

## Entropieschall:

### Eine Parameterstudie zur Entstehung von indirektem Verbrennungsschall

Friedrich Bake, Ulf Michel und Ingo Röhle

*Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.*

*in der Helmholtz-Gemeinschaft*

*Institut für Antriebstechnik, Abteilung Triebwerksakustik, Berlin*

*Email: friedrich.bake@dlr.de*

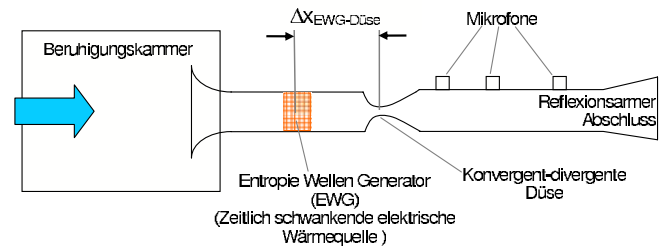
## Einleitung

In Verbrennungssystemen wie zum Beispiel in Triebwerken unterscheidet man zwischen direktem Verbrennungsschall, der an den instationären Verbrennungsprozess oder an Wärmefreisetzungsschwankungen gekoppelt ist, und indirektem Verbrennungsschall oder auch Entropieschall. Beide Schallentstehungsmechanismen bilden Quellterme der von Dowling [1] aufgestellten verallgemeinerten akustischen Energiegleichung für Verbrennungssysteme.

Die Wahl der Entropie statt der Temperatur als betrachtete Störungsgröße basiert in diesem Zusammenhang auf einer Zerlegung der Störungsgrößen von Kovaszny [2] in die so genannten Moden der Turbulenz: Druck, Wirbelstärke und Entropie, da sich die zugehörigen linearisierten Differentialgleichungen dieser Größen für eine konstante homogene Grundströmung entkoppeln.

Entropieschall entsteht durch Entropieinhomogenitäten, die mit der Brennkammerströmung konvektieren und im Brennkammerausritt also der ersten Turbinenleitstufe stark beschleunigt werden. Dieser Brennkammerausritt ist in Triebwerken bei allen relevanten Betriebszuständen gesperrt, wird also mit der Machzahl  $Ma = 1$  durchströmt. Die somit beschleunigten Entropiewellen verursachen dann eine Massenstromschwankung (Monopolquelle) sowie eine Impulsstromschwankung (Dipolquelle) [3, 4]. Temperatur- bzw. Entropieschwankungen können außerdem weiteren Breitbandlärm in jeder Turbinenstufe erzeugen, da die gekoppelten Dichtefluktuationen an den Rotor- und Statorblättern der Turbine Druckschwankungen erzeugen. Marble & Candel [5] veröffentlichten 1977 zu diesem Phänomen ein vereinfachtes eindimensionales Modell, das analytisch die Schallentstehung von Entropiewellen in einer Düsen- und Diffusorströmung beschreibt.

Das erhöhte Interesse an den Entstehungsmechanismen von Entropieschall begründet sich auf der großen Bedeutung für die Gesamtschallabstrahlung von Brennkammersystemen. Durch die erreichten Lärmreduktionsmaßnahmen an den verschiedenen Komponenten des Triebwerks, z. B. beim Bläserdesign oder im Bereich des Strahlärmes durch Vergrößerung des Mantelstroms, gehört Brennkammerlärm zu den zukünftig potentiell relevanten Triebwerksschallquellen.



