

LDV-Profil-Sensor Messungen und ergänzende planare PIV Experimente zur Untersuchung von Spaltströmungen

LDV-Profile-Sensor Measurements and Complementary Planar PIV Experiments for Gap-Flow Investigations

Jochen Kriegseis

Institute für Strömungsmechanik (ISTM), Karlsruher Institut für Technologie (KIT),
Karlsruhe, Deutschland

Philipp Mattern

Fachgebiet für Strömungsmaschinen (FSM), Karlsruher Institut für Technologie (KIT),
Karlsruhe, Deutschland

Michael Dues

Intelligent Laser Applications Research and Development (ILA R&D) GmbH, Jülich, Deutschland

Schlagworte: PIV, LDV-PS, Spaltströmung, phasenaufgelöste Messungen

Key words: PIV, LDV-PS, gap flow, phase-resolved measurements

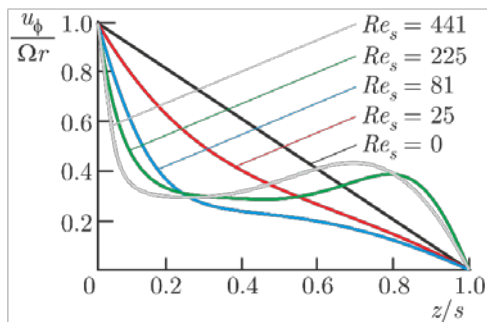
Zusammenfassung

Viele technische Anwendungen sind durch Strömungen zwischen zwei parallelen Wänden gekennzeichnet, die sich mit einer Winkelgeschwindigkeit um dieselbe Achse drehen und durch einen schmalen Spalt getrennt sind. Für den Fall sehr geringer Spalthöhen $s < 1$ mm kommen übliche Messtechniken bzw. -methoden an ihre Grenzen, sodass nur bedingt belastbare Geschwindigkeitsinformation erfasst wird. Strukturierte Oberflächen erschweren die Experimente zusätzlich. Um die Anforderung eines großen Betrachtungsbereichs der parallelen Ebenen in Verbindung mit einer äußerst genauen axialen Auflösung der Geschwindigkeitsprofile senkrecht zur Oberfläche zu garantieren, wird die Kombination eines planaren PIV Systems mit dem neuartigen LDV Profilsensor (LDV-PS) getestet. Hierfür wird ein Vergleich zwischen glatten und strukturierten Plattenoberflächen in einer Rotor-Stator Konfiguration bei unterschiedlichen Spalthöhen und entsprechenden Reynoldszahlen durchgeführt.

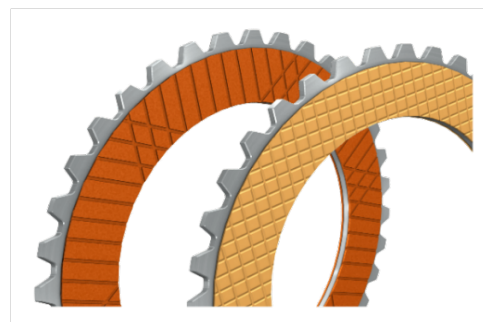
Einleitung

Spaltströmungen zwischen zwei parallelen Wänden mit geringem Abstand sind in einer Vielzahl technischer Anwendungen zu finden. Häufig drehen sich hierbei zwei Gegenstände mit einer Winkelgeschwindigkeit um dieselbe Achse und sind durch einen schmalen Spalt getrennt. Die dadurch entstehende Spaltströmung dient entweder zur Optimierung des Wärmeübergangs zwischen festem und strömendem Medium, oder um die Übertragung des Drehmoments zwischen den Platten zu beeinflussen. In Turbomaschinen beispielsweise strömt im Bereich der Nabe ein Kühlmassenstrom durch den axialen Spalt zwischen Rotor und Stator. Bis heute sind solche Konfigurationen Gegenstand der Forschung, um beispielsweise ein ganzheitliches Verständnis des Wärmeflusses zwischen Oberflächen und Strömung in derartigen Spaltströmungen zu erlangen (siehe z.B. Owen, 1988, Owen und Rogers, 1989, Gran und MacGregor, 1995, und Poncet et al., 2005).

