Ein modularisierter Versuchsträger für experimentelle Untersuchungen an Helmholtz-Resonatoren mit flexiblen Wänden

Julia Genßler[1], Fleming Kohlenberg[1], Friedrich Bake[2], Karsten Knobloch[2], Lars Enghardt[2]

[1] *TU Berlin, Institut für Strömungsmechnaik und Technische Akustik, 10623 Berlin, Deutschland, Email: genssler@tu-berlin.de*

[2] *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Triebwerksakustik, 10623 Berlin*

Einleitung

In der Luftfahrt geht der Trend immer weiter zu größeren Triebwerken mit höheren Bypass-Verhältnissen. Die erste Fan-Stufe der Triebwerke dreht sich bei gleichem Schub langsamer und emittiert dadurch tieffrequenteren Schall. Gleichzeitig wird der Schall auch breitbandiger und der Bauraum verringert sich. Herkömmliche Akustikliner, die den Schall absorbieren, wirken auf dem Prinzip eines Helmholtz-Resonators oder eines $\lambda/4$-Resonators. Diese Resonatoren benötigen für tiefe Frequenzen eine große Kammertiefe. Da die vergrößerte Bautiefe die Größe der Triebwerkverkleidung und damit gleichzeitig den Luftwiderstand des Triebwerkes negativ beeinflussen würde, müssen neue Konzepte entwickelt werden, die mit weniger Bauraum und bei möglichst gleichem Gewicht realisiert werden können. Dazu muss vom herkömmlichen sogenannten Single-Degree-of-Freedom Resonator zu einem Multi-Degree-of-Freedom Resonator übergegangen werden. Diese weiteren Freiheitsgrade werden in diesem Forschungsvorhaben durch flexible Wände realisiert, die den Schall durch intrinsische Dämpfung dissipieren. Für diese flexible Wand wird, anstelle einer festen (schallharten) Wand, eine Kunststofffolie eingebaut. In [1] wurde das Wirkprinzip bereits untersucht und die Wirkung bestätigt. Dabei war, verglichen mit der eher schmalbandigen Helmholtz-Resonanz, eine Verbreiterung der Dissipationskurve erkennbar. Die genauen Wirkweisen konnten noch nicht detailliert beschrieben werden und sollen mit dem hier gezeigten Aufbau untersucht werden.

Aufbau des Resonators

Der entwickelte Resonatoraufbau besteht aus einem Resonator-Körper, an den bis zu fünf flexible Wände mittels Gewindestangen angebaut werden können. Die flexiblen Wände bestehen aus verschiedenen Folien, die in Dicke und Material variieren und wiederum in Plattenhalter, mit runden, rechteckigen oder quadratischen Aussparungen eingespannt werden können. Ein solcher Plattenhalter mit quadratischer Aussparung ist in Abb. 1 zu sehen. Dahinter können ein bis drei Rückkavitätselemente angebaut werden, die jeweils ungefähr dem halben Resonatorvolumen entsprechen. So können Rückkavitäten erstellt werden, die halb, gleich oder eineinhalbmal so groß sind, wie die Hauptkavität des Helmholtz-Resonators. Am Ende des Aufbaus wird eine Abschlussplatte angebaut, die den Aufbau schallhart zur Umgebung abschließt. Der gesamte Aufbau wird mit einem Lochblech mit dem akustischen Windkanal verbunden, wie in Abb. 2 zu sehen ist.

