

UNTERSUCHUNG DER STRAHLSTRUKTUR EINES MASSENSTROMNEUTRALLEN PIEZO-AKTUATORS MIT PHASENGEMITTELTER PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY

INVESTIGATION OF THE JET-STRUCTURE OF A ZERO-NET-MASS-FLUX PIEZO-ACTUATOR BY PHASE-AVERAGED PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY

M. Hecklau, V. Zander, W. Nitsche

Technische Universität Berlin
Institut für Luft- und Raumfahrt
Marchstraße 12
10587 Berlin

Phasengemittelt PIV, Piezo-Aktuator, massenstromneutral, Synthetic Jet
Phase-Averaged PIV, Piezo-Actuator, Synthetic Jet, zero-net-mass-flux

Einleitung

Zur aktiven Kontrolle von abgelösten Strömungen haben sich periodisch arbeitende Aktuator-Konzepte als sehr effektive Systeme bewährt [Gad-el-Hak 2000; Petz et al. 2007]. Im Gegensatz zu kontinuierlich arbeitenden Systemen ist der Massenstrom dabei um ein Vielfaches reduziert und es können Instabilitäten in der Scherschicht angefacht werden, die zum Wiederanlegen der Strömung führen [Darabi et al. 2004; Brunn et al. 2004]. Eine weiterführende Methode der aktiven Strömungskontrolle ist die massenstromneutrale Beeinflussung (ZNMF – zero-net-mass-flux) mit Hilfe von oszillierend arbeitenden Aktuatoren (Synthetic Jet) [Glezer et al. 2002; Schaeffler et al. 2002]. Wenn ein solcher Synthetic Jet Aktuator zur aktiven Kontrolle abgelöster Strömungen eingesetzt werden soll, sind detaillierte Kenntnisse über die Struktur und Entwicklung des Wandstrahls von großer Wichtigkeit. Diese ist stark abhängig von der Anregefrequenz, dem Volumen der Aktuator-Kammer und der Amplitude des Anregesignals. Zur Bestimmung der Abhängigkeit der Jet-Austrittsgeschwindigkeit von den genannten Parametern wurde die PIV-Methode eingesetzt. Das Strömungsfeld des Wandstrahls konnte auf diese Weise bis zu einem Wandabstand von $y/d = 17$ berührungsfrei und mit einer hohen räumlichen Auflösung bei verschiedenen Frequenzen und Amplituden phasengemittelt analysiert werden.

Synthetic Jet Aktuator

Für die Untersuchungen wurde ein rotationssymmetrischer Aktuator mit einer kreisförmigen Austrittsöffnung verwendet. Der Aktuator besteht aus der zylindrischen Austrittsöffnung und einer dahinter liegenden Aktuator-Kammer (Abb. 1). Der periodische Jet wird durch eine schwingende Piezomembran erzeugt, welche die Aktuator-Kammer auf der gegenüber liegenden Seite der Austrittsöffnung abschließt [Gomes et al. 2006]. Die Piezomembran ist vom Typ EPZ-27MS44 der Firma Ekulit. Durch die Membranschwingungen wird die Luft in dem Hohlraum zum Schwingen angeregt. Um eine möglichst hohe Austrittsgeschwindigkeit des

14.2

Luftstahls am Aktuatoraustritt zu erhalten, müssen die Resonanzfrequenzen der Piezomembran und der Aktuatorchamber (Helmholtzresonator) aufeinander abgestimmt sein. Zur Ansteuerung der Piezomembran wurde ein Sinussignal verwendet.

