



*Technische Universität Berlin
Fakultät I – Geistes- und Bildungswissenschaften
Institut für Sprache und Kommunikation – Fachgebiet Audiokommunikation*

Exposé einer Masterarbeit für die Prüfung zum Master of Science
im Studiengang Audiokommunikation und -technologie

Die Richtungsabhängigkeit der Abstrahlung eines doppelwandigen Plattenresonators in Impedanzgitteranordnung

Martin Klüpfel BEARBEITUNG
Matrikelnummer: 362701

Prof. Dr. Stefan Weinzierl BEGUTACHTUNG
Dipl.-Ing. (FH) Ralf Bauer-Diefenbach

Berlin, März 2018

Zusammenfassung

Das vorliegende Exposé beschreibt die Kernpunkte des Themenvorschlags für eine Masterarbeit im Studiengang Audio-kommunikation und -technologie an der Technischen Universität Berlin. In dieser Abschlussarbeit soll die Beeinflussung der Richtungsabhängigkeit der Abstrahlung doppelwandiger Plattenresonatoren untersucht werden. Hierzu wird eine, sich periodisch wiederholende, Gitterstruktur von Teilresonatoren vorgeschlagen.

Das Schallfeld vor der Anordnung soll bei schrägem Einfall einer ebenen Welle, in Abhängigkeit der Parameter der Anordnung, beschrieben und hieraus die Abstrahlcharakteristik ermittelt werden.

Abschließend sollen der Aufbau eines Prototyps und die messtechnische Evaluation der erhaltenen Ergebnisse realisiert werden.

1 Einleitung

Aufgrund der Anzahl und Ungenauigkeit der verwendeten Begriffe – Folienresonator, Panelabsorber, Plattenresonator, Plattenschwinger oder Membranabsorber – sei eine kurze Begriffsklärung nach Mechel (1995) vorangestellt. Die allgemeinste Form dieses Resonators besteht aus einer Massenbelegung m'' als Schwingmasse, welche in einem Abstand a vor einer starren Wand ein Luftvolumen als Feder einschließt. Fuchs (2017) schließt aus der, im Vergleich zu der mit bewegten Luftmasse der auftreffenden Schallwelle, hohen Massenbelegung, dass die Anordnung lediglich als Teil eines Resonanzsystems anzuregen sein kann. Dies ist durch Eigenmoden der Flächenmasse oder durch die Resonanz eines Masse-Feder-Systems möglich. Daher bestimmen, unter der idealisierten Voraussetzung von Inkompressibilität, die Elastizität der Flächenmasse und die Randbedingungen der Lagerung das Verhalten des Gesamtsystems. Die Grundtypen für die Beschreibung der Flächenmasse sind *biegesteife Platte*, *biegeelastische Platte*, *Membran* und *schlaffe Folie*.

Schließt man die Möglichkeit der elastischen Verformung aus, erhält man die beiden theoretischen Grenzfälle: Wird auch die plastische Verformung der Flächenmasse nicht zugelassen, ergibt sich die Anordnung der *biegesteifen Platte*. Hier ist eine Anregung durch das auftreffende Schallfeld ausschließlich dann möglich, wenn die Lagerung elastisch erfolgt und kolbenförmige Schwingungen der gesamten Platte erlaubt. Für den zweiten Grenzfall, die *schlaffe Folie*, wird nun eine plastische Verformung zugelassen, die Folie folgt in jedem Punkt direkt einer Druckdifferenz zwischen Vorder- und Rückseite, als Gegenkraft wirkt lediglich die Trägheit. Bereits Schultz (1962) verwendete diese Näherung bei der Auslegung von Resonanzabsorbern mit dünnen Holzplatten, durch viele Messungen konnte diese Annahme von Fasold et al. (1987) bestätigt werden. Bei senkrechtem Schalleinfall und unter der Voraussetzung *lokal reagierenden* Verhaltens des Luftvolumens ist nach Mechel (1995) die Eingangsimpedanz:

$$Z = j\omega m'' - jZ_0 \cot(k_0 a).$$

Unter der Annahme, dass die Wellenlänge hinreichend groß gegenüber dem Abstand a ist ($k_0 a \ll 1$) und bei Abbruch der Laurentreihe des Kotangens nach $n = 0$, folgt für die Kreisfrequenz ω_0 und, mit Dichte und Schallgeschwindigkeit von Luft bei $T = 20^\circ\text{C}$, für die Resonanzfrequenz f_0 :

$$\omega_0 = c_0 \sqrt{\frac{\rho_0}{m'' a}} \quad ; \quad f_0 = \frac{600}{\sqrt{m'' a}} \quad ([m] = \text{kg/m}^2; [t] = \text{cm}).$$

