

Untersuchung des Wärmeübergangs eines Systems mit rotierendem Helixkanal-Ringspalt und zusätzlich aufgeprägtem Kanalvolumenstrom

Heat transfer of a rotating annular gap-system with helical channel and additional volume flow rate

S. Burgmann¹, M. Rohde¹, V. Nandana¹, M. Dues², U. Janoske¹

¹Lehrstuhl für Strömungsmechanik, Bergische Universität Wuppertal, Gaußstraße 20, 42097 Wuppertal

²ILA R&D GmbH, Karl-Heinz-Beckurts-Straße 13, 52428 Jülich

Wärmeübergang, Taylor-Couette Strömung, Helix-Spaltströmung
heat transfer, Taylor-Couette flow, helical gap flow

Zusammenfassung

In Turbomaschinen liegen durch die rotierenden Teile und hohen Geschwindigkeiten oft sehr komplexe Strömungsverhältnisse vor. Sind in solchen Fällen Problemstellungen des Wärmeübergangs bzw. der Kühlung zu betrachten, steht man vor dem Problem, dass analytische Betrachtungen auf der Basis empirischer Werte dabei keine zufriedenstellenden Ergebnisse für den Wärmeübergangskoeffizienten liefern. Aus diesem Grund ist es wünschenswert, den Wärmeübergangskoeffizienten aus Simulationen zu gewinnen. Für den zuverlässigen Einsatz dieser Simulationstechnologien ist eine umfassende Validierung der Modelle und Gleichungslöser erforderlich.

Zu diesem Zweck wurde eine Versuchsanlage aufgebaut, um an einem zentralen Testfall den Wärmetransport und den Wärmeübergang in schmalen rotierenden Spalten analysieren zu können. Es wird ein modifiziertes Taylor-Couette System gewählt, welches sich durch eine aufgewickelte Strömungskanal-Steg-Kombination in Form einer Helix auszeichnet. Bei der hier gewählten Konfiguration kann zusätzlich unabhängig von der Rotation des Systems ein Volumenstrom durch den Helix-Spalt getrieben werden, was z.B. der realen Konfiguration eines Kühlmassenstroms im schmalen Spalt eines Rotor-Stator-Systems nahe kommt. Der Helix-Spalt wird dabei von einem warmen Fluid durchströmt, während das Innere des Zylinders von einem kalten Fluid durchströmt wird.

Das globale Verhalten des Wärmetauschers für verschiedene Durchflusszahlen Φ wird über eine Analyse der Nusselt-Zahl Nu in Abhängigkeit der Taylor-Zahl Ta untersucht. Entgegen der klassischen Taylor-Couette-Strömung zeigt sich in diesem Fall sowohl im Experiment als auch in der Simulation für keine der untersuchten Durchflusszahlen Φ ein sprunghafter Anstieg der Nusseltzahl über der Taylorzahl. Vielmehr steigt die Nusselt-Zahl kontinuierlich an; in der Simulation ist der Kurvenverlauf steiler als im Experiment. Strömungsvisualisierungen im Helix-Spalt zeigen dennoch wirbelartige Strukturen, die mit zunehmender Taylorzahl deutlicher werden. Aus den Ergebnissen der Strömungssimulation kann eine mäandernde Strömungsstruktur identifiziert werden, die den Strömungskanal aufsteigt; ähnliche Strukturen können aus LDA-Messungen im Helix-Spalt gefunden werden. Allerdings sind die Wirbelstrukturen an der rotierenden Innenwand bei der Simulation deutlich ausgeprägter als im Experiment. Dies korrespondiert mit unterschieden im Profil der Umfangsgeschwindigkeit über die Spaltweite. Weitere Untersuchungen sind erforderlich.

Einleitung

Bei Gasturbinen kann durch komprimierte Luft ein Kühlmassenstrom als Sekundärströmungspfad in das Rotor-Stator-System zu den thermisch hoch belasteten Bauteilen der Turbine geleitet werden. Für die Auslegung von Bauteilen im Hochtemperaturbereich soll das Gesamtsystem des Kühlungs- und Verbrennungskreislaufes auf der Basis einer Netzwerkbeachtung modelliert werden. Die numerische Simulation übernimmt dann die Bereitstellung von Kennfeldern und des Wärmeübertragungsverhaltens an den diskreten Netzknoten. In Turbomaschinen liegen durch die rotierenden Teile und hohen Geschwindigkeiten oft sehr komplexe Strömungsverhältnisse vor. Analytische Betrachtungen auf der Basis empirischer Werte, wie im VDI-Wärmeatlas aufgeführt, liefern dabei keine zufriedenstellenden Ergebnisse für den Wärmeübergangskoeffizienten. Insbesondere kann der Wärmeübergangskoeffizient örtlich stark schwanken, was zu Fehleinschätzungen bei der Auslegung der Turbinen führen kann. Aus diesem Grund ist es wünschenswert, den Wärmeübergangskoeffizienten aus Simulationen zu gewinnen. Für den zuverlässigen Einsatz dieser Simulationstechnologien ist eine umfassende Validierung der Modelle und Gleichungslöser erforderlich.

