

# Control Performance of Active Absorbers in Enclosed, Harmonic Sound Fields

vorgelegt von  
Diplom-Ingenieur  
Stefan Zimmermann  
aus Berlin

Von der Fakultät III – Prozesswissenschaften  
der Technischen Universität Berlin  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor der Ingenieurwissenschaften  
— Dr.-Ing. —

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr. Björn A.T. Petersson

Berichter: Prof. Dr.-Ing. Michael Möser

Berichter: Dr.-Ing. Philip Leistner

Berichter: Dr. Phillip F. Joseph

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 7. Februar 2003

Berlin 2003  
**D83**

Teile der Arbeit wurden unter folgenden Titeln veröffentlicht oder auf Tagungen vorgestellt:

- Third European Conference on Noise Control, Munich, Germany, 1998. DEGA Oldenburg, S. 1029–1034.
- Zeitschrift f. Bauphysik 24 (2002) Heft 6, S. 361–367
- IBP Mitteilungen 24 (1997) Nr. 308 und 25 (1998) Nr. 333

Forschen und Wissen - Physik

**Stefan Zimmermann**

**Control Performance of Active Absorbers in  
Enclosed, Harmonic Sound Fields**

D 83 (Diss. Technische Universität Berlin)

**GCA-Verlag  
Herdecke 2003**

**Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Copyright GCA-Verlag, Herdecke 2003

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 1436-1205

ISBN 3-89863-120-6

GCA-Verlag der GCA mbH, Bahnhofstr. 31, D 58313 Herdecke

Telefon 02330/10520

-

Telefax 02330/2207

Internet: [www.gca-verlag.de](http://www.gca-verlag.de)

-

eMail: [info@gca-verlag.de](mailto:info@gca-verlag.de)

## Zusammenfassung

Diese Arbeit untersucht die Wirkung aktiver Absorber in Schallfeldern geschlossener Räume mit harmonischer Anregung. Das Schallfeld wird mittels modaler Theorie beschrieben. Für die Wirkung zusätzlicher passiver Absorber wird ein vereinfachtes Dämpfungsmodell benutzt. Die räumlich gemittelte Schallenergie und die Schalleistung quantifizieren die Wirkung der aktiven Absorber. Die abgestrahlte Schalleistung und die Strahlungsimpedanz einer Monopolquelle spielen dabei eine wesentliche Rolle. Für das vereinfachte Dämpfungsmodell wird gezeigt, dass die Schalleistung, die im Fernfeld berechnet wird, äquivalent zu der aus dem Nahfeld berechneten ist.

Die Wirkung der aktiven Absorber wird mit einer Theorie für passive Resonatoren beschrieben, die für die aktiven Absorber durch Beschreibung aller akustischen Eigenschaften in ihrer Impedanz anwendbar wird. Es wird gezeigt, dass ein einzelner aktiver Absorber tatsächlich Schalleistung absorbiert. Die räumlich gemittelte Schallenergie kann reduziert werden, jedoch ist die Wirkung stark positionsabhängig. Eine höhere passive Dämpfung reduziert die Dämpfungswirkung des aktiven Absorbers. Die absorbierte Schalleistung kann über die eingestellte Verstärkung maximiert werden und damit eine optimale, frequenzabhängige Verstärkung ermittelt werden. Die Impedanz eines einzelnen aktiven Absorbers kann aus Messungen einzelner Raumübertragungsfunktionen bestimmt werden.

Für eine flächige Anordnung mehrerer aktiver Absorber werden Schalleistung und räumlich gemittelte Schallenergie bestimmt. Es zeigt sich, dass eine Erhöhung der Gesamtanzahl aktiver Absorber die absorbierte Schalleistung zunächst erhöht und die räumlich gemittelte Schallenergie verringert. Ab einer bestimmten Anzahl lässt die Verbesserung jedoch nach. Die Absorptionswirkung des einzelnen aktiven Absorbers lässt mit zunehmender Gesamtanzahl aktiver Absorber ebenfalls nach.

