



# EMRP/EMFP - European Metrology Research Programme

Das europäische Joint Research Projekt (JRP) ENG06 „Metrology for improved power plant efficiency“ hat das Ziel, die Unsicherheit aller wichtigen Steuerungsparameter, wie z. B. Temperatur, Durchfluss, thermische Energie und elektrische Leistung zu verringern und somit die Energieeffizienz für große Kraftwerke um 2 % bis 3 % zu steigern.

**Zeitraum: 01.04.2010 bis 31.03.2013**

WPN: Management and coordination, PTB

WPN-1: Creating Impact, SP

WP1: Temperature measurement, PTB

WP2: Thermophysical properties, LNE

WP3: Flow and thermal energy, SP

WP4: On-site electricity measurement, VSL

## WP3: Flow and thermal energy

**Ziel:** Reduzierung der Unsicherheit der Durchflussmessung in Kraftwerken und Fernwärmenetzen von 2 % zu 0,5 %.

### Teilnehmende NMIs:



SP (Borås) – Messblende

PTB (Berlin) – Ultraschall Durchflusssensor

BEV (Wien) – Magnetisch-induktiver Durchflusssensor

DTI (Århus) – Venturirohr

### Aufgabenstellung

- DFS können nicht direkt für den Einsatz in Kraftwerken kalibriert werden, da es keine Prüfstände mit bekannter Unsicherheit für diesen Anwendungsfall gibt.
- Eine Hauptaufgabe ist die Entwicklung und Evaluation eines akzeptierten empirischen Modells für die Extrapolation der Kalibrierwerte bei niedrigen Temperaturen zu höheren Temperaturen.

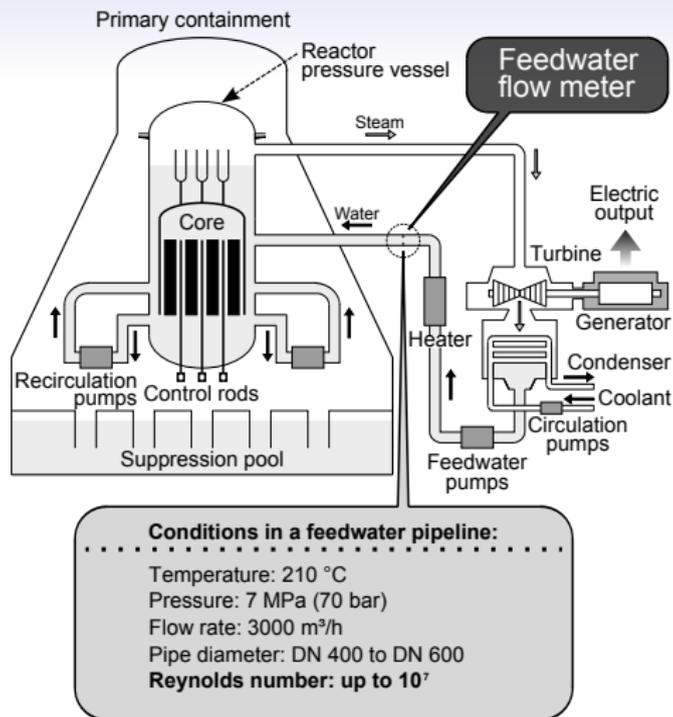


Abbildung: Arbeitsweise eines Atomkraftwerks / *Takamoto*

## Problemstellung

- Es gibt keine Prüfanlage, welche die im Feedwater Kreislauf eingesetzten Durchflusssensoren (DFS) unter Prozessbedingungen kalibrieren kann.
- DFS die auf rückgeführten (mit bekannten Unsicherheiten) Durchflussanlagen (meistens) unter Umgebungsbedingungen mit Drücken von 2 bar kalibriert wurden, werden in Kraftwerken bei Temperaturen von 200 °C bis 280 °C und Drücken von über 70 bar eingesetzt.
- Diese unbekanntenen Unsicherheiten werden in der „Sicherheitsmarge“ des Kraftwerks berücksichtigt.
- Jede Reduzierung dieser Sicherheitsmarge führt zu einer Erhöhung des Wirkungsgrads und lässt das Kraftwerk effizienter arbeiten.
- Dies führt wiederum zu einer Ressourcenschonung und Reduzierung von Treibhausgasen (z. B. CO<sub>2</sub>).

