

Strömungsstörungen

Karsten Tawackolian
(karsten.tawackolian@ptb.de)

Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Fachbereich 7.6

26. August 2009



Inhalt des Vortrages

- ① Ungestörte Rohrströmung
 - Gersten-Profil
- ② Gestörte Rohrströmung
 - Parameter der Krümmerströmung
 - Qualitative Betrachtung der Strömung im Krümmer
 - Quantifizierung
 - Schlussfolgerungen



Karsten Tawackolian (PTB Fachbereich 7.6)

Strömungsstörungen

26. August 2009

2 / 31

Über mich



- Diplom Ing. TU-Berlin, Physikalische Ingenieurwissenschaft, Vertiefung Strömungsmechanik, Numerik und Simulation
 - Studentischer Mitarbeiter Hermann-Föttinger Institut für Strömungsmechanik, Fachgebiet Numerische Methoden der Thermofluidodynamik, Prof. Thiele, CFD mit inhouse Code Elan, kommerziellen Codes CFX, StarCD...
- Seit 2007: Doktorand in der PTB, Fachbereich 7.62 - F&E
 - Themengebiet: Innenströmung in Durchflusssensoren
 - Betreuung der Industrieprojekte sowie Koordinierung der projektbezogenen Arbeiten der anderen Doktoranden. Eingesetzte Technologien: CFD-Simulationen, Lasermessungen (LDV/PIV), präzise Messanlagen der PTB.

Ausgebildete Rohrströmung

Profilansatz nach Gersten¹

$$u^+(r) = \frac{1}{\kappa} \left[\ln(1+r) - \frac{\alpha}{2a} \ln(1+ar^2) - \frac{\beta}{2b} \ln(1+br^2) \right] + \bar{C}$$

$$+ \frac{1}{\Lambda} \left[\frac{1}{3} \ln \frac{\Lambda y^+ + 1}{(\Lambda y^+)^2 - \Lambda y^+ + 1} + \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\arctan \frac{2\Lambda y^+ - 1}{\sqrt{3}} + \frac{\pi}{6} \right) \right]$$

$$+ \frac{1}{4\kappa} \ln(1 + \kappa B y^{+4})$$

Zusammenhang u^+/u : Widerstandsgesetz

$$\frac{1}{2} \frac{Re}{Re_\tau} = \frac{1}{\kappa} \ln Re_\tau + 2,55 - \frac{201}{Re_\tau}$$

¹K.Gersten, "Fully Developed Turbulent Pipe Flow", in: "Fluid Mechanics of Flow Metering", Springer, 2004

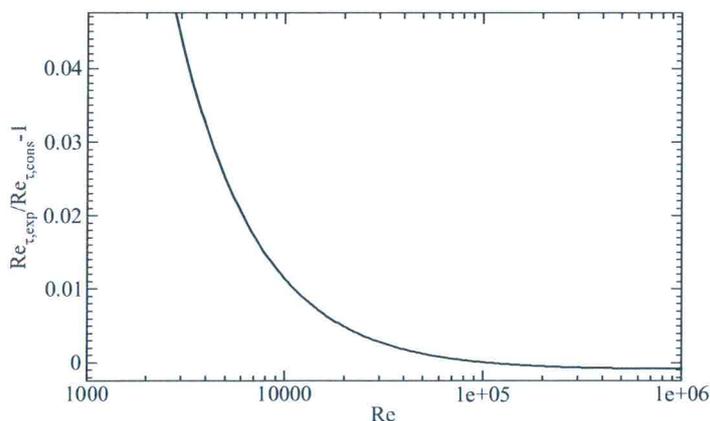
Anmerkung zum Widerstandsgesetz

Inhärentes Widerstandsgesetz

Experimentelles Widerstandsgesetz

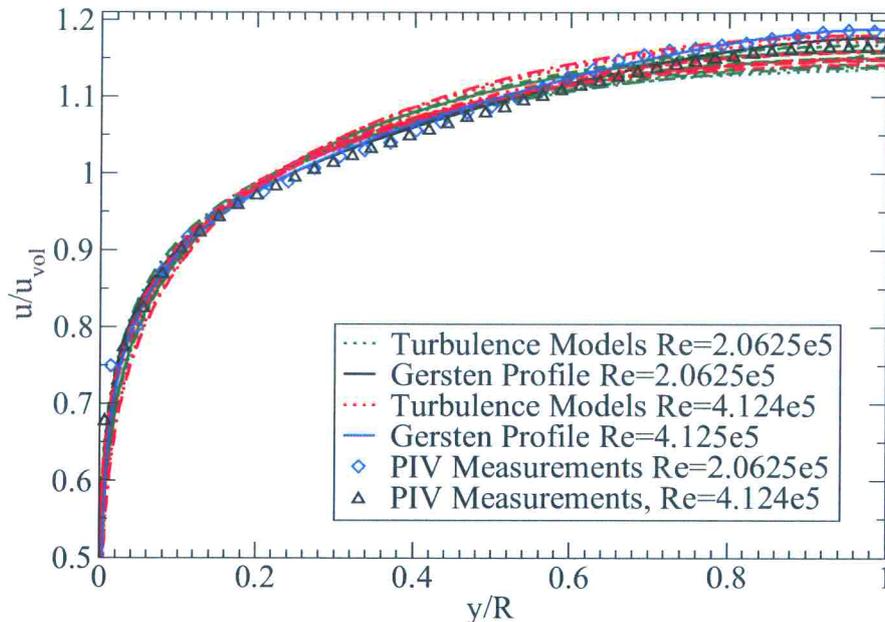
$$\frac{1}{2} \frac{Re}{Re_\tau} = 2 \int_0^1 u^+(r) \left(\frac{r}{R} \right) d \left(\frac{r}{R} \right) \quad (1) \quad \frac{1}{2} \frac{Re}{Re_\tau} = \frac{1}{\kappa} \ln Re_\tau + 2,55 - \frac{201}{Re_\tau} \quad (2)$$

Gleichung (1) und (2) sind nicht konsistent für $Re < 10^5$. Für Profiluntersuchungen wird Gleichung (1) verwendet.