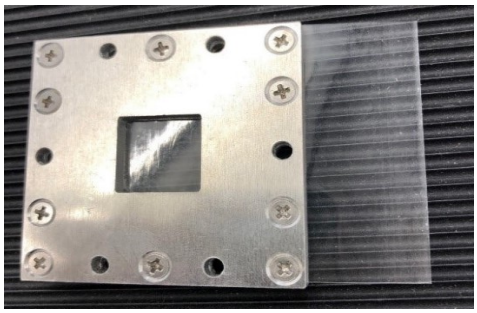

Abbildung 1: Plattenhalter mit quadratischer Aussparung und Kunststofffolie

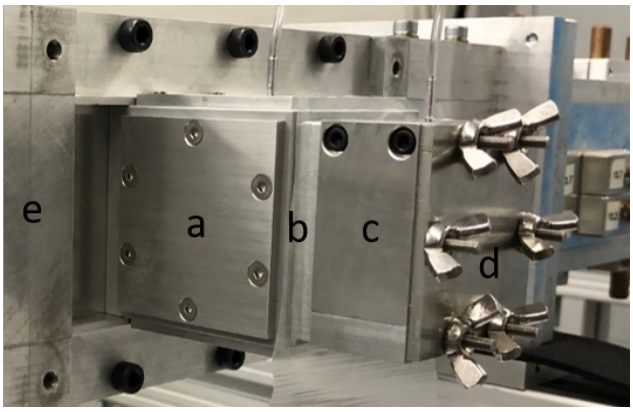

Abbildung 2: Resonatoraufbau mit vier festen Wänden (a), Plattenhalter mit flexibler Wand (b), Rückkavität (c), schalldichtem Abschluss (d) angebaut an den Strömungskanal DUCT-R (e)

Mögliche Messungen mit dem Versuchsträger

Durch den nahezu würfelförmigen Aufbau können die Wände sowohl einzeln, als auch gegenüberliegend oder im 90° Winkel zueinander angebaut werden. Weiterhin kann die Ausrichtung der Wände und zugehöriger Rückkavität zum Strömungskanal und damit zum Schalleinfall zwischen senkrecht und parallel variiert werden. Außerdem wurde bei der Auslegung darauf geachtet, dass der Aufbau sowohl eine Helmholtz-Resonanz im Bereich von 600 Hz–700 Hz, als auch eine wellenlängenabhängige Resonanz aufweist. Aufgrund des modularen Aufbaus kann, in späteren Untersuchungen, ein zusätzlicher Resonator gekoppelt und mögliche Interaktionen untersucht werden. Mit den schnell austauschbaren Wänden können auch in diesem Bereich viele verschiedene Untersuchungen durchgeführt werden:

- Form der Aussparung,
- Anzahl der Aussparungen pro Wand,
- Platzierung der Aussparung innerhalb der Wand,
- Einspannung der Folie in die Wand,
- Dämpfungsverhalten der Wand.

Wenn ein schallharter Abschluss aus Aluminium, wie in Abb. 2 erkennbar, eingebaut ist, findet keine Dämpfung durch die Wand statt. Bei der Verwendung von Aluminiumfolie als flexible Wand, kommt es aufgrund der Schallanregung zu einer geringen Dämpfung. Die Aluminiumfolie weist jedoch keine oder nur sehr geringe intrinsische Dämpfung auf. Die zusätzliche intrinsische Dämpfung wird beispielsweise durch die Verwendung von Kunststofffolien realisiert werden. Die Art der Einspannung der Folien kann ebenfalls einen Einfluss auf die intrinsische Dämpfung der flexiblen Wände haben und kann in weiteren Versuchen dementsprechend variiert werden.

Statistische Versuchsplanung

Für die Versuchsplanung wurde das Programm DesignExpert 13 verwendet. Dies ermöglichte, nach der Auswahl der in der ersten Messkampagne zu untersuchenden Parameter, eine weitere Reduktion der zu messenden Kombinationen. Die für diese Veröffentlichung untersuchten Parameter waren:

- Material (mit zwei unterschiedlichen E-Modulen)
- Form der Aussparung (rund, quadratisch, rechteckig horizontal und rechteckig vertikal)
- Dicke der Folie,
- Rückkavitätslänge (ca. halb so groß und gleich groß wie der Helmholtz-Resonator) und
- Position zum Schalleinfall (senkrecht und parallel)

Mit Hilfe des Programms konnte die Anzahl der Messungen auf die Hälfte reduziert werden, was eine deutliche Reduktion der Messzeit und des Aufwandes der Auswertung zur Folge hatte. Die geringere Anzahl an Messergebnissen reicht dennoch aus, um die Haupteinflussparameter zu erkennen und mögliche Interaktionen zwischen den Parametern hinsichtlich der untersuchten Auswertungskriterien herauszufinden.

