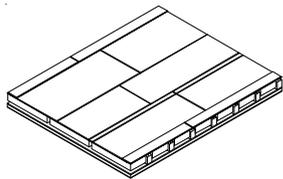
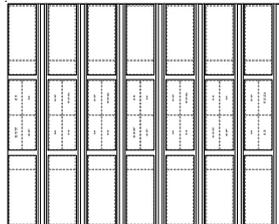
<u>Nr.</u>	<u>Kopplung</u>	<u>Ist-Frequenz</u>	<u>Anzahl</u>	<u>Spannrichtung</u> <u>UK</u>	<u>Gefachdämmung</u>	<u>Anbindung</u>
5.5.3	an Unterdecke	61 Hz & 53, 65, 78, 94 Hz	21 7 x 4-Fach 14 x Randres	längs zur Balkenlage	ohne	Gefach
						
						

Abbildung 48: Aufbau verschiedene Resonatoren, gekoppelt mit Unterdecke

5.6 Deckenaufbau mit freihängenden Resonatoren

Um die guten Ergebnisse aus den Messungen mit den Deckenaufbauten 5.5.1 und 5.5.2 durch eine weitere Messreihe nochmals zu bestätigen, entstand der Deckenaufbau 5.6 mit den freihängenden Resonatoren.

Es wurde die maximale Anzahl von 21 Resonatoren verwendet. Drei verschiedene Resonatortypen kamen zum Einsatz: jeweils 7 Resonatoren mit dem ungeteilten Volumen von 58,8 dm³ wurden auf 50 Hz bzw. 63 Hz abgestimmt. Bei weiteren 7 Resonatoren wurde das Volumen geteilt. Diese zweifach frequenz-kaskadierten Resonatoren hatten ein kleineres Volumen mit ca. 26 dm³ und ein größeres mit etwa 32 dm³. Diese 7 Kästen weisen eine Resonanzfrequenz bei 80 Hz und bei 90 Hz auf.

Die Verteilung der unterschiedlichen Resonatoren im Gefach erfolgte zufällig. Da immer 3 Kästen in ein Gefach passen, wurde darauf geachtet, dass nie zwei Resonatoren einer Bauweise und gleicher Abstimmfrequenz in denselben Gefachbereich gehängt wurden. Die Verteilung der Resonanzfrequenzen ergab sich wie in Zeile 4 der nachstehenden Abbildung 49 zu sehen.

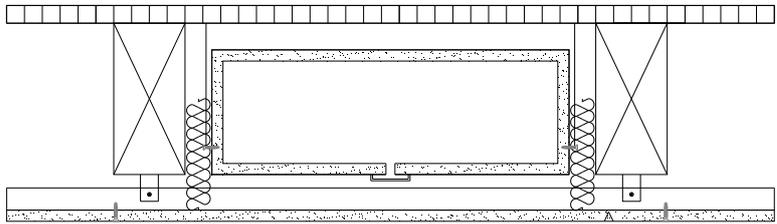
Alle Resonatoren wurden an Schnüren in das Gefach gehängt, die Ankopplung der Resonatoren erfolgte damit an den Gefachraum. Lose zwischen den Kästen und den Holzbal-

ken war Mineralwolle zur Bedämpfung des Gefachraums eingelegt. Um herauszufinden, welche Wirkung die Dämmung auf die Messergebnisse hat, wurde einmal mit und einmal ohne Dämmung gemessen. Als Referenzmessung diente eine Messung, bei der alle Resonatoren durch Zukleben der Schlitze mit Klebeband inaktiv gemacht wurden.

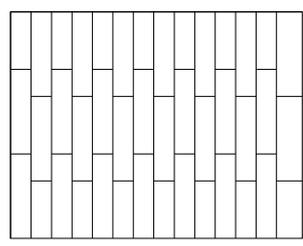
Zum Zweck der Dämpfung der Helmholtzresonatoren waren vor den Schlitzöffnungen mit Vlies bespannte Rahmen befestigt. Durch den Strömungswiderstand des Vlieses wurde eine breitbandigere Absorption möglich. Diese Konstruktion war in den vorangegangenen Messaufbauten genauso ausgeführt worden.

Bei Deckenaufbau 5.6 wurde die Unterdecke auf Grund von Umbaumaßnahmen zuerst in 30 cm breiten Streifen ausgeführt. Dann wurden die Messungen erneut durchgeführt mit einer Unterdeckenkonstruktion aus großformatigen Gipskartonplatten.

<i>Nr.</i>	<i>Kopplung</i>	<i>Ist-Frequenz</i>	<i>Anzahl</i>	<i>Spannrichtung UK</i>	<i>Gefachdämmung</i>	<i>Anbindung</i>
5.6.1	frei hängend an Schnüren	50 Hz 63 Hz 80 Hz & 90 Hz	Gesamt 21 7x50Hz 7x63Hz 7x80/90Hz	quer zur Balkenlage	mit	Gefach



Plattenanordnung Unterdecke







63	80	63	50	80	63	80
	90			90		90
50	50	50	80	50	50	63
			90			
80	63	80	63	63	80	50
90		90			90	

Abbildung 49: Aufbau freihängende Resonatoren mit Gefachdämmung

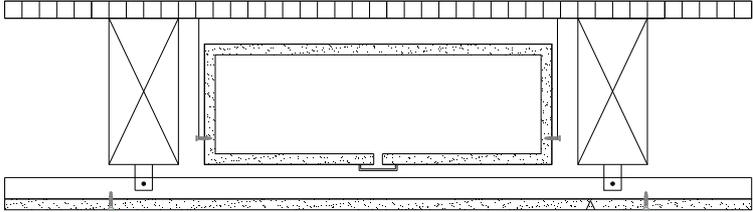
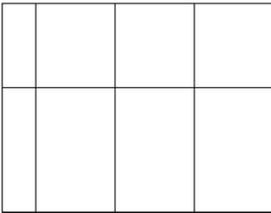
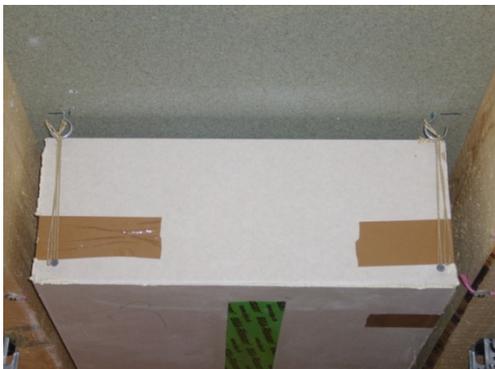
<u>Nr.</u>	<u>Kopplung</u>	<u>Ist-Frequenz</u>	<u>Anzahl</u>	<u>Spannrichtung UK</u>	<u>Gefachdämmung</u>	<u>Anbindung</u>																					
5.6.2	frei hängend an Schnüren	50 Hz 63 Hz 80 Hz & 90 Hz	Gesamt 21 7x50Hz 7x63Hz 7x80/90Hz	quer zur Balkenlage	Ohne	Gefach																					
					Plattenanordnung Unterdecke 																						
				<table border="1"> <tbody> <tr> <td>63</td> <td>80 90</td> <td>63</td> <td>50</td> <td>80 90</td> <td>63</td> <td>80 90</td> </tr> <tr> <td>50</td> <td>50</td> <td>50</td> <td>80 90</td> <td>50</td> <td>50</td> <td>63</td> </tr> <tr> <td>80 90</td> <td>63</td> <td>80 90</td> <td>63</td> <td>63</td> <td>80 90</td> <td>50</td> </tr> </tbody> </table>			63	80 90	63	50	80 90	63	80 90	50	50	50	80 90	50	50	63	80 90	63	80 90	63	63	80 90	50
63	80 90	63	50	80 90	63	80 90																					
50	50	50	80 90	50	50	63																					
80 90	63	80 90	63	63	80 90	50																					

Abbildung 50: Aufbau freihängende Resonatoren ohne Gefachdämmung

5.7 Deckenaufbau mit dem Gefach als Helmholtzresonator

Messreihe 5.7 ist als eigenständige Messreihe zu betrachten. Der Deckenaufbau weicht von allen vorangegangenen Aufbauten ab, weil hier auf den Einbau von Helmholtzresonatoren in Form von Gipskartonkästen verzichtet wurde. Das Gefach selbst sollte als Resonator ausgebildet werden. Der Vorteil bei dieser Konstruktion liegt darin, dass das gesamte Gefachvolumen genutzt werden kann. Dieser Deckenaufbau bietet etwa 30 % mehr Volumen.

Um den Frequenzbereich von 40 Hz bis 80 Hz abzudecken, wurde das Gefach in kleinere Abteilungen unterteilt. Zur Abtrennung wurden Stellbretter aus Gipskarton im Gefach befestigt. Jede Abteilung wurde mit Acryl abgedichtet, damit luftdichte Resonator-kammern entstehen.

Mit Schlitzern versehene Gipskartonstreifen wurden als Resonatoröffnung direkt auf die Unterseite des Holzbalkens geschraubt und ebenfalls mit Acryl verfugt. Eine dünne

Schicht Dämmmaterial im Gefach sollte das Absorptionsvermögen verbessern. Die Unterdecke wurde mit großformatigen Gipskartonplatten 1,25 m x 2,00 m ausgeführt.

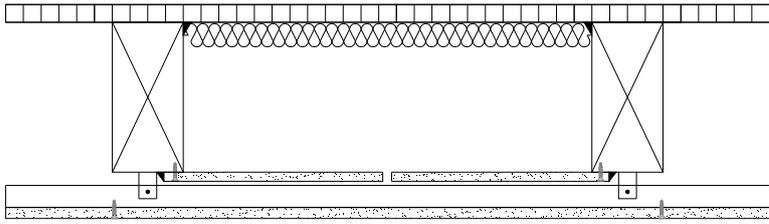
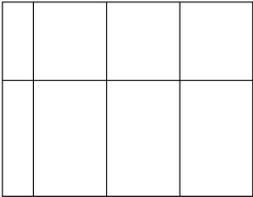
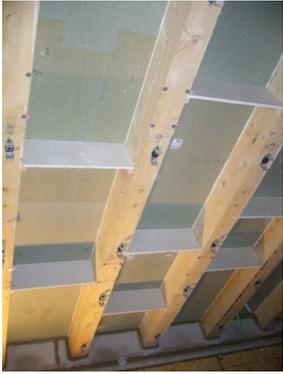
<u>Nr.</u>	<u>Kopplung</u>	<u>Ist-Frequenz</u>	<u>Anzahl</u>	<u>Spannrichtung UK</u>	<u>Gefachdämmung</u>	<u>Anbindung</u>																													
5.7	Gefach als Resonator ausgebildet	siehe Abbildung	siehe Abbildung	quer zur Balkenlage	mit	----																													
					Plattenanordnung Unterdecke 																														
				<table border="1"> <tr> <td>56</td> <td rowspan="2">44</td> <td>52</td> <td rowspan="2">46</td> <td>53</td> <td>59</td> <td>45</td> </tr> <tr> <td>36</td> <td>54</td> <td>46</td> <td>46</td> <td rowspan="2">52</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">50</td> <td>55</td> <td>37</td> <td rowspan="2">39</td> <td rowspan="2">50</td> <td rowspan="2">57</td> <td rowspan="2">35</td> </tr> <tr> <td>53</td> <td>35</td> <td>54</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">45</td> <td rowspan="2">53</td> <td>41</td> <td rowspan="2">55</td> <td>38</td> <td>36</td> <td>59</td> </tr> </table>			56	44	52	46	53	59	45	36	54	46	46	52	50	55	37	39	50	57	35	53	35	54	45	53	41	55	38	36	59
56	44	52	46	53	59	45																													
36		54		46	46	52																													
50	55	37	39	50	57		35																												
	53	35				54																													
45	53	41	55	38	36	59																													
																																			

Abbildung 51: Aufbau Gefach als Helmholtzresonator

6 Darstellung der Messergebnisse

Im Folgenden werden nun die wichtigsten Messergebnisse dargestellt und diskutiert. Zur Übersicht dient dazu die unter 6.1 dargestellte Ergebnismatrix. Dort sind alle gemessenen Aufbauten mit Einzahlwerten zu Trittschall-, Luftschall- und Gehermessungen aufgelistet.

Zur Beurteilung der Wirkung der Helmholtzresonatoren auf die Schallübertragung im tief-frequenten Bereich, insbesondere unter 100 Hz, wurden als Spektrum-Anpassungswerte die hierfür geeigneten, d.h. also die auf den Frequenzbereich bis 50 Hz erweiterten Werte $C_{1,50-2500}$ und $C_{tr,50-3150}$ gewählt. Für die Beurteilung von Gehergeräuschen wurde der beim Begehen durch eine männliche Person mit ca. 75 kg Körpergewicht auf einer „Achterkurve“ unter Einhaltung eines Mindestabstandes von 75 cm zu den Wänden bei einer Schrittfrequenz von 100 Schritten pro Minute ermittelte energetische Mittelwert aus den Terzpegeln bei 50, 63, 80 und 100 Hz herangezogen. Die Messzeit betrug i.d.R. 30 s. Während des Forschungsprojektes wurden die Referenzgeher zweimal gewechselt, so dass ein Vergleich von Absolutwerten auf Grund der Unterschiedlichkeit der Geher nicht möglich ist. Der Wechsel der Referenzgeher ist als Fußnote in der Ergebnismatrix markiert.

Wichtig ist ebenso, dass auch der Vergleich der absoluten Werte für den bewerteten Norm-Trittschallpegel als auch für das bewertete Schalldämm-Maß für verschiedene Varianten nur bedingt möglich sind, da für verschiedene Aufbauten die Abhängung der Unterdecke zur Positionierung der Helmholtzresonatoren mitunter stark verändert werden musste. Nur für den Fall, dass die Unterdeckenabhängung identisch gleich blieb, konnte eine hohe Wiederholbarkeit der Messwerte trotz eines kompletten Ab- und Wiederaufbaus der Unterdecke erzielt werden (s. Abbildung 9). Deshalb sollte vornehmlich die Wirkung der Helmholtzresonatoren durch den Vergleich der Messwerte jedes einzelnen Aufbaus bei aktiven bzw. inaktiven Resonatoren erfolgen.

6.1 Übersichtsmatrix der Einzahlwerte

Tabelle 2: Übersichtsmatrix

Aufbau - Nr.	Prinzipskizze	Erläuterung	Resonatoren	L _{n,w} in dB		C _{l,50-2500} in dB		R _w in dB		C _{tr} in dB		C _{tr 50-3150} in dB		L _{eq, walk, Schuhe 50-100} in dB		L _{eq, walk, Socken, 50-100} in dB		Δ (L _{n,w} + C _{l,50-2500}) in dB		Δ (R _w + C _{tr 50-3150}) in dB		ΔL _{eq,walk,Schuhe,50-100} in dB		ΔL _{eq,walk,Socken,50-100} in dB		
				bedämpft	unbedämpft	bedämpft	unbedämpft	bedämpft	unbedämpft	bedämpft	unbedämpft	bedämpft	unbedämpft	bedämpft	unbedämpft	bedämpft	unbedämpft	bedämpft	unbedämpft	bedämpft	unbedämpft	bedämpft	unbedämpft	bedämpft	unbedämpft	bedämpft
		Referenzaufbau	keine		56,0		8,0		60,0		-13,0		-22,8		61,2		69,4		-		-		-		-	
5.1.1		10 Einzel	aktiv	-	56,9	-	6,6	-	-	-	-	-	-	-	57,2	-	69,4	-	1,2	-	-	-	1,5	-	1,4	
			inaktiv	-	57,5	-	7,2	-	-	-	-	-	-	-	58,6	-	70,8									
5.2.1		10 Zweifach	aktiv	56,9	57,2	6,9	6,0	-	58,1	-	-11,4	-	-20,0	52,6	-	65,7	-		0,7	0,3	-	-0,5	1,3	-	2,5	-
			inaktiv	56,4	56,2	8,1	7,3	-	58,6	-	-11,1	-	-20,0	54,0	-	68,2	-									
5.2.2		10 Zweifach	aktiv	57,9	-	6,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		0,6	-	-	-	-	-	-	
			inaktiv	57,3	-	7,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-									
5.3.1		10 Vierfach	aktiv	-	58,0	-	5,6	-	-	-	-	-	-	-	53,6	-	67,5	-		1,5	-	-	-	-	-	
			inaktiv	-	57,3	-	7,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-									
5.3.2		10 Vierfach	aktiv	-	58,1	-	5,9	-	-	-	-	-	-	-	52,8	-	70,9	-		1,1	-	-	-	-	-	
			inaktiv	-	57,3 *	-	7,8 *	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-									
5.3.3		10 Vierfach	aktiv	59,3	59,4	5,3	4,9	-	-	-	-	-	-	-	58,7	-	68,8		0,2	0,7	-	-	-	1,3	-	1,4
			inaktiv	59,3	59,0	5,5	6,0	-	-	-	-	-	-	-	60,0	-	70,2									
5.4.1		14 Randmünd.	aktiv	60,0	59,7	5,1	4,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		-0,3	0,1	-	-	-	-	-	
			inaktiv	59,0	58,6	5,8	5,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-								
5.4.2		14 Randmünd.	aktiv	61,3	61,6	5,6	5,7	-	55,1	-	-8,4	-	-	-	57,0	-	70,2		-0,1	-0,3	-	-	-	2,0	-	-0,7
			inaktiv	60,1	60,5	6,7	6,5	-	56,7	-	-8,1	-	-	-	59,0	-	69,5									
5.4.3		14 Randmünd.	aktiv	60,0	60,8	7,1	7,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		-0,2	-1,1	-	-	-	-	-	
			inaktiv	61,0	60,9	5,9	5,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-									
5.5.1		21 Randmünd. + vierfach	aktiv	60,1	60,1	2,8	2,5	-	55,9	-	-10,3	-	-12,5	51,4	51,0	63,5	66,8		1,1	1,3	-	1,8	5,6	1,1	3,8	2,6
			inaktiv	60,0	59,5	4,0	4,4	-	56,6	-	-10,0	-	-15,0	57,0	52,1	67,3	69,4									
5.5.2		21 Randmünd. + vierfach	aktiv	-	63,3	-	2,2	-	54,7	-	-7,7	-	-12,3	-	40,0 **	-	57,2 **		-	2,1	-	4,4	-	5,0	-	5,9
			inaktiv	-	64,3	-	3,3	-	53,8	-	-10,9	-	-15,8	-	45,1 **	-	63,1 **									
5.5.3		21 Randmünd. + vierfach	aktiv	-	60,8	-	2,8	-	55,7	-	-10,3	-	-13,3	-	43,2 **	-	56,1 **		-	1,0	-	1,6	-	0,7	-	3,6
			inaktiv	-	60,4	-	4,2	-	56,2	-	-10,8	-	-15,4	-	43,9 **	-	59,7 **									
5.6.1		21 14 einfach 7 zweifach kaskad.	aktiv	60,5	-	2,6	-	56,5	-	-8,5	-	-15,6	-	-	-	50,3	-		3,1	-	1,8	-	-	5,9	-	
			inaktiv	63,2	-	3,0	-	56,3	-	-8,9	-	-17,2	-	-	-	56,2	-									
5.6.2		21	aktiv mit Dämmung	60,5	-	2,6	-	56,5	-	-8,5	-	-15,6	-	-	-	50,3	-		2,8	-	0,3	-	-	-	-1,7	-
			aktiv ohne Dämmung	65,0	-	0,9	-	52,9	-	-7,3	-	-12,3	-	-	-	48,6	-									
5.6.3		21	aktiv ohne Dämmung	65,0	-	0,9	-	52,9	-	-7,3	-	-12,3	-	-	-	48,6	-		0,3	-	1,5	-	-	-	7,6	-
			inaktiv mit Dämmung	63,2	-	3,0	-	56,3	-	-8,9	-	-17,2	-	-	-	56,2	-									
5.7		gesamter Gefachhohlraum	aktiv	62,5	-	3,2	-	56,7	-	-7,8	-	-13,3	-	-	-	44,0	-		1,9	-	3,5	-	-	-	2,5	-
			inaktiv	64,3	-	3,3	-	55,0	-	-9,1	-	-15,1	-	-	-	46,5	-									

Legende:

GK-Platte unten bzw. Verlegespanplatte oben
 Holzbalken

Holzaufleger
 Anzahl Resonatoröffnung (z.B. 4 fach kaskadiert)

Resonator
 Kitt

* geschlossene Messung aus vorhergehender Messung
 ** veränderte Gehweise

6.2 Darstellung der erfolgreichen Varianten

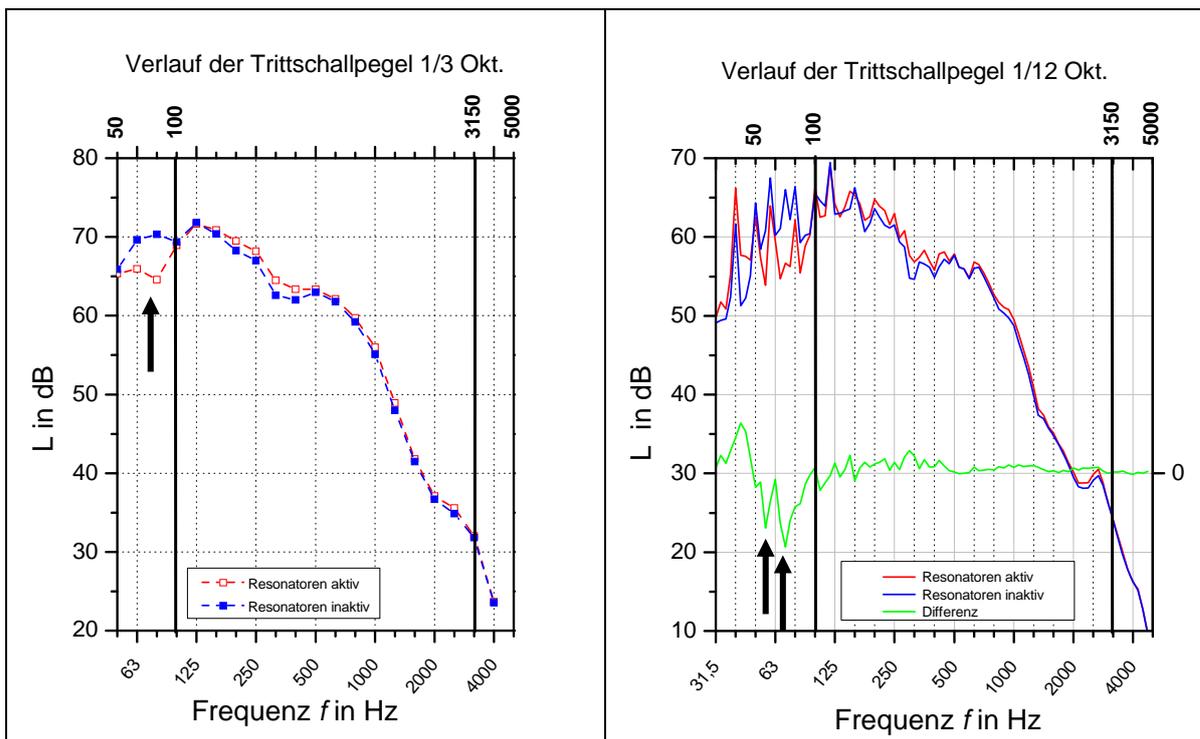
Wie man aus der Übersichtsmatrix erkennen kann, waren die Aufbauten 5.5.1, 5.5.2, 5.6.1 und 5.6.2 durchgehend am erfolgreichsten. Die Ergebnisse der verschiedenen Messmethoden werden in den folgenden Unterkapiteln dargestellt und erläutert. Alle anderen Messungen können im Anhang dieses Berichtes nachgelesen werden.

Die Deckenaufbauten Nr. 5.5.1 und Nr. 5.5.2 unterscheiden sich nur in der Art der Ankopplung. Aufbau Nr. 5.5.2 liefert dennoch gleichwertige bzw. sogar bessere Ergebnisse. Daraus resultiert, dass sowohl durch Körperschall- als auch durch Luftschallanregung vergleichbare Erfolge erzielbar sind.

6.2.1 Deckenaufbau Nr. 5.5.1

6.2.1.1 Trittschallpegel

Die Wirkung der Helmholtzresonatoren ist sowohl im zwölfstel Oktavband als auch in den Terzen durch die Pfeilmarkierung in Abbildung 52 deutlich zu sehen. Der bewertete Norm-Trittschallpegel wurde aus den dargestellten Terzdaten und der Nachhallzeit gebildet.



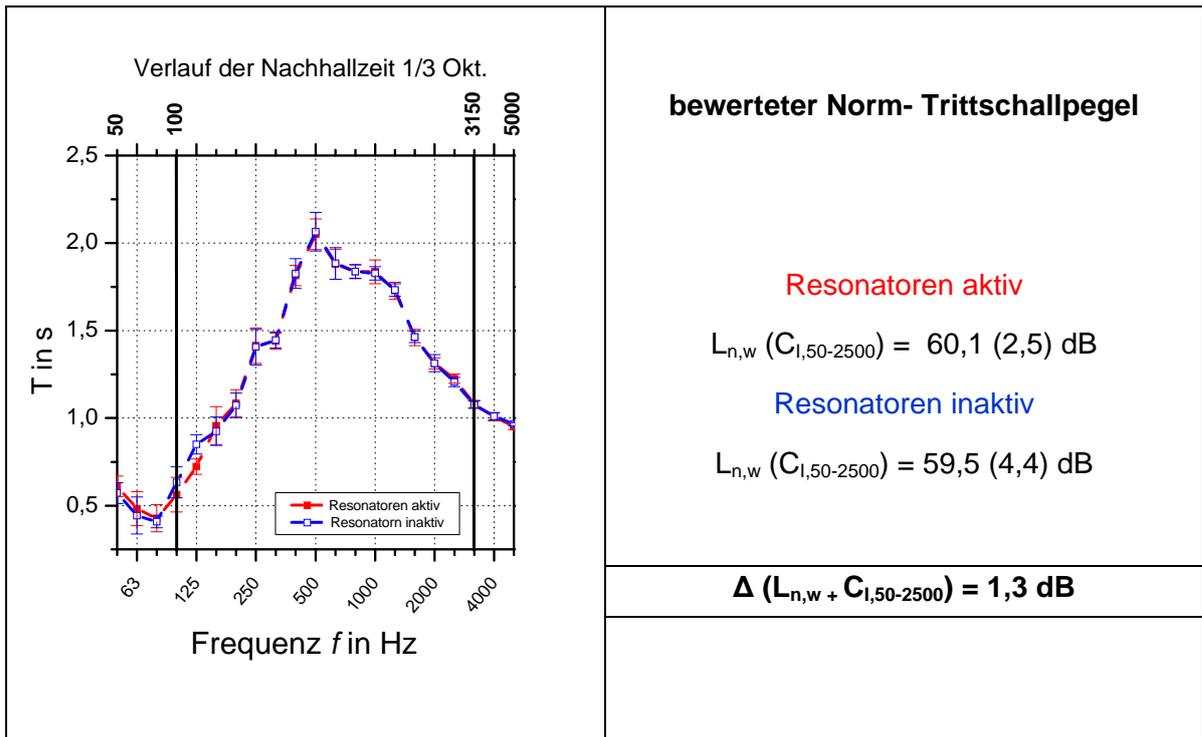
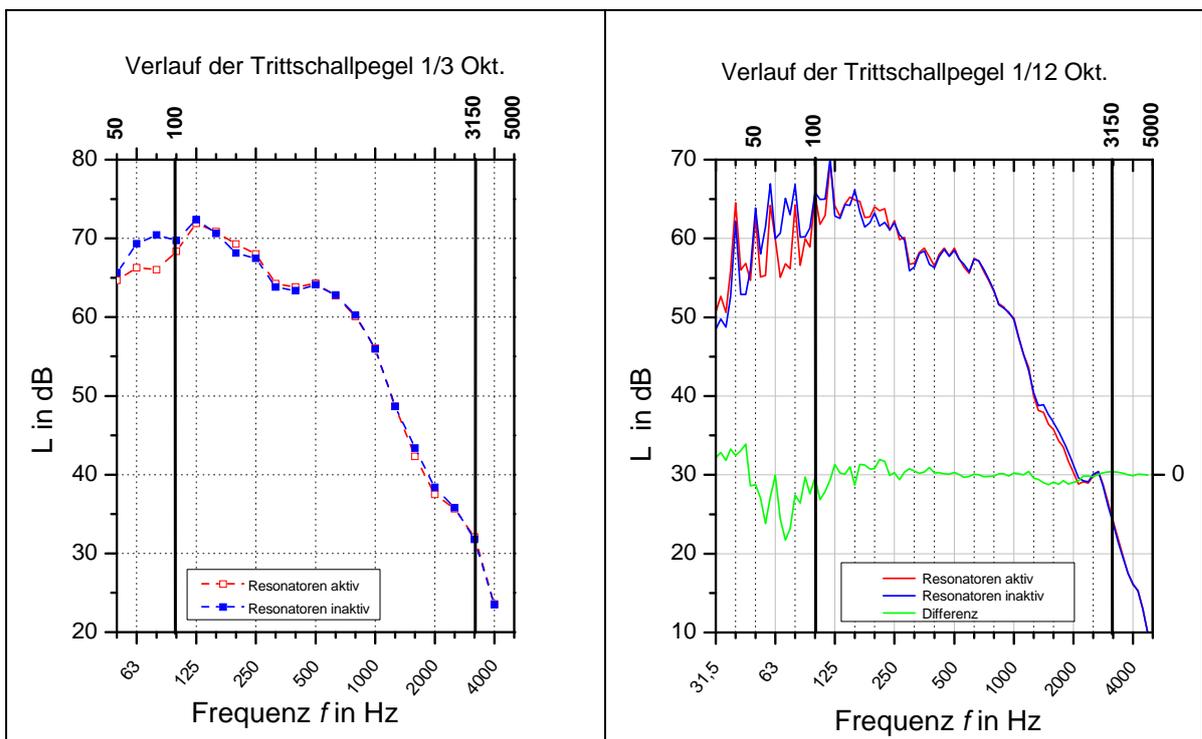


Abbildung 52: Trittschall - Aufbau Nr. 5.5.1 Mündung unbedämpft



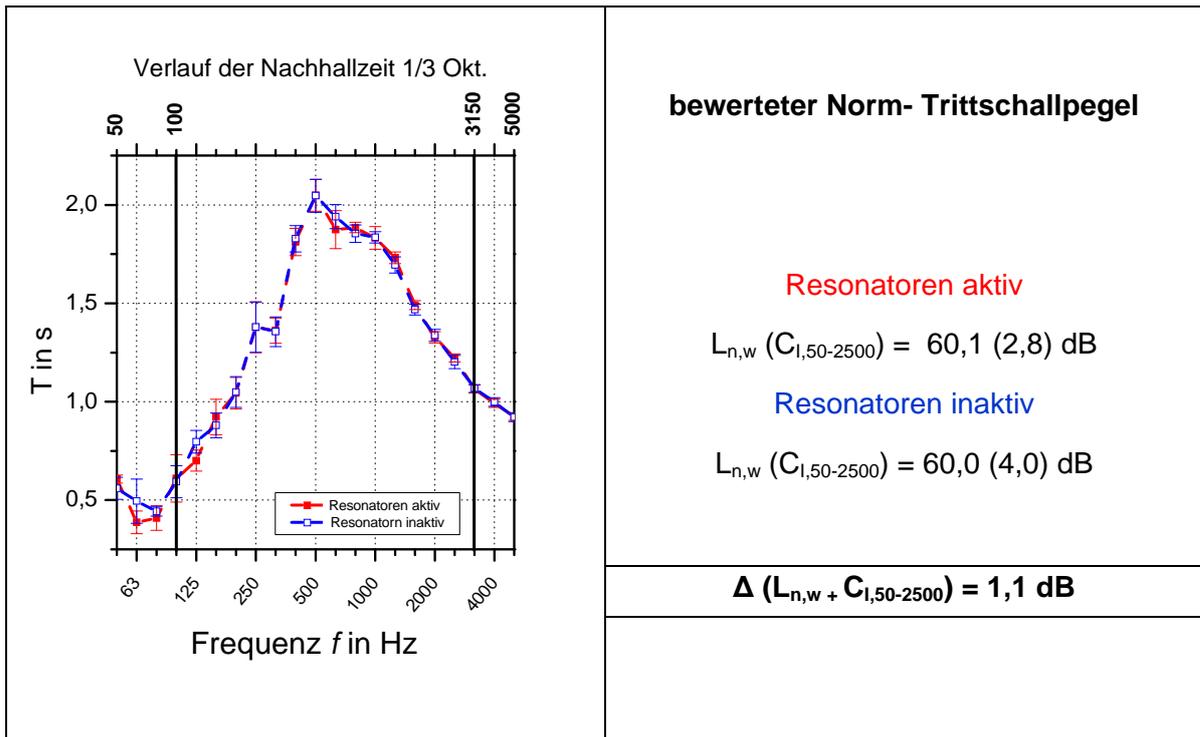


Abbildung 53: Trittschall - Aufbau Nr. 5.5.1 Mündung bedämpft

In der Messung mit bedämpften Helmholtzresonatoren ist zu sehen, dass diese gegenüber der unbedämpften Variante keine Verbesserung erzielten. Da sich die Ergebnisse sehr ähneln, wurde in den weiteren Messungen (Nr. 5.5.2 und 5.5.3) auf eine Bedämpfung der Helmholtzresonatoren durch das in Abbildung 22 gezeigte Akustikvlies verzichtet.