Für den Grundtyp der *Membran* ergibt sich die Elastizität aus den, durch die Einspannung verursachten, Zugspannungen in der Flächenmasse. Die *Membran* ist somit auch für sich selbst resonanzfähig, ein abgeschlossenes Luftvolumen als Feder ist nicht notwendig.

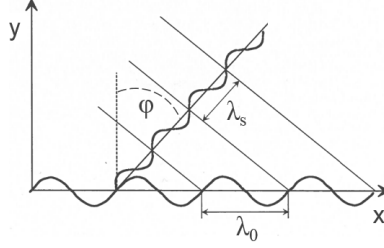


Abbildung 1: Projektion (Spuranpassung) der Wellenlänge des anregenden Schallfeldes λ_0 auf die Spur-Biegewellenlänge λ_s

Im Fall der *biegeelastischen Platte* folgt die Elastizität aus den Materialeigenschaften, charakterisiert durch den Biegemodul B . Hier ist die Anregung und Ausbreitung von Biegewellen möglich, welche in erzwungene Spur-Biegewellen λ_s und freie Biegewellen λ_b unterteilt werden. Freie Biegewellen werden durch Transienten oder bei Daueranregung durch Störstellen verursacht, Spur-Biegewellen, wie in Abbildung 1 dargestellt, durch das Luftschallfeld erzwungen. Die Relation der Wellenlängen ergibt sich bei Koinzidenz durch

$$\lambda_s = \frac{\lambda_0}{\sin \varphi}.$$

Aufgrund der unterschiedlichen Dispersionsrelation von Biegewellen im Festkörper ($\lambda_b \sim 1/\sqrt{\omega}$) und Longitudinalwellen in Luft ($\lambda_0 \sim 1/\omega$), gibt es für jeden Einfallswinkel φ einer ebenen Welle eine Koinzidenzfrequenz, bei welcher gilt: $\lambda_s = \lambda_b$. Hier liegen mögliche Eigenformen der (unendlich ausgedehnten) *biegeelastischen Platte*, weitere ergeben sich bei endlichen Abmessungen aus ebendiesen, sowie der Art der Lagerung.

Beim Design von Resonanzabsorbern befindet sich die Abstimmungsfrequenz üblicherweise weit unterhalb der niedrigsten Koinzidenzfrequenz, der Koinzidenzgrenzfrequenz. Auch ist man bestrebt, eine möglichst geringe Anzahl von Fehlstellen zu erzeugen und wählt daher die Abmessungen groß gegenüber der Wellenlänge der freien Biegewellen im Material. Nach einer von Mechel (1995)[S. 770] zitierten Abschätzung Heckels, können freie Biegewellen vernachlässigt werden, wenn die Abmessungen der Platte groß gegenüber $\lambda_b/2$ sind. Des Weiteren wird die Richtcharakteristik der Anordnung zumeist nicht betrachtet, im Standardwerk von Cremer et al. (2009) wird diese lediglich kurz erwähnt, jedoch nicht näher beschrieben.

Vor diesem Hintergrund ist das Ziel dieser Arbeit die Beschreibung eines doppelwandigen Plattenresonators im Grenzbereich hinsichtlich der Berücksichtigung freier Biegewellen, von Koinzidenzgrenzfrequenz und Doppelwandresonanz. Besonderes Interesse gilt hierbei der Richtcharakteristik von Anregung und Abstrahlung. Des Weiteren sollen auch die Möglichkeit deren Beeinflussung und die Erhöhung der wirksamen Bandbreite des Resonanzsystems durch eine periodische Impedanzgitteranordnung von einzelnen Teilresonatoren untersucht werden. Abschließend soll eine messtechnische Evaluation einer Beispielanordnung durchgeführt werden.