Aus diesem Grund wird eine Konfiguration erstellt, welches ein modifiziertes Taylor-Couette System darstellt. Aufgrund der hier auftretenden Stabilitätsproblematiken (vgl. Chandrasekhar (1954, 1970), Jones (1981)) und des Einflusses von Temperaturgradienten (vgl. Ali & Weidmann (1990), Deters & Egbers (2005), Deters et al. (2008), Snyder & Karlson (1964)) sind Taylor-Couette-Strömungen bereits häufig untersucht und zur Entwicklung von numerischen Modellen verwendet worden. Das hier verwendete System besteht aus einem rotierenden Ringspalt, dem eine Helix-Struktur überlagert ist, so dass sich eine aufgewickelte Strömungskanal-Steg-Kombination ergibt. Die Außenwand steht dabei still und der innere Zylinder mit der Helix-Kanalstruktur rotiert (vgl. Janoske und Piesche (2005)). Auf diese Weise können die Einflüsse von Temperaturgradienten und der Spaltströmung auf das Stabilitätsverhalten und der damit verbundene Einfluss auf das Wärmeübertragungsverhalten analysiert werden.

Diese Konfiguration stellt den zentralen Testfall für die numerische Simulation der konjugiert gekoppelten Fluid-/Wärmeübergangsprobleme dar. Zunächst muss diese Konfiguration für einen Abgleich mit den Simulationsergebnissen in verschiedenen Untersuchungen vermessen werden. Dazu wird das globale Verhalten des Wärmetauschers für verschiedene Durchflusszahlen Φ über eine Analyse der Nusselt-Zahl Nu in Abhängigkeit der Taylor-Zahl Ta untersucht. Außerdem werden laser-optische Messungen und Strömungsvisualisierungen zur Untersuchung des Strömungszustandes durchgeführt.

Konfiguration des rotierenden Helixkanal-Ringspalts und Versuchsaufbau

Bei dem klassischen Taylor-Couette-System, bestehend aus einem Ringspalt zwischen einem rotierendem und einem fest stehenden Zylinder, bilden sich Instabilitäten in Form von Wirbeln, die sich paarweise gegenläufig als eine Art Reifen um den inneren rotierenden Zylinder legen (Taylor (1923)). Bei der hier gewählten Konfiguration kann zusätzlich unabhängig von der Rotation des Systems ein Volumenstrom durch den Helix-Spalt getrieben werden. Der Helix-Spalt wird dabei von einem warmen Fluid durchströmt, während das Innere des Zylinders von einem kalten Fluid durchströmt wird, so dass ein Wärmetauscher vorliegt (Abb. 1). Während das klassische Taylor-Couette System nur eine Scherströmung zulässt, kann in diesem Fall der Volumenstrom in Kombination mit der Rotation des Innenzylinders so gewählt werden, dass sich sowohl ein lineares, als auch ein schiebendes oder schleppeendes Geschwindigkeitsprofil einstellt (Abb.1). Eng damit verknüpft ist die Durchflusszahl Φ ,

die als Quotient des Fördervolumenstroms \dot{V} der Pumpe und des Fördervolumenstroms des Helixkanals geschrieben werden kann:

$$\Phi = \frac{\dot{V}}{h \cdot s \cdot r_1 \cdot \omega}$$

Dabei entspricht h der Spalthöhe (30 mm) und s der Spaltweite (5 mm) sowie r_1 dem inneren Radius (95 mm) und ω der Winkelgeschwindigkeit des inneren Zylinders. Die Steigung der Helix beträgt $p = 40$ mm. Für $\Phi = 0.5$ erhält man ein lineares Geschwindigkeitsprofil, für Werte $\Phi > 0.5$ ein schiebendes und für $\Phi < 0.5$ ein schleppendes Geschwindigkeitsprofil. Dieser Beitrag beschränkt sich jedoch auf die Darstellung der Ergebnisse für $\Phi = 0.5$.

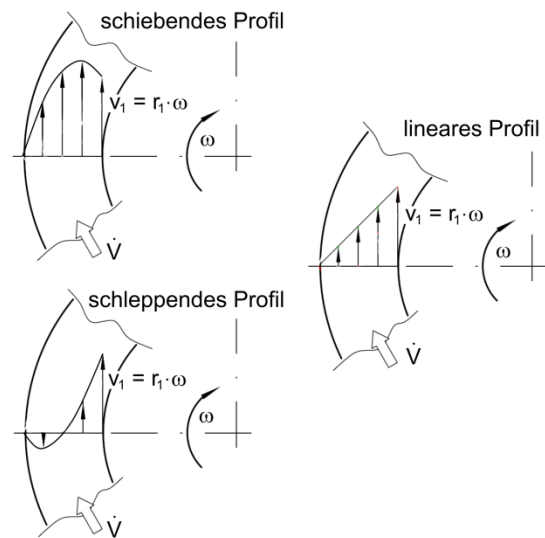
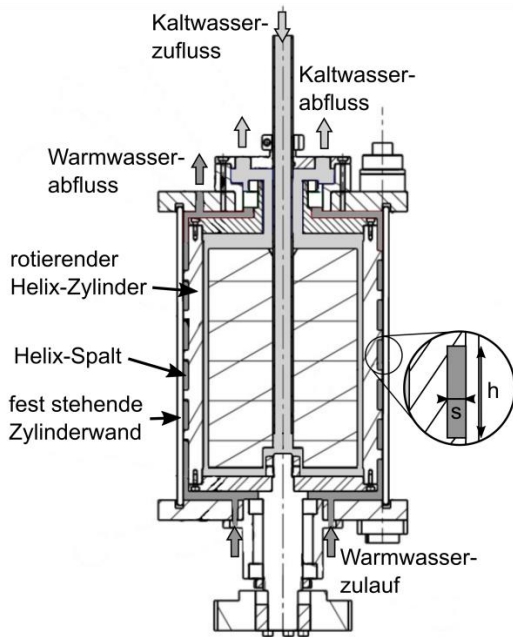


Abb. 1: Schnitt-Ansicht des rotierenden Helixkanal-Ringspalts

Abb. 2: mögliche Geschwindigkeitsprofile im Strömungskanal des Helix-Spalts

Abbildung 3 zeigt den Versuchsstand, dessen Kernelement die rotierende Helix-Trommel (3) ist. Das Warmwasser wird von einem Wärmebehälter (9) auf die gewünschte Temperatur erhitzt und konstant gehalten. Die konstante Förderung des Warmwassers zur Helix erfolgt über eine Pumpe in Kombination mit einem Nadelventil (10) und wird über eine Messturbinen gemessen (1).