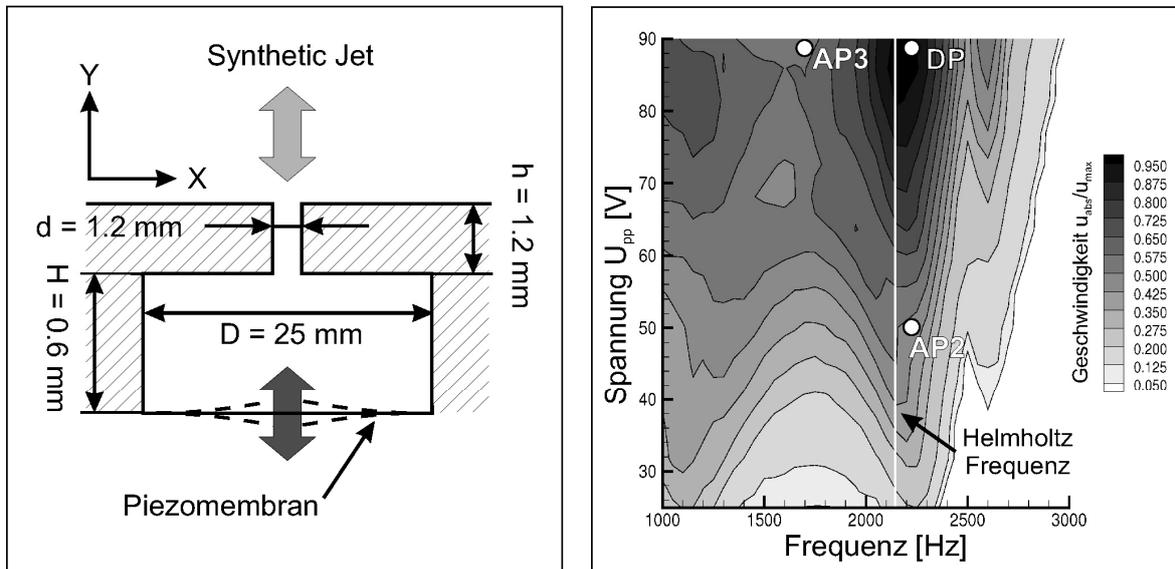


Abb. 1: Aufbau des verwendeten Piezo-Aktuators Abb. 2: Austrittsgeschwindigkeit des Jets

In einer Voruntersuchung zum Frequenz- und Amplitudenverhalten des Aktuators wurde die Austrittsgeschwindigkeit des Jets zunächst mit einem Hitzdraht bei einem Wandabstand von 1 mm direkt über der Austrittsöffnung gemessen. Abb. 2 zeigt das Ergebnis der Voruntersuchung. Die Strahlgeschwindigkeit ist in Abhängigkeit der beiden Anregeparameter Frequenz (Abszisse) und Amplitude (Ordinate) dargestellt. Zusätzlich ist die theoretisch berechnete Helmholtzfrequenz der Aktuatorchamber eingezeichnet. Die Darstellung zeigt deutlich den dominierenden Einfluss der Helmholtzfrequenz auf das Aktuatorverhalten. Es ist eine sichtbare Abhängigkeit der Austrittsgeschwindigkeit von der Anrefrequenz zu erkennen, da eine starke Kopplung zwischen dem Helmholtzresonator und der Piezomembran besteht. Die Ergebnisse der Voruntersuchung dienten zur Auswahl von drei Aktuatorbetriebspunkten für die PIV-Untersuchung. Als Designfall (DP) wurde der Betriebspunkt mit der maximalen Austrittsgeschwindigkeit gewählt (Abb. 2). Der Aktuator wird im Designfall mit einer Frequenz von $f_p = 2208 \text{ Hz}$ und einer Amplitude von $U_{pp} = 90 \text{ V}$ betrieben. Im zweiten Fall (AP2) beträgt die Amplitude der Versorgungsspannung $U_{pp} = 50 \text{ V}$. Beim dritten Betriebspunkt (AP3) erfolgte, im Vergleich zum Designfall, eine Reduzierung der Frequenz auf $f_p = 1666 \text{ Hz}$.

Experimentelle Untersuchung

Da der Piezo-Aktuator periodisch bei einer hohen Betriebsfrequenz (1 bis 2,5 kHz) arbeitet, bietet sich eine phasenstarre Untersuchung des Synthetic Jets mit einer anschließenden Phasenmittlung der Strömungsfeldmessungen an [Guo et al. 2006]. Als Bezugspunkt für die Phasenmittlung wurde das Anregesignal verwendet. Das Strömungsfeld wurde für 16...20 diskrete Phasenwinkel, verteilt über eine Periode der Piezomembran, aufgenommen. Bei der anschließenden Auswertung wurden die Daten über 100 Einzelmessungen gemittelt. Für die PIV-Messung war der Piezo-Aktuator in einer Messbox eingebaut, die seitlich optische Zugänge besitzt. Die Bildebene wurde mit einem Nd:Yag Laser beleuchtet und der Lichtschnitt über eine Lichtschnittoptik erzeugt. Um einen möglichst dünnen Lichtschnitt zu

erhalten, wurde der Fokus kurz hinter die Aktuatoröffnung verschoben. Die Bildebene hat die Aktuatoröffnung im Zentrum geschnitten und lag symmetrisch zwischen zwei CCD-Kameras (1376 x 1040 Pixel), die einen Winkel von 110° zueinander hatten (Abb. 3). Mit einem Seedinggenerator wurden DEHS-Partikel ($\sim 1\mu\text{m}$) erzeugt und direkt in die Messbox eingeleitet. Das gesamte PIV-System wurde bei 0,1% der Anregefrequenz des Aktuators betrieben und direkt über diese getriggert.

