

## Versuchsaufbau und Messergebnisse zur Strömung im vereinfachten Modell eines axialen Segmentgleitlagers

### Test rig and results of the flow in a simplified model of an axial thrust bearing

**O. Kirschner, A. Ruprecht, S. Riedelbauch**

Institut für Strömungsmechanik und Hydraulische Strömungsmaschinen  
Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 10  
70550 Stuttgart  
E-Mail: kirschner@ihs.uni-stuttgart.de

Wassergeschmierte Gleitlager, hydrostatische Gleitlager, Segmentgleitlager  
Water lubricated bearings, hydrostatic bearings, pad type bearings

#### Zusammenfassung

In dieser experimentellen Untersuchung wird die Strömung an einem vereinfachten Gleitlagermodell zur Validierung von numerischen Strömungssimulationen untersucht. Das vereinfachte Gleitlagermodell ist dazu mit feststehenden, unelastischen Segmenten ausgeführt, um eine feste Geometrie sicherzustellen. Um eine genügende räumliche Auflösung der Strömung in Spalthöhe zu gewährleisten ist die Spalthöhe entsprechend größer ausgeführt. Im ersten Teil des Beitrags wird der Versuchsaufbau, die installierte Messtechnik und die Vorgehensweise bei den Messungen vorgestellt, bevor im Anschluss die messtechnischen Ergebnisse der Untersuchung dargestellt werden.

Der Fokus der experimentellen Untersuchung liegt hierbei auf Anströmung in den Spalt aus dem Zwischenraum zwischen zwei Segmenten. Dazu wird die Geschwindigkeit im Bereich zwischen zwei Segmenten mit Particle Image Velocimetry (PIV) für verschiedene Betriebspunkte gemessen. Neben der Geschwindigkeit zwischen den Segmenten wird die Druckverteilung über den Umfang des Lagers erfasst.

#### Einleitung

In Wasserkraftwerken werden bei Maschinensätzen mit vertikaler Wellenanordnung die Kräfte durch das Rotoreigengewicht und den Achsschub des Turbinenlaufrades durch das Axiallager aufgenommen. Wegen der hohen Belastungen werden diese Axiallager als Segmentgleitlager ausgeführt. Um eine Kontamination der Umwelt durch eventuell austretenden Schmierstoff zu vermeiden, ist die Verwendung von wassergeschmierten Gleitlagern von Vorteil, siehe McCarthy 2008. Bei wassergeschmierten Gleitlagern sind dabei die einzelnen Segmente als Kippsegmente aus einem elastisch deformierbaren Werkstoff ausgebildet. Durch die niedrigere Viskosität des Wassers im Vergleich zu Ölen ist bei wassergeschmierten Lagern die Schmierpaltweite deutlich kleiner als bei ölgeschmierten Lagern, siehe Kächele 1985. Bei diesen kleinen Spaltweiten und der elastischen Deformation der Segmente ergibt sich speziell bei dynamischer Belastung eine sehr komplexe Strömung, die eine Wechselwirkung mit der Struktur des Lagers aufweist.

Ziel des Projektes ist, für das Verständnis der Strömung in wassergeschmierten axialen Gleitlagern und für die Auslegung dieser axialen Gleitlager, geeignete Modelle für die numerische Strömungssimulation zu entwickeln. Im experimentellen Teil der Untersuchung wird die Strömung an einem vereinfachten Gleitlagermodell zur Validierung von numerischen Strömungssimulationen untersucht.

### Versuchsaufbau

Das Gehäuse des Gleitlagers besitzt eine quadratische Grundfläche und ist mit geraden Wänden ausgeführt, um die optischen Verzerrungen möglichst gering zu halten (siehe Abb. 1 oben). Der minimale Abstand zwischen den Seitenwänden und den Gleitlagersegmenten bzw. dem Gleitlagerläufer beträgt 30 mm. Das Segmentgleitlager besteht aus fünf Segmenten. Um bei der Messung eine definierte Geometrie bei den Messungen sicherzustellen, ist das Gleitlager für die vorgestellten Versuche mit feststehenden unelastischen Segmenten ausgeführt. Im Modell haben die Segmente des Lagers einen Außendurchmesser von 190 mm und einen Innendurchmesser von 70 mm. Zwischen den Segmenten besteht ein Zwischenraum mit einer Breite von 20 mm und einer Tiefe von 19 mm. Der Zwischenraum ist in der Fotografie rechts unten in Abb. 1 mit dem Rechteck markiert. Jedes Segment ist mit einer Schmiermittelzuführungsbohrung (Durchmesser 3 mm) in der Segmentmitte ausgestattet. Von dieser Schmiermittelzuführungsbohrung führen jeweils in Umfangsrichtung und radialer Richtung zwei Nuten mit einer Breite und Tiefe von 3 mm und einer Länge von 20 mm bzw. 19 mm zur angefasten Kante des Segmentes. Die Schmiermittelzuführungsbohrung und die Nuten sind in der Fotografie links unten in Abb. 1 zu sehen. In Abb. 2 ist noch einmal ein CAD-Modell der Segmente dargestellt, an dem die Nuten sowie die Zwischenräume zwischen den Segmenten zu sehen sind.