Abbildung 1(a) zeigt die charakteristische Umfangsgeschwindigkeit u_ϕ entlang des Spalts z , normiert mit der lokalen Plattengeschwindigkeit Ωr und der Spalthöhe s . Diese Kombination von charakteristischen Größen wird in der Tribologie verwendet, um die Reynoldszahl des Problems entsprechend $Re_t = \Omega r s / \nu$ zu definieren (siehe z.B. Tauvirrahman et al., 2013, oder Gropper et al., 2016). Des Weiteren wurde in Abbildung 1(a) bereits die sogenannten Spalt-Reynoldszahl $Re_s = \Omega s^2 / \nu$ eingeführt, die als Scharparameter im Diagramm enthalten ist. Mit der sog. Rotations-Reynoldszahl $Re_\phi = \Omega R^2 / \nu$ wird eine dritte charakteristische Kennzahl definiert, die lediglich vom äußeren Radius R des Rotors als Längenmaß abhängt (siehe Lance und Rogers, 1962).



(a) Normiertes Spaltprofil der Umfangsgeschwindigkeit $u_\phi(z)$ für verschiedene Spalt-Reynoldszahlen Re_s (entsprechend Lance und Rogers, 1962).



(b) Verschiedene Lamellennutbilder nass laufender Kupplungen: Gruppenparallelnut ■ und Waffelnut ■ (Quelle: www.ortlinghaus.com, copyright © 2016 Ortlinghaus-Werke GmbH, reproduziert mit Genehmigung)

Abb. 1: Typische Rotor-Stator-Konfigurationen: (a) Wandnormale Profile der Umfangsgeschwindigkeit $u_\phi(z)$ für glatte Oberflächen und (b) Beispiele verschiedener Nutbilder.

Neben der klassischen Rotor-Stator-Strömung ist auch die Umströmung gemeinsam rotierender Scheiben von großem Interesse, wo z.B. die Kühleffizienz von Festplatten o.Ä. direkt vom Zusammenspiel der einzelnen Scheiben untereinander oder mit dem Gehäuse zusammenhängt (siehe Tzeng und Humphrey, 1991, Shirai et al., 2011, und Tsai et al., 2007).

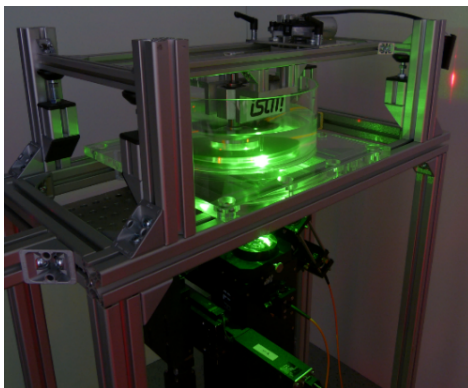
Bei geöffneten Kupplungen z.B. ist das relevante Phänomen die Übertragung eines Drehmoments durch die Spaltströmung. Im Vergleich zu Turbomaschinen sind derartige Rotor-Stator-Konfigurationen durch ein extrem kleines Spaltverhältnis $G = s/R$ von der Größenordnung $10^{-3} - 10^{-2}$ gekennzeichnet, wobei R der Scheibenradius ist. Im Speziellen ist bei geöffneter Kupplung ein möglichst niedriges Schleppmoment erstrebenswert. Daher ist sowohl grundlegendes Verständnis als auch die Optimierung des Schmierfilms zwischen den beiden Reibpartner Gegenstand zahlreicher Forschungs- und Entwicklungsbemühungen. Als Ergebnis haben sich über die Jahre einige komplexe Nutbilder als geeignet herausgestellt (siehe Abb 1(b)), die eine Reduzierung des Schleppmoments bewirken (siehe Razzaque und Kato, 1999, Misimer und Johnson, 1982, oder Takagi et al., 2011).

Trotz all dieser vielversprechenden Untersuchungen sind die Skalierungsgesetze bei derart dünnen Spaltströmungen $G \ll 1$ mit rauen Oberflächen noch immer nicht vollständig verstanden. Da außerdem numerische Simulationen für derartige Rotor-Stator-Systeme wegen der Komplexität der (Nut-)Geometrien stark limitiert sind, erscheinen experimentelle Referenzdaten für einen zuverlässigen Verifikation-/Validierung-Prozess als äußerst wichtig.