6.2.1.2 Luftschallpegel

Auch im Luftschall kann man den Effekt der Resonatoren guten erkennen. Auffällig ist, dass sowohl bei den Zwölftel-Oktav-Trittschallpegeln, als auch bei den Zwölftel-Oktav-Luftschallpegeln unmittelbar vor der Resonanzfrequenz (d.h. im tieffrequenteren) eine geringfügigere Verschlechterung zu erkennen ist. Dieses Verhalten wurde in vielen weiteren Messungen beobachtet.

Im Frequenzbereich zwischen 63 und 80 Hz konnte im Zwölftel-Oktavband eine Verbesserung von ca. 8 dB erzielt werden.

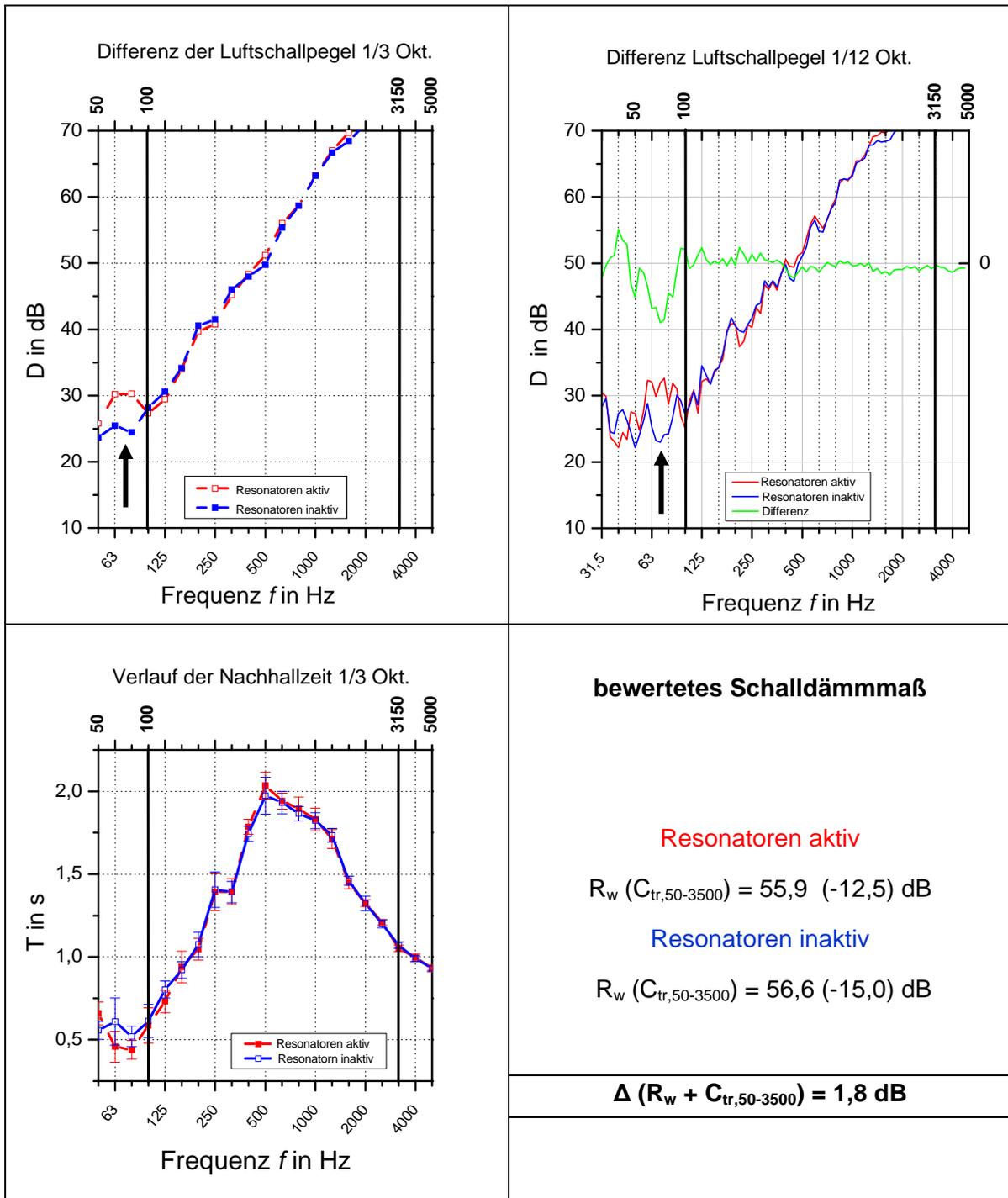


Abbildung 54: Luftschall - Aufbau Nr. 5.5.1 Mündung unbedämpft

6.2.1.3 Intensitätspegel über das Scanverfahren

Die Resonatoren zeigten auch über das Abstrahlverhalten der Unterdecke Wirkung. Klar zu erkennen ist der Einbruch des Intensitätspegels bei aktiven Resonatoren. Da die Intensitätsmessung eine zeitaufwändige Messmethode ist und keine Zusatzinformation lieferten, wurde deren Einsatz auf einzelne Versuchsaufbauten beschränkt.

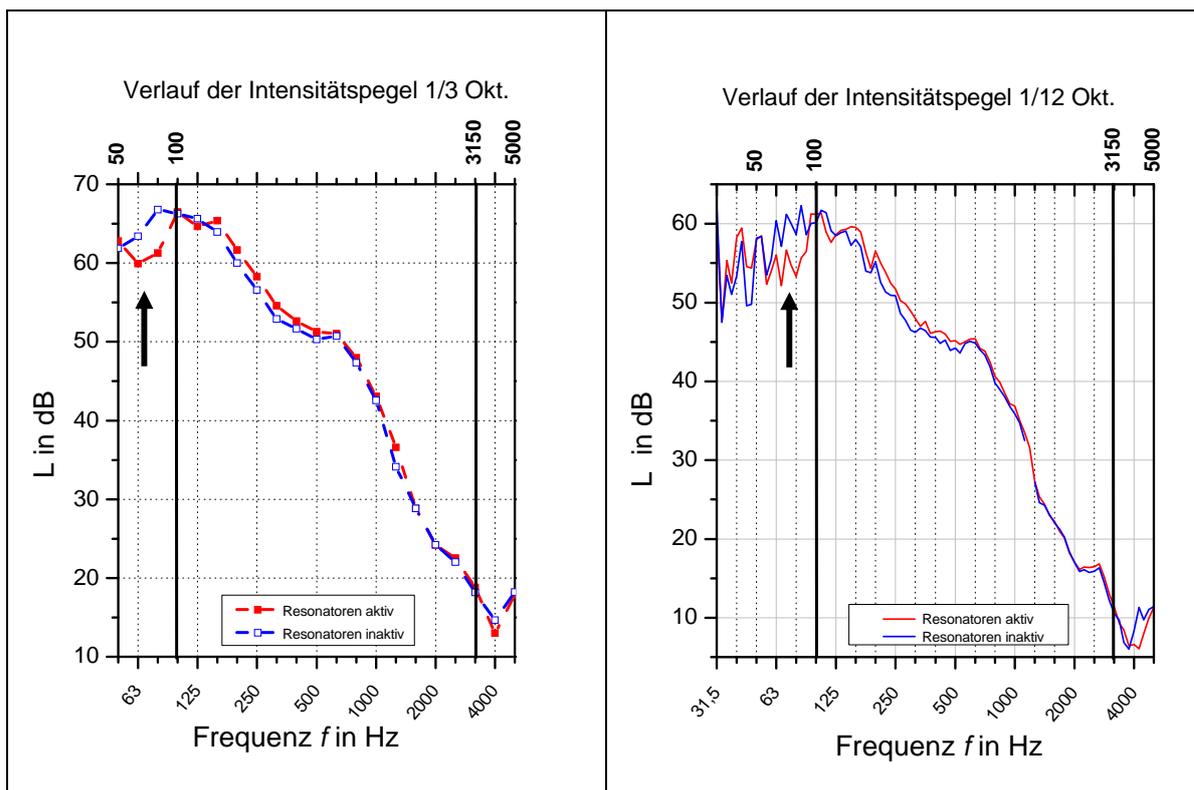


Abbildung 55: Scan - Aufbau Nr. 5.5.1 Mündung unbedämpft

6.2.1.4 Gehermessung

Grundsätzlich unterschied man bei den Gehermessungen in der Anregung zwischen Schuhe und Socken. Bei der Betrachtung der Messkurven wird deutlich, dass bei einer Anregung mit Socken deutlich höhere Pegel entstehen. Im hohen Frequenzbereich ab ca. 315 Hz weichen die Kurven bei niedrigen Pegeln deutlich voneinander ab (siehe Abbildung 56 links). Der Grund blieb ungeklärt, die Abweichung ist jedoch für diese Untersuchung unwichtig. Klar zu erkennen ist die Verbesserung der tieffrequenten Übertragung durch die Helmholtzresonatoren im Bereich zwischen 50 Hz und 100 Hz. Der geringe Wert von 1,1 dB im $\Delta L_{eq, walk, Schuhe 50-100}$ resultiert hier aus der Tatsache, dass bei 50 Hz eine Verschlechterung zu erkennen ist.

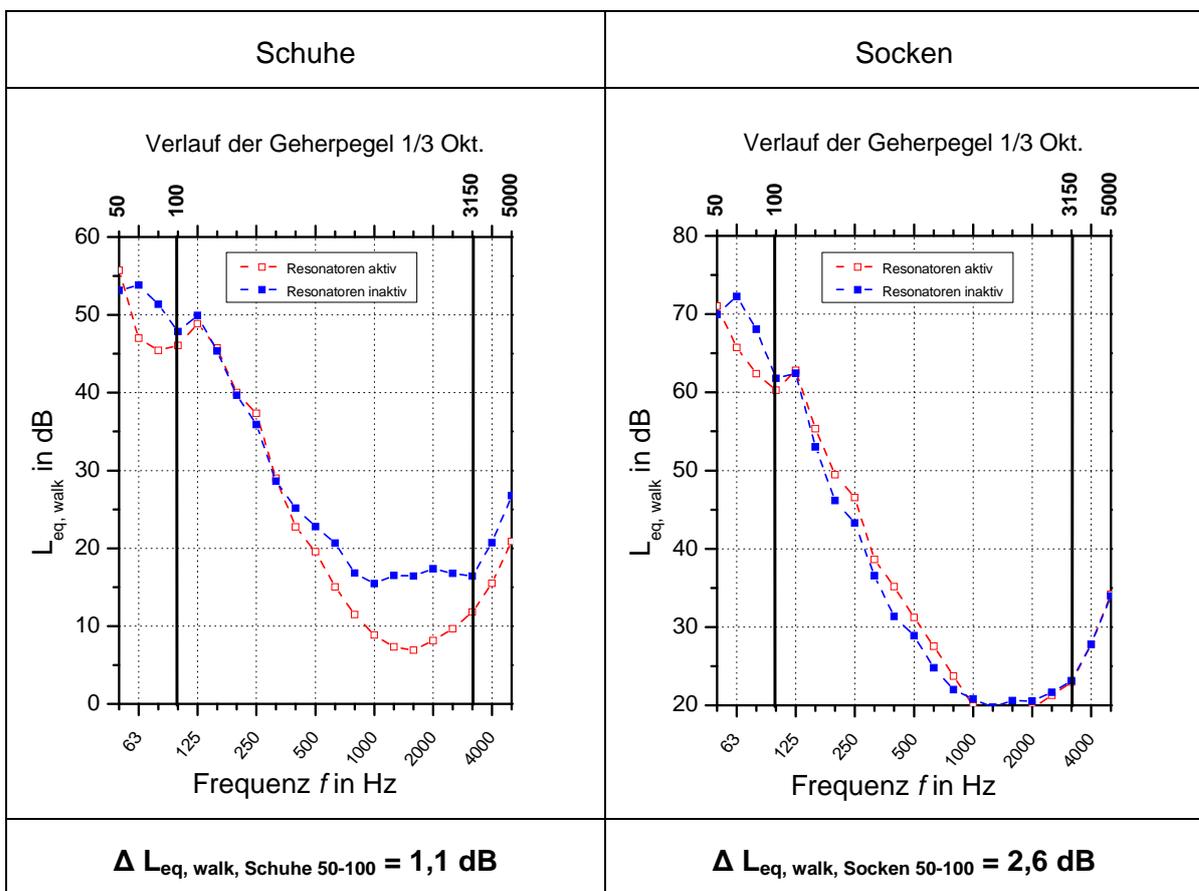


Abbildung 56: Geher - Aufbau Nr. 5.5.1 Mündung unbedämpft

Ein großer Effekt durch die Helmholtzresonatoren ist bei der Messung mit bedämpften Resonatoren bei Anregung der Decke durch Geher mit Schuhe erkennbar (s. Abbildung 57).

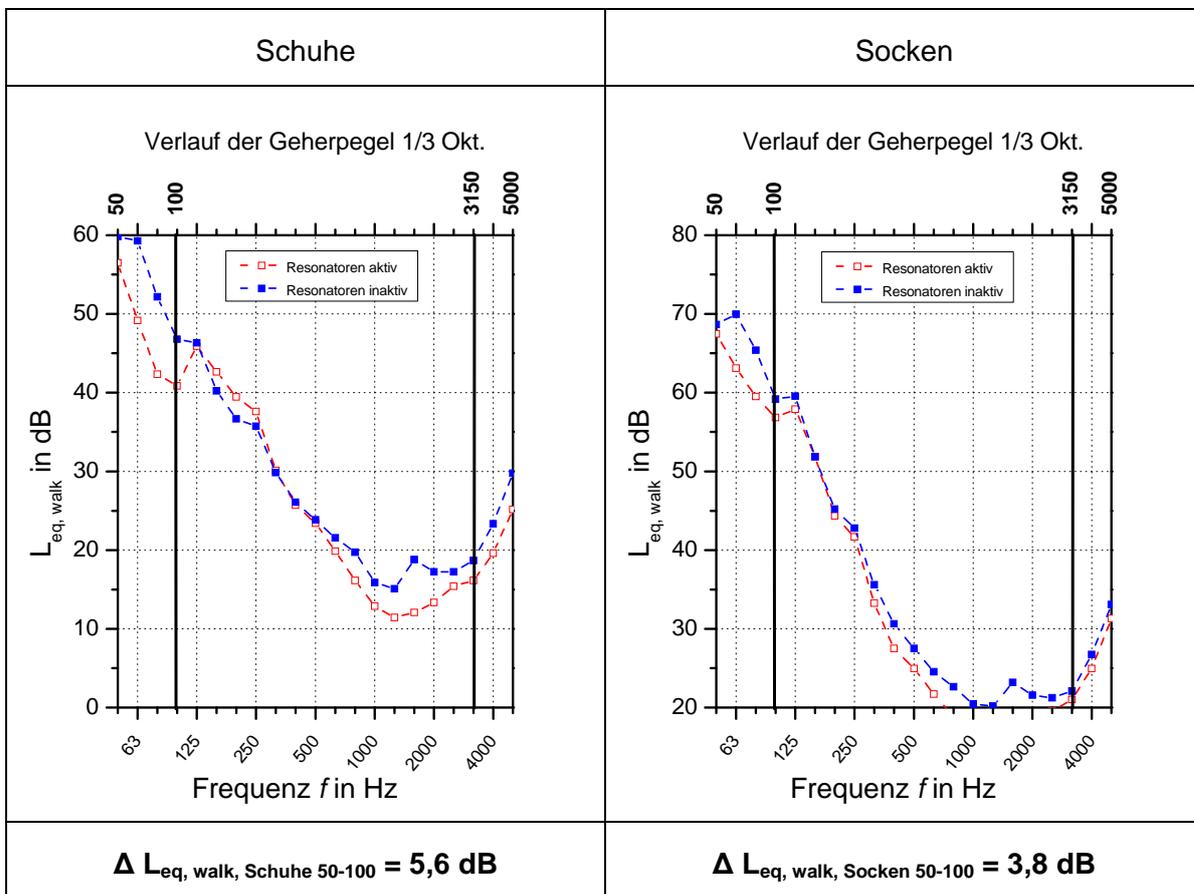


Abbildung 57: Geher - Aufbau Nr. 5.5.1 Mündung bedämpft

6.2.2 Deckenaufbau Nr. 5.5.2

6.2.2.1 Trittschallpegel

Die Ergebnisse im Trittschallpegel dieses Deckenaufbaus zeigen den größten gemessenen Effekt. So nimmt die Differenz der Zwölftel-Oktavpegel Werte von knapp 10 dB an. Durch die breitbandigere Wirkungsweise konnte im Einzahlwert $L_{n,w} + C_{1,50-2500}$ eine direkte Verbesserung von 2,1 dB durch die Helmholtzresonatoren erzielt werden.

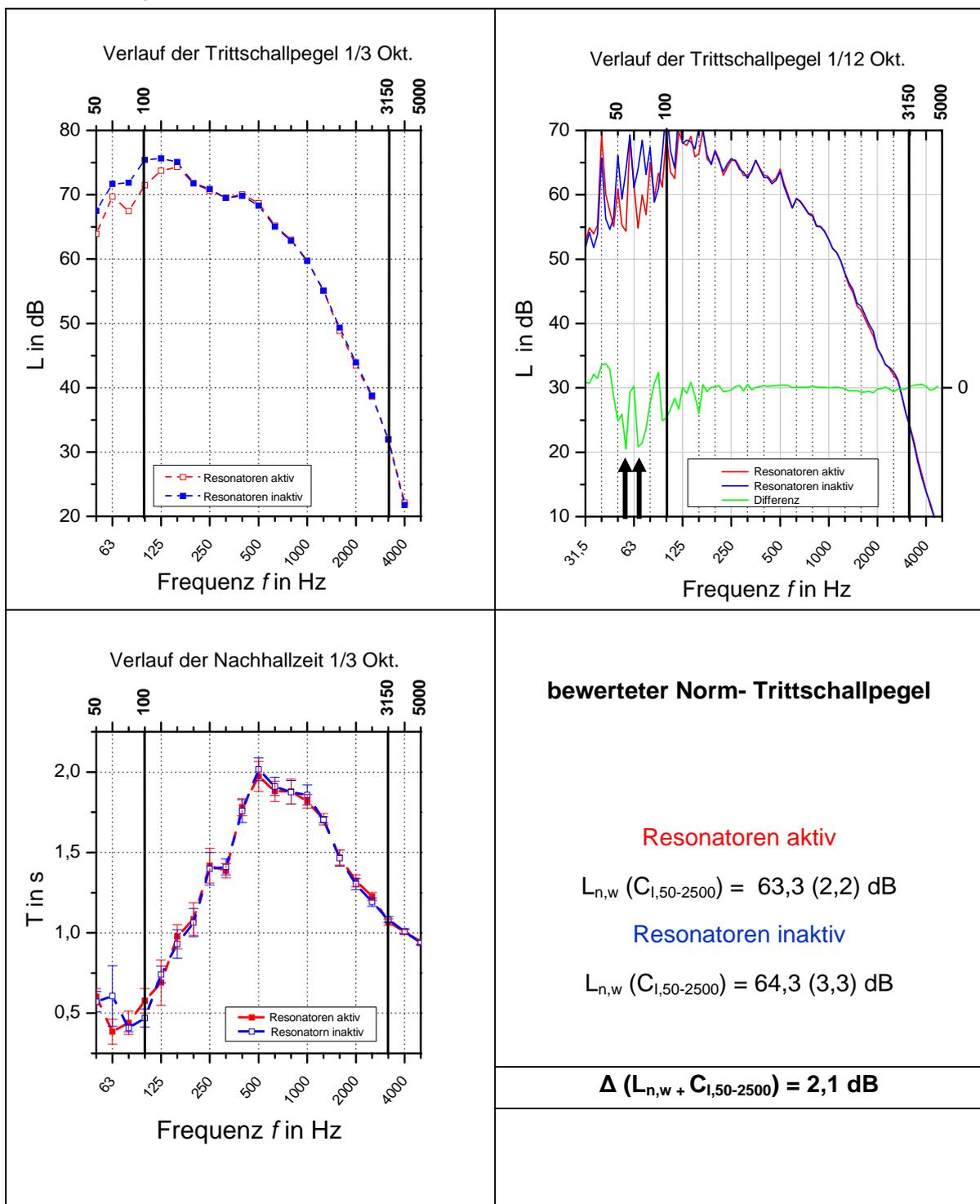


Abbildung 58: Trittschall - Aufbau Nr. 5.5.2 Mündung unbedämpft

6.2.2.2 Luftschallpegel

Der Einfluss der Helmholtzresonatoren macht sich in der Erhöhung des Einzahlwertes $R_w + C_{tr,50-3500}$ mit 4,4 dB bemerkbar.

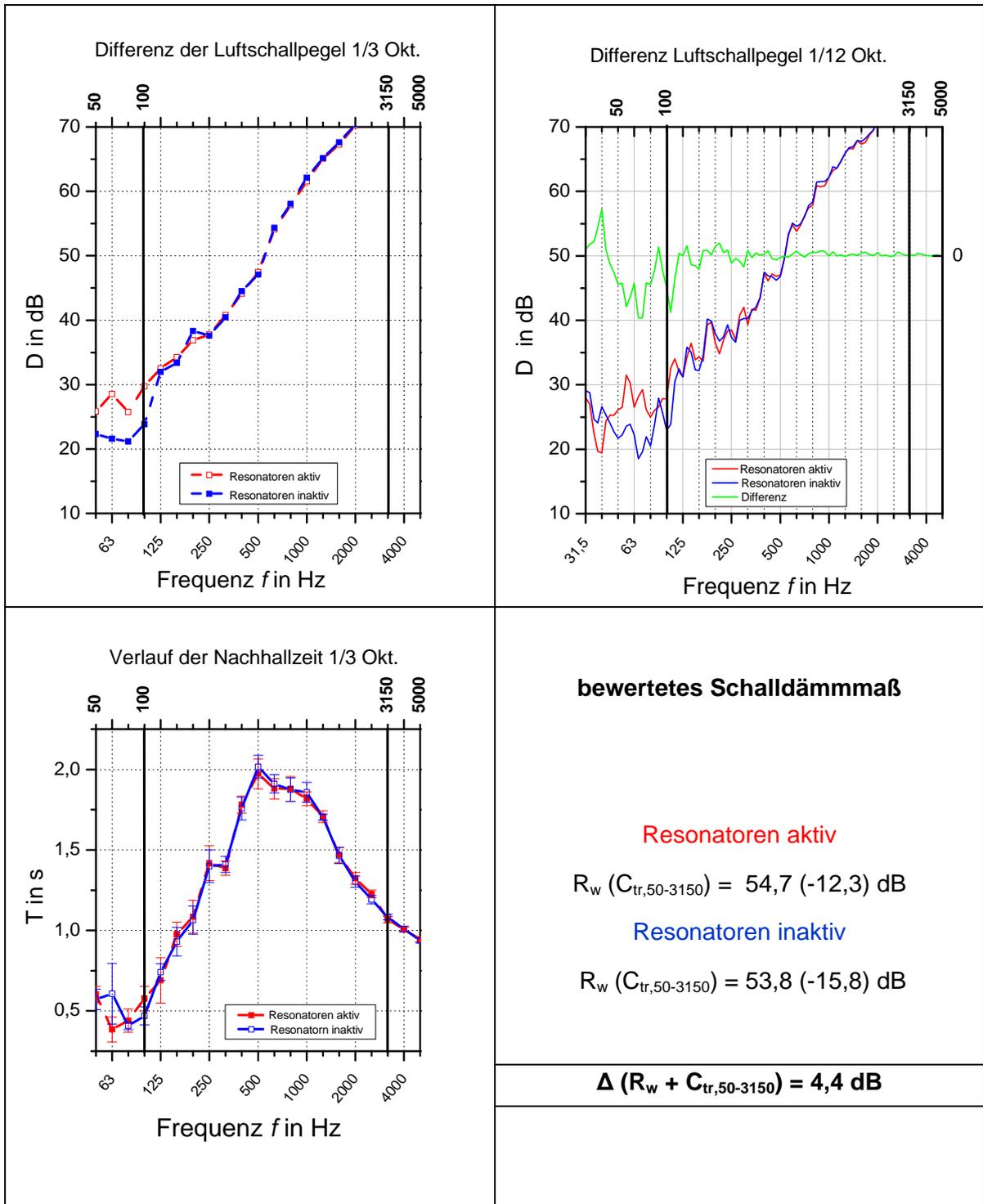


Abbildung 59: Luftschall - Aufbau Nr. 5.5.2 Mündung unbedämpft

6.2.2.3 Geher Messung

In der Geher-Messung mit Anregung durch Socken wurde die größte Verbesserung von ca. 6 dB erreicht!

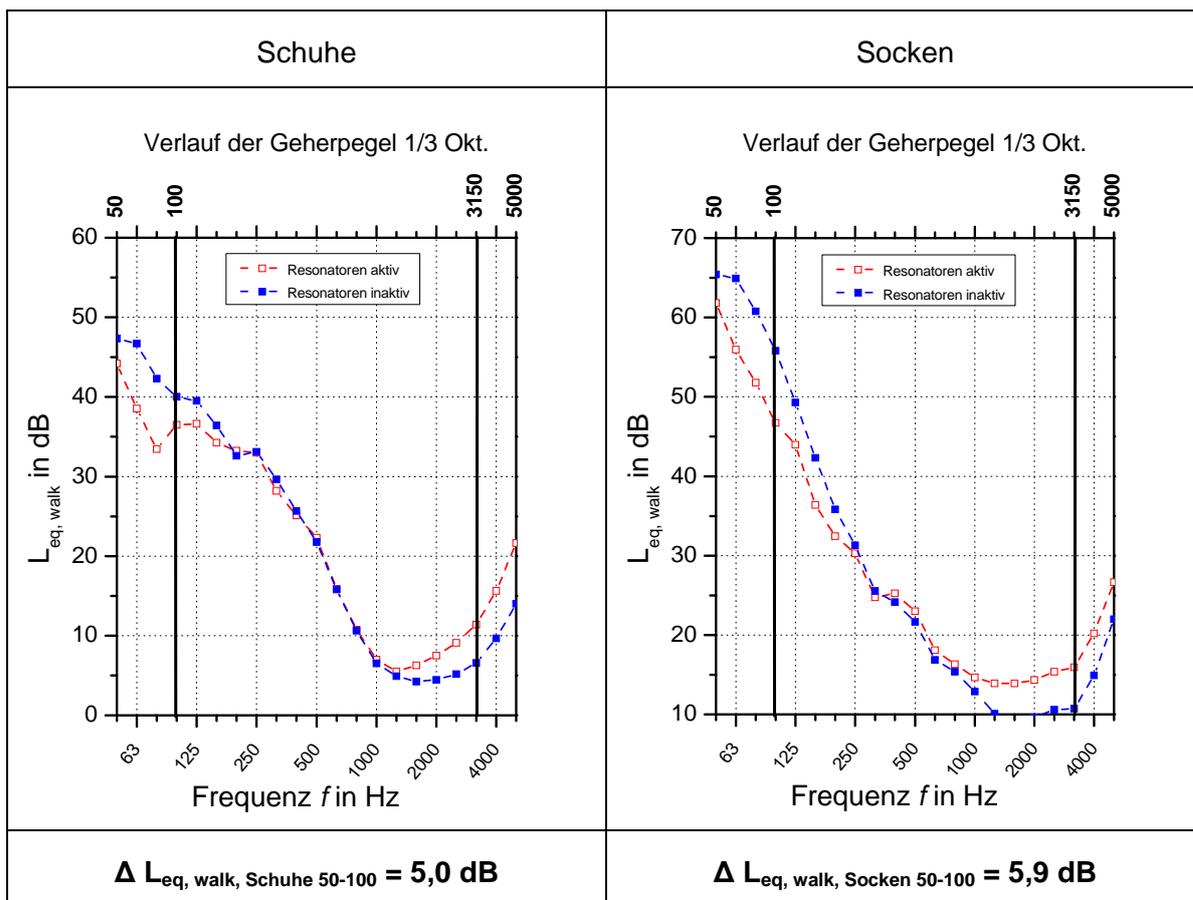


Abbildung 60: Geher - Aufbau Nr. 5.5.2 Mündung unbedämpft

6.2.3 Deckenaufbau Nr. 5.6.1

Bei den folgenden Diagrammen handelt es sich um die Ergebnisse der Messungen mit 21 freihängenden Resonatoren. Verglichen werden die Messungen mit aktiv und inaktiven Helmholtzresonatoren. Bei beiden Messungen war Gefachdämmung lose zwischen den Resonatoren eingelegt (siehe dazu Abbildung 49). Die Resonatoröffnungen waren mit Glasvlies bedämpft.

