

Optische Messung des Schalldruckes mittels Rayleighstreuung

A. Rausch¹, A. Fischer¹, F. Bake¹, I. Röhle²

¹ Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Antriebstechnik, Abteilung Triebwerksakustik,

D 10623 Berlin, Deutschland, Email: anne.rausch@dlr.de

² Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Antriebstechnik, Abteilung Turbine, D 10623 Berlin, Deutschland

Einleitung

Mikrofone zeichnen sich durch ihre hohe Zuverlässigkeit und Genauigkeit sowie ihr breites Anwendungsfeld aus. Jedoch gibt es Messfälle, in denen Mikrofone nur schwer einsetzbar sind. Soll die dreidimensionale Struktur eines Schallfeldes analysiert werden, z.B. bei der Untersuchung höherer Moden in akustischen Kanälen, können mittels Mikrofonen nur wandnahe Schalldruckschwankungen vermessen werden oder die Mikrofone müssen in den Kanal eingebracht werden, was das Schallfeld und die eventuell vorhandene Strömung stört. Andere Beispiele sind Objekte mit geringem Durchmesser, wie z.B. Düsen, die die Installation von Mikrofonen erschweren oder Teststände, in denen durch hohe Temperaturen, hohe Druckschwankungen oder starke elektromagnetische Felder, die für den Einsatz von Kondensatormikrofonen notwendigen Umgebungsbedingungen nicht hergestellt werden können. In derartigen Messfällen ist es wünschenswert, das Schallfeld auf anderem Wege vermessen zu können.

Es gibt optische Messtechniken, die die prinzipielle Möglichkeit bieten nichtinvasive, räumlich aufgelöste Messungen von Druckschwankungen durchzuführen. Diese Techniken basieren auf Dichtemessungen, die gemäß $\rho' = c^2 p'$ in Druckwerte umgerechnet werden können. Eine optische Dichtemesstechnik, die den großen Vorteil besitzt kein Seeding (Nebel aus Fremdteilchen, der in das Messobjekt eingebracht werden muss) zu benötigen, ist die Rayleighstreuung. Die Sensitivität dieser Messtechnik ist hoch genug um sie zur Vermessung von Druckschwankungen in akustischen Größenordnungen zu nutzen. Eine in einem akustischen Kanal erzeugte stehen Welle wurde sowohl mit Mikrofonen als auch mittels Rayleighstreuung vermessen, wodurch die Verwendbarkeit der Rayleighstreuung für akustische Messungen erstmals demonstriert werden konnte.

Grundlagen der Rayleighstreuung

Eine der Besonderheiten von Laserlicht besteht darin, dass es gerichtet ist. Dies bedeutet, dass die Wellenvektoren aller Teilwellen, aus denen der Laserstrahl besteht, die gleiche Richtung haben. Betrachtet man einen Laserstrahl von der Seite müsste er also unsichtbar sein, da alles Licht sich in Strahlrichtung ausbreitet. Im Vakuum trifft dies auch zu jedoch nicht bei der Ausbreitung von Laserstrahlen in Medien, wie z.B. Luft. Verantwortlich dafür, dass man einen Laserstrahl in Luft von der Seite sehen kann ist die Streuung. Streuung ist ein optischer Effekt, der eine der Wechselwirkungen von Licht und Ma-

terie beschreibt. Trifft ein Laserstrahl auf ein Luftteilchen wird ein Teil seiner Energie von dem Teilchen aufgenommen und quasi-instantan wieder abgegeben. Das abgegebene Licht ist jedoch ungerichtet und kann damit auch seitlich zum Laserstrahl gesehen oder von einem Detektor aufgezeichnet werden. Die Intensität des gestreuten Lichtes I_{streu} ist dabei direkt proportional der Anzahl der Teilchen im betrachteten Volumen N und der einfallenden Intensität I_0 , also

$$I_{streu} = const. \cdot I_0 \cdot N . \quad (1)$$

Da das hier vorgestellte optische Messsystem auf die Bestimmung von Schwankungen abzielt, muss die Proportionalitätskonstante nicht bestimmt werden, sondern entfällt bei der Normierung auf den Mittelwert, denn es folgt unter Berücksichtigung des idealen Gasgesetzes

$$p_{max} = \frac{p_{mittel} \cdot N_{max}}{N_{mittel}} = p_{mittel} + \frac{p_{mittel} \cdot \Delta I_{streu}}{I_{(streu-mittel)}} . \quad (2)$$

Dabei sind N_{mittel} und N_{max} die mittlere Teilchenzahl im Volumen bzw. die maximale Teilchenzahl, die die Summe aus mittlerer Teilchenzahl und Amplitude der Anzahloszillation ist. Dementsprechend sind p_{mittel} der Umgebungsdruck und p_{max} der maximal auftretende Druck, also die Summe aus Druckmittelwert und Amplitude der Druckschwankung.

Damit kann über die Messung der in einem Volumen gestreuten Intensität die Anzahl der Teilchen im Volumen und damit die Dichte bestimmt werden.

Die Messtechnik Rayleighstreuung [1], die auf dem erläuterten optischen Effekt basiert, wurde bisher beispielsweise zur Vermessung von Temperaturänderungen in Freiflammern [2], zur Detektion von Dichtegradienten und Schallquellen in Freistrahlen [3] oder auch zur Charakterisierung von Windkanalströmungen [4] eingesetzt. Diese Anwendungsfelder bieten im Vergleich zur Akustik hohe Dichtegradienten und damit ein besseres Signal-zu-Rausch-Verhältnis.

Versuchsaufbau

Ein Prinzipexperiment wurde aufgebaut um die Anwendbarkeit von Rayleighstreuung zur Messung akustischer Druckschwankungen zu demonstrieren. In einem rechteckigen, allseitig geschlossenen Plexiglaskanal wurde mit einem Lautsprecher ein Stehwellenfeld erzeugt und mit fünf Mikrofonen vermessen. Der Aufbau des akustischen Kanals und die Mikrofonpositionen sind in Abbildung 1 dargestellt. Die Abstände der Mikrofone sind ungleichmäßig, was die Analyse des Schallfeldes erleichtert.

Ebenfalls in Abbildung 1 dargestellt, ist der optische

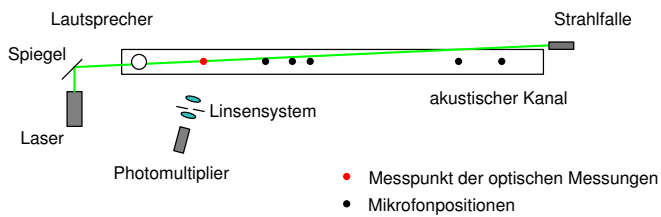


Abbildung 1: Aufbau der Messanordnung bestehend aus einem Plexiglas Kanal, fünf Mikrofonen und zwei optischen Detektoren zur Aufzeichnung von Intensitätsänderungen.

Versuchsaufbau der Rayleighmessungen. Es wurden ein Detektorsystem auf den rot gekennzeichneten Raumpunkt ausgerichtet. Dieses System bestand aus einem Photomultiplier, der die einfallende Intensität detektierte und einem optischen System, das das gestreute Licht sammelte und filterte.

Messergebnisse und Messfehler

Es wurden zwei Frequenzen zur Anregung eines Stehwellenfeldes im Kanal gewählt. Zunächst 570.3 Hz , da bei dieser Frequenz an der Messposition der Rayleighmessungen ein Druckmaximum lag. Der mittels des Lautsprechers gewählte Schalldruckpegel wurde variiert, um zu ermitteln bis zu welchem Schalldruckpegel Rayleighstreuung sensitiv genug ist um verwendet werden zu können. Die Aufzeichnungsdauer betrug 130 s und die Amplituden der Druckschwankungen wurden gemäß Formel 2 berechnet. Aus den Mikrofonmessungen wurden die für die Position der Rayleighmessungen zu erwartenden Druckamplituden zum einen über Schalldruckzerlegung berechnet (grün dargestellt), zum anderen wurde davon ausgegangen das ein perfektes Stehwellenfeld vorliegt und aus jeder Mikrofoneinzelmessung die für die Rayleighmessstelle zu erwartende Schalldruckamplitude berechnet, um einen Eindruck von der Güte des Stehwellenfeldes und dem Messfehler der Mikrofonensignale zu geben. Diese Ergebnisse sind in Abbildung 2 dargestellt. Bei Schalldruckamplituden höher als 125 dB stimmen Mikrofonmessungen und optische Messungen gut überein. Bei kleineren Schalldruckamplituden weichen die optischen Messungen jedoch von den akustischen Messungen ab, was auf das sinkende Signal-zu-Rausch-Verhältnis zurückzuführen ist. Durch eine längere Messzeit und die Verwendung eines phasenempfindlichen Gleichrichters könnte dieses verbessert werden, was auch die Vermessungen kleiner Schalldruckpegel ermöglichen würde.

Bei 740.3 Hz lag die Messposition der Rayleighmessungen in einem Druckminimum (gemäß Schalldruckzerlegung zwischen 1.8 und 15 Pa). Auf diese Weise konnte überprüft werden, wie stark der Einfluss von akustisch angeregten Körperschwingungen des Aufbaus auf die Rayleighmessungen war, denn aufgrund seiner begrenzten Sensitivität sollte das Rayleighsystem in dieser Konfiguration keine Druckamplituden messen können. Dies konnte nachgewiesen werden.

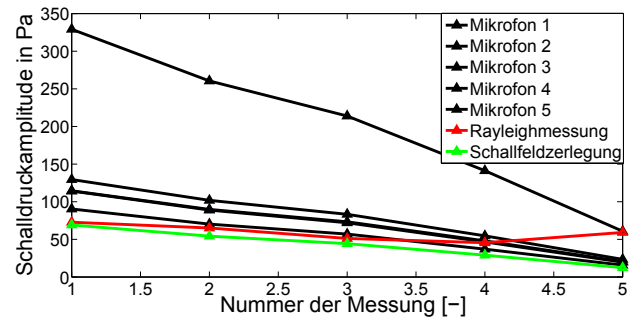


Abbildung 2: Vergleich der mit Mikrofonen und Rayleighstreuung gemessenen Druckschwankungen bei unterschiedlichen maximalen Schalldruckamplituden im Kanal.

Zusammenfassung

Ein optisches Messsystem basierend auf Rayleighstreuung wurde aufgebaut, das zeitlich aufgelöst Dichteschwankungen vermessen kann. Dieses Messsystem ist sensitiv genug, um Dichte- und damit Druckschwankungen im akustischen Bereich detektieren zu können. Ein Modellversuch wurde durchgeführt, um die Anwendbarkeit der Rayleighstreuung für akustische Messungen zu demonstrieren. Dazu wurde in einem Plexiglas Kanal ein Stehwellenfeld erzeugt und mittels Mikrofonen und Rayleighstreuung vermessen. Die gemessenen Schalldruckschwankungen wurden verglichen. Oberhalb von 125 dB konnte eine gute Übereinstimmung der akustischen und optischen Messungen gefunden werden.

Danksagung

Die Autoren danken der Helmholtzgemeinschaft, die im Rahmen einer Helmholtz-Hochschul-Nachwuchsforschergruppe diese Arbeit finanziell unterstützte.

Literatur

- [1] R. B. Miles, W. R. Lempert, J. N. Forkey.: Laser Rayleigh scattering. MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY 12 (2001), R33-R51
- [2] D. Hoffman, K.U. Muench, A. Leipertz.: Two-dimensional temperature determination in sooting flames by filtered Rayleigh scattering. OPTICS LETTERS 21 7 (1996), 525-527
- [3] J. Panda, R.G. Seasholtz.: Experimental investigation of density fluctuations in high-speed jets and correlation with generated noise. J. FLUID MECH. 450 (2002), 97-130
- [4] R.B. Miles, J.N. Forkey, W.R. Lempert: Filtered Rayleigh Scattering Measurements in Supersonic/Hypersonic Facilities. AIAA 92 (1992) pp.3892-3894