## Projektziele

- Untersuchung der Temperaturabhängigkeit für verschiedene DFS.
- Welche Temperatureinflüsse gibt es im Allgemeinen?
- Kann ein Extrapolationsmodell für den Temperatureinfluss auf die Kalibrierwerte gefunden werden?

### Vorgehensweise im Fall von Messblenden (Untersuchungen bei SP):

- Auswirkung von Temperaturänderungen (Re-Zahl Änderung) auf den Dischargekoeffizienten  $C_d$ ?
- Herleitung einer Gleichung für die Temperaturabhängigkeit.
- Ist eine Extrapolation der Kalibrierwerte für höhere Temperaturen möglich?
  - Prognose der Kalibrierdaten bei 85 °C aus den Messungen bei 20 °C, 30 °C und 50 °C.
  - Prognose der Messergebnisse für die Messungen bei Temperaturen über 200 °C an der Hoch-Temperatur Prüfanlage (HTPA) der PTB.
  - **Später:** Verfeinerung des Modells mit den Messdaten der HTPA.

# Messprinzip einer Messblende

Das Messprinzip basiert auf einer Messung der statischen Druckdifferenz stromaufwärts - und stromabwärts der Messblende.

Nach ISO 5167 und ASME MFC-3M folgt:

$$C_d = \frac{4 \cdot q_m \cdot \sqrt{1 - \beta^4}}{\varepsilon \cdot \pi \cdot d^2 \cdot \sqrt{2 \Delta p \cdot \rho_1}}$$

- Der Differenzdruck  $\Delta p$  wird mit einem Differenzdrucksensor gemessen.
- Die Dichte  $\rho_1$ , der Rohrdurchmesser  $D$  und der Blendendurchmesser  $d$  können direkt aus der Fluidtemperatur bestimmt werden.
- Für die thermische Ausdehnung wird meist ein lineares Modell verwendet, hierbei bleibt das Messblenden- zu Rohrdurchmesser Verhältnis ( $\beta$ -ratio) nahezu konstant.
- Der Expansionkoeffizient  $\varepsilon$  beträgt für inkompressible Fluid  $\varepsilon = 1$ .

## Reader-Harris/Gallagher Gleichung

$$\begin{aligned} C_d = & 0.5961 + 0.0261 \beta^2 - 0.216 \beta^8 + 0.000521 \left[ \frac{\beta \cdot 10^6}{Re_D} \right]^{0.7} \\ & + (0.0188 + 0.0063 A) \beta^{3.5} \left[ \frac{10^6}{Re_D} \right]^{0.3} \\ & + (0.043 + 0.080 e^{-10L_1} - 0.123 e^{-7L_1}) \cdot (1 - 0.11 A) \frac{\beta^4}{1 - \beta^4} \\ & - 0.031 \cdot (M'_2 - 0.8 M'_2{}^{1.1}) \beta^{1.3} \end{aligned}$$

Die Reader-Harris/Gallagher-Gleichung ist eine aus empirischen Daten gewonnene Gleichung, die sich auf mehrere tausend Messwerte mit unterschiedlichen Arten von Messblenden stützt.

# Wahl der Messblende

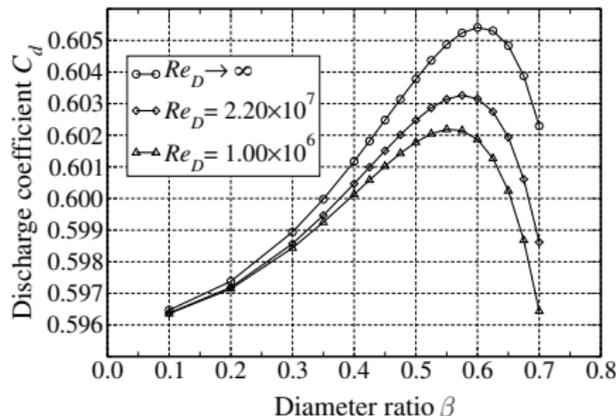
Wie man erkennt, gibt es zwei interessante Bereiche:

1  $0,10 \leq \beta \leq 0,30$

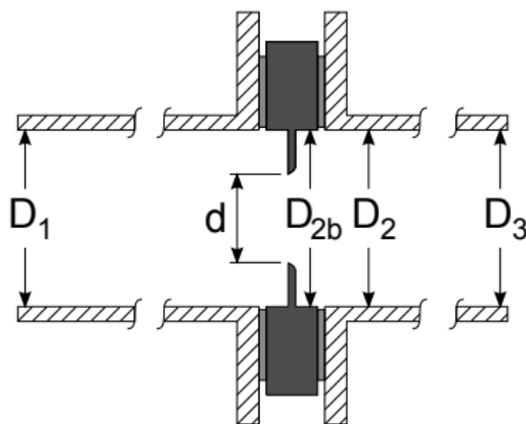
keine Abhängigkeit von der Re-Zahl. Aufgrund des hohen Druckverlusts über der Blende jedoch uninteressant.

2  $0,50 \leq \beta \leq 0,65$

(Wendepunkt)  
Änderungen im Durchmesser (z. B. Ablagerungen) betreffen den Dischargekoeffizienten  $C_d$  nur in geringem Maße.



- Die teilnehmenden NMI's untersuchen einen ANSI 4" DFS mit einem nominalen Durchmesser von  $D = 102,26$  mm bzw. ein DN 100 Gerät.
- Basierend auf den vorgestellten Überlegungen wurde eine Messblende mit einem Durchmesser ratio von  $\beta = 0,5$  gewählt.



	Nom.	Meas.
$d$	51.13	51.13
$D_1$	102.26	101.84
$D_2$	102.26	102.26
$D_{2b}$	102.26	103.49
$D_3$	102.26	102.28
$\beta$	0.500	0.494

**Tabelle:** Nominaler und gemessener Durchmesser [mm] der Messblende – mit Ringkammer und Druckeckentnahme – und der resultierende Wert für  $\beta$

## Festgelegter Messplan

Temperature [°C]	10	20	30	50	70	85
Kin. visc. [ $\times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ]	1.3081	1.0048	0.8018	0.5539	0.4133	0.3444
Av. flow velocity [ $\text{m s}^{-1}$ ]	6.40	4.92	3.92	2.71	2.02	1.68
Flow rate [ $\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$ ]	188.993	145.173	115.850	80.034	59.721	49.760

**Tabelle:** Messplan für die Re-Zahl  $Re_D = 500\,000$  für unterschiedliche Temperaturen

Temperature [°C]	10	20	30	50	70	85
Kin. visc. [ $\times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ]	1.3081	1.0048	0.8018	0.5539	0.4133	0.3444
Av. flow velocity [ $\text{m s}^{-1}$ ]	12.80	9.83	7.85	5.42	4.04	3.37
Flow rate [ $\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$ ]	377.985	290.347	231.701	160.069	119.443	99.520

**Tabelle:** Messplan für die Re-Zahl  $Re_D = 1\,000\,000$  für unterschiedliche Temperaturen

Diese Messpunkte wurden von allen NMI einheitlich gemessen. Alle weiteren Messpunkte konnten frei gewählt werden.

# Organisation der Messungen

## Struktur der Messungen

### 1 Temperatureinfluss

- Trennung von Temperatur- und Strömungsprofileinfluss setzt vollausgebildetes turbulentes Strömungsprofil voraus.
- Dieses ungestörte, vollausgebildete Strömungsprofil ist zudem Voraussetzung für die Vergleichbarkeit der Messungen bei den unterschiedlichen NMIs.
  - Messung des ungestörten (vollflächigen) Geschwindigkeitsprofils bei jedem teilnehmenden NMI bei 20 °C, 30 °C und 50 °C.
  - Vergleich des gemessenen Profils mit dem berechneten G&H-Normprofil und Bewertung mit Hilfe von Strömungskennzahlen.

