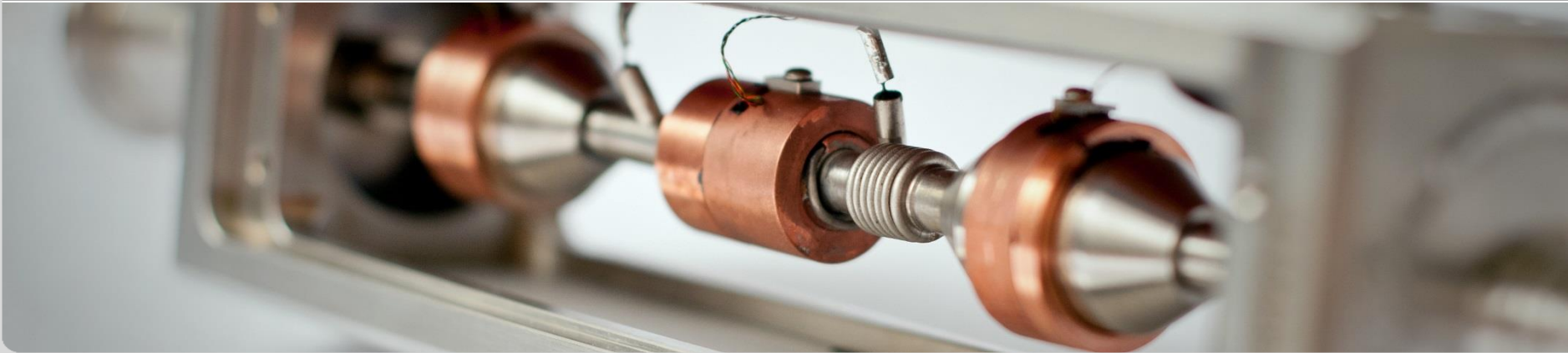


# Eigenkalibrierung eines neuen kryogenen Durchflusssensors im Anlagenbetrieb

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



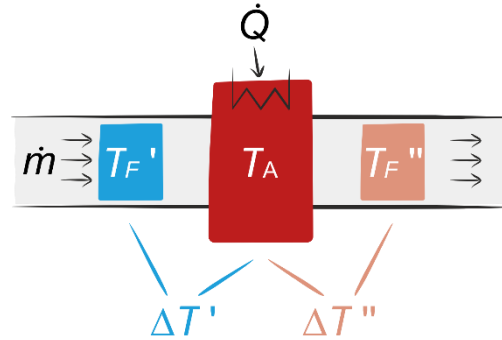
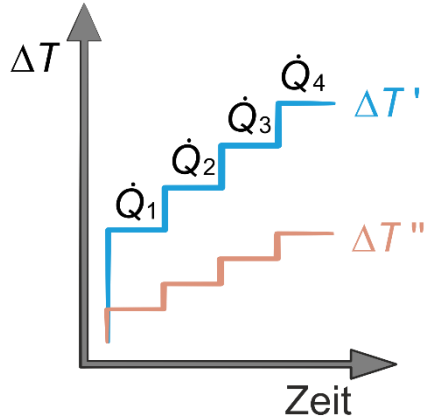
# Motivation

- 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:

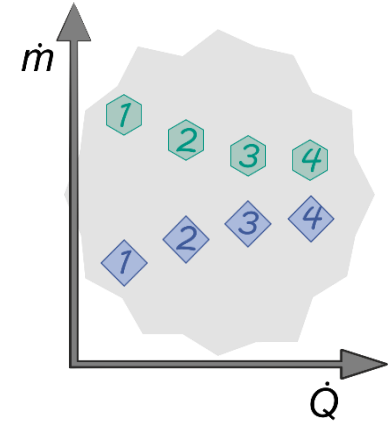
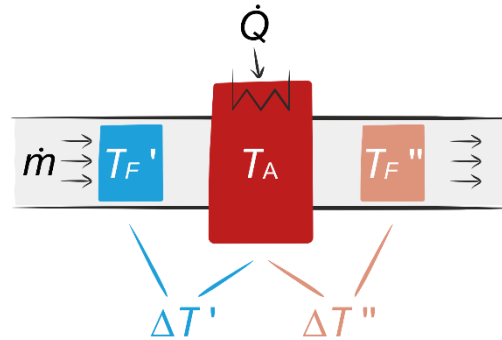
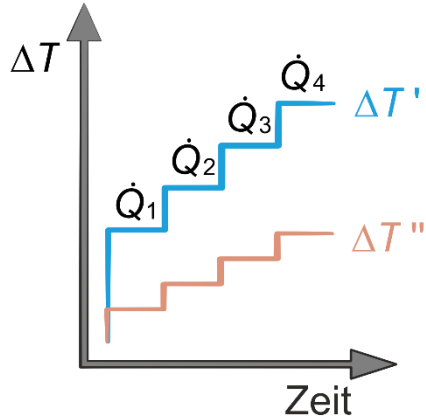
$$\dot{m}_A = \frac{\dot{Q}}{c_p (\Delta T' - \Delta T'')}$$

