

Hochauflösende Laser-Doppler-Strömungsmessungen in einem Festplattenmodell

Highly resolving laser Doppler measurements of the flow inside a hard disk drive model

Lars Büttner¹, Yusuke Yaguchi², Katsuaki Shirai¹, Shinnosuke Obi², Jürgen Czarske¹

¹ Technische Universität Dresden
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Professur für Mess- und Prüftechnik
Helmholtzstr. 18, 01069 Dresden
E-Mail: Lars.Buettner@tu-dresden.de, Internet: <http://eeemp1.et.tu-dresden.de>

² Keio University, Department of Mechanical Engineering
3-14-1 Hiyoshi, Kouhoku-ku, Yokohama 223-8522, Japan

Schlagworte: Festplattenmodell, Spaltströmung, dreidimensionale Grenzschicht,
Laser-Doppler-Profilesensor
Key words: hard disk model, gap glow, three-dimensional boundary layer,
laser Doppler velocity profile sensor

Kurzfassung

Um dem ständig wachsenden Bedarf an Speicherkapazität zu begegnen, werden Festplatten mit immer kleineren Abmessungen und höheren Speicherdichten und mit immer höheren Drehzahlen gefertigt. Der Schreib-/Lesekopf schwebt bei neueren Modellen nur noch ca. 10 Nanometer über der Scheibe. Unter diesen Randbedingungen können strömungsinduzierte Scheibenvibrationen kritisch werden, wobei die genaue Wechselwirkung zwischen Scheibe und Strömung bisher nicht komplett verstanden ist.

Während das Strömungsfeld zwischen den einzelnen Scheiben bereits intensiv mittels numerischer Simulation und auch experimentell untersucht wurde, fehlen insbesondere für die Spaltströmung verlässliche experimentelle Daten, welche für die Entstehung der Vibrationen eine besondere Bedeutung besitzt. Der Grund dafür ist der schmale Spalt mit Spaltweiten im Submillimeterbereich, in dem sich eine komplexe dreidimensionale Grenzschicht mit starken Geschwindigkeitsgradienten in radialer und tangentialer Richtung ausbildet. Zu deren Vermessung wird eine entsprechend hohe Ortsauflösung benötigt, welche die meisten Meßsysteme prinzipbedingt nicht liefern können.

In diesem Beitrag wird erstmals über den Einsatz des Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilensors zur Vermessung des Geschwindigkeitsfeldes in einem Festplattenmodell aus Plexiglas berichtet. Der Schwerpunkt der Arbeiten lag dabei auf der Untersuchung des axialen Profils der Tangentialgeschwindigkeit der Spaltströmung. Es zeigte sich, daß der Profilsensor die Struktur der Strömung mit einer Ortsauflösung von ca. 22 µm sehr genau auflösen konnte, während ein konventionelles Laser-Doppler-Anemometer, welches zur Referenzierung eingesetzt wurde, aufgrund des örtlichen Mittelungseffektes das Strömungsprofil nur unzureichend wiedergab.

Es wurden die Strömungsfelder für den Fall einer konventionellen, unstrukturierten Innenwand und den Fall einer lamellierten Innenwand miteinander verglichen. Dabei stellte sich heraus, daß bei lamellierter Innenwand der Turbulenzgrad im Zwischenbereich der Scheiben wie erwartet reduziert wird, während er im Spalt jedoch ansteigt.

1.) Einleitung

Computerfestplatten gehören mit zu den meistverbreiteten Datenträgern überhaupt. Um dem ständig wachsenden Bedarf an Speicherkapazität zu begegnen, geht die Entwicklung in Richtung höherer Speicherdichten und damit kleineren Festplatten, aber auch zu immer höheren Drehzahlen. Momentan sind Festplatten mit Drehzahlen bis 15.000 min^{-1} kommerziell erhältlich, wobei jedoch zunehmend strömungsinduzierte Vibrationen problematisch werden. Da der Abstand vom Schreib-/Lesekopf zur Platte bei neuesten Entwicklungen lediglich 10 nm beträgt, können bereits kleinste Vibrationen verheerende Folgen haben.

Durch die schnelle Bewegung der Scheiben wird die umgebende Luft mitgeführt und es bildet sich ein komplexes dreidimensionales Strömungsmuster aus, welches auf die Scheibe rückwirkt und dort Vibrationen verursachen kann. Der genaue Mechanismus der Strömungs-Scheibe-Interaktion ist bisher nur teilweise verstanden.