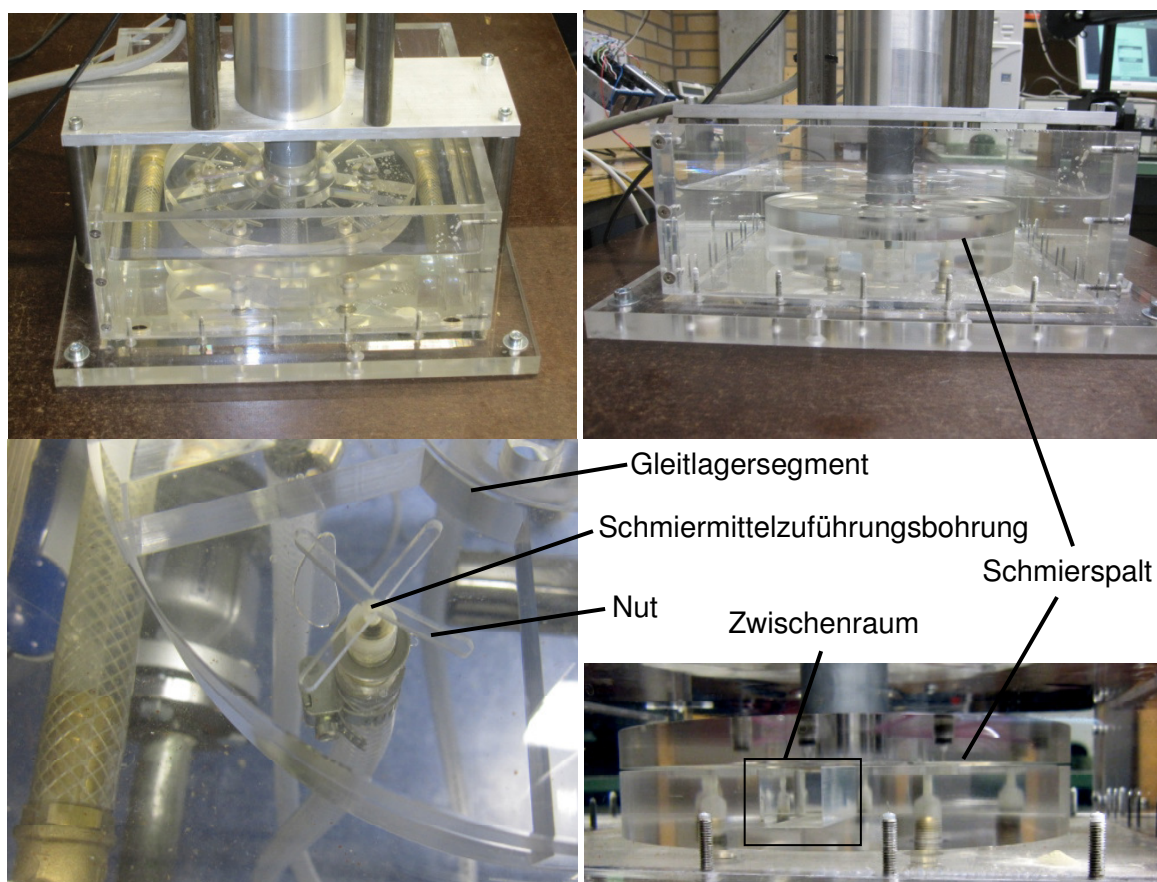


Abb. 1: Segmentgleitlagermodell mit Gehäuse

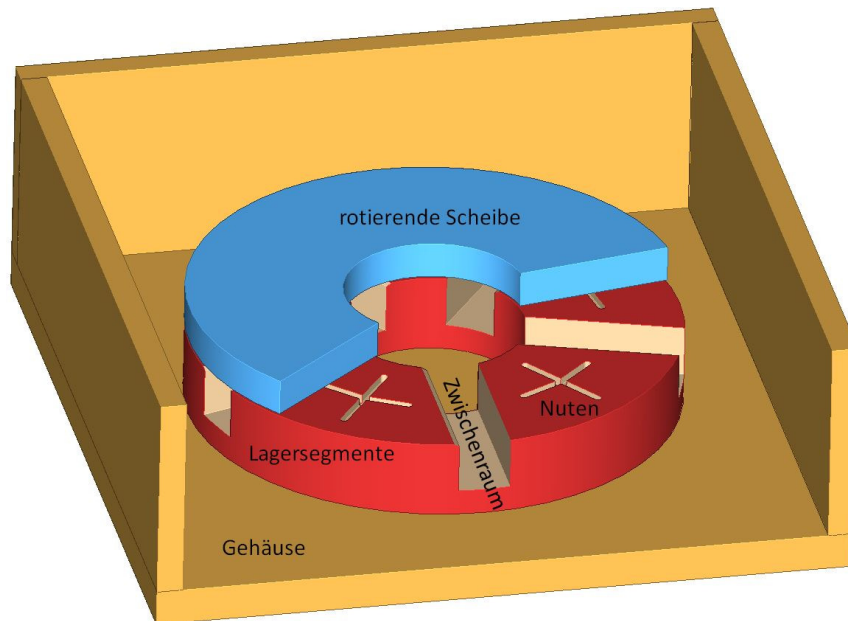


Abb. 2: CAD-Modell des Segmentgleitlagers

Im Modell ist über einem Schmier-spalt mit der Spalthöhe von 1 mm der plane rotierende Läufer angebracht. Der Läufer besitzt wie die Segmente einen Außendurchmesser von 190 mm. Bei einem Durchmesser von 70 mm (Innendurchmesser der Segmente) am Läufer ist ein Absatz mit einem Rücksprung von 2,2 mm abgedreht. Zum Abfluss des nach innen im Lager abströmenden Teils des in den zum Läufer geförderten Schmiermittelmenge, sind im Läufer acht axiale Bohrungen mit einem Durchmesser von 10 mm vorgesehen.

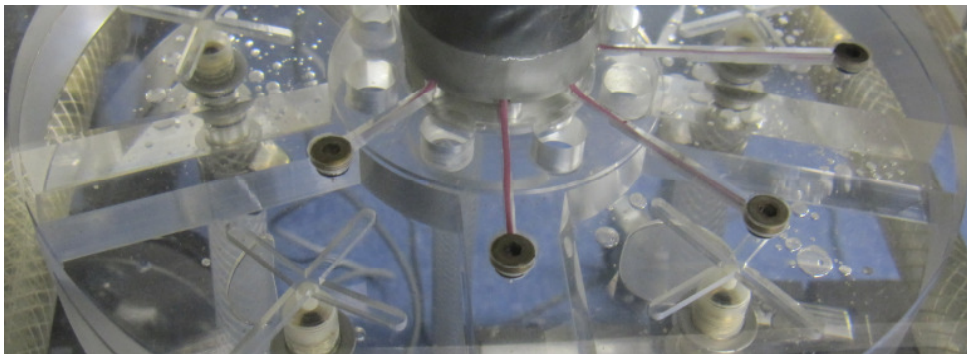


Abb. 3: Montierte Miniaturdruckaufnehmer im Läufer des Segmentgleitlagermodells

Zur Erfassung der Druckverläufe über den Umfang sind fünf Miniaturdruckaufnehmer vom Typ 2MI des Herstellers Keller mit einem Durchmesser von 6 mm und einer Höhe von 2 mm in den Läufer eingebaut. Die Miniaturdruckaufnehmer sind von der Oberseite in den Läufer eingesetzt und über eine Druckmessbohrung mit 1 mm Durchmesser mit der Unterseite des Läufers verbunden. Somit ist jeder Druckaufnehmer über die Druckmessbohrung mit dem Spaltraum verbunden. Die Miniaturdruckaufnehmer sind dabei so angeordnet, dass im Bereich des Segments in radialer Richtung alle 10 mm eine Druckmessung durchgeführt wird. Durch die Rotation der Scheibe wird damit der Druck auf fünf Radien über den kompletten Umfang erfasst. In Abb. 3 sind vier der Druckaufnehmer zu sehen. Wie zu erkennen ist sind die Miniaturdruckaufnehmer jeweils mit einem Versatz von 45° Drehwinkel eingebaut. Die Übertragung der Versorgungsspannung und der Drucksignale aus der rotierenden Welle zur Messwerterfassung ist über einen Schleifringübertrager realisiert.

