

## **ÖRTLICH UND ZEITLICH HOCH AUFGELOSTE GESCHWINDIGKEITS-, BESCHLEUNIGUNGS- UND KRAFTMESSUNGEN AN PLASMA- UND LORENTZKRAFT-AKTUATOREN**

**M. Neumann, C. Friedrich, T. Albrecht\*, T. Weier\*,  
J. Kriegseis\*\*, S. Grundmann\*\*, J. Czarske**

Technische Universität Dresden  
Professur für Mess- und Prüftechnik  
Helmholtzstraße 18, D-01069, Dresden, Germany  
E-mail: Mathias.Neumann@tu-dresden.de

\* Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf  
PF 51 01 19, D-01314 Dresden, Germany

\*\* Center of Smart Interfaces / Technische Universität Darmstadt  
Petersenstraße 32, D-64287 Darmstadt, Germany

Keywords: Plasma-Aktuator, Lorentzkraft-Aktuator, optische Kraftmessung, zweikomponentiger Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensor

### **Zusammenfassung**

Mittels eines zweikomponentigen Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensors wurde eine hoch aufgelöste Vermessung von Strömungsfeldern durchgeführt, welche von Plasma- bzw. Lorentzkraft-Aktuatoren angetrieben wurden. Für den Einsatz der Aktuatoren zur aktiven Strömungskontrolle ist ein genaues Verständnis der jeweiligen Wirkungsweise erforderlich, was im Fall des Plasma-Aktuators noch nicht komplett vorliegt. Da Plasma-Aktuatoren im Allgemeinen mittels alternierender Hochspannung betrieben werden, ist eine hohe Zeitauflösung des Messsystems ebenso unabdingbar. Die gewonnen Messergebnisse erlauben schließlich die Berechnung der induzierten Kraft und gewähren daher einen tieferen Einblick in das Funktionsprinzip. Es konnte somit ein wertvoller Beitrag zur Beschreibung des zeitlichen Verlaufs der erzeugten Kraft geleistet werden.

### **Einleitung**

Die aktive Strömungsbeeinflussung zur Widerstandsreduktion, Turbulenzdämpfung und Effizienzoptimierung, beispielsweise von Turbomaschinen, gewinnt zunehmend an Bedeutung. Eine Alternative zur mechanischen Strömungsbeeinflussung stellt dabei der Plasma-Aktuator dar, der aufgrund des Verzichts auf bewegliche Bauteile und seinen geringen Platzbedarf gepaart mit einem einfachen Aufbau eine hohe Robustheit bietet. Zudem sollte dessen einfacher Aufbau – lediglich zwei gegeneinander isolierte Elektroden – zukünftig eine günstige Herstellung ermöglichen.

In der letzten Dekade wurden daher intensive Untersuchungen zur Nutzbarkeit von Plasma-Aktuatoren in der Strömungskontrolle durchgeführt (Moreau 2007, Corke et al. 2009). Während des Betriebs in ruhender Luft erzeugt der Plasma-Aktuator eine lokale Volumenkraft, die einen Wandstrahl nahe der Oberfläche antreibt. Dieser Aspekt ist für vielseitige Anwendungen in der Strömungskontrolle interessant. Plasma-Aktuatoren wurden bereits zur aktiven Strömungsbeeinflussung von externen Strömungen, wie beispielsweise zur Ablösekontrolle (Post et al. 2004) und Strömungsumschlagkontrolle (Grundmann et al. 2009), sowie für interne Strömungen, z. B. in Turbomaschinen (Rizzetta et al. 2008) und Diffuser-Strömungen (Grundmann et al. 2011),

eingesetzt. Da die genaue Wirkungsweise von Plasma-Aktuatoren jedoch bis heute noch nicht vollständig verstanden ist und darüber hinaus noch kontroverse Messergebnisse bzgl. der zeitlichen Kraftverläufe vorliegen, besteht noch erheblicher Forschungsbedarf. Die meisten Plasma-Aktuatoren werden mittels alternierender Hochspannung betrieben. Es liegt also nahe zu vermuten, dass sich ebenso ein periodisches Verhalten der induzierten Kraft ausbilden sollte. Aktuelle zeitaufgelöste Strömungsmessungen konnten dies jedoch nicht bestätigen (Benard et al. 2010). Generell existieren derzeit zwei kontroverse Theorien über das Kraftverhalten. Die „push/pull-Theorie“ besagt, dass sich eine alternierende Volumenkraft in Abhängigkeit von der Phasenlage ausbildet (Debien et al. 2012). Dieses Verhalten konnte jedoch nicht in den Experimenten von Enloe et al. 2008 nachgewiesen werden, was wiederum die sogenannte „push/push-Theorie“ unterstützt, die von einer konstanten Krafrichtung während der gesamten Periode ausgeht. Der Zusammenhang zwischen der erzeugten Volumenkraft, dem Strömungsverhalten und der Phasenlage des Treibersignals ist somit ein Aspekt, der besondere Aufmerksamkeit verdient und einen hohen Forschungsbedarf aufweist. Für die Strömungsbeeinflussung in elektrisch schwach leitfähigen Fluiden können alternativ auch Lorentzkraft-Aktuatoren genutzt werden (Weier et al. 2001, Albrecht et al. 2008). Diese basieren auf der Interaktion von magnetischem Feld  $B$  und Stromfluss  $I$ , welcher durch die in der Lösung vorliegenden Ionen ermöglicht wird. Die daraus resultierende Lorentzkraft lässt sich gezielt zur Strömungsbeeinflussung nutzen.