Für die Auswertung der PIV-Messungen wurden die Partikelbilder entzerrt [Tsai 1987] und eine adaptive Kreuzkorrelation bis zu einer Auswertefenstergröße von 32×32 Pixel mit 50% Überlappung durchgeführt. Die Vektorfelder von beiden Kameras wurden über die Kamerapositionen (Tsai-Parameter) zu einem 3C-Vektorfeld miteinander verrechnet.

Die beobachtete Bildebene war $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ groß und es wurde eine räumliche Auflösung von $0,4 \text{ mm}$ je Geschwindigkeitsvektor erreicht. Die Qualität einer PIV-Messung ist stark von einer gleichmäßigen Verteilung des Seedings abhängig. Durch eine Analyse der aufgenommenen Partikelbilder konnte gezeigt werden, dass die Partikel radial in den Aktuator eingesaugt werden und beim Ausblasen eine ausreichende Partikeldichte im Jet vorhanden ist. Damit es bei der Phasenmittlung zu keiner Überschneidung der Phasenwinkel kommt und jeweils eine eindeutige Zuordnung erfolgen kann, musste der zeitliche Versatz (Δt) zwischen einem Doppelbild kleiner als der zeitliche Abstand zum nächsten Phasenpunkt sein.

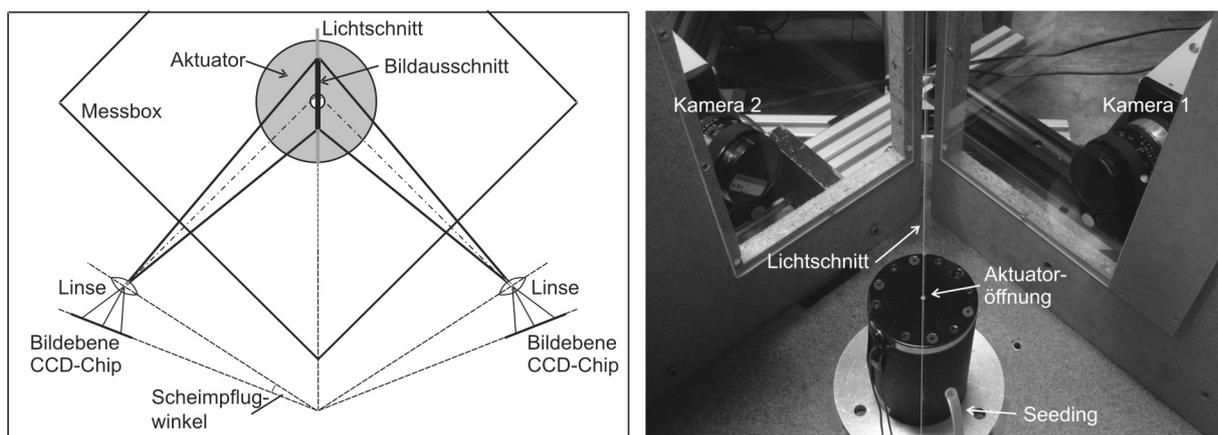


Abb. 3: Stereo-PIV Setup mit Piezo-Aktuator

Ergebnisse und Diskussion

Für jeden Betriebspunkt wurde die zeitlich-räumliche Entwicklung des Jets für einzelne Phasenwinkel über eine gesamte Periode aufgenommen. Durch eine Mittlung der Messdaten gehen jedoch Informationen über instationäre Vorgänge im Luftstrahl verloren.

Die Auswertung der Geschwindigkeitsverteilung (Abb. 4) und der Wirbelstärke (Abb. 5) im Designfall für unterschiedliche Phasenwinkel lässt deutlich die periodisch auftretenden Ringwirbel im wandnahen Bereich erkennen. Unterhalb von $y/d = 8$ sind die einzelnen Wirbel klar voneinander getrennt. Erst ab $y/d = 12$ lassen sich keine einzelnen Wirbelstrukturen mehr erkennen. Die an der Aktuatoröffnung generierten Ringwirbel induzieren ein eigenes Geschwindigkeitsfeld, mit dem sich die Wirbel von der Austrittsöffnung wegbewegen, so dass der Wirbel vom folgenden Einsaugvorgang unbeeinflusst bleibt [Smith et al. 1998]. Beim Einsaugen strömt die Luft daher radial in den Aktuator ein (Abb. 4b). Gut zu erkennen ist außerdem der Staupunkt, welcher sich über der Austrittsöffnung des Aktuators ausbildet und der sich während des Einsaugens von der Wand entfernt. Die mittlere Konvektionsge-