Nach den guten Ergebnissen aus den Messungen an den Deckenaufbauten 5.5 diente der Deckenaufbau 5.6 allein der Reproduktion und wenn möglich Verbesserung der bereits vorhandenen Ergebnisse.

Die ausgewerteten Daten der Messreihe 5.6.1 bestätigen die Ergebnisse der vorangegangenen Untersuchungen. Die Wirkung der Helmholtzresonatoren ist in den entsprechenden Frequenzbereichen deutlich messbar. Beim Vergleich der Messung mit inaktiven und aktiven Resonatoren können in einzelnen Terzbändern Verbesserungen von bis zu 10 dB gemessen werden.

6.2.3.1 Trittschallpegel

Der Vergleich der Trittschallpegel zeigt im Bereich von 80 Hz deutlich die Wirkung der Resonatoren. Die Differenz der Trittschallpegel erreicht in einzelnen Zwölftel-Oktavbändern Werte von ca. 8 dB. Es zeigt sich auch, dass eine Verbesserung auch im Frequenzbereich von über 100 Hz zu erzielen ist. Dies kann bedingt sein durch die Plattenresonanz des Deckels der Resonatorkästen.

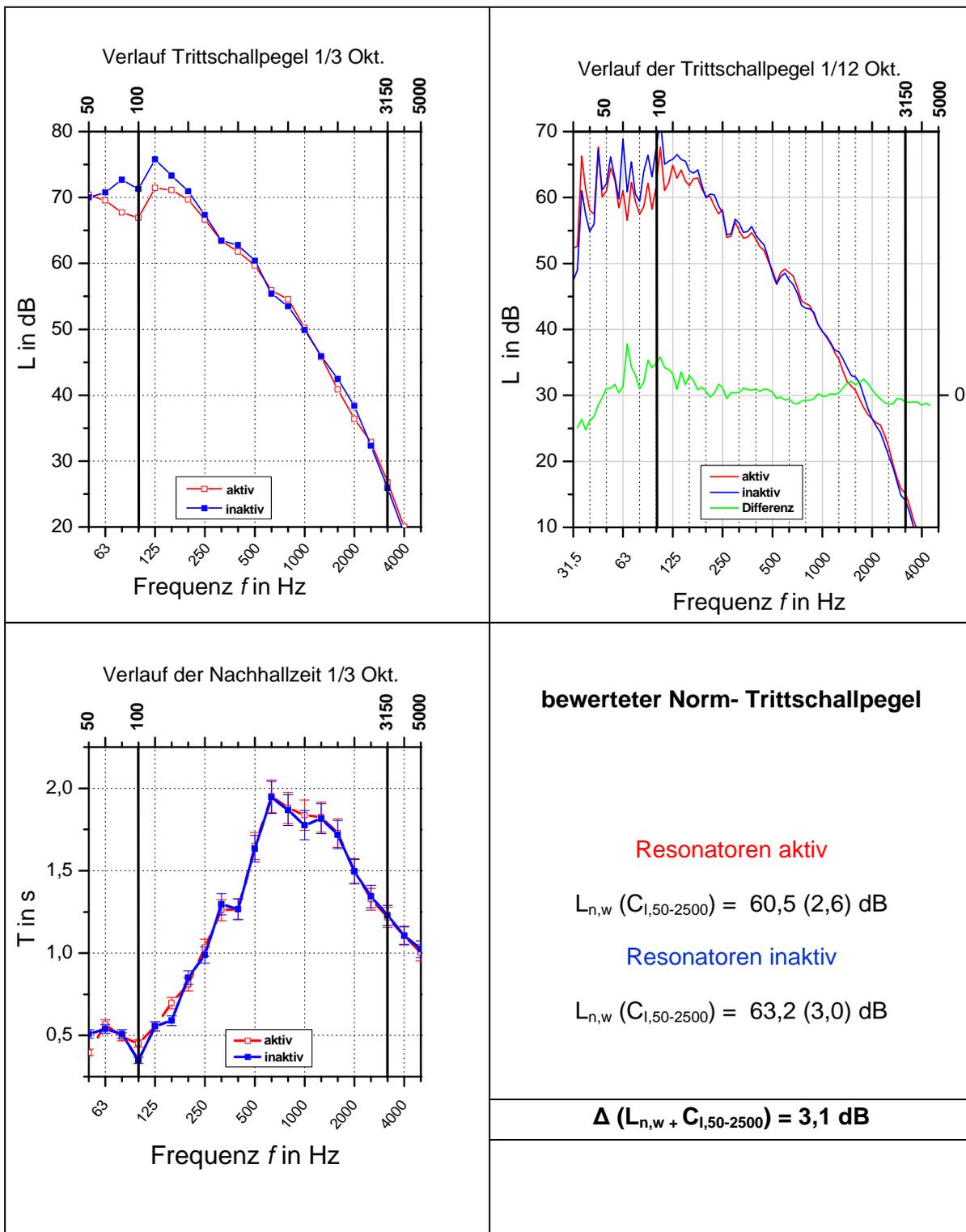


Abbildung 61: Freihängende Resonatoren mit Dämmung

6.2.3.2 Luftschallpegel

Eine deutliche Wirkung der Resonatoren zwischen 63 Hz und 80 Hz zeigt sich auch bei der Luftschalldämmung. Die Differenz des Schalldämmmaßes nimmt in manchen Terzbändern einen Wert von 7 dB an. Über den gesamten Frequenzbereich betrachtet ergibt sich aber nur eine Differenz des Summenwertes $\Delta(R_w + C_{tr})$ von 0,6 dB.

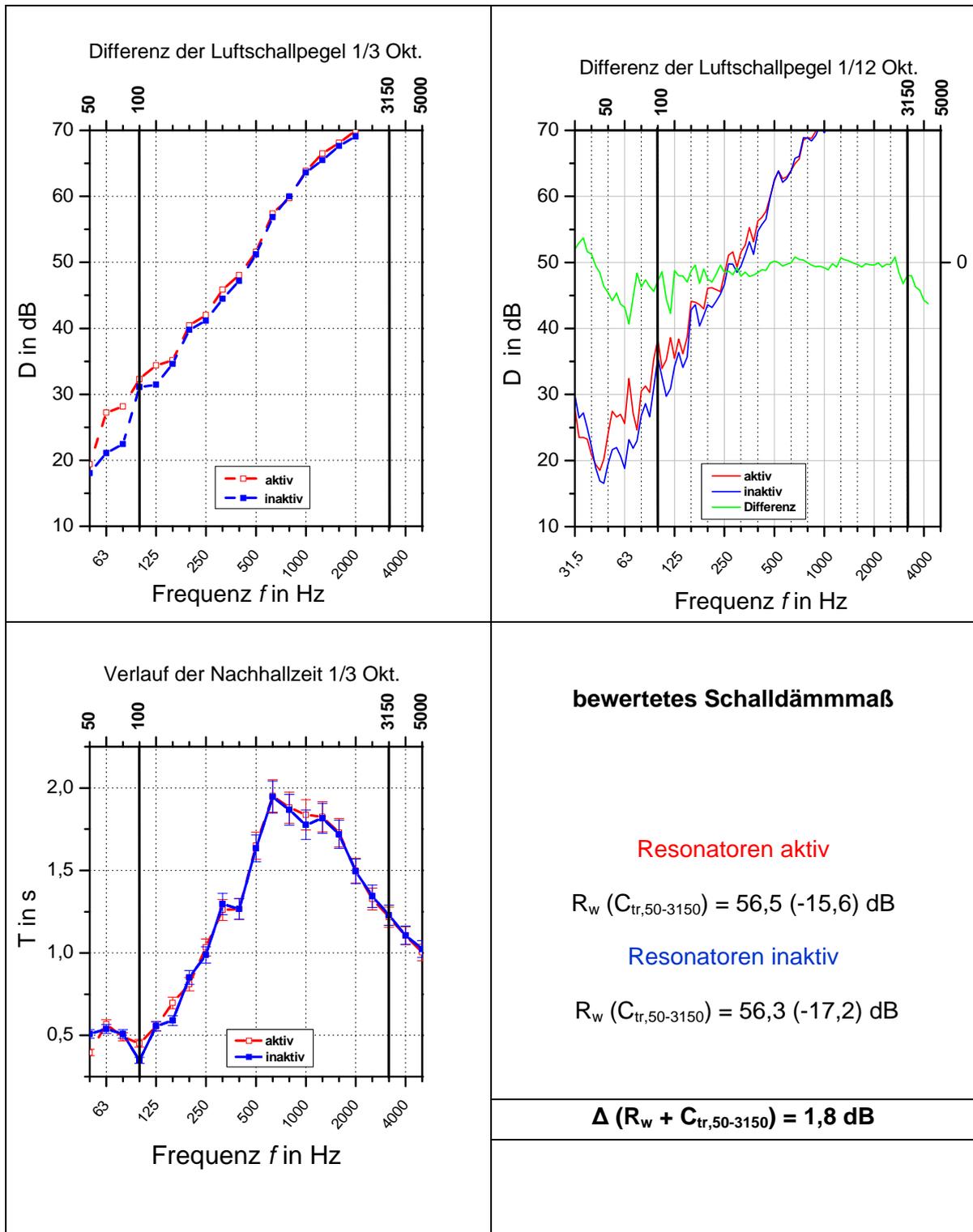


Abbildung 62: freihängende Resonatoren mit Dämmung

6.2.3.3 Gehermessung

Sehr ausgeprägt ist die Wirkung der Resonatoren beim Vergleich der Gehermessungen mit Socken. Durchgehend wurde eine Verringerung der Geherpegel von 10 dB in den Terzbändern von 63 Hz bis 125 Hz statt. Durch diese breitbandige Absorption nimmt der $\Delta L_{eq, walk, Socken 50-100}$ einen Wert von 5,9 dB an.

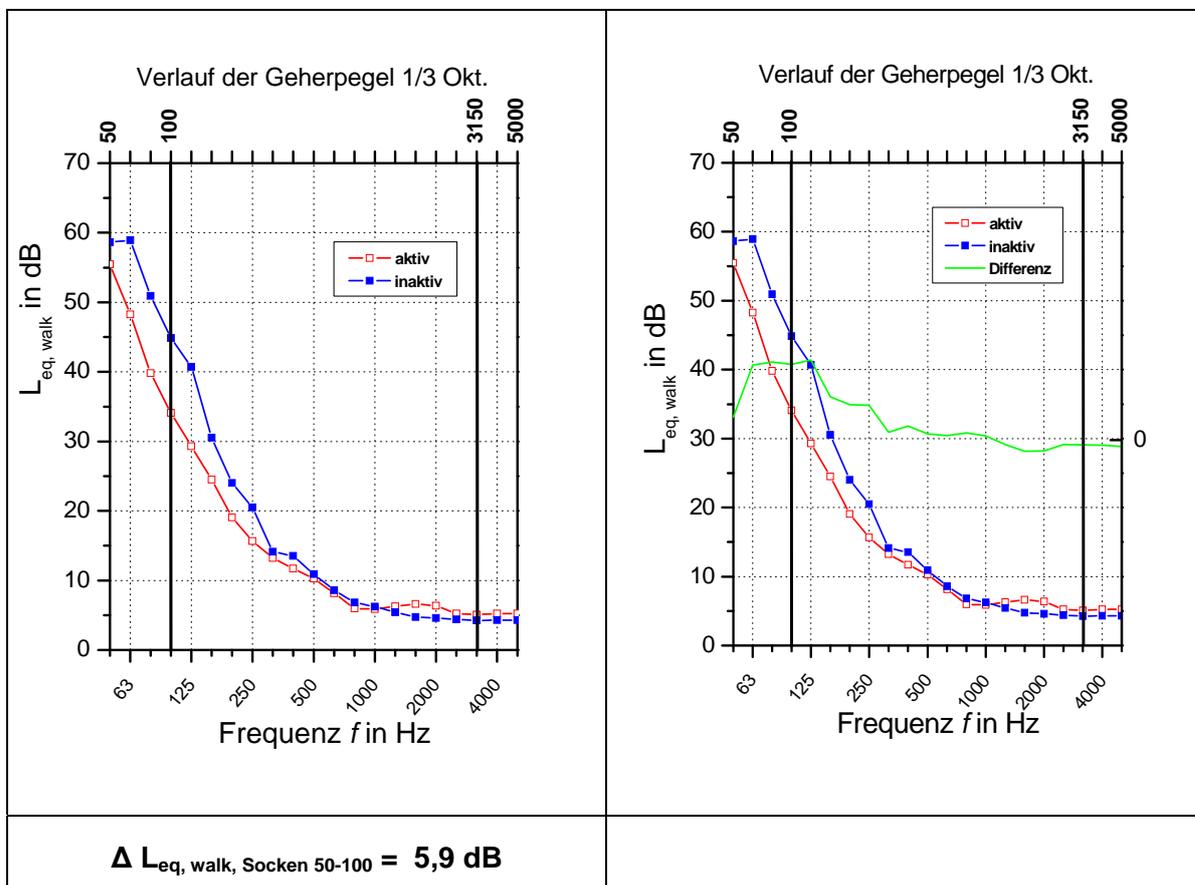


Abbildung 63: freihängende Resonatoren mit Dämmung

6.2.4 Deckenaufbau Nr. 5.6.2

In den folgenden Diagrammen ist der Vergleich der Messungen des **aktiven** Resonators **mit** Gefachdämmung mit dem **aktiven** Resonator **ohne** Gefachdämmung dargestellt. Die Wirkungsweise der eingelegten Mineralwolle wird dadurch gut erkennbar.

6.2.4.1 Trittschall

Die Gefachdämmung beeinflusst den mittelfrequenten Bereich von 250 Hz bis 2000 Hz. In manchen Terzen ist eine Verringerung des Trittschallpegels von bis zu 10 dB bei Verwendung einer Gefachdämmung erkennbar. Bei den tiefen Frequenzen, in denen die Helmholtzresonatoren wirken, zeigt die Mineralwolle nahezu keinen Einfluss.

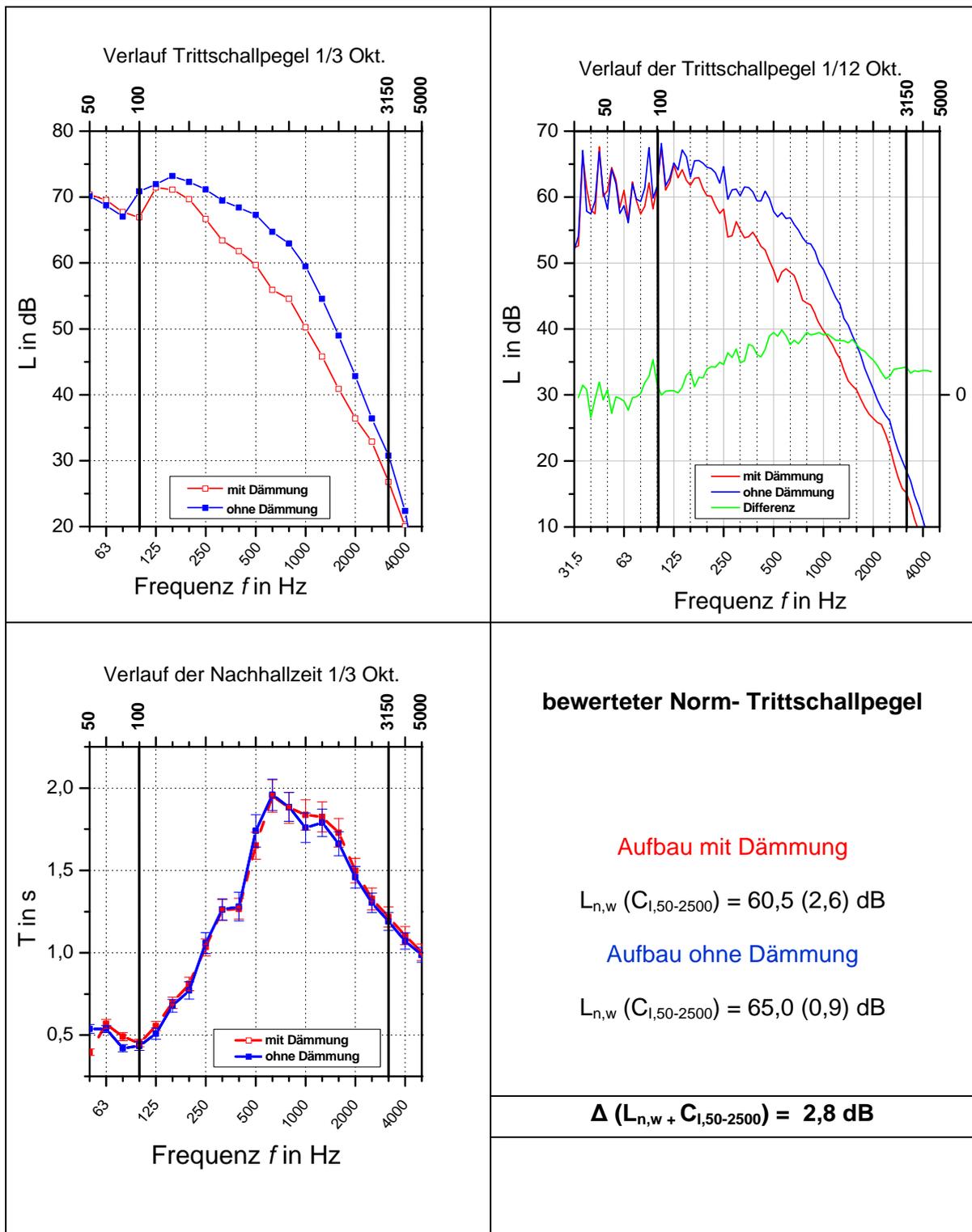


Abbildung 64: freihängende Resonatoren mit und ohne Dämmung

6.2.4.2 Luftschall

Auch bei der Betrachtung der Luftschallpegel wird der Unterschied der Messung mit Gefachdämmung sofort deutlich. Die Verbesserung des Einzahlwertes $\Delta(R_w + C_{tr})$ von 2,4 dB ist auf die breitbandige Absorption im Frequenzbereich von 200 Hz bis 2000 Hz zurückzuführen. Eine Betrachtung von $\Delta(R_w + C_{tr,50-3150})$ ist bei diesem Vergleich nicht relevant.

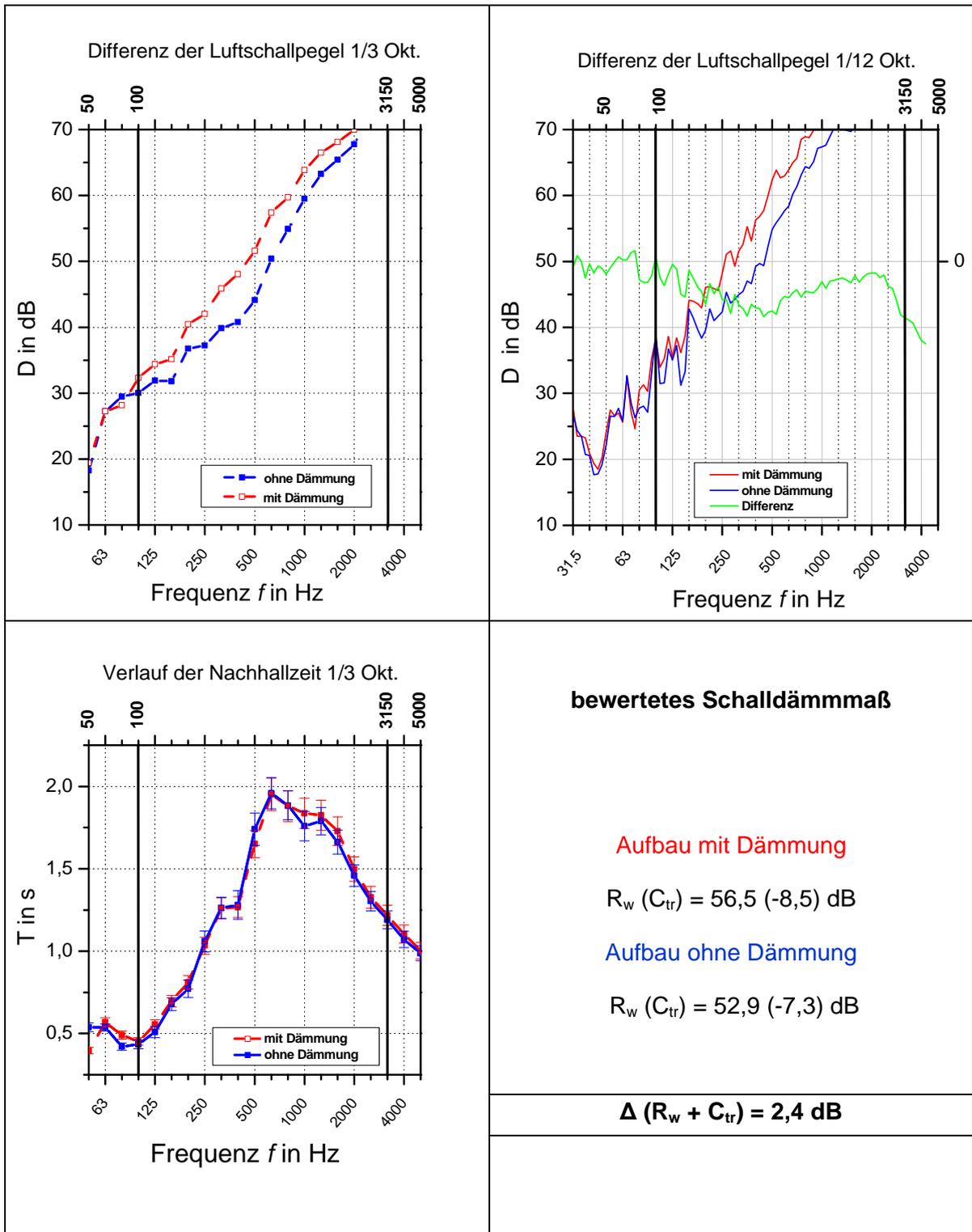


Abbildung 65: freihängende Resonatoren mit und ohne Dämmung

6.2.4.3 Gehermessung

Die Ergebnisse der Gehermessungen zeigen, dass bei dieser Art der Anregung das Vorhandensein der Gefachdämmung keine Rolle spielt. Der Unterschied der Pegel zwischen 250 Hz und 1000 Hz fällt deutlich geringer aus als bei der Tritt- und Luftschallmessung.

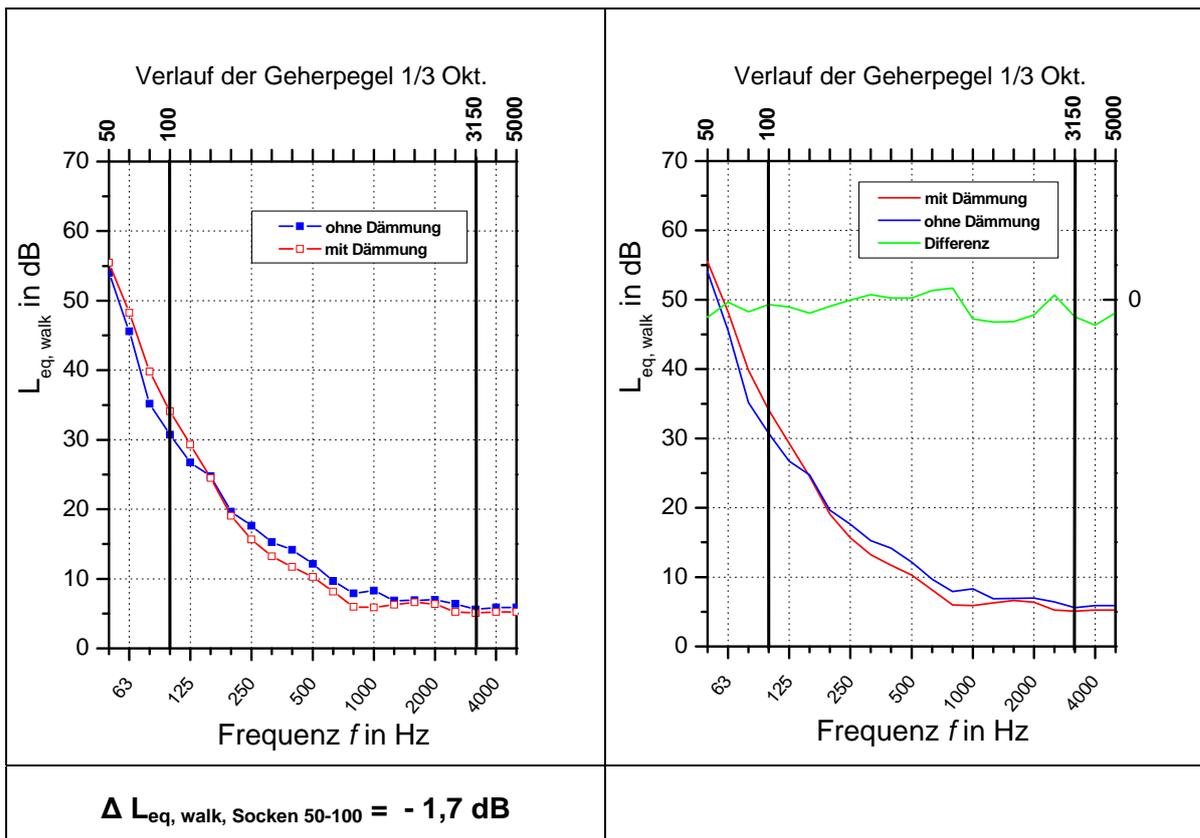


Abbildung 66: freihängende Resonatoren mit und ohne Dämmung

6.3 Abstrahlverhalten der Unterdecke

Untersucht wurden die soeben dargestellten Aufbauten (vgl. Kapitel 6.2.1 und 6.2.2) auch hinsichtlich ihres Abstrahlverhaltens. Hierzu wurden sowohl die Schnellepegel der Unterdecke als auch die Schallintensitätspegel im Nahfeld gemessen. Aus diesen beiden Messgrößen konnte der Abstrahlgrad bzw. das Abstrahlmaß bestimmt werden. Es konnte die absorbierende Wirkung der Resonatoren im Abstrahlverhalten der Decke gezeigt werden bzw. das Abstrahlverhalten wurde im tiefen Frequenzbereich mittels der Helmholtzresonatoren positiv beeinflusst²⁷.

²⁷ Eine ausführliche Betrachtung hierzu findet sich in (Schramm, Masterarbeit, 2010)

7 Resümee

Die experimentellen Untersuchungen zu Helmholtzresonatoren haben folgende Ergebnisse gebracht:

1. Helmholtzresonatoren für den Frequenzbereich zwischen 50 Hz und 100 Hz können aus einer einzigen Gipskartonplatte einfach gefertigt werden.
2. Die Resonanzfrequenz kann für eine schlitzförmige Resonatoröffnung gut dimensioniert werden.
3. Die Breite der Absorptionsresonanz ist deutlich höher als theoretische Betrachtungen vorhersagen und erreichen Werte von über 10 Hz.
4. Absorptionsgrade können durch eine leichte Bedämpfung im Bereich der Resonatoröffnung Werte bis nahezu 1,0 bezogen auf die Deckelfläche erreichen. Eine Bedämpfung der Resonatoren im Hohlraumvolumen zeigt keine Auswirkung.

Die Wirkung von im Gefachbereich von Holzbalkendecken integrierten Helmholtzresonatoren als Absorber für tieffrequenten Trittschall konnte durch den Vergleich von Messungen mit aktiven bzw. durch mit Klebeband inaktiv geschalteten Resonatoren eindeutig gezeigt werden. Folgende Ergebnisse können hinsichtlich der Verminderung der Schallübertragung im tieffrequenten Bereich festgehalten werden:

1. Die Resonatoren müssen an den Luftraum im Gefach angekoppelt werden. Die Art der Unterbringung als auch die Art der Montage der Resonatoren im Gefach ist unkritisch. Eine einfach zu konstruierende Aufhängung, die eine schnelle, fehlertolerante Montage ermöglicht, ist völlig ausreichend.
2. Die Absorptionswirkung wurde auf den Frequenzbereich zwischen 50 Hz und 100 Hz vorgesehen. Der Summenwert aus Norm-Trittschallpegel und auf den Frequenzbereich bis 50 Hz erweiterte Spektrum-Anpassungswert $L_{n,w} + C_{1,50-2500}$ konnte bei den gut durchgeführten Aufbauten um 3 dB verringert werden. Die Verbesserung der tieffrequenten Schalldämmung macht sich ebenso im Luftschall bemerkbar.
3. Speziell der durch reale Geher verursachte Trittschall weist in o.g. Frequenzbereich die höchsten Trittschallpegel auf. Die Terzpegel aus Messung von mit Socken bekleideten Gehern konnten in diesem Frequenzbereich durch die Helmholtzresonatoren im Mittel um 6 dB verringert werden, in einzelnen Terzbändern sind durchweg 10 dB erreichbar.
4. Die Gefachdämmung ist weiterhin für die Absorption von Schallenergie im Frequenzbereich zwischen 250 Hz und 2000 Hz notwendig und beeinflusst die Wirkung der Helmholtzresonatoren nicht.
5. Frei hängende Resonatorkästen können offensichtlich durch Ausbildung der Eigenmoden der Wandungen zusätzlich zur Absorption beitragen. Dies könnte noch

zur Steigerung der Wirksamkeit beitragen, müsste aber durch weitere Arbeiten noch geklärt werden.

Damit sind die untersuchten Helmholtzresonatoren durchaus als eine mögliche Maßnahme denkbar, Holzbalkendecken mit schlechter Trittschaldämmung im tieffrequenten Frequenzbereich zu verbessern. Verglichen zu anderen Verbesserungsmaßnahmen ist der Einsatz bei entsprechender Fertigungstiefe und einer einfachen Montagemethode durchaus wirtschaftlich und für manche Einsatzzwecke sogar vorteilhaft. Auch wenn wie in Kap. 6.1 bereits angemerkt ist, **ein direkter Vergleich der Norm-Trittschallpegel und der Schalldämm-Maße der unterschiedlichen Deckenvarianten auf Grund der unterschiedlichen Aufhängungen der Unterdecke nicht direkt verglichen werden können**, soll die abschließende Abbildung die Wirkung der Helmholtzresonatoren im tieffrequenten Bereich dokumentieren.