Zu Charakterisierung der Scheibenvibrationen wurden bereits Schwingungssensoren wie Laser-Doppler-Vibrometer [1] oder kapazitive Sensoren [2] eingesetzt. Untersuchungen des Strömungsfeldes wurden bisher hauptsächlich aus numerischen Simulationen [3-5] abgeleitet. Experimentelle Untersuchungen wurden mit Hitzdrahtanemometrie [2,6], Particle-Image-Velocimetry [6] und Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) [7] durchgeführt, wobei sich diese jedoch auf den Bereich zwischen den Scheiben beschränkten.

Eine numerische Simulation zeigte jedoch, daß für das Verständnis der strömungsinduzierten Vibrationen die Spaltströmung zwischen den rotierenden Scheiben und dem Gehäuse von viel größerer Bedeutung ist, da es hierüber zu einem Strömungsaustausch zwischen den einzelnen Scheibenebenen kommen kann [3].

Gerade dieser Bereich ist jedoch experimentell sehr schwer zugänglich, was einerseits den schmalen Spaltweiten (weniger als 500 μm bei einer konventionellen 3,5 Zoll-Festplatte), andererseits der hier auftretenden komplexen dreidimensionalen Grenzschicht mit starken Geschwindigkeitsgradienten in radialer und tangentialer Richtung geschuldet ist.

Es hat sich gezeigt, daß die Vibrationen reduziert werden können, indem sehr kleine Spaltweite gewählt werden [4,5] und ein an der Innenseite lamelliertes Gehäuse verwendet wird, bei dem die Lamellen den Scheiben gegenüberliegen [8].

Wegen der geringen Spaltweiten und der damit einhergehenden großen Geschwindigkeitsgradienten sind optische Meßtechniken für die Untersuchung der Spaltströmung bisher kaum zum Einsatz gekommen. Bei der etablierten Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) beträgt die Ortsauflösung, definiert durch die Abmessungen des Meßvolumens, typischerweise $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m} \times 1 \text{mm}$. In dieser Arbeit wird erstmals der Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensor mit einer Ortsauflösung von ca. 22 μm für die Vermessung Spaltströmung in einem Festplattenmodell eingesetzt.

2.) Das Experiment

Das Kernstück der experimentellen Arbeiten ist ein Festplattenmodell, das im Wesentlichen aus dem Gehäuse mit einem Innendurchmesser von 310 mm und fünf Scheiben von je 3 mm Dicke sowie einem Motor zum Antrieb besteht, siehe Abb. (1). Die Spaltweite betrug, je nach Durchmesser der verwendeten Scheiben, 2 mm oder 5 mm, wobei im folgenden nur über die Meßergebnisse mit der 5 mm Spaltweite berichtet wird. Das Modell ist, abgesehen von der Welle und den Abstandshaltern der Scheiben, komplett aus Plexiglas gefertigt und entspricht in seinen Abmessungen einer konventionellen 3,5 Zoll-Festplatte im Maßstab 1:3,4. Als Arbeitsmedium wurde normales Leitungswasser verwendet. Bei einer Kreisfrequenz von $\Omega = 60 \text{ min}^{-1}$ ($\hat{=} 0,94 \text{ m/s}$ Umfangsgeschwindigkeit) wird eine Reynoldszahl von $\text{Re} = R^2\Omega/\nu = 1,4 \cdot 10^5$ (R: Scheibenradius, ν : kinematische Viskosität) erreicht, welche in etwa derjenigen einer handelsüblichen 3,5 Zoll-Festplatte entspricht. Um einen qualitativ hochwertigen optischen Zugang zu gewährleisten, sind in der oberen und unteren Gehäuseplatte über dem Spalt zwischen Gehäuse und Seitenwand zwei Fenster aus antireflexbe-

schichtetem Glas (Sigma Koki, WBMA-30C03-10-550) eingelassen, die optische Messungen der Spaltströmung in Vorwärtsstreurichtung erlauben.