Die Strahlungsimpedanz und räumliche Schallenergie unterschiedlich bedämpfter Räume werden experimentell bestätigt. Die Impedanzbestimmung eines einzelnen aktiven Absorbers in einem angemessen bedämpften Raum wird messtechnisch bestimmt und bestätigt das verwendete Impedanzmodell. Die Absorptionswirkung eines einzelnen aktiven Absorbers wird über die absorbierte Schalleistung ebenfalls im Experiment bestätigt. Messergebnisse mit Anordnungen von vier und neun aktiven Absorbern zeigen, dass die vorausberechnete Reduktion der räumlich gemittelten Schallenergie erreicht wird.

## Abstract

This work investigates the performance of Active Absorbers in enclosed, harmonic sound fields. The sound field is described by modal theory. A simplified damping model is used to describe the effect of additional passive absorbers on the performance of the Active Absorbers. The total acoustic potential energy and the sound power quantify the performance of the Active Absorbers. The radiated sound power and the radiation impedance of a point monopole source is significant. It is shown that the radiated sound power calculated with far field expressions is equivalent to that calculated by near field expressions, when using the simplified damping model.

The performance of Active Absorbers is described by a theory for passive resonators which is adapted for Active Absorbers. Their active properties are included in the acoustic input impedance. It is shown that a single Active Absorber is absorbing sound power. The total acoustic potential energy is also reduced. The performance of a single Active Absorber is dependent on its position. Higher passive absorption reduces the performance of Active Absorbers. The absorbed sound power is maximised by adjusting the gain and an optimum, frequency dependent gain is derived. The acoustic impedance of a single Active Absorber can be determined by measurements of room transfer functions.

For multiple Active Absorbers at one room surface the absorbed sound power and total acoustic potential energy reduction are assessed. It is shown that increasing the total number of Active Absorbers at first increases the absorbed sound power and decreases the total acoustic potential energy. From a certain number of Active Absorbers the improvement ceases. The absorbing effect of a single Active Absorber decreases with increasing total number of Active Absorbers as well.

The radiation impedance and the total acoustic potential energy are validated experimentally for different damping conditions. The impedance of a single Active Absorber is determined by experiments and matches the derived impedance model. The absorbed sound power of a single Active Absorber is also validated experimentally. Experimental results with a setup of four and nine Active Absorbers prove that the predicted total acoustic potential energy reduction is achieved.

# Contents

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Acoustics of Rectangular Enclosures</b>	<b>5</b>
2.1	Modal Sound Field Theory . . . . .	5
2.1.1	Sound Pressure of a Point Monopole Source in a Rigid Room . . . . .	5
2.1.2	Acoustic Transfer Impedance . . . . .	7
2.2	The Damping Model . . . . .	8
2.2.1	Minimal Absorption at Rigid Walls . . . . .	10
2.2.2	Specific Acoustic Admittance of Porous Materials . . . . .	10
2.2.3	Influence of Damping on a Single Mode . . . . .	12
2.2.4	Limitations of the Damping Model . . . . .	14
2.3	Total Acoustic Potential Energy . . . . .	14
2.3.1	Influence of Damping on Total Acoustic Potential Energy . . . . .	16
2.4	Sound Power Output of a Point Monopole Source . . . . .	17
2.4.1	Equivalence of the Sound Power Output Calculated in the Source Near Field and by Intensity Integration over the Walls . . . . .	19
2.4.2	Influence of Damping on Source Power Output . . . . .	20
2.5	Radiation Impedance . . . . .	22
2.5.1	Comparison to Free Field Values of Source Power Output of a Point Monopole and a Small Pulsating Sphere . . . . .	23
2.6	Influence of Temperature on the Mode Frequencies . . . . .	26
<b>3</b>	<b>The Active Absorber</b>	<b>29</b>
3.1	Impedance of the Active Absorber . . . . .	30
<b>4</b>	<b>Control Performance — Theory</b>	<b>33</b>
4.1	Sound Field due to Active Absorbers . . . . .	33
4.2	Total Acoustic Potential Energy with Active Absorbers . . . . .	36
4.3	Sound Power Output of Sources and Active Absorbers . . . . .	37
<b>5</b>	<b>Control Performance — Prediction</b>	<b>39</b>
5.1	Single Source and Single Active Absorber . . . . .	39
5.1.1	Control Performance of a Single Active Absorber . . . . .	40
5.1.2	Total Acoustic Potential Energy Reduction . . . . .	41
5.1.3	Position Dependence of the Control Performance . . . . .	43
5.1.4	Influence of Damping on Total Acoustic Potential Energy Reduction . . . . .	44