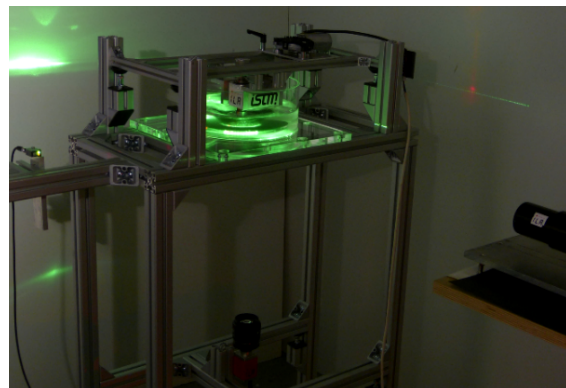
Im Fall großer Spalthöhen (Größenordnung Zentimeter) und moderaten Spaltverhältnissen $G > 1$ führten zahlreiche experimentelle Versuche bereits zu wertvollen Ergebnissen (siehe z.B. Poncet et al., 2005, Tsai et al., 2007, Wu, 2009, und Tzeng und Humphrey, 1991). Im Gegensatz dazu existieren für Spalthöhen unterhalb des Millimeterbereichs mit mittleren und kleinen Spaltverhältnissen nur sehr wenige experimentelle Daten. Einige wenige Ergebnisse konnten bereits von Lee und Nishino, 2011, und Tang et al., 2015, auf der Basis von μ PIV Messungen veröffentlicht werden. Diese Studien sind jedoch dadurch limitiert, dass das Messvolumen systembedingt in allen Richtungen unterhalb des Millimeterbereichs liegt.

Motivation und Zielsetzung

Um die Anforderungen eines großen Messbereichs in der spaltparallelen Ebene mit einer sehr hohen axialen Auflösung des Geschwindigkeitsprofils senkrecht zur Oberfläche zu verbinden, wird in der vorliegenden Arbeit die Kombination eines üblichen planaren PIV Systems mit dem neuartigen LDV Profil Sensor (LDV-PS) getestet. In Speziellen wird ein Vergleich zwischen glatten und strukturierten Plattenoberflächen in einer Rotor-Stator Konfiguration für Spaltverhältnisse $G < 10^{-2}$ mit entsprechend zugehöriger Spalt-Reynoldszahl $Re_s < 20$ durchgeführt. Alle Experimente wurden in einem speziell angefertigten Versuchsstand durchgeführt (siehe Abb. 2), in dem Scheiben mit einem Radius von $R = 75$ mm in Bereich von $0.5 \text{ Hz} < \Omega < 10 \text{ Hz}$ drehen gedreht werden können.



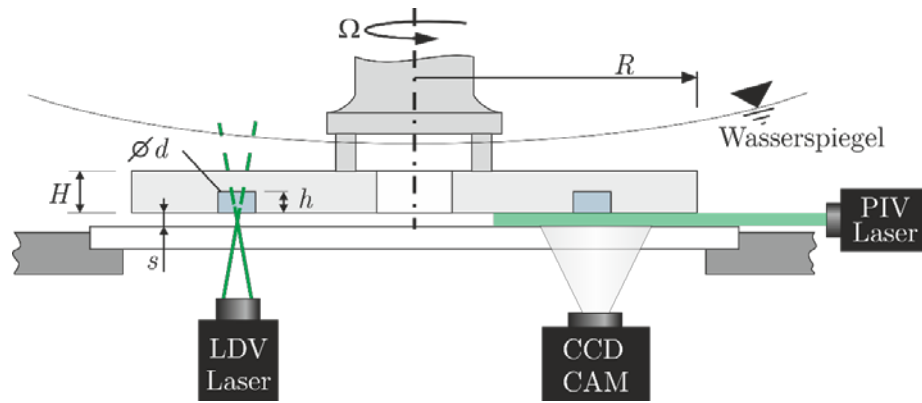
(a) LDV-Setup



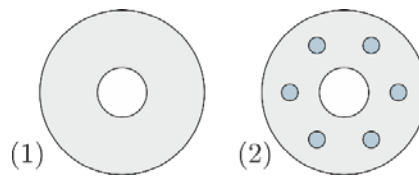
(b) PIV-Setup

Abb. 2: Versuchsstand und Messaufbau: (a) LDV-Profil Sensor, optischer Zugang durch Glasboden ($\lambda/10$ Glasplatte); (b) PIV, optischer Zugang von Laser bzw, Kamera durch die Seitenwand (Plexiglas) und Glasboden ($\lambda/10$ Glasplatte).