14.4

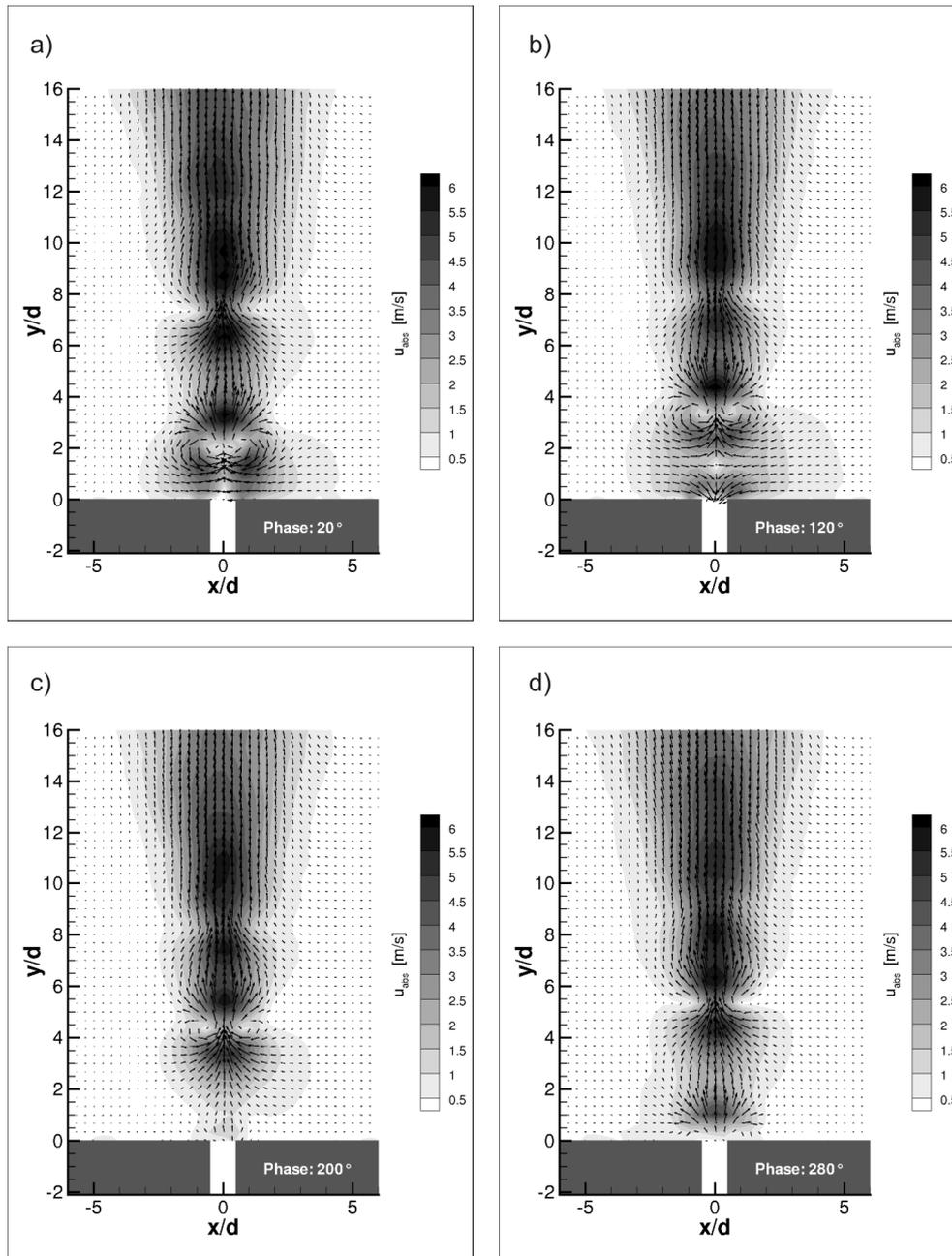


Abb. 4: Phasengemitteltetes Geschwindigkeitsfeld u_{abs} des Synthetic Jets im Designpunkt (DP)

schwindigkeit der Wirbel lässt sich anhand des Wirbelabstandes und der Anregungsfrequenz bestimmen.

