

## VERGLEICHENDE BESTIMMUNG DES DRALLVERLAUFS IN SCHNELL ROTIERENDEN LABYRINTHDICHTUNGEN MITTELS LDA UND CFD

J. Denecke, K. Dullenkopf, H.-J. Bauer

Lehrstuhl und Institut für Thermische Strömungsmaschinen  
Universität Karlsruhe (TH)  
76128 Karlsruhe

### Abstract

Labyrinthdichtungen sind ein wesentliches Dicht- und Regulierungselement im Turbomaschinenbau. Insbesondere die Funktion des Kühlluftsystems von Gasturbinen (s. Abb.1) wird durch das kontrollierte Durchflussverhalten von Labyrinthdichtungen sichergestellt. In modernen Auslegungsverfahren ist auch der Verlauf der Umfangsgeschwindigkeit des Leckagemassenstroms (Drallverlauf) von wesentlicher Bedeutung. Im Gegensatz zu zahlreichen Veröffentlichungen von Ergebnissen in nicht rotierenden Prüfständen wird in diesem Beitrag erstmals über detaillierte Messungen des Verlaufs der Axial- und Umfangsgeschwindigkeit in einer schnell rotierenden Stufenlabyrinthdichtung mittels Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) berichtet. Die ermittelten Ergebnisse weisen z.T. auf ein deutlich instationäres Verhalten der Strömung hin. Da für die Skalierung der Ergebnisse auf Triebwerksbedingungen numerische Simulationen unverzichtbar sind, werden die Möglichkeiten und Grenzen einer zeitlich stationären Berechnung in einem Vergleich der charakteristischen Strömungsgrößen aufgezeigt. Von experimentell validierten numerischen Verfahren ist eine wesentliche Verbesserung der Auslegung von Labyrinthdichtungen in Kühlluftsystemen von Gasturbinen zu erwarten.

### Einleitung

Wichtige Aufgaben der Labyrinthdichtungen sind neben der Aufteilung der Kühlluft auf die Stufen und letztlich die einzelnen Schaufeln, die Kühlung der Rotorscheiben, eine ausrei-

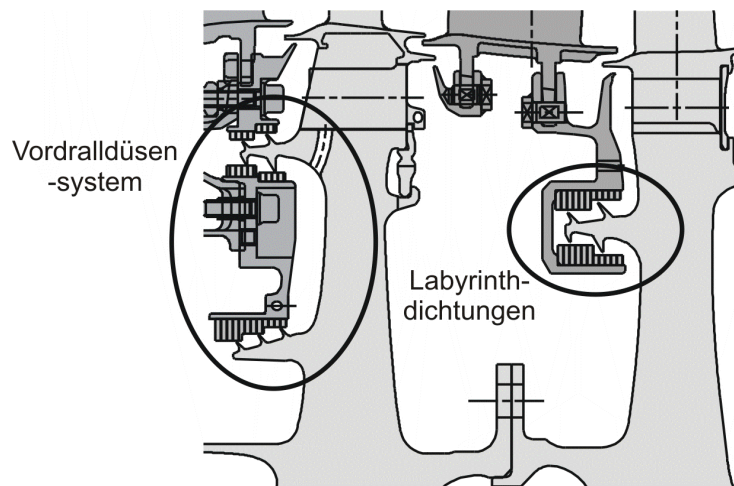


Abb. 1: Labyrinthdichtungen im Kühlluftsystem von Gasturbinen,  
(schematisch nach Peitsch et al., 2003)

chende Sperrluft an der Spaltdichtung zum Hauptgasmassenstrom, sowie der Axialschubausgleich zur Reduzierung der Lagerlast. In modernen Auslegungsverfahren ist zusätzlich zum Durchflussverhalten die Kenntnis des Verlaufs der Umfangsgeschwindigkeit in Labyrinthdichtungen (auch „Drallverlauf“) von entscheidender Bedeutung. Nachfolgende Komponenten, wie das in Abb.1 dargestellte Vordralldüsensystem, werden vom Austrittsdrall der Dichtung beeinflusst. Bei großen Rotorumfangsgeschwindigkeiten definiert der Drallverlauf außerdem die reibungsbedingte Temperaturerhöhung, die bei der Bemessung des Kühlluftmassenstroms berücksichtigt werden muss. Für die Thermalanalyse des Systems sind der Drall und die Temperatur am Austritt der Dichtung ebenfalls wesentliche Randbedingungen. Um die strukturelle Integrität der Labyrinthdichtung zu gewährleisten, muss sichergestellt sein, dass keine aerodynamisch verursachten Instabilitäten auftreten. Diese werden wesentlich durch die Umfangsgeschwindigkeit in den Kammern der Dichtung verursacht, so dass die genaue Kenntnis dieser Geschwindigkeitskomponente auch hier für die Auslegung von wesentlicher Bedeutung ist.

Bereits in der Vergangenheit wurde das Strömungsfeld von inkompressibel durchströmten rotierenden Durchblicklabyrinthdichtungen von Morrison et al. (1990) oder Stoff et al. (1980) mittels LDA vermessen. Wittig et al. (1987) zeigten, dass mit Hilfe des Standard  $k-\epsilon$  Turbulenzmodells und logarithmischem Wandgesetz die Messungen von Morrison am besten wiedergegeben werden konnten. Problematisch war dabei allerdings, dass das Rechengebiet an der ersten Spitze begann und hier die Eintrittsrandbedingungen zum Teil unbekannt waren.

Um eine Validierung numerischer Simulationen auch an Stufenlabyrinthdichtungen mit ihrem komplexeren Strömungsfeld zu ermöglichen, wurde in einem aktuellen Forschungsvorhaben am Institut für Thermische Strömungsmaschinen ein Prüfstand zur Untersuchung schnell rotierender Labyrinthdichtungen entwickelt. Die Betriebsgrößen wurden von triebwerkstypischen Bedingungen auf nur leicht erhöhten Druck und Umgebungstemperatur skaliert, um den Versuchsaufwand zu verringern.