Messungen und Datenauswertung

Hinsichtlich der für die spätere Anwendung interessanten tiefen Frequenzen wurden im tieferen Frequenzbereich mehr Frequenzen vermessen als im höheren Frequenzbereich. Im Bereich von 204 Hz bis 1020 Hz wurde im Abstand von 26 Hz, im Bereich von 1020 Hz bis 2040 Hz an weiteren 18 Stützstellen gemessen. Die Anregung erfolgte dabei immer mit 110 dB (akustisch linearer Bereich) und 130 dB (nicht-linearer Bereich hinsichtlich der Perforation des gelochten Übergangs zwischen Resonatorwürfel und Strömungskanal). Die Messungen wurden am Akustikwindkanal DUCT-R des DLR (Abteilung Triebwerksakustik) in Berlin Charlottenburg durchgeführt. Die Spezifika des Prüfstands und das Messverfahren können in [2] nachgelesen werden.

Als Folienmaterial wurde Thermoplastisches Polyurethan (TPU) und Poly-Propylen (PP) (mit einem ca. 100fachen E-Modul von TPU) verwendet.

In Abb. 3 sind die Ergebnisse der gemessenen Dissipation für den einfachen Resonator (ohne Rückkavität) und für die TPU- bzw. PP-Folie mit einfacher Rückkavität (Höhe entspricht halber Resonatorhöhe) verglichen. Der Einbau der Folien bewirkte im Vergleich zum einfachen Helmholtz-Resonator eine Verschiebung der Dissipation zu tieferen Frequenzen. Außerdem war bei der Verwendung von TPU-Folie als flexible Wand ein zusätzlicher Dissipationspeak (bei ca. 230 Hz) im unteren Frequenzbereich zu verzeichnen.

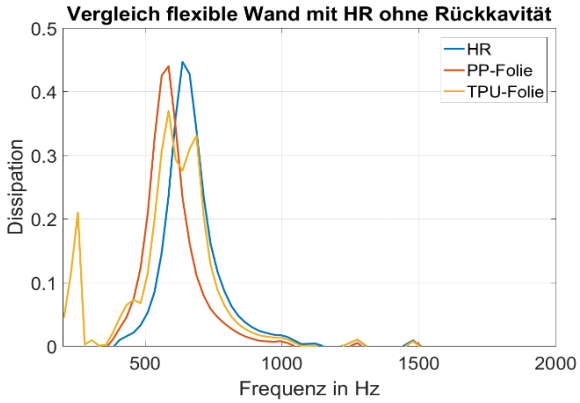

Abbildung 3: Einfluss der Folie als flexible Wand auf die Dissipation im Vergleich zum Helmholtz-Resonator ohne flexible Wände (TPU und PP mit Rückkavität, $h = 1/2\ h_{res}$, HR ohne Rückkavität)

In Abb. 4 sind die gleichen Messwerte für die flexiblen Wände mit dem Dissipationsspektrum eines Helmholtz-Resonators verglichen, der zusätzlich ebenfalls ein Rückvolumen der gleichen Höhe wie der Aufbau mit flexiblen Wänden aufweist, wobei diese Rückkavität mit dem Hauptresonator ein durchgehendes Volumen bildet. Es ist ersichtlich, dass die eingesetzten Folien aus TPU und PP im direkten Vergleich eine Verschiebung der Dissipation zu höheren Frequenzen bewirken. Dies ist durch die flexible Wand, die den Resonator unterteilt, zu erwarten. Die steife PP-Folie bewirkt dabei nur eine geringfügige Verbreiterung des Haupt-Dissipationspeaks, während die weichere TPU-Folie eine Verbreiterung des Hauptpeaks und den schon beschriebenen Nebenpeak bei 230 Hz bewirkt. Damit wird ersichtlich, dass die Folie, abhängig von Ihren Materialeigenschaften, direkt zur gezielten Manipulation des Dissipationsspektrums genutzt werden kann. Die λ-abhängige Resonanz, die beim einfachen Helmholtz-Resonator ohne Folie und Rückkavität oberhalb des untersuchten Messbereiches liegt, ist für den größeren Resonator in Abb. 4 bei ca. 1700 Hz zu erkennen. Weiterhin fällt auf, dass die Verwendung von PP nur wenig Verbreite-