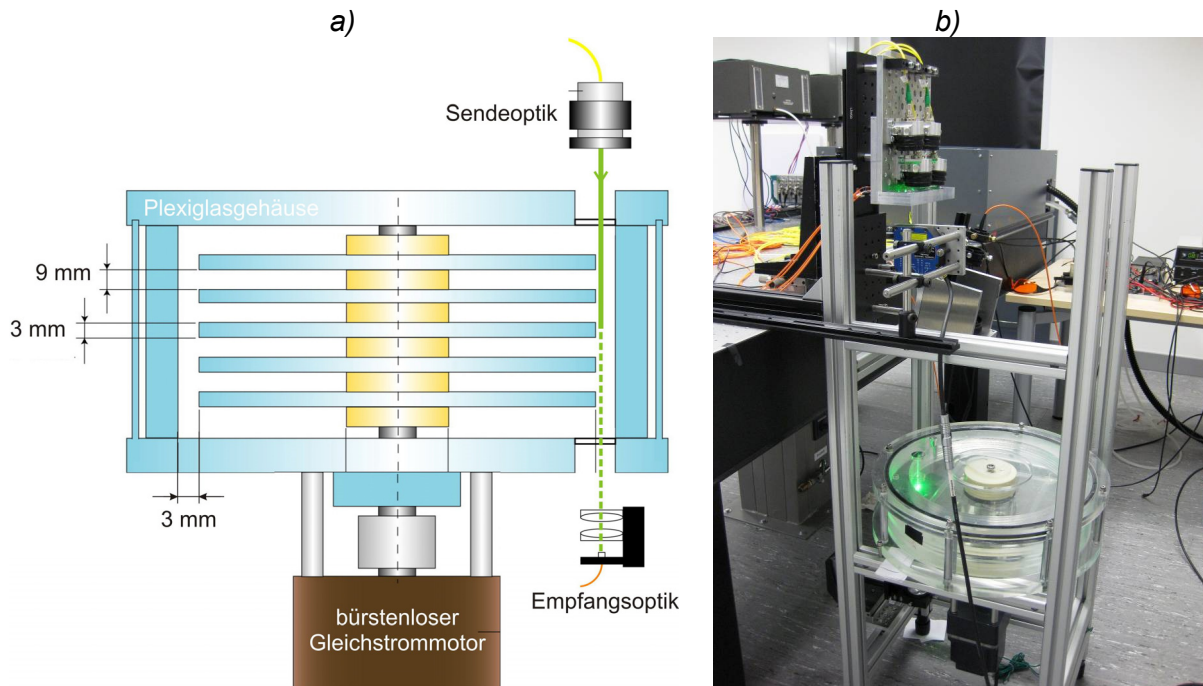


Abb. (1): a) Skizze des Versuchsaufbaus mit Festplattenmodell und Laser-Doppler-Sensoren. b) Foto des Aufbaus mit montiertem Profilsensor-Meßkopf.

Als Meßtechniken kamen sowohl ein konventionelles Laser-Doppler-Anemometer (LDA) als auch der Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensor zum Einsatz.

Das konventionelle LDA (Ono Sokki Co. Ltd., LV-5000) verwendet einen luftgekühlten Argon-Ionen-Laser mit 100 mW Ausgangsleistung als Lichtquelle und erzeugt mit einer Frontlinse der Brennweite 250 mm ein Meßvolumen mit den Abmessungen $0,1 \times 0,1 \times 1,2 \text{ mm}^3$. Da die Signale in Rückwärtsrichtung detektiert werden, wurde an der der Sonde gegenüberliegenden Seite ein Spiegel angebracht, welche die starken Vorwärtsstreulichtsignale in die Sonde zurücklenkte.

Über den Geschwindigkeitsprofilsensor wurde im Rahmen dieser Tagung schon öfter berichtet [9,10]. Er basiert auf der konventionellen Laser-Doppler-Anemometrie, verwendet aber zwei überlagerte, entgegengesetzt fächerförmige Interferenzstreifensysteme. Durch die Auswertung zweier Dopplerfrequenzen (je eine pro Streifensystem) kann nicht nur wie bisher die laterale Geschwindigkeitskomponente, sondern nun zusätzlich die axiale Position von Streuteilchen im Meßvolumen bestimmt werden. Daraus resultieren für die Strömungsmessung Vorteile wie eine deutliche höhere Ortsauflösung und eine reduzierte Meßunsicherheit der Geschwindigkeit.

Das hier verwendete Profilsensor-Meßsystem nutzt einen frequenzverdoppelten Festkörperlaser mit 532 nm Wellenlänge und 5 W Ausgangsleistung als Lichtquelle. Zur Signaltrennung kommt Frequenzmultiplex zum Einsatz, was den Vorteil hat, daß beide Streifensysteme dieselbe Wellenlänge haben und so – im Gegensatz zum Wellenlängenmultiplex – Dispersionseffekte im Wasser vermieden werden. Eine ausführliche Beschreibung des Meßsystems findet sich in [11]. Die Ortsauflösung in Wasser wurde basierend auf den Kalibrierdaten und dem erreichten Signal-zu-Rauschabstand der Burstsignale zu ca. 22 μm abgeschätzt.

Beide Meßsysteme wurden von oben durch das Glasfenster in den Spalt gelenkt, so daß die optische Achse parallel zur Rotationsachse ausgerichtet ist (z-Achse). Im Fall des Profilsensors ist die Empfangsoptik auf der gegenüberliegenden, unteren Seite angebracht, siehe Abb. (1a). Die Kalibrierung des Profilsensors, d.h. die Bestimmung der Streifenabstandsfunk-

tionen, erfolgte mit einer rotierenden Lochblende direkt im Aufbau, so daß die Einflüsse des Arbeitsmediums (Wasser) und des Fensters mit berücksichtigt sind. Gemessen wurden dann im Bereich der zentralen Scheibe jeweils das axiale Profil der tangentialen Geschwindigkeitskomponente U_θ im Spalt mit verschiedenen Wandabständen als Parameter, siehe Abb. (2c). Dabei wurden sowohl der konventionelle Fall einer unstrukturierten, glatten Wandung, Abb. (2a), als auch die Variante mit Lamellen, Abb. (2b), untersucht.

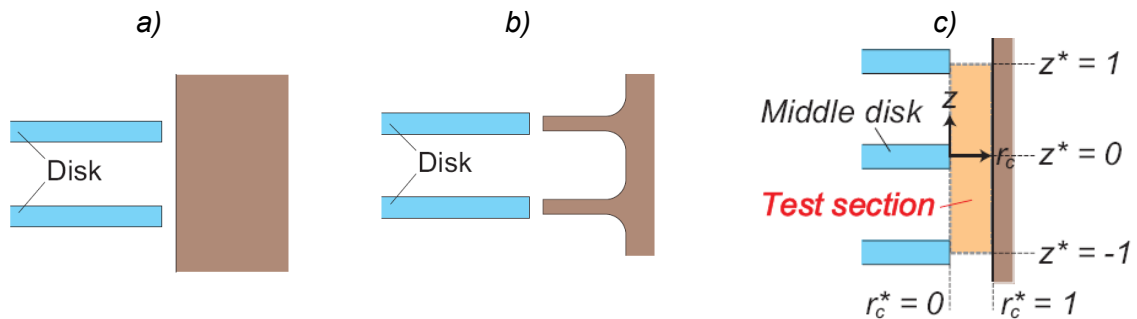


Abb. (2): Untersuchte Spaltkonfigurationen: a) mit konventioneller (glatter) Wandung, b) mit lamellierter Wandung. c) Darstellung des untersuchten Strömungsbereiches mit Nomenklatur der normierten Einheiten.

Um die Profile der unterschiedlichen Konfigurationen besser vergleichen zu können, werden im folgenden teilweise normierte Variablen verwendet, siehe dazu auch Abb. (2c). Dabei sind: z^* : normierte axiale Position ($z^*=0$: Mittelebene einer Scheibe, $z^*=1$: Unterseite der darüber liegenden Scheibe), r^* : normierte radiale Position im Spalt ($r^*=0$: äußere Kante der rotierenden Scheibe, $r^*=1$: Position des Gehäuses bzw. der Lamelle) sowie $U_\theta^* = U_\theta / (\Omega R)$ und $V_r^* = V_r / (\Omega R)$ die auf die Umfangsgeschwindigkeit der Scheibe bezogene tangentiale und radiale Strömungsgeschwindigkeitskomponente.

3.) Die Ergebnisse

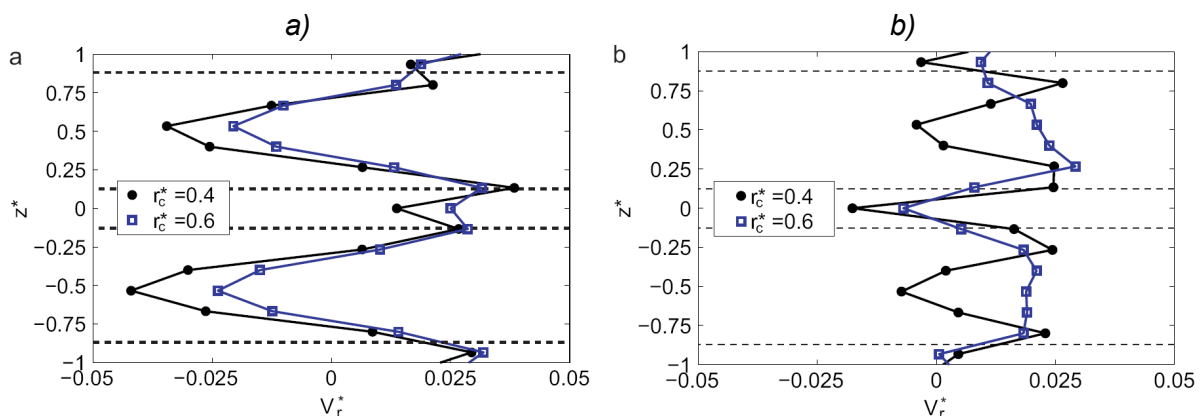


Abb. (3): Mit dem konventionellen LDA gemessene axiale Profile der Radialkomponente für zwei radiale Positionen, a) für eine glatte Innenwand und b) für eine lamellierte Wand.

Zunächst wurde das axiale Profil der radialen Geschwindigkeitskomponente $V_r^*(z)$ im Zwischenraum der Scheiben für zwei unterschiedliche radiale Positionen mit dem konventionellen LDA vermessen, siehe Abb. (3a,b), wobei sowohl ein konventionelles, glattes Gehäuse (Abb. (3a)) als auch ein an der Innenseite lamelliertes Gehäuse (Abb. (3b)) untersucht wurden.

Das Ergebnis kann wie folgt interpretiert werden: An den Scheibenober- und unterseiten bilden sich Grenzschichten aus, durch welche das Fluid infolge der wirksamen Zentrifugalkraft radial nach außen gedrückt wird (positive Geschwindigkeit). Am Gehäuse wird das Fluid umgelenkt und strömt im Zwischenraum der Scheiben ($z^*=0,5$) in Richtung der Rotationsachse zurück (negative Geschwindigkeit). Im Scheibenzwischenraum bildet sich damit ein gegensinnig rotierendes Wirbelpaar aus, ähnlich den Taylor-Wirbeln bei Taylor-Couette-Strömung. Die Messungen bestätigen die von Schuler et al. publizierten Ergebnisse [5]. Für den Fall des lamellierten Gehäuses ändert sich die Strömung derart, daß für den Abstand $r^*=0,6$ im Scheibenzwischenraum auch nach außen gerichtet ist.

Für die Untersuchung der Spaltströmung wurden nun zusätzlich Messungen mit dem Profilsensor durchgeführt, um hier den Vorteil aus der höheren Ortsauflösung zu ziehen. Die Abb. (4) zeigt die damit aufgenommenen Rohdaten in axialer Richtung an der radialen Position $r^*=0,4$ für eine Spaltweite von 5 mm, wobei die hellblau hinterlegte Fläche die Ebene der Scheibe kennzeichnet. Jeder Datenpunkt entspricht dabei einem ausgewerteten Streuteilchen, für das sowohl die Geschwindigkeit als auch die axiale Position bestimmt wurden.

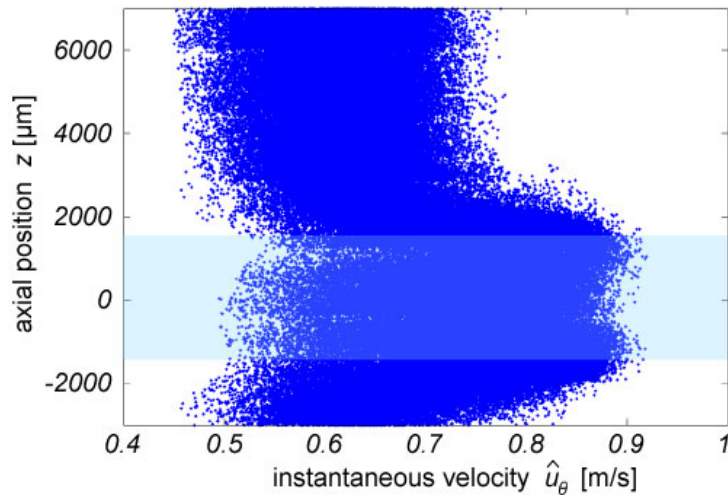


Abb. (4): Mit dem Profilsensor gemessene Rohdaten des axialen Profils der Tangentialgeschwindigkeit für 5 mm Spaltweite und eine glatte Wandung bei $r^*=0,4$. Der Datensatz besteht aus 245.000 Meßpunkten, wobei jeder einem ausgewerteten Streuteilchen entspricht. Der hellblau hinterlegte Bereich entspricht der Lage der rotierenden Scheibe.

Für die statistische Auswertung (Bestimmung von mittlerer Geschwindigkeit, Turbulenzgrad und höherer Momente) werden die Punkte in bestimmte Intervalle eingeteilt und dann für jedes Intervall die mittlere Geschwindigkeit und die Varianz berechnet. Da die Intervallbreite die Ortsauflösung der Messung mitbestimmt, kann damit die Ortsauflösung künstlich variiert und deshalb der örtliche Mittelungseffekt untersucht werden. Dabei ist zu beachten, daß mit abnehmender Intervallbreite die Anzahl der Daten pro Intervall ebenfalls abnimmt, so daß immer ein Kompromiß zwischen hoher Ortsauflösung (kleine Intervallbreite) und hoher statistischer Verlässlichkeit (hohe Datenanzahl) gefunden werden muß.

In Abb. (5) sind die ausgewerteten Daten dargestellt, wobei zur Untersuchung des Mittelungseffektes drei verschiedene Intervallbreiten gewählt wurden. Zum Vergleich sind die Meßdaten des konventionellen LDA ebenfalls mit eingetragen. Es ist zu erkennen, daß für das konventionelle LDA und für den Profilsensor mit großer Intervallbreite (1600 µm, entspricht ungefähr der Ortsauflösung des konventionellen LDA) der Einbruch im Profil von Geschwindigkeit und Turbulenzgrad im Zentrum der Scheibe nicht aufgelöst werden kann. Verringert man für die Daten des Profilsensors die Intervallbreite auf 300 µm, dann erscheinen

sowohl im Geschwindigkeits- als auch im Turbulenzgradprofil zwei ausgeprägte Maxima am oberen und unteren Rand der Scheibe und einer etwas geringeren Geschwindigkeit bzw. Turbulenzgrad in der Scheibenmitte. Diese Struktur konnte hier erstmals mit dem Profilsensor aufgelöst werden. Bei einer weiteren Verringerung konvergieren die Profile gegen die „wahren“ Funktionen und eine weitere Verringerung der Intervallbreite ist dann für die Bestimmung der Profile nicht mehr sinnvoll.

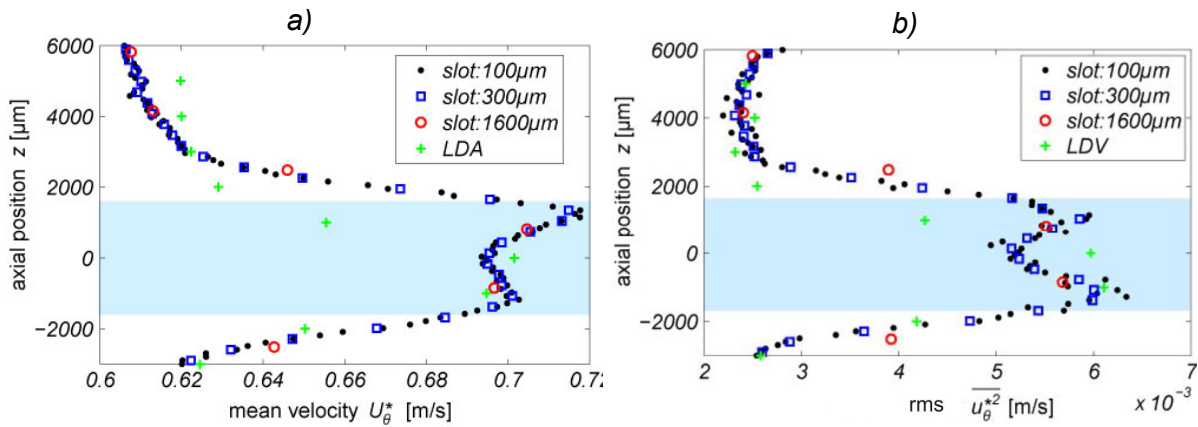


Abb. (5): Aus Abb. (4) gewonnene Profile a) der mittleren Tangentialgeschwindigkeit und b) des Turbulenzgrades für 5 mm Spaltweite und glatte Wandung bei $r^*=0,4$. Für die Beurteilung der erforderlichen Ortsauflösung wurden unterschiedliche Intervallbreiten gewählt. Zum Vergleich sind die Daten des konventionellen LDA ebenfalls mit eingezeichnet.

Das Auftreten der zwei Maxima kann wieder mit den oben erwähnten Wirbeln erklärt werden: Das an der Scheibenober- und Unterseite durch die Zentrifugalkraft nach außen gedrückte Fluid gewinnt es an Impuls und löst sich schließlich an der Kante von der Scheibe ab. Dort trifft es auf die Grenzschicht am Gehäuse, was es zu einem Impulsaustausch und damit zu einem Anstieg von Geschwindigkeit und Turbulenzgrad in der Verlängerung der Scheibenober- und unterseite im Vergleich zur Scheibenmitte führt. Es entsteht ein großer Geschwindigkeitsgradient sowohl in axialer als auch in radialer Richtung.

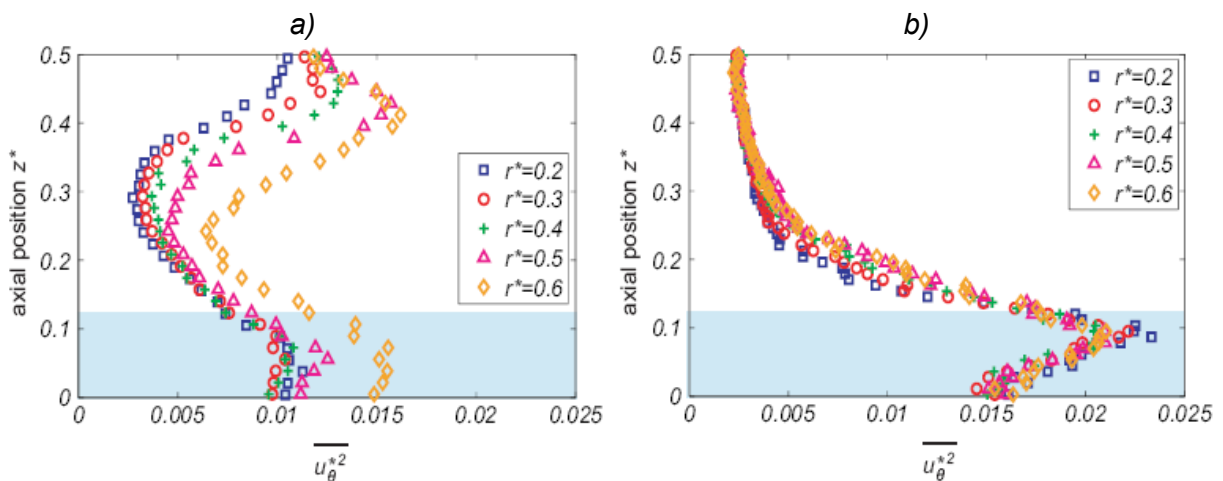


Abb. (6): Turbulenzgradprofile an fünf verschiedenen radialen Positionen für a) eine glatte Innenwand und b) die lamellierte Innenwand.

Die Abb. (6) vergleicht für fünf radiale Positionen die Turbulenzgradprofile bei glatter Wand (Abb. (6a)) mit der lamellierte Wand (Abb. (6b)). Deutlich ist zu erkennen, daß der ge-

wünschte Fall der Turbulenzreduzierung mit lamellierter Wandung zwar im Zwischenbereich der Scheiben auftritt, während jedoch im Spalt selbst eine deutliche Zunahme der Turbulenz zu verzeichnen ist. Hier ist zukünftig ein Abgleich mit numerischen Simulationen notwendig.

4.) Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde der Einsatz des Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensors zur erstmaligen Untersuchung der Spaltströmung einem Festplattenmodell vorgestellt. Die Ergebnisse stehen in Übereinstimmung mit den Referenzdaten eines konventionellen Laser-Doppler-Anemometers, wobei der Profilsensor aber aufgrund der höheren Ortsauflösung von ca. 22 μm zusätzliche Strukturen auflösen konnte. Die Spaltströmung ist erwartungsgemäß hochgradig dreidimensional mit großen Geschwindigkeitsgradienten in radialer und axialer Richtung. Die gemessene Geschwindigkeitsverteilung im Zwischenraum der Scheiben ist konsistent mit den Erwartungen.

Weiterhin wurde der Einfluß einer lamellierten Gehäuseinnenwand auf das Strömungsfeld untersucht. Es stellte sich heraus, daß im Vergleich zu einer glatten, unstrukturierten Wandung zwar wie erwartet der Turbulenzgrad im Zwischenbereich der Scheiben abnimmt, jedoch im Spalt selbst erhöht wird. Zur Klärung der genauen Mechanismen sind weitere Experimente und der Abgleich mit numerischen Simulationen notwendig.

Eine tiefergehende Untersuchung der Spaltströmung in Abhängigkeit von verschiedenen Geometrien und Parametern erscheint angesichts der erzielten Ergebnisse aussichtsreich. Beispielsweise kann für zukünftige Experimente mit einem seitlich auf Höhe der mittleren Scheibe eingebrachten Zugangsfenster das radiale Geschwindigkeitsprofil mit dem Profilsensor genauer untersucht werden.

Danksagung

Es wird Herrn A. Voigt für die Bereitstellung des FM-Profilsensorsystems gedankt. Weiterer Dank gebührt Herrn G. Paschew für die Unterstützung beim mechanischen Aufbau, Herrn R. Häußler und den Mitarbeitern der Fakultätswerkstatt Abteilung Präzisionsmechanik, Herrn M. Löper und Herrn S. Pötschke. Dem japanischen Storage Research Consortium und dem Deutschen Akademischen Austauschdienst (DAAD) wird für die Förderung des Forschungsaufenthaltes von Herrn Y. Yuguchi gedankt. Die Arbeiten wurden teilweise durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG, FKZ: CZ55/20-1) gefördert.

Literatur

- [1] C.K. Pang, E.H. Ong, G. Guo, H. Qian, "Experimental dynamic characterizations and modelling of disk vibrations for HDDs", ISA Transactions 47, S. 85-93, 2008
- [2] R. Fukaya, S. Obi, S. Masuda, M. Tokuyamam, "Flow instability and elastic vibration of shrouded corotating disk systems", Exp. Fluids 33, S. 369-373, 2002
- [3] M. Tatewaki, N. Tsuda, T. Maruyama, "An Analysis of Disk Flutter in Hard Disk Drives in Aerodynamic Simulations", IEEE Transaction on Magnetics 37(2), S. 842-846, 2001
- [4] S. Imai, Mikio Tokuyama, Yuzo Yamaguchi, "Reduction of Disk Flutter by Decreasing Disk-to-Shroud Spacing", IEEE Transaction on Magnetics 35(5), S. 2301-2303, 1999
- [5] M. Al-Shannag, J. Herrero, J.A.C. Humphery, F. Giralt, "Effect of Radial Clearance on the Flow between Corotating Disks in Fixed Cylindrical Enclosures", Trans. ASME. J. Fluids. Eng., Vol. 124, S. 719-727, 2002
- [6] S. Kanagai, J. Suzuki, S. Obi, S. Masuda, "Flow instability and disk vibration of shrouded corotating disk system", ASME J. Fluids Eng. 129, S. 1306-1313, 2007

- [7] C.A. Schuler, W. Usry, B. Weber, J.A.C. Humphrey, R. Greif, "On the flow in the unobstructed space between shrouded corotating disks", *Phys. Fluids A*, Vol. 2, S. 1760–1770, 1990
- [8] Y. Yamamoto, S. Obi, S. Masuda, "Effect of disk-shroud spacing on flow induced vibration in corotating disk system", *ASME Information Storage and Processing Systems Conference*, 2004/6/14-16
- [9] J. Czarske, L. Büttner, T. Razik, H. Müller, D. Dopheide, S. Becker, H. Lienhart, F. Durst, "Ortsaufgelöste Vermessung turbulenter Scherströmungen mittels Laser-Doppler-Profilsensor", 11. GALA-Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik", S. 1.1-1.8, Braunschweig, 9.-11. Sept. 2003
- [10] L. Büttner, A. Voigt, C. Bayer, K. Shirai, J. Czarske, N. Pape, V. Strunck, H. Müller, „Optisches Durchflusssensor für HD-Erdgas: Präzise Durchflussmessung mit dem Laser-Doppler-Profilsensor“, 15. GALA-Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik", S. 43.1-43.9, Rostock, 4.-6. Sept. 2007
- [11] L. Büttner, C. Bayer, A. Voigt, J. Czarske, H. Müller, N. Pape, V. Strunck, „Precise flow rate measurement of natural gas under high pressure with a laser Doppler velocity profile sensor“, *Exp. in Fluids* 45(6), S. 1103 – 1115, 2008