Im Designfall beträgt diese $v_{Wirbel} = 14,15$ m/s. Mit wachsendem Wandabstand kommt es zunächst noch nicht zu einem Verschmelzen der Wirbel, jedoch zu einer Abnahme der Wirbelstärke und dem damit verbundenen Anwachsen des Wirbels. Im Bereich von $y/d = 8$ bis $y/d = 12$ lösen sich die Wirbel auf und es bildet sich ein aufgeweiteter Strahl aus (Abb. 6a). Dieses ist gut am Schwankungsanteil des Geschwindigkeitsbetrags $u'_{abs}/u_{abs,max}$ im Strahl zu erkennen (Abb. 6b). In diesem Bereich sind die Schwankungsanteile besonders hoch. Hier vollzieht sich die Transition des Strahls hin zu einem annähernd kontinuierlichen vollturbulenten Jet [Amitay et al. 2005]. Die Strahlaufweitung wird auch in den Geschwindigkeitsprofilen in Abb. 7 deutlich sichtbar. Ab $y/d = 12$ kommt es zu einer starken Strahlaufweitung und zu einer Reduzierung der maximalen Strahlgeschwindigkeit.

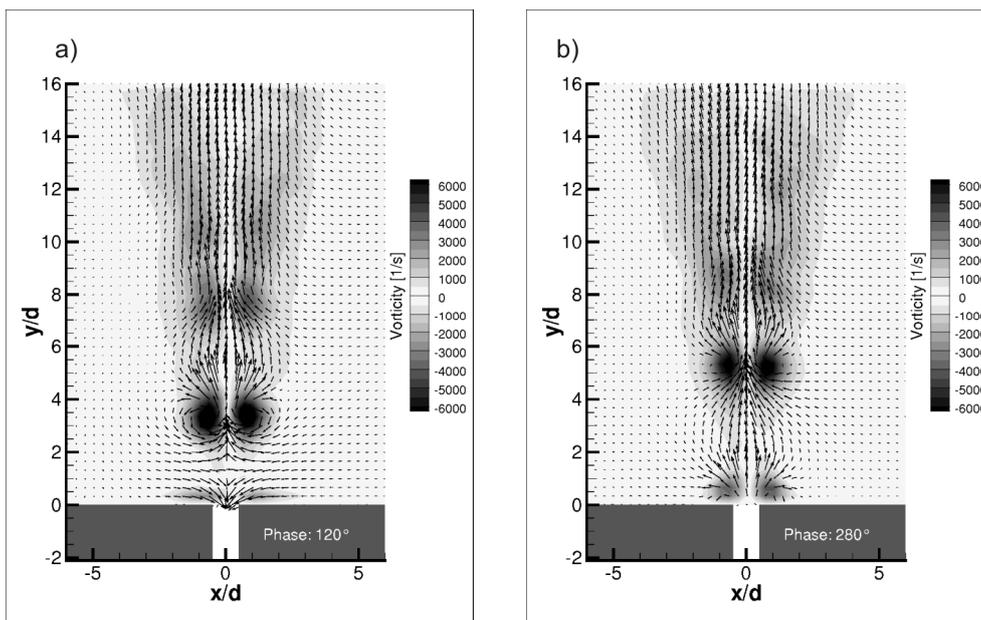


Abb. 5: Wirbelstärke (Vorticity) im Designpunkt (DP) für zwei Phasenwinkel

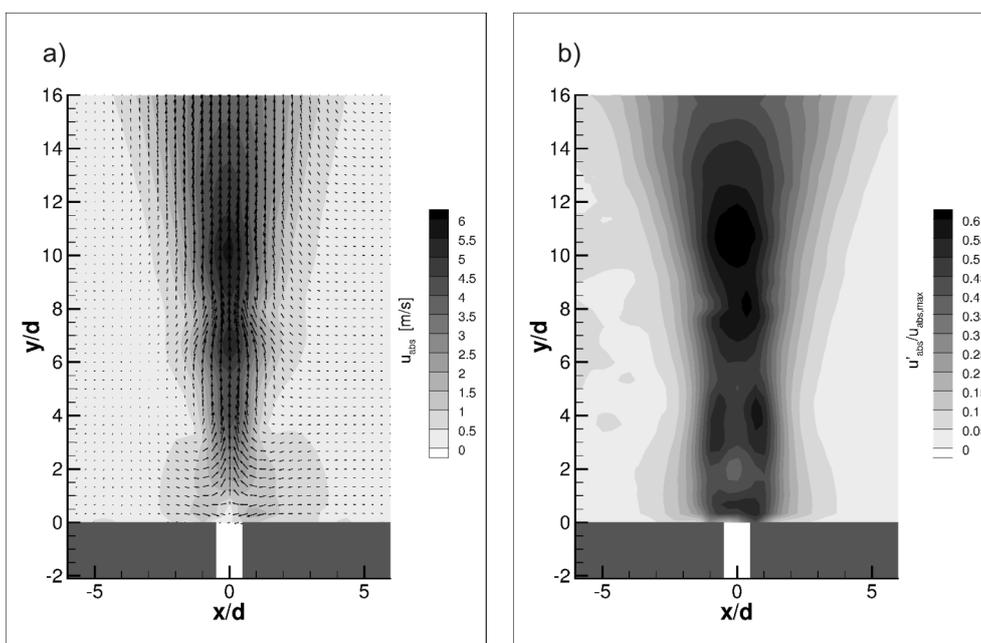


Abb. 6: Mittleres Geschwindigkeitsfeld u_{abs} über eine Periode und normierter Schwankungsanteil $u'_{\text{abs}}/u_{\text{abs,max}}$ im Designpunkt (DP)

Im zweiten Betriebspunkt (AP2) mit geringerer Amplitude zeigt sich im Vergleich zum Designpunkt eine deutliche Reduzierung der Geschwindigkeitsbeträge und der Wirbelstärke (Abb. 8). Auch die Konvektionsgeschwindigkeit mit der sich die Wirbel von der Wand fortbewegen fällt auf $v_{\text{Wirbel}} = 5,9 \text{ m/s}$ ab. Der Abstand der Wirbel zueinander ist deutlich geringer als im Designfall. Dieser Geschwindigkeitsunterschied weist auf das nichtlineare Verhalten des Synthetic Jet Aktuators bezüglich der Anregeparameter