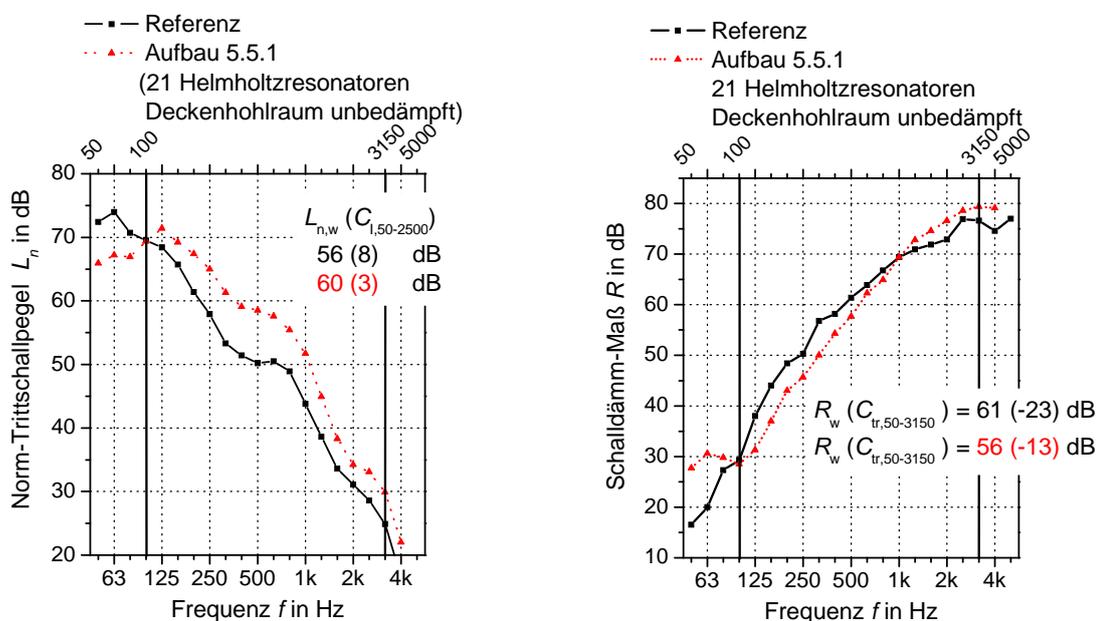


Abbildung 67: Vergleich unterschiedlicher Aufbauten (Referenz versus Aufbau 5.5.1)

Literaturverzeichnis

- Arnold, G. (2003). modeling of the transfer function of a helmholtz-resonator. *Proceedings of the European Combustion Meeting, Orleans* .
- Barthel, F. (1958). Dissertation: Untersuchung über nichtlineare Helmholtzresonatoren. *Frequenz, Band 12, Heft 3* , S. 1-11.
- Bretschneider, V. (2001). *Praxisnahe Anwendung der Schallintensitätsmesstechnik in der Bauakustik - Vortrag auf dem 1. Weimarer Bauphysiktagen*. Dresden: Brüel & Kjaer GmbH.
- Cremer, L., & Müller, H. A. (1976). *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik - Band II Wellentheoretische Raumakustik*. Stuttgart: S. Hirzel Verlag.
- DIN 18180. (Januar 2007). *Gipsplatten - Arten und Anforderungen* . Berlin: Beuth.
- DIN EN ISO 10534-2. (Oktober 2001). *Akustik – Bestimmung des Schallabsorptionsgrades, Teil 2: Verfahren mit Übertragungsfunktion (ISO 10534-2:1998)*. Berlin: Beuth.
- DIN EN ISO 140-11. (August 2005). *Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen, Teil 11: Messung der Trittschallminderung durch Deckenauflagen auf leichten Bezugsdecken in Prüfständen*. Beuth, Berlin.
- DIN EN ISO 140-3. (März 2005). *Akustik - Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen - Teil 3: Messung der Luftschalldämmung von Bauteilen in Prüfständen*. Beuth, Berlin.
- DIN EN ISO 140-6. (Dezember 1998). *Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen, Teil 6: Messung der Trittschalldämmung von Decken und Prüfständen*. Beuth, Berlin.
- DIN EN ISO 15186-1,. (Dezember 2003). *Bestimmung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen aus Schallintensitätsmessung. Teil 1 - Messung im Prüfstand*. Berlin: Beuth.
- DIN EN ISO 354. (Dezember 2003). *Messung der Schallabsorption in Hallräumen*. Berlin: Beuth.
- DIN EN ISO 717 - 2. (1996 - 06). *Akustik - Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen -Teil 2: Trittschalldämmung*. Berlin: Beuth.
- DIN EN ISO 717 -1. (1996 - 06). *Akustik - Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen -Teil 1: Luftschalldämmung*. Berlin: Beuth.
- Drotleff, H., & Wack, R. (2008). *Raumakustische Qualifikation von Holzkonstruktionen - Entwicklung von integrierten Schallabsorbern für Holzbausysteme mit hohem Vorfertigungsgrad, Reihe Holzbauforschung, Band 8*. Stuttgart: Fraunhofer IRB-Verlag.

- Drotleff, H., & Zha, X. (2001). Raumakustische Maßnahmen für ein Videolabor unter Verwendung von Alternativen Faserfreien Absorbern. *IBP-Mitteilung 381* .
- Drotleff, H., Zha, X., & Scherer, W. (2000). Innovative Raumakustik für denkmalgeschützte Räume. *IBP-Mitteilung 358* .
- Fasold, W., & Veres, E. (2003). *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis, 2. Auflage*. Huss-Medien GmbH.
- Fasold, W., & Winkler, H. (1975). *Bauphysikalische Entwurfslehre Band 5*. Berlin: VEB Verlag für Bauwesen.
- Fuchs, H. (2006). Sport und Akustik im Einklang. *TrockenBau Akustik, Heft 8* , S. 34-38.
- Fuchs, H. V. (1992). Akustische Eigenschaften von Membranabsorbern. *Gesundheits-Ingenieur, Heft 4* , S. 205-213.
- Fuchs, H. V. (2002). Schallabsorber und Schalldämpfer - Teil 1: Überblick, Passive Absorber. *Bauphysik* , S. 102-113.
- Fuchs, H. V., Eckoldt, D., Brandstät, P., Rambauser, N., & Hanisch, R. (2002). Schallabsorber und Schalldämpfer - Teil 3: Helmholtz-Resonatoren, Interferenz-Dämpfer. *Bauphysik 24, Heft 4* , S. 286-295.
- Fuchs, H. V., Eckoldt, D., Zha, X., & Babuke, G. (kein Datum). Schallabsorber und Schalldämpfer - Teil 6: Hochintegrierte Absorber. *Bauphysik* , S. 261-270.
- Fuchs, H. V., Zha, X., & Zhou, X. (kein Datum). Schallabsorber und Schalldämpfer - Teil 5: Mikroperforierte Bauteile. *Bauphysik* , S. 80-88.
- Fuchs, H. V., Zha, X., Krämer, M., & Zhou, X. (2002). Schallabsorber und Schalldämpfer - Teil 2: Reaktive Absorber, Platten-Resonatoren. *Bauphysik 24, Heft 4* , S. 218-227.
- Gadyl'shin, R. R. (Oktober 1992). Influence of the position of the opening and its shape on the properties of a Helmholtz resonator. *Translated from "Teoreticheskaya i Matematicheskaya Fizika, Vol. 93, No. 1"* , S. 107-118.
- Grüning, T. (2001). Events im guten Ton. *Trockenbau-Akustik Heft 1* , S. 18ff.
- Hanisch, R., Krämer, M. M., Rambauser, N., & Brandstät, P. (2004). Plattenresonator und Streifenabsorber als Schalldämpfer für tiefe und mittlere Frequenzen. *IBP-Mitteilung 449* .
- Heckel, M., & Müller, H. A. (1975). *Taschenbuch der Technischen Akustik*. Berlin: Springer-Verlag Berlin/Heidelberg.
- Holtz, F., Hessinger, J., Rabold, A., & Buschbacher, H. (Mai 1999). *Holzbau Handbuch R3T3F3 Schalldämmende Holzbalken- und Brettstapeldecken*. München: Entwicklungsgemeinschaft Holzbau.

- Hopkins, C. (2009). Vortrag. *Sound insulation in timber-framed buildings, Improving the reliability and relevance of field measurements in the low-frequency range*. Vaxjö, Schweden.
- ISO 9613-1. (June, 1993). *Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors, Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere*. Genève: Switzerland.
- Krnak, M. (Acustica Vol. 16, Heft 6). Einfluß der Luftviskosität auf die Dämpfung und Resonanzfrequenz von Helmholtz-Resonatoren. *Acustica Vol. 16, Heft 6*, S. 331-342.
- Lapin, A. D. (2000). Low-Frequency Sound Field in a Room with a Helmholtz Resonator. *Acoustical Physics, Vol. 46, No. 4*, S. 491-493.
- Leistner, P., & Fuchs, H. V. (2001). Schlitzförmige Schallabsorber. *Bauphysik 23, Heft 6*, S. 333-337.
- Leistner, P., Leister, M., & Zimmermann, S. (2002). Schallabsorber und Schalldämpfer - Teil 4: Absorber mit aktiven Komponenten. *Bauphysik 24, Heft 6*, S. 361-367.
- Lohmann, Arnold, & Buchner. (2001). Modeling of the resonance characteristics of a helmholtz resonator type. *Proceedings of the European Combustion Meeting, Des Plaines, III*.
- Mao, Q., & Pietrzko, S. (17. April 2005). Control of Sound Transmission Through Double Wall Partitions Using Optimally Tuned Helmholtz Resonators. *Acta acustica united with Acustica, Vol. 91*, S. 723-731.
- Mechel, F. P. (1995). *Schallabsorber, Band 2 - Innere Schallfelder, Strukturen*. Hirzel-Verlag Stuttgart.
- Mechel, F. P. (1998). *Schallabsorber, Band 3 - Anwendungen*. Hirzel-Verlag Stuttgart.
- Mechel, F. P. (1989). *Schallabsorber, Band I Äußere Schallfelder, Wechselwirkungen*. Stuttgart: Hirzel Verlag.
- Mechel, F. P., Veits, I., & Schneider, W. (1982). *Voruntersuchung für die Entwicklung eines breitbandigen Absorberelementes mit Hilfe von Helmholtz-Resonatoren*. Stuttgart: IBP-Bericht SA03-83.
- Müller, G., & Möser, M. (2004). *Taschenbuch der Technischen Akustik 3. Auflage*. Berlin: Springer-Verlag Berlin.
- Ochmann, M. (1987). Eine asymptotische Methode für nichtlineare Kolbenabschlussprobleme und deren Anwendung auf nichtlineare Helmholtz-Resonatoren. *Fortschritte der Akustik - DAGA '87*, S. 401-404.
- Otto, J. (Diplomarbeit Oktober 2009). *Diplomarbeit - Experimentelle Untersuchungen zur Konstruktion und Wirkung von Helmholtz - Resonatoren in Holzbalkendecken*. Rosenheim: Hochschule Rosenheim.
- Renz, J. (2004). Die We(ä)nde zur besseren Akustik. *TrockenBau Akustik*, S. 30-33.

- Rschevkin, S. N. (1959). Gestaltung von Resonanzschallschluckern und deren Verwendung für die Nachhallregelung und Schallabsorption. *Hochfrequenztechnik und Elektroakustik, Heft 67*, S. 128-135.
- Russ, M. (2007). Berechnung des Schwingungsverhaltens gekoppelter Helmholtz-Resonatoren. *Verbrennung und Feuerung*, S. 175-181.
- Santifaller, E. (2004). Architektur als Droge - Cocoon Club Frankfurt am Main. *Deutsche Bau Zeitschrift DBZ Heft 12*, S. 58-62.
- Schmidt, H. (1989). *Schalltechnisches Taschenbuch*. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH.
- Schramm, M. (2010). Masterarbeit. *Aspekte zur Wirkungsweise von Helmholtzresonatoren als tieffrequente Trittschallabsorber in Holzbalkendecken*. Rosenheim: Hochschule Rosenheim.
- Schramm, M. (Januar 2010). Projektarbeit. *Experimentelle Untersuchungen zur Wirkungsweise von Helmholtzresonatoren als Trittschallabsorber in Holzbalkendecken*. Rosenheim, Deutschland.
- Schulze Hobbeling, H. (1998). Berechnung komplexer Absorption-/Reflexions-Schalldämpfer mit Hilfe der Finite-Element-Methode. *Acustica Vol. 67*, S. 275-283.
- VDI-4100. (August 2007). *Schallschutz von Wohnungen – Kriterien für Planung und Beurteilung*.
- Veit, I. (2005). *Technische Akustik*. Würzburg: Vogel Buchverlag.
- Vlcek, M. (1959). Die Dämpfung von Resonatoren. *Hochfrequenztechnik und Elektroakustik, Heft 67*, S. 135-139.
- Winkler, H., & Tennhardt, H.-P. (2004). Immer den richtigen Ton gewählt. *Trockenbau Akustik Heft 3*, S. 30-37.
- Wöhle, W. (1959). Die Absorption von Einzelresonatoren bei linienförmiger Anordnung in der unendlich ausgedehnten Wand und im geschlossenen Raum. *Hochfrequenztechnik und Elektroakustik, Heft 68*, S. 7-14.
- Wöhle, W. (1959). Die Absorption von Einzelresonatoren bei verschiedener Anordnung im geschlossenen Raum (Wandmitte, Kante, Ecke). *Hochfrequenztechnik und Elektroakustik, Heft 67*, S. 180-187.
- Wöhle, W. (1959). Die Absorption von Einzelresonatoren in der unendlich großen Wand. *Hochfrequenztechnik und Elektorakustik, Heft 68*, S. 140-146.
- Zha, X., Fuchs, H. V., & Drotleff, H. (2000). Eine neue Akustik für den Probesaal des Staatsorchesters Stuttgart. *IBP-Mitteilung 368*.
- Zhou, X., Heinz, R., & Fuchs, H. V. (1998). Zur Berechnung geschichteter Platten- und Lochplatten-Resonatoren. *Bauphysik 20, Heft 3*, S. 87-94.

Anlage

Anlage 1: Mitglieder der Arbeitsgruppe

Dipl.-Ing. Peter Jonak	Postfach 33 20
Firma BIEN ZENKER AG	D 64720 Michelstadt
Abt. Statik / Planung / Konstruktion	Tel. 06061/75-251
	Fax. 06061/75-203
	eMail p.jonak@bien-zenker.de

Dr. Jürgen Maack	Max-Planck-Ring 49
ITA Ingenieurgesellschaft für technische Akustik	65205 Wiesbaden
	Tel. 06122/956125
	Fax. 06122/956161
	eMail maack@ita.de

Dipl.-Ing. Roland Kurz	Brückenstraße 9
Kurz und Fischer GmbH	D 71364 Winnenden
Beratende Ingenieure für Bauphysik und Bautenschutz	Tel. 07195/9147-0
	Fax. 07195/9147-10
	eMail: roland.kurz@kurz-fischer.de

Dipl.-Ing. Georg Lange	Flutgraben 2
Bundesverband Deutscher Fertigung e.V.	D 53604 Bad Honnef
	Tel. 02224/ 9377-66
	Fax. 02224/ 9377-77
	eMail. g.lange@bdf-ev.de

Dr.-Ing. Philip Leistner	Postfach 80 1 1 40
Fraunhofer-Institut für Bauphysik	D 70511 Stuttgart
	Tel. 0711/970-3346
	Fax. 0711/970-3406
	eMail: phl@ibp.fhg.de

Prof. Dr. Ulrich Schanda	Hochschulstraße 1
Fachhochschule Rosenheim	D 83024 Rosenheim
Fakultät Angewandte Natur- und Geisteswissenschaften	Tel. 08031/805-407
	Fax. 08031/805-402
	eMail schanda@fh-rosenheim.de

Prof. Dr.-Ing. Werner Scholl	Bundesallee 100
Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)	D 38116 Braunschweig
D38116 Braunschweig	Tel. 0531/592-1700
Fachbereich 1.7 "Akustik und Dynamik"	Fax. 0531/592-1705
	eMail: werner.scholl@ptb.de

Dipl.-Ing. Arch, Dipl.-Ing. Bauw. Babett Schriewer Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung Forschungsinitiative Zukunft Bau	Deichmanns Aue 31-37 D 53179 Bonn Tel. 0228/994011642 Fax. 0228/99401 1529 eMail: b.schriewer@arcor.de
Dr. Wolfgang Rümler Knauf Gips KG	Postfach 10 D 97343 Iphofen Tel. 09323/311565 Fax. 09323/311040 eMail wolfgang.ruemler@knauf.de
Dipl.-Phys. Jochen Seidel Knauf Gips KG	Postfach 10 D 97343 Iphofen Tel. 09323/311565 Fax. 09323/311040 eMail jochen.seidel@knauf.de

Anlage 2: Mitarbeiter

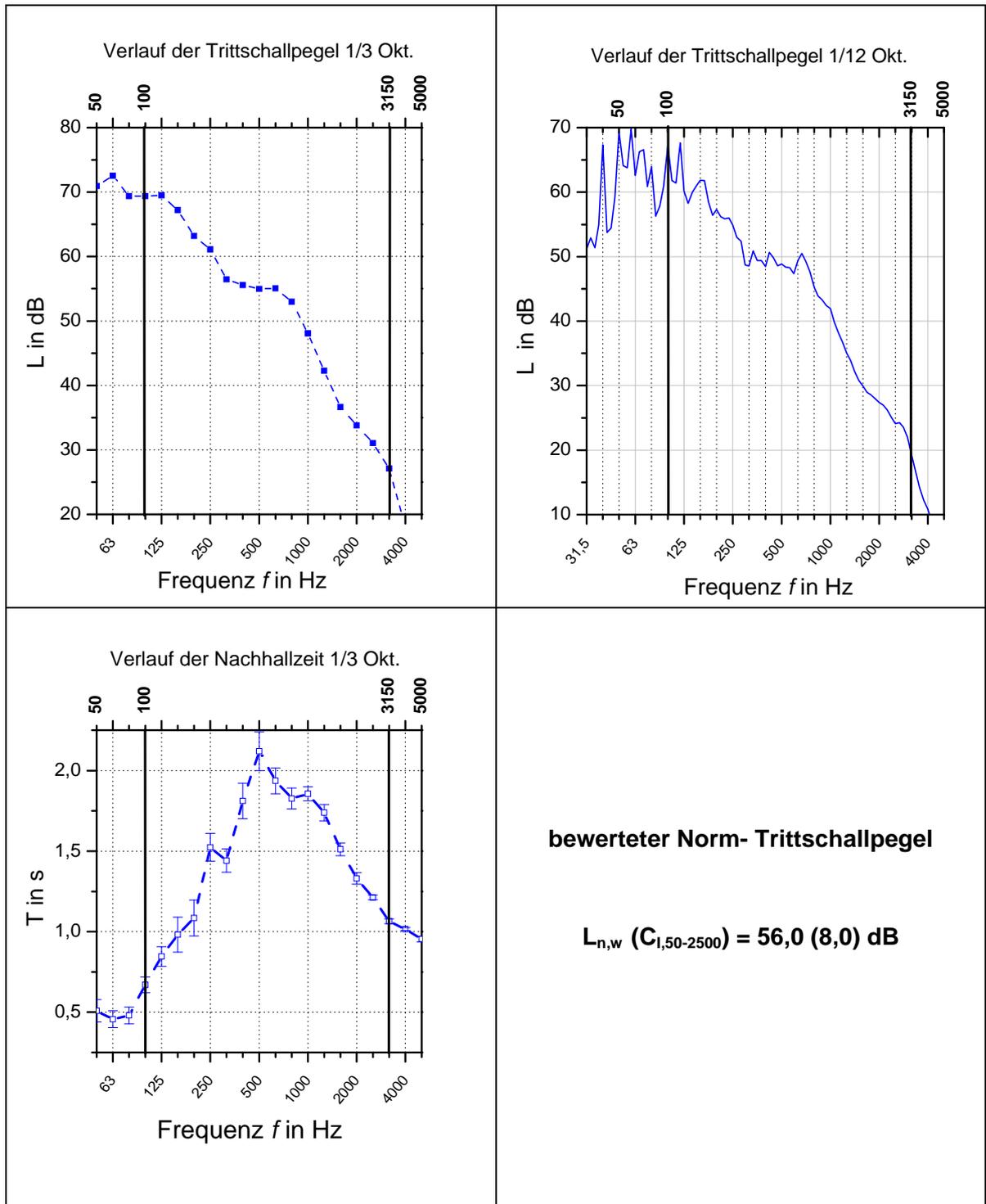
Am Forschungsprojekt waren folgende Mitarbeiter beteiligt:

Funktion	Name	Zeitraum
Projektleiter	Prof. Dr. Ulrich Schanda	Durchgehend
Projektmitarbeiter	Dipl.-Ing.(FH) Markus Schramm	bis Aug. 2010
Diplomandin	Jasmin Otto	bis Okt. 2009
Diplomand	Michael Wolf	von Feb. bis Aug. 2010
Diplomandin	Uta Link	von Sep. 2010 bis Jan. 2011
Wissenschaftliche Hilfskräfte	Sebastian Haupt Hanns-Martin Tröbs	nach Bedarf