Der Antrieb des Gleitlagers erfolgt, um die gewünschte Versuchsdrehzahl einstellen zu können, mit einem Gleichstrommotor und einem stabilisierten Labornetzgerät. Um eine konstante Spalthöhe während der Versuche zu gewährleisten, ist die Welle der Versuchsanordnung mit einer angestellten Lagerung mit Vorspannung realisiert.

Neben den Druckmesswerten werden mit der Messwerterfassung noch die Drehzahl und der Volumenstrom der zugeführten Schmiermittelmenge aufgezeichnet. Die Drehzahlerfassung erfolgt hierbei mit Hilfe einer Lochscheibe und einer Lichtschranke. Der Volumenstrom der zugeführten Schmiermittelmenge wird mit einem magnetisch induktiven Durchflussmesser gemessen. Der gesamte Versuchsaufbau ist in Abb. 4 zu sehen.

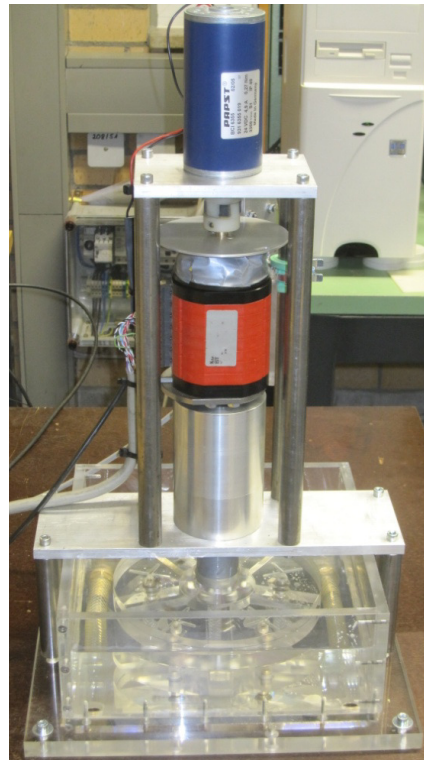


Abb. 4: Versuchsaufbau des Segmentgleitlagers mit Antrieb

### Durchführung und Auswertung der Messungen

Im Modell werden Versuche mit einer Reynoldszahl für ein Axialgleitlager von ca. 500 durchgeführt. Die Reynoldszahl wird dabei nach folgender Formel bestimmt.

$$Re = \frac{u \cdot h_0}{\nu} \approx 500$$

Bei den Modellwerten wird die Reynoldszahl mit einer Spalthöhe von 1 mm und einer Drehzahl von 50 U/min am Außendurchmesser bestimmt. Als Fluid wird im Modelllager Wasser bei Raumtemperatur eingesetzt. Die gewählte Modell-Reynoldszahl entspricht in etwa der Reynoldszahl eines Lagers mit einem Durchmesser von 2 m und einem Schmier spalt von 10  $\mu\text{m}$  und einer Drehzahl von 500 U/min. Es ist hier jedoch anzumerken, dass keine geometrische Ähnlichkeit besteht, da die Dimensionen von Durchmesser und Spalthöhe nicht maßstäblich übertragen werden können.

Bei der Durchführung der Messungen wird jeweils ein stationärer Betriebspunkt angefahren. Dabei werden die Betriebsdrehzahl und der Durchfluss durch alle Schmiermittelzuführungs-

bohrungen eingestellt. Die Abweichung der eingestellten Drehzahl liegt bei den Messungen unter 3%. Die Messunsicherheit des Durchflusses beträgt 0,5% auf den Messwert. Für die eingestellten Betriebspunkte werden sowohl die Betriebspunktdaten aufgezeichnet, als auch die Druck- und Geschwindigkeitsmessung durchgeführt.

Die Variation der untersuchten Betriebspunkte wird über den Zuführdruck des Schmiermittels bzw. den Durchfluss der zugeführten Schmiermittelmenge eingestellt. Damit werden unterschiedliche Strömungskonfigurationen unabhängig von der Spaltweite des Lagers untersucht.