hin. Ein ähnlicher Zusammenhang ist durch die Reduzierung der Anrefrequenz (AP3) des Aktuators in Abb. 9 zu erkennen. Die Geschwindigkeitsbeträge und die Wirbelstärke fallen stark ab und die Geschwindigkeiten liegen geringfügig über denen des zweiten Betriebspunkts. Trotz der hohen Anregeamplitude von $U_{\text{pp}} = 90 \text{ V}$ liegt die Konvektionsgeschwindigkeit der Ringwirbel nur bei

14.6

$v_{\text{Wirbel}} = 3,9 \text{ m/s}$ und damit unterhalb der von AP2. Der Grund dafür ist der starke Kopplungsmechanismus zwischen der Piezomembran und dem Helmholtzresonator. Durch eine optimale Abstimmung der Resonanzfrequenz beider Komponenten zueinander lassen sich erhebliche Leistungssteigerungen erzielen. Für den dritten Betriebspunkt wurde gezielt eine Anregungsfrequenz außerhalb der Resonanz gewählt, um diesen Effekt näher zu betrachten. Die Frequenzabhängigkeit des Aktuators wird noch deutlicher, wenn die Anregung der Piezomembran bei Frequenzen oberhalb von $f_p = 2700 \text{ Hz}$ erfolgt (Abb. 2). In diesen Fällen bildet sich kein Jet mehr aus und die Geschwindigkeiten fallen fast bis auf null ab. Auf Grund dieser Tatsache wurden hier keine PIV Messungen vorgenommen.

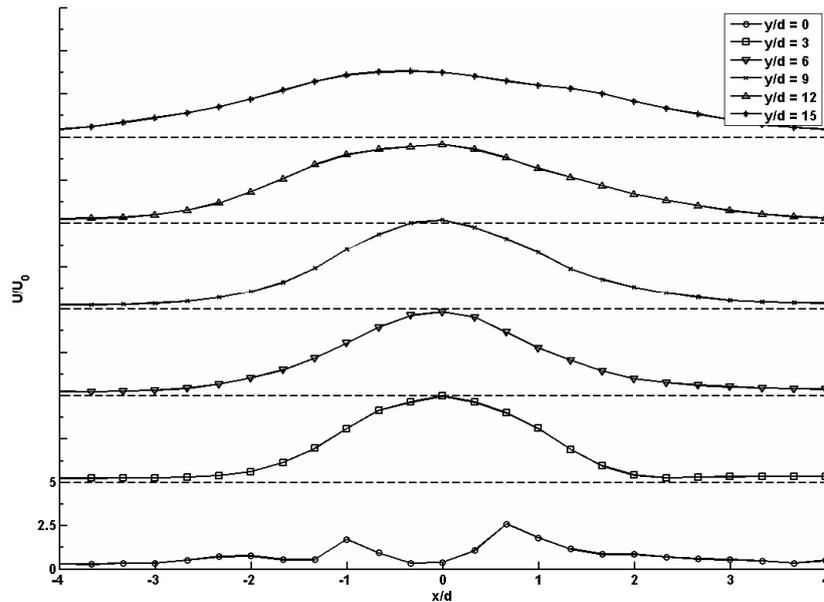


Abb. 7: Geschwindigkeitsprofile für Phasenwinkel 40° im Designfall (DP)

Einen Vergleich der beiden Offdesignfälle kann anhand der benötigten elektrischen Leistung für die Piezomembran erfolgen. Da sich das Piezoelement auf der Membran elektrisch wie ein Kondensator verhält, lässt sich die elektrische Leistung P wie folgt bestimmen:

$$P = \hat{U}^2 \omega C$$

Dabei bezeichnet \hat{U} die Spannungsamplitude, ω die Kreisfrequenz des Steuersignals und C die Kapazität der Piezomembran.