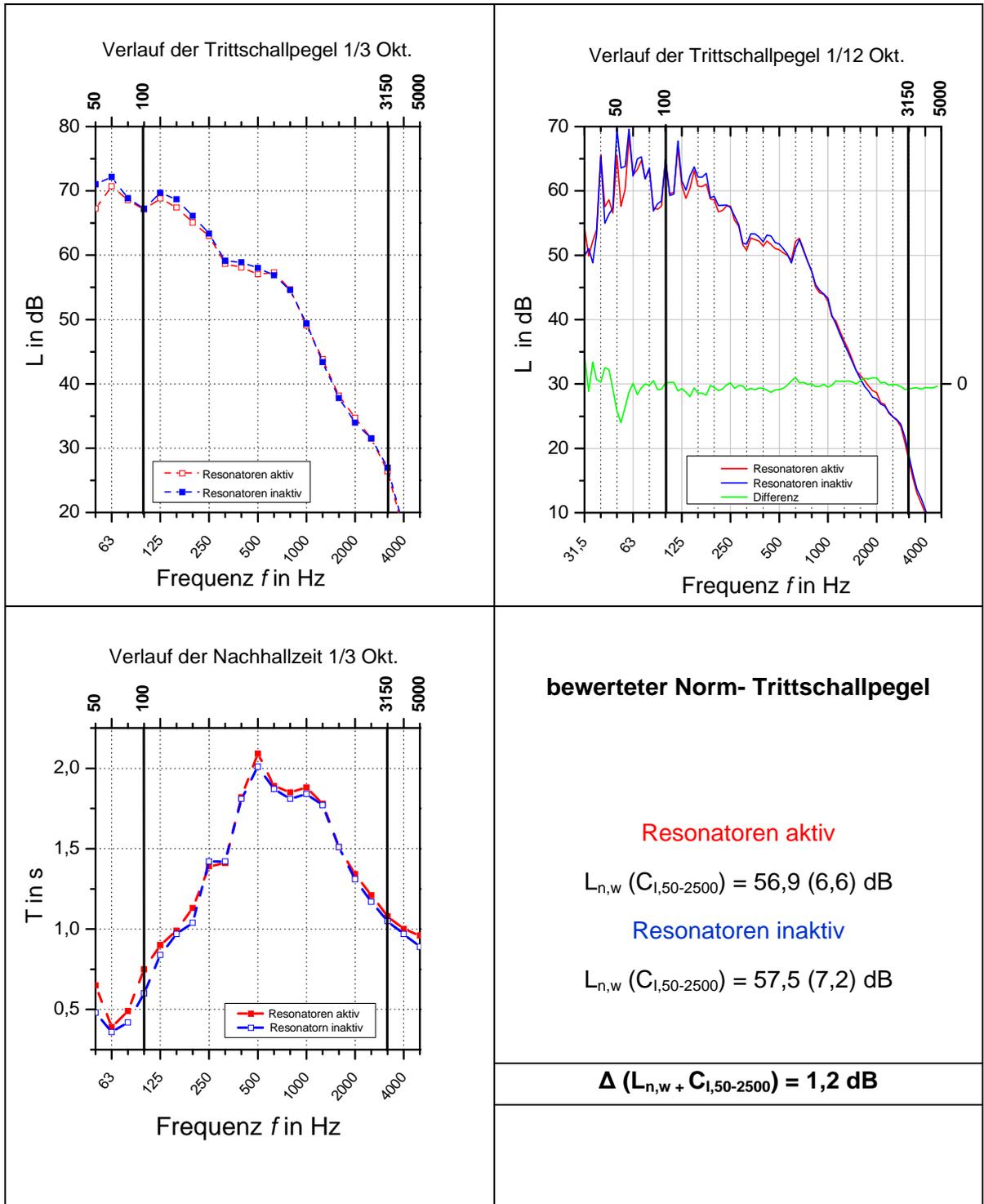
Anlage 3: Messergebnisse

Trittschallmessungen

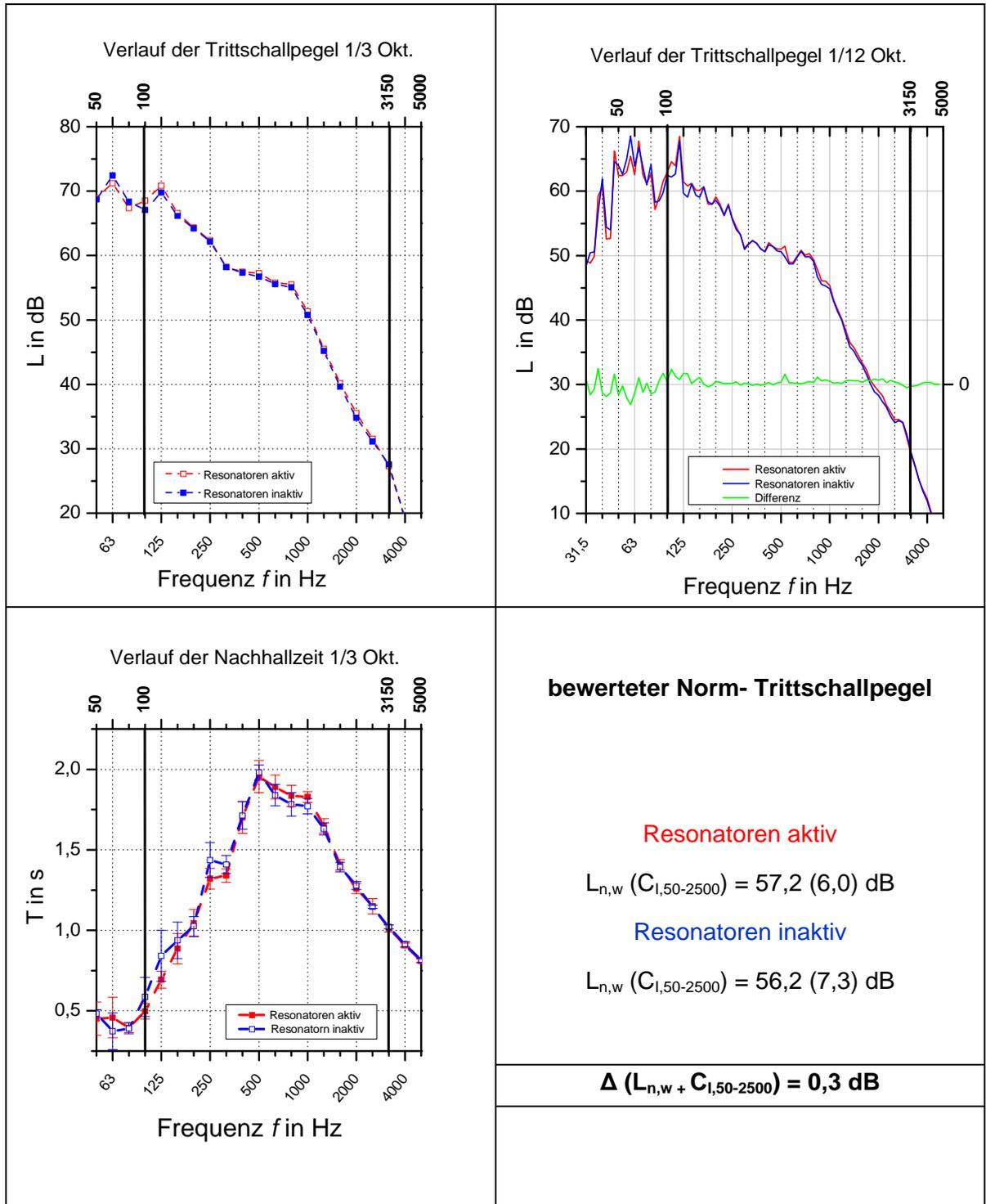
Referenzaufbau



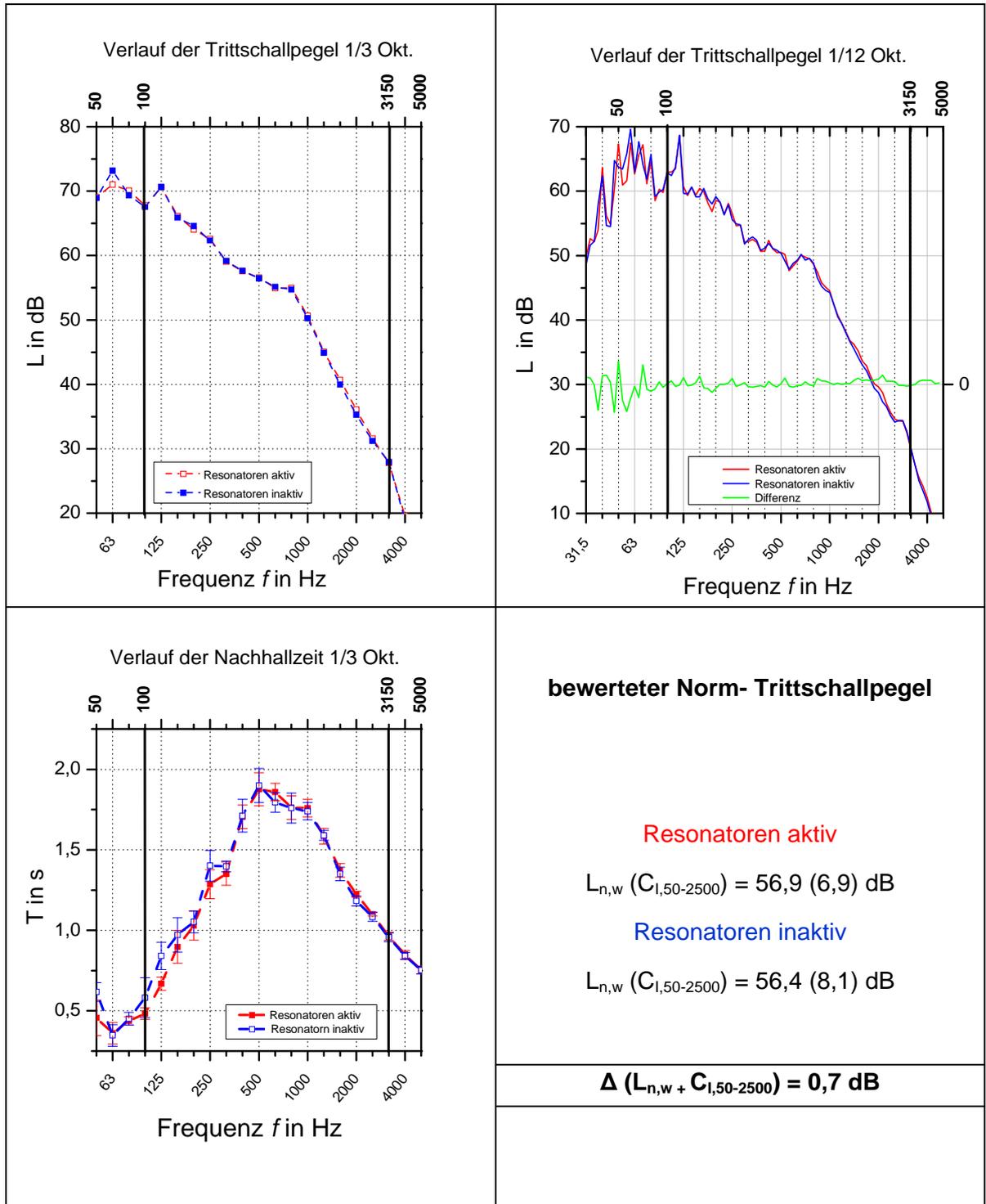
Aufbau 5.1.1 Mündung unbedämpft



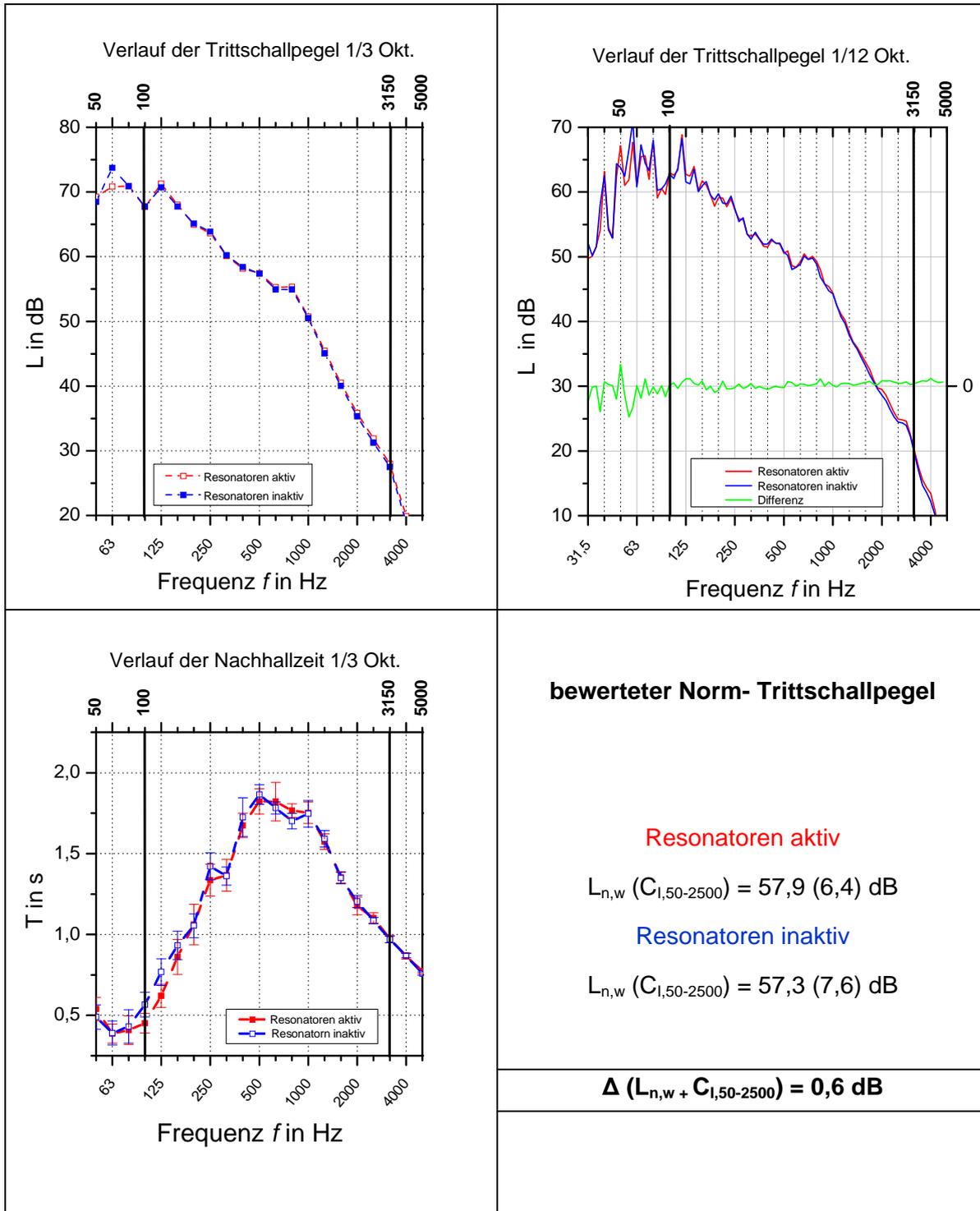
Aufbau 5.2.1 Mündung unbedämpft



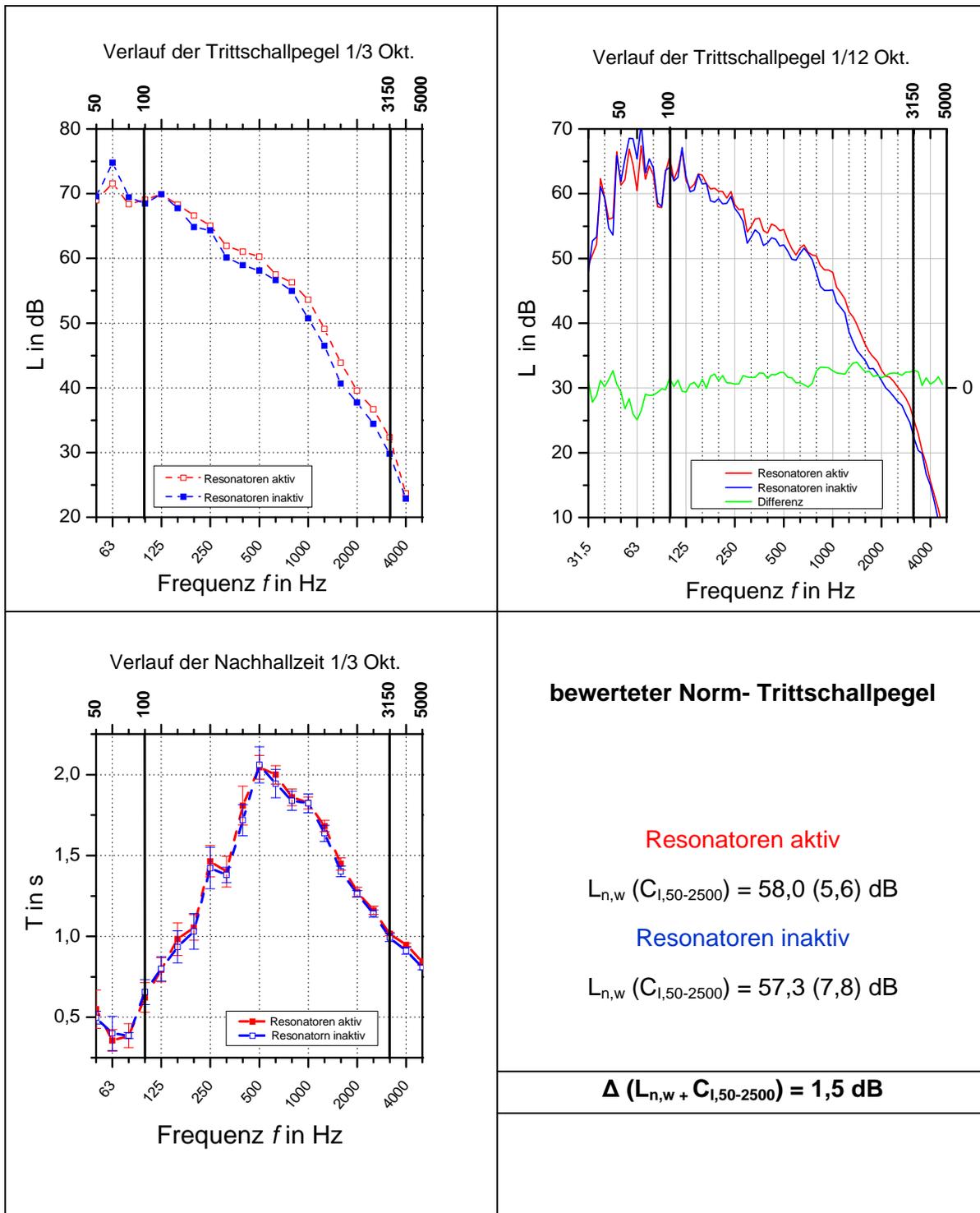
Aufbau 5.2.1 Mündung bedämpft



Aufbau 5.2.2 Mündung bedämpft

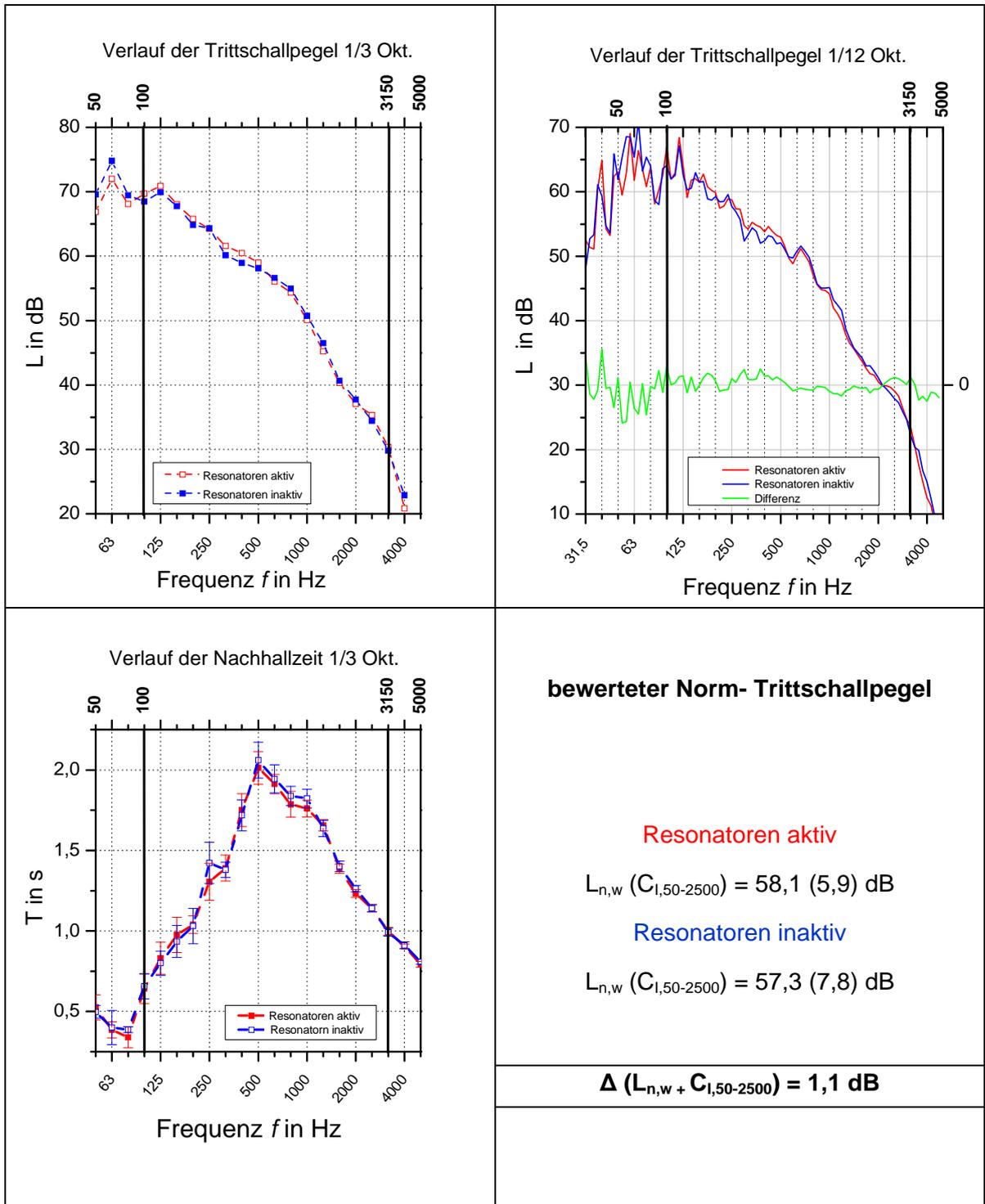


Aufbau 5.3.1 Mündung unbedämpft

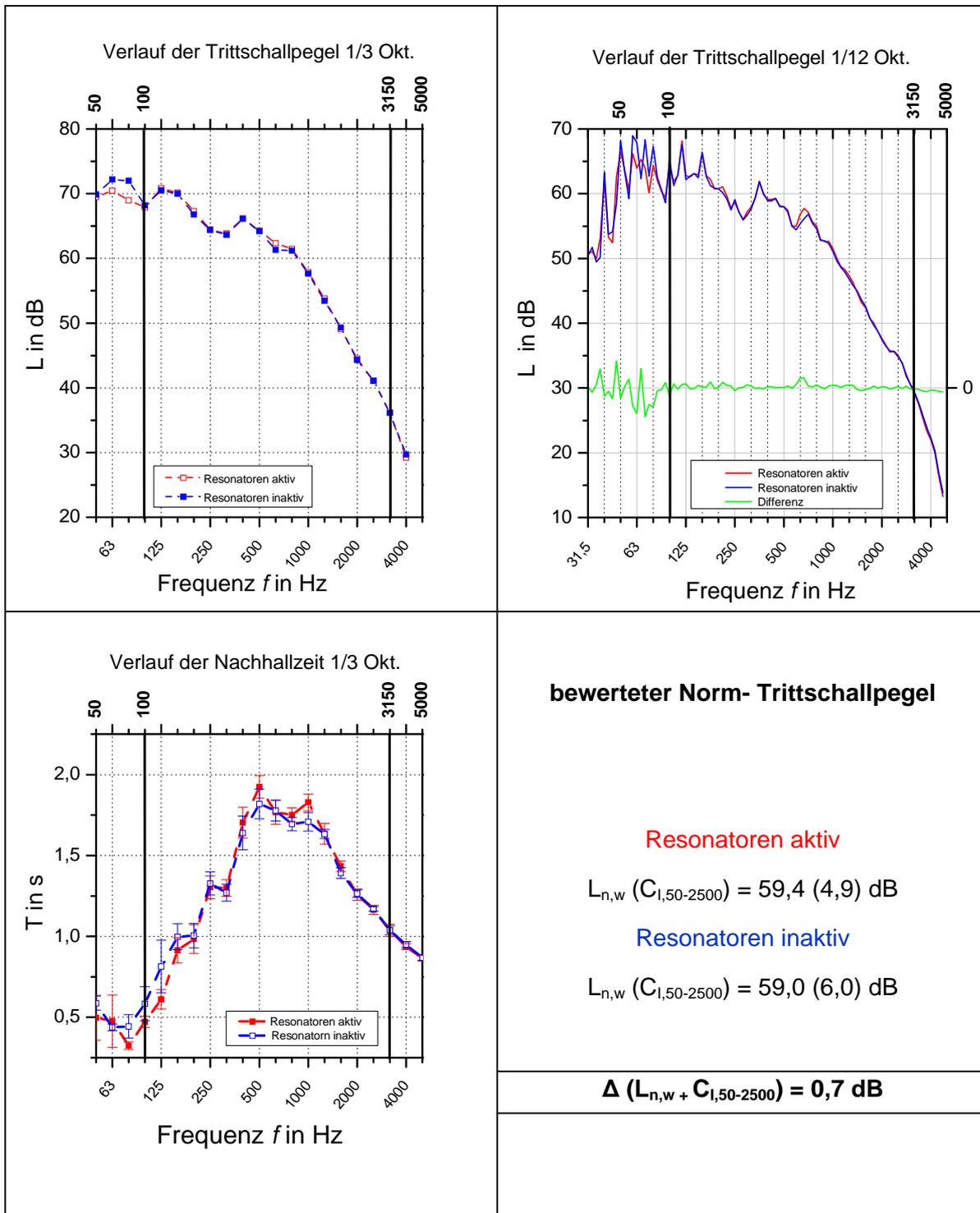


Aufbau 5.3.2 Mündung unbedämpft

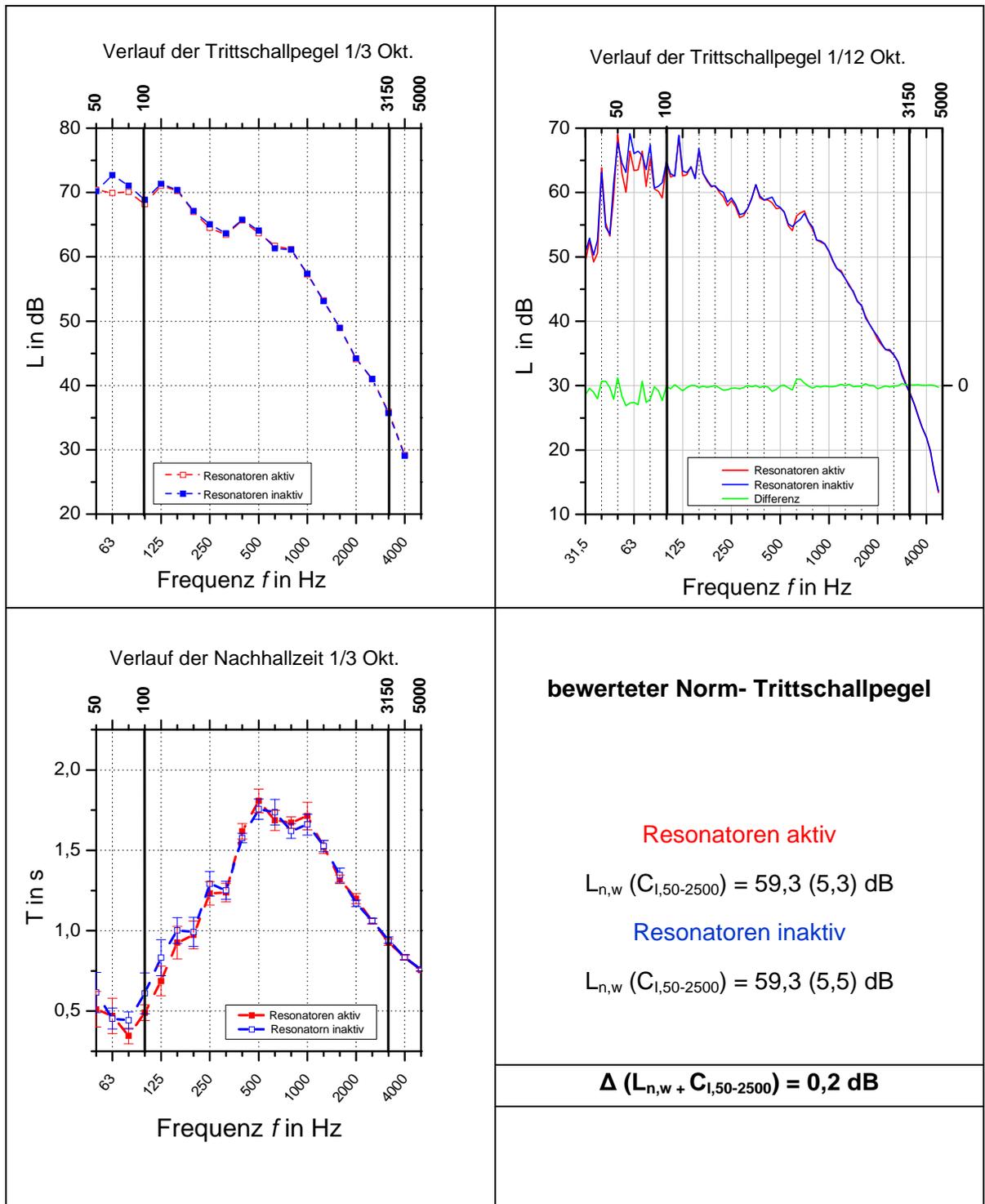
Für die Messung der geschlossenen Resonatoren wurden die Werte von 5.3.1 übernommen



