

Anwendung der Particle-Image-Velocimetry für Akustische und Aeroakustische Untersuchungen

Arne Henning¹, Lars Koop², Stephan Kröber², Carsten Spehr², Klaus Ehrenfried²

¹ Institut für Luft- und Raumfahrt, TU Berlin, 10587 Berlin, Deutschland, Email: arne.henning@dlr.de

² Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik, DLR-Göttingen, 37073 Göttingen, Deutschland

Einleitung

Mit Hilfe der Particle Image Velocimetry (PIV) lassen sich in frei wählbaren Ebenen berührungslos ortsauflösende Geschwindigkeitsmessungen durchführen. Aufgrund der Verfügbarkeit stabil arbeitender diodengepumpter Laser und der Entwicklung von CMOS Kameras mit Aufnahmefrequenzen von bis zu 100 kHz ist es heute möglich, die zeitliche Entwicklungen von Schwankungsgrößen mit einem sogenannten High-Speed-PIV (HS-PIV) System zu verfolgen. Ein solches System wurde in der vorliegenden Arbeit eingesetzt um den Schnellesensor einer p-u Sonde im Frequenzbereich von 10 - 10.000 Hz zu kalibrieren. Darüber hinaus wird hier eine experimentelle Methode vorgestellt, welche PIV- und Mikrofon-Messungen kombiniert, wodurch aeroakustische Quellregionen identifiziert werden können. Die Methode wurde sowohl an einer aeroakustischen Quelle mit starkem tonalem Anteil, als auch an einem breitbandig abstrahlenden Freistrahler erfolgreich angewandt.

Kalibrierung einer p-u Sonde mittels High-Speed PIV Messungen

Die Standardmethode zur Kalibrierung von p-u Sonden ist die relative Kalibrierung der beiden Sensoren zueinander, d.h. der Phasen- und Amplitudengang des Schnellesensors wird relativ zum Drucksensor (Mikrofon) vermessen [3]. Die Durchführung dieser Kalibrierungsmethode ist an einen reflektionsarmen Raum gebunden. Wird die Messung nicht in einem ebenen Wellenfeld durchgeführt, kann die für diese Art der Kalibrierung nötige Formulierung der akustischen Impedanz sehr komplex und fehlerhaft sein, da Annahmen über das Schallfeld getroffen werden müssen. Es ist mit dieser Methode außerdem nicht möglich, den Pegel der Schallschnelle absolut zu vermessen. Aus diesen Gründen wird in dieser hier vorgestellten Arbeit eine neue Methode zur Kalibrierung des Schnellesensors entwickelt. Die Schallschnelle im Nahfeld eines Lautsprechers wird Hilfe eines High-Speed PIV (HS-PIV) Systems vermessen [4]. Die so erhaltenen Absolutwerte der Schallschnelle werden dann zu den an der gleichen Position mit der p-u Sonde vermessenen Schnellefluktuationen ins Verhältnis gesetzt. Der Aufbau dieser Kalibrierungsmessung ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Abbildung 2 zeigt das Spektrum des mittels der PIV gemessenen Schwankungen der Schnelle im Nahfeld des HF-Lautsprechers bei 250 Hz, und Abbildung 3 zeigt einen Vergleich der Sensitivität einer p-u Sonde, gemessen mit dem HS-PIV System und der Freifeldmethode.

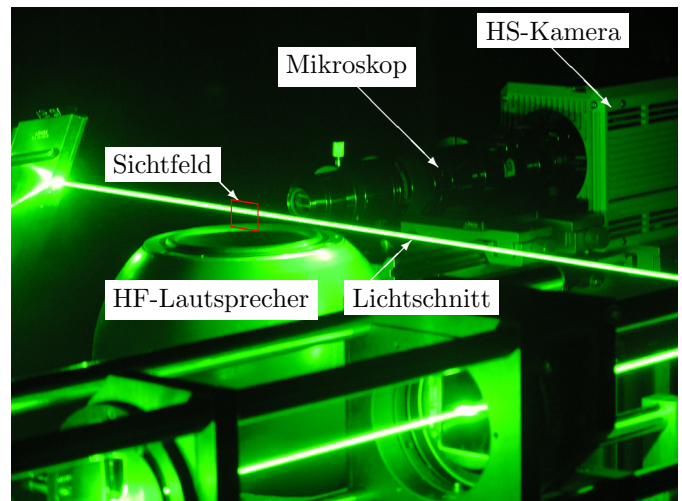


Abbildung 1: Messaufbau für die Kalibrierung der p-u Sonde mit dem HS-PIV System im akustischen Halbraum. Das Sichtfeld der PIV-Messung befindet sich im Nahfeld des Hochtonlautsprechers. In diesem Bereich wurde auch die p-u Sonde positioniert.

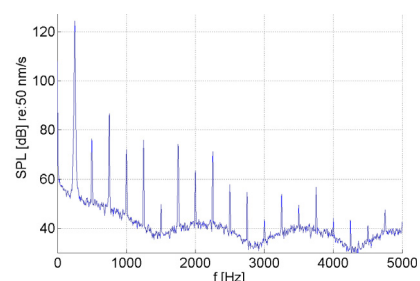


Abbildung 2: Spektrum des mittels der PIV gemessenen Schwankungen der Schnelle in SPL [dB] re: 50 nm/s im Nahfeld des HF-Lautsprechers bei 250 Hz.

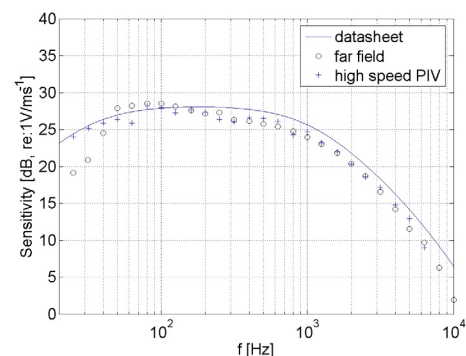


Abbildung 3: Vergleich zwischen Freifeld- und HS-PIV Kalibrierungsmessung. Dargestellt ist die Sensitivität [V/ms^{-1}] einer p-u Sonde, gemessen mit dem HS-PIV System (+) und der Freifeldmethode (o).

Causality Correlation

Bei der hier vorgestellten experimentellen Methode zur Bestimmung des Zusammenhangs von Ursache und Wirkung in der Aeroakustik wird ein Ansatz verfolgt, der zwei experimentelle Verfahren kombiniert: Die Messung mittels der PIV in einer Ebene liefert Informationen über die ursächlichen Schwankungsgrößen in der Strömung. Synchron dazu werden die emittierten Schallwellen im akustischen Fernfeld durch Mikrofone erfasst. Durch die Berechnung der Korrelationsfunktion $R_{\phi,p}$ zwischen einer aus den PIV Ergebnissen abgeleiteten Größe ϕ und den Druckschwankungen im Fernfeld p können dann akustische Quellregionen identifiziert werden. Die räumliche Auflösung des resultierenden Korrelationskoeffizienten entspricht dabei der Auflösung der PIV Messung und die Abtastrate des Mikrofonsignals bestimmt dessen zeitliche Auflösung. Im statistischen Sinne lässt sich also der zeitliche Verlauf von Strukturen im Raum verfolgen, welche an dem Schallentstehungsmechanismus beteiligt sind. Diese Resultate ermöglichen einen völlig neuen Einblick in den Entstehungsprozess von Druck- und Geschwindigkeitsschwankungen, welche sich in das Fernfeld ausbreiten.

In einem ersten Schritt wurde die Methode am Nachlauf eines Zylinders erprobt. Dadurch konnte die prinzipielle Machbarkeit solcher kombinierter Messungen an einer tonalen aeroakustischen Quelle nachgewiesen werden [1]. In einem zweiten Schritt wurde die Methode unter Verwendung eines Mikrofon-Arrays an einem im Nachlauf eines Zylinders eingebrachten Flügelprofil untersucht [2]. Diese Konfiguration verursacht Druckschwankungen im

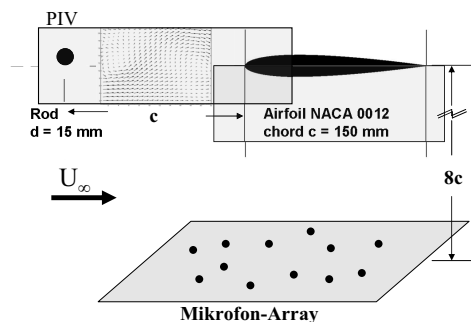


Abbildung 4: Zylinder-Tragflügel Konfiguration: Die grauschattierten Rechtecke markieren die Ebenen in welchen mittels der PIV die Geschwindigkeitsfluktuationen in der Strömung vermessen wurden. Synchron dazu wurden durch ein Mikrofon-Array die Druckschwankungen im Fernfeld erfasst.

Fernfeld in einem breiten Bereich des Frequenzspektrums mit einem aufgeweiteten Maximum im Bereich der charakteristischen Strouhal-Frequenz. Abbildung 4 zeigt eine Prinzipskizze des experimentellen Aufbaus. Die Untersuchungen wurden im aeroakustischen Windkanal Braunschweig (AWB) durchgeführt. In Abbildung 4 ist dargestellt, wie sich die Wirbelstruktur der als Vektorfeld dargestellten Korrelationskoeffizienten in zwei entlang der Flügeloberfläche laufende Einzelwirbel aufteilt. Die dargestellten Vektoren setzen sich dabei aus den Komponenten-

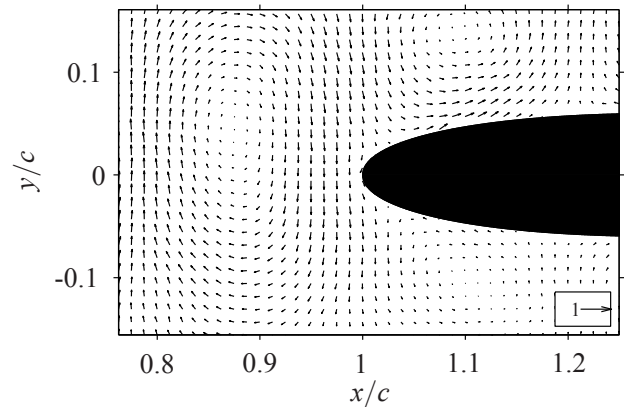


Abbildung 5: Zylinder-Tragflügel Konfiguration: Die Korrelationskoeffizienten $R_{u,p}$ und $R_{v,p}$ sind als die beiden Komponenten eines Vektorfeldes dargestellt.

ten $R_{u,p}$ und $R_{v,p}$ zusammen. Auffällig ist die aus der hohen räumlichen Kohärenz der Strömung resultierende Regelmäßigkeit der Wirbelstrukturen. Eine aus den Experimenten gewonnene wichtige Erkenntnis ist die Tatsache, dass sich von einem hohen Wert des Koeffizienten nicht unbedingt auf eine akustische Quellregion schließen lässt. Durch eine Analyse der räumlichen Verteilung von Zeitpunkten, bei denen $R_{\phi,p}$ maximal ist, ist es jedoch möglich, die Quellregion zu identifizieren.

Zur Prüfung der Methode an einer breitbandig abstrahlenden aeroakustischen Quelle wurden Untersuchungen an einem subsonischen Freistrahldurchgeführt [5]. Erste Ergebnisse haben gezeigt, dass sich auch hier geordnete Strukturen im Bereich des Potentialkerns identifizieren lassen.

Literatur

- [1] Henning, A., Käpernick, K., Ehrenfried, K., Koop, L., und Dillmann, A.: Investigation of Aeroacoustic Noise Generation by Simultaneous Particle Image Velocimetry and Microphone Measurement. Experiments in Fluids, Vol. 348, 2008.
- [2] Henning A., Koop L., Ehrenfried K., Lauterbach A., und Kröber S.: Simultaneous multiplane piv and microphone array measurements on a rod-airfoil configuration. 15th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Miami, USA AIAA-2009-3184
- [3] Jacobsen, F. und V. Jaud.: A note on the calibration of pressure-velocity sound intensity probes. Journal of the Acoustical Society of America 120 (2), 2006. pp. 830-837.
- [4] Henning, A. und Ehrenfried, K.: Frequency resolution of high-speed PIV. Proceedings, 8th ONERA-DLR Aerospace Symposium, ODAS-2007, Göttingen, 2007.
- [5] Henning, A., Koop, L. und Ehrenfried K.: Causality correlation in aeroacoustic experiments by means of simultaneous PIV and microphone-array measurements. Proceedings, Berlin Beamforming Conference, BEBEC-2010, Berlin, 2010.