Ein Vergleich der Betriebspunkte AP2 (Index 2) und AP3 (Index 3) ergibt ein Verhältnis von:

$$\frac{P_3}{P_2} = \frac{\hat{U}_3^2 \omega_3}{\hat{U}_2^2 \omega_2} = 2,44$$

Dies zeigt, dass der Aktuator bei vergleichbarer Austrittsgeschwindigkeit im Bereich der Resonanzfrequenz (AP2) fast 2,5-mal weniger Energie benötigt. Ein effizienter Betrieb kann daher nur unter Ausnutzung des Resonanzverhaltes erfolgen.

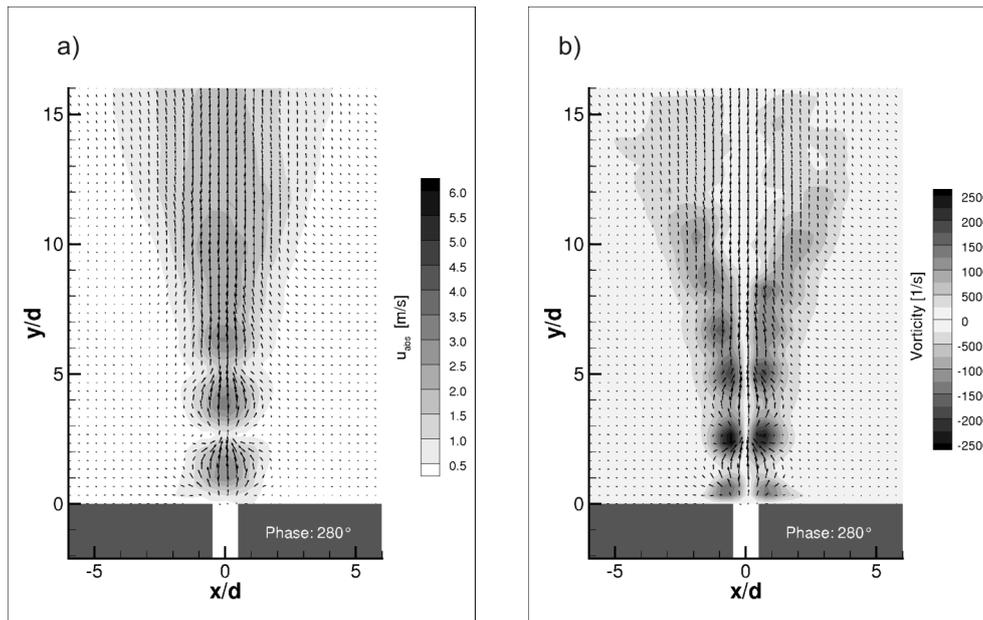


Abb. 8: Betriebspunkt 2 (AP2) bei $f_p = 2,208$ kHz und $U_{pp} = 50$ V

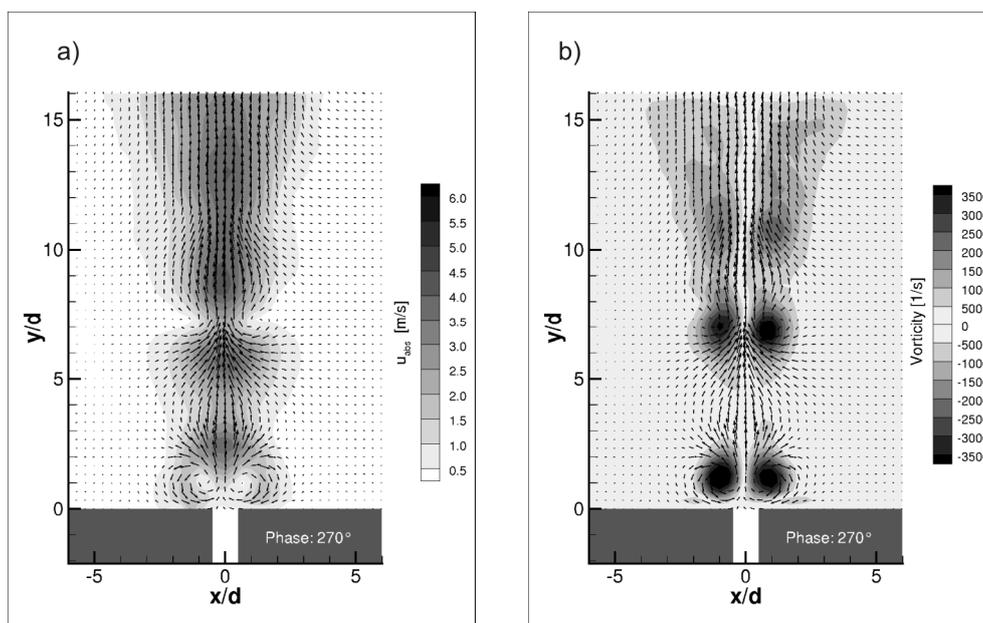


Abb. 9: Betriebspunkt 3 (AP3) bei $f_p = 1,666$ kHz und $U_{pp} = 90$ V

Zusammenfassung

Die Strahlstruktur eines Synthetic Jet Aktuators wurde mit Stereo-PIV untersucht. Über phasengemittelte PIV-Messungen konnte die räumlich-zeitliche Strahlentwicklung eines hochfrequent arbeitenden Synthetic Jet Aktuators erfasst werden. Eine Periode konnte dazu in 16 bis 20 Zeitschritte zerlegt werden. Dabei hat sich bestätigt, dass die Amplitude des Strahls stark von den Anregeparametern abhängig ist und für einen effizienten Betrieb die Kopplung der Resonanzfrequenzen des Helmholtzresonators und der Piezomembran ausgenutzt werden müssen. Die Konvektionsgeschwindigkeit des Ringwirbels über dem Jet ist im Resonanzfall stark abhängig von der Anregeamplitude der Piezomembran und fällt außerhalb der Resonanz deutlich ab. In einem Abstand von $y/d = 8$ bis $y/d = 12$ bildet sich ein vollturbulenter

14.8

Strahl aus, der mit steigendem Wandabstand deutlich an Amplitude verliert und sich aufweitet. Die aus der Untersuchung gewonnen Erkenntnisse gehen in eine weitere Optimierung des Aktuatorkonzepts ein, um dieses in Zukunft zur aktiven Kontrolle von abgelösten Strömungen einzusetzen.

Literatur

Amitay, M. & Cannelle, F., 2005: Transitory Behavior of Synthetic Jets, *ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting and Exhibition June 2005, Houston, TX*

Brunn, A. & Nitsche, W., 2006: Active control of turbulent separated flows over slanted surfaces, *International Journal of Heat and Fluid Flow, Special issue of the 6th International Symposium on Engineering Turbulence Modelling and Measurements - ETMM6*, Vol. 27, pp. 748-755

Darabi, A. & Wygnanski, I., 2004: Active management of naturally separated flow over a solid surface - Part 1: The forced reattachment process, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 510, pp. 105-129

Gad-el-Hak, M., 2000: Flow Control - Passive, Active and Reactive Flow Management, *Cambridge University Press*

Glezer, A. & Amitay, M., 2002: SYNTHETIC JETS, *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 34, pp. 503-529

Gomes, L.; Crowther, W. & Wood, N., 2006: Towards a practical piezoceramic diaphragm based synthetic jet actuator for high subsonic applications - effect of chamber and orifice depth on actuator peak velocity, *3rd AIAA Flow Control Conference, 2006, San Francisco, California*, AIAA Paper 2006-2859

Guo, F. & Zhong, S., 2006: A PIV Investigation of the Characteristics of Micro-scale Synthetic Jets, *3rd AIAA Flow Control Conference 2006, San Francisco, USA*, AIAA 2006-3183

Petz, R. & Nitsche, W., 2007: Active Separation Control on the Flap of a Two-Dimensional Generic High-Lift Configuration, *Journal of Aircraft*, Vol. 44, pp. 865-874

Schaeffler, N.; Hepner, T.E.; Jones, G. & Kegerise, M., 2002: Overview of Active Flow Control Actuator Development at NASA Langley Research Center, *1st AIAA Flow Control Conference*, AIAA Paper 2002-3159

Smith, B.L. & Glezer, A., 1998: The formation and evolution of synthetic jets, *Physics of Fluids*, Vol. 10, No. 9, pp. 2281-2297

Tsai, R., 1987: A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-shelf TV Cameras and Lenses, *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. 3, pp. 323-344