5.1.5	Sound Power Absorption . . . . .	45
5.1.6	Influence of Damping on the Absorbed Sound Power of a Single Active Absorber . . . . .	46
5.1.7	Maximising the Sound Power Absorption of a Single Active Absorber . . . . .	47
5.2	Impedance Determination — Measurement Technique . . . . .	51
5.2.1	Influence of Temperature Changes on Impedance De- termination . . . . .	52
5.3	Single Source and Multiple Active Absorbers . . . . .	55
5.3.1	Reduction of Total Acoustic Potential Energy . . . . .	56
5.3.2	Sound Power Absorption . . . . .	58
5.3.3	Sound Power Absorption of the First Active Absorber with Increasing Number of Total Active Absorbers . . . . .	60
5.3.4	Single Source and Multiple Different Active Absorbers . . . . .	61
<b>6</b>	<b>Experimental Methods</b>	<b>63</b>
6.1	Test Facility . . . . .	63
6.2	Volume Velocity Source Description . . . . .	63
6.3	Measurement Equipment . . . . .	64
6.4	Damping of the Test Room for Impedance Measurements . . . . .	65
6.5	Determination of Total Acoustic Potential Energy . . . . .	66
6.6	Determination of Sound Power Absorption . . . . .	66
6.7	Damping of the Test Room with Active Absorbers . . . . .	68
<b>7</b>	<b>Control Performance — Experiments</b>	<b>71</b>
7.1	Room with Rigid Walls . . . . .	71
7.1.1	Sound Field in the Corners of a Room Diagonal . . . . .	71
7.1.2	Source Radiation Impedance . . . . .	72
7.2	Damped Room . . . . .	73
7.2.1	Sound Field in the Corners of a Room Diagonal . . . . .	73
7.2.2	Source Radiation Impedance . . . . .	75
7.3	Influence of Damping on Total Acoustic Potential Energy — Comparison with Theory . . . . .	76
7.4	Single Source and Single Active Absorber . . . . .	81
7.4.1	Total Acoustic Potential Energy Reduction . . . . .	81
7.4.2	Position Dependence . . . . .	82
7.4.3	Sound Power Absorption . . . . .	83
7.4.4	Impedance Measurement of the Active Absorber . . . . .	84
7.5	Single Source and Multiple Active Absorbers . . . . .	86
<b>8</b>	<b>Summary</b>	<b>91</b>

<b>A</b>	<b>Orthogonality Relationships</b>	<b>95</b>
A.1	Normalisation Property . . . . .	95
A.2	Orthogonal Integral Sum over a Volume . . . . .	96
A.3	Orthogonal Integral Sum over a Boundary Surface . . . . .	97
<b>B</b>	<b>Reverberation Times in the Test Facility</b>	<b>97</b>
<b>C</b>	<b>Thiele-Small Parameters</b>	<b>98</b>
C.1	Visaton W200NG . . . . .	98
C.2	Visaton W200S . . . . .	98
C.3	Nokia W252FG . . . . .	99
C.4	Dynacord D24W100 . . . . .	99
<b>D</b>	<b>List of Symbols</b>	<b>101</b>