Energiebilanz Fluid + WÜ:

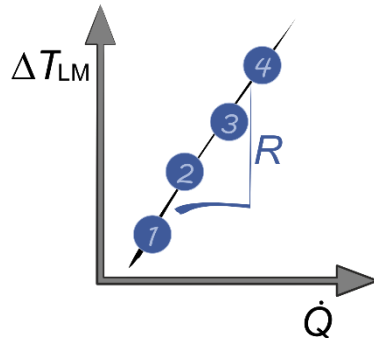
$$\dot{m}_B = \frac{1}{R c_p \ln \left( \frac{\Delta T'}{\Delta T''} \right)}$$

?

# Funktion der Eigenkalibrierung



Systematische  
Unsicherheit



Energiebilanz Fluid + WÜ:

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

?

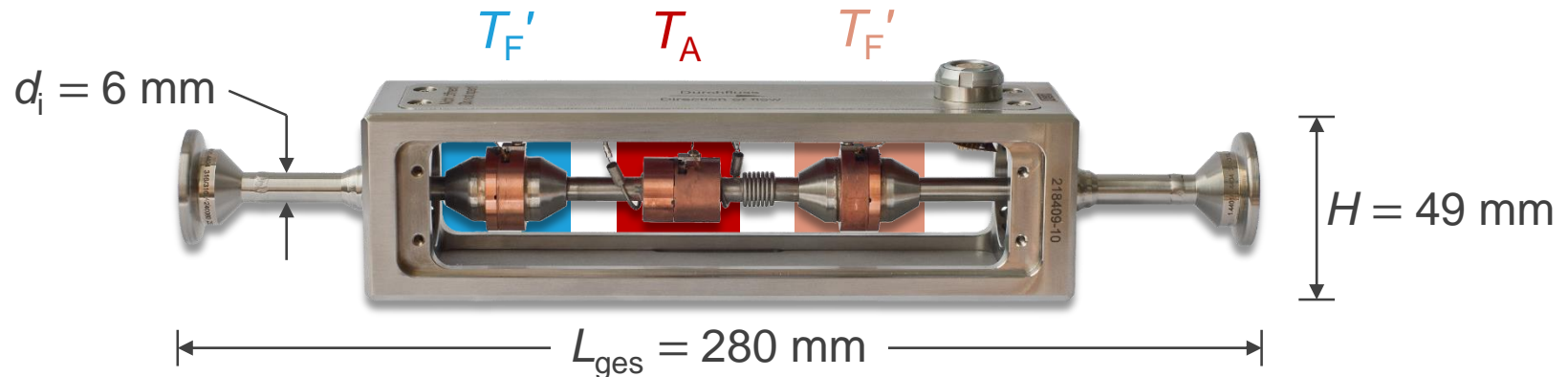
Kryogene Experimente

# EXPERIMENTELLER AUFBAU

# Prototypmesssystem

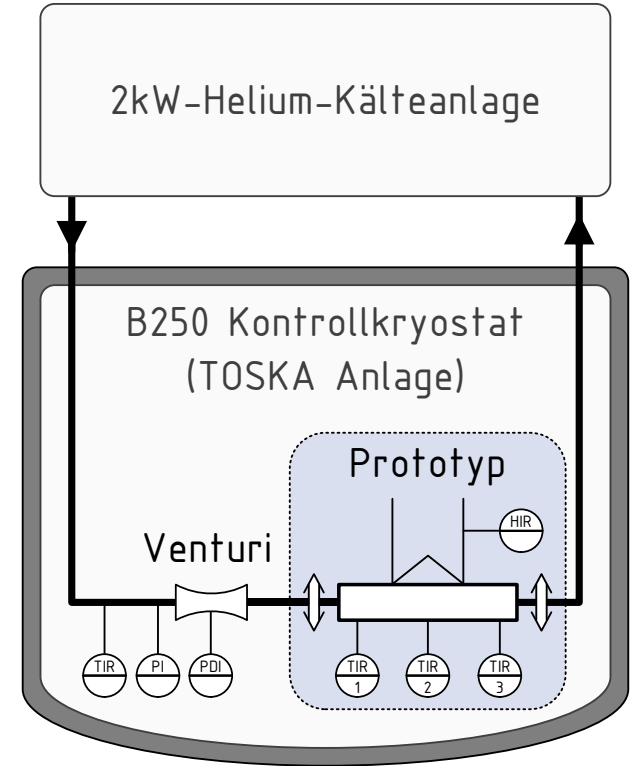
## ■ Prototypsensor

- 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