### 2 Strömungsprofileinfluss

- Untersuchungen mit einem von der PTB entwickelten Störkörper.
- Zusätzliche Untersuchungen mit einem weiteren Störkörper.
- Voraussagbarkeit des  $C_d$ -Werts für verschiedene Störungen.

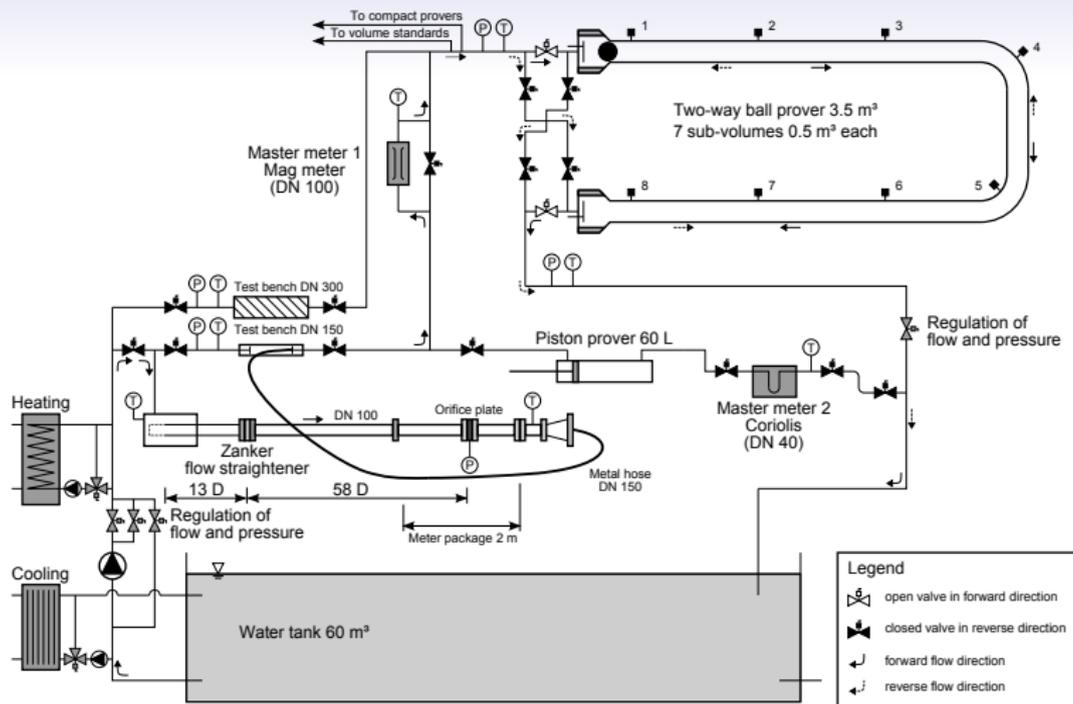


Abbildung: Übersicht der SP-Kalibrierprüfstände VM 3 (DN 300) und VM 4 (DN 150)



Abbildung: Messaufbau für die LDV-Untersuchungen

# LDV-Messungen

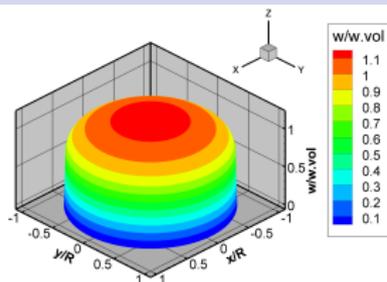


Abbildung: Normprofil nach G&H für 20 °C

- Die Messung der sekundären Geschwindigkeitskomponenten für die Ermittlung des maximalen Drallwinkels  $\Phi_{\max}$  wurde aus Zeitgründen nur bei 20 °C mit Hilfe von zwei sich kreuzenden Einzelpfaden durchgeführt.

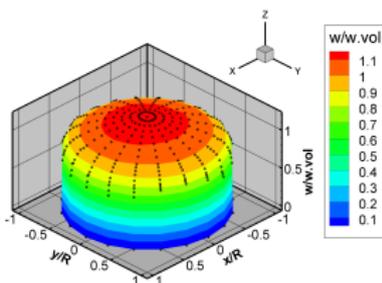
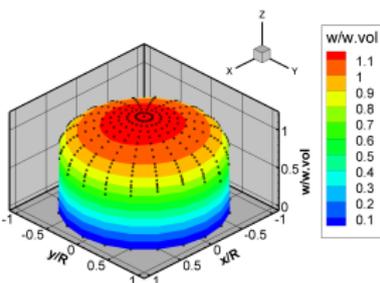
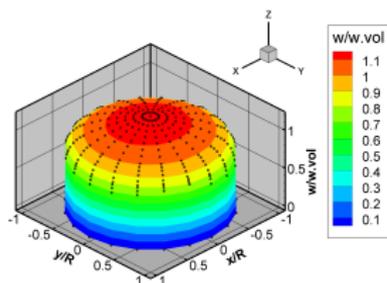


Abbildung: Gemessene axiale Profile für  $Re = 500\,000$  bei 20 °C, 30 °C und 50 °C

# Ergebnisse der LDV-Messungen

Bezeichnung	Abkürzung	Grenzen	ermittelter Wert	Bedingung erfüllt?
Profilmfaktor	$K_P$	$0,80 \leq K_P \leq 1,30$	$1,01 \leq K_P \leq 1,07$	☑
Asymmetriefaktor	$K_A$	$K_{A,max} = 1\%$	$K_{A,max} = 0,41\%$	☑
Turbulenzfaktor	$K_{Tu}$	$K_{Tu,max} = 2$	$K_{Tu,max} = 1,71$	☑
Maximaler Drallwinkel	$\Phi_{max}$	$\Phi_{max} = 2^\circ$	$\Phi_{max} \ll 1^\circ$	☑

Tabelle: Übersicht der ermittelten Kennzahlen und Akzeptanzbereiche / Dues

## Zusammenfassung

- Die Bedingungen für ein vollausgebildetes, turbulentes Strömungsprofil sind erfüllt.
- **Die Voraussetzungen für weitere Untersuchungen sind gegeben!**

# Temperaturabhängigkeit

## Durchführung

- Untersuchungen bei Temperaturen von 20 °C, 30 °C, 50 °C, 70 °C und 85 °C.
- Zwei Mastermeter (und zugehörige Normale): E&H MID (Ball prover) und CMF 200 Coriolis-DFS (Pisten prover, 60 L).
- Drei Differenzdrucksensoren (100 kPa, 200 kPa und 500 kPa), jeweils zwei parallel.
- Zwei oder mehr Messreihen mit jeweils 10 Wiederholungen pro Messpunkt.

## Vorgehensweise

- 1 Die Extrapolation basierend auf den Daten von 20 °C, 30 °C und 50 °C wurde mit den experimentellen Daten bei 85 °C verglichen. Die maximale Abweichung betrug 0,104 % bei einem Mittelwert von 0,047 %.
- 2 Bei der Verwendung der Datensätze von vier Temperaturen 20 °C, 30 °C, 50 °C und 70 °C für die Extrapolation betrug die Differenz zwischen Experiment und Voraussage 0,004 % im Mittel und 0,044 % im Maximum.

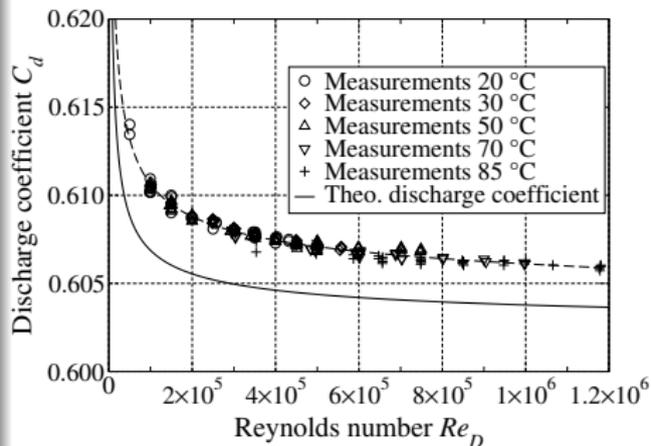
# Fitting bzw. Anpassung der Messdaten

## Mathematisches Modell

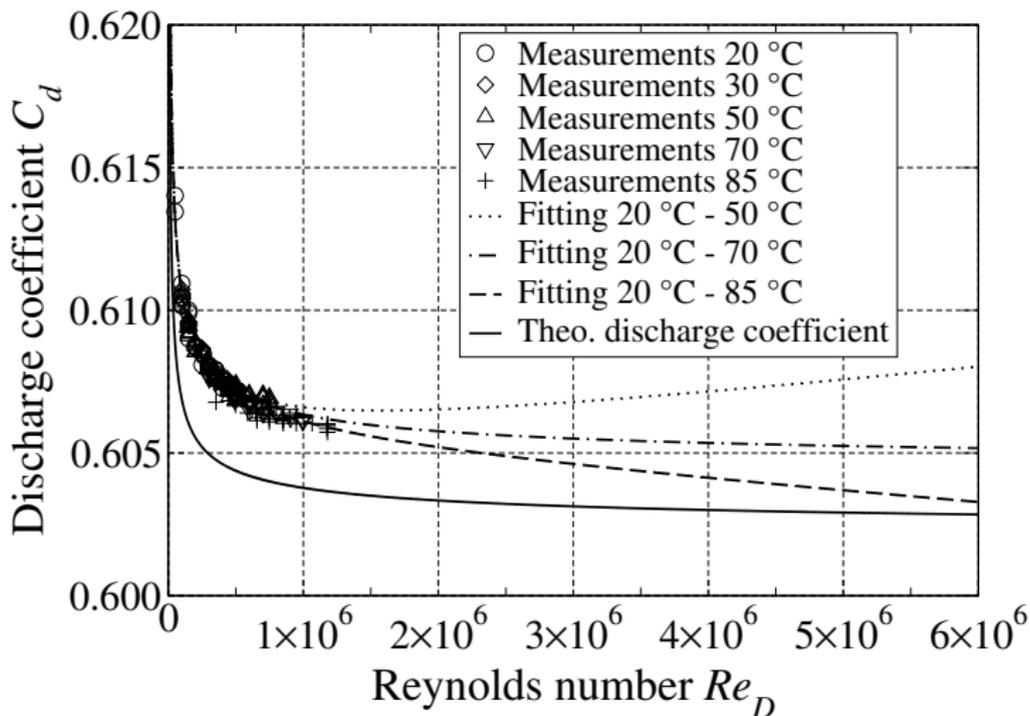
Extrapolation von Kalibrierdaten bei geringen Temperaturen zu hohen Temperaturen:

$$C_{d,fit} = c_1 + \frac{c_2}{\sqrt{Re_D}} + c_3 \cdot Re_D$$

Die Anpassung der Koeffizienten  $c_1$ ,  $c_2$  und  $c_3$  wurde mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate, bzw. mit dem *Levenberg-Marquardt Algorithmus* (LMA) durchgeführt.



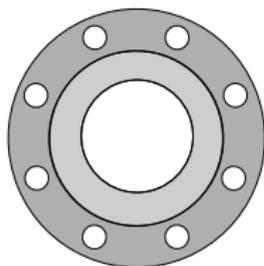
# Extrapolation zu höheren Re-Zahlen



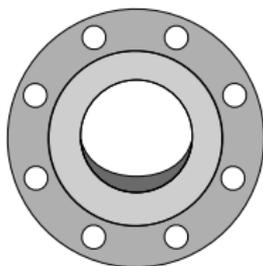
## Zusammenfassung der Temperaturabhängigkeit

- Die Messblende erzeugte sehr wiederholbare und reproduzierbare Messdaten.
- Der gemessenen Kurvenverlauf der Kalibrierkurve passt sich gut der Reader-Harris/Gallagher-Gleichung an und liegt in allen Bereichen innerhalb der angegebenen Unsicherheit der RHG-Gleichung von 0,5 %.
- Die gemessene Kurve liegt tendenziell unterhalb der RHG-Gleichung.
- Ein vereinfachtes Modell für die Extrapolation der Kalibrierwerte für höhere Temperaturen (höhere Re-Zahlen) wurde eingeführt.
- Das Modell wurde für einen ersten Fall erfolgreich angewandt.
- Das Modell soll später mit Hilfe der HTPA (Re-Zahlen bis  $6 \times 10^6$ ) validiert und verbessert werden.
- Das angestrebte Ziel (Reduzierung der Unsicherheit der Durchflussmessung von 2 % zu 0,5 %) scheint erreichbar.

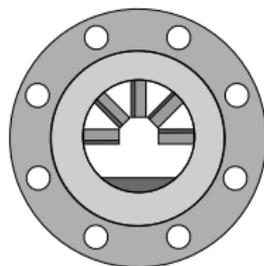
# Störkörperuntersuchungen



(a) Undisturbed



(b) SP-designed



(c) PTB-designed

## Überblick der verwendeten Störkörper

Die Störkörper wurden  $12D$  vor der Messblende eingebaut.

- a) Ungestörter Fall
- b) SP-designed: Dichtung die in die Strömung ragt, ein teilweise geschlossenes Kugelventil (flacheres Profil)
- c) PTB-designed: Raumkrümmer (drallbehaftetes Profil)

# Arten von Störungen

## Theorie für Messblenden

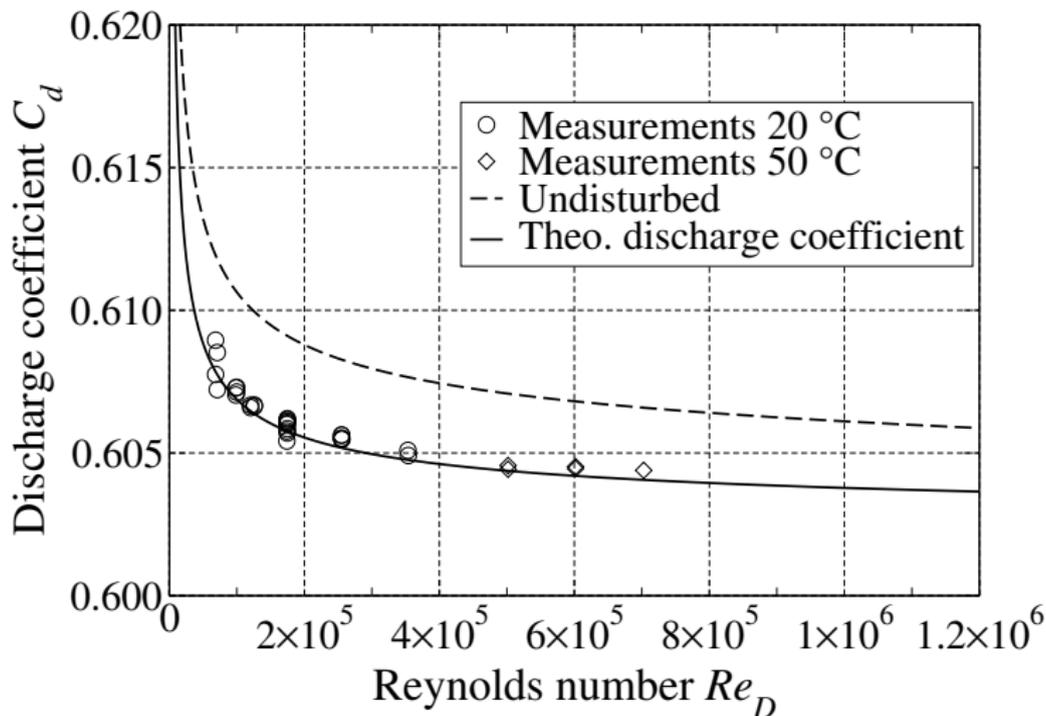
1 **Asymmetrie** überhöhte (spitzere) Profile führen zu einem erhöhten  $C_d$ -Wert, flachere Profile führen zu einem verringerten  $C_d$ -Wert.

- Abhängigkeit von den Druckabnahmestellen (corner taps, flange taps,  $D/2$  und  $D$  taps)
- Höhere  $\beta$ -ratios sind stärker betroffen als geringere.
- Spitzere Profile: rauhere Rohre, enge Flansche, Diffusoren
- Flachere Profile: Blenden, Düsen, Siebe, Sonden, Gleichrichter, Konfusoren, Krümmer, T-Stücke

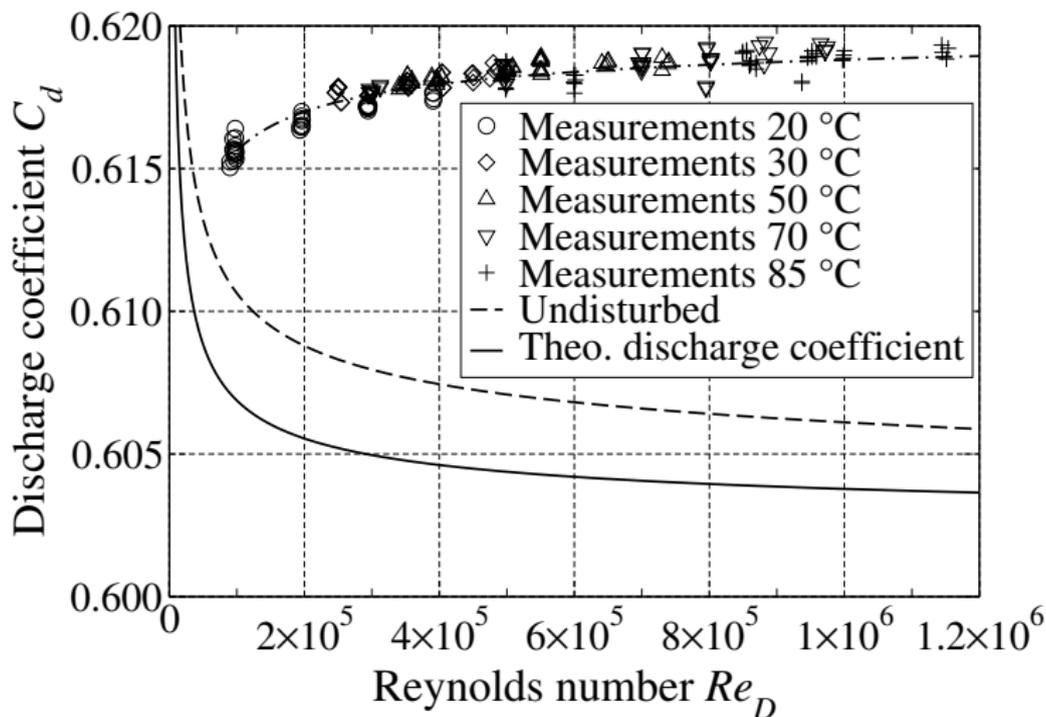
2 **Drallbehaftete Profile** (gleichzeitige Änderung des axialen Profils)

- (Problem bei generischem Drall: bei höherem Drall wird Profil meist flacher)
- Stromabwärts wird ein zu hoher Druck gemessen.
- Der geringere Gesamtdruck führt zu einem höheren  $C_d$ -Wert.
- Geringere  $\beta$ -ratios sind stärker betroffen als höhere (!)
- Messblenden sind empfindlicher bei Drall- als bei asymmetrischen Störungen.

## SP-designed Störkörper



# PTB-designed Störkörper



## Zusammenfassung der Strömungsprofilabhängigkeit

- Untersucht wurde die asymmetrische - und die drallbehaftete Anströmbedingung.
- Die gemessenen Werte entsprechen dem erwarteten (bzw. theoretischen) Verhalten.
- Das Verhalten ist jedoch für jede Messblende individuell.
- Es gibt viele Einflussfaktoren auf den Messwert, z. B. Druckentnahme und  $\beta$ -ratio.
- Es lassen sich Voraussagen für unterschiedliche Anströmbedingungen machen.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit !!