

Hochgenaue Bestimmung der akustischen Dämpfung von durchströmten Linern für Triebwerke

Stefan Busse¹, Claus Heuwinkel², Lars Enghardt², Ingo Röhle²

¹ Technische Universität Berlin, Institut für Strömungsmechanik und Technische Akustik, FG Numerische Methoden der Thermofluidodynamik, Müller-Breslau-Str. 8, 10623 Berlin, Email: stefan.busse@cf.d.tu-berlin.de

² Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Antriebstechnik, Abteilung Triebwerksakustik, Müller-Breslau-Str. 8, 10623 Berlin-Charlottenburg

Einleitung

Zur Lärminderung von Flugtriebwerken wird an vielen Stellen passive, akustisch dämpfende Wandauskleidung, sogenanntes Lining, eingesetzt. Während im Triebwerkseinlauf oder im Bypasskanal das Prinzip des Helmholtzresonators ausgenutzt wird, kommt bei der Brennkammer die perforierte Seitenwand mit Kühlluft einblasung als Dämpfungsmethode in Frage. Der auftretende schalldämpfende Effekt von eingeblasenen Luftstrahlen wurde von Bechert et al. [1] beschrieben, wird aber in heutigen Brennkammern nicht bewusst genutzt.

Im Rahmen einer aktuellen Untersuchung zu durchströmten Linern [2] wurden die bisherigen Mess- und Auswerteverfahren in vielen Bereichen ergänzt, optimiert und verbessert, um die akustische Dämpfung hochgenau bestimmen zu können. Im folgenden Beitrag werden diese Maßnahmen näher erläutert.

Aufbau der Teststrecke

Für die o. g. akustischen Versuche wurde der in Abbildung 1 gezeigte Kaltakustikprüfstand des DLR Berlin-Charlottenburg mit rundem Querschnitt verwendet. Dieser besteht aus einem mittig angeordneten Probenhalter für die zylinderförmigen, perforierten Liner mit einer radial umgebenden Druckkammer (Plenum) für die Einblasung. Zu beiden Seiten des Probenhalters sind zwei symmetrische Kanalsegmente montiert, die jeweils mit Anbohrungen für fünf Mikrofonringe versehen sind. Diese Ringe konnten mit bis zu acht gleichmäßig auf dem Umfang verteilten, hochgenauen 1/4"-Mikrofonen bestückt werden. Das äußere Ende des jeweiligen Segments schließt mit einem radial angeflanschten Lautsprecher und einem reflexionsarmen Abschluss ab. Der Strömungskanal ermöglicht beim vorliegenden Rohrdurchmesser Strömungsgeschwindigkeiten bis etwa 50 m/s.



Abbildung 1: Kaltakustikteststand zur Untersuchung der akustischen Dämpfung durchströmter Linier.

Hintergrund der Messungen

Ziel der Optimierung war die Verringerung der Messfehler einer Parameterstudie [1]. Deren Gegenstand war die Untersuchung verschiedenartig belochter Linier bei unterschiedlichen Hauptströmungs- und Einblasgeschwindigkeiten. Mit

Hilfe der Lautsprecher wurden dazu Schallwellen in einem Frequenzbereich erzeugt, für den ausschließlich ebene Wellen im Kanal ausbreitungsfähig sind. Aus diesem Grund wurden lediglich fünf Mikrofone je Sektion auf verschiedenen axialen, aber identischen Winkelpositionen platziert.

Optimierung der Mess- u. Auswerteverfahren

Als Kenngröße der Einfügedämpfung des Messobjektes wurde die dimensionslose Energiedissipation Δ verwendet. Sie wird nach Gleichung 1 aus der Reflexion R und der Transmission T berechnet. Der hochgestellte Index kennzeichnet mit „+“ die Dissipation in und mit „-“ die Dissipation entgegen der Hauptströmungsrichtung [2].

$$\Delta^{\pm} = 1 - (R^{\pm} + T^{\pm}) \quad (1)$$

Als Referenz für die Genauigkeit der Messungen wurde eine „Nullmessung“ ohne Messobjekt durchgeführt. Die dabei auftretenden Abweichungen zur theoretischen Dissipation ($\Delta^{\pm} = 0$) sind in den folgenden Diagrammen als prozentualer Gesamtfehler bei der Dissipationsbestimmung über der Frequenz f aufgetragen.