Die Messwerte der fünf Miniaturdruckaufnehmer werden jeweils über fünf Umdrehungen aufgezeichnet. Die Messwerte werden nach einer Tiefpassfilterung mit einer Grenzfrequenz von 100 Hz abgespeichert. Für die Darstellung der Ergebnisse werden die Winkelversätze der einzelnen Druckaufnehmer durch ein Verdrehen der Signale auf den Winkel des ersten Aufnehmers synchronisiert.

Für die Messungen der Strömungsgeschwindigkeit wird ein PIV-System des Herstellers TSI eingesetzt. Das PIV-System besteht aus einem doppeltgepulsten Nd:YAG-Laser mit 25 mJ pro Puls und einer maximalen Wiederholungsrate von 20 Hz sowie einer CCD-Kamera mit einer Auflösung von 12 Bit und  $1280 \times 1024 \text{ Pixel}^2$  bei einer Bildwiederholrate von 8 Hz. Als Seeding-Partikel werden silberbeschichtete Hohlglaskugeln mit einer mittleren Korngröße von  $14 \mu\text{m}$  eingesetzt. Die Auswertung der Messung erfolgt über Kreuzkorrelation mit einem Auswertefenster von  $32 \times 32 \text{ Pixel}^2$  bei 50% Überlappung. Bei der zeitgemittelten Messung werden 1000 Vektorfelder gemittelt.

## Ergebnisse

In Abb. 5 sind die Geschwindigkeitsvektorfelder für drei Betriebspunkte im Zwischenraum zwischen zwei Segmenten in einem Querschnitt bei einem Radius von 65 mm dargestellt. Das obere Vektorfeld zeigt die Geschwindigkeitsverteilung bei einem Betriebspunkt ohne Zuführung von Schmiermittel durch die Schmiermittelzuführungsbohrung. Beim mittleren Bild beträgt der Gesamtdurchfluss durch alle Schmiermittelbohrungen 150 l/h. In dem unten dargestellten Vektorfeld beträgt Gesamtdurchfluss durch alle Schmiermittelbohrungen 385 l/h. Die Schwarze Linie oberhalb der Vektorfelder symbolisiert den Läufer. Wie bereits erwähnt wurde beim Läufer eine Drehzahl von 50 U/min bei allen Betriebspunkten eingestellt. Dies entspricht der Geschwindigkeit des Läufers von ca. 0,34 m/s in der Bildmitte. Die Rotation des Läufers würde in den Abbildungen eine Bewegung von rechts nach links entsprechen.

Bei der Betrachtung der Strömung im Zwischenraum ist zu erkennen, dass im Betriebspunkt ohne Schmiermittelzufuhr durch die Bohrungen in den Segmenten im Bereich des Zwischenraums zwischen den Segmenten ein großes Totwassergebiet besteht. Es ist nur eine Schleppströmung am Läufer sichtbar. In den beiden Betriebspunkten mit Schmiermittelzufuhr ist jeweils eine klassische Hohlraumströmung mit einem zentralen Wirbel zu sehen. Bei dem Betriebspunkt mit höherer Schmiermittelzufuhr treten erwartungsgemäß größere Geschwindigkeitsbeträge auf. In beiden Betriebspunkten ist zu erkennen, dass an der linken Wand größere Geschwindigkeiten auftreten.

Neben den Messungen des gesamten Bereichs zwischen zwei Segmenten wurden auch Geschwindigkeitsmessungen mit höherer räumlicher Auflösung im Einströmbereich aus dem Zwischenraum in den Lagerspalt durchgeführt. In Abb. 6 ist die Geschwindigkeit am Einströmbereich in den Spalt gezeigt. Als Betriebspunkt ist ein Schmiermitteldurchfluss von 150

l/h gewählt. Durch starke Lichtreflexionen am Läufer war es direkt am Läufer nicht möglich Messwerte zu erfassen. Im Geschwindigkeitsvektorfeld ist an der Fase der Einströmkante der Staupunkt erkennbar.