2 Stand der Forschung

Historisch betrachtet erfolgte die erste ausführliche Beschreibung eines, als Membran-Absorber bezeichneten, Resonanzabsorbers als Tieftonabsorber in Rundfunkstudios durch Gilford (1952). Wie auch in der detaillierten Design Richtlinie von Schultz (1962), wird die Frontplatte vereinfacht als *schlaffen Folie* beschrieben. Anhand von empirischen Methoden wird bei Variation der Tiefe, der Flächenmasse, sowie der Resonanzfrequenz der Anordnung auf den Maximalwert des Absorptionskoeffizienten und die Bandbreite geschlossen. Auch für die Art der Auflagerung und deren Abstand, sowie den zu verwendenden Mineralfaserdämmstoff, werden Vorgaben empirisch ermittelt. Die Beschreibungen von Fasold et al. (1987) und Fasold und Veres (2003) erfolgen in dieser Tradition, für viele Beispiele werden die Ergebnisse von Hallraummessungen des Absorptionskoeffizienten vorgestellt. Allerdings erfolgt der einschränkende Hinweis, Resonanzabsorber bei der Auslegung anhand dieser empirischen Methode vor der Verwendung nach Möglichkeit durch Messung zu überprüfen.

Die erste analytische Beschreibung des Verhaltens eines Plattenabsorbers wurde von Ford und McCormick (1969) vorgelegt. Unter den Annahmen der festen Einspannung der Plattenränder und des Verhaltens des eingeschlossenen Volumens als *lokal reagierend*, wird eine akustische Impedanz für eine mehrschichtige Anordnung hergeleitet. Von Zhou et al. (1998) werden an Beispielanordnungen gute Übereinstimmungen von Berechnungen des Absorptionskoeffizienten nach Ford und McCormick (1969) und Messungen im Kundtschen Rohr festgestellt. Durch die vollflächige Verbindung einer dünnen und schweren Frontplatte mit einer elastischen Schicht, ermöglicht das Prinzip eines Verbundplattenresonators nach Fuchs und Zha (1996) die Bedämpfung möglichst vieler Plattenresonanzen und vergrößert die Bandbreite der Wirksamkeit der Anordnung als Resonanzabsorber. Ausführliche Beschreibungen der Eigenmoden von Platten in Abhängigkeit der Randbedingungen zeigen Blevins (1995) und Leissa (1969), auch für *vollständig freie* Lagerung an den Rändern ist eine exakte Lösung von Hurlebaus et al. (2001) vorhanden.

Unter Annahme der Plattenaullagerung als *einfach aufgestützt* und der Betrachtung des eingeschlossenen Volumens als *lokal reagierend*, formuliert Mechel (1989) eine Lösung für die akustische Wandimpedanz. Als Generalisierung zeigen Mechel (1998), für die Schalltransmission durch eine *einfach aufgestützte* Platte, und Mechel (2001), für einen Resonanzabsorber, jeweils eine Lösung ohne die vereinfachende Annahme *lokal reagierenden* Verhaltens.

Durch die Anwendung des Reziprozitätsprinzips schließen Cremer et al. (2009) auf den Zusammenhang zwischen Anregung und Abstrahlung einer Platte. Die Beschreibung der Abstrahlung von Ebenen erfolgte zuerst von Heckl (1977), eine weitere Auseinandersetzung – in diesem Fall allerdings mit dem Ziel der Verschlechterung der Abstrahlung – erfolgt vor allem in den Bereichen des Technischen Lärmschutzes und der Maschinenakustik bei Kollmann (2006) und Schirmer (2006). Die „Gerichtete Schall-

abstrahlung von Außenwänden des Industriebaus bei und oberhalb der Grenzfrequenz“ hat Lotze (1980) betrachtet. Das akustische Verhalten von Doppelwandsystemen wird von Thomas (2005), sowie Lu und Xin (2014) untersucht.