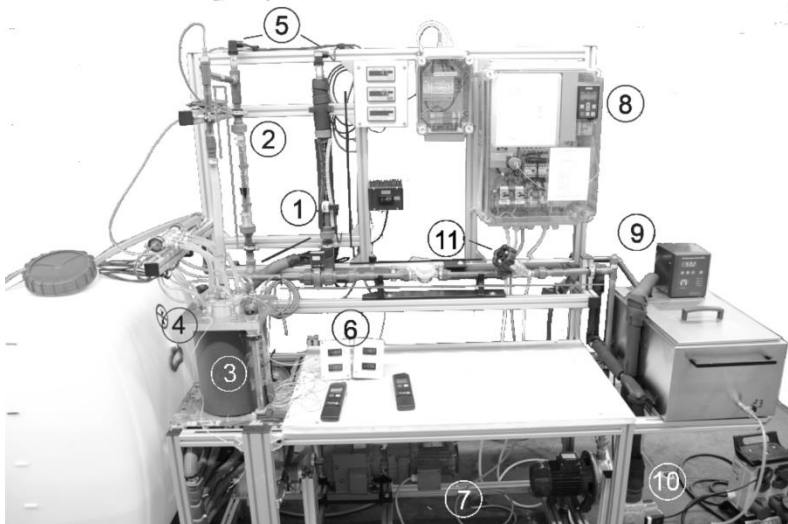


Abb. 3: Versuchsstand des rotierenden Helixkanal-Ringspalt-Systems

Ein eingebrachter Relativdrucksensor (5) dient der Ermittlung des Wasserdruckes, um damit in Kombination mit der Temperatur über Tabellen die Viskosität ν zu ermitteln. Im schmalen Spalt zwischen Außenwand und innerem Zylinder soll eine Veränderung des Wärmeübergangs durch die Entstehung von Instabilitäten (z.B. Taylorwirbeln) mittels Temperaturdifferenz ermittelt werden. Dazu sind an der Außenwand vier Pt100 Thermoelemente (3) appliziert. Kaltwasser wird direkt aus der Versorgungsleitung des Labors entnommen und in die Rohrleitung des Versuchsstandes geleitet. Der Volumenstrom wird über ein Schrägsitzventil (11) eingestellt und über einen Schwebekörper-Durchflussmesser (2) überwacht. Alle Eintritts- und Austrittstemperaturen sowohl des Warmwasserstroms als auch des Kaltwasserstroms werden über Temperaturfühler gemessen (4). Der rotierende innere Zylinder des Versuchsaufbaus wird durch einen Asynchronmotor über ein Winkelgetriebe (7) angetrieben. Die Einstellung und Regelung der Motordrehzahl erfolgt über einen Frequenzumrichter bzw. über ein Operator Panel (8).

Die Winkelgeschwindigkeit ω , bei der die Strömung von einer laminaren Couette-Strömung in die wirbelförmige Strömung umschlägt, d.h. das System wird instabil, wird als kritische Winkelgeschwindigkeit ω_{krit} bezeichnet. ω_{krit} ist abhängig von der Geometrie des Helixspalts. Für die dimensionslose Betrachtung wird daher die Taylor-Zahl Ta eingeführt. Die Taylor-Zahl ist definiert als:

$$Ta = \frac{s \cdot \omega \cdot r_1}{\nu} \sqrt{\frac{s}{r_1}}$$

Das globale Verhalten des Wärmetauschers für verschiedene Durchflusszahlen Φ wird über eine Analyse der Nusselt-Zahl Nu in Abhängigkeit der Taylor-Zahl Ta untersucht. Da die Taylorzahl über die Winkelgeschwindigkeit definiert ist, muss entsprechend für konstante Durchflusszahlen für unterschiedliche Taylorzahlen der Warmwasser-Volumenstrom angepasst werden. Die Nusselt-Zahl Nu ist in diesem Falle definiert als:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot s}{\lambda}$$

Dabei steht λ für die Wärmeleitfähigkeit. Da der Wärmeübergangskoeffizient α kein am Versuchsstand direkt messbarer Wert ist, wird er mithilfe der im Versuch dokumentierten Parameter über folgende Formel berechnet, die aus einer Wärmebilanz abgeleitet wurde.

$$\alpha = \left[\dot{V} \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_{\text{warm,ein}} - T_{\text{warm,aus}}) - \frac{\lambda \cdot A \cdot \Delta T_{\text{Spalt}}}{s} \right] \frac{1}{A \cdot \Delta T_{\text{Spalt}}}$$

A bezeichnet dabei die Mantelfläche des abgewickelten Helixspalts.