Wiedergabe des idealen Profiles

Vergleich des Gersten-Profiles mit PIV-Messungen und CFD-Ergebnissen unterschiedlicher Turbulenzmodelle/Wandbehandlung. Eine wichtige Einflussgröße ist die Auflösung und Modellierung des Wandbereiches.



Kennzahlen des ausgebildeten Profiles

Axialer Impulsfluss (normiert)

$$K_f = \frac{\int \int u_z^2 dA}{\pi u_m^2 R^2}$$

Radiales Moment des axialen Impulsflusses (normiert)

$$K_u = \frac{\int \int u_z^2 r dA}{\pi u_m^2 R^3}$$

Messblenden, Venturidüsen, Staudrucksonden

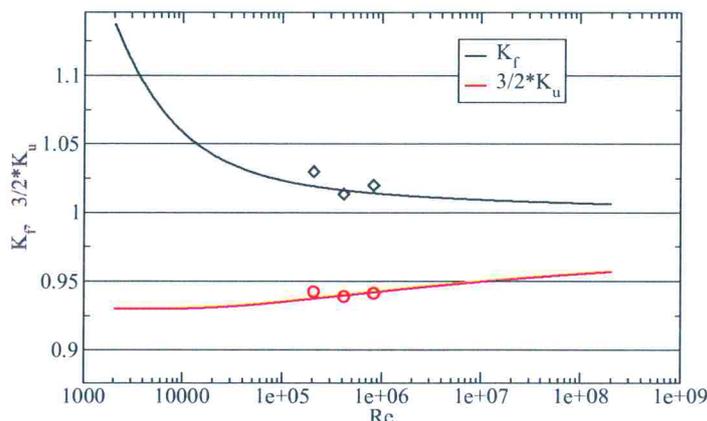
Turbinenradzähler

Laminare Strömung

$$K_f = 4/3$$

$$K_u = 64/105$$

$$3/2 K_u \approx 0,91...$$



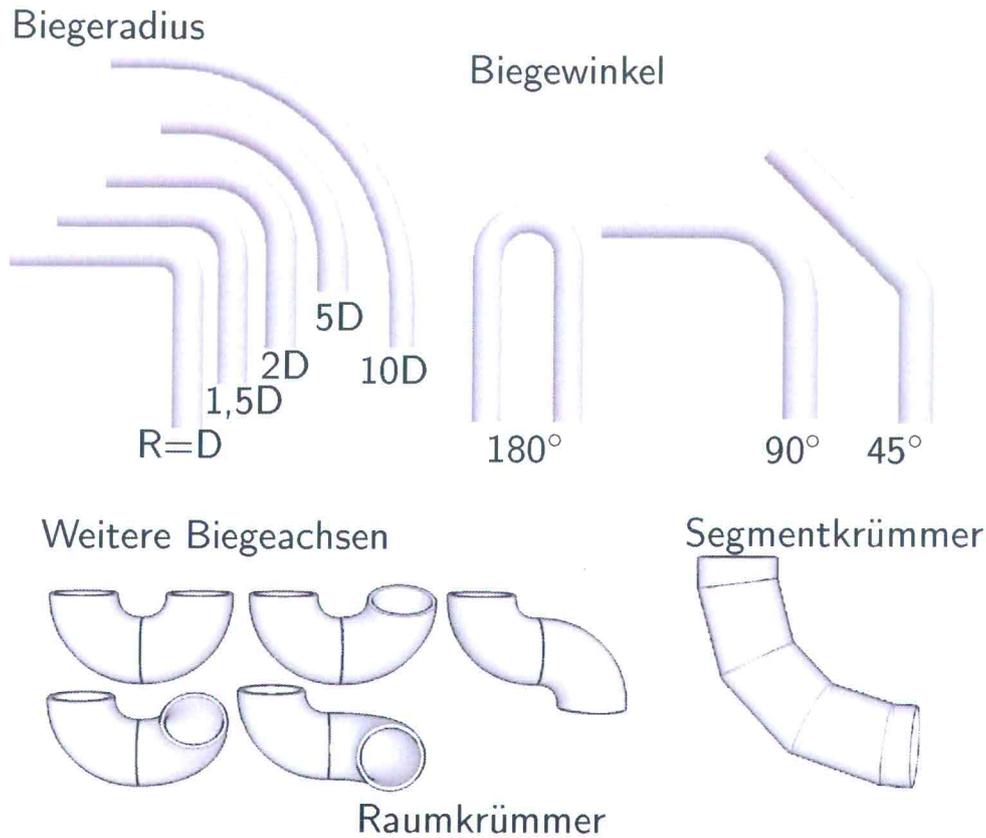
$Re \rightarrow \infty$

$$K_f = 1$$

$$K_u = 3/2$$

$$3/2 K_u = 1$$

Gestörte Rohrströmung



Karsten Tawackolian (PTB Fachbereich 7.6)

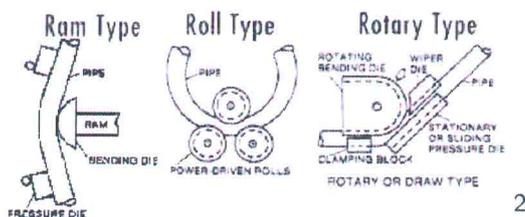
Strömungsstörungen

26. August 2009

8 / 31

Weitere Parameter

- Querschnitt
 - Abhängig vom Verfahren



- Unrundheit DIN EN 13480-4
- Walztoleranzen
- Wandrauhigkeit
- Flanschversatz
- Durchmesseranpassungen
- ...

²Quelle: <http://www.ttb.com/process.htm>

Systematische Untersuchung?

Let us consider just one combination of a single bend with a flow meter. There exist about ten parameters (distance, radius of curvature, Reynolds number, roughness, six characteristic parameters for the velocity profile of the bend inflow). Assume that five values for each parameter are sufficient and that one test takes five minutes only. This would lead to a total measurement time of 100 years (5^{11} min).³

- 1 Hohe Anzahl an Konfigurationen (Kombinationen).
- 2 Vgl. Einzeluntersuchungen: $5 \cdot 11 \cdot 5$ min \rightarrow 1 Tag (eher 1 Woche).
- 3 Bestimmte Störungen werden ausgewählt.
- 4 Störungen werden über Kennzahlen quantifiziert (Parameterraum).
- 5 Die Kennzahlen müssen für alle Messprinzipien anwendbar sein.
- 6 Kennzahlen für: Prüfstandsvalidierung (Qualitäts-Kennzahlen), Modellierung (Physikalische Kennzahlen)

³K. Gersten, Flow metering with disturbed inflow, Acta Mechanica, Volume 201, Numbers 1-4 / Dezember 2008

Ausgewählte Testfälle



Double Bend
(DB)



Single Bend
(SB)



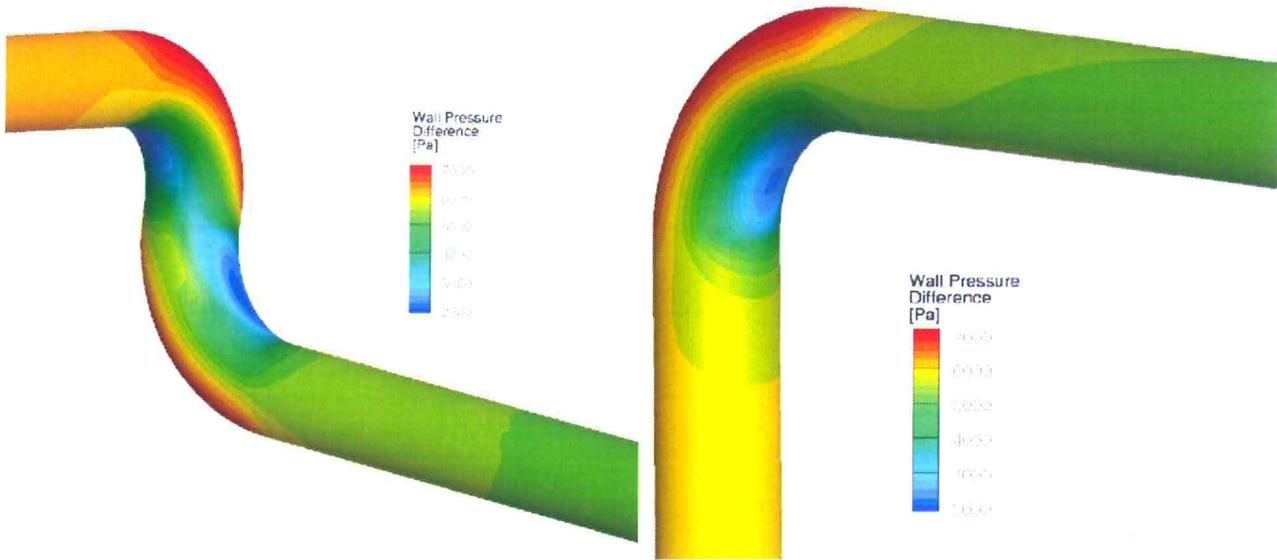
Single Bend 45°
(SB45)



Swirl Generator
(SG)

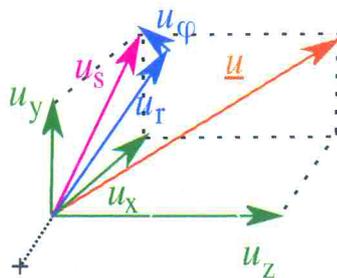
Qualitative Betrachtung der Strömung im Krümmer

Wanddruck, normiert auf $p = 0$ am Auslass ($z/D = 100$)



$$Re = 2,0625 \cdot 10^5$$

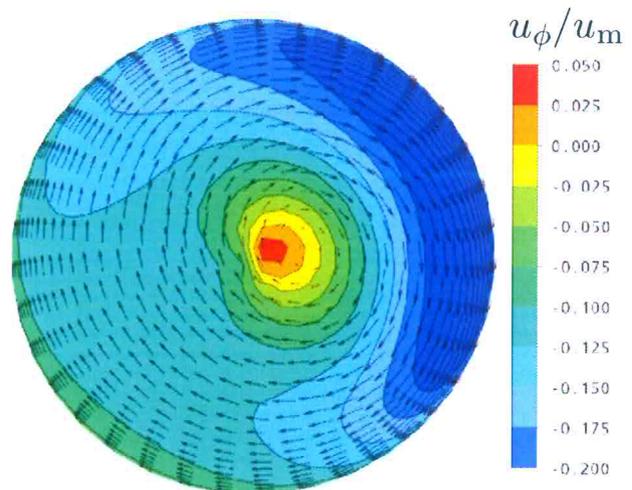
Strömungskomponenten



$$u_s = \sqrt{(u_x^2 + u_y^2)}, u_m = \frac{1}{A} \int u dA$$

- u_ϕ relevant für Turbinenradzähler

- Das Vorzeichen von u_ϕ ist lageabhängig
- $u_\phi = 0$ im Zentrum trotz vorhandener Sekundärgeschwindigkeit
- Für die experimentelle Bestimmung von u_ϕ muss der Nullpunkt sehr genau bestimmt werden.

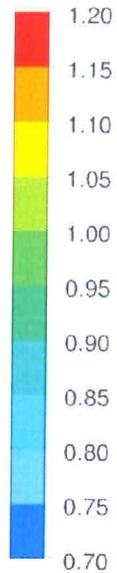


Sekundärströmung (Pfeile) und Umfangsgeschwindigkeit u_ϕ (Konturen)
20D stromab eines Raumkrümmers.

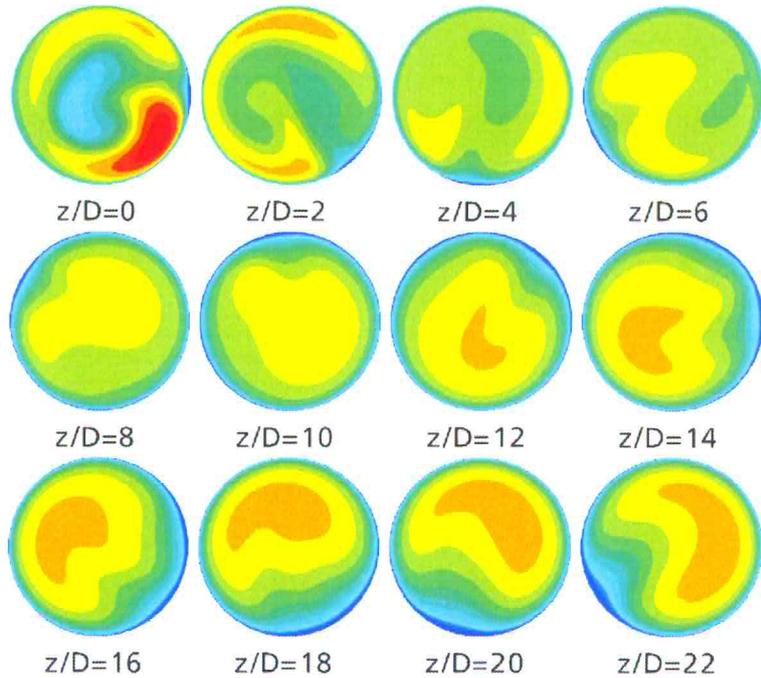


Axiale Strömungskomponente Raumkrümmer

u_z/u_m

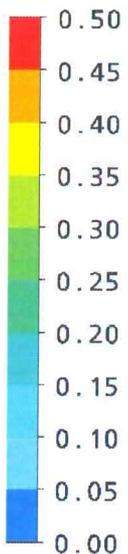


$Re = 2,0625 \cdot 10^5$

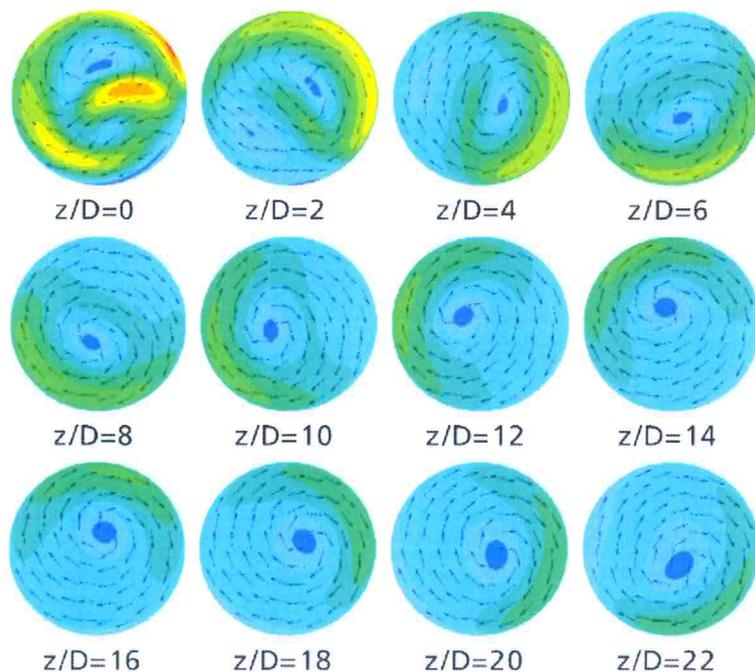


Sekundäre Strömungskomponente Raumkrümmer

u_s/u_m

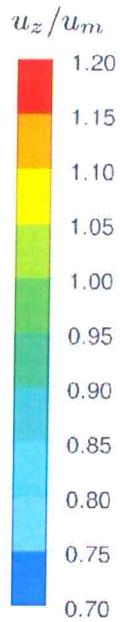


$Re = 2,0625 \cdot 10^5$

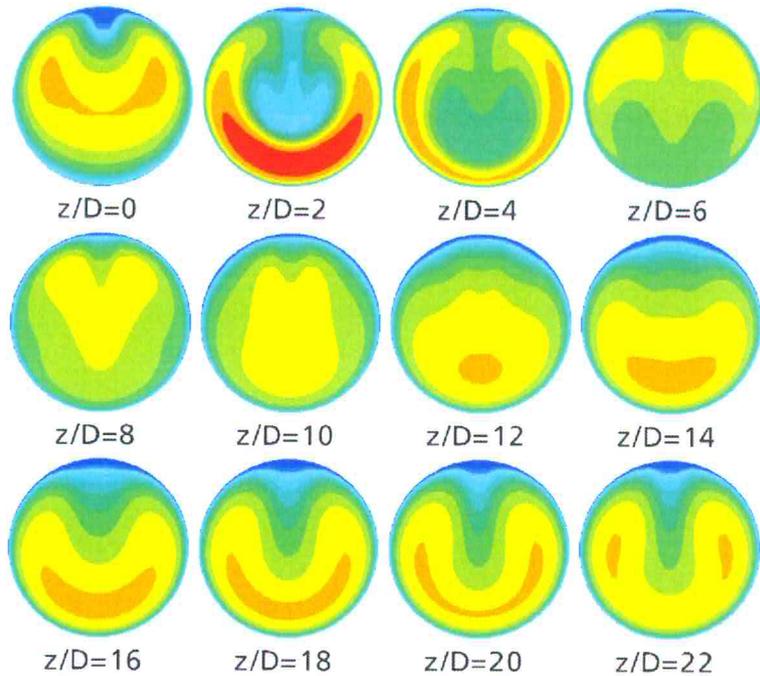




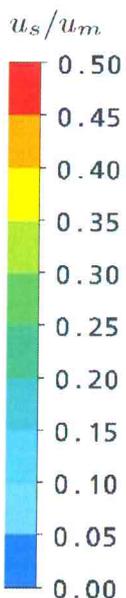
Axiale Strömungskomponente Krümmer



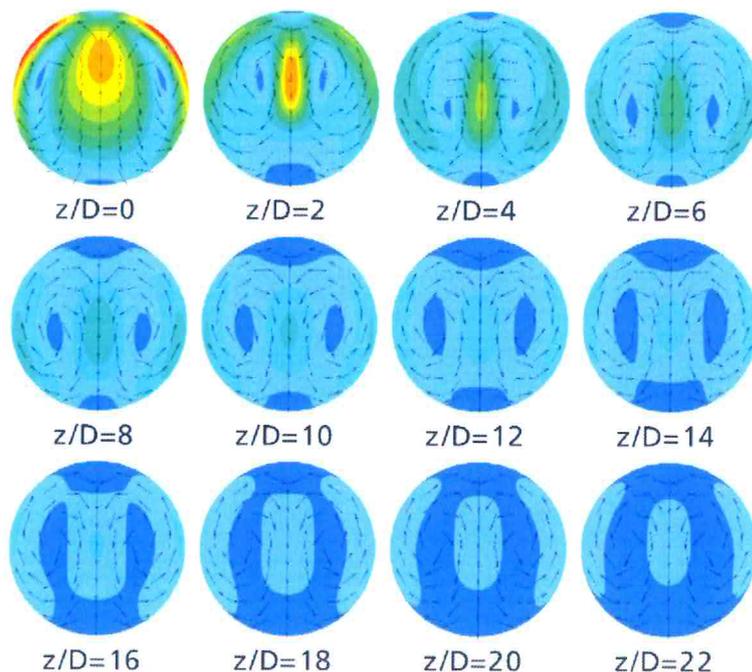
$Re = 2,0625 \cdot 10^5$



Sekundäre Strömungskomponente Krümmer

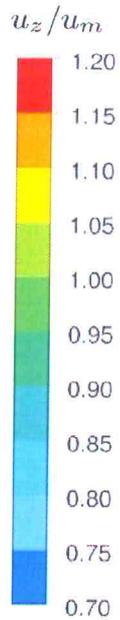


$Re = 2,0625 \cdot 10^5$

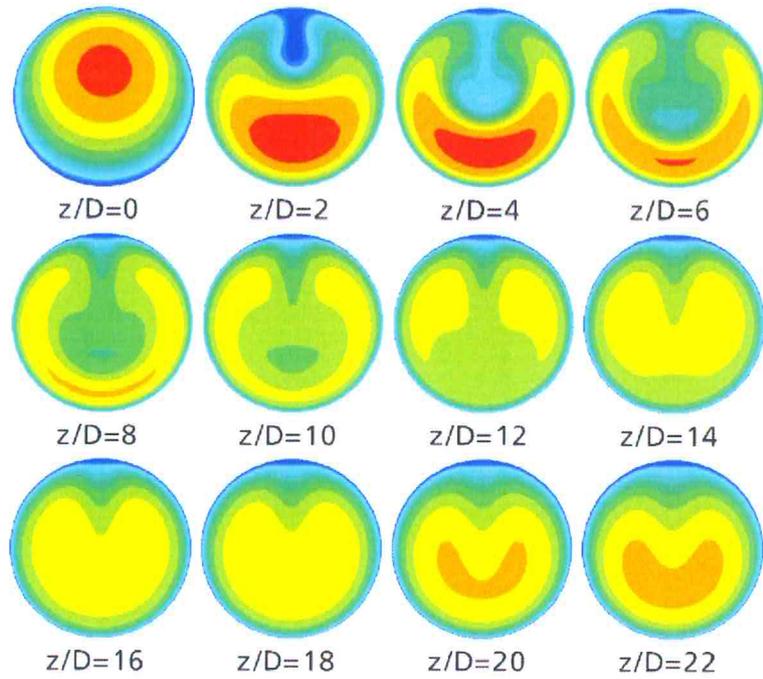




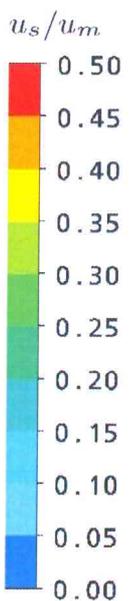
Axiale Strömungskomponente Krümmer 45°



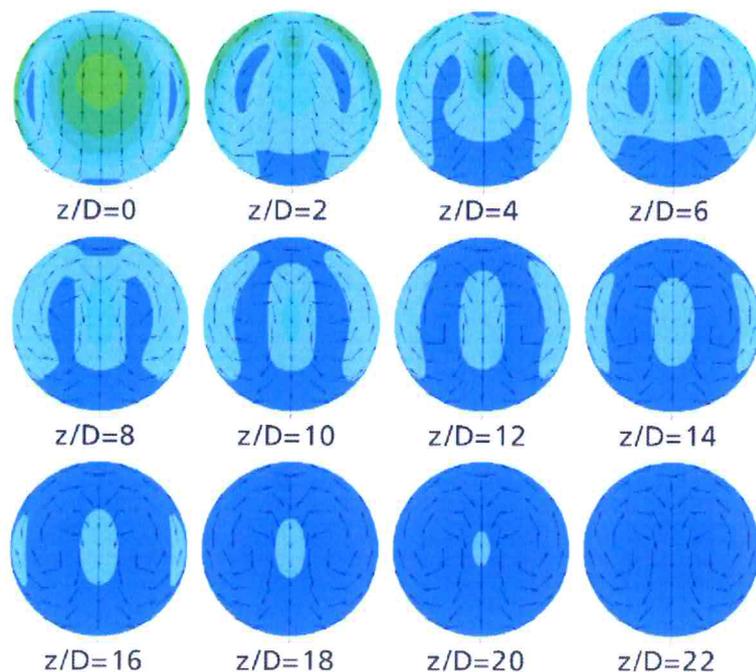
$Re = 2,0625 \cdot 10^5$



Sekundäre Strömungskomponente Krümmer 45°



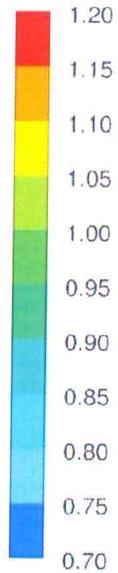
$Re = 2,0625 \cdot 10^5$



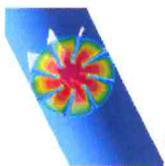
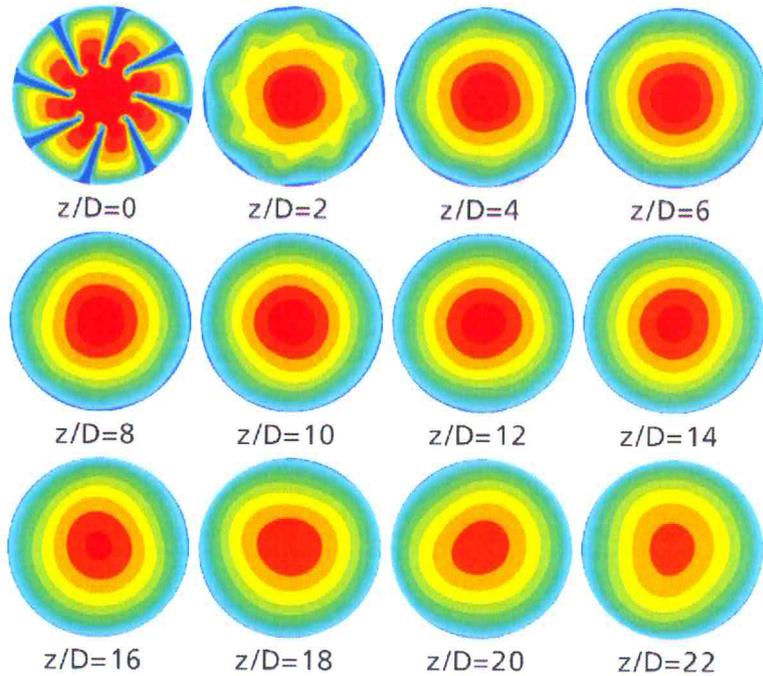


Axiale Strömungskomponente Drallerzeuger

u_z/u_m

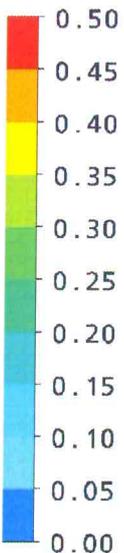


$Re = 2,0625 \cdot 10^5$

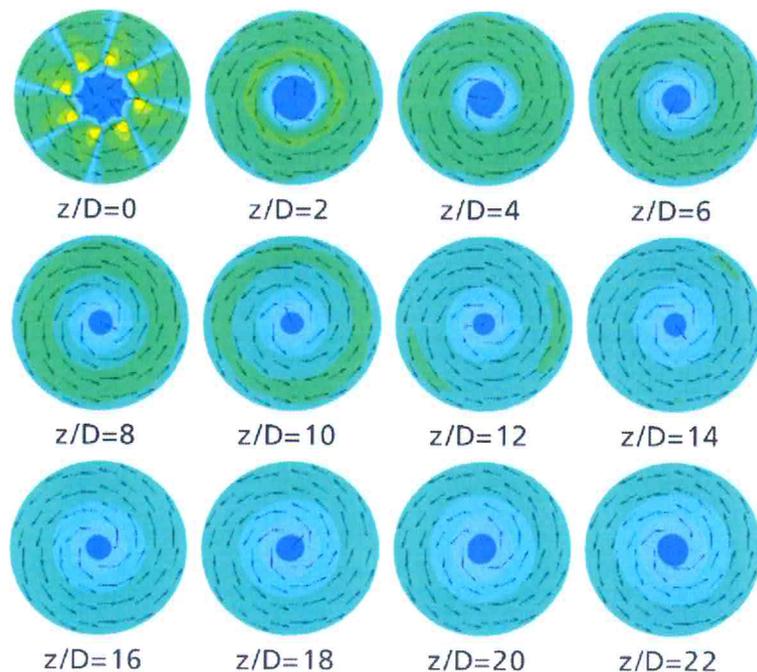


Sekundäre Strömungskomponente Drallerzeuger

u_s/u_m

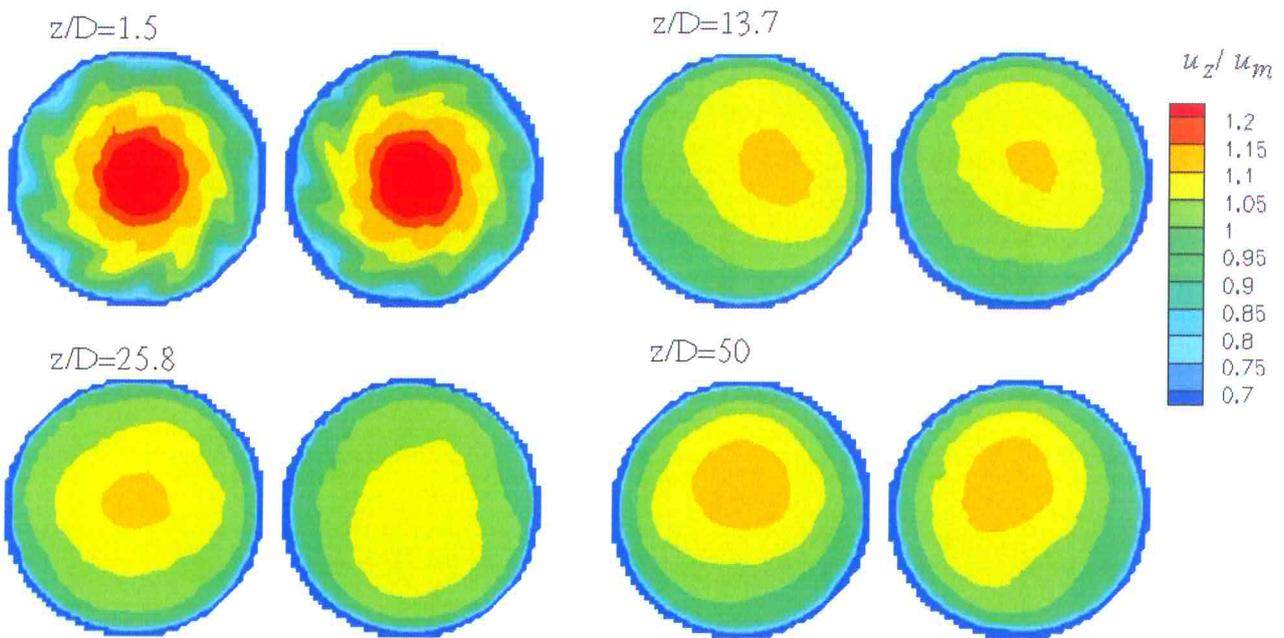


$Re = 2,0625 \cdot 10^5$



Axiale Strömungskomponente Drallerzeuger

PIV: Ergebnisse von Wiederholmessungen⁴, $Re = 4,125 \cdot 10^5$

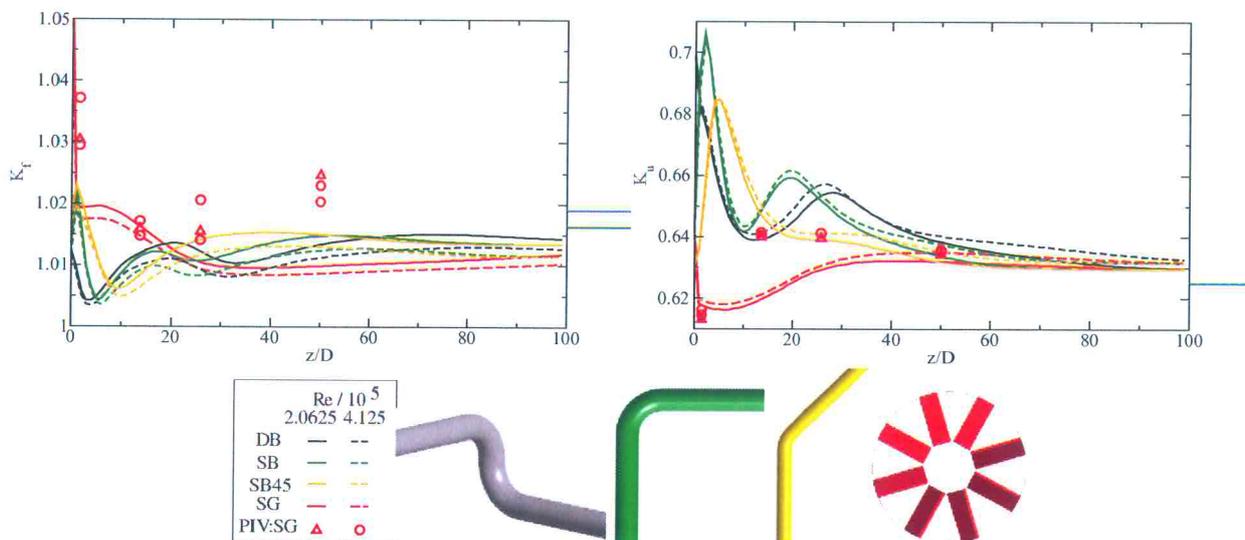


⁴PIV-Messungen: Thomas Eichler (PTB 7.62), PIV-Technologie: ILA GmbH

Kennzahlen der axialen Strömungskomponente

$$K_f = \frac{\int \int u_z^2 dA}{\pi u_m^2 R^3}$$

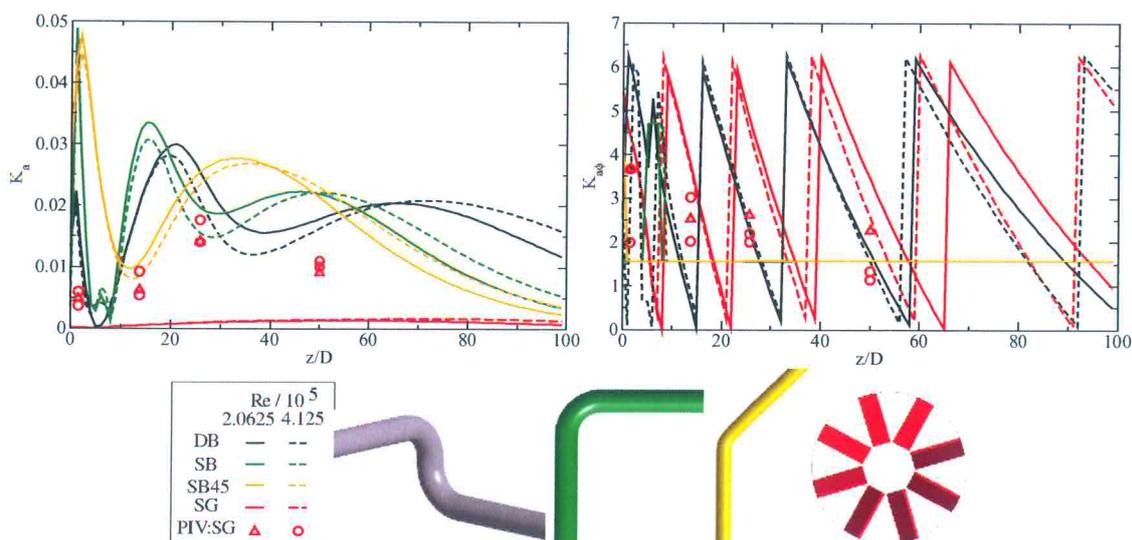
$$K_u = \frac{\int \int u_z^2 r dA}{\pi u_m^2 R^3}$$



Kennzahlen der axialen Strömungskomponente II

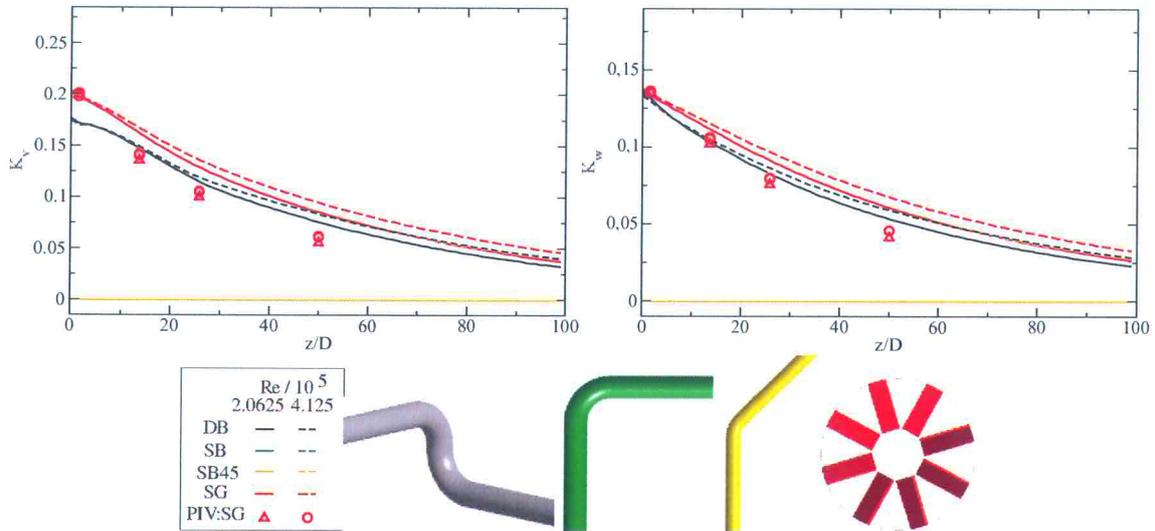
$$x_s = \frac{\int \int x d\dot{m}}{\dot{m}} \quad y_s = \frac{\int \int y d\dot{m}}{\dot{m}}$$

$$K_a = \sqrt{(x_s^2 + y_s^2)}/R \quad K_{a\phi} = \text{atan2}(y_s, x_s)$$



Kennzahlen der sekundären Strömungskomponente

$$K_v = \frac{\int \int u_x u_\phi \, dA}{\pi u_m^2 R^3} \quad K_w = \frac{\int \int u_x u_\phi r \, dA}{\pi u_m^2 R^3}$$

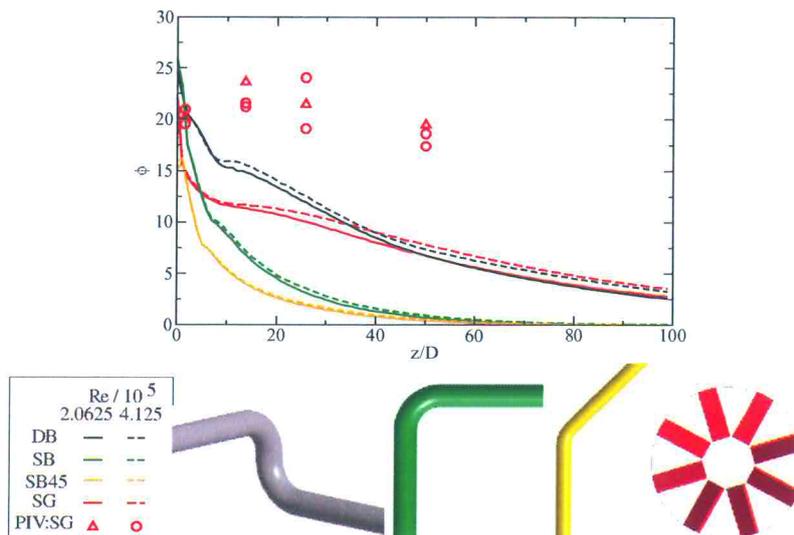


Kennzahlen der sekundären Strömungskomponente II

Drallwinkel

$$\phi = \arctan(\max(u_\phi)/u_m)$$

(Problematisch bei Messungen - Ausreisser)



Beurteilung der Kennzahlen

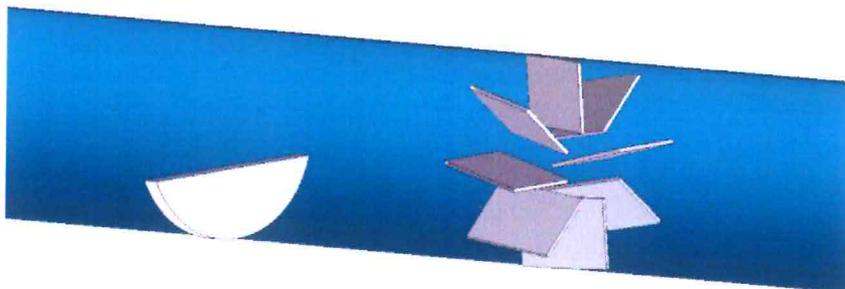
- K_f, K_u, K_v, K_w sind nicht orientierungsabhängig.
- Magnetisch-induktive und Ultraschall-Durchflusssensoren weisen jedoch eine Abhängigkeit von der Profilorientierung auf.
- Bei komplexen Strömungen haben die Kennzahlen keine anschauliche Bedeutung.
- Anwendbarkeit der Kennzahlen auf reale Sensoren: Bei Turbinenradzählern ist oftmals ein Flow-Straightener integriert. Es findet auch eine Verformung des axialen Profiles statt (Ringraumströmung). Ebenso spielt die Rotorbewegung eine Rolle (Strömungskomponenten im Relativsystem). Die Kennzahlen gelten somit nur für idealisierte Sensoren.
- Zum Einbeziehen anderer Messverfahren sind ebenfalls einfache Sensormodelle nötig.

Drallerzeuger vs. Krümmer?

- Die Vorreiterrolle des Raumkrümmers folgt aus Untersuchungen mit Turbinenradzählern. Asymmetrie und Form der Sekundärströmung führen dort zu großen Beeinflussungen.
- Das Nahfeld des Raumkrümmers $z/D < 8$ ist komplex und wird nicht vom Drallerzeuger wiedergegeben.
- Die sekundären Komponenten des Raumkrümmers werden gut durch den Drallerzeuger wiedergegeben.

Drallerzeuger vs. Krümmer?

- Der Drallerzeuger bewirkt eine zusätzliche Änderung der primären Strömungskomponente. Eventuell ist eine Verbesserung des Designs möglich (Centerbody?).
- Zusätzliche Erzeugung einer definierten Asymmetrie:



- Diese Konfiguration wurde von uns bereits mittels PIV gemessen. Eine Veröffentlichung der Ergebnisse erfolgt in nächster Zeit.