3 Methode

Die zu beschreibende Anordnung ist beispielhaft in Abbildung 2 mit Blick durch die Frontplatte dargestellt und besteht aus einer periodischen Wiederholung von Kammern verschiedener Größe in x-Richtung. Eine Unterteilung in y-Richtung erfolgt äquidistant zur möglichen Voraussetzung *lokal reagierenden* Verhaltens.

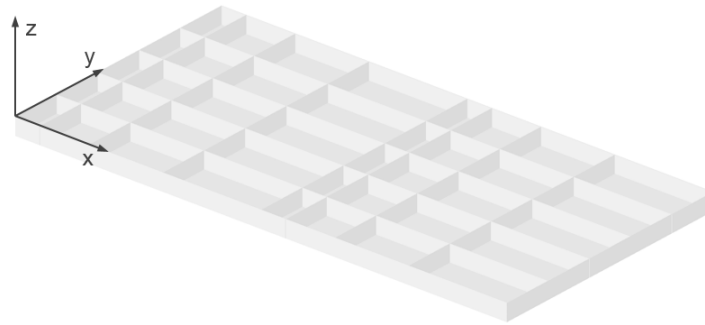


Abbildung 2: Beispielhafte Darstellung des doppelwandigen Plattenresonators in Impedanzgitteranordnung

Eine Beschreibung des mehrschichtigen Systems kann anhand der elektro-akustischen Analogie von Kurtze (1975) als Reihenschaltung von Vierpolen erfolgen, auch Thomas (2005) gibt eine sehr anschauliche Darstellung der Vorgehensweise.

Nach geeigneter Auswahl der Randbedingung hinsichtlich der Einspannung der *biegeelastischen Platte* an den Rändern, sowie der Auflagerung auf der Gitteranordnung, soll eine theoretische Beschreibung der einzelnen Teilresonatoren nach Mechel (1989) durchgeführt werden. Sollte sich die Annahme des *lokal reagierenden* Volumens als unzureichend erweisen, könnte auch eine vollständige Analyse nach Mechel (1998) und Mechel (2001) vorgenommen werden.

Des Weiteren soll die Änderung der Abstrahlung der Anordnung aufgrund der hohen Biegesteifigkeit durch die Auflage auf den Verstrebungen qualitativ beschrieben werden. Bei der Gesamtbetrachtung der Anordnung als Resonanzsystem sind deren Grenzfrequenz, die Lage der Plattenresonanzen, die Koinzidenzgrenzfrequenz und die Resonanz des Doppelwandsystems zu beachten.

Im zweiten Teil der Arbeit soll, auf Grundlage der Beschreibungen von Fernández (2013) und Mechel (1989), das Schallfeld in einer Ebene senkrecht vor der Anordnung, bei schrägem Einfall einer ebenen Welle, beschrieben werden. Diese Beschreibung ist vor der Verwendung durch die Überprüfung von bekannten Anordnungen zu verifizieren.

Besonderes Interesse gilt dem Anteil und der Verteilung der gestreuten Schallenergie. Durch Variation der Abmessungen der Teilresonatoren und deren akustischer Impedanz soll eine geeignete Anordnung bestimmt und als Prototyp realisiert werden.

Abschließend soll das Abstrahlverhalten des Prototyps eines doppelwandigen Plattenresonators in Impedanzgitteranordnung durch eine Messung im Reflexionsarmen Raum untersucht und mit den Ergebnissen der Berechnung verglichen werden.

4 Arbeits- und Zeitplan

Zeitraum	Aufgaben
März	Erarbeitung der theoretischen Grundlagen, Beschreibung der Anordnung
April	Beschreibung des Schallfeldes vor der Anordnung
Mai	Simulation/Berechnung in MATLAB, Festlegung des Designs und Anfertigung des Testobjekts
Juni	Akustische Messungen im Reflexionsarmen Raum, Auswertung der Messdaten
Juli	schriftliche Ausfertigung der Arbeit