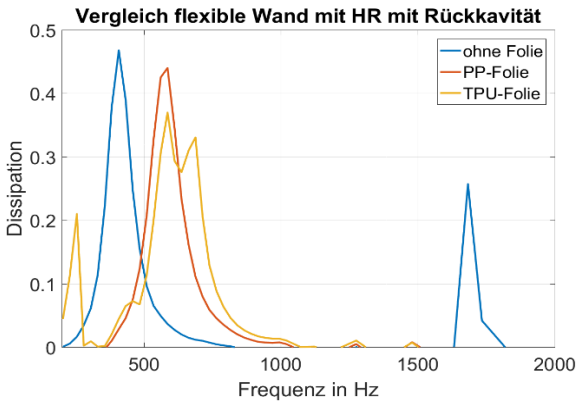

Abbildung 4: Einfluss der Folie als flexible Wand auf die Dissipation im Vergleich zum Helmholtz-Resonator ohne flexible Wände (TPU, PP und HR mit Rückkavität, $h = 1/2\ h_{res}$)

rung der Dissipationskurve bewirkt, wohingegen bei der TPU-Folie ein zusätzlicher Dämpfungspeak im niedrigen Frequenzbereich auftritt. Die λ-abhängige Resonanz, die beim Helmholtz-Resonator ohne Folie auftrat, wurde so weit zu höheren Frequenzen verschoben, dass sie nicht mehr im Messbereich ist. Die Untersuchung der Abhängigkeit der Dissipation von der Anbauposition ergab, dass diese sehr gering und somit zu vernachlässigen ist. Die geringen Abweichungen, die in Abb. 5 zu sehen sind, können auf die Ausrichtung und ggf. Einspannung des Materials in der flexiblen Wand zurückgeführt werden. Es ist demnach im betrachteten Frequenzbereich nicht mehr notwendig, darauf zu achten, ob die flexible Wand parallel oder senkrecht zum Schalleinfall verbaut ist, beziehungsweise Messungen an beiden Positionen durchzuführen. Es kann die besser zugängliche Position verwendet werden.

Bei der Untersuchung des Einflusses der Rückkavitätsgröße auf die Dissipation, zeichnet sich eine gewisse Materialabhängigkeit ab. Bei der Verwendung von PP ist keine Abhängigkeit von der Rückkavitätsgröße erkennbar, bei TPU schon. Auffällig ist hierbei, dass die Abhängigkeit jedoch nicht proportional zur Größe der Rückkavität ist. Es gibt jeweils Unterschiede in der Lage und Höhe des Dissipationspeaks bei der Verwendung von TPU Folie mit 0,1 mm Dicke. Diese ist sehr viel geringer ausgeprägt bei der Verwendung von TPU Folie mit 0,3 mm Dicke. Es scheint hier eine Abhängigkeit von der Kombination Dicke – Material, also der Biegesteife zu geben, die jedoch genauer untersucht werden muss. Diese Abhängigkeiten sind in Abb. 6 erkennbar. Weiterhin wurde der Einfluss der Form der Aussparung, in der die flexible Wand eingesetzt ist, untersucht. Dabei war auffällig, dass die Dissipationskurve bei der runden und quadratischen Aussparung annähernd gleich aussieht, es jedoch eine davon unterschiedliche Form der Kurve bei rechteckiger Aussparung gibt. Diese Ähnlichkeit kann an den ähnlichen Abmaßen der Aussparung liegen (Durchmesser und Seitenlänge sind gleich). Bei der Verwendung von TPU kommt es bei rechteckiger Aussparung zu zwei tieffrequenteren Dämpfungspeaks, die weniger Dissipation zeigen, als der Hauptpeak. Es ist anzunehmen, dass bei der rechteckigen Folie mehrere Schwingungsformen angeregt werden. Hinsichtlich der gewünschten tieffrequenten Dämpfungswirkung der flexiblen Wände, ist eine rechteckige Aussparung dementsprechend vorzuziehen. Für die statistisch unterstützte Auswertung mit DesignExpert 13 ([3]) wurde das Integral der Dissipation im Bereich von 204 Hz bis 1020 Hz, der Maximalwert der Dissipation in diesem Bereich sowie die Frequenz des Dissipationspeaks untersucht. Die Auswertung ergab, dass das Material den größten Einfluss auf das Integral der Dissipation, einzeln als auch im Vergleich zur Referenz ohne flexible Wand, und den Maximalwert der Dissipation hat. Beim Maximalwert der Dissipation hat neben dem E-Modul auch die Dicke der flexiblen Wand einen Einfluss. So ist es hinsichtlich des Maximalwertes besser, eine dicke Folie mit hohem E-Modul (hier PP) zu verwenden, hinsichtlich des Integrals der Dissipation ist jedoch eine dünnere Folie mit niedrigem E-Modul besser geeignet. Die Anbauposition der flexiblen Wand hat in DesignExpert hingegen keinen Einfluss ergeben, was im direkten Vergleich der Messwerte auch bestätigt werden konnte.

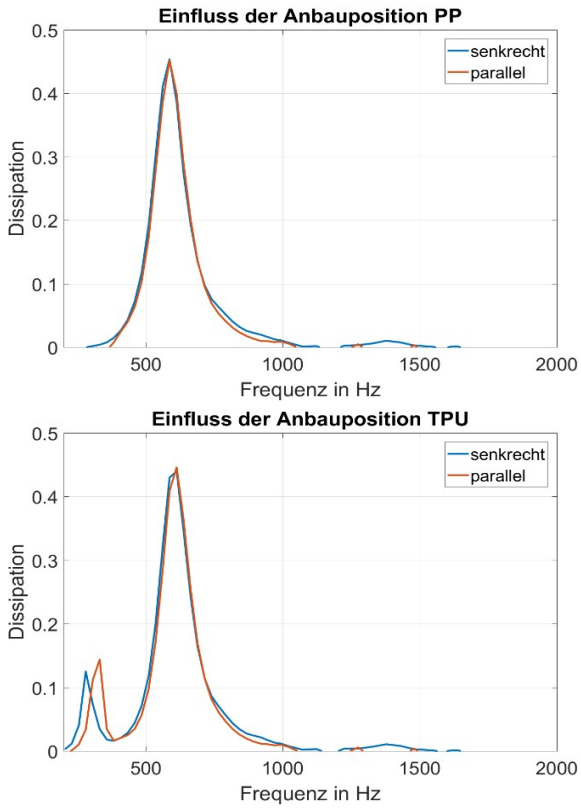

Abbildung 5: Einfluss der Anbaupositionen der flexiblen Wand hinsichtlich des Schalleinfalls bei verschiedenen Materialien)

Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend konnten mit dieser Studie wichtige Erkenntnisse gewonnen werden, die sowohl für weitere Untersuchungen am gleichen Aufbau, als auch für die nächsten Schritte relevant sind:

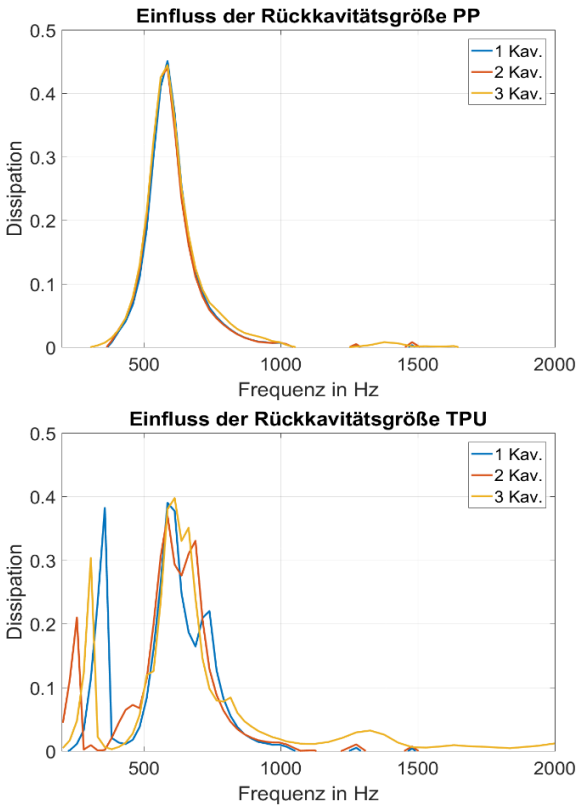

Abbildung 6: Einfluss der Rückkavitätsgröße (0.5, 1 oder 1.5-faches Resonatorvolumen) auf die Dissipation, sortiert nach Material)

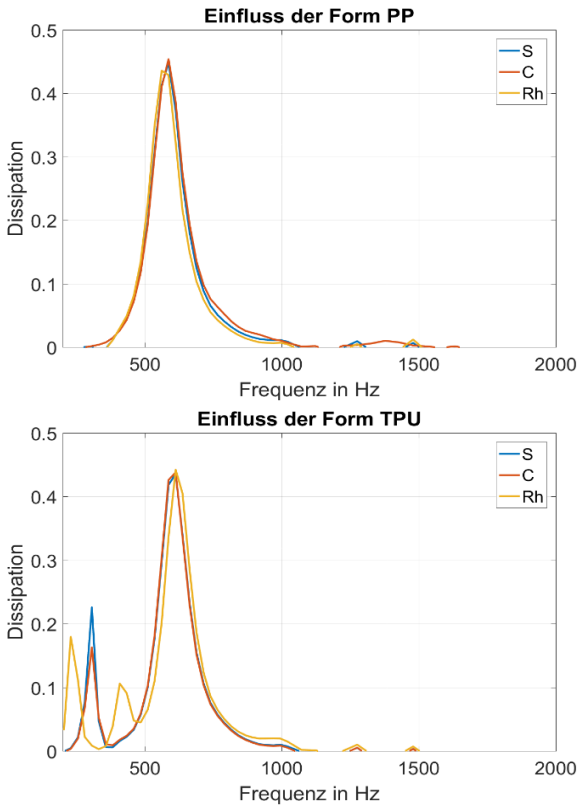

Abbildung 7: Einfluss der Form (quadratisch (S), rund (C), rechteckig (Rh)) der flexiblen Wand auf die Dissipation, sortiert nach Material)

- Die Ausrichtung der flexiblen Wand zum Schalleinfall hat keinen Einfluss auf die Dissipation.
- Die Einflüsse der Aussparungsform, des Dämpfungsverhaltens und der notwendigen Rückkavitätsgröße sind materialabhängig und müssen weiter untersucht werden.
- Die wellenlängenabhängige Resonanz kann mit flexiblen Wänden durch die Verschiebung der Dissipation mit dem vorliegenden Aufbau nicht weiter untersucht werden.

Im Rahmen des Projektes FLIER des Luftfahrtforschungsprogramms LuFo sollen nun noch folgende Untersuchungen durchgeführt werden, die jedoch keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben:

- Interaktion mehrerer Resonatoren
- Anzahl der notwendigen Wände für maximale Dissipation,
- Abhängigkeiten der Folienflächen bei verschiedenen Formen sowie
- Kombination mehrerer Wände mit unterschiedlichen Formen.

In [4] werden die gewonnenen Messergebnisse mit den Ergebnissen einer Simulation verglichen. Dabei gab es eine gute Übereinstimmung von Simulation und Experiment, eine Weiterentwicklung und Ausweitung der Simulation steht jedoch noch aus.

Danksagung

Die finanzielle Förderung der Untersuchung im Rahmen des LuFo VI Verbundvorhabens „Flexible Wände für akustische Liner (FLIER)“ erfolgte durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Förderkennzeichen 20E1915B) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages. Weiterhin gilt Dank der Werkstatt des DLR Berlin Charlottenburg (Angelo Rudolphi, Sebastian Kruck und Oliver Klose) für die Herstellung des Resonators.

Literatur

[1] Knobloch et al.: Helmholtz Resonator Liner with Flexible Walls. AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, American Institute of Aeronautics and Astronautics (2018)

[2] Busse-Gerstengarbe et al.: Comparative study of impedance eduction methods, Part 1: DLR tests and methodology, AIAA-2013-2124

[3] DesignExpert 13, URL: `http://www.Statease.com/software/design-expert/`

[4] Kohlenberg et al.: Analytische und experimentelle Modellierung eines über flexible Wände gekoppelten Helmholtz-Resonators, DAGA 2021