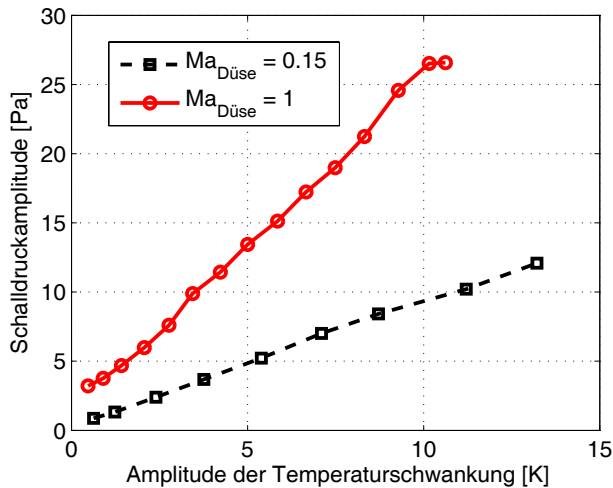
**Abbildung 1:** Prinzipskizze des Entropiewellengenerator-Teststands (EWG). Durch sehr dünne elektrisch geheizte Platindrähte wird die Temperatur einer Rohrströmung zeitlich veränderlich moduliert. Entropieschall entsteht durch die starke Beschleunigung dieser Temperaturfluktuationen in der stromab gelegenen Düse.

## Aufbau - Entropiewellengenerator (EWG)

Zur Untersuchung der Einflüsse verschiedener Parameter auf die Entstehung von Entropieschall oder auch indirektem Verbrennungsschall wurde ein generischer Referenzversuch aufgebaut (siehe Abbildung 1). In einer Rohrströmung werden durch elektrisches Heizen von sehr dünnen Platindrähten künstlich Entropiewellen eingebracht. Der Aufbau wird daher Entropiewellengenerator (EWG) genannt. Stromab des Heizmoduls mit sechzig durch den Rohrquerschnitt gespannten Platindrähten wird die Strömung in einer konvergent-divergenten Düse auf eine Machzahl von bis zu  $Ma = 1,2$  beschleunigt. Der entstehende Entropieschall wird dann in dem Rohrabschnitt stromab der Düse mit wandbündig eingebauten Mikrofonen erfasst und aufgezeichnet. Abgeschlossen wird der Versuchsstand durch einen reflexionsarmen Abschluss, um Reflexionen der Schallwellen in die Messstrecke zu minimieren. Der Versuchsstand ermöglicht die Variation vieler verschiedener Parameter, wie Massenstrom, Düsenmachzahl, Heizleistung und damit die Amplitude der Entropiestörung, Lauflänge zwischen Heizmodul und Düse sowie Art der Anregung (periodisch, pulsartig oder kontinuierlich).

## Ergebnisse und Diskussion

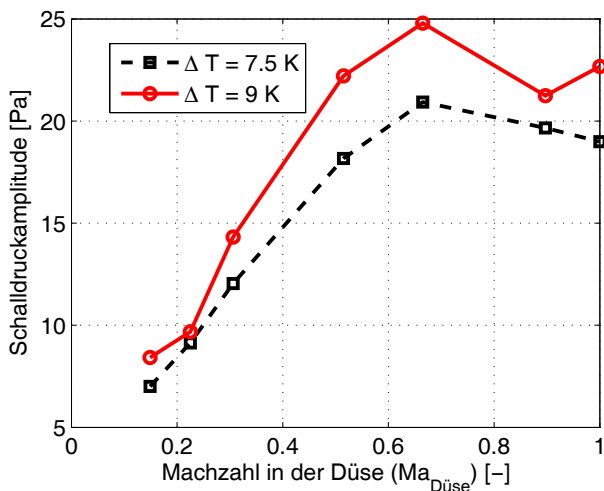
Für die Ergebnisse in Abbildung 2 wurde die Strömung pulsartig bei zwei verschiedenen Düsenmachzahlen mit variierter Heizleistung geheizt. Ausgewertet wurde dann die über etwa 300 Pulse gemittelte Amplitude des Entropieschallpulses stromab der Düse. Abbildung 2 zeigt jeweils einen linearen Anstieg der Entropieschallamplitude



**Abbildung 2:** Abhängigkeit der Entropieschallamplitude von der Amplitude der Temperaturfluktuation für zwei verschiedene Machzahlen.

mit der Amplitude der Temperaturstörung.