### **Versuchsaufbau und verwendete Messtechnik**

Der Versuchsaufbau besteht aus einem TiAl Rotor in einem Gehäuse, das die Statorfläche der Dichtung, die Lagerung und einen Drallerzeuger enthält (s. Abb.2). Die Rotorscheibe wurde für maximale Drehzahlen von  $11000\text{min}^{-1}$  ausgelegt, was bei einem mittleren Dichtungsdurchmesser von  $D=0.257\text{m}$  einer Umfangsgeschwindigkeit von  $c_t=300\text{m/s}$  entspricht. Der Rotor wird direkt von einem Elektromotor mit  $38\text{kW}$  Leistung angetrieben. Ein Drehmomentsensor steht zur Limitierung des Drehmoments beim Anfahren zur Verfügung.

Zusätzliche Betriebsdaten, wie die Lagertemperaturen und die Messwerte von Vibrationssensoren werden aus Sicherheitsgründen ständig überwacht. Präzisionskugellager in Hybridbauweise (Keramikugeln und Stahlringe) erlauben den Verzicht auf eine Ölkühlung. An der Lagerkammer wird zusätzliche Sperrluft so zugegeben, dass die Druckdifferenz über das Lager verschwindet und die Gesamtmassenbilanz nicht verfälscht wird. Es kann ein maximaler Massenstrom von  $0,5\text{kg/s}$  bei  $10\text{bar}$  bei einer Eintrittstemperatur von  $300\text{K}$  zugeführt werden. Der Massenstrom wird von Messblenden verschiedener Durchmesser in einem Messbereich von  $50\text{g/s}$  bis  $500\text{g/s}$  erfasst.

Mit einem Drallerzeuger am Eintritt können in einem weiten Bereich variierende Eintrittsrandbedingungen eingestellt werden. Dabei wird der Massenstrom durch Axialbohrungen zugeführt, um Eintrittsbedingungen ohne Vordrall vorzugeben. Um einen Vordrall einzustellen, wird der Massenstrom auf Axial- und Tangentialbohrungen aufgeteilt. Abb.3 zeigt eine perspektivische Ansicht des Drallerzeugers. Die symmetrische Konstruktion des Prüfstands wird zukünftig auch die Untersuchung mit umgekehrter Strömungsrichtung erlauben (diver-

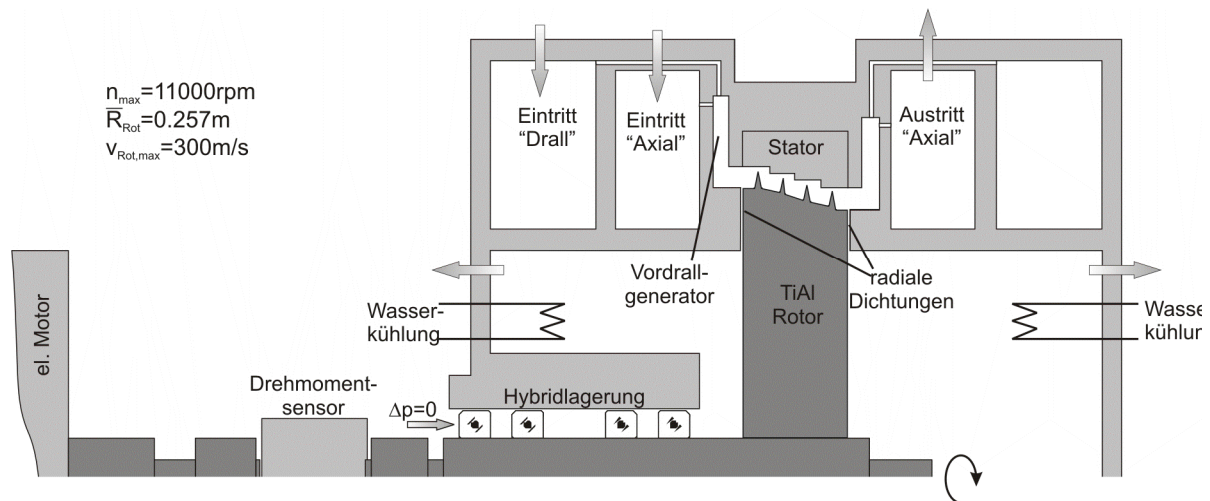


Abb. 2 Schematische Beschreibung des Versuchsaufbaus

gente Labyrinthdichtung).

Die vierspitziige konvergente Labyrinthdichtung hat einen Eintrittsradius von  $R_0=0,256\text{m}$  und einen Austrittsradius von  $R_1=0,250\text{m}$ . Die Geometrie wird in Abb.5 und Tab.1 definiert. Das Druckverhältnis kann von  $p=1,01$  bis  $p=1,8$  eingestellt werden. Der Austrittsdruck wird dabei von einem zusätzlichen Ventil auf  $p_1=2\text{bar}$  eingestellt. Dieser erhöhte Druck verhindert zum einen das Grenzschichtpumpen des Rotors mit Hilfe einer Absaugung durch die radiale Spaltdichtung am Ein- und Austritt der zu untersuchenden Labyrinthdichtung. Nur mit einer solchen Absaugung am Radialspalt kann der Vordrall wirklich unabhängig von der Drehzahl eingestellt werden. Zum anderen kann der Axial Schub der Lager auf ein bestimmtes Maß beschränkt werden. Der abgesaugte Massenstrom wird vor dem Austritt mit Heißfilmsensoren gemessen. Um die Temperatur im Radseitenraum zu kontrollieren, wird ständig Luft entnommen, in einem Wärmetauscher gekühlt und dem Radseitenraum wieder zugeführt. Die Drücke werden an mehreren Stellen am Umfang mit Differenzdrucksensoren erfasst, die eine Genauigkeit von  $\pm 0,05\%$  aufweisen. Die elektrischen Signale der Sensoren werden über eine 16-Bit A/D-Karte digitalisiert. Die Bestimmung der Leckage ist sehr sensitiv bezüglich der Änderung der Spaltweite aufgrund von Ausdehnung durch die Rotation der Scheibe. Daher wird die Spaltweite mit einem optischen Abstandsensor mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,003\text{mm}$  bestimmt. Mit einer FE-Rechnung wurde zuvor nachgewiesen, dass die