Die Spaltgröße kann durch einen Linearschlitten+Mikrometerschraube präzise im Bereich $0.2 \text{ mm} < s < 5 \text{ mm}$ eingestellt werden. Eine Schemaskizze des Versuchsaufbaus ist in Abbildung 3 dargestellt, die die relevanten Größen des untersuchten Problems zeigt. Zusätzlich sind die Anordnung der verwendeten Messgeräte und die Plattengeometrien gezeigt. Um sowohl strukturierte Oberflächen (Kupplungsströmungen) als auch radiale Durchströmung (Turbomaschinen) abzubilden, wurden zwei Scheiben mit zentralem Loch gewählt, wobei in eine der Scheiben zusätzlich sechs zylinderförmige Vertiefungen aufweist; siehe Abbildung 3(b). Prinzipiell wird davon ausgegangen, dass sich die Auswirkung der Vertiefungen trotz der axialen Mittelung in den PIV-Ergebnissen erkennen lassen. Diese $\vec{u}(r, \phi)$ Geschwindigkeitsfelder zeigen die relevanten Bereiche für anschließende LDV-PS Messungen in der $\phi - z$ Ebene auf, die dann die zusätzliche Information über das axiale Profil der Umfangsgeschwindigkeit liefern.



(a) experimenteller Aufbau



(b) untersuchte Scheibengeometrien: (1) glatt, (2) strukturiert

Abb. 3: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus; (a) Skizze der Rotor-Stator Konfiguration, der relevanten Maße und der optischen Zugänge für die angewendeten Messtechniken; (b) Scheiben mit zwei verschiedenen Oberflächenstrukturen.

Messtechnik und Datenauswertung

PIV Messungen

Verwendet wurde ein kommerzielles PIV System bestehend aus einem Quantel EverGreen Nd:YAG ($\lambda = 532 \text{ nm}$) Doppelpuls laser und einer PCO Pixelfly Kamera (14 Bit, maximale Auflösung $1392 \times 1050 \text{ Pixel}$), die bei einer Abtastrate von 4 Bildern pro Sekunde eingesetzt wurde. Die Ansteuerung wurde über die Phaseninformation der Scheibe getriggert. Ein 50 mm f/1.4D Nikon Nikkor Objektiv wurde verwendet, um etwa 120° der Platte bei einer räumlichen Auflösung von etwa 18 px/mm vermessen zu können. Als Tracer wurde Polyamidpulver ($5 \mu\text{m}$) verwendet. Die Strahltaile wurde direkt vor den Eintritt in den Spalt positioniert, um mit dem divergenten Teil des Lichtschnitts Schattenwurfeffekte zu vermeiden. Außerdem wurde darauf geachtet, dass der gesamte Spalthöhe ausgeleuchtet wurde. Der Pulsabstand des Lasers wurde so angepasst, dass eine mittlere Verschiebung von ca. 5 px für den äußeren Teil der Strömungskomponente realisiert wurde.

$N = 20,000$ Bildpaare wurden aufgezeichnet, um die statistische Signifikanz der Experimente sicherzustellen. Die Bilder wurden mit einem Multi-Grid/Multi-Pass Korrelationsschema mit einer finalen IA-Größe von 32 px und 50% Overlap ausgewertet. Ausreißer wurden mittels eines normalisierten Mediantests (Westerweel und Scarano, 2005) identifiziert und durch den zweitgrößten Peak ersetzt, der aus den jeweiligen Korrelationsfeldern hervorging.

LDV-PS Messungen

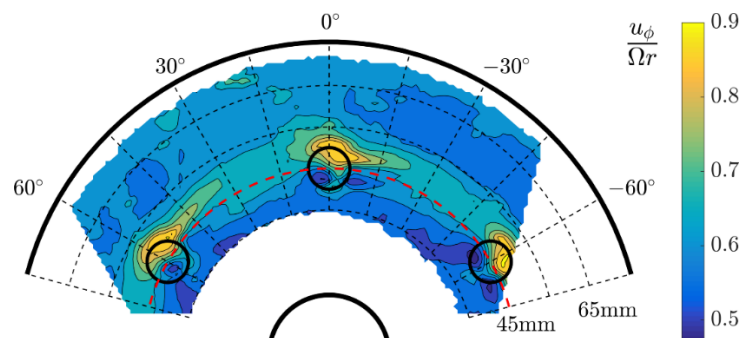
Für die LDV Messungen wurde der ILA R&D LDV-Profilsensor verwendet, der in Kooperation zwischen der ILA R&D GmbH, OPTOLUTION und der Technischen Universität Dresden entwickelt wurde. Der Sensor besteht aus zwei Nd:YAG Lasern, die zwei überlappende Messvolumina mit divergenten und konvergenten Interferenzmustern bilden. Für Details über das

