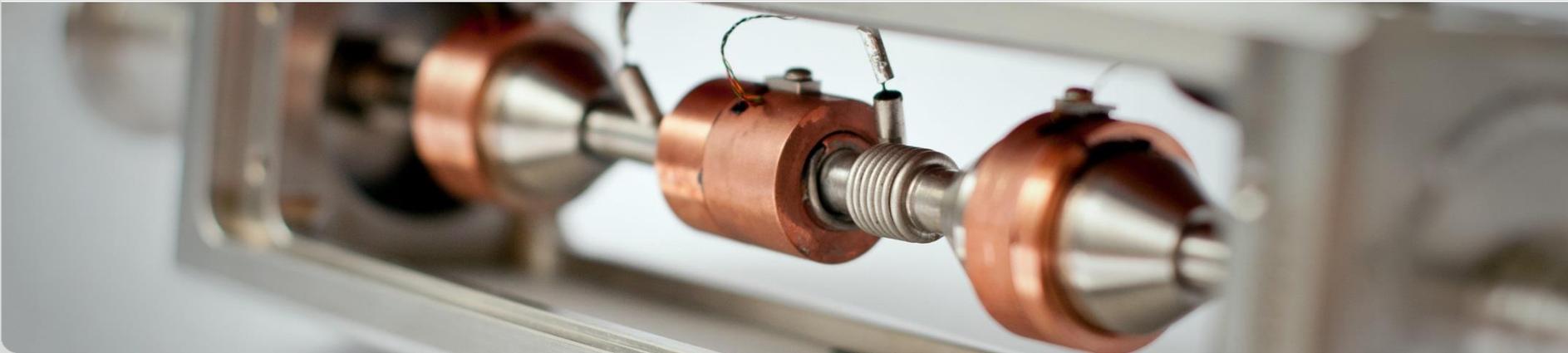


Eigenkalibrierung eines neuen kryogenen Durchflusssensors im Anlagenbetrieb

A. Janzen, M. Börsch, B. Burger, A. Ebersoldt, P. Erni, F. Feldbusch, R. Lietzow, D. Oertig,
H. Schön, M. Stamm, S. Grohmann, DKV-Tagung 2016, Kassel, AA I.20, 18.11.2016

INSTITUT FÜR TECHNISCHE THERMODYNAMIK UND KÄLTETECHNIK



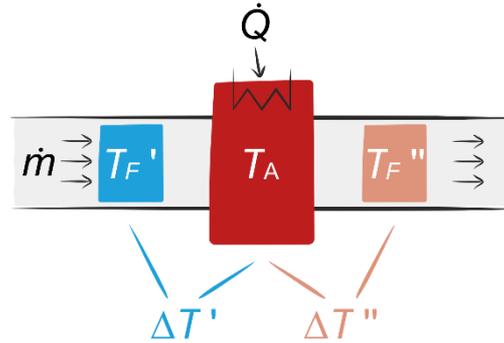
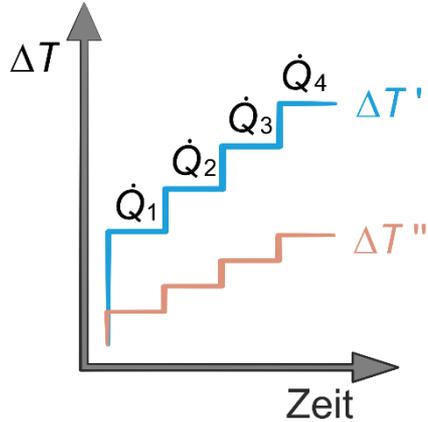
Motivation

- Keine kommerzielle Verfügbarkeit von kryogenen Durchflusssensoren
 - Kryogene Kalibrierung aufwendig und teuer
 - Extrapolation werksseitiger Kalibrierungen zu tiefen Temperaturen nur mit sehr großer Unsicherheit möglich

Entwicklung eines kommerziellen Durchflusssensors für kryogene Anwendungen mit der WEKA AG, Schweiz

- Kurzvorstellung der neuen thermischen Messmethode
- Vorstellung des experimentellen Aufbaus
- Prototypmesssystem im Vergleich zu einem Venturirohr

Funktion der Eigenkalibrierung



Energiebilanz Fluid:

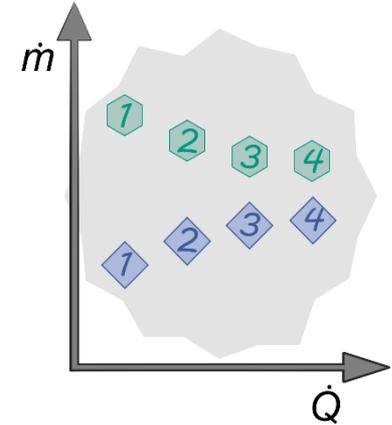
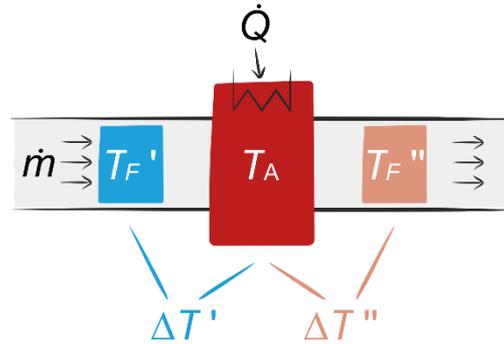
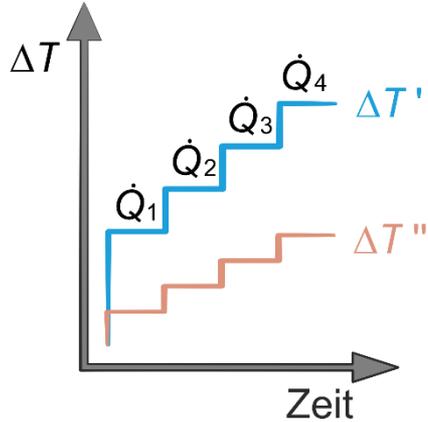
$$\dot{m}_A = \frac{\dot{Q}}{c_p (\Delta T' - \Delta T'')}$$

Energiebilanz Fluid + WÜ:

$$\dot{m}_B = \frac{1}{R c_p \ln \left(\frac{\Delta T'}{\Delta T''} \right)}$$

?

Funktion der Eigenkalibrierung



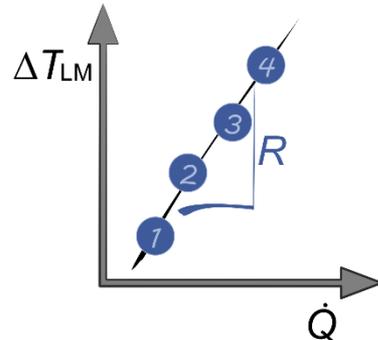
Systematische
Unsicherheit



Energiebilanz Fluid + WÜ:

$$\dot{m}_B = \frac{1}{R c_p \ln\left(\frac{\Delta T'}{\Delta T''}\right)}$$

?



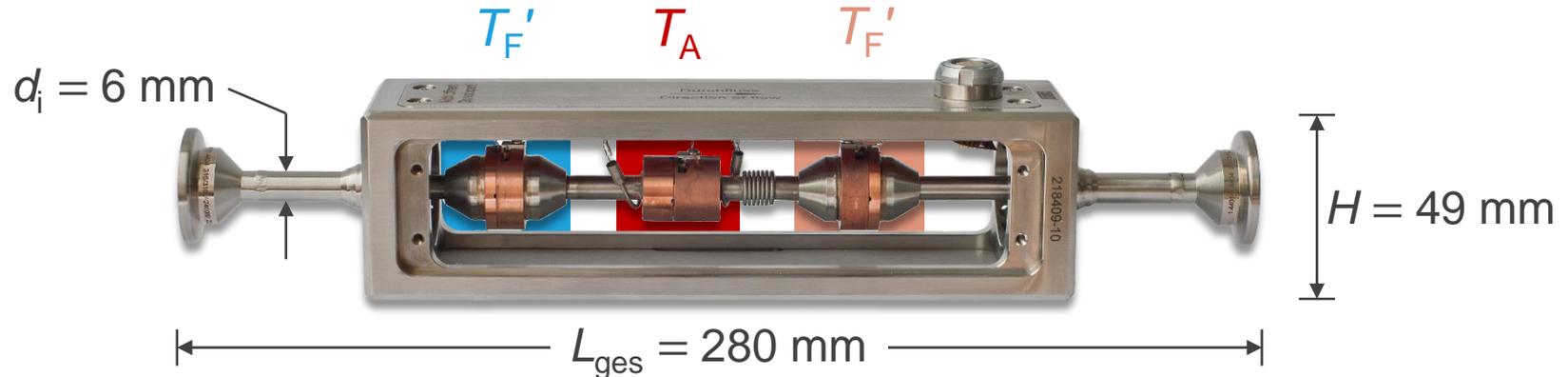
Kryogene Experimente

EXPERIMENTELLER AUFBAU

Prototypmesssystem

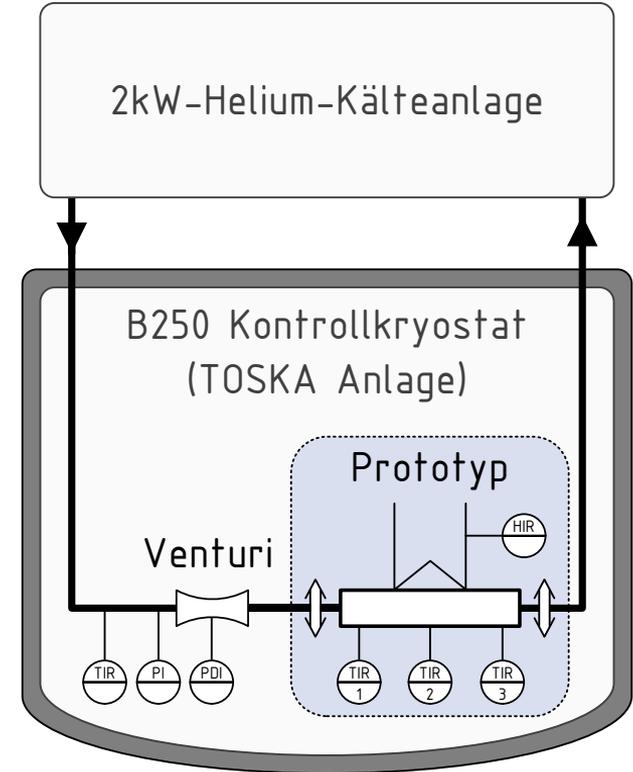
■ Prototypsensor

- 3 Temperaturmessstellen (Cernox CX-1050-Sensoren)
- $\dot{m}_{\text{Helium}} = 0,2 \dots 12 \text{ g/s}$
- $T = 4 \dots 300 \text{ K}, p \leq 5 \text{ MPa}$



Einbau in B250-Kontrollkryostat

- Einbau des Prototypen in TOSKA-Anlage
- Kryogenes Helium aus 2 kW-Kälteanlage
- Venturirohr als Vergleichsmesssystem



Einbau in B250-Kontrollkryostat

- Einbau des Prototypen in TOSKA-Anlage
- Kryogenes Helium aus 2 kW-Kälteanlage
- Venturirohr als Vergleichsmesssystem



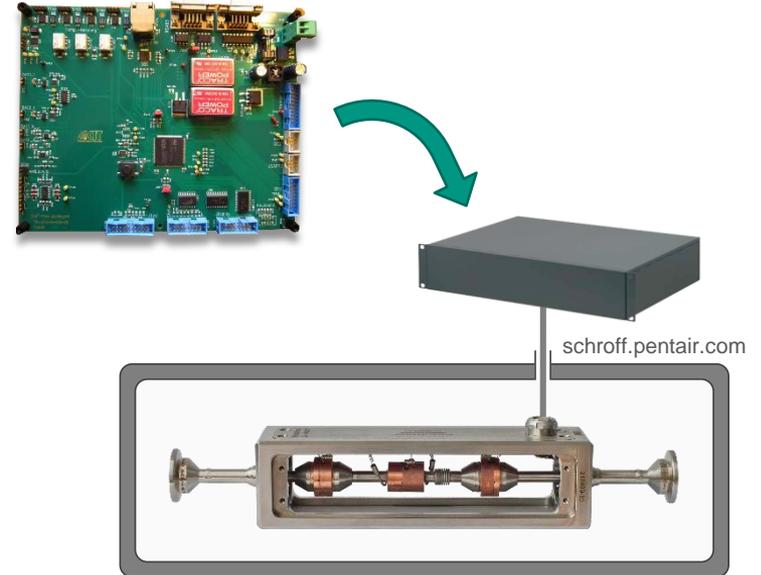
Vergleich der Messsysteme



Größe	klein	klein
Druckverlust	gering	hoch
Kalibrierung	Eigenkalibrierung Betrieb	im Labor bei $T = T_U$
$\dot{m}_{\max} / \dot{m}_{\min}$	60	3 – 5
Rel. Unsicherheit	1 - 2 %, Istwert (GUM Typ A)	5 %, Schätzwert (GUM Typ B)
Magnetfeldeinfluss	-	-
Messeinrichtungen	-	Δp , p_{abs} und T
Aufwand / Kosten	Serienprodukt ↓	Unikate ↑

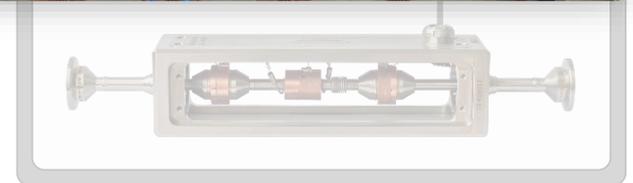
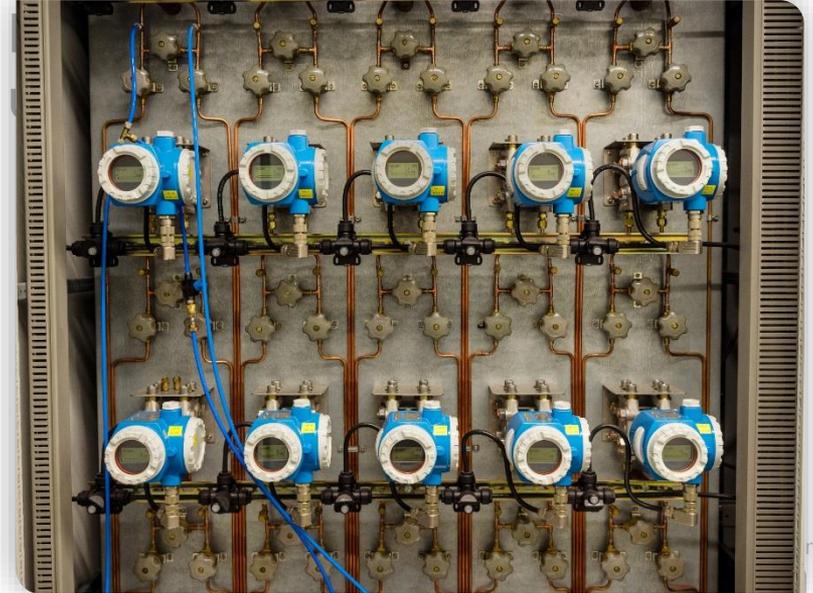
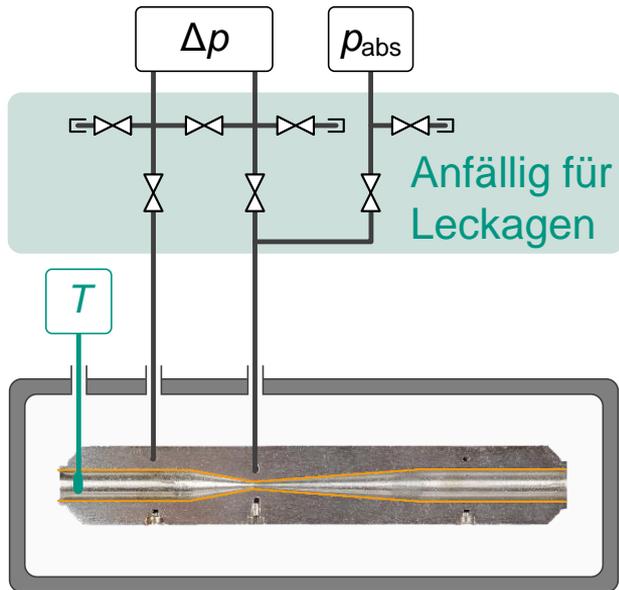
Vergleich der Messsysteme

- Eigenentwicklung einer Mess- und Auswertelektronik



Vergleich der Messsysteme

- Messfehler durch Leckagen
- Lecktests notwendig



Kryogene Experimente

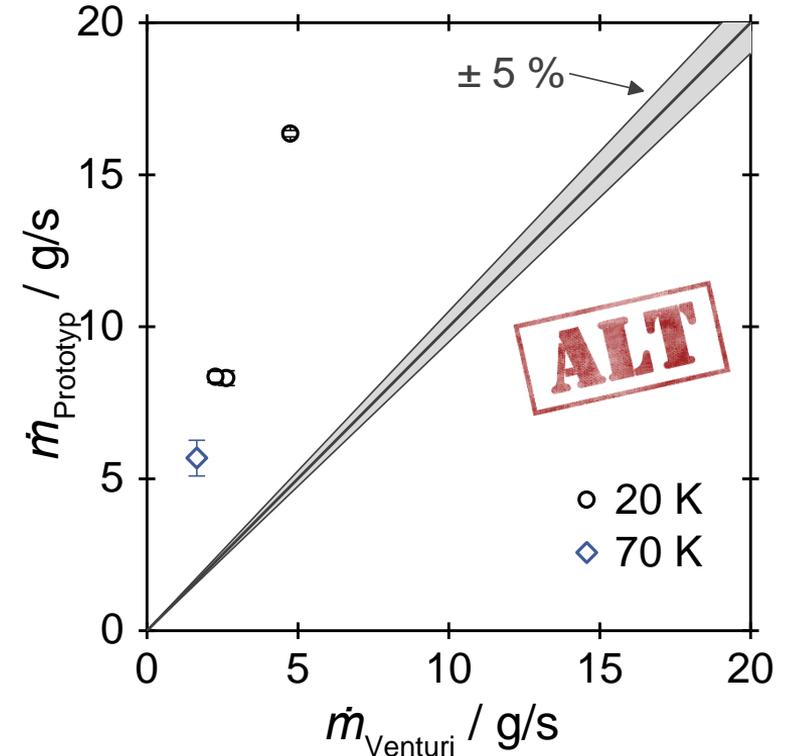
ERGEBNISSE

Erste Messreihe 2015 – Ergebnisse

- Messungen bei 20 und 70 K
- Große Abweichungen zwischen beiden Messsystemen
 $\dot{m}_{\text{Prototyp}} \approx 3 \dot{m}_{\text{Venturi}}$
- Worin liegt die Ursache für die Abweichung begründet?

Prototypmesssystem?

Venturirohr?

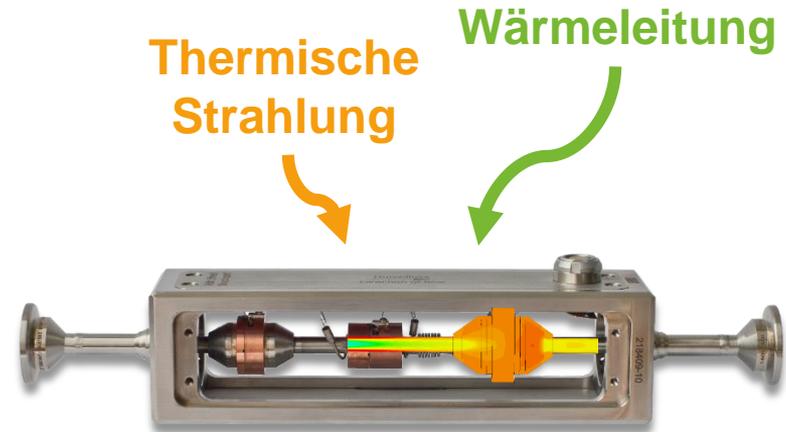


Erste Messreihe 2015 – Analyse

Prototypmesssystem

- Fehler in der T -Messung
 - ➔ durch Konstruktion unterbunden
- Thermische Analyse des Sensors
 - Beeinflussung durch Strahlung und Wärmeleitung möglich
 - ➔ **70 % \dot{Q} -Verlust notwendig** für Übereinstimmung der Daten
 - ➔ aus thermodynamischer Sicht unmöglich (1. Hauptsatz)

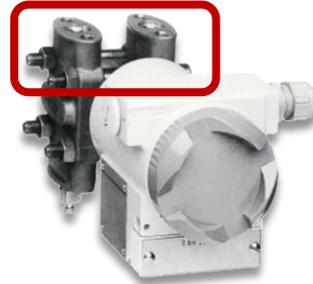
Prototypmesssystem
misst richtig!



Erste Messreihe 2015 – Analyse

Venturirohr

- Kalibrierung im Labor
- Auslegung: $\dot{m} = 60 \text{ g/s}$
Messung: $\dot{m} < 12 \text{ g/s}$



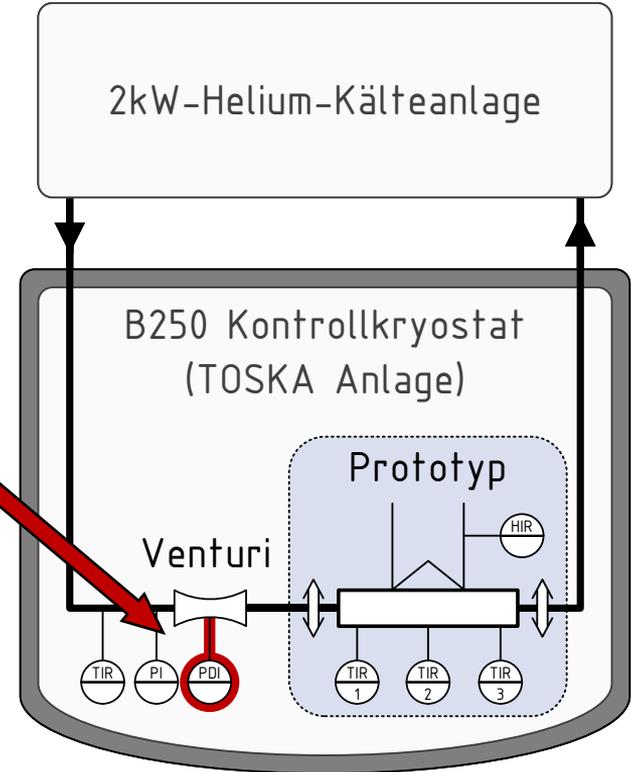
Leckage

- Druckmesstechnik

➔ Messung zu kleiner Δp -Werte

$$\Rightarrow \dot{m}_{\text{Venturi}} \propto \sqrt{\Delta p} \downarrow$$

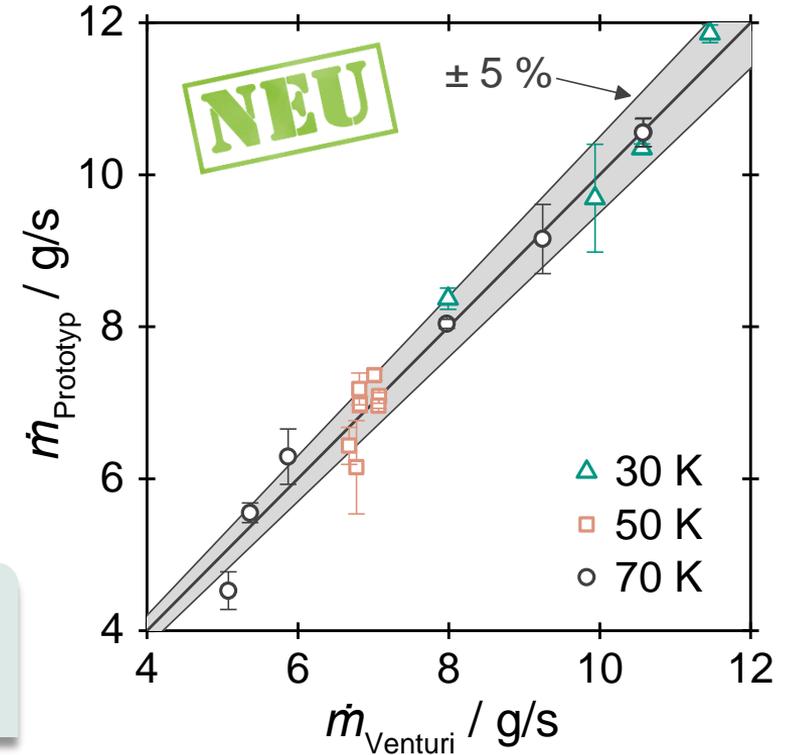
Leckage war Ursache für Abweichungen!



Neue Ergebnisse

- Neue Messungen nach Behebung des Lecks bei 30, 50 und 70 K
- ➔ Messmethoden stimmen im Rahmen ihrer Messunsicherheiten überein

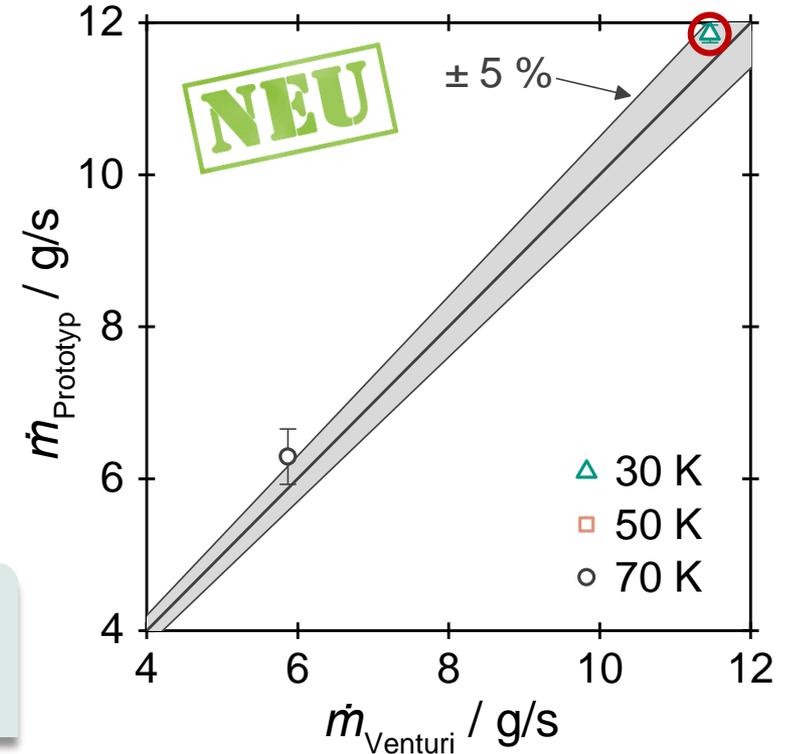
Eigenkalibrierung funktioniert bei kryogenen Einsatzbedingungen!



Neue Ergebnisse

- Neue Messungen nach Behebung des Lecks bei 30, 50 und 70 K
- ➔ Messmethoden stimmen im Rahmen ihrer Messunsicherheiten überein

Eigenkalibrierung funktioniert bei kryogenen Einsatzbedingungen!

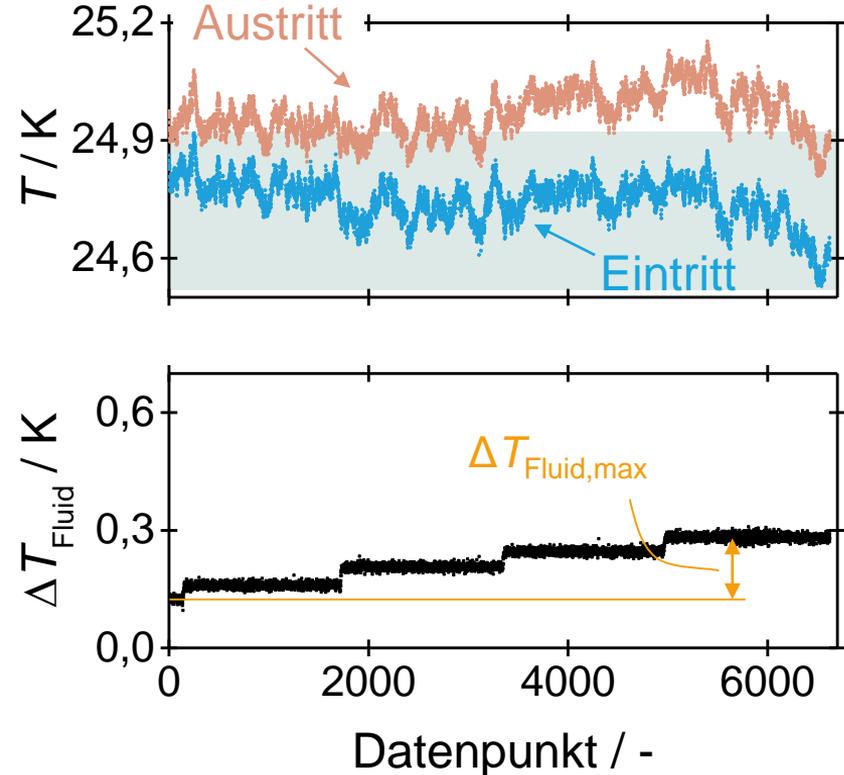


Exemplarische Messungen

Einfluss von T -Schwankungen

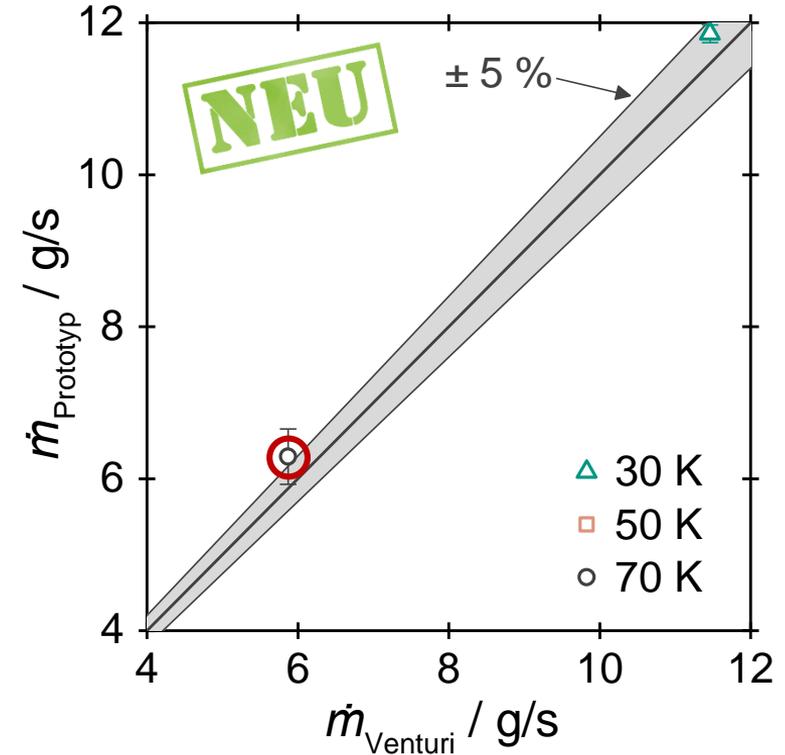
- Schwankungen am Eintritt: ~ 400 mK
- T -Änderung durch \dot{Q} :
 $\Delta T_{\text{Fluid,max}} = T_{\text{Aus}} - T_{\text{Ein}} = 110$ mK
- Ergebnis Prototyp:
 $\dot{m} = 11,9$ g/s ($\pm 1,0$ %, $k = 1$)

T -Schwankungen haben keinen Einfluss auf Eigenkalibrierung!



Exemplarische Messungen

Einfluss von \dot{m} -Schwankungen



Exemplarische Messungen

Einfluss von \dot{m} -Schwankungen

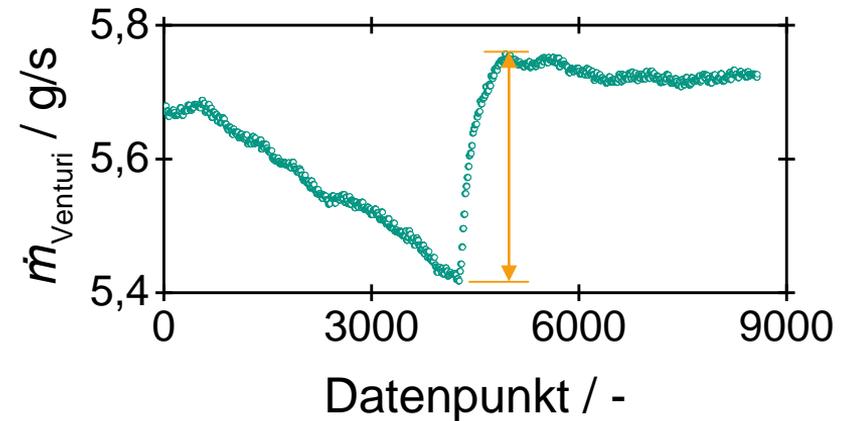
- Schwankungen im Durchfluss (Min.-Max.-Wert):

$$\Delta \dot{m}_{\text{Venturi}} \approx 0,33 \text{ g/s} \triangleq 5,70 \%$$

- Ergebnis Prototyp:

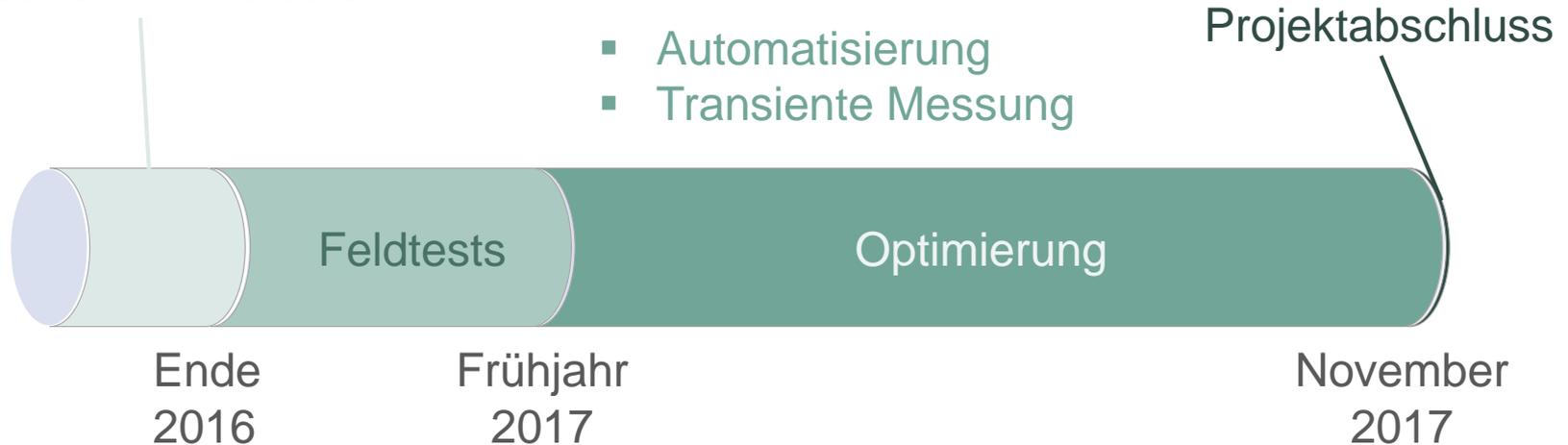
$$\dot{m} = 5,87 \text{ g/s} (\pm 5,78 \%, k = 1)$$

\dot{m} -Schwankungen wirken sich unmittelbar auf die Unsicherheit des Prototypen aus!



- Prototypmesssystem nach neuem thermischen Messprinzip aufgebaut
 - 👍 Fähigkeit zur Eigenkalibrierung
 - 👍 Systematische Messunsicherheiten haben keinen Einfluss
 - 👍 Keine zusätzlichen Messeinrichtungen notwendig
- Anfängliche Abweichungen aufgrund eines Lecks im Venturisystem
- Nach Behebung des Lecks:
Übereinstimmung beider Messsysteme im Rahmen ihre Unsicherheiten
 - 👍 Fähigkeit zur Eigenkalibrierung erfolgreich nachgewiesen
 - 👍 T-Schwankungen haben keinen Einfluss auf Eigenkalibrierung
 - 👍 Messunsicherheit stellt ein Maß für Schwankungen im Durchfluss dar

Nullserie für Feldtests



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!