

# Vergleichsmessungen in der Durchflussmessung von Flüssigkeiten Erfahrungen aus der Praxis

Workshop  
„Nachweis von Messunsicherheiten im Rahmen der Akkreditierung von  
Laboratorien im Durchflussbereich“

22./23.10.2019 PTB, Braunschweig

Enrico Frahm  
Arbeitsgruppe 1.52 „Darstellung Flüssigkeitsmenge“

## Ringvergleiche – Inhalt Vortrag

### Schwerpunkte im Vortrag

- Fachbereich 1.5 „Flüssigkeiten“ – Teilnahme an Ringvergleichen
- Allgemeines Vorgehen bei Vergleichsmessungen
- Unsicherheit des Transfergerätes
  - => Bestimmung
  - => Einflussgrößen
  - => Beispiele und Bedeutung

### Wo tritt die AG 1.52 als Teilnehmer auf?

#### Als Pilotlabor (Organisation + Auswertung)

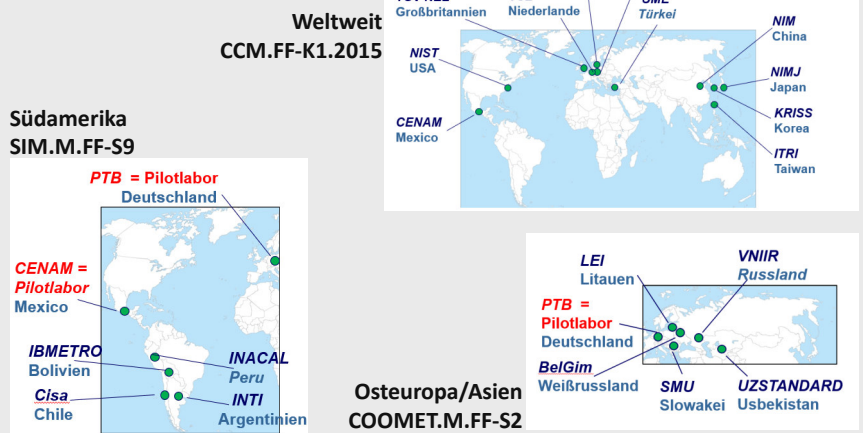
- CCM.FF-K1.2015 (Wasser, DN100) = Key Comparison
- COOMET.M.FF-S2 (Wasser, DN25 + DN 80) = Supplementary Comparison
- SIM.M.FF-S9 (Wasser, DN 80) = Supplementary Comparison
- DKD-Ringvergleich Flüssigkeiten (Wasser + Testbenzin, DN15/25 DN150)

#### Als Teilnehmer (z.B. Anschlussmessung)

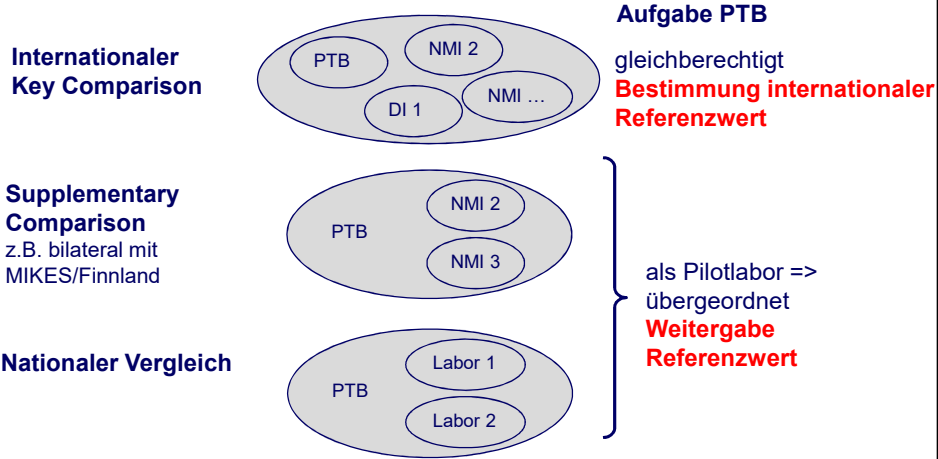
- CCM.FF-K2.2011 (Wasser + Testbenzin, DN40)
- PTB – MIKES (Wasser, DN100) = Supplementary Comparison
- ILC 1500-18 Herstellervergleich in Tschechien, Italien (Wasser, DN 300)