Messprinzip oder das verwendete Messgerät sei an dieser Stelle auf die Publikationen von Czarske et al., 2002, oder Shirai et al., 2006, und das Datenblatt des verwendeten Profilsensors (ILA R&D GmbH, 2015) verwiesen. Als Tracer wurden versilberte Hohlglaskugeln (5 μm) verwendet. Eine Gesamtzahl von $N = 100,000$ Partikeln wurde pro Messpunkt registriert, um die statistische Signifikanz der Daten zu gewährleisten. Zusätzlich wurden zwei bzw. drei Messpunkt für die Spalthöhen $s = 0.4$ und $s = 0.7$ mm vermessen, um eine angemessene Datenrate in allen Bereichen des Spalts zu erhalten. Die gemessene Information wurde weiter hinsichtlich der Phasenlage der registrierten Partikel nachbereitet, sodass ein Geschwindigkeitsfeld in der $\phi - z$ Ebene erzeugt werden konnte. Es sei angemerkt, dass die ersten Versuche zur phasenaufgelösten Auswertung von LDV-PS Daten bereits von Neumann et al., 2012,2013, gezeigt wurden, wo die zeitlich-räumliche Volumenkraftverteilung durch die erfassten LDV-PS-Daten bestimmt werden konnte.

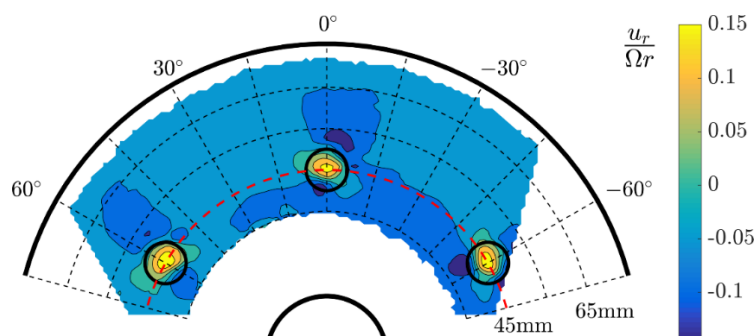
Ergebnisse der Messungen

PIV Ergebnisse

Die Ergebnisse der PIV Messung mit strukturierter Scheibe sind in Abbildung 4 dargestellt, wobei das Geschwindigkeitsfeld mit der lokalen Scheibengeschwindigkeit Ωr normiert wurde. Obwohl die Ergebnisse über die Spalthöhe gemittelt wurden, ist die Auswirkung der zylinderförmigen Vertiefung deutlich zu erkennen. Abbildung 4(a) zeigt deutlich, dass die Strömung



(a) Umfangskomponente der Geschwindigkeit $u_\phi(r, \phi)$



(b) Radialkomponente der Geschwindigkeit $u_r(r, \phi)$

Abb. 4: PIV-Ergebnisse (Exp 2, $s = 0.7$ mm, $\Omega = 25.45$ Hz): Umfangskomponente $u_\phi(r, \phi)$ (a) und Radialkomponente $u_r(r, \phi)$ (b) der Strömung in der $r - \phi$ Ebene. Die rot strichlierte Linie ($r = 45$ mm) kennzeichnet den Lochkreis für die sechs runden Vertiefungen (schwarze Kreise). Dieser Umfang spannt zusammen mit der Spalthöhe s die Messebene für die LDV-PS Experimente auf. Die Abmessungen der rotierenden Scheibe sind ebenfalls mit schwarzen Linien gekennzeichnet.

hinter jeder Vertiefung von einem verzögerten inneren Nachlaufbereich und einer strahlähnlichen Strömung im äußeren Bereich des Nachlaufs dominiert wird. Diese Beobachtung wird von Bereichen hoher radialer Geschwindigkeiten unterstrichen, die das radiale Ausweichen der verzögerten Strömung nach außen verdeutlicht; siehe Abbildung 4(b).

LDV-PS Ergebnisse

Die Ergebnisse der LDV-PS Messungen für strukturierte Scheiben sind in Abbildung 5 gezeigt. Grundsätzlich ist klar zu erkennen, dass mit dem getesteten Prüfstand extrem hohe Geschwindigkeitsgradienten erfasst werden können. Zusätzlich ist zu erkennen, wie deutlich die phasenaufgelöste Information mit dem LDV-PS erfasst werden kann. Trotz allem sind die systematischen Fehler an beiden Wänden offensichtlich.

An der festen Wand zeigt sich trotz Glasboden eine große Abweichung der Geschwindigkeitsniveaus vom Erwartungswert (vgl. Abbildung 1(a)), da die aktuelle Version des Profilsensors noch ungeschiftet realisiert ist. Entsprechend ist die Erfassung von Geschwindigkeiten unter 0.1 m/s mit dem aktuellen Gerät noch nicht möglich und maßgeblich schnelle Ausreißer wurden unmittelbar über der festen Wand erfasst (siehe vor allem Abbildung 5(d)). Zusätzlich haben Reflektionen an der rotierenden Scheibe nennenswert zur Geschwindigkeitsschätzung beigetragen, sodass auch an dieser Wand die Geschwindigkeit zu hoch geschätzt wurde.