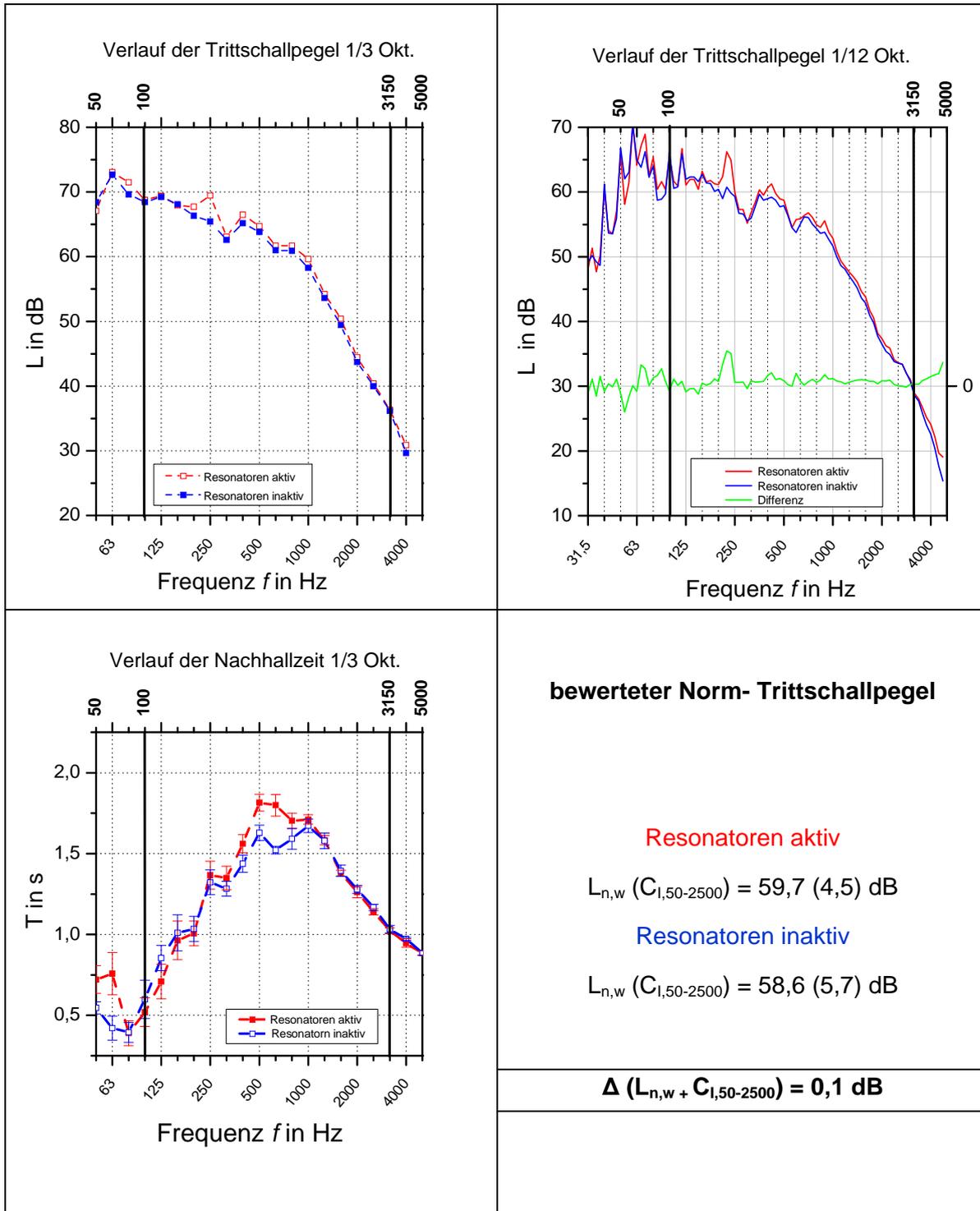
Aufbau 5.3.3 Mündung unbedämpft



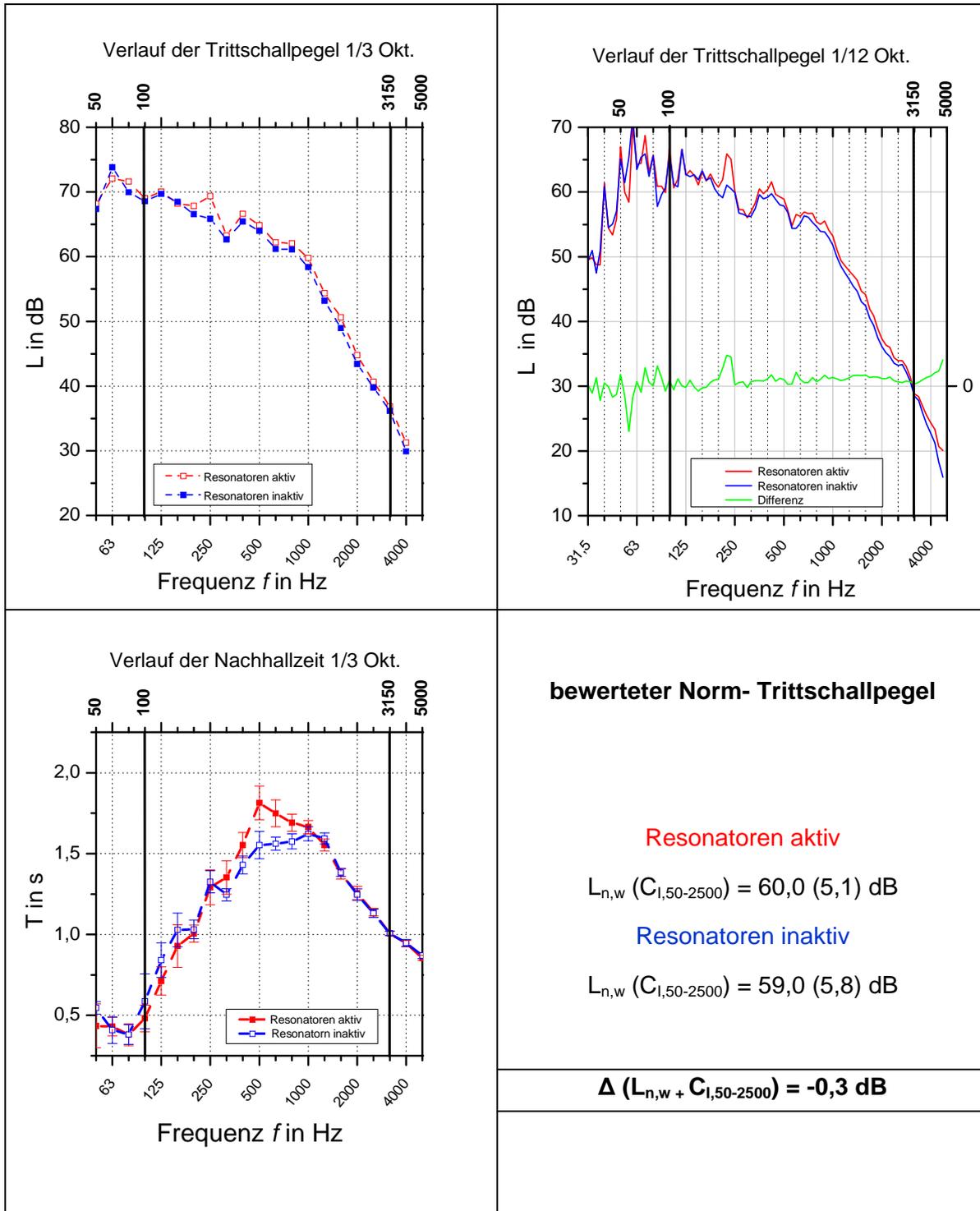
Aufbau 5.3.3 Mündung bedämpft



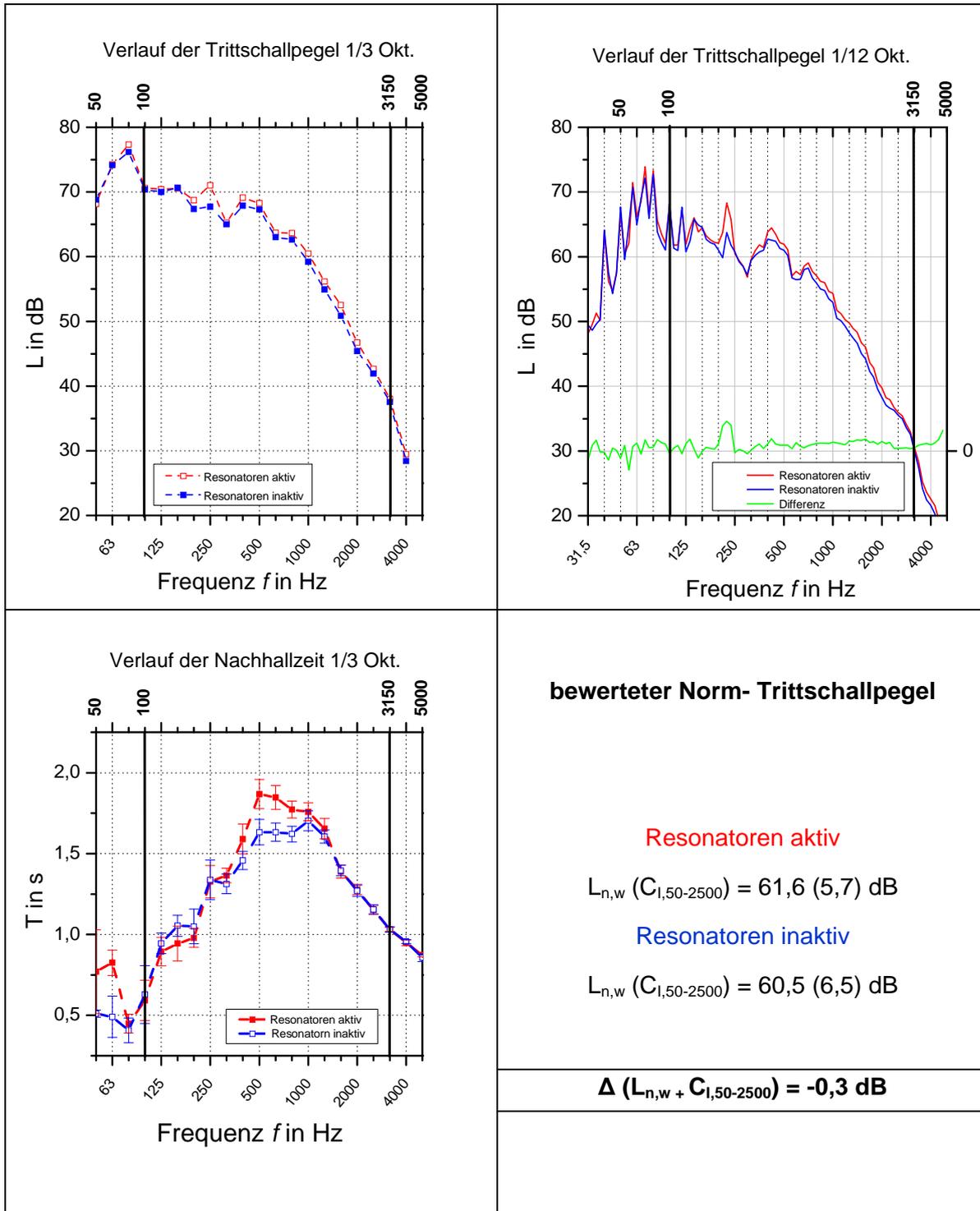
Aufbau 5.4.1 Mündung unbedämpft



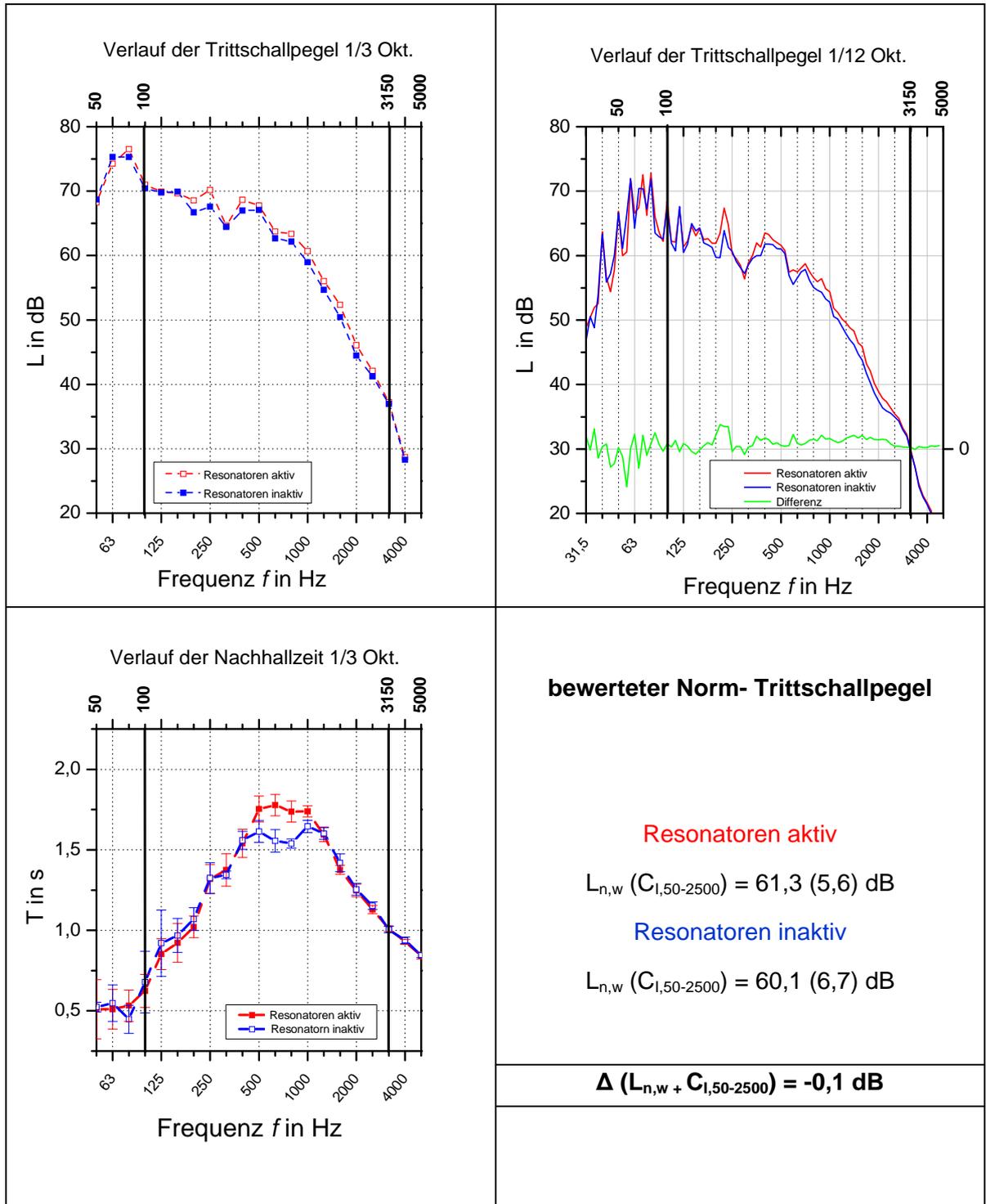
Aufbau 5.4.1 Mündung bedämpft



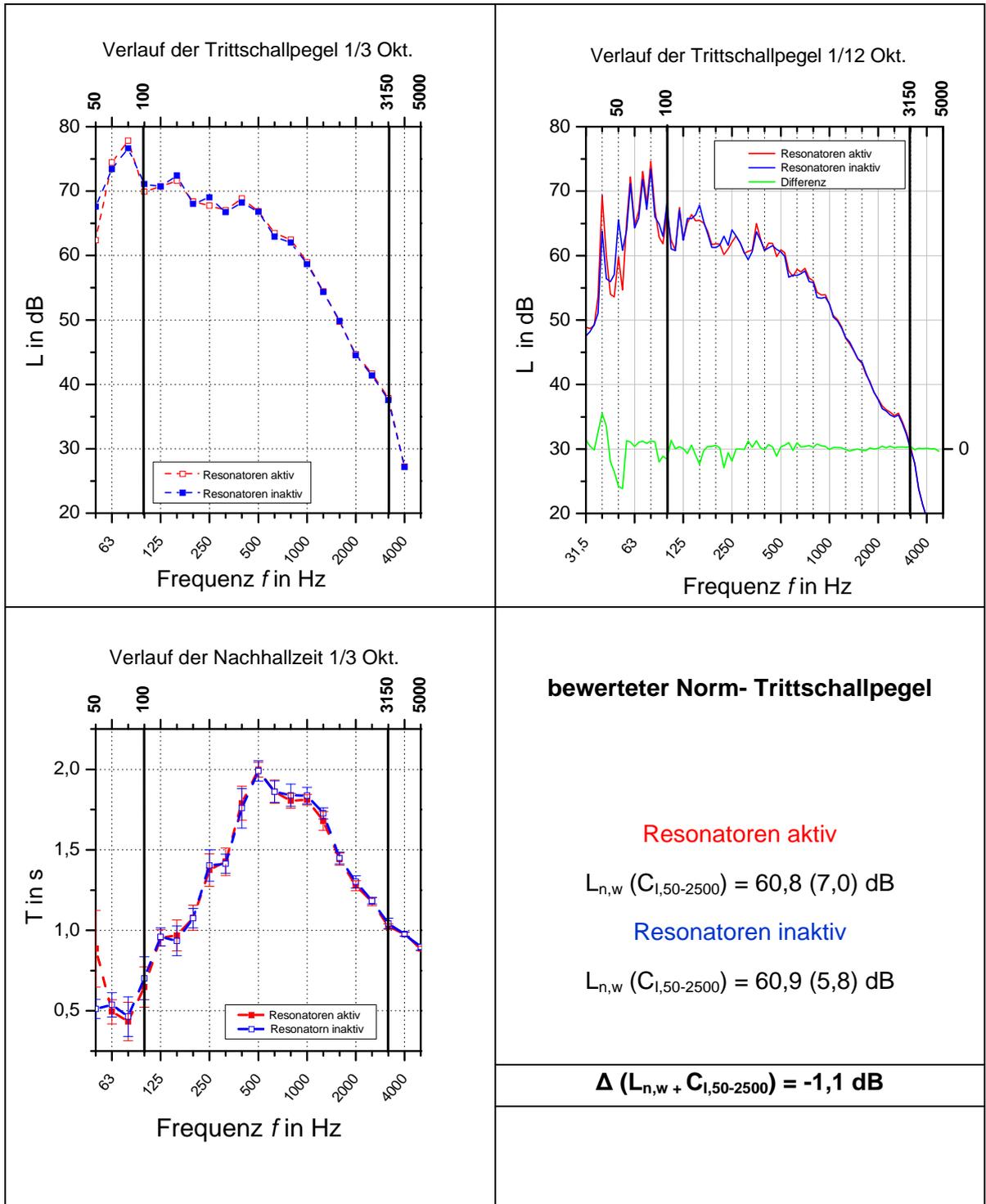
Aufbau 5.4.2 Mündung unbedämpft



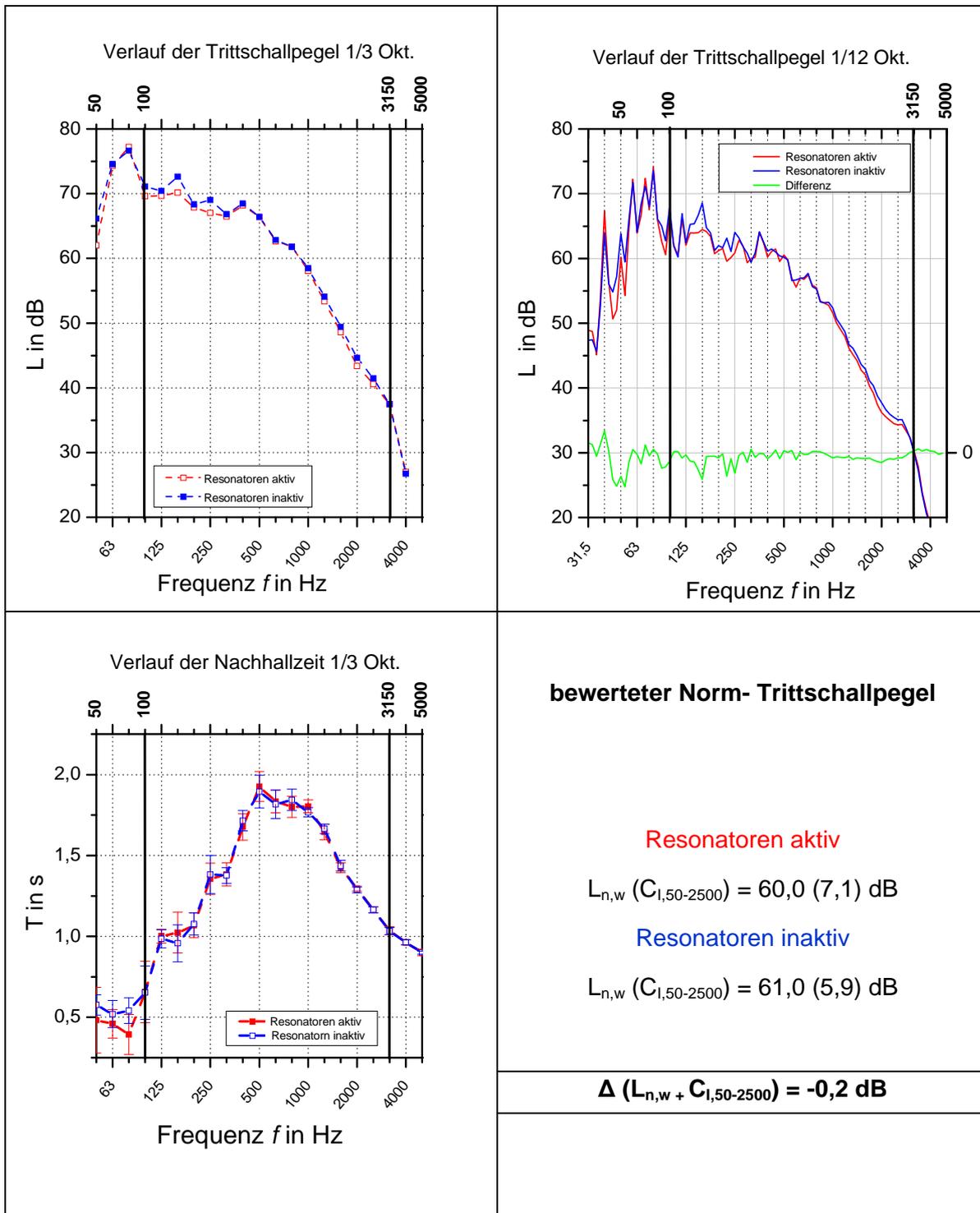
Aufbau 5.4.2 Mündung bedämpft



Aufbau 5.4.3 Mündung unbedämpft

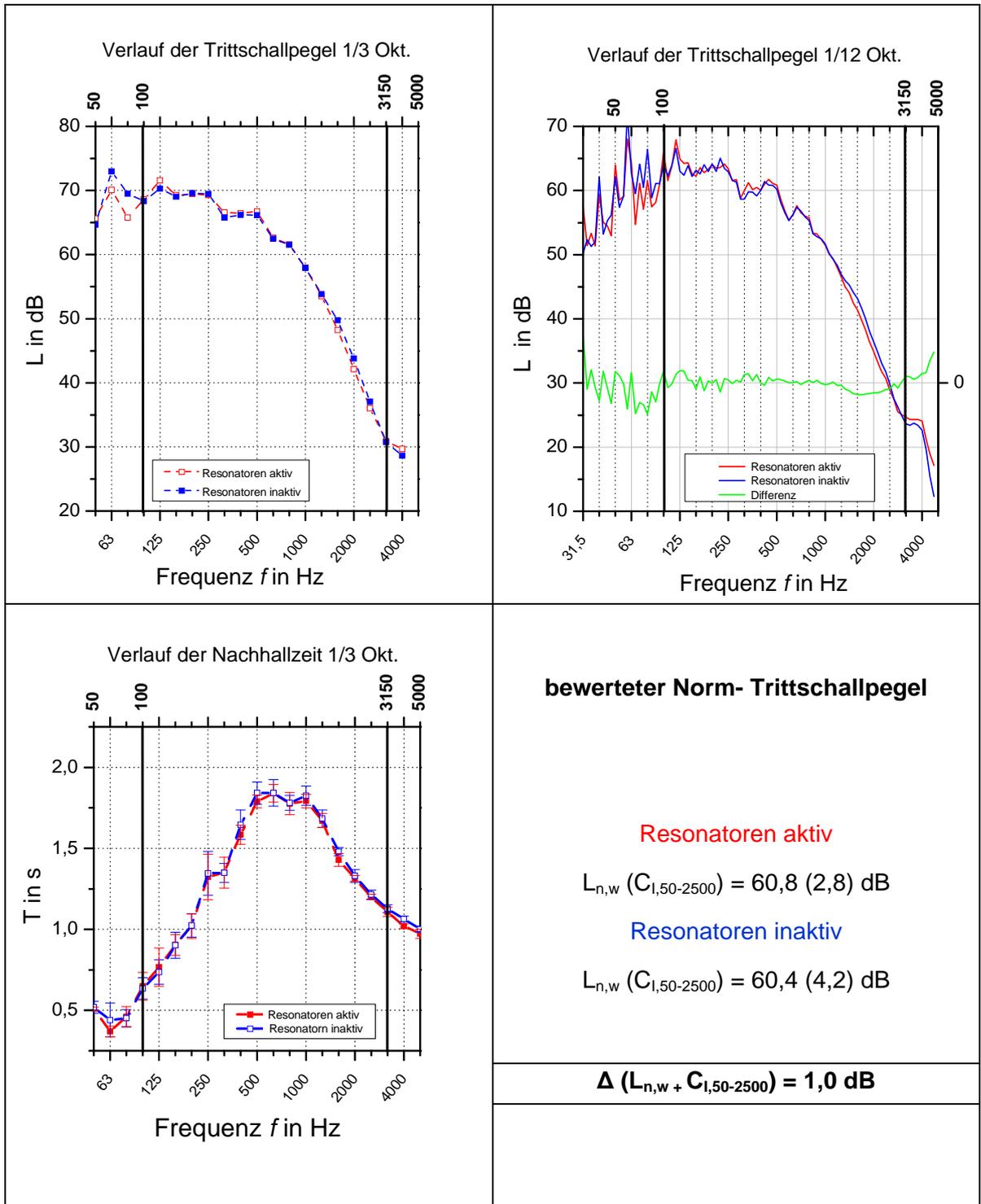


Aufbau 5.4.3 Mündung bedämpft



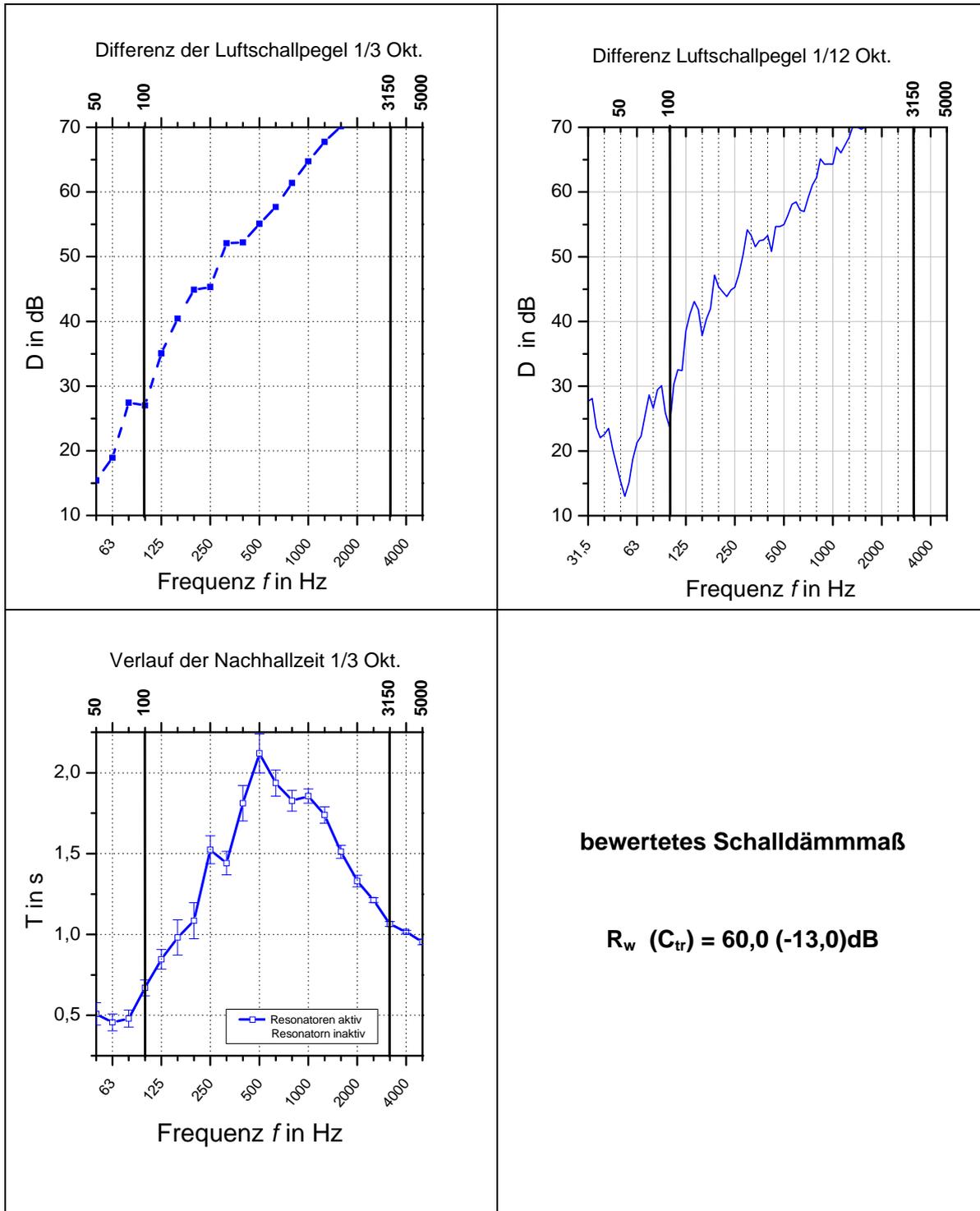
Aufbau 5.5.1 und 5.5.2 - siehe Kapitel 6.2