Numerische Simulation

Bei der numerischen Simulation wird als Rechengebiet ein Segment des Helix-Spaltes betrachtet, das zwei Umdrehungen beinhaltet (Abb. 4). Das Rechengitter besteht aus 9.9 Millionen Hexaeder-Elementen. Die Spaltweite s wird dabei mit 25 Gitterzellen aufgelöst, wobei das Rechengebiet im wandnahen Bereich mit $\Delta = 0.01s$ feiner aufgelöst wird, um den Wärmeübergang an den Wänden ausreichend präzise berechnen zu können. Zur Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen wird der SIMPLE-Algorithmus verwendet. Die Strömung im Spalt wird als stationär und laminar betrachtet. Darüber hinaus wird die Außenwand als perfekt isoliert angenommen. Als weitere Randbedingungen für die Simulation werden die Drehzahl des inneren Zylinders und der Volumenstrom am Eintritt vorgegeben. Die Fluideigenschaften (Wasser) werden als konstant angenommen. Die Simulationen wurden auf dem von der DFG-geförderten Pleiades-Cluster der Universität Wuppertal durchgeführt.

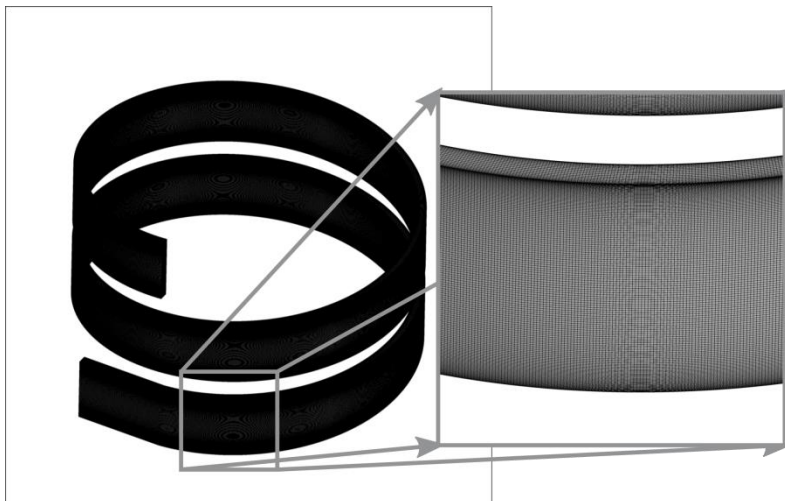


Abb. 4: Darstellung der Gitterstruktur des Simulationsgebietes

Wärmeübergang: Experiment und Simulation

Abbildung 5 zeigt den Vergleich der ermittelten Verläufe der Nusselt-Zahl über der Taylor-Zahl für den Versuch und die Simulation für den Fall $\Phi = 0.5$. Zusätzlich ist als Referenz die Nusselt-Kurve für eine reine Taylor-Couette-Strömung mit den entsprechenden Spaltdimensionen eingetragen (Rupp & Janoske (2015)). Man erkennt, dass im Gegensatz zum Fall einer klassischen Taylor-Couette-Strömung kein spontaner Anstieg der Nusselt-Zahl in diesem durchströmten Helix-System auftritt. Da die Nusselt-Zahl das Verhältnis von konvektiven zu diffusen Wärmetransportvorgängen beschreibt, muss im Fall des aktiv durchströmten Helixkanals auch für niedrige Umdrehungsgeschwindigkeiten bereits ein konvektiver Wärmetransport stattfinden, wohingegen beim klassischen Taylor-Couette-Fall, der konvektive Wärmetransport erst durch das Auftreten von Wirbeln und den dadurch bewirkten Queraustausch stattfindet (in diesem Fall ab einer Taylorzahl von etwa $Ta_{krit} = 42$). Dennoch wäre auch im Falle des durchströmten Helix-Kanals das Auftreten von Wirbelstrukturen, die den Wirbelwalzen der Taylor-Couette-Strömung ähneln, zu erwarten, wodurch auch der Nusselt-Zahl-Verlauf einen Sprung aufweisen könnte. Ein solcher Sprung ist aber weder aus den Ergebnissen des Versuchs noch aus den Ergebnissen der Simulation zu ermitteln. Vielmehr steigt die Kurve kontinuierlich an – in der Simulation allerdings steiler als im Experiment.

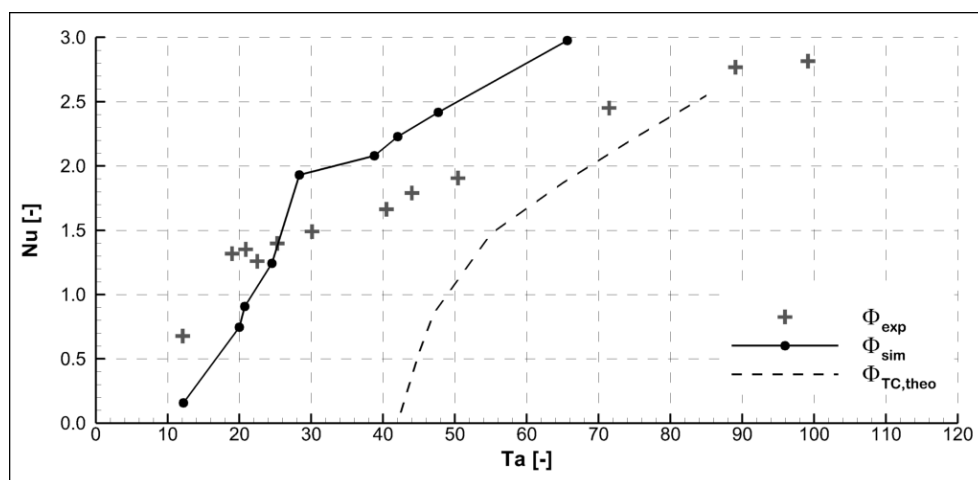


Abb. 5: Nusselt-Zahl über der Taylor-Zahl für den Fall $\Phi = 0.5$ (lineares Geschwindigkeitsprofil): Ergebnis des Versuchs (+) und der Simulation (●) im Vergleich zur Kurve für ein reines Taylor-Couette-System (- -) (Rupp & Janoske (2015)).

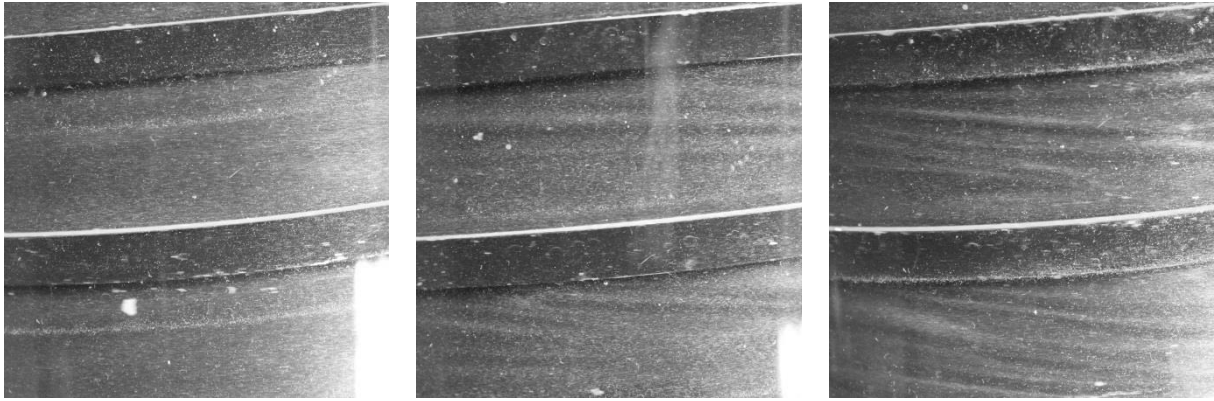


Abb. 6: Strömungsvisualisierungen für den Fall $\Phi = 0.5$ mittels Iridin®-Partikeln für verschiedene Taylor-Zahlen: links $Ta \approx 40$, Mitte $Ta \approx 50$ und rechts $Ta \approx 90$

Zum besseren Verständnis der Strömungsvorgänge im Helix-Spalt wurden Visualisierungen mittels Iridin®-Partikeln (Glimmer beschichtet mit Titandioxid + Zinnoxid, 10-60 μm) vorgenommen. Wie in Abbildung 6 zu erkennen, verändert sich das Strömungsfeld im Helix-Spalt mit zunehmender Taylorzahl. Für $Ta \leq 40$ sind die Partikel homogen im Strömungsfeld verteilt, wohingegen bereits bei $Ta \approx 50$ sich streifenartige Strukturen zeigen (Abb. 6, Mitte). Nimmt die Taylor-Zahl weiter zu, werden diese Streifenstrukturen deutlicher und es zeigt sich ein zunehmender Wellencharakter. Diese Streifenstrukturen können als Wirbelstrukturen interpretiert werden. Das Vorhandensein von Wirbelstrukturen für höhere Taylorzahlen wird im Folgenden mittels laser-optischer Geschwindigkeitsmessungen und Strömungssimulationen untersucht.

Strömungsfeld: Experiment und Simulation

Für den Fall $\Phi = 0.5$ wurden LDA-Messungen am Helix-Spalt durchgeführt. Dabei kam eine geschiftete 2D-LDV-Sonde mit 250 mm Brennweite bei 45 mm Strahlabstand der ILA GmbH zum Einsatz. Für die beiden senkrecht zu einander ausgerichteten Strahlen-Paare wurden jeweils 200 mW Diodenlaser verwendet mit einer Wellenlänge von 532 nm bzw. 561 nm. Die Sonde wurde so positioniert, dass die Umfangsgeschwindigkeit und die axiale Geschwindigkeit gemessen werden konnten. Um die Krümmung des Zylinders auszugleichen, wurde ein mit Wasser gefülltes Plexiglasэлеment mit ebener Außenfläche an der Messstelle positioniert. Über die Spalthöhe wurde ein Messraster mit einer örtlichen Auflösung von 0.5 mm und über die Spaltweite eine Auflösung von 2 mm gewählt.

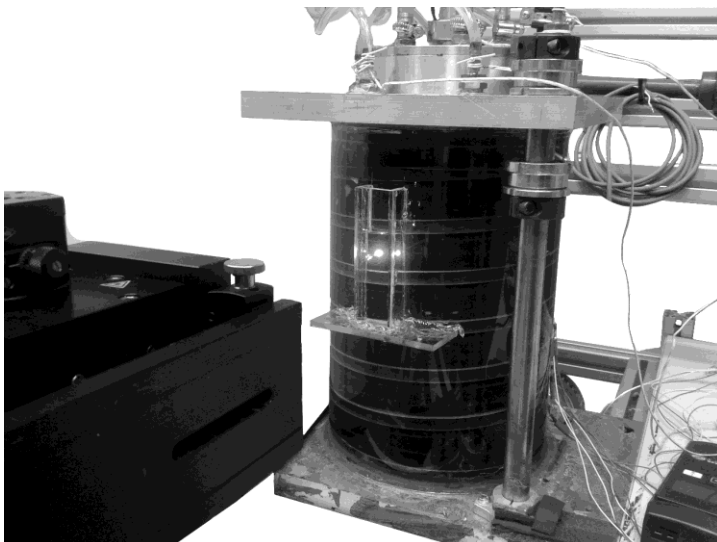


Abb. 7: Applikation der 2D-LDA-Sonde an dem Helix-Ringspalt.

Für jede einzelne Position des Messrasters wurden bis zu 100.000 Messwerte aufgenommen. Dabei wurde für jeden einzelnen Messwert der zugehörige Umfangswinkel mittels eines an der Achse der Helix angebrachten Drehgebers mit aufgenommen. Auf diese Weise kann für den rotierenden Zylinder eine phasengemittelte Geschwindigkeitsverteilung im Spalt ortsfest ermittelt werden. Im Folgenden werden die Ergebnisse der gemessenen und simulierten Geschwindigkeitsverteilung im Helixspalt für den Fall $\Phi = 0.5$ bei einer Taylorzahl von $Ta \approx 100$ diskutiert. Für diesen Fall liegen deutlich erhöhte Nusselt-Zahlen vor und es kann auf Basis der Strömungvisualisierungen (Abb. 6) angenommen werden, dass in diesem Zustand Wirbelstrukturen vorliegen. Wie in Abbildung 8 zu erkennen, zeigt das Ergebnis der stationären Simulation wirbelartige Strukturen in Form von kaskadierten Zonen mit geringen und höheren Axialgeschwindigkeiten. Eine Darstellung über 2D-Stromlinien in der Darstellungsebene zeigt Wirbelstrukturen sowohl an der still stehenden Außenwand, als auch an der rotierenden Innenwand, wobei die Wirbelstrukturen an der Innenwand ausgeprägter erscheinen.

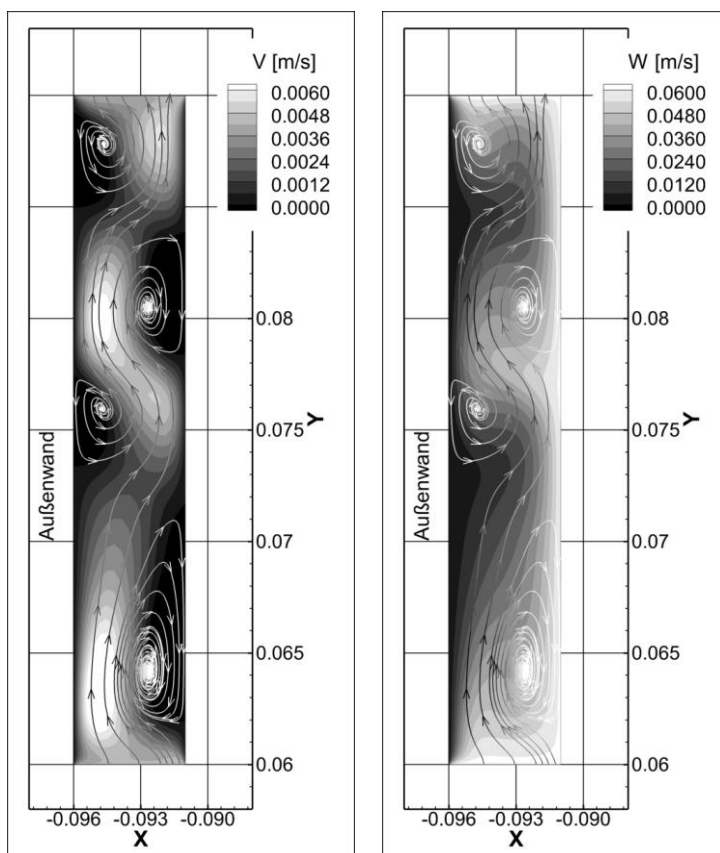


Abb. 8: Ergebnisse der stationären Simulation: typische Geschwindigkeitsverteilung im Spalt für $\Phi = 0.5$: dargestellt sind als Konturplot die Geschwindigkeit in axialer Richtung (V , links) und in Umfangsrichtung (W , rechts). Zusätzlich ist das 2D-Strömungsfeld im Schnitt über Stromlinien dargestellt.

Der Vergleich mit den LDA-Daten zeigt, dass auch in der Strömungsmessung ähnliche Strukturen gefunden werden können. Abb. 9 zeigt das simulierte und das gemessene Strömungsfeld in einer Schnittebene über den Helix-Spalt für verschiedene Umfangswinkel. Obwohl die örtliche Auflösung der LDA-Messung für die Detailerfassung der Wirbelstrukturen offensichtlich zu grob ist, können zusammenhängende Zonen relativ niedriger Vertikalgeschwindigkeiten vor allem an der stillstehenden Außenwand detektiert werden. Betrachtet man die örtliche Verteilung dieser Zonen für verschiedene Umfangswinkel kann sowohl in der Simulation, als auch im Experiment eine vertikale Verschiebung der Strukturen gegenüber der Kanalbegrenzung durch den Steg über den Umfangswinkel festgestellt werden. Betrachtet man wiederum die Visualisierung in Abb. 6 kann man auch hier einen entsprechenden Winkel zwischen den nahezu waagrecht verlaufenden Strukturen und dem Steg erkennen. Festzustellen bleibt, dass sich offensichtlich Wirbelstrukturen für höhere Taylor-

zahlen im Helix-Spalt ausbilden. Allerdings kann das Muster der Wirbelstrukturen aus der Simulation im Experiment nicht vollständig bestätigt werden; auch die Wanderung der Wirbelstrukturen in Abhängigkeit des Umfangswinkels ist nicht identisch, wie Abb. 9 zeigt. Große Wirbelstrukturen an der rotierenden Innenwand des Spalts konnten im Experiment nicht bestätigt werden.

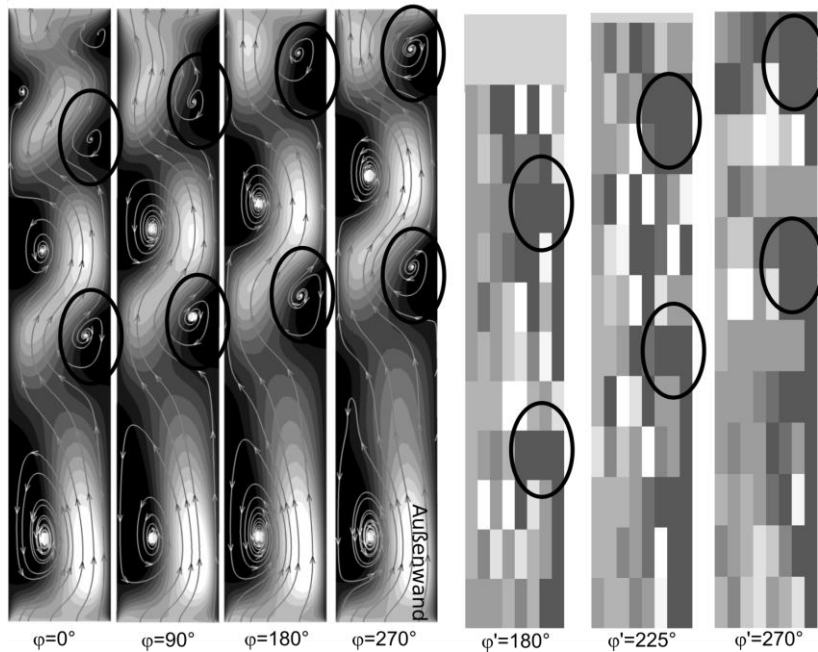


Abb. 9: Ergebnisse der Simulation im Vergleich zu LDA-Daten: Verteilung der Geschwindigkeit in axialer Richtung (V) im Spalt für $\Phi = 0.5$ dargestellt als Konturplot für verschiedene Drehwinkel– Skalen der dargestellten Geschwindigkeit und der Ort der Darstellungensebenen für Simulation und Experiment sind nicht identisch.

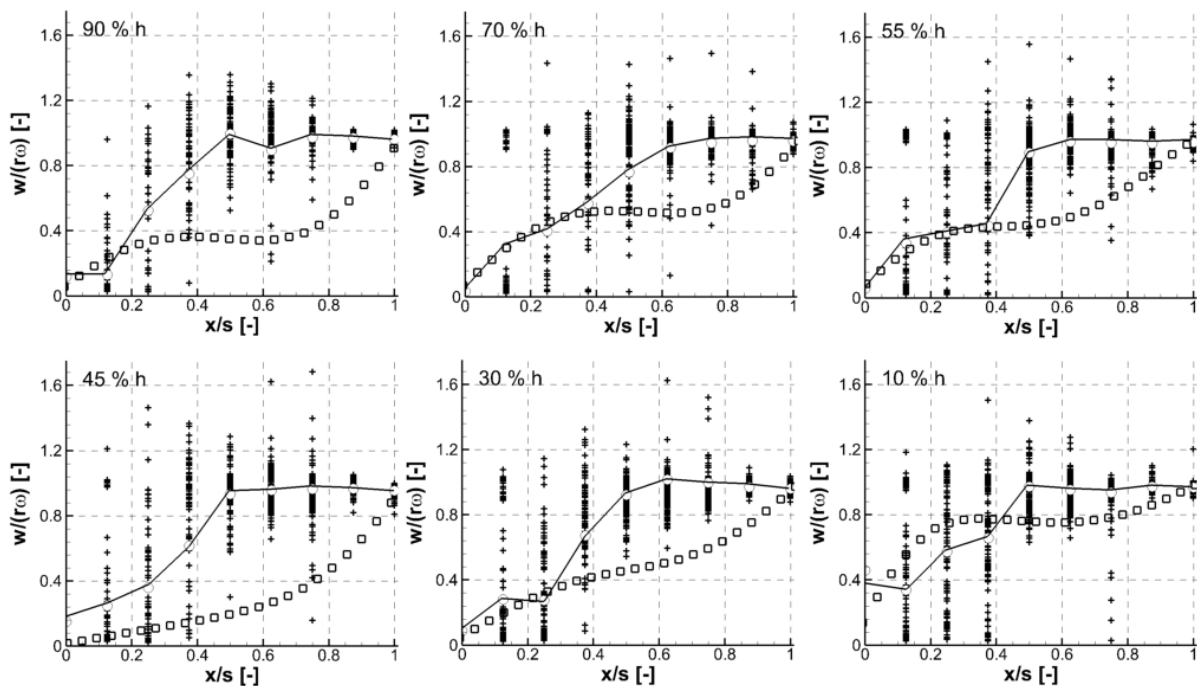


Abb. 10: Ergebnisse der Simulation (\square) im Vergleich zu LDA-Daten ($\circ, +$): Geschwindigkeit in Umfangsrichtung (W) im Spalt für $\Phi = 0.5$ dargestellt für verschiedene Höhen im Spalt

Ein weiterer Detailvergleich zwischen Simulation und Messung wird in Abbildung 10 gezeigt. Hier ist die Umfangsgeschwindigkeit an verschiedenen Höhenpositionen über die Spalthöhe h dargestellt. Zum einen wird in dieser Darstellung die starke Streuung der Messwerte deutlich, welche auch auf den instationären Charakter der Strömung zurückzuführen sind; für

einen direkten Vergleich sind weitere instationäre Rechnungen erforderlich. Zum anderen wird aber vor allem deutlich, dass sowohl in der Simulation, als auch in der Messung kein linearer Verlauf der Umfangsgeschwindigkeit festzustellen ist, obwohl die Durchflusszahl $\Phi = 0.5$ dies erwarten lassen würde. Allerdings zeigt das Ergebnis der Simulation gegenüber der Messung eine deutlich geringere Umfangsgeschwindigkeit in der Innenwand-nahen Kanalhälfte. Während der Geschwindigkeitsverlauf im zeitlichen Mittel nahe der stehenden Wand für Simulation und Experiment eine gute Übereinstimmung zeigt, zeigt das Geschwindigkeitsprofil in der Simulation eine Einbuchtung mit anschließender starker Geschwindigkeitserhöhung mit geringer werdendem Abstand zur rotierenden Innenwand. Dies korrespondiert mit der Analyse aus Abb. 9, bei der die großen Wirbelstrukturen aus der Simulation im Bereich der rotierenden Innenwand im Experiment nicht bestätigt werden können. Während das Geschwindigkeitsprofil der Messung eher einer schiebenden Strömung zuzuordnen wäre, zeigt das Profil bei der stationären Simulation eine Mischform aus einer schiebenden und einer schleppenden Strömung. Hier sind weitere Analysen erforderlich.

Zusammenfassung und Ausblick

Bei der hier untersuchten Konfiguration eines rotierenden Zylinderspalt-Systems ist dem inneren rotierenden Zylinder eine Helix-Struktur aufgeprägt. Dadurch kann zusätzlich unabhängig von der Rotation des Systems ein Volumenstrom durch den Helix-Spalt getrieben werden. Der Helix-Spalt wird dabei von einem warmen Fluid durchströmt, während das Innere des Zylinders von einem kalten Fluid durchströmt wird, so dass ein Wärmetauscher vorliegt. Das globale Verhalten des Wärmetauschers für verschiedene Durchflusszahlen Φ wird über eine Analyse der Nusselt-Zahl Nu in Abhängigkeit der Taylor-Zahl Ta untersucht. Entgegen der klassischen Taylor-Couette-Strömung zeigt sich in diesem Fall sowohl im Experiment als auch in der Simulation für keine der untersuchten Durchflusszahlen Φ ein sprunghafter Anstieg der Nusseltzahl über der Taylorzahl, wie es beim Einsetzen einer Strömungsinstabilität und der Ausbildung von Wirbeln zu erwarten wäre. Vielmehr steigt die Nusselt-Zahl kontinuierlich an; in der Simulation ist der Kurvenverlauf steiler als im Experiment. Strömungsvisualisierungen im Helix-Spalt zeigen dennoch wirbelartige Strukturen, die mit zunehmender Taylorzahl deutlicher werden. Zu ähnlichen Ergebnissen kommt die Strömungssimulation: es kann eine mäandrierende Strömungsstruktur identifiziert werden, die den Strömungskanal aufsteigt. Aus den Ergebnissen der LDA-Messungen im Helix-Spalt können ähnliche Strukturen gefunden werden. Allerdings sind die gemessenen Geschwindigkeiten im Bereich der rotierenden Innenwand höher als in der Simulation und die großen Wirbelstrukturen an dieser Wand, die von der Simulation vorhergesagt werden, können in der Messung nicht bestätigt werden. In der Simulation steigt die Nusselt-Zahl als Maß für den Wärmeaustausch schon bei geringeren Taylor-Zahlen als im Versuch an. Es ist zu vermuten, dass dieser Effekt durch die in der Simulation viel stärker ausgeprägten Wirbelstrukturen auftritt, da hier ein stärkerer Queraustausch stattfindet. Hier sind weitere Untersuchungen erforderlich.

Literatur

Ali, M.; Weidman, P.D.: On the stability of circular Couette flow with radial heating. In: Journal of Fluid Mechanics 220 (1990), 11, S. 53–84.

Chandrasekhar, S.: On Characteristic Value Problems in High Order Differential Equations Which Arise in Studies on Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability. In: The American Mathematical Monthly 61 (1954), Nr. 7, S. pp. 32–45.

- Chandrasekhar, S.: Hydrodynamic and hydromagnetic stability. 2. Oxford: Clarendon Press, 1970 (The international series of monographs on physics XIX)
- Deters, T.; Egbers, C.: The Taylor-Couette System with Radial Temperature Gradient. In: Journal of Physics: Conference Series 14 (2005), S. 138–142.
- Deters, T.; Egbers, C. ; Zanoun, E.-S. ; Guillerm, R.: Influence of Thermal Convection in Taylor-Couette System. In: Journal of Physics: Conference Series 137 (2008), Nr. 012015.
- Janoske, U., Piesche, M. (2005) Hydrodynamic instabilities in a new type of cross-flow filter, in: Proceedings zu FILTECH 2005, Okt. 2005, Wiesbaden.
- Jones, C. A.: Nonlinear Taylor Vortices and their Stability. In: Journal of Fluid Mechanics 102 (1981), S. 249–261. – Cambridge University Press
- Rupp, W., Janoske, U. (2015) Abschlussbericht im Forschungsprojekt VALENTINO, Förderkennzeichen: EF 2014 B
- Snyder, H. A.; Karlsson, S. K. F.: Experiments on the Stability of Couette Motion with a Radial Thermal Gradient. In: Physics of Fluids (1958-1988) 7 (1964), Nr. 10, S. 1696–1706.
- Taylor, G. I. (1923) Stability of a Viscous Liquid contained between Two Rotating Cylinders. In: Philosophical Transactions of the Royal Society of London 123, S. 289–343. – Series A