Zur Bestimmung der von den Aktuatoren induzierten Volumenkraft wurden in den letzten Jahren diverse Ansätze verfolgt, sowohl numerisch als auch experimentell. Boeuf et al. 2007 führte dazu numerische Simulationen durch, ohne diese jedoch Referenzexperimenten gegenüber zu stellen. Enloe et al. 2008 schlugen ein Modell für den Plasma-Aktorator vor, welches auf einem zweistufigen mechanischen System beruht, und verfeinerte dies anhand experimenteller Daten. Somit wurde gezeigt, dass während der negativen Halbperiode ein Großteil des Impulses in die Strömung eingebracht wird. Ein weiterer messtechnischer Ansatz sind Kraftwaagen, welche die zeitgemittelte Volumenkraft in Form des erzeugten Schubs auswerten (Thomas et al. 2009, Kriegseis et al. 2011). Obwohl aufgrund der Trägheit des Messsystems jedoch keine zeitaufgelösten Daten gewonnen werden können, dienen derart erzeugte Integralwerte als Referenz zur Validierung des Mittelwerts der zeitaufgelösten Verfahren. Jüngste Versuche basieren auf der Auswertung des zeitaufgelösten, zweidimensionalen Strömungsfeldes welches z. B. mittels Particle-Image-Velocimetry (PIV) vermessen wird (Wilke 2009, Albrecht et al. 2011). Wilke 2009 schlug dazu eine Methode vor, die auf den Navier-Stokes-Gleichungen und der Annahme einer zweidimensionalen Strömung beruht. Des Weiteren wird ein, im Gegensatz zu den induzierten Kräften, vernachlässigbar kleiner Druckgradient angenommen.

In den folgenden Abschnitten wird zunächst das Messsystem für die zeitaufgelösten, zweikomponentigen Strömungsmessungen vorgestellt und der experimentelle Messaufbau dargestellt. Danach wird auf die zur Strömungsbeeinflussung genutzten Aktuatoren eingegangen, gefolgt von kurzer Theorie zur Kraftberechnung. Nach der Präsentation der entsprechend ermittelten Strömungsfelder und ihrer Eigenschaften wird abschließend das Ergebnis der Volumenkraftbestimmung gezeigt.

## **Messsystem & experimenteller Aufbau**

Als Messsystem für die Erfassung des Strömungsfeldes kam ein erweiterter Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilensensor (LDV-PS) zum Einsatz (Neumann et al. 2009).

Um die von den Aktuatoren induzierte Volumenkraft zu bestimmen sind sowohl die wandnormale als auch die wandparallele Strömungsgeschwindigkeit zu erfassen. Zu diesem Zweck wurde ein drittes Streifensystem erzeugt, nun mit konstantem Streifenabstand  $d$  und um  $\alpha =$

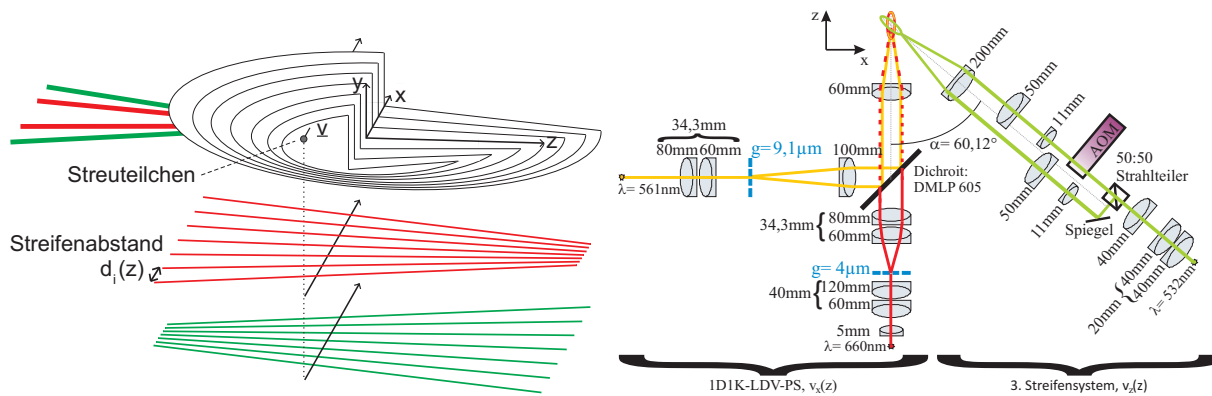


Abb. 1: Links: Zwei überlagerte Streifenoptiken bilden den 1D-LDV-PS zur Ermittlung von  $v_x(z)$ . Rechts: Zur zweikomponentigen Strömungsmessung wird ein drittes Streifenoptikensystem mit Verkipfungswinkel  $\alpha$  überlagert, wodurch der 1D2K-LDV-PS sowohl  $v_x(z)$  als auch  $v_z(z)$  erfasst.