Aufbau 5.5.3 Mündung unbedämpft

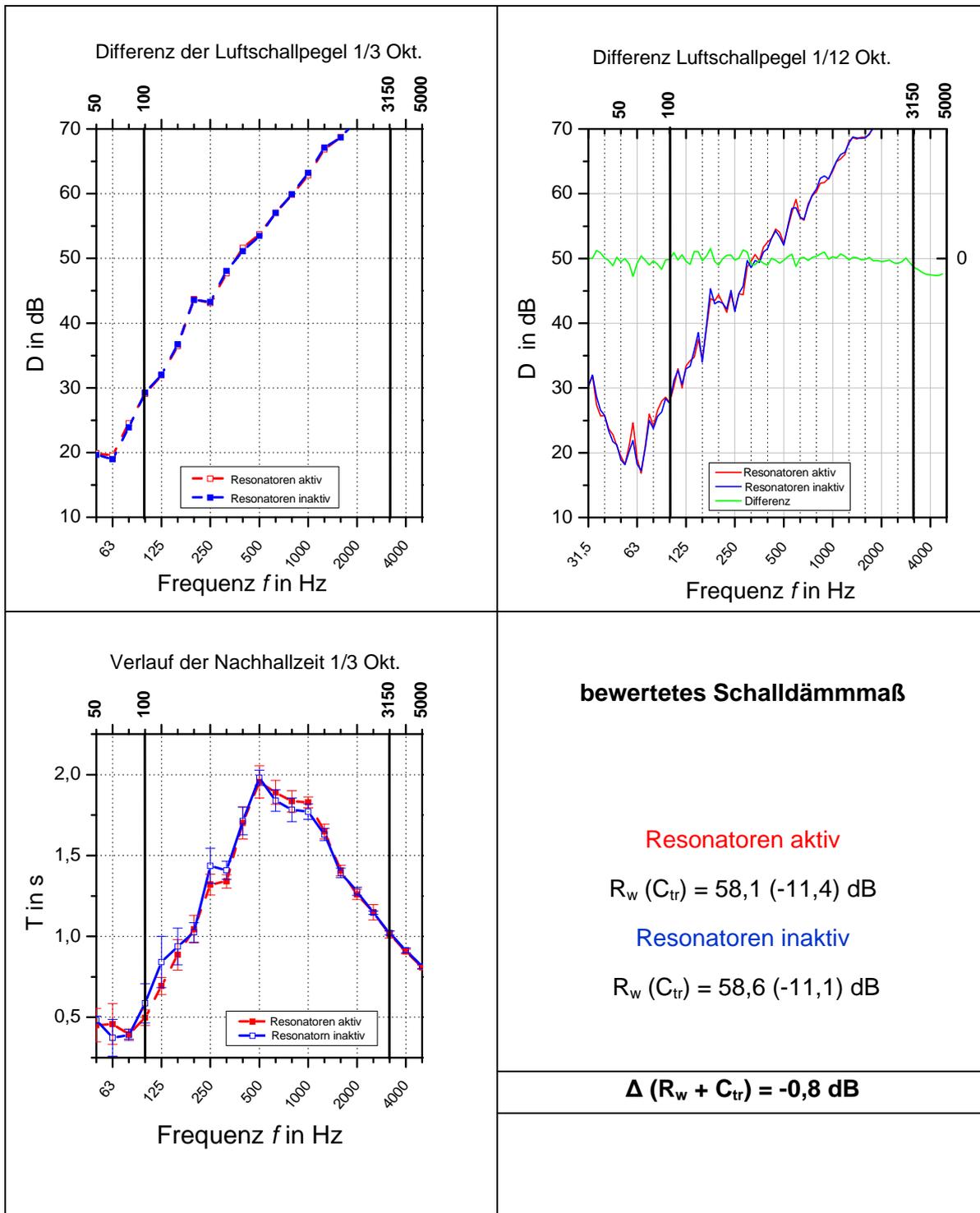


Luftschallmessungen

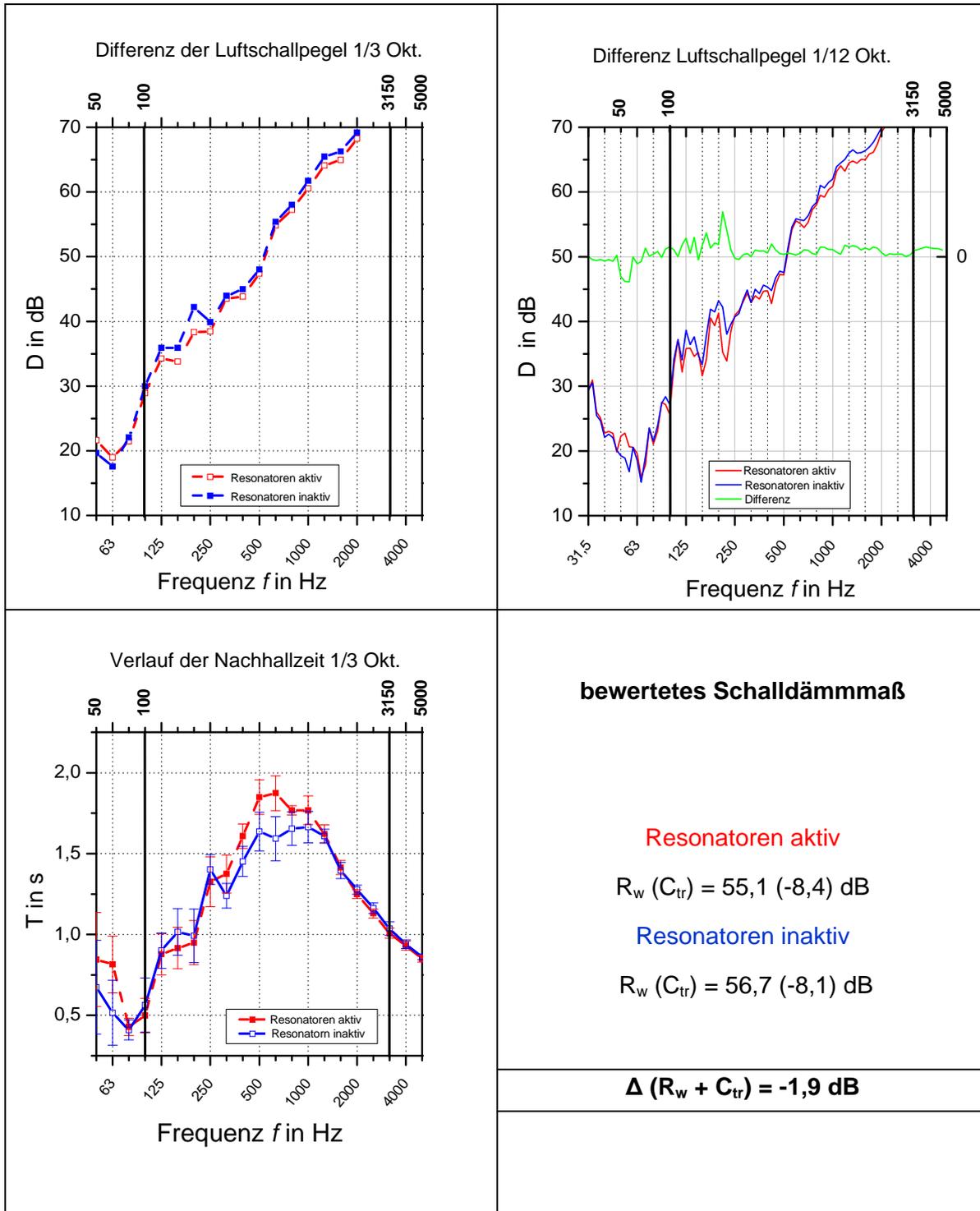
Referenzaufbau



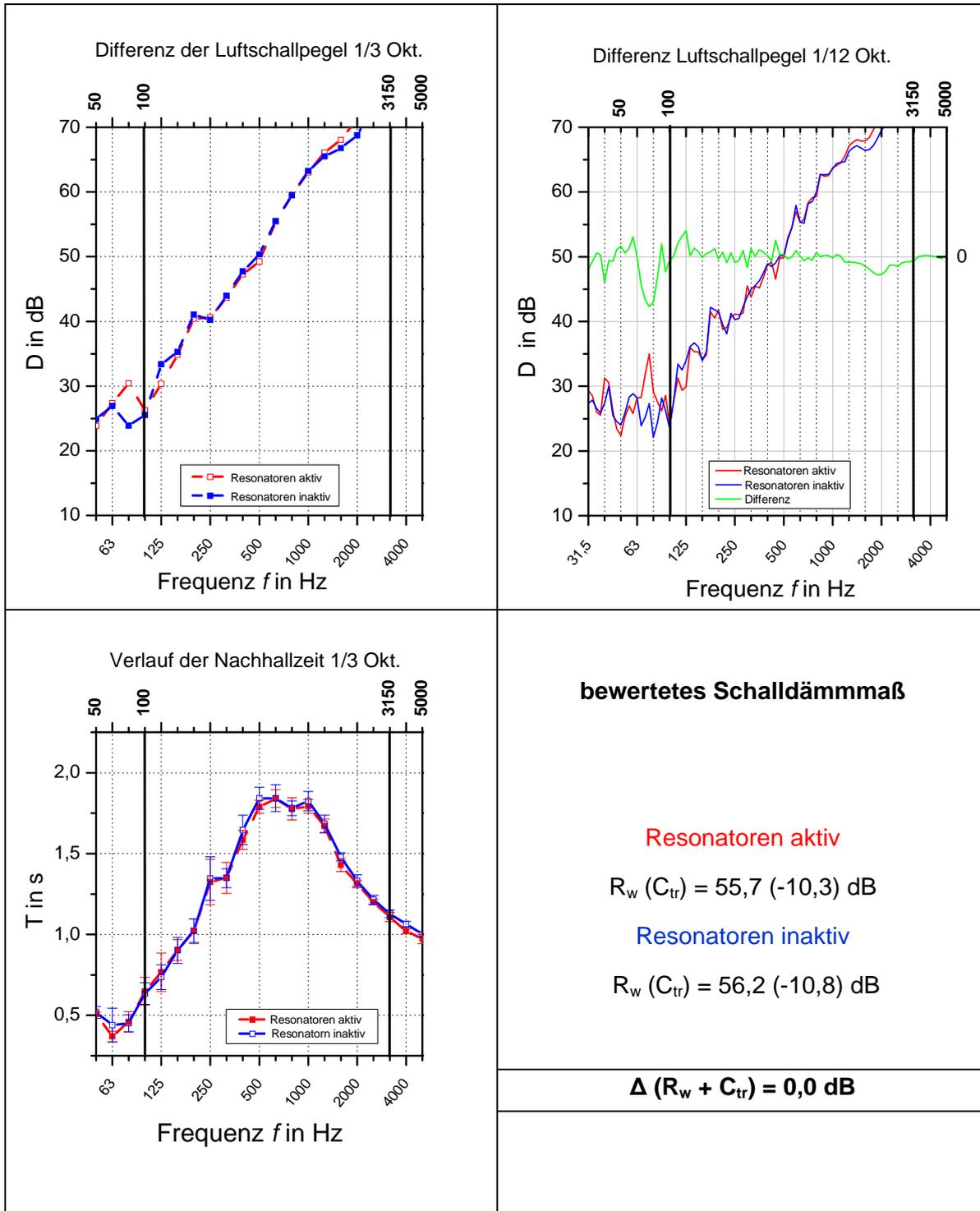
Aufbau 5.2.1 Mündung unbedämpft



Aufbau 5.4.2 Mündung unbedämpft



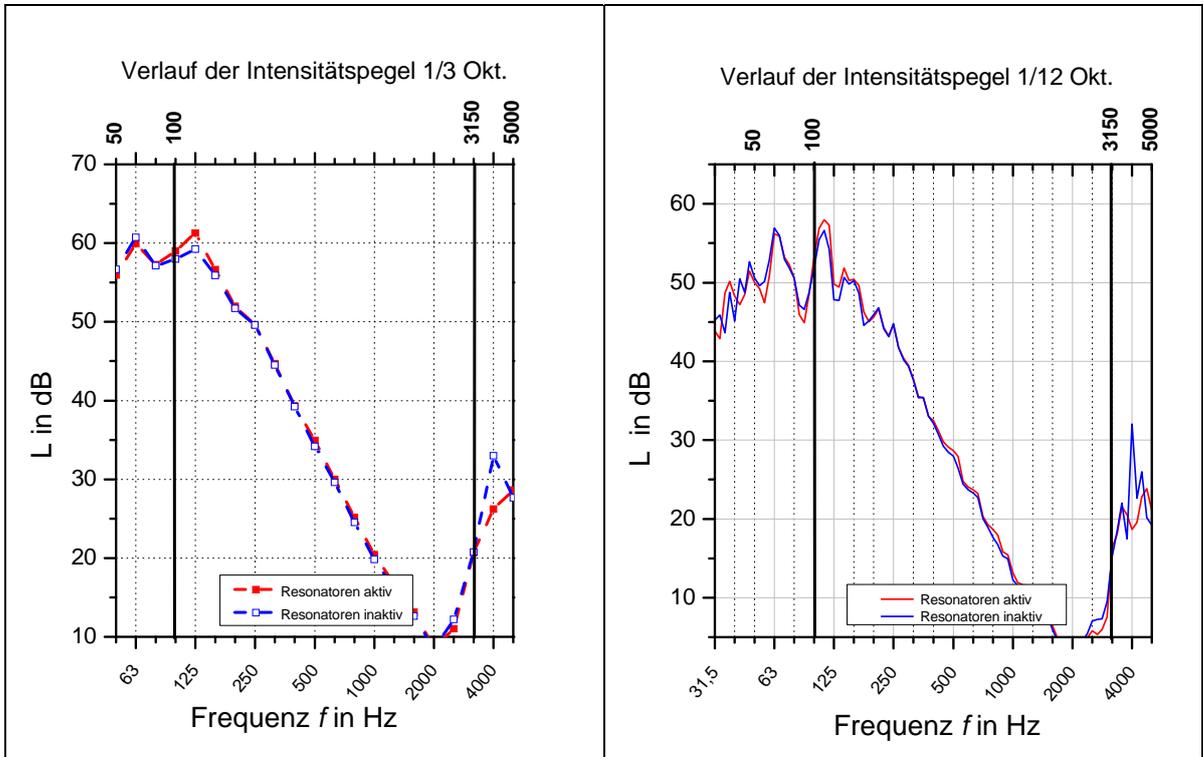
Aufbau 5.5.3 Mündung unbedämpft



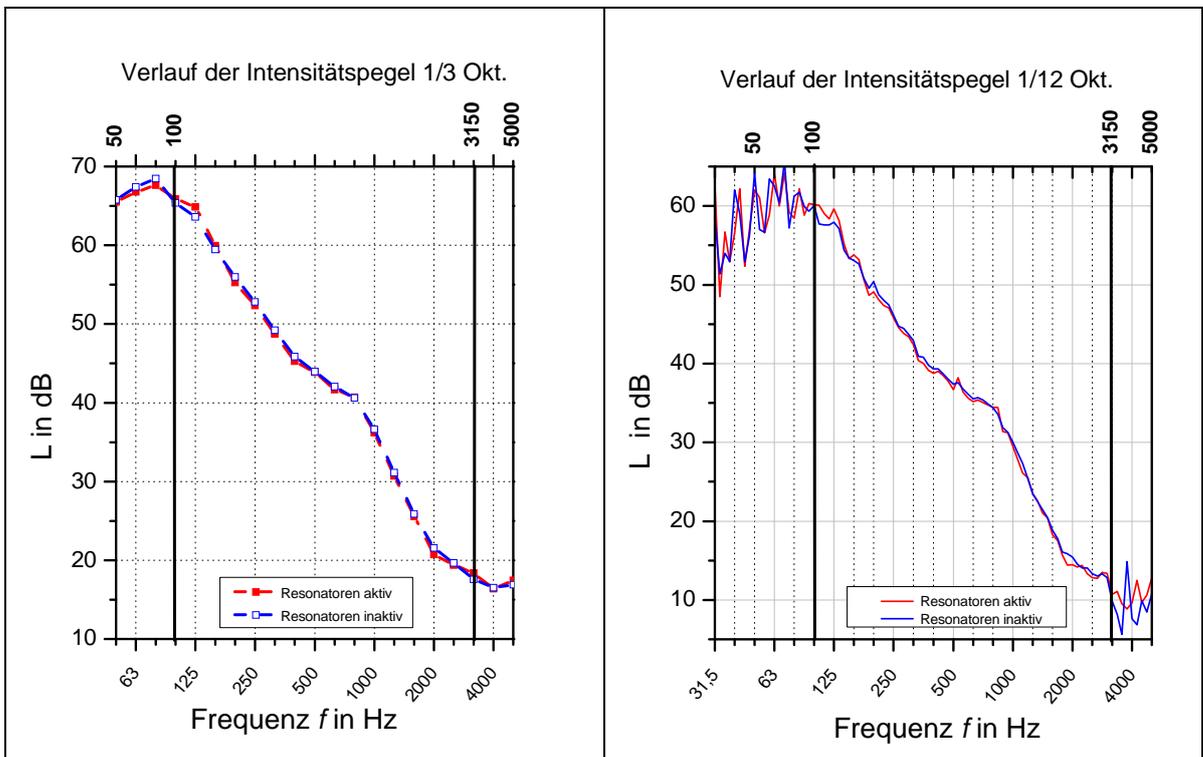
Intensitätsmessungen – Scan

Aufbau 5.2.2 Mündung unbedämpft

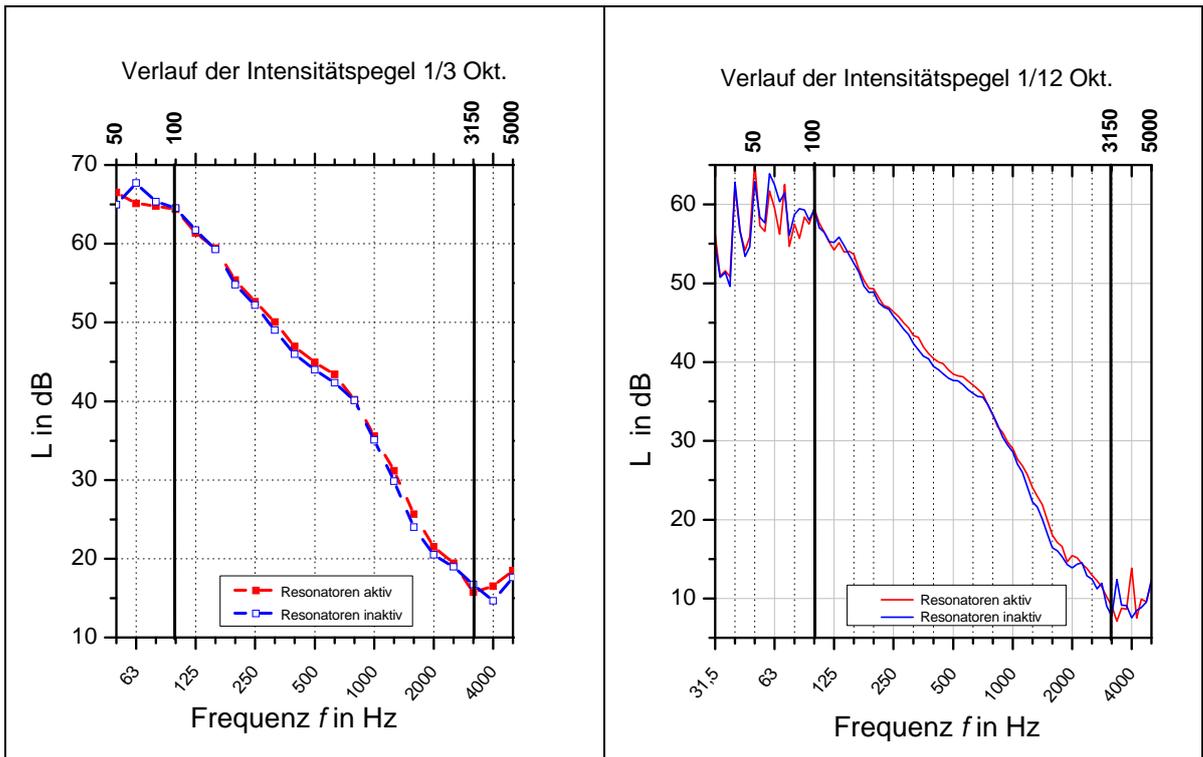
Anregung durch Luftschall (Dodekaeder)



Anregung durch Normhammerwerk

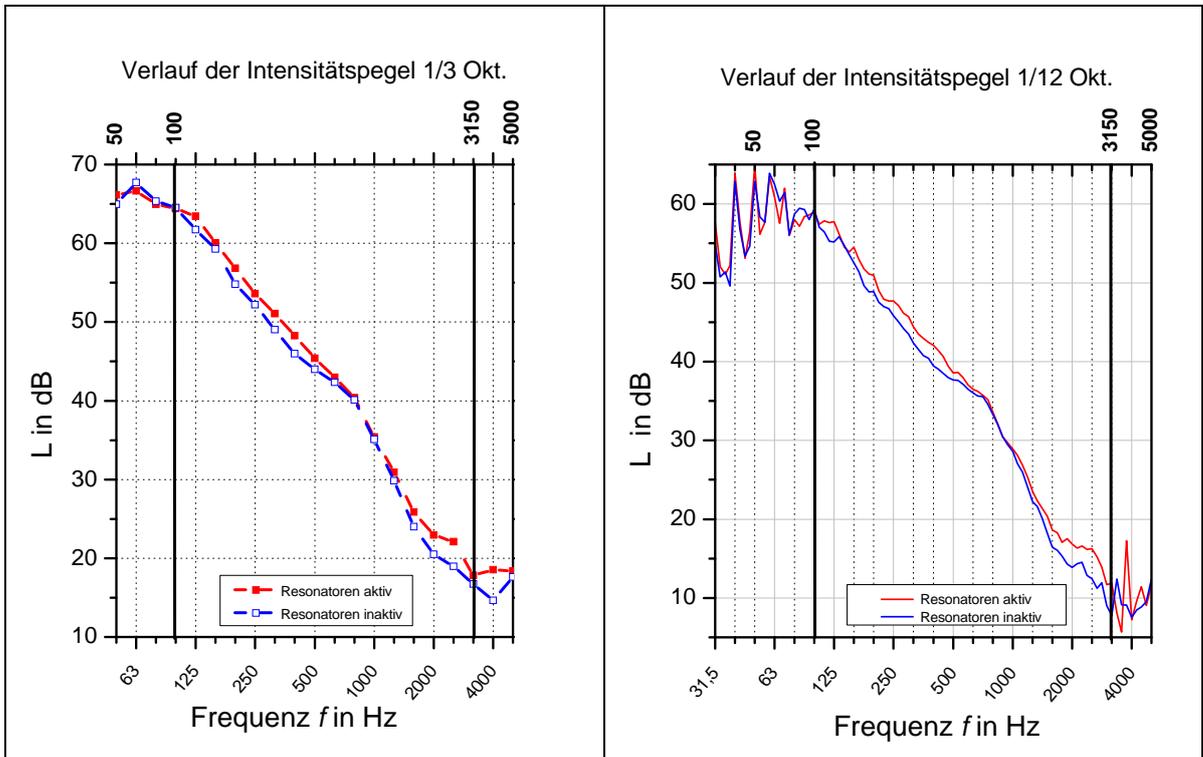


Aufbau 5.3.1 Mündung unbedämpft



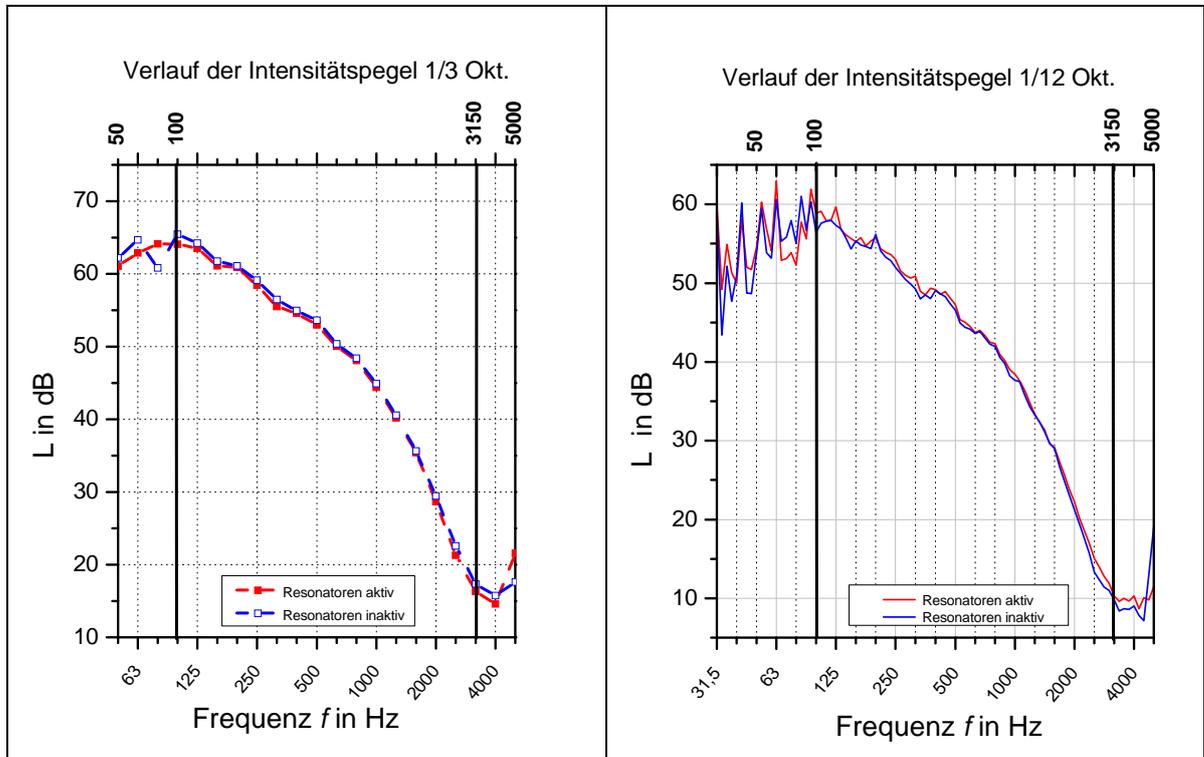
Aufbau 5.3.2 Mündung unbedämpft

Für die Messung der geschlossenen Resonatoren wurden die Werte von 5.3.1 übernommen



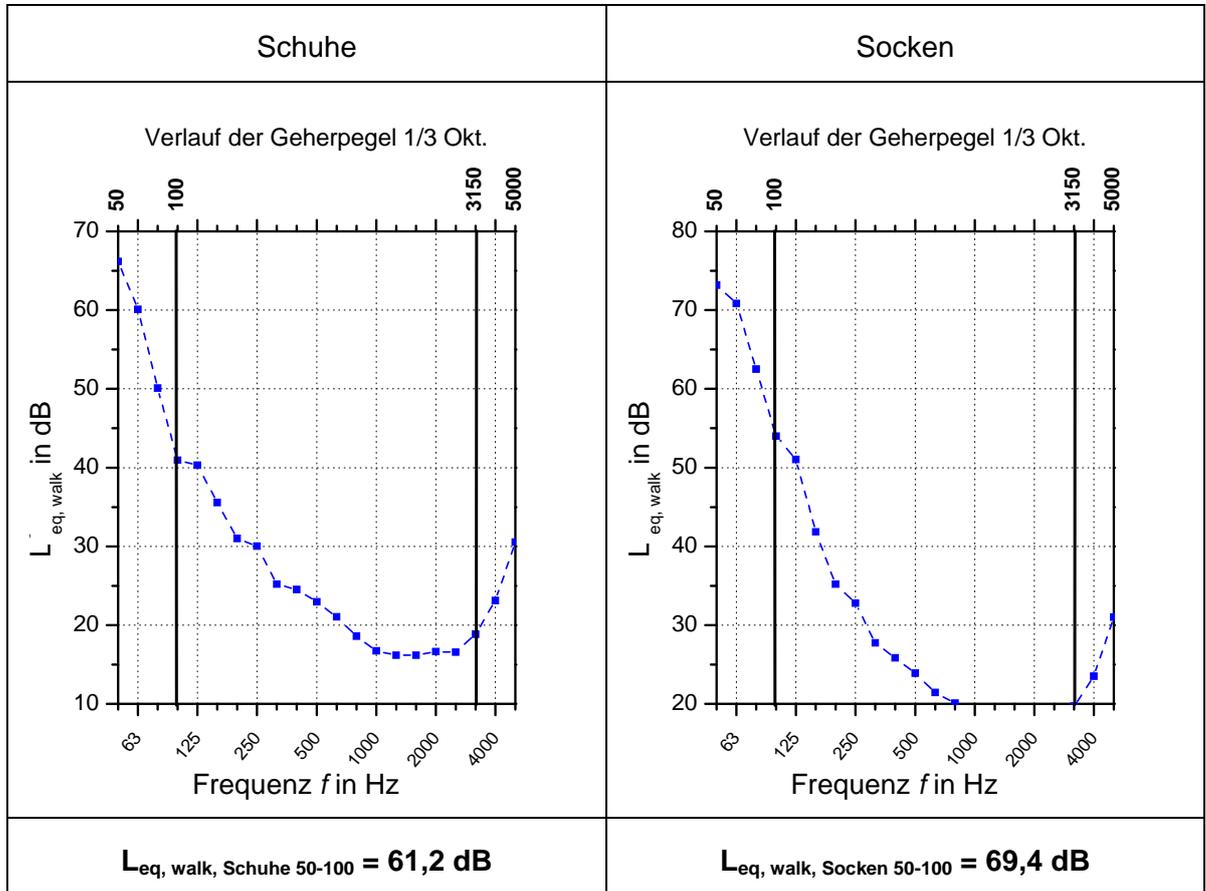
Aufbau 5.5.1 und 5.5.2 - siehe Kapitel 6.2

Aufbau 5.5.3 Mündung unbedämpft

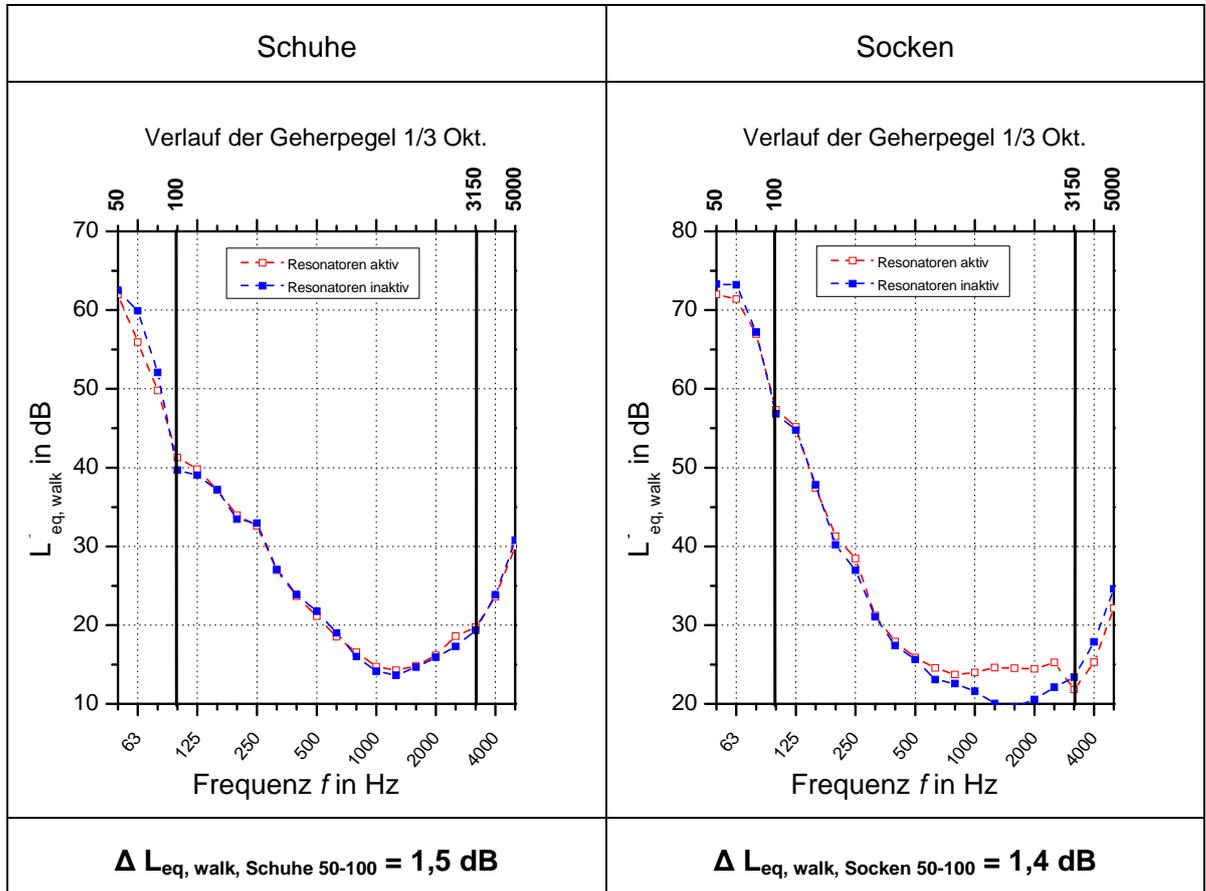


Gehör Messungen

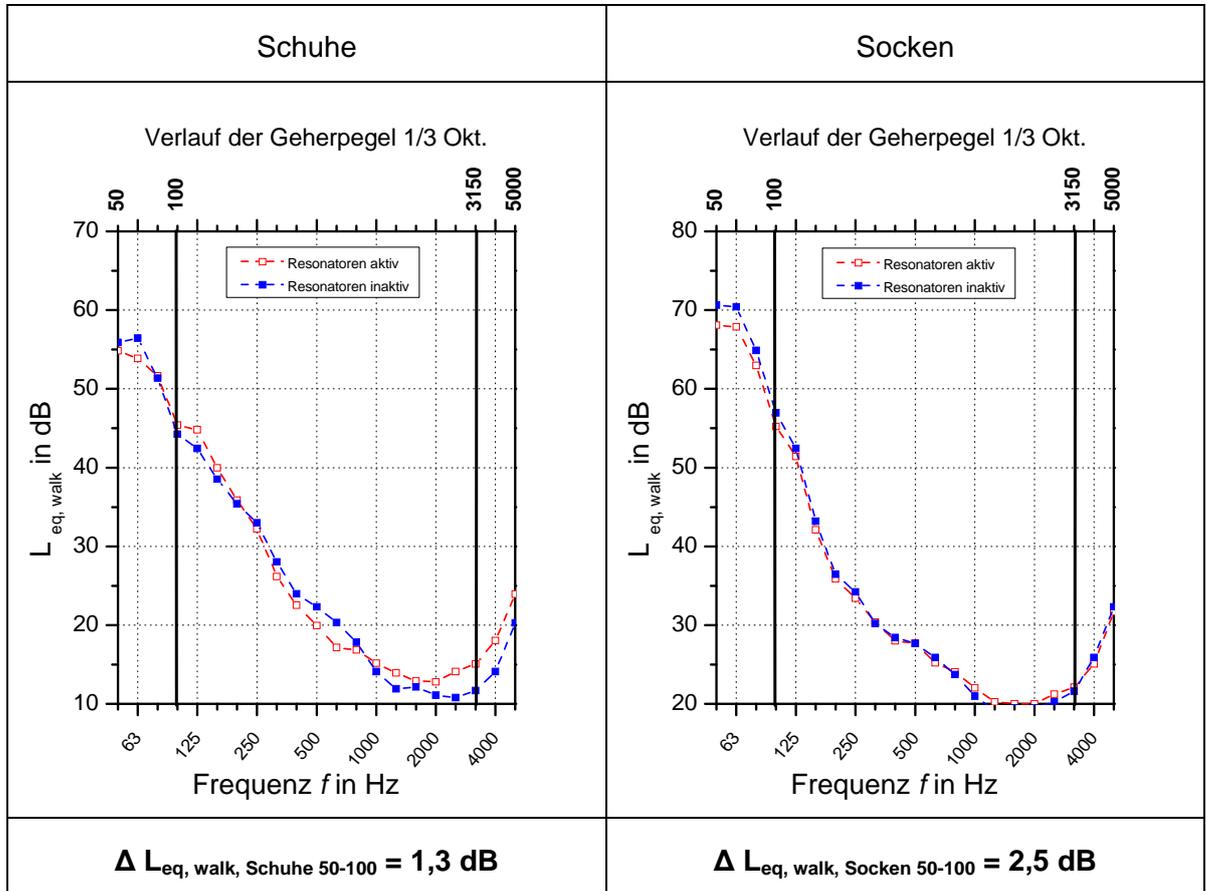
Referenzaufbau



Aufbau 5.1.1 Mündung unbedämpft

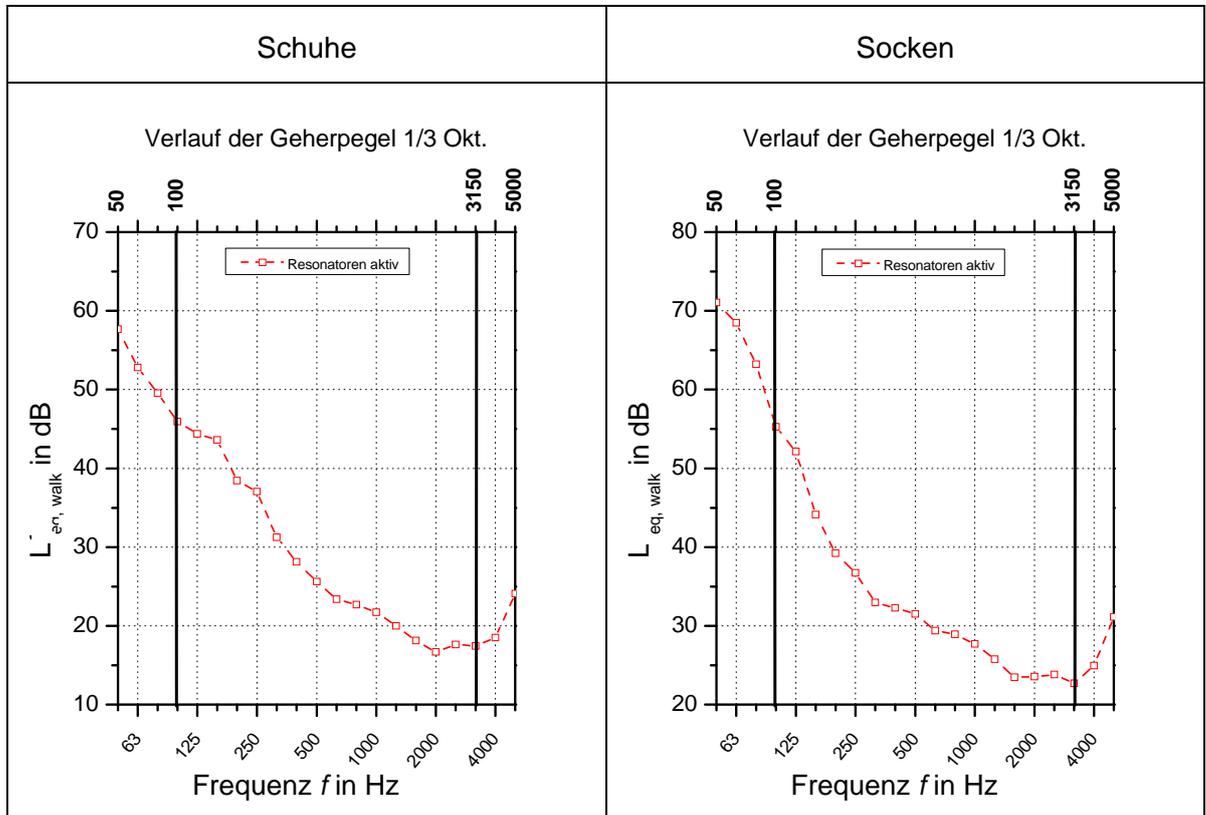


Aufbau 5.2.1 Mündung bedämpft



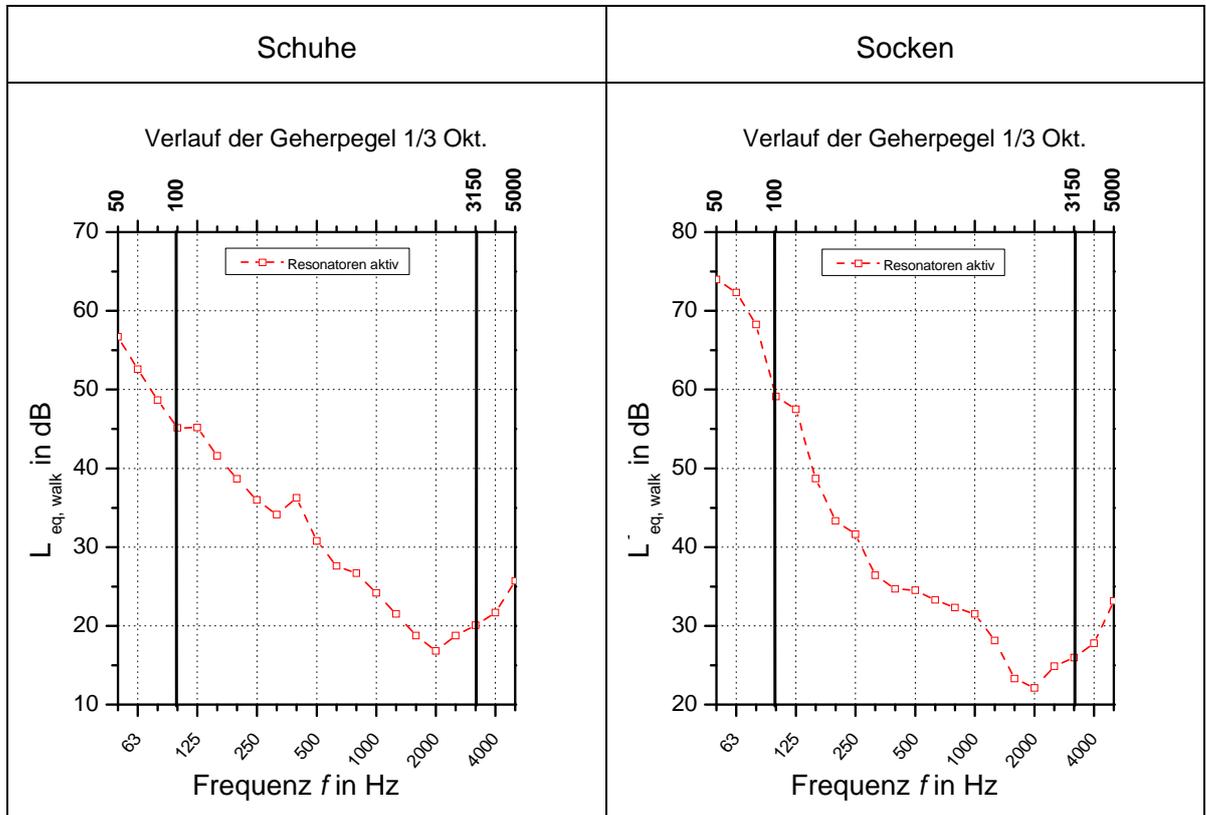
Aufbau 5.3.1 Mündung unbedämpft

Hier wurde nur der Aufbau mit aktiven Resonatoren gemessen.