Literatur

- Blevins, Robert D. (1995): *Formulas for natural frequency and mode shape*. Malabar (Florida): Krieger.
- Cremer, Lothar; Michael Möser; Wolfgang Kropp und Manfred Heckl (2009): *Körperschall: Physikalische Grundlagen und technische Anwendungen*. 3. ed. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Fasold, Wolfgang; Ernst Sonntag und Helgo Winkler (1987): *Bauakustik und Raumakustik*. Berlin: VEB Verlag für Bauwesen.
- Fasold, Wolfgang und Eva Veres (2003): *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis: Planungsbeispiele und konstruktive Lösungen*. 2. ed. Berlin: Huss-Medien.
- Fernández, Alfio Yori (2013): *Sound Absorption of Periodical Surfaces*. PhD Thesis, Technische Universität Berlin, Berlin.
- Ford, R. D. und M. A. McCormick (1969): „Panel sound absorbers.” In: *Journal of Sound and Vibration*, 10(3) S. 411–423. doi:10.1016/0022-460X(69)90219-3.
- Fuchs, H. V. und X. Zha (1996): „Wirkungsweise und Auslegungshinweise für Verbund-Platten-Resonatoren.” In: *Zeitschrift für Lärmbekämpfung*, 43(1) S. 1–8.
- Fuchs, Helmut V. (2017): „Schallabsorber.” In: Gerhard Müller und Michael Möser (Hrsg.) *Fachwissen Technische Akustik*. Springer Vieweg.
- Gilford, C. L. S. (1952): „Membrane sound absorbers and their application to broadcasting studios.” In: *BBC Quarterly*, 53(7) S. 246 ff.
- Heckl, M. (1977): „Radiation from Plane Sound Sources.” In: *Acta Acustica united with Acustica*, 37(3) S. 155–166.
- Hurlebaus, S.; L. Gaul und J. T. S. Wang (2001): „An exact series solution for calculating the eigenfrequencies of orthotropic plates with completely free boundary.” In: *Journal of Sound and Vibration*, 244(5) S. 747–759. doi:10.1006/jsvi.2000.3541.
- Kollmann, Franz G. (2006): *Praktische Maschinenakustik*. VDI-Buch. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Kurtze, Günther (1975): *Physik und Technik der Lärmbekämpfung*. Wissenschaftliche Bücherei, 2. ed. Karlsruhe: Braun.
- Leissa, Arthur W. (1969): *Vibration of plates*. Washington D.C.: U.S. Government Printing Office.

- Lotze, Eberhard (1980): *Gerichtete Schallabstrahlung von Außenwänden des Industriebaus bei und oberhalb der Grenzfrequenz*. PhD Thesis, Technische Universität Dresden, Dresden.
- Lu, Tian Jian und Fengxian Xin (2014): *Vibro-acoustics of lightweight sandwich structures*. Springer Tracts in Mechanical Engineering. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Mechel, F. P. (1989): *Schallabsorber Band I: Äußere Schallfelder, Wechselwirkungen*. Stuttgart: Hirzel.
- Mechel, F. P. (1995): *Schallabsorber Band II: Innere Schallfelder, Strukturen*. Stuttgart: Hirzel.
- Mechel, F. P. (1998): *Schallabsorber Band III: Anwendungen*. Stuttgart: Hirzel.
- Mechel, F. P. (2001): „Panel Absorber.“ In: *Journal of Sound and Vibration*, 248(1) S. 43–70. doi:10.1006/jsvi.2001.3696.
- Schirmer, Werner (2006): *Technischer Lärmschutz: Grundlagen und praktische Massnahmen zum Schutz vor Lärm und Schwingungen von Maschinen*. 2. ed. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Schultz, T. J. (1962): „Design procedure for the sound absorption of resonant plywood panels.“ In: *BBN Technical Report 925*. Bolt Beranek and Newman Cambridge, Massachusetts, S. blank.
- Thomas, Christian (2005): *Beeinflussung des akustischen Verhaltens von Doppelwand-systemen durch den Einsatz mikroperforierter Absorber*. Ph.D. thesis, Technische Universität Hamburg-Harburg, Norderstedt.
- Zhou, Xiarou; Renate Heinz und Helmut V. Fuchs (1998): „Zur Berechnung geschichteter Platten-und Lochplatten-Resonatoren.“ In: *Bauphysik*, 20(3) S. 87–94.