### Wo tritt die AG 1.52 als Teilnehmer auf?

#### Pilotlabor – Internationale Vergleichsmessungen



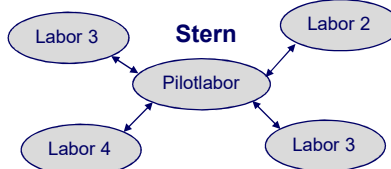
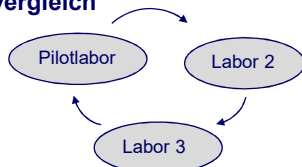
**In welcher Rolle tritt die PTB als Teilnehmer auf?**



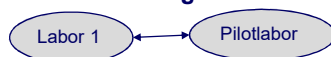
**In welcher Rolle tritt die PTB als Teilnehmer auf?**

Beispiele für Organisationsformen von Vergleichen:

**Ringvergleich**



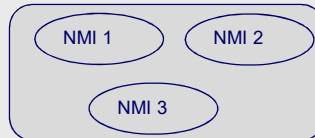
**Bilateraler Vergleich**



In welcher Rolle tritt die PTB als Teilnehmer auf?

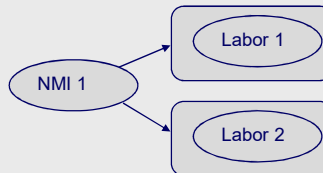
Ergebnis von Ringvergleichen – Unterschied in der Auswertung

Ein metrologisches Level  
(e.g. PTB, VSL, NIST)



→ Bestimmung eines gemeinsamen **Referenzwertes**

Referenzlabor vs. niedrigeres metrologisches Level bzw. Abschlussmessung



→ **Abweichung** zum Referenzlabor

Ringvergleich – Allgemeines Vorgehen

## Ringvergleich – Allgemeines Vorgehen

### Arbeitsschritt 1 - Vorbereitung:

- Teilnehmer und (möglichst unabhängiges) Pilotlabor festlegen
- Messgrößen und -bereich abstimmen
- Fragenkatalog von Teilnehmern beantworten lassen (Messmöglichkeiten, Referenz, Messbereiche etc.)
- Festlegen vom Auswerteprocedere (Referenzwert vs. Referenzlabor)
- Anfertigen und gemeinsames Bestätigen vom Technischen Protokoll u.a. Qualitätskriterien festlegen, Transfergeräte beschreiben, Veröffentlichungen, „Worst-Case-Szenarios“ abstimmen, Kosten, Zeitplan etc.

## Ringvergleich – Allgemeines Vorgehen

### Arbeitsschritt 2 – Charakterisierung TransfERNormale:

→ Nächstes Kapitel

### Arbeitsschritt 3 – Durchführen der Vergleichsmessungen:

- Kalibrieren unter Standard-Messbedingungen
- Zusätzlich: an Vorgaben zu Nominalbedingungen halten (Durchfluss, Druck, Temperatur)
- Protokollführung inkl. Fotodokumentation
- Datenerfassung und -versand, möglichst als Kalibrierschein

## Ringvergleich – Allgemeines Vorgehen

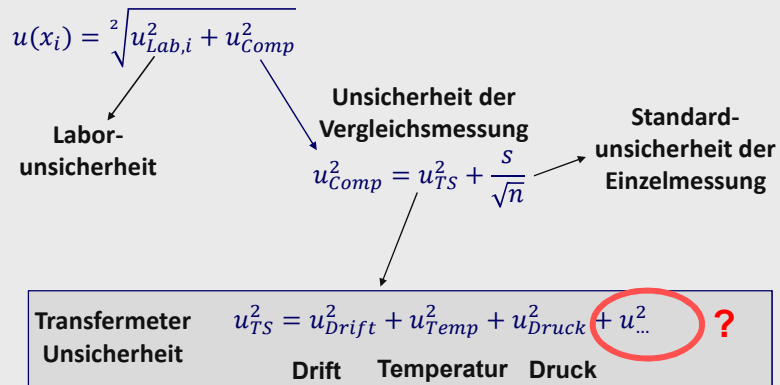
### Arbeitsschritt 4 – Auswertung, Vergleich und Abschlussbericht

- Zusammenstellung aller relevanten Daten
- Auswertung nach Technischem Protokoll
- **Bestimmung Unsicherheit Transfergerät**
- Evaluierung der Messergebnisse ( $\chi^2$ -Test,  $E_N$ -Wert,  $u_{TS}$ )
- Entscheidung zu den eingereichten Laborunsicherheiten
- **Abschlussbericht Draft A** => alle Teilnehmer stimmen über eigene Teilnahme ab und bestätigen die abgegebenen Daten + Auswerteprocedere
- **Abschlussbericht Draft B** => Zustimmung aller Teilnehmer zur abschließenden Auswertung

## Ringvergleich – Unsicherheit Transfergeräte

**Ringvergleich – Unsicherheit Transfergerät**

**Unsicherheit  $u(x_i)$  einer Messung - Eingangsgrößen**



**Ringvergleich – Unsicherheit Transfergerät**

**Im Folgenden Beispiele für Unsicherheitsbeiträge**

- Fluidtemperatur
- Viskosität Kalibriermedium
- Sensitivität auf unterschiedliche Einlaufbedingungen
- Einfluss von Durchflussstabilität

**Gegenüberstellung von**

- a) Varianz der Laborbedingungen
- b) Geräteeigenschaften

**Fluidtemperatur und Druck - Varianz Laborbedingungen**

**Fluidtemperatur und Druck - Varianz Laborbedingungen**

		Internat. Ringvergleich CCM.FF-K1.2015		DKD Ringvergleich „Flüssigkeiten“	
<b>Fluid- Temperatur</b>	nominal	20 °C	<b>Max Abweichung zum Nominalwert</b>  <b>9 K</b>	20 °C	<b>Max Abweichung zum Nominalwert</b>  <b>8 K</b>
	Min	11 °C		20 °C	
	Max	28 °C		28 °C	
<b>Druck Messstrecke</b>	nominal	3 bar	<b>2,5 bar</b>	3 bar	<b>1 bar</b>
	Min	0,5 bar		2 bar	
	Max	4 bar		3 bar	

**→ Einfluss auf Unsicherheit Transfermeter?**



## Fluidtemperatur - Geräteabhängigkeit

Beispiel: CCM.FF-K1.2015 → deutliche Temperaturabhängigkeit der Geräte

→ max. Änderung k-Faktor: 0,07 % bei  $\Delta T = 10 \text{ K}$

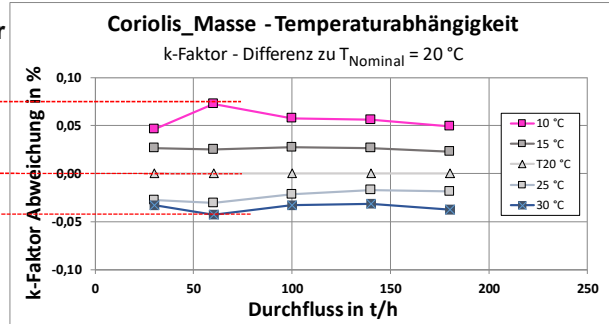
Änderung Geräte k-Faktor bei  $\Delta T = \pm 10 \text{ °C}$

- 10 °C →  $\Delta k = 0,07 \%$

+ 10 °C →  $\Delta k = 0,04 \%$



Korrektur der k-Faktoren → Verringerung der Geräteunsicherheit

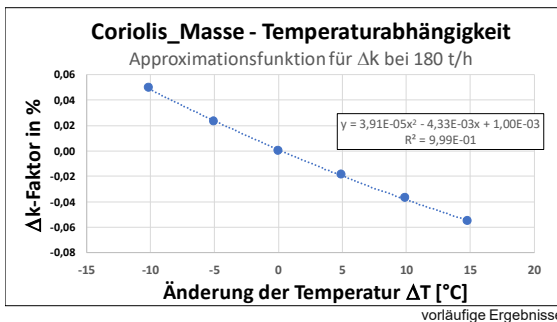


vorläufige Ergebnisse

## Fluidtemperatur - Korrektur Geräte k-Faktor

Beispiel: CCM.FF-K1.2015 → durchflussabhängige Korrektur Geräte k-Faktor

→ = Korrektur systematischer Fehler



vorläufige Ergebnisse

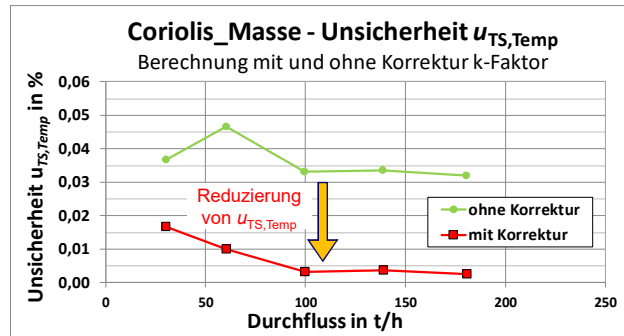
Korrelation zwischen  $\Delta k$ -Faktor und  $\Delta T = (k_{\text{Labor}} - k_{20^\circ\text{C}})$  vs.  $(T_{\text{Labor}} - T_{20^\circ\text{C}})$

Korrektur bei jedem Nominaldurchfluss

### Fluidtemperatur - Korrigierte Unsicherheit $u_{TS,Temp}$

Beispiel: CCM.FF-K1.2015 → Residuen nach Korrektur => neue Unsicherheit

→ Reduzierung von  $u_{TS,Temp}$  um bis zu 90 %



vorläufige Ergebnisse

### Fluideigenschaften - Varianz der Laborbedingungen

### Fluideigenschaften - Varianz der Laborbedingungen

Beispiel: DKD-Ringvergleich „Flüssigkeiten“ und andere intern. Ringvergleiche

→ unterschiedliche Viskositäten und Dichte

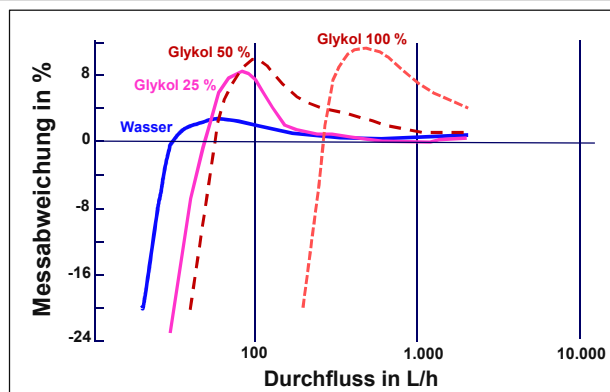
	Viskosität	Dichte
Wasser bei 20 °C	1,0 mPa s	1.000 kg/m <sup>3</sup>
Flüssige Kohlenwasserstoffe (z.B. Testbenzin)	1,1 mPa s ... 25,0 mPa s	750 kg/m <sup>3</sup> ... 880 kg/m <sup>3</sup>

→ Einfluss auf Unsicherheit Transfermeter?

### Fluideigenschaften - Geräteabhängigkeit

Beispiel: Mehrstrahlflügelradzähler, Wasser und Glykol-Gemische

→ von Viskosität abhängige Messabweichung

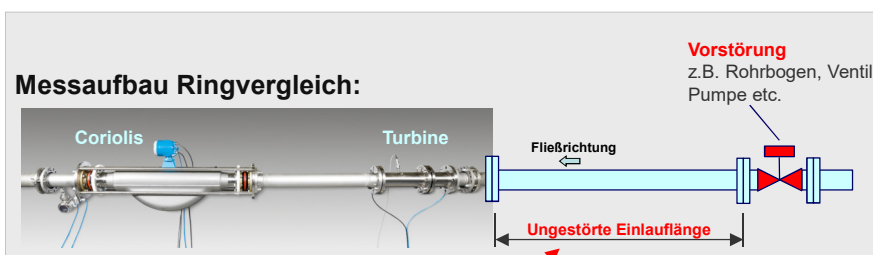


Nach Adunka (2019):  
Handbuch der  
Wärmeverbrauchs-  
messung.  
Grundlagen,  
Methoden, Probleme.  
5. Auflage  
Vulkan Verlag