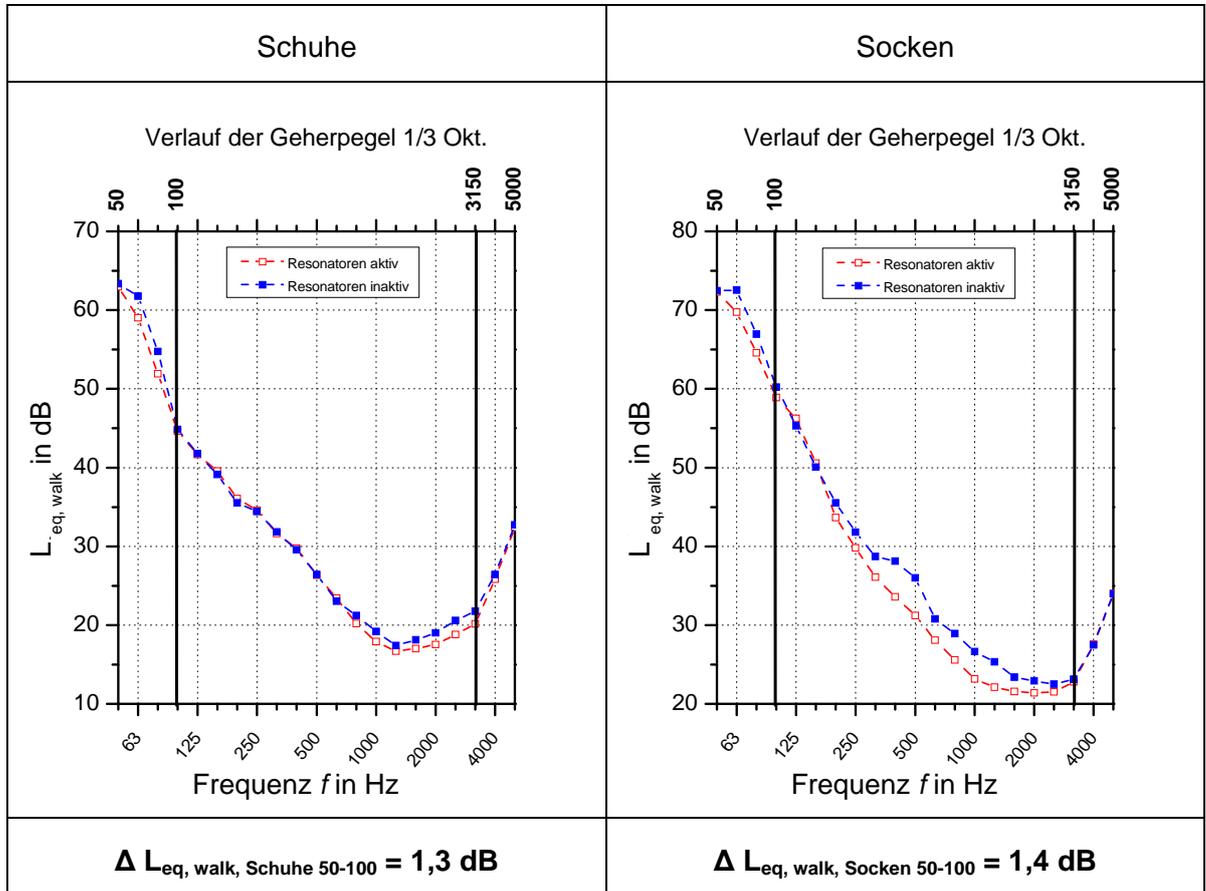


Aufbau 5.3.2 Mündung unbedämpft

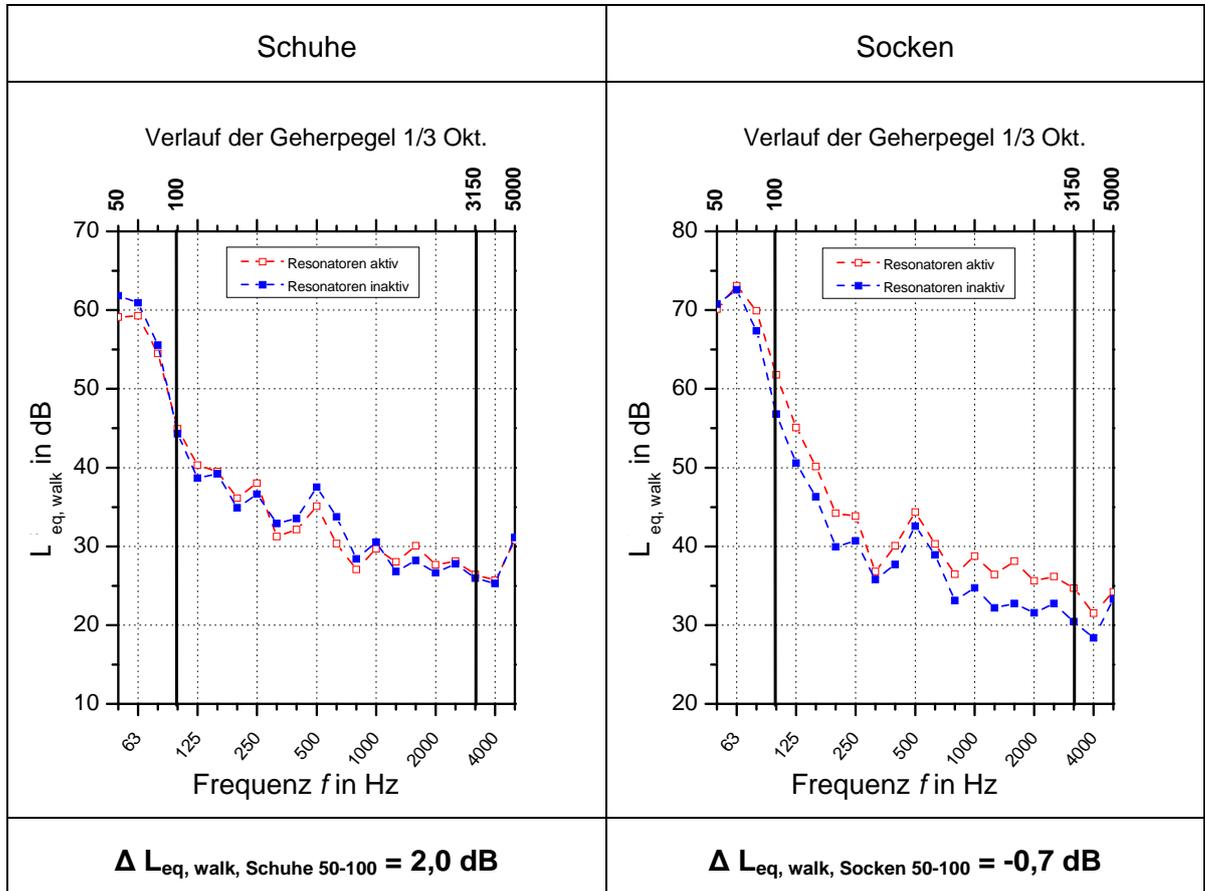
Hier wurde nur der Aufbau mit aktiven Resonatoren gemessen.



Aufbau 5.3.3 Mündung unbedämpft

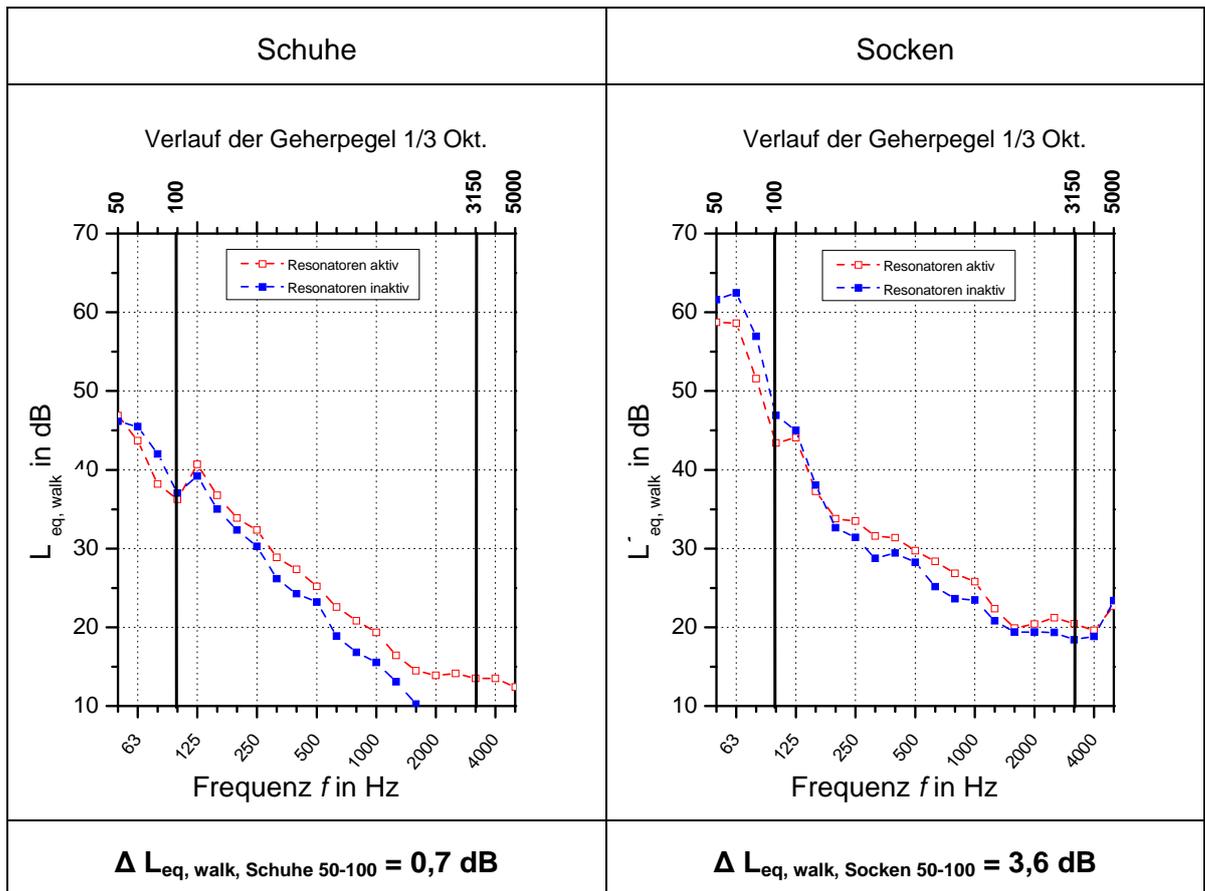


Aufbau 5.4.2 Mündung unbedämpft



Aufbau 5.5.1 und 5.5.2 - siehe Kapitel 6.2

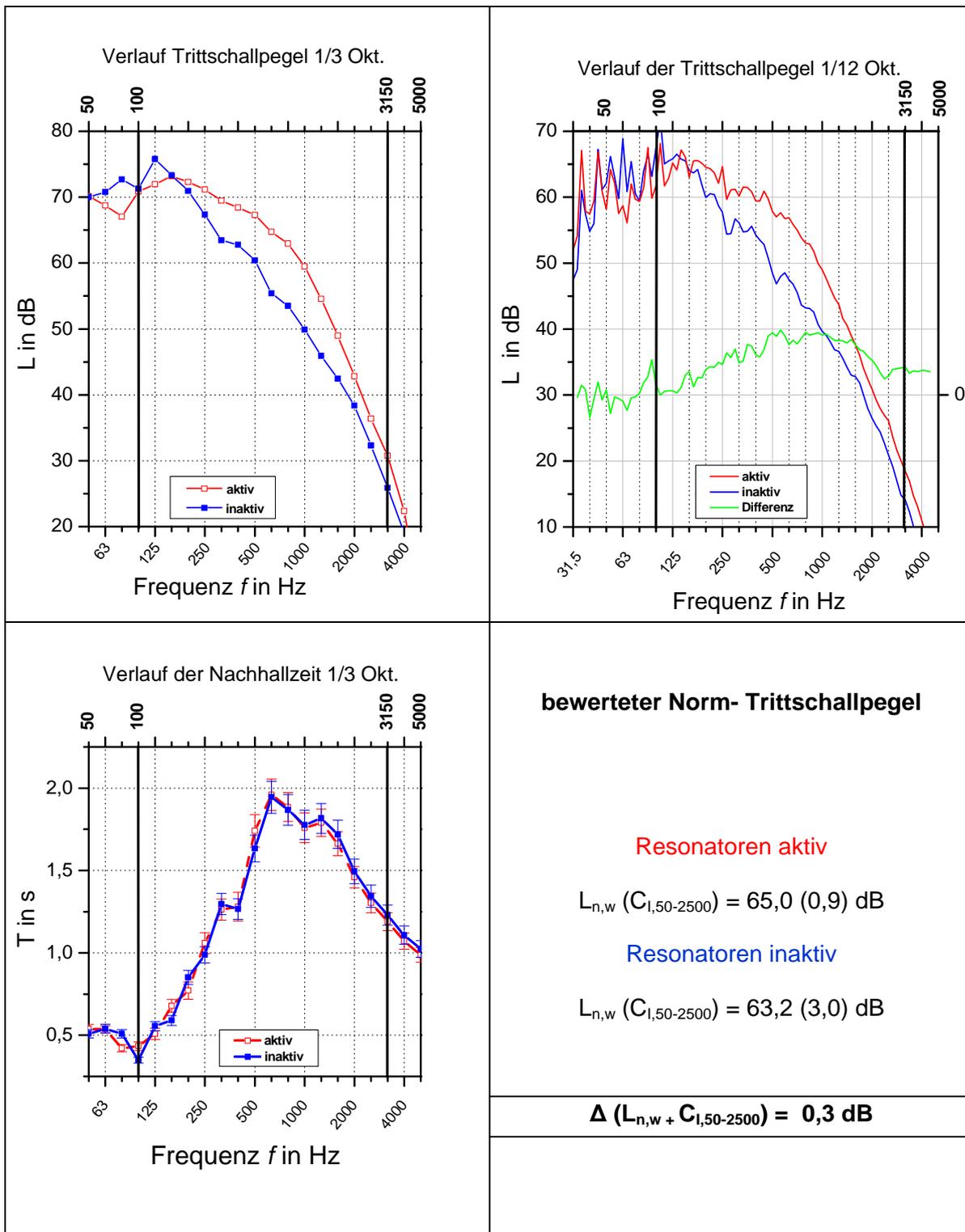
Aufbau 5.5.3 Mündung unbedämpft



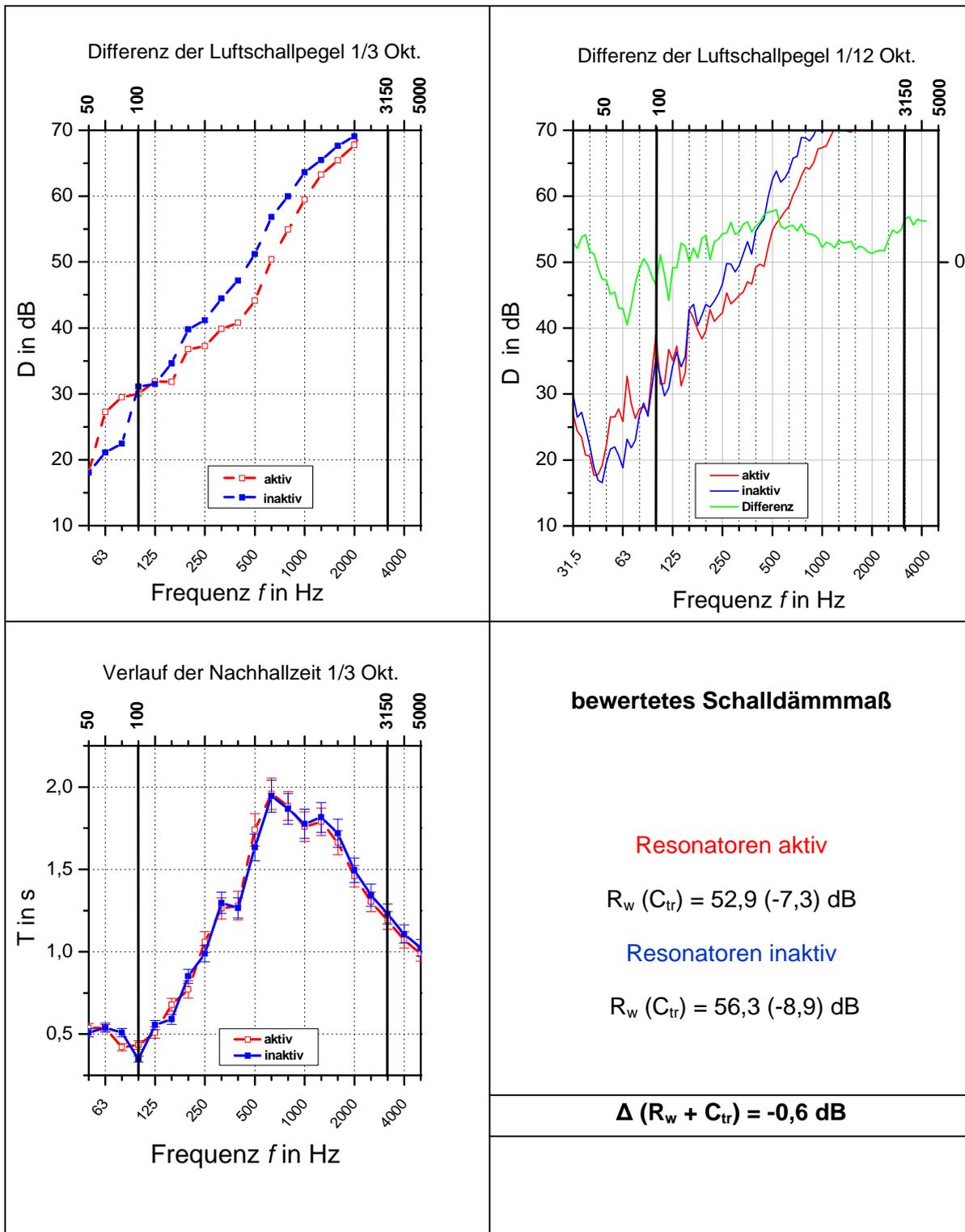
Aufbau 5.6.3: 21 freihängende Resonatoren

Vergleich **inaktiv mit Dämmung** - **aktiv ohne Dämmung**

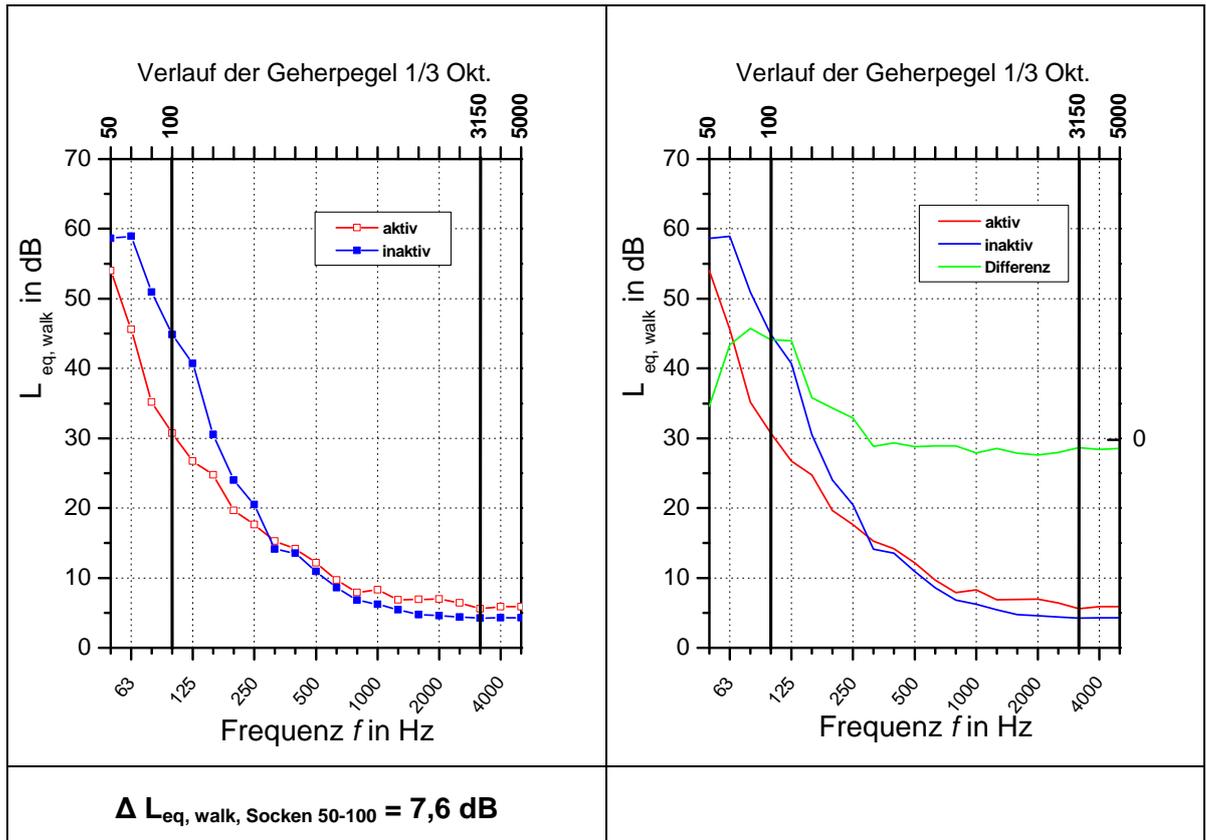
Trittschall



Luftschall



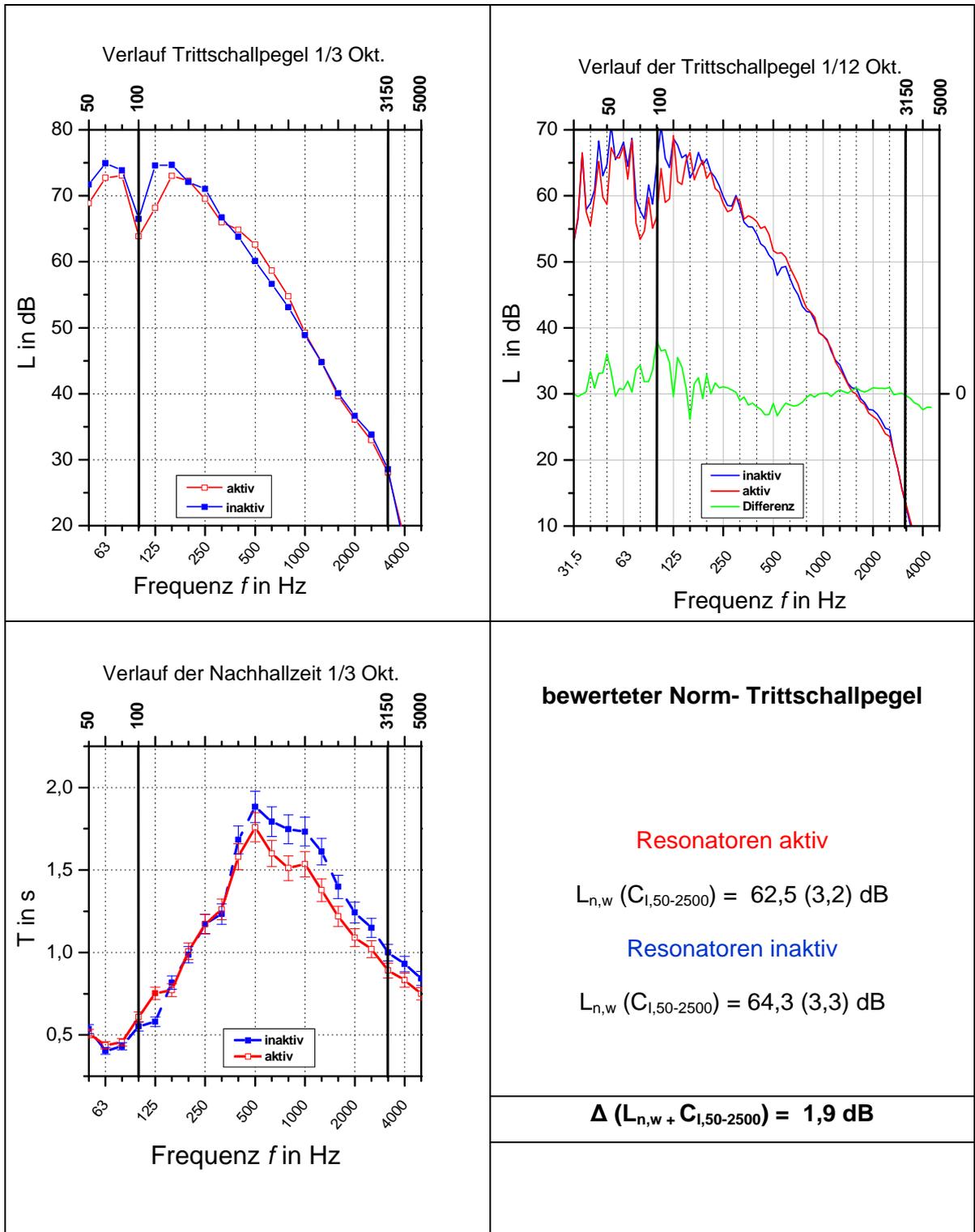
Geher



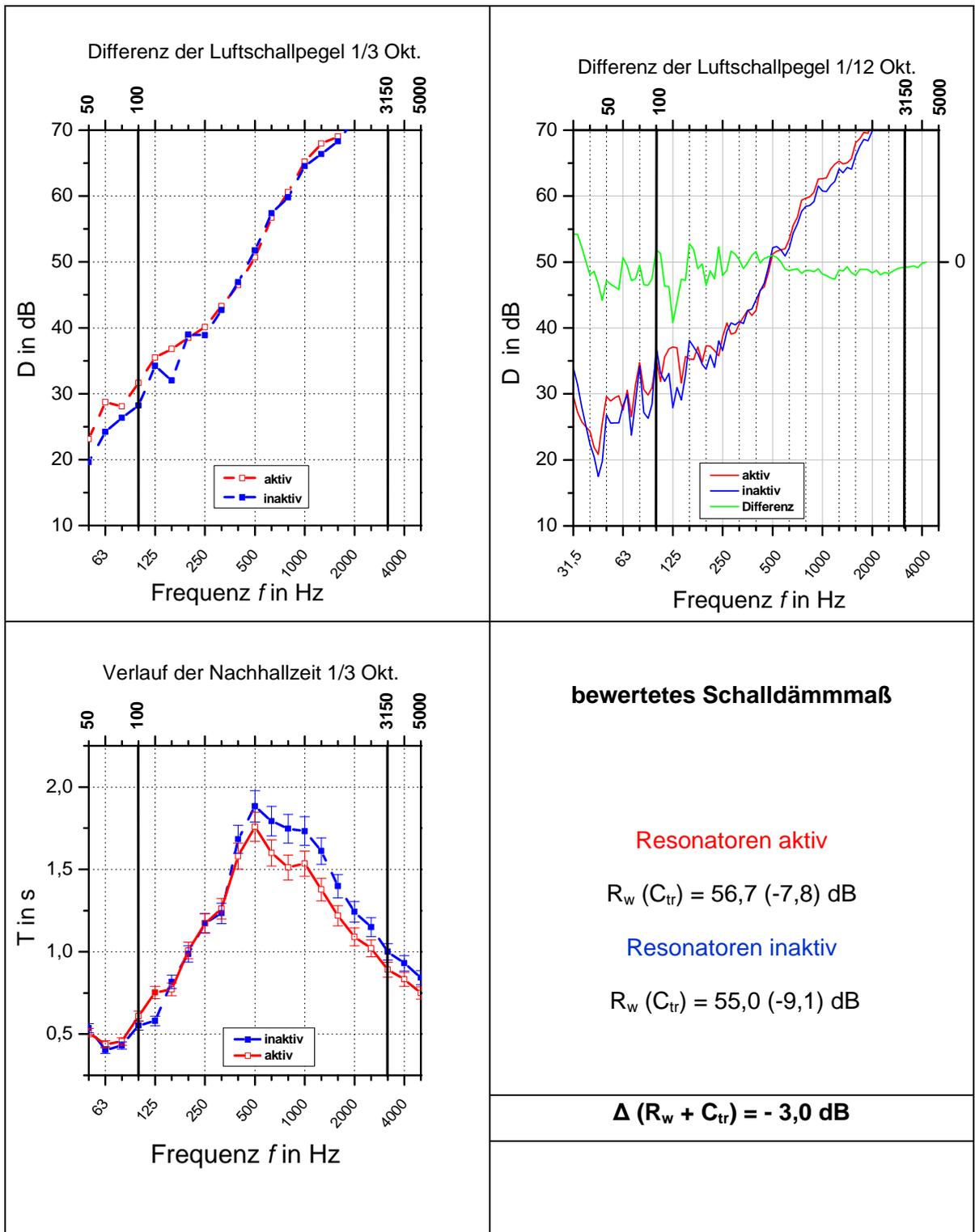
Aufbau 5.7: Gefach als Resonator

Vergleich inaktiv - aktiv

Trittschall



Luftschall



Geher