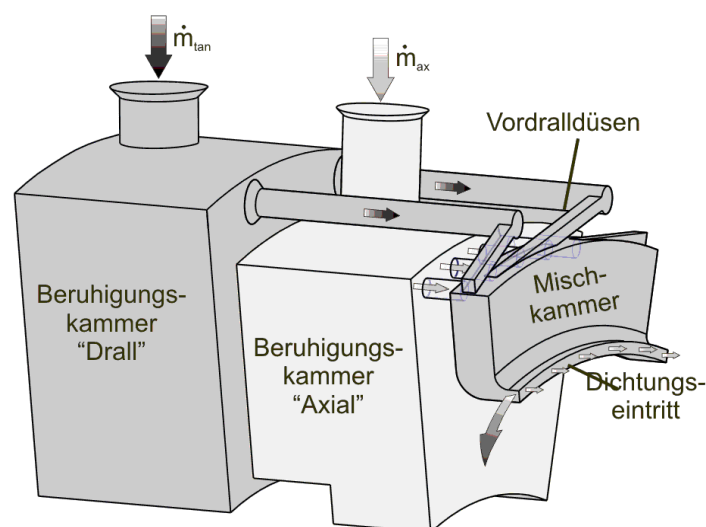


Abb. 3: Perspektivische Ansicht des Drallerzeugers

Tab. 1: Charakteristische Maße der Labyrinthdichtung

| c/t   | h/t | H/t  | a/t | b/s   | t   |
|-------|-----|------|-----|-------|-----|
| 0,155 | 0,5 | 0,25 | 0,5 | 0,323 | 8mm |

Dehnung der einzelnen Spitzen gegenüber der Gesamtdehnung des Rotors vernachlässigbar ist. Die gemessenen Spaltweiten werden als Vorgabe für das numerische Modell verwendet. Weitere Angaben zum Versuchsaufbau sind in Denecke et al. (2001) beschrieben.

### Laser-Doppler Anemometer (LDA)

Es wurde ein zweidimensionaler Aufbau in Rückstreuung gewählt, um den Aufwand für den optischen Zugang zu minimieren. Die zeitgemittelten axialen und tangentialen Geschwindigkeitskomponenten sind für eine Validierung der Ergebnisse der numerischen Simulation in diesem Fall ausreichend. Für die Messungen wurde ein Dantec LDA-System mit einer 60mm-2D-Sonde verwendet. Die Signale wurden mit einem in den BSA-Prozessoren („Burst Signal Analyser“) gesetzten Zeitfenster koinzident erfasst.

Die besondere Herausforderung der Messaufgabe liegt in den geringen Abmessungen des optisch erreichbaren Bereichs der Labyrinthkammern von nur  $4 \times 5 \text{ mm}^2$ . Um hier Geschwindigkeitsänderungen detailliert auflösen zu können, muss das Messvolumen so klein wie möglich eingestellt werden. Erreicht wird dies durch die Kombination zweier Strahlaufweitungen, so dass der Strahldurchmesser an der Frontlinse (240mm Brennweite) ca. 4mm beträgt. Das Messvolumen selbst hat eine Länge von ca.  $260 \mu\text{m}$  und einen Durchmesser von  $40 \mu\text{m}$ . Als optischer Zugang wurde ein Fenstereinsatz für den Stator gefertigt, der die Geometrie nur minimal verändert (s. Abb.4a). Die Stufen der Dichtung werden durch die versetzten Glasblöcke wiedergegeben. Die Verringerung der Kammerhöhe in der Glasmitte durch das ebene Fenster ist über der Spitze mit 1,3mm Spaltweite kleiner als 0,6% und in der Kammermitte kleiner als 0,15%. Um die Funktionsfähigkeit dieses Aufbaus zu prüfen, wurde das Fenster zunächst auf einer optischen Bank aufgebaut, wo umfangreiche Tests mit der auch für die späteren Messungen verwendeten LDA-Konfiguration durchgeführt wurden (s. Abb.4b). Insbesondere die Signalqualität bei Annäherung an den Kammerboden und für Po-