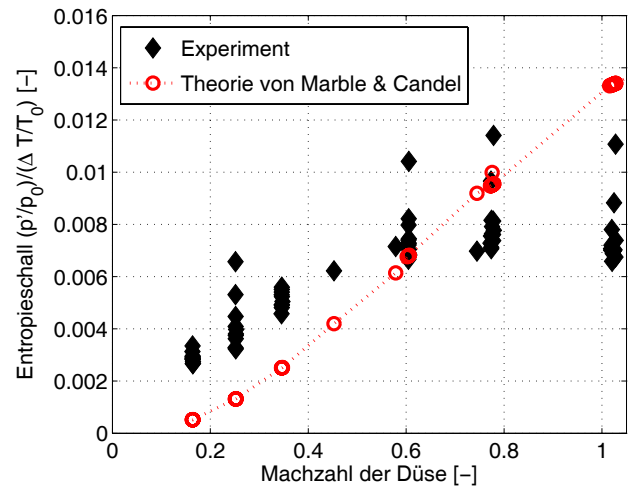
Des Weiteren wurde für eine konstante Amplitude der Entropiewelle die erzeugte Entropieschallamplitude bei verschiedenen Machzahlen bestimmt. Abbildung 3 zeigt dazu für eine Temperaturstörung von 7,5 und 9 K zunächst einen starken Anstieg des Entropieschalls mit der Düsenmachzahl, allerdings für Machzahlen über 0,8 sinkt die Schalldruckamplitude wieder leicht.



**Abbildung 3:** Abhängigkeit der Entropieschallamplitude von der Düsen-Machzahl für zwei verschiedene Amplituden der Temperaturfluktuation.

In weiteren Versuchen unter Variation des Abstands zwischen Heizmodul und Düse wurde eine leichte Abnahme der Entropieschallamplitude mit zunehmender Lauflänge, vermutlich hervorgerufen durch Dispersions- oder Diffusionseffekte der Entropiewellen, festgestellt.

Das analytische Modell von Marble & Candel [5] beschreibt die Schallentstehung durch Entropiewellen in einer eindimensionalen Düsen- und Diffusorströmung unter der Annahme, dass die Düse kompakt also ihre



**Abbildung 4:** Vergleich der experimentellen Ergebnisse vom Entropiewellengenerator (EWG) mit der vereinfachten eindimensionalen Theorie von Marble & Candel [5].

axialen Abmaße klein gegenüber der betrachteten Wellenlänge ist. Zum Vergleich der experimentellen Ergebnisse mit dieser Theorie sind in Abbildung 4 die normierten Entropieschallamplituden  $p'/p_0$  bezogen auf die jeweilige normierte Temperaturstörung  $\Delta T/T_0$  über die Düsenmachzahl aufgetragen. Die experimentellen Ergebnisse (schwarze Rauten) zeigen für kleine Machzahlen höhere Amplituden als die Theorie (rote Kreise) an, während sie für hohe Machzahlen unter den theoretisch vorhergesagten Amplituden liegen. Außerdem ist eine relativ starke Streuung der Messergebnisse für jeweils eine Machzahl zu erkennen. Unter Berücksichtigung dieser Messwertstreuung und der Tatsache, dass die Theorie auf einem eindimensionalen kompakten Modell beruht, zeigt Abbildung 4 eine gute Übereinstimmung.

## Literatur

- [1] Dowling, A. P., 1996. "Acoustics of unstable flows". In *Theoretical and Applied Mechanics*, T. Tatsumi, E. Watanabe, and T. Kambe, eds., Elsevier, Amsterdam, pp. 171–186.
- [2] Kovasznay, L. S. G., 1953. "Turbulence in supersonic flow". *Journal of the Aeronautical Sciences*, **20**(10), October, pp. 657–682.
- [3] Howe, M. S., 1975. "Contributions to the theory of aerodynamic sound, with application to excess jet noise and the theory of the flute". *J. Fluid Mech.*, **71**, pp. 625–673. part 4.
- [4] Ffowcs Williams, J. E., and Howe, M. S., 1975. "The generation of sound by density inhomogeneities in low Mach number nozzle flows". *J. Fluid Mech.*, **70**, November, pp. 605–622. part 3.
- [5] Marble, F. E., and Candel, S. M., 1977. "Acoustic disturbances from gas non-uniformities convected through a nozzle". *J. Sound Vibration*, **55**(2), pp. 225–243.