## Einlaufbedingungen - Varianz der Laborbedingungen

## Einlaufbedingungen - Varianz der Laborbedingungen

Beispiel: CCM.FF-K1.2015 → unterschiedliche Einlaufängen



Ungestörte Einlaufängen der beteiligten Labore:  
zwischen 2,5 m und 15,0 m

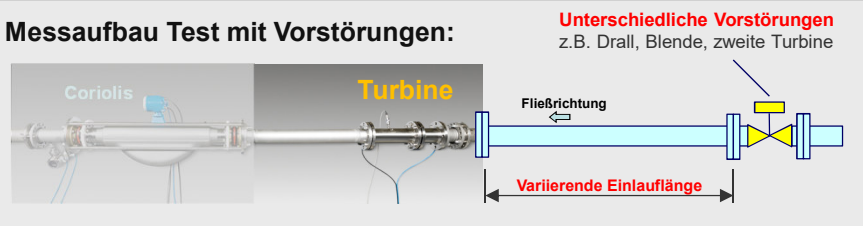
→ Einfluss auf Unsicherheit Transfermeter?

### Einlaufbedingungen - Geräteabhängigkeit

Beispiel: CCM.FF-K1.2015 und DKD Ringvergleich „Flüssigkeiten“ - Turbine

- deutliche Abweichungen in den Fehlerkurven der einzelnen Labore
- nicht zu erklären mit bekannten Unsicherheitsbeiträgen
- **Frage:** Welchen Einfluss haben die Einlaufbedingungen auf die Messeigenschaften der Turbine?
- zusätzliche Untersuchungen mit Vorstörungen im Einlauf zur Turbine

#### Messaufbau Test mit Vorstörungen:

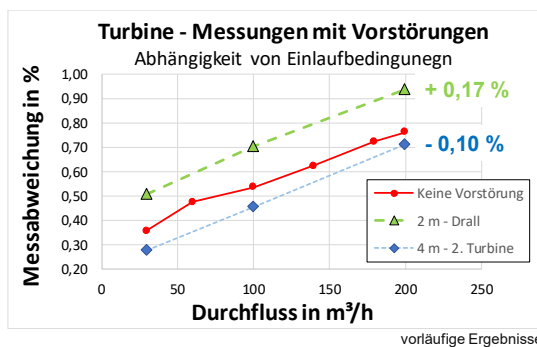
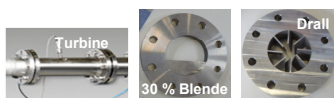


### Einlaufbedingungen - Geräteabhängigkeit

Beispiel: CCM.FF-K1.2015

- Sensitivität des Messgerätes auf Vorstörungen eindeutig nachweisbar
- Unsicherheitsbeitrag von  $u_{TS, Einlauf} = 0,08 \% (k = 1)$

Maximale Verschiebung der Messabweichung bei Einlaufängen  $\geq 2 \text{ m} \Rightarrow +0,17 \%$  (Drall, 2 m Einlaufänge)



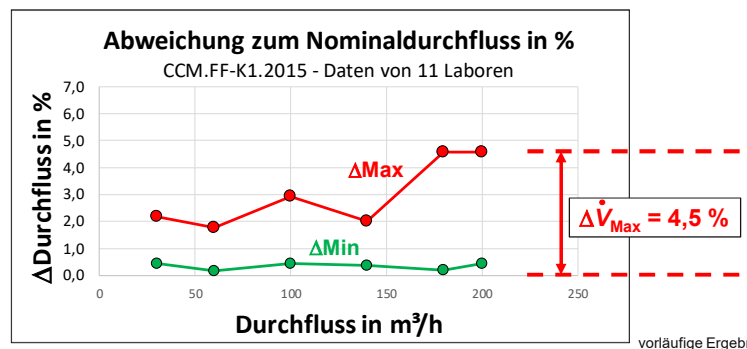
## Varianz der Laborbedingungen - Durchflussstabilität

## Varianz der Laborbedingungen - Durchflussstabilität

Beispiel: CCM.FF-K1.2015 → Abweichung vom Nominaldurchfluss

Nominaldurchfluss vorgegeben: 30 m<sup>3</sup>/h, 60 m<sup>3</sup>/h, ..., 200 m<sup>3</sup>/h