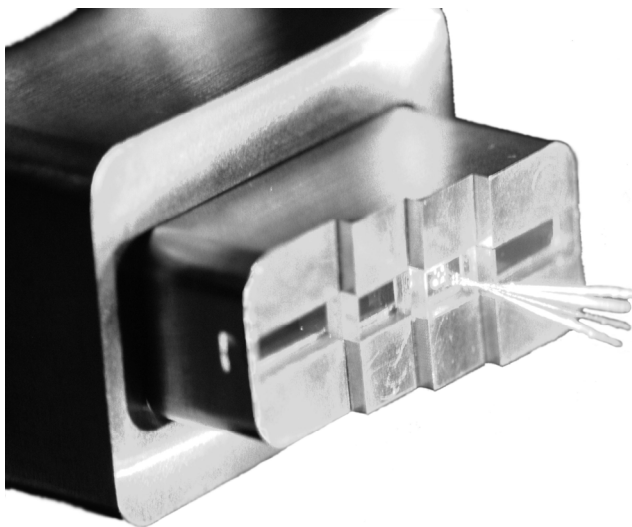


Abb. 4a: Optischer Zugang ohne Veränderung der Statorgeometrie

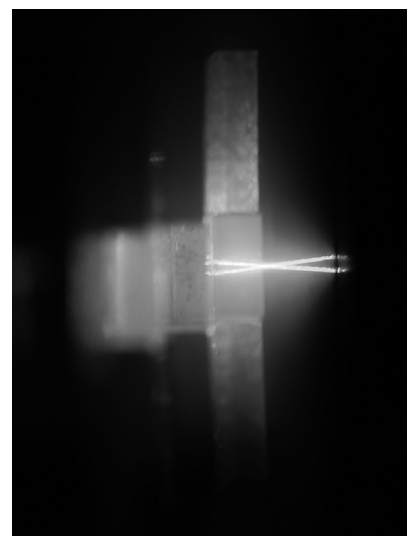


Abb. 4b: Strahlengang in der Labyrinthkammer

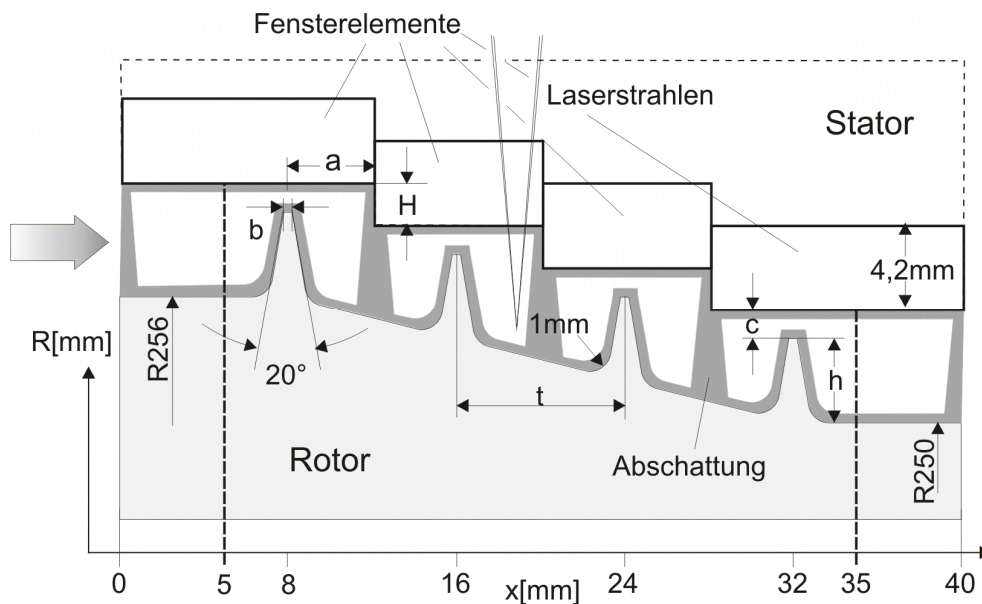


Abb. 5: Definition der Labyrinthgeometrie, Messbereich und Verschattung

sitionen in Fensternähe wurden untersucht. Es konnten Messungen bis zu einem Abstand von ca. 1,5 Messvolumina zur Wand wie zum Fenster durchgeführt werden. Bei geringeren Abständen nahm das Rauschen stark zu, so dass hier keine Messungen mehr durchgeführt werden konnten.

Der Bereich der Verschattung ist in Abb. 5 dargestellt. Die Sonde wurde um  $45^\circ$  gedreht, so dass bei den erwarteten großen Umfangs- und kleinen Axialgeschwindigkeiten die transformierten Komponenten etwa gleich groß waren. Weiterhin ist die Abschattung so gering und das Fenster konnte kleiner gebaut werden.

### Fehlereinflüsse und Mittelungsverfahren

Als Seeding Partikel wurden Silikonöltröpfchen benutzt (Dow Corning Fluid 200 1.5cs), die in einem Aerosolgenerator erzeugt wurden, der auf dem Prinzip der „Lazkin nozzle“ basiert. Die wesentlichen Einflüsse auf die erzeugten Tropfengrößen dieser Bauart wurden in Kähler et al. (2002) detailliert beschrieben. Die Größenverteilungen der Partikel wurden am ITS mit einem Beugungsspektrometer der Fa. Sympatec (Clausthal-Zellerfeld) vermessen, wobei sich Tropfendurchmesser  $D_{10} = 0,93 \dots 1,66 \mu\text{m}$  ergaben. Nach den bekannten Ergebnissen zahlreicher Untersuchungen kann davon ausgegangen werden, dass die Partikel klein genug sind, um der Strömung zu folgen. Die Fensterverschmutzung mit dem erzeugten Aerosol war gering. Es reichte aus, vor jedem Betriebspunkt das Fenster zu reinigen.

Da insbesondere die Umfangsgeschwindigkeitskomponente gemessen werden sollte, muss der optische Zugang radial von außen erfolgen. Damit liegt jedoch die größte Ausdehnung des Messvolumens längs der optischen Achse im Bereich der größten Geschwindigkeitsgradienten. Zum Beispiel im Wandstrahl hinter der Spitze des Labyrinths ergeben die Daten der numerischen Simulation, dass sich die Axialgeschwindigkeit innerhalb eines Radius von einer Messvolumenlänge maximal von  $52,2 \text{ m/s}$  auf  $34,6 \text{ m/s}$  ändert. Die dadurch eventuell verursachte Verschiebung des Mittelwertes zu größeren Geschwindigkeiten („velocity bias“) wurde in der vorliegenden Auswertung nicht korrigiert. Als weitere Unsicherheit muss in die Bewertung der Messungen einbezogen werden, dass das Messvolumen im Labyrinth mit der verwendeten Traverse auf  $\pm 50 \mu\text{m}$  genau positioniert werden konnte.

Die zeitlichen Mittelwerte beruhen teilweise auf bimodalen Verteilungen, wie sie in Abb. 6 zu

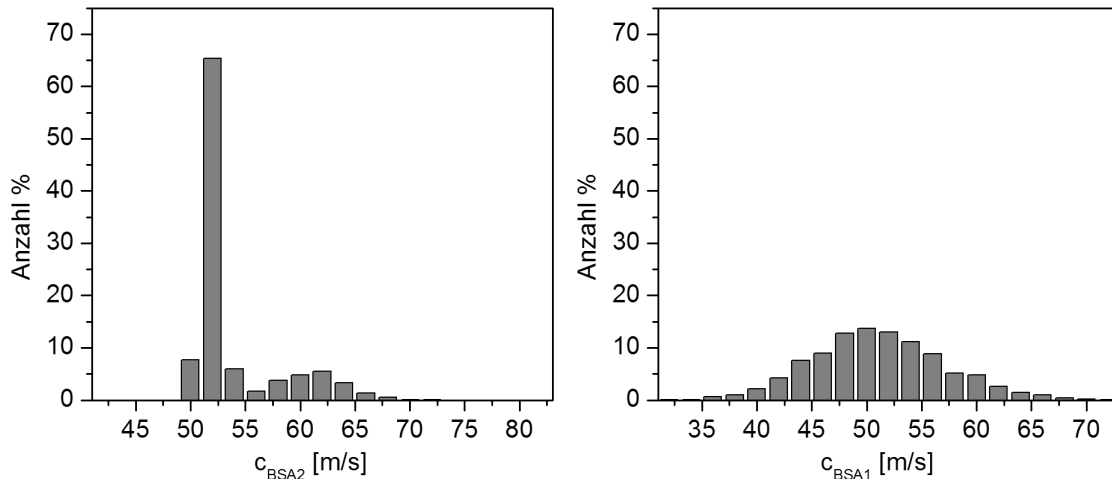


Abb. 6: Rohdaten der Geschwindikeitsverteilung für  $k=0,3$  an Position  $c=18,5\text{mm}$   $R=255,6\text{mm}$  (erste Hälfte der mittleren Kammer)

sehen sind. Dieses Beispiel zeigt die nicht transponierten Rohdaten in der ersten Hälfte der mittleren Kammer als Geschwindigkeitsverteilung in Klassen von  $2\text{m/s}$ . BSA1 misst um  $45^\circ$  gedreht in Hauptströmungsrichtung eine klassische nahezu normal verteilte, aber sehr breite Geschwindigkeitsverteilung, während BSA2 deutlich bimodal ist. Dies überrascht nicht, da bereits Brownell et al. (1989) und Denecke et al. (2003) deutliche Hinweise auf ein zeitlich instationäres Verhalten der Strömung in Labyrinthdichtungen (im nicht rotierenden Fall) entdeckten. Die zeitlich gemittelten Werte einer bimodalen Verteilung wurden bei der Auswertung nicht gesondert behandelt. Die Autoren sind sich den möglichen Unsicherheiten bei der Mittelwertbestimmung in diesen Fällen bewusst.

### Numerische Simulation

Für die numerische Simulation der Labyrinthströmung wurde das kommerzielle Strömungssimulationsprogramm Fluent in der Version 6.1.22 verwendet. Diese Software löst mit den für den vorliegenden Fall gewählten Einstellungen die kompressiblen, zeitgemittelten Navier-Stokes-Gleichungen implizit auf einem unstrukturierten, zweidimensionalen, achsensymmetrischen Gitter. Es wurde für alle Transportgleichungen eine Upwind Diskretisierung zweiter Ordnung, kombiniert mit der SIMPLE Druckkorrektur verwendet (Fluent Users Guide, 2004). Die turbulenten Eigenschaften wurden mit dem Standard  $k-\varepsilon$  Modell beschrieben. Das logarithmische Wandgesetz wurde genutzt, um die Transportgrößen der wandnächsten Zellen zu modellieren.

In früheren Veröffentlichungen wurde die Eignung des  $k-\varepsilon$  Turbulenzmodells in Verbindung mit dem logarithmischen Wandgesetz bereits nachgewiesen (z.B. Wittig et al. 1987, Benim und Arnal 1994, Rhode et al. 1994). Insbesondere sei hier auf die Arbeit von Schramm et al. (2004) hingewiesen, da dort, um die Simulation des Durchflussverhaltens der Labyrinthdichtung zu bewerten, eine ausführliche Gitterunabhängigkeitsstudie durchgeführt wurde.

Bei einer komplexen Geometrie und Strömungen mit Staupunkten und Ablösungen, wie sie in Labyrinthdichtungen üblicherweise auftreten, ist es sehr schwierig ein Gitter zu erstellen, bei dem einerseits die Größe der wandnächsten Zellen optimal dem logarithmischen Wandgesetz angepasst sind und andererseits die Gitterzellen im Innern klein genug sind, um die Scherschicht des Wandstrahls ausreichend fein aufzulösen. Um ein solches Gitter zu erstellen, wurden die von Fluent zur Verfügung stehenden Algorithmen zur Adaptierung des Gitters nach verschiedenen Zielgrößen intensiv genutzt. So weisen fast alle Wandzellen im verwendeten Gitter ein  $y^+ > 30$  auf, was eine korrekte Anwendung des logarithmischen Wand-

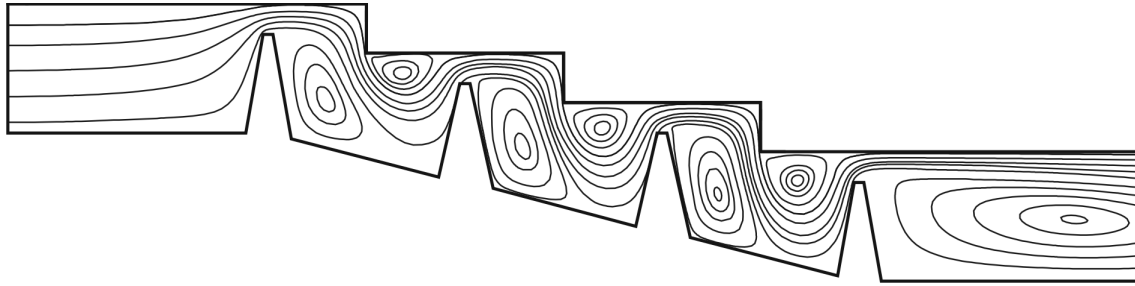


Abb. 7: Stromlinien im Labyrinth (CFD) bei  $k=0$

gesetzes erlaubt. Die Gitter der untersuchten Fälle haben eine Größe von etwa 11500 Zellen. Diese Zahl enthält die Zellen des Eintritts, mit einer Länge von fünf mal der Spitzenhöhe ( $5h$ ) und die des Austritts, mit einer Länge von  $12h$ . Inwieweit diese vergleichsweise einfache Modellierung auch auf den Verlauf der Umfangsgeschwindigkeiten angewendet werden kann, wird der Vergleich zu den LDA-Messungen zeigen.

### Vergleich der berechneten und gemessenen Geschwindigkeiten im Labyrinth

Als ersten Eindruck des Strömungsfeldes in einer konvergenten Labyrinthdichtung sind in Abb.7 die Stromlinien für den Fall  $k=0$  abgebildet. Deutlich sind die zwei dominierenden Wirbel in der Kammer sowie der Wirbel am Austritt zu erkennen. Die nachfolgend beschriebenen Ergebnisse wurden bei einer Drehzahl von  $n=6000\text{min}^{-1}$  ermittelt. Dabei wurde die Umfangsgeschwindigkeit (Vordrall) am Eintritt variiert. Der Vordrall  $k$  ist als Verhältnis der Fluidumfangsgeschwindigkeit  $c_t$  zur Rotorumfangsgeschwindigkeit  $\omega R$  definiert. Zum einen wurde der Fall der axialen Anströmung  $k=0$  und zum anderen der Fall mit einem Vordrall von  $k=0,3$  untersucht. Die Reynoldszahl wurde konstant zu  $Re = \dot{m}/(\mu \cdot \pi \cdot R) = 10000$  eingestellt, so dass eine Änderung der Umfangsgeschwindigkeit vorwiegend vom Dichteverlauf und von der Wandreibung an Rotor und Stator verursacht wird. Bei erhöhten Drehzahlen verringert sich zunehmend der Durchfluss durch die Labyrinthdichtung. Der Vordrall hat dabei nur geringen Einfluss auf das Durchflussverhalten, welches nur vom Verhältnis der statischen Drücke und geringfügig vom Axialimpuls abhängt (s. Denecke et al., 2004).

Wie in der Einleitung ausgeführt ist die interessierende Fragestellung die Änderung der Umfangsgeschwindigkeit über die Labyrinthdichtung vom Eintritt zum Austritt. In Abb.8a sind zunächst die gemessenen Axialgeschwindigkeiten  $c_x$  (LDA) als Profil über dem Radius im Vergleich zu den berechneten (CFD) aufgetragen. Die Werte entsprechen den gekennzeichneten Positionen  $x=5\text{mm}$  (Eintritt) und  $x=35\text{mm}$  (Austritt) in Abb.5. Um einen Eindruck der Größe des Messvolumens zu bekommen, ist es in Abb.8a beispielhaft in seinen Abmessungen dargestellt.

Am Eintritt zeichnet sich die Aufstauung vor der Wurzel der ersten Spitze ab. Die gemessenen Geschwindigkeiten stimmen insgesamt sehr gut mit den berechneten überein. Deutlich wird allerdings auch, dass bei der Simulation mit dem Standardwandgesetz die Grenzschicht nicht aufgelöst werden kann. Am Austritt der Dichtung im rechten Bild ist der Wandstrahl hinter dem Spalt über Spitze zur erkennen. In Abb.8b sind die zu diesen Positionen gehörigen Umfangsgeschwindigkeiten aufgetragen. Die Rotorumfangsgeschwindigkeit  $\omega R$  ist durch einen Stern gekennzeichnet. Der Vordrall am Eintritt ist mit  $k=0$  vorgegeben, wobei die Grenzschicht hier, kurz vor der Spitze, schon deutlich angewachsen ist. Am Austritt hat sich die Umfangsgeschwindigkeit auf etwas über  $k=0,31$  erhöht. Die durch CFD vorhergesagte Geschwindigkeitsüberhöhung im Bereich von  $R=0,2545\text{m}$  ist darauf zurückzuführen, dass der Drall in der letzten Labyrinthkammer maximal ist. Im Austrittsbereich wird die Luft wieder

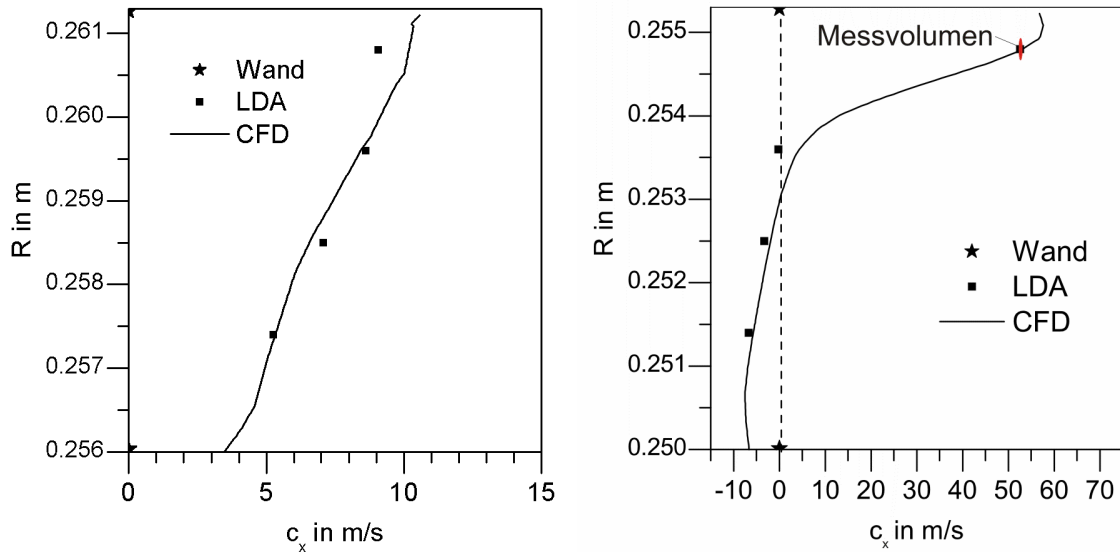


Abb. 8a: Vergleich der gemessenen und berechneten Geschwindigkeitsprofile  $c_x$  an den Positionen  $x=5\text{mm}$  und  $x=35\text{mm}$  für  $k=0$

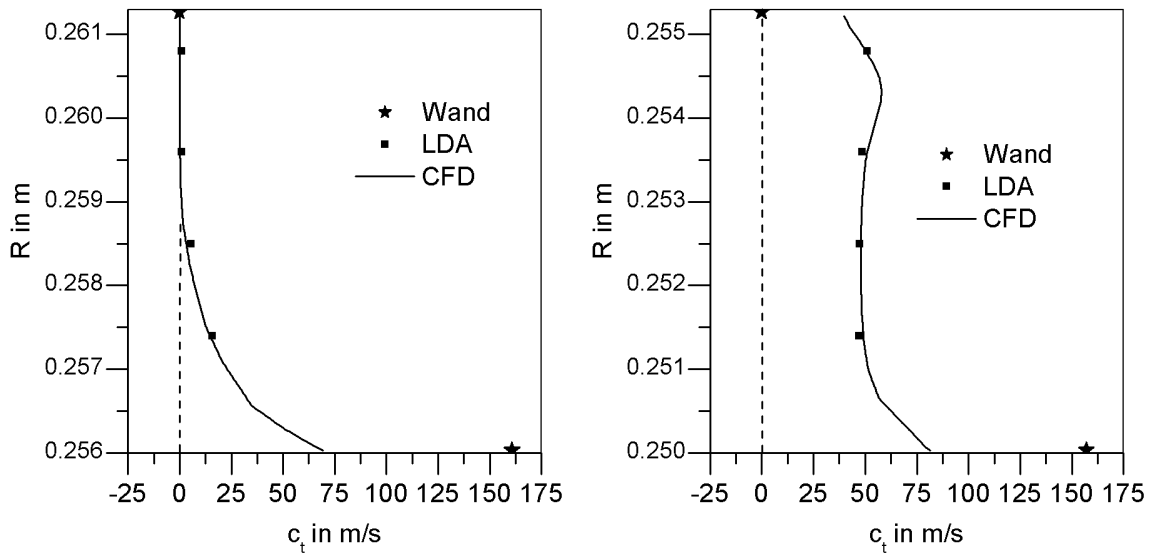


Abb. 8b: Vergleich der gemessenen und berechneten Geschwindigkeitsprofile  $c_t$  an den Positionen  $x=5\text{mm}$  und  $x=35\text{mm}$  für  $k=0$

auf eine geringere Umfangsgeschwindigkeit abgebremst, da der größte Teil des Austrittswirbels mit der stehenden Wand interagiert (s. Abb.7).

In Abb.9 ist der für Flugtriebwerke realistischere Fall mit einem Vordrall von  $k=0,3$  abgebildet. Am Eintritt hat sich eine deutliche Kernströmung ausgebildet, die Grenzschichten sind nicht zusammengewachsen. Dies ist ein wichtiger Hinweis für die Anwendung analytischer Modelle für die Vorhersage des Drallverlaufs (McGreehan et al., 1989, Yucel et al., 2001). Am Austritt ist die Umfangsgeschwindigkeit gegenüber der Messung ohne Vordrall leicht auf  $k=0,38$  angestiegen. Die Geschwindigkeitsüberhöhung scheint noch etwas ausgeprägter zu sein, als im Falle ohne Vordrall.

### Zusammenfassung

In einem vierspitzigen konvergenten Stufenlabyrinth wurden erstmals detaillierte Messungen der Umfangsgeschwindigkeit mittels Laser-Doppler-Anemometrie in einer schnell rotieren-



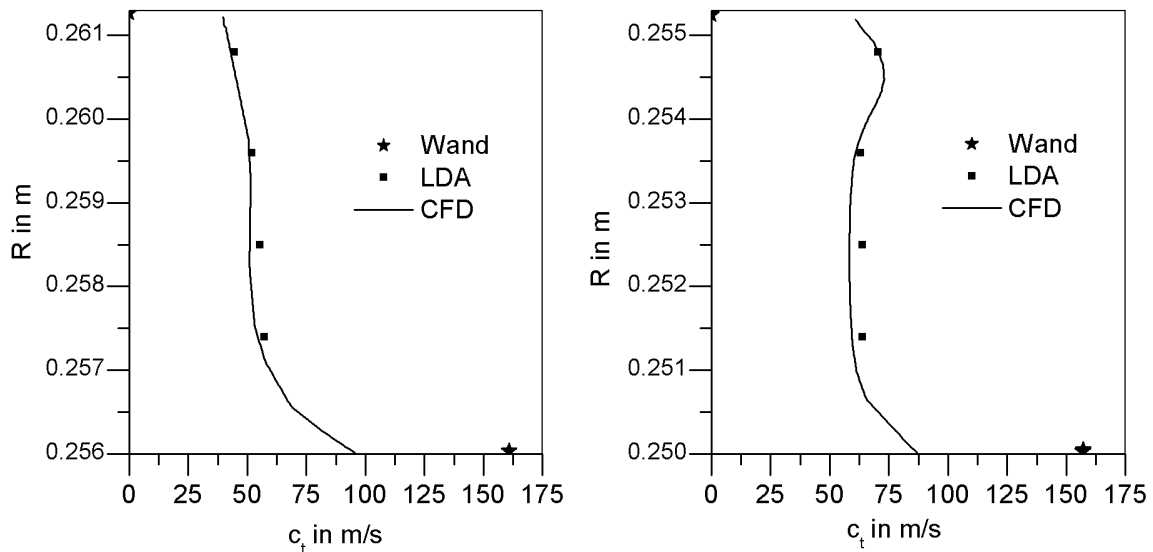


Abb. 9: Vergleich der gemessenen und berechneten Geschwindigkeitsprofile  $c_t$  an den Positionen  $x=5\text{mm}$  und  $x=35\text{mm}$  für  $k=0,3$

den Labyrinthdichtung durchgeführt. Dabei wurde die Umfangsgeschwindigkeit am Eintritt (Vordrall) mit Hilfe eines Drallerzeugers variiert. Da für die Skalierung der Ergebnisse auf Triebwerksbedingungen numerische Simulationen unverzichtbar sind, werden die Möglichkeiten und Grenzen einer zeitlich stationären Berechnung in einem Vergleich der charakteristischen Strömungsgrößen aufgezeigt. Die experimentell ermittelten zeitlich gemittelten Geschwindigkeiten stimmen sehr gut mit denen der numerischen Simulation überein. Weiterhin wurde festgestellt, dass die experimentellen Ergebnisse z.T. auf ein deutlich instationäres Verhalten der Strömung hinweisen. Es ist zu erwarten, dass die hier erstmals experimentell validierte Vorgehensweise zur numerischen Berechnung der Strömung in Labyrinthdichtungen wesentlich zur Verbesserung zukünftiger Kühlluftsysteme von höchst belasteten Gasturbinen beitragen wird. Mit Hilfe der hier vorgestellten Ergebnisse kann die Temperatur und der Drall als Randbedingung für nachfolgende Komponenten, wie das Vordralldüsen-system vorgegeben werden. Weiterhin werden in Zukunft bei Kenntnis des Drallverlaufs in der Dichtung schon während der Konstruktion eventuell auftretende aerodynamische Instabilitäten vermieden werden können. Auch die Randbedingungen für die Thermalanalyse des Kühlluftsystems sind jetzt genauer zu bestimmen.

## Literatur

**Benim, A.C. und Arnal, M.** 1994: „A Numerical Analysis of the Labyrinth Seal Flow“, Computational Fluid Dynamics, John Wiley & Sons Ltd.

**Brownell, J.B., Millward, J.A. und Parker, R.J.**, 1989: „Nonintrusive Investigations Into Life-Size Labyrinth Seal Flow Fields“, ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 111, 335-342

**Denecke, J., Dittmann, M., Kim, S., Wittig, S., Peitsch, D. und Friedl, W.-H.**, 2001: „Grundlagenuntersuchungen zur Optimierung von innovativen Hochdruckturbinen-Kühlungssystemen“, Tagungsband Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, DGLR-2001-156

**Denecke, J., Schramm, V., Kim, S. und Wittig, S.**, 2003: Influence of Rub-Grooves on Labyrinth Seal Leakage“, ASME Journal of Turbomachinery, 125 (2), pp. 387-393.

**Denecke, J. Dullenkopf, K. und Wittig, S.**, 2004: „Influence of Preswirl and Rotation on Labyrinth Seal Leakage“, Proceedings of the ISROMAC-10, March 7-11, 2004, Honolulu, USA

- Kähler, C.J., Sammler, B. und Kompenhans J.**, 2002: „Generation and Control of tracer particles for optical flow investigations in air“, Experiments in Fluids, 33 , pp. 736-742
- McGreehan, W.F. und Ko, S.H.**,1989: „Power Dissipation in Smooth and Honeycomb Labyrinth Seals“, ASME-Paper 89-GT-220
- Morrison, G.L., Johnson, M.C. und Tatterson, G.B.**, 1991: „3-D Laser Anemometer Measurements in a Labyrinth Seal“, ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power,113, pp. 119-125}
- Peitsch, D., Friedl, W.-H., Dittmann, M. und Denecke J.** 2003: „Detailed Investigation of the Flow within the Secondary Air System in High Pressure Turbines of Aero Engines“, ISABE Paper 2003-1038
- Rhode, D.L., Ko, S.H. und Morrison, G.L.**, 1994: „Leakage Optimization of Labyrinth Seals Using a Navier-Stoke Code“, Tribology Transactions, 37 (1), pp. 105-110
- Schramm, V., Denecke, J., Kim, S. und Wittig, S.**,: 2004: "Shape Optimization of a Labyrinth Seal Applying the Simulated Annealing Method", International Journal of Rotating Machinery 10 (5): pp.1-7
- Stoff, H.**, 1980: „Incompressible Flow in a Labyrinth Seal“, Journal of Fluid Mechanics, 100, pp. 817-829
- Wittig, S., Schelling U., Jacobsen, K. und Kim, S.**, 1987: „Numerical Predictions and Measurements of Discharge Coefficients in Labyrinth Seals“, ASME Paper No. 87- GT-188
- Yucel, U. und Kazakia, J.Y.**, 2001: „Analytical prediction techniques for axisymmetric flow in gas labyrinth seals“, ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 123, pp. 255-257.