Als Konsequenz aus diesen beiden Limits lässt sich aus den erfassten Messdaten derzeit noch kein signifikanter Unterschied zwischen den gewählten Parameterkombinationen ableiten. Trotzdem lässt sich aus den durchgeführten Messungen und ausgewerteten Daten schlussfolgern, dass sich mit Hilfe von LDV-PS Messungen die Auswirkung strukturierter Oberflächen in den Spalt hinein als überlagerter Effekt auf die hohen Geschwindigkeitsgradienten erfassen lässt.

Abschlussbemerkungen

In der vorliegenden Arbeit konnte gezeigt werden, dass die Kombination aus einem planaren 2D2C PIV System und einer LDV-PS Sonde für Anwendungsfälle mit sehr schmalen Spaltströmungen $s < 1 \text{ mm}$ vielversprechend erscheint. Die Experimente wurden in Rotor-Stator-Konfiguration durchgeführt, um im Speziellen den Strömungsfall der geöffneten nasslaufenden Kupplung mit und ohne Nutbild zu imitieren.

Aus den PIV-Ergebnissen lassen sich über die Spalthöhe s gemittelte Strömungsfelder $u_\phi, u_r(r, \phi)$ bestimmen, die vorhandene Oberflächenstrukturen klar in Form entsprechender Strömungsmuster abzeichnen. Diese Fußabdrücke in der Strömung können direkt als Indikator für geeignete Messpositionen der LDV-PS Messungen genutzt werden. Die LDV-PS Ergebnisse zeigen sehr deutlich, dass sich die durch die Oberflächenstrukturierung entstehenden Bewegungsmuster auf die komplette Spalthöhe erstrecken. Diese Erkenntnis ist von großer Bedeutung, wenn man z.B. über die Manipulation des Reibungswiderstands und entsprechenden Schleppmoments nachdenkt.

Trotz dieser grundsätzlich positiven Erkenntnis, konnte allerdings auf Grund zweier messtechnischer Probleme ein quantitativer Parametervergleich bisher nicht durchgeführt. Zum einen haben nennenswerte Reflektionen an der rotierenden Scheibe zur systematischen Überschätzung der Geschwindigkeit in Scheibennähe geführt. Dieses Problem kann allerdings durch die Verwendung brechungsindexangepasster Öle leicht umgangen werden. Zum anderen zeigten

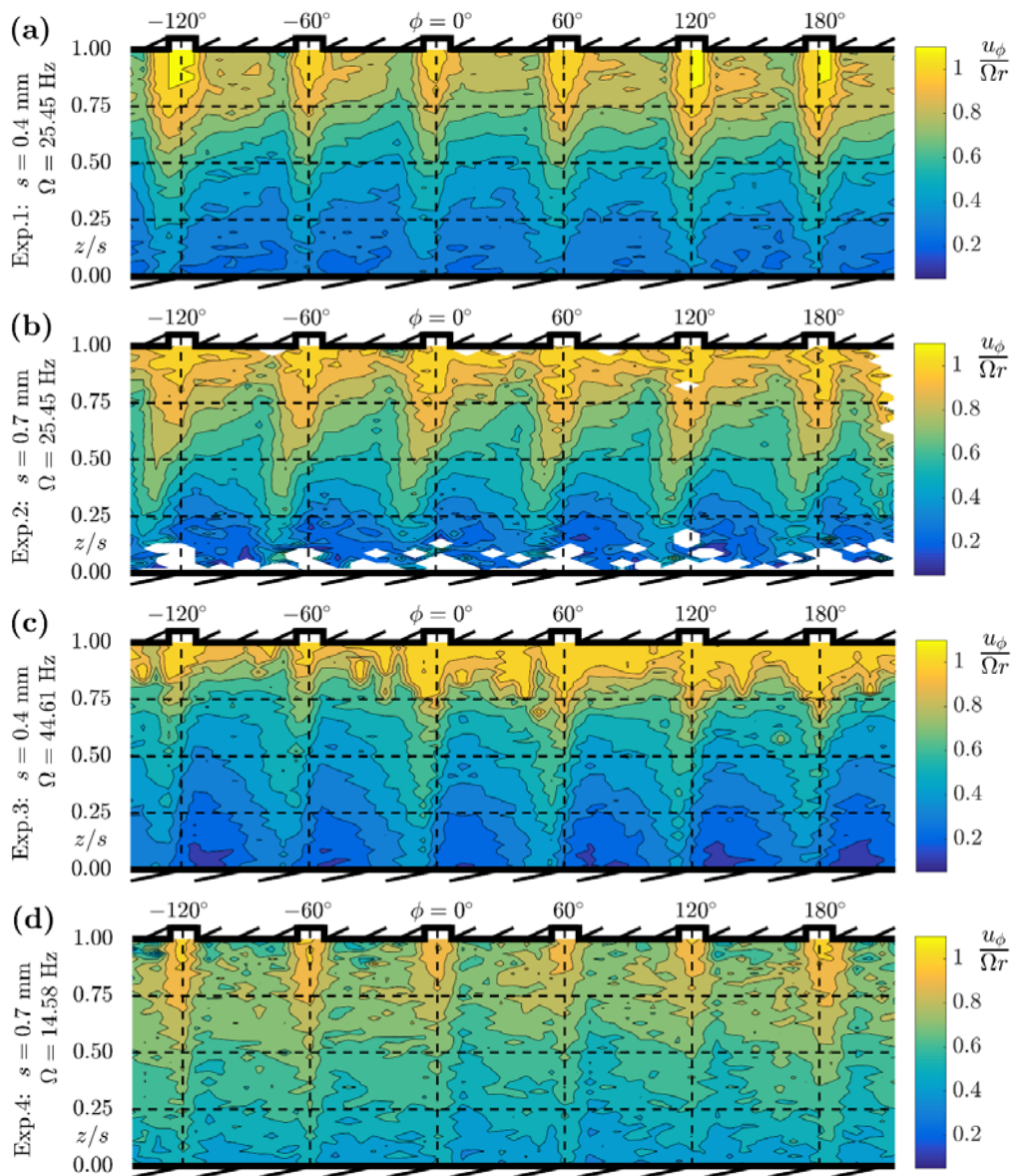


Abb. 5: LDV-PS Ergebnisse für vier verschiedene Experimente mit strukturierter Scheibenoberfläche: Umfangsgeschwindigkeit $u_\phi(r, \phi)$ in der $\phi - z$ Ebene bei dem Radius $r = 45 \text{ mm}$ (vgl. rote Linie in Abb. 4). Die sechs Vertiefungen entlang des Umfangs sind ebenfalls angedeutet, um die Phasenbeziehung zum Geschwindigkeitsfeld anzudeuten.

sich die Grenzen eines ungeschifteten Laser-Doppler Sensors im Bereich von Geschwindigkeiten nahe Null. Die im verwendeten Sensor verbauten Filter lassen nur Geschwindigkeiten $\geq 0.1 \text{ m/s}$ zu, sodass die Geschwindigkeitsschätzung nahe der festen Wand stark von schnellen Ausreißern dominiert wurde. Da der typische Parameterbereich üblicher Kupplungen bei Spalthöhen $s < 0.5 \text{ mm}$ und Winkelgeschwindigkeiten Ω im Bereich $10^2 - 10^3 \text{ Hz}$ liegt, lässt sich dieser Einfluss auf den unmittelbaren Bereich an der festen Wand limitieren.

Derzeitige Bemühungen der ILA R&D GmbH behandeln eine zusätzliche Ausrüstung des Profilsensors mit Bragg-Zellen, sodass damit die Geschwindigkeitsbestimmung auf Basis geschifteter Messsignale stattfinden kann. Es ist davon auszugehen, dass diese Modifikation die Messung von Geschwindigkeiten nahe Null ($\sim \text{mm/s}$) und auch lokale Rezirkulationen innerhalb der erfassten Geschwindigkeitsprofile erkennen und quantifizieren kann.

Abschließend lässt sich - trotz aller Probleme mit Wandreflektionen, hardware-Filtern und shift-Problemen - aus der vorliegenden Machbarkeitsstudie schlussfolgern, dass die Kombination aus einem üblichen PIV System und dem LDV-PS durchaus für Anwendungsbereiche geeignet scheint, bei dem gleichzeitig sehr schmale Spaltbreiten und große Flächen im Spalt untersucht werden sollen.

Literatur

- Czarske J., Büttner L., Razik T., Müller H., 2002:** "Boundary layer velocity measurements by a laser doppler profile sensor with micrometre spatial resolution", *Meas Sci Technol*, Vol. 13, pp. 1979-1989.
- Gan X.P., MacGregor S.A., 1995:** "Experimental study of the flow in the cavity between rotating disks", *Exp Thermal Fluid Sci*, Vol. 10, pp. 379-387.
- Gropper D., Wang L., Harvey T.J., 2016:** "Hydrodynamic lubrication of textured surfaces: A review of modeling techniques and key findings", *Tribol Int*, Vol. 94, pp. 509-529.
- ILA R&D GmbH, 2015:** "ILA.Data sheets – LDV-Profile Sensor", www.ila.de/fileadmin/documents/en/datasheets/ldv/probes/ILA_data_ProfileSensor.pdf.
- Lance G.N., Rogers M.H., 1962:** "The axially symmetric flow of a viscous fluid between two infinite rotating disk", *Proc Roy Soc London Ser A*, Vol. 266, pp. 109-121.
- Lee H.-J., Nishino K., 2011:** "Micro-piv measurement and cfd analysis of a thin liquid flow between rotating and stationary disks", *J Vis*, Vol. 14, pp. 249-258.
- Missimer J.R., Johnson W.S., 1982:** "Flow between a smooth stationary disk and grooved rotating disk", *J Lubrication Tech*, Vol. 104, pp. 248-254.
- Neumann M., Friedrich C., Czarske J., Kriegseis J., Grundmann S., 2012:** "Spatio-temporal velocity, acceleration and force measurements of a dielectric barrier discharge plasma actuator", 16th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics.
- Neumann M., Friedrich C., Czarske J., Kriegseis J., Grundmann S., 2013:** "Determination of the phase-resolved body force produced by a dielectric barrier discharge plasma actuator", *J Phys D: Appl Phys*, Vol. 46, pp. 042001.
- Ortlinghaus GmbH, 2015:** "Plates for dry- and wet-running clutches and brakes by industries", <http://www.ortlinghaus.com/english/products/plates/plates.html>.
- Owen J.M., 1988:** "Air-cooled gas-turbine discs: a review of recent research", *Int J Heat Fluid Flow*, Vol. 9, pp. 354-365.
- Owen J.M., Rogers R.H., 1989:** "Flow and heat transfer in rotating-disc systems - Volume 1: Rotor-Stator-Systems", John Wiley and Sons Inc., New York.
- Poncet S., Chauve M.-P., Schiestel R., 2005:** "Batchelor versus Stewartson flow structures in a rotor-stator cavity with throughflow", *Phys Fluids*, Vol. 17, pp. 075110.
- Razzaque M.M., Kato T., 1999:** "Effects of groove orientation on hydrodynamic behavior of wet clutch coolant films", *J Tribol*, Vol. 121, pp. 56-61.
- Shirai K., Pfister T., Büttner L., Czarske J., Müller H., Becker S., Lienhart H., Durst F., 2006:** "Highly spatially resolved velocity measurements of a turbulent channel flow by a fiber-optic heterodyne laser-doppler velocity-profile sensor", *Exp Fluids*, Vol. 40, pp. 473-481.
- Shirai K., Yaguchi Y., Büttner L., Czarske J., Obi S., 2011:** "Highly spatially resolving laser doppler velocity measurements of the tip clearance flow inside a hard disk drive model", *Exp Fluids*, Vol. 50, pp. 573-586.
- Tang F., Wang C., Shi Y., Wang X., 2015:** "Experimental study of the application of micro-piv on the flow characteristics detection of micro-gap rotational flow field", *AIP Adv*, Vol. 5, pp. 041311.
- Takagi Y., Nakata H., Okano Y., Miyagawa M., Katayama N., 2011:** "Effect of two-phase flow on drag torque in a wet clutch", *J Adv Res Phys*, Vol. 2, pp. 021108.
- Tauviiqirrahman M., Ismail R., Jamari J., Schipper D.J., 2013:** "A study of surface texturing and boundary slip on improving the load support of lubricated parallel sliding contacts", *Acta Mech*, Vol. 224, pp. 365-381.
- Tsai Y.S., Chang Y.M., Chang Y.J., Chen Y.M., 2007:** "Phase-resolved piv measurements of the flow between a pair of corotating disks in a cylindrical enclosure", *J Fluids Struct*, Vol. 23, pp. 191-206.
- Tzeng H.-M., Humphrey J.A.C., 1991:** "Co-rotating disk flow in an axisymmetric enclosure with and without a bluff body", *Int J Heat Fluid Flow*, Vol. 12, pp. 194-201.
- Westerweel J., Scarano F., 2005:** "Universal outlier detection for piv data", *Exp Fluids* 39:1096-1100.
- Wu S.-C., 2009:** "A PIV study of co-rotating disks flow in a fixed cylindrical enclosure", *Exp Thermal Fluid Sci*, Vol. 33, pp. 875-882.