$60,12^\circ$  verkippt gegenüber den ersten beiden Systemen (siehe Abb. 1). Durch den Einsatz eines akustooptischen Modulators (AOM) weist dieses dritte Streifenoptikensystem eine Trägerfrequenz auf, die eine Richtungssinnerkennung ermöglicht. Dieser Aspekt ist von besonderer Bedeutung, da somit die Abhängigkeiten zwischen Richtung und Amplitude der Strömung/Volumenkraft und der Phasenlage des harmonischen Plasma-Aktuator-Treibersignals genauestens untersucht werden können. Aufgrund des Verkipfungswinkels ergibt sich für das tatsächlich nutzbare Messvolumen, welches sich im Schnittbereich aller drei Streifenoptiken ausbildet, eine Ausdehnung in  $z$ -Richtung von ca.  $50 \mu\text{m}$  und ein Durchmesser von ebenfalls etwa  $50 \mu\text{m}$ .

Für die Messungen am Lorentzkraft-Aktuator wurde der Verkipfungswinkel  $\alpha$  auf  $45^\circ$  reduziert, um den geänderten Bedingung aufgrund des Elektrolyts Rechnung zu tragen. Durch Einsatz einer Kupfersulfatlösung ( $\text{CuSO}_4$ ) als Elektrolyt ändert sich der Brechungsindex, wodurch die Ausdehnung des Messvolumens zusätzlich variiert. Das resultierende effektive Messvolumen besitzt daher eine Länge von etwa  $150 \mu\text{m}$  in  $z$ -Richtung und einen Durchmesser von rund  $67 \mu\text{m}$ .

Um die Streulichtsignale von den verschiedenen Streifenoptiken, welche mittels unterschiedlicher Laserwellenlängen erzeugt werden, zu unterscheiden, kommt eine Wellenlängenmultiplex-Technik (WDM-Technik) zur Anwendung. Bei den drei genutzten Wellenlängen handelt es sich um  $\lambda_1 = 532 \text{ nm}$ ,  $\lambda_2 = 561 \text{ nm}$  und  $\lambda_3 = 660 \text{ nm}$ . Sowohl für die Überlagerung der Laserstrahlen als auch für die Auftrennung des Streulichts wurden dichroitische Spiegel genutzt.

Eine Prinzipskizze beider Experimente ist in Abb. 2 dargestellt. Zur Vermessung des Geschwindigkeitsfeldes wurden die Aktuatoren jeweils auf zwei Verfahrtischen befestigt, sodass sie relativ zum Messsystem traversiert werden konnten. Zur Vermessung der Strömung über dem Plasma-Aktuator wurde der gesamte Aufbau in einem geschlossenen Behältnis verstaut, welches über einen optischen Zugang sowie Ein- und Auslassventile zur Seedingzu- bzw. -abfuhr verfügt. Der Lorentzkraft-Aktuator wurde analog in der Elektrolytlösung versenkt, welche sich in einem Glasgefäß befand. Auch bei diesem Experiment wurde der optische Aufbau vor dem Gefäß positioniert um das Strömungsfeld zu erfassen.

Eine Seitwärtsdetektion wurde genutzt, um den Einfluss der Wandreflexe weitestgehend zu unterdrücken und gleichzeitig Messungen mit möglichst geringem Abstand zum Aktuator durchzuführen. Die Datenerfassung und Auswertung fand abschließend mittels Messrechner statt, der über Analog/Digital-Wandlerkarten (je 4 Kanäle, 16-bit, 200 MS/s, 125 MHz Bandbrei-

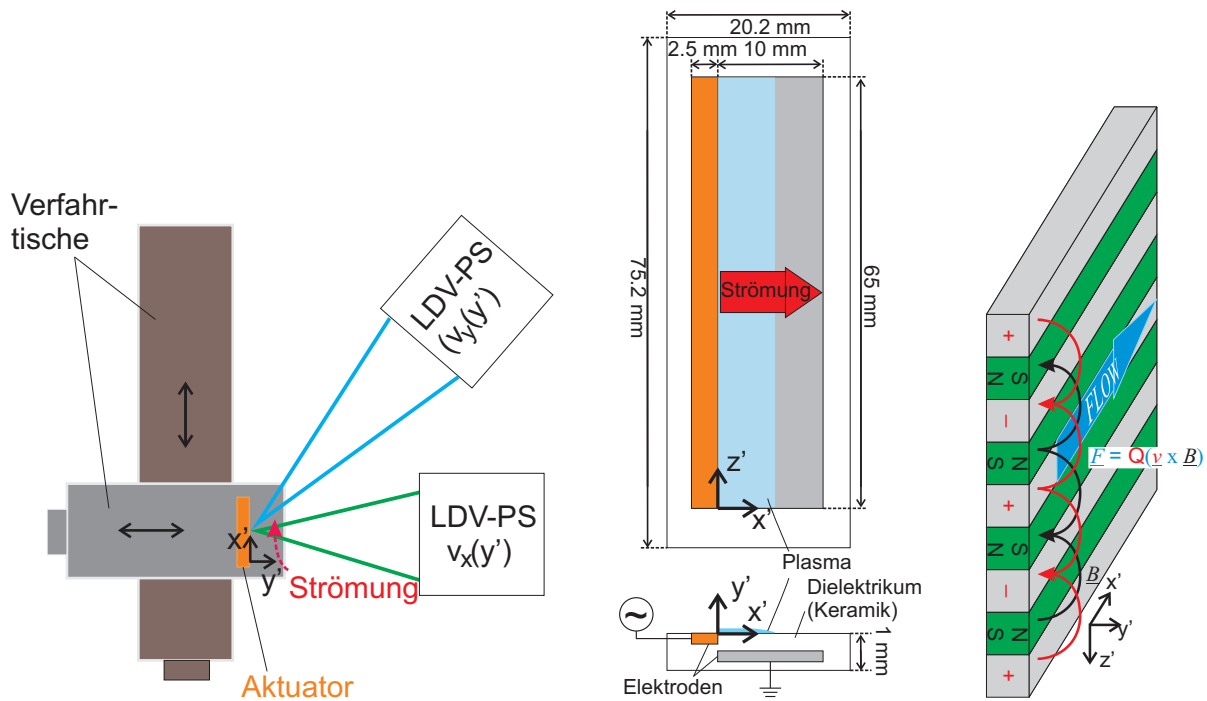


Abb. 2: Links: Experimenteller Aufbau zur Strömungsvermessung. Mitte: Seitenansicht (unten) und Draufsicht (oben) des DBD Plasma-Aktuators. Rechts: Prinzipieller Aufbau des Lorentzkraft-Aktuators.

te, 1 GS Speichertiefe) sowohl die von den Avalanche-Photodetektoren (APDs) umgewandelten Streulichtsignale als auch die Treibersignale des Aktuators digitalisierte. Dieses Vorgehen ermöglichte phasenaufgelöste Messungen mit einer hohen zeitlichen Auflösung.

## Aktuatoren

Strömungsmessungen wurden an zwei Konfigurationen vorgenommen: einerseits die Luftströmung über einem Plasma-Aktuator, andererseits die Strömung in einer Kupfersulfatlösung, hervorgerufen von einem Lorentzkraftakt-Aktuator.

### DBD Plasma-Aktuator

Der verwendete Plasma-Aktuator ist aus Keramik nach dem LTCC (low temperature co-fired ceramics) Verfahren hergestellt. Die obere, an der Luft befindliche Elektrode ist 2,5 mm breit, die untere 10 mm. Beide Aluminiumelektroden haben eine Dicke von ca. 50  $\mu\text{m}$  und wurden ohne Abstand in  $x'$ -Richtung in die Keramik eingebracht, wie aus Abb. 2-Mitte zu erkennen ist. Um eine zweidimensionale Strömung sicher zu stellen erstrecken sich die Elektroden 65 mm in  $z'$ -Richtung, sodass ein homogener Antrieb der Strömung gewährleistet ist. Das keramische Dielektrikum umgibt die gesamte untere Elektrode mit Ausnahme einer kleinen Kontaktfläche an der Unterseite. Der Herstellungsprozess und die verwendeten Materialien tragen zu einem sehr widerstandsfähigen und robusten Aktuator bei, wodurch auch mehrwöchige Experimente möglich sind. Während der mehrtägigen Messungen konnte keine signifikante Änderung der Betriebsparameter festgestellt werden, was die Erwartungen bestätigte. Dies ist ein großer Fortschritt gegenüber konventionellen Aktuatoren, die als Dielektrikum Kapton-Tape verwenden. Perspektivisch lassen sich mit den neuartigen Keramik-Aktuatoren somit auch Anwendungen bei rauen Umgebungsbedingungen, wie beispielsweise in Turbomaschinen, erschließen.

Der verwendete Plasma-Aktuator wird mit einem harmonischen Hochspannungssignal ( $U_{pp} = 8 \text{ kV}$ ) bei einer Frequenz von 9,5 kHz betrieben. Das erzeugte kalte Plasma erstreckt sich im Betrieb über einen Bereich von etwa  $x' = 0 \dots 5 \text{ mm}$  und weist eine Höhe von ca. 0,4 mm in  $y'$ -Richtung auf.

### Lorentzkraft-Aktuator

Der eingesetzte Lorentzkraft-Aktuator (Abb. 2-rechts) besteht aus alternierend angeordneten Elektroden und Permanentmagneten, welche in ein Plexiglas-Trägermedium eingelassen sind. Eine Lorentzkraft  $F$  entsteht durch Interaktion von magnetischem Feld  $B$  und Stromfluss  $I$ , ermöglicht von freien Ionen  $Q$  in der Lösung. Der Aktuator wird mit einem kontinuierlichen Strom betrieben, dessen Amplitude bei den Experimenten auf  $I = 4,8 \text{ mA}$  eingestellt wurde.

### Seedingpartikel

Aufgrund der hohen Betriebsfrequenz des Plasma-Aktuators müssen die zur optischen Strömungsvermessung nötigen Partikel sorgfältig ausgewählt werden. Es muss sichergestellt werden, dass die Partikel der Strömung ausreichend gut folgen, also mit möglichst geringem Schlupf. Aus diesem Grund wurden polydisperse Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat (DEHS) Partikel eingesetzt, die einen mittleren Durchmesser von  $0,85 \mu\text{m}$  aufweisen. Entsprechend Albrecht et al. 2003 weisen diese Partikel eine Relaxationszeit von  $\tau = 2,4 \mu\text{s}$  bei einer Temperatur von  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  auf. Somit ergibt sich die charakteristische Grenzfrequenz  $f_c = 9.5 \text{ kHz}$ , jene Frequenz also, bis zu der Partikel Strömungsszillationen mit weniger als 1 % Schlupf folgen können. Dieser Wert entspricht auch der Treiberfrequenz des Plasma-Aktuators, wodurch die Seedingpartikel das Verhalten der Strömung und auch die lokal auftretenden Schwankungen dieser sehr gut abbilden sollten.

Bei den Strömungsmessungen des Lorentzkraft-Aktuators in der  $\text{CuSO}_4$ -Lösung wurde silberbeschichtete Glashohlkugeln mit einem mittleren Durchmesser von  $10 \mu\text{m}$  genutzt.

### Volumenkraftbestimmung

Die von den Aktuatoren hervorgerufene Strömung kann als zweidimensional und laminar in der Nähe der Aktuatoroberfläche angenommen werden, was durch die Bauform der Aktuatoren sichergestellt wird. Somit müssen nur die wandnormale Komponente  $v_{y'}$  und die wandparallele Komponente  $v_{x'}$  berücksichtigt werden. Zur Bestimmung der Kraft wurde die Methode von Wilke 2009 genutzt. Diese geht davon aus, dass die absolute Kraftdichte  $f_i$  wesentlich größer als der entsprechende Druckgradient ist ( $|f_i| \gg \partial p / \partial x_i$ ). Aus diesem Grund kann letztgenannter vernachlässigt werden und die Kraftdichten ergeben sich folglich zu

$$\begin{aligned} f_{x'} &= \rho \left( \frac{\partial v_{x'}}{\partial t} + v_{x'} \frac{\partial v_{x'}}{\partial x'} + v_{y'} \frac{\partial v_{x'}}{\partial y'} \right) - \eta \left( \frac{\partial^2 v_{x'}}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 v_{x'}}{\partial y'^2} \right) \\ f_{y'} &= \rho \left( \frac{\partial v_{y'}}{\partial t} + v_{x'} \frac{\partial v_{y'}}{\partial x'} + v_{y'} \frac{\partial v_{y'}}{\partial y'} \right) - \eta \left( \frac{\partial^2 v_{y'}}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 v_{y'}}{\partial y'^2} \right), \end{aligned} \quad (0.1)$$

mit den Volumenkraftdichten in Hauptströmungs- bzw. wandnormaler Richtung  $f_x$  und  $f_y$ , der Dichte des Fluids  $\rho$  und der Viskosität  $\eta$ . Die Beschleunigung wird dabei aus den Geschwindigkeitsveränderungen über der Zeit (zu verschiedenen Phasenlagen) ermittelt. Schließlich wird nach dem Verfahren von Wilke 2009 die Volumenkraft durch die Integration der Kraftdichten

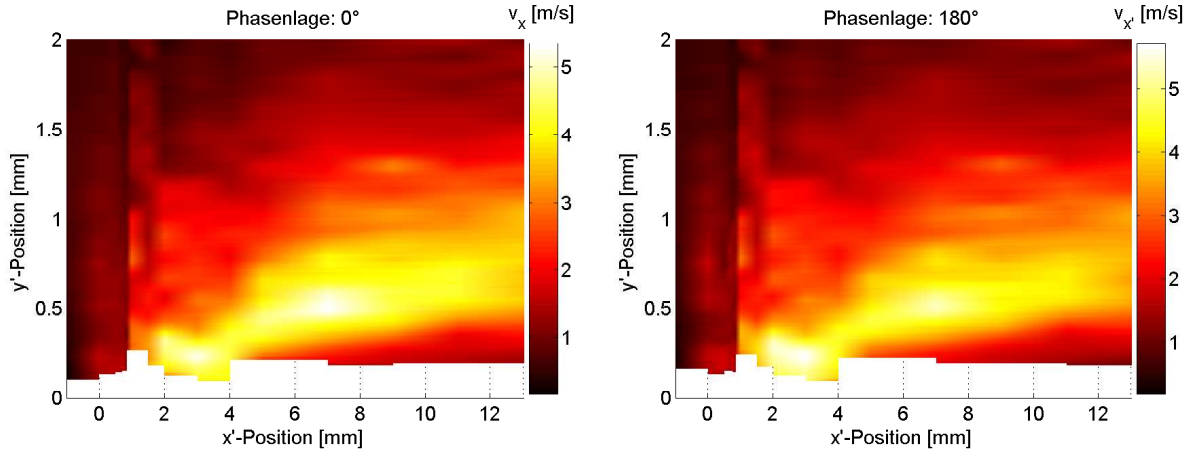


Abb. 3:  $v_{x'}$ -Komponente des Strömungsfeldes bei den Phasenlagen  $0^\circ \pm 30^\circ$  (links) und  $180^\circ \pm 30^\circ$  (rechts).

wie folgt bestimmt

$$F_{x'} = \iint_A f_{x'} dA \quad \text{und} \quad F_{y'} = \iint_A f_{y'} dA. \quad (0.2)$$

### Messergebnisse

Zunächst wurden Messungen am Plasma-Aktuator an diversen  $x'$ -Positionen entlang des Aktuators durchgeführt (für den Koordinatenbezug siehe Abb. 2-Mitte). Um die jeweiligen Strömungsprofile komplett zu erfassen wurde der Aktuator in  $y'$ -Richtung traversiert, wobei auf eine 50 %-ige Überlappung je Traversierschritt geachtet wurde. Alle Messungen wurden an einer zentralen  $z'$ -Position durchgeführt, sodass die Annahme über eine zweidimensionale Strömung gerechtfertigt ist und Grenzeffekte vernachlässigt werden können. Durch die simultane Erfassung der Phasenlage des Treibersignals ist eine zeitaufgelöste Vermessung des Strömungsverhaltens möglich. Bei der Datenauswertung wurden jeweils  $60^\circ$ -Phasenslots angewendet, die mit ebenfalls 50 %-iger Überlappung ausgewertet wurden. Die örtliche Auflösung betrug, bedingt durch eine örtliche Slot-Technik,  $10 \mu\text{m}$  in  $y'$ -Richtung. Abbildung 3 stellt das sich ausbildende Strömungsfeld zu zwei exemplarischen Phasenlagen dar. Neben dem Wandstrahl ist auch eine starke Schwankung der Strömungsgeschwindigkeit während einer Periode deutlich zu erkennen (vgl. Abb. 3 links und rechts). Diese Geschwindigkeitsschwankung tritt insbesondere im Bereich  $5 \text{ mm} \leq x' \leq 10 \text{ mm}$  deutlich hervor. Da der Wandstrahl ausschließlich durch das Plasma hervorgerufen wird, deuten diese Schwankungen bereits auf ein periodisches Verhalten der erzeugten Volumenkraft hin.

Die Messergebnisse für die  $v_{y'}$ -Komponente, dargestellt in Abb. 4, zeigen den Ansaugeffekt, der auf die Luft über dem Aktuator wirkt und diese in Richtung Plasma zieht. Erneut ist die zeitliche Schwankung der Geschwindigkeit erkennbar, welche sich vor allem in dem Bereich hinter  $x' = 5 \text{ mm}$  zeigt. Dies weist abermals auf eine periodische Schwankung der erzeugten Volumenkraft hin. Aus den zeitaufgelösten, zweidimensionalen Strömungsfeldern wurden nun induzierte Kraftdichten berechnet (nach Wilke, 2009) und die Volumenkraft integriert (Gl. (0.2)). Der resultierende zeitliche Verlauf der Volumenkraft in  $x'$ -Richtung ist in Abb. 5-links dargestellt. Das Ergebnis zeigt eindeutig den fluktuierenden Verlauf der Volumenkraft während einer Periode, wobei ebenfalls negative Amplituden auftreten. Der höchste Wert der Kraft in  $x'$ -Richtung

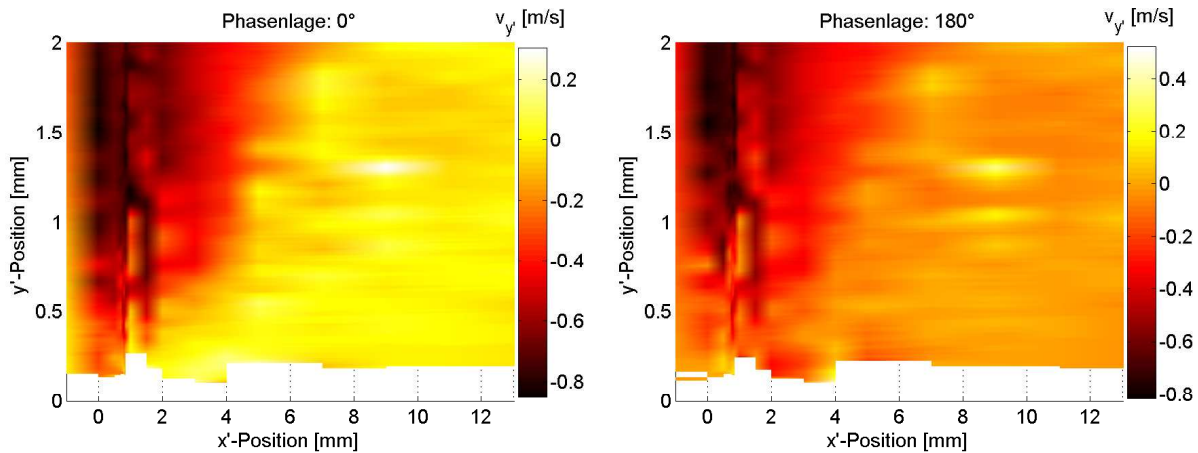


Abb. 4:  $v_{y'}$ -Komponente des Strömungsfeldes bei den Phasenlagen  $0^\circ \pm 30^\circ$  (links) und  $180^\circ \pm 30^\circ$  (rechts).

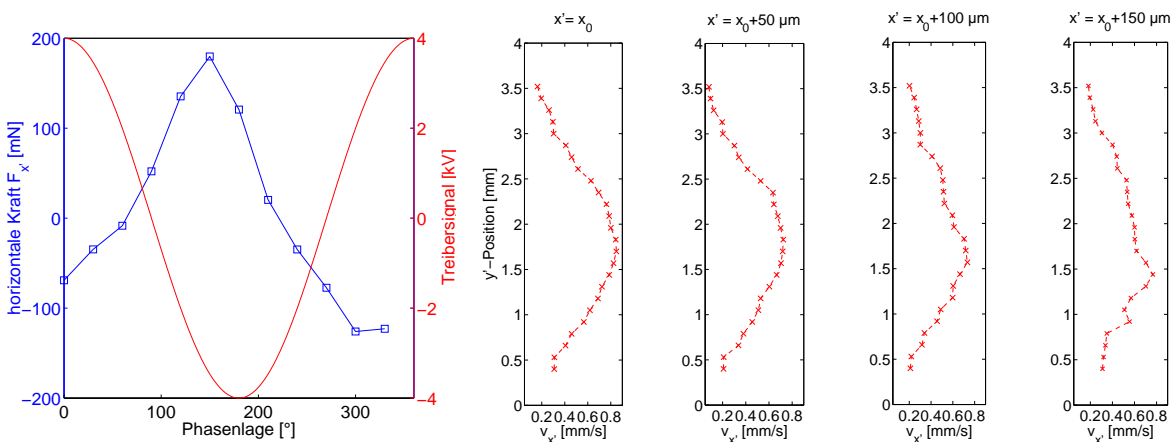


Abb. 5: Zeitaufgelöster Kraftverlauf  $F_{x'}$  in Abhängigkeit von der Phasenlage für den Plasma-Aktuator (links) und 4 Strömungsprofile am Lorentzkraft-Aktuator (rechts).

$F_{x'}$  wird etwa bei  $180^\circ$  Phasenlage erreicht. Obwohl auch eine negative Kraft  $F_{x'}$  während der zweiten Halbperiode zu verzeichnen ist, ist deren Betrag wesentlich geringer als der positive Kraftanteil. Aus diesem Grund ergibt sich im Mittel eine positive Volumenkraft mit einem Wert von  $F_{x',\text{mean}} = 43 \text{ mN/m}$ . Dieses Ergebnis bestätigt die bereits aus den gezeigten Strömungsfeldern erkennbare Tendenz zur „push/pull-Theorie“.

Die ersten gewonnenen Strömungsprofile an einer zentralen  $x'$ -Position des Lorentzkraft-Aktuators mit jeweils  $50 \mu\text{m}$  Abstand in  $x'$ -Richtung sind in Abb. 5-rechts zu sehen.

### Zusammenfassung und Ausblick

Die Messergebnisse zur Volumenkraft zeigen deutlich das Vorhandensein einer alternierenden Richtung der vom Aktuator induzierten Kraft während verschiedener Phasenlagen des Treiber-signals. Somit konnte für die untersuchte Aktuatorgeometrie eindeutig gezeigt werden, dass die sogenannte „push/pull-Theorie“ zutreffend ist. Nach unserer Kenntnis konnte dieses Verhalten erstmalig bei einem Aktuator mit derartig hoher Anregungsfrequenz von fast  $10 \text{ kHz}$  ausgewertet werden. Somit wurde ein tieferer Einblick in das Funktionsprinzip des Plasma-Aktuators

erreicht.

Da das Funktionsprinzip dieses Aktuators, im Gegensatz zum Plasma-Aktuator, komplett verstanden ist, lässt sich anhand der Ergebnisse eine Rückführung auf die SI-Einheiten durchführen. Somit wird eine Validierung der gewonnen Messdaten möglich, was im Falle der Plasma-Aktuatoren derzeit nur bedingt und mit Hilfe von zeitgemittelten Vergleichsmessungen möglich ist.

## Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die Unterstützung der Forschungsarbeiten durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (SFB-609, EXC 259).

## Literaturverzeichnis

- Albrecht, H.-E., Borys, M., Damaschke, N., Tropea, C., 2003, "Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques", Springer
- Albrecht, T., Metzkes, H., Grundmann, R., Mutschke, G., Gerbeth, G., 2008, "Tollmien-Schlichting wave damping by a streamwise oscillating Lorentz force", *Magnetohydrodynamics*, Vol. 44, pp. 205-222
- Albrecht, T., Weier, T., Gerbeth, G., Metzkes, H., Stiller, J., 2011, "A method to estimate the planar, instantaneous body force distribution from velocity field measurements", *Phys. Fluids*, Vol. 23, 021702
- Benard, N., Moreau, E., 2010: "Capabilities of the dielectric barrier discharge plasma actuator for multi-frequency excitations", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 43, 145201
- Boeuf, J., Lagmich, Y., Unfer, T., Callegari, T., Pitchford, L., 2007, "Electrohydrodynamic force in dielectric barrier discharge plasma actuators", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 40, pp. 652-662
- Corke T., Post, M., Orlov, D., 2009: "Single dielectric barrier discharge plasma enhanced aerodynamics: physics, modeling and applications", *Exp. Fluids*, Vol. 46, pp. 1-26
- Debien, A., Benard, N., David, L., Moreau, E., 2012: "Unsteady aspects of the electrohydrodynamic force produced by surface dielectric barrier discharge actuators", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 100, 013901
- Enloe, C., McHarg, M., McLaughlin, T., 2008: "Time-correlated force production measurements of the dielectric barrier discharge plasma aerodynamic actuator", *J. Appl. Phys.*, Vol. 103, 073302
- Grundmann, S., Tropea, C., 2009: "Experimental damping of boundary-layer oscillations using DBD plasma actuators", *Int. J. Heat Fluid Fl.*, Vol. 30, pp. 394-402
- Grundmann, S., Sayles, E., Eaton, J., 2011: "Sensitivity of an Asymmetric 3D Diffuser to Plasma-Actuator Induced Inlet Condition Perturbations", *Exp. Fluids*, Vol. 50, pp. 1-15
- Kriegseis, J., Grundmann, S., Tropea, C., 2011, "Power Consumption, Discharge Capacitance and Light Emission as Measures for Thrust Production of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators", *J. Appl. Phys.*, Vol. 110, 013305
- Moreau E., 2007: "Airflow control by non-thermal plasma actuators", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 40, pp. 605-636
- Neumann, M., Shirai, K., Büttner, L., Czarske, J., 2009, "Two-point correlation estimation of turbulent shear flows using a novel laser Doppler velocity profile sensor", *Flow Meas. Instr.*, Vol. 20, pp. 252-263
- Post M. L., Corke, T. C., 2004: "Separation Control on High Angle of Attack Airfoil using Plasma Actuators", *AIAA J.*, Vol. 42, pp. 2177 - 2184
- Rizzetta, D., Visbal, M., 2008: "Plasma-based flow-control strategies for transitional highly loaded low-pressure turbines", *J. Fluids Eng.*, Vol. 130, 041104
- Thomas, F., Corke, T., Iqbal, M., Kozlov, A., Schatzman, D., 2009, "Optimization of dielectric barrier discharge plasma actuators for active aerodynamic flow control", *AIAA J.*, Vol. 47, pp. 2169-2178
- Weier, T., Fey, U., Gerbeth, G., Mutschke, G., Lielausis, O., Platacis, E., 2001, "Boundary layer control by means of wall parallel Lorentz forces", *Magnetohydrodynamics*, Vol. 37, pp. 177-186
- Wilke, B., 2009, "Aerodynamische Strömungssteuerung mittels dielektrischen Barriereentladung-Plasmaaktuatoren", Dissertation, Technische Universität Darmstadt, DLR Göttingen