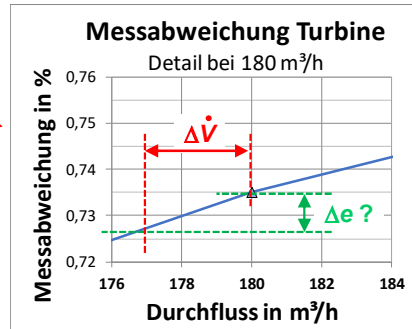
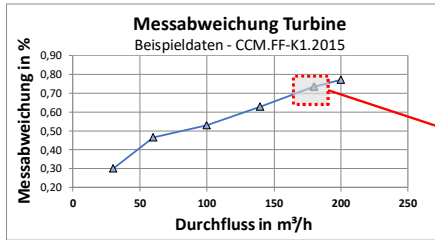
Maximale Abweichung in den Laboren  $\Delta \dot{V}_{Max} = 4,5 \%$



### Durchflussstabilität - Geräteabhängigkeit

Beispiel: CCM.FF-K1.2015 → Beispiel Turbine – Anstieg der Fehlerkurve

bereits bei kleinem  $\Delta \dot{V} \Rightarrow$  Auswirkungen auf Messabweichung  $\Delta e$



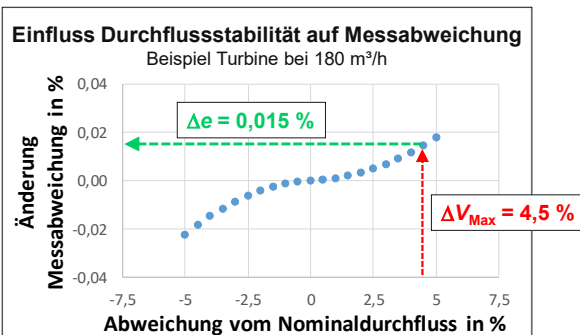
vorläufige Ergebnisse

### Durchflussstabilität - Geräteabhängigkeit

Beispiel: CCM.FF-K1.2015 → Beispieldaten Turbine

Nominaldurchfluss vorgegeben: 30 m³/h, 60 m³/h, ... 200 m³/h

z.B. bei  $\Delta \dot{V}_{\max} = 4,5 \%$  → Messabweichung  $\Delta e = 0,015 \%$



vorläufige Ergebnisse

## Unsicherheit Transfergerät $u_{TS}$

Unsicherheit Transfermeter = Summe aller Einflussgrößen

$$u_{TS}^2 = u_{Drift}^2 + u_{Temp}^2 + u_{Druck}^2 + u_{Reprod}^2 + \dots$$
$$\dots + u_{Visk}^2 + u_{Einlauf}^2 + u_{Stab.}^2$$

**Berücksichtigung von:**

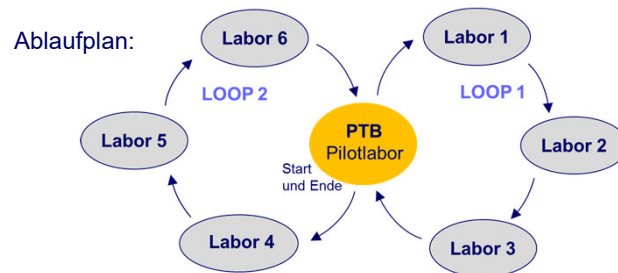
- Drift
- Temperatur
- Druck
- Reproducibility
- Viskosität
- Einlaufbedingungen
- Durchflussstabilität

## Bewertung der Unsicherheit $u_{TS}$ vom Transfergerät



### Unsicherheit $u_{TS}$ : Beispiel DKD Ringvergleich

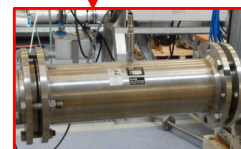
- **Ziel:** Bestätigung der Laborunsicherheiten für Akkreditierung
- **Teilnehmer:** 6 DAkkS-Laboratorien
- **Messzeitraum:** 2017 - 2018



### Unsicherheit $u_{TS}$ : Beispiel DKD Ringvergleich

**Messgeräte:**

	Turbine DN15	Coriolis DN25	MID DN25	Turbine DN150
Messbereich	0,08 m <sup>3</sup> /h - 1,2 m <sup>3</sup> /h	0,9 t/h - 9,0 t/h	0,9 m <sup>3</sup> /h - 9,0 m <sup>3</sup> /h	60 m <sup>3</sup> /h - 600 m <sup>3</sup> /h



### Unsicherheit $u_{TS}$ : Beispiel DKD Ringvergleich

Unsicherheit  $u_{TS}$

$$u_{TS}^2 = u_{Drift}^2 + u_{Temp}^2 + u_{Druck}^2 + u_{Reprod}^2 + ???$$

$u_{TS}$  bei 1/3 vom Durchflussbereich:

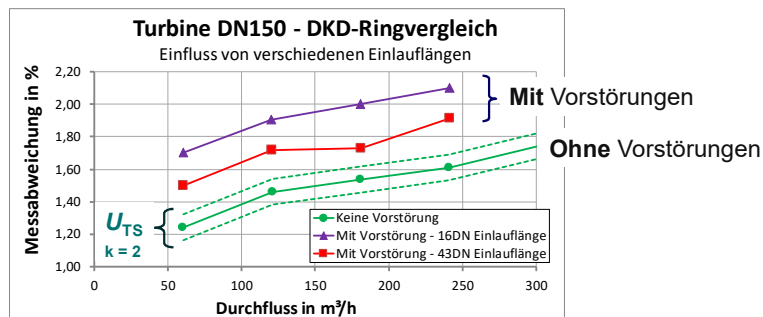
	Turbine DN150 in %	Coriolis DN25 in %
$u_{Drift}$	0,038	0,016
$u_{Temp}$	0,006	0,007
$u_{Press}$	0,009	0,003
$u_{Reprod}$	0,004	0,002
$u_{TS}$	<b>0,040</b>	<b>0,019</b>

vorläufige Ergebnisse

Was bei Berücksichtigung von Einlaufbedingungen  $u_{TS, Einlauf} ???$

### Unsicherheit $u_{TS}$ : Beispiel DKD Ringvergleich

Messungen an der PTB: Messabweichung Turbine – Einfluss Vorstörungen



Erhöhung Unsicherheit  $u_{TS}$ , wenn Einlaufbedingungen berücksichtigt werden  
=> **um Faktor 7**

$$u_{TS}^2 = u_{Drift}^2 + u_{Temp}^2 + u_{Druck}^2 + u_{Reprod}^2 + u_{Einlauf}^2$$

## Unsicherheit $u_{TS}$ : Beispiel DKD Ringvergleich

### Qualitätskriterien zur Ergebnisevaluierung:

Chi<sup>2</sup>-Test, E<sub>N</sub>-Wert und  $u_{comp}/u_{labor}$

Maßgeblich geprägt durch Verhältnis zwischen Unsicherheit des Transfergerätes  $u_{TS}$  und der Laborunsicherheit  $u_{Labor}$   $\frac{u_{TS}}{u_{Labor}} \leq 2.0$

Die Unsicherheit  $u_{TS}$  vom Transfergerät steigt, wenn die Einlaufbedingungen berücksichtigt werden:

=> Bis zu Faktor 7 =>  $u_{TS}(\text{Turbine}) = 0,30 \%$

**Eignung der Turbine als Transfergerät?**

Eine **Bestätigung** der Laborunsicherheiten ist **nur** möglich **für Labore mit**  $u_{lab} \geq 0,15 \%$  ( $k = 1$ )

## Ringvergleiche

- **!wichtig für den Nachweis der Prüfstandsunsicherheiten!**
- Zeitlich sehr **aufwendig**
- Genügend Zeit für Vorbereitungen einplanen (**Technisches Protokoll**)
- Auswahl des **Transfergerätes ist entscheidend** - Eignungstests (z.B. durch Charakterisierungsmessungen)
- **Einfluss von Laborbedingungen** auf die Messungen berücksichtigen (Einlaufbedingungen, Umgebungsbedingungen etc.)
- **Je geringer die Laborunsicherheit => desto höher die Ansprüche an die Vergleichsmessungen und das Testgerät**

**Dr. Enrico Frahm**

Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig  
Fachbereich 1.5 „Flüssigkeiten“  
[enrico.frahm@ptb.de](mailto:enrico.frahm@ptb.de)