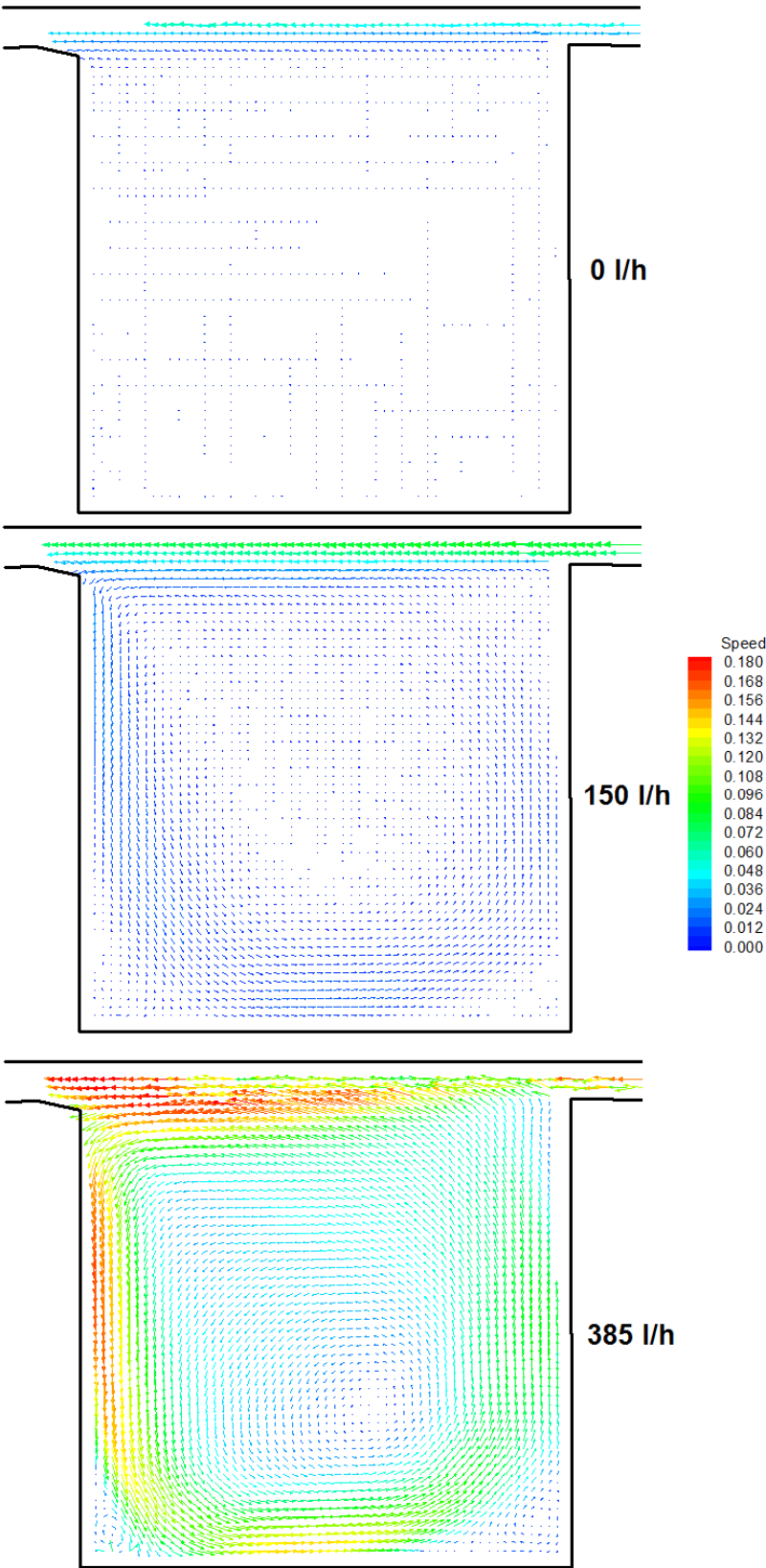


Abb. 5: Ein- und Ausströmbereich des Spaltes - Zwischenraums

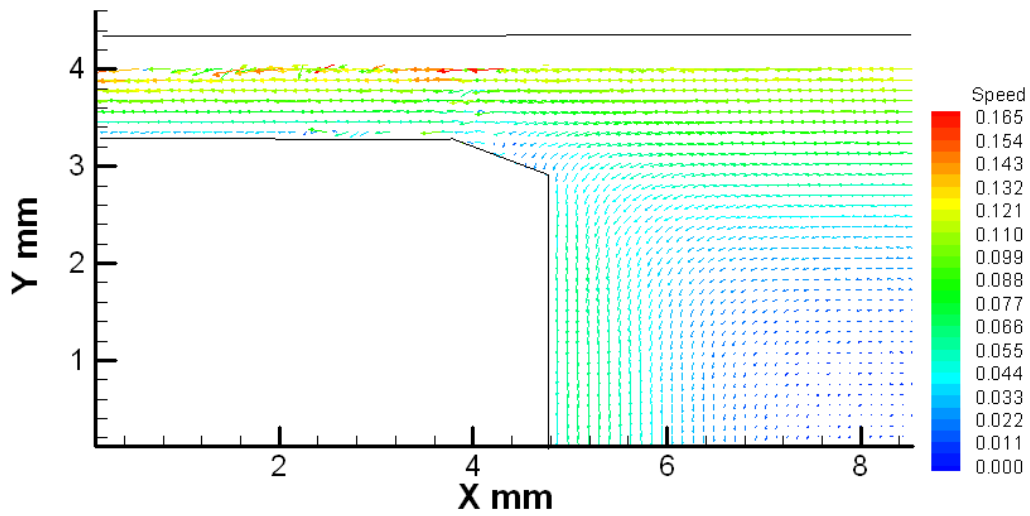


Abb. 6: Einströmbereich in den Spalt bei einem Schmiermittelzufluss von 150 l/h

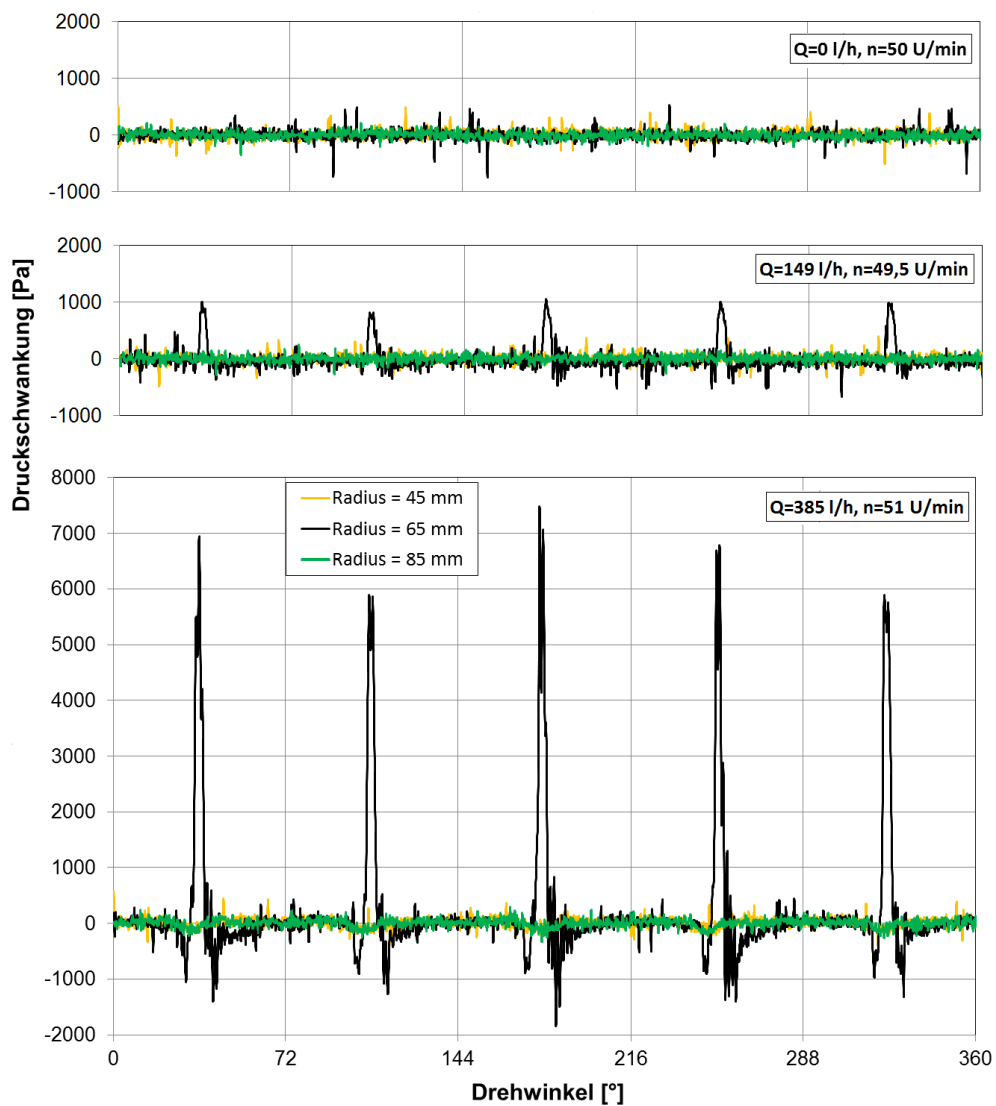


Abb. 7: Druckverlauf über eine Umdrehung

Wie bereits erwähnt wurden neben den Geschwindigkeitsmessungen mit PIV Druckmessungen an der Läuferwand durchgeführt. In Abb. 7 sind die Druckmesswerte in drei Radien der drei oben aufgeführten Betriebspunkte über eine Umdrehung dargestellt. Ohne Zufuhr von Schmiermittel durch die Bohrungen in den Segmenten ergibt sich, bis auf kleinere Störungen, ein konstantes Druckniveau. Bei den Betriebspunkten mit Schmiermittelzufuhr durch die Bohrungen in den Segmenten zeigt das Drucksignal des mittleren Aufnehmers (Radius = 65 mm, Schwarze Linie in den Diagrammen) beim passieren der Bohrung den Druckanstieg des Staupunkts. Bei einem Schmiermitteldurchfluss von 150 l/h kann direkt um den Staupunkt eine leichte Druckabsenkung beobachtet werden. Im Betriebspunkt mit einem Schmiermitteldurchfluss von 385 l/h zeigt sich ein deutlich höherer Druck im Staupunkt und eine deutlich größere Druckabsenkung um den Staupunkt. Die räumliche Ausdehnung der Druckabsenkung wird deutlich größer. Die Druckabsenkung ist nun auch in den beiden radial um 20 mm versetzten Druckaufnehmern zu sehen.

### **Zusammenfassung und Ausblick**

Das Ergebnis der bisherigen Untersuchung zeigt bei Schmiermittelzufuhr durch die Bohrungen in den Segmenten im Bereich zwischen den Segmenten die erwartete Hohlraumströmung mit einem zentralen Wirbel, der den gesamten Zwischenraum ausfüllt. Bei großem Schmiermitteldurchfluss entsteht in jeder Ecke am Boden des Zwischenraumes ein weiterer Sekundärwirbel. Die Druckverteilung zeigt bei der Schmiermittelzuführungsbohrung die Spitze die durch den Staudruck erzeugt wird und eine Druckabsenkung in dem umgebenden Bereich. Angesichts der relativ großen Spaltweite zeigt sich jedoch die Druckabsenkung erst bei größeren Schmiermittelzufuhrdurchflüssen.

Parallel zu der messtechnischen Untersuchung wurden bereits erste numerische Strömungssimulationen durchgeführt, die eine gute Übereinstimmung mit den Messergebnissen aufweisen. Im nächsten Schritt erfolgt die Durchführung von Messungen mit kleineren Spaltweiten um auch bei kleineren Schmiermittelzufuhrdurchflüssen größere Variationen des Drucks auf den Läufer zu erzeugen.

Im weiteren Vorgehen werden die ebenen Segmente durch Segmente ersetzt, die einen konischen Spaltverlauf besitzen. Durch den modularen Aufbau des Versuchs kann die bestehende Segmentscheibe durch einen Segmentträger, der Segmente mit einer schrägen Segmentoberfläche besitzt, ersetzt werden. Damit lassen sich dann Messungen an einem hydrodynamischen Lagermodell durchführen.

### **Verwendete Formelzeichen**

|       |                                       |
|-------|---------------------------------------|
| $h_0$ | Spalthöhe                             |
| $Re$  | Reynoldszahl                          |
| $U$   | Umfangsgeschwindigkeit am Außenradius |
| $\nu$ | kinematische Viskosität               |

### **Literatur**

McCarthy, D. M. C. 2008: "Sliding Bearings for Hydropower Applications - Novel Materials, Surface Texture and EALs" Doctoral Thesis, Luleå University of Technology, Department of Applied Physics and Mechanical Engineering.

Kächele, T., 1985: „Ein Beitrag zur Berechnung wassergeschmierter hydrodynamischer Radialgleitlager. Dissertation, Institut für Hydraulische Strömungsmaschinen, Universität Stuttgart