Relativkalibration von Amplitude und Phase

Die Streuung von Amplitude und Phasenlage der Mikrofone und der dadurch verursachte Fehler wurden durch eine Relativkalibration deutlich vermindert (Abbildung 2). Dazu wurden vor der Messung die normalerweise axial auf dem Kanalsegment angeordneten Mikrofone auf einem der Ringe über dem Umfang positioniert.

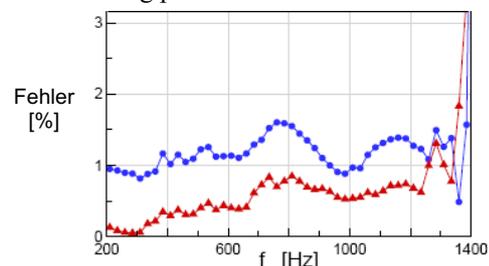


Abbildung 2: Fehlerkurven mit (▲) und ohne Verwendung der Relativkalibration (●).

Bei dieser Anordnung werden beim Durchgang einer ebenen Welle unabhängig vom Reflexionsfaktor für alle Positionen die gleichen Werte für Amplitude und Phase erwartet. Der relative Unterschied der an den einzelnen Winkelpositionen für eine Frequenz gemessenen Werte zum Mittelwert wurde als Amplituden- und Phasenkorrektur für die Datenauswertung herangezogen.

Eliminieren der Endreflexion

Durch Anpassung des Mess- und Auswerteverfahrens konnte der Einfluss der Endreflexion an den Rohrenden nahezu beseitigt werden. Dazu wurden bei wechselseitiger Beschallung der Messstrecke (Abbildung 3) die Mikrofon-signale in beiden Kanalsegmenten erfasst, mittels Kopplung von Reflexion und Transmission beider Abschnitte die Einflüsse der Endreflexion verrechnet und auf diese Weise eliminiert. Die Kopplung wird dabei durch ein aufgrund der wechselseitigen Beschallung geschlossenes lösbares Gleichungssystem ermöglicht. Dieses enthält weiterhin implizit die Endreflexion in den Mikrofon-signalen, erfordert aber keine aufwändige explizite Bestimmung derselben mehr [2].

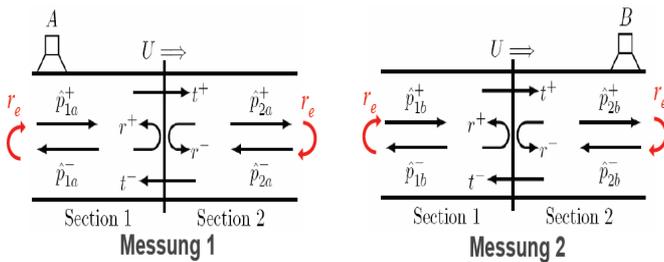


Abbildung 3: Wechselseitige Beschallung der Messstrecke.

Akustische und thermische Wandgrenzschicht

Das der Auswertung des Rohrschallfelds zu Grunde liegende Modell berücksichtigt viskose Reibungseffekte an der Kanalwand nicht. Eine Modellierung der akustischen Grenzschicht (Stokes-Schicht) wurde mit Hilfe eines analytischen Modells (siehe z.B. Kinsler et al. [3]) durchgeführt.

Ferner ist der Wärmeleitungskoeffizient des strömenden Mediums Luft geringer als der des Wandmaterials, so dass sich eine thermische Grenzschicht ausbildet.

Für beide Phänomene wurde eine Korrektur der komplexen Wellenzahl Δk , (siehe Gleichung 2) in die Auswertungsbe-rechnung eingeführt, die die Anpassungsqualität des akustischen Modells an die Messwerte weiter verbesserte (Abbildung 5).

$$\Delta k = (1 - i) \frac{\omega}{c} \frac{\partial A}{A} l_v \left[1 + \frac{\gamma - 1}{\sqrt{\text{Pr}}} \right] \quad (2)$$

Hier ist i die imaginäre Einheit, ω die Kreisfrequenz, c die Schallgeschwindigkeit, ∂A der Kanalumfang, A der Kanal-querschnitt, l_v die Stokesdicke, γ der Adiabatenkoeffizient und Pr die Prandtlzahl.

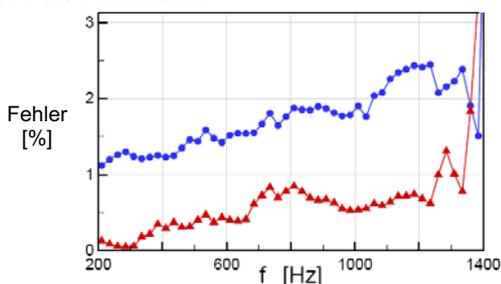


Abbildung 5: Fehlerkurven mit (▲) und ohne Modellierung der akustischen und thermischen Grenzschichten (◆).

Berücksichtigung nicht ausbreitungsfähiger Moden

Eine weitere Einflussgröße sind nicht ausbreitungsfähige Moden, deren Schallfeldanteile im Bereich nahe der Cut-On-Frequenz ($f_c = 1443$ Hz) die ebene Welle überlagern und den Messfehler dadurch erhöhen können (Abbildung 4). Diese Anteile können mittels zusätzlicher auf dem Umfang in der Nähe der Schallquelle angebrachter Mikrofone erfasst werden. Bei Mittelung über den Umfang fallen die Anteile der höheren Moden heraus, während die Schallfeldteile der ebenen Welle verbleiben. Der zu untersuchende Frequenzbereich kann dadurch in die Nähe der Cut-On-Frequenz der höheren Moden mit gleich bleibender Genauigkeit erweitert werden.

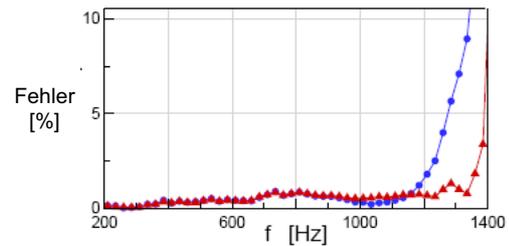


Abbildung 4: Fehlerkurven mit (▲) und ohne Berücksichtigung der nicht ausbreitungsfähigen Moden (◆).

Zusammenfassung

Die genannten Optimierungsmethoden ermöglichten eine deutliche Reduktion des Messfehlers für die Dissipation. Bei Versuchen ohne Hauptströmung lag der berechnete Maximalfehler im Frequenzbereich bis etwa 1400 Hz bei unter 1% und auch mit Strömungsüberlagerung blieb dieser unter 2% (Abbildung 5). Dadurch steht mit der Parameterstudie [2] eine Datenbasis mit hochgenauen Werten zur Verfügung, die zur aeroakustischen Beurteilung von Linern und zur Validierung von CFD/CAA-Codes herangezogen werden kann.

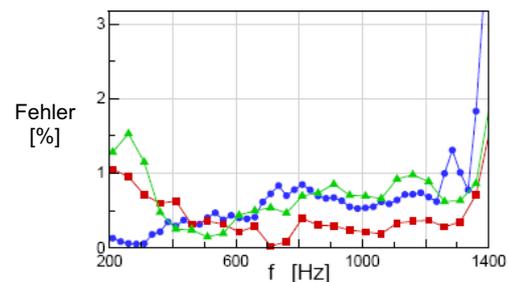


Abbildung 5: Vergleich des prozentualen Fehlers bei verschiedenen Strömungsmachzahlen, $\text{Ma}=0$ (◆), $\text{Ma}=0.05$ (■), $\text{Ma}=0.1$ (▲).

Literatur

- [1] Bechert, D.; Michel, U.; Pfitzenmaier, E.: Experiments on the transmission of sound through jets. AIAA Journal 116, 1978, S. 873-874.
- [2] Heuwinkel, C.: Experimentelle Untersuchung der akustischen Eigenschaften perforierter Liner. Diplomarbeit, TU Berlin, 2006.
- [3] Kinsler, L.; Frey, A.; Coppens, A.; Sanders, J.: Fundamentals of acoustics. John Wiley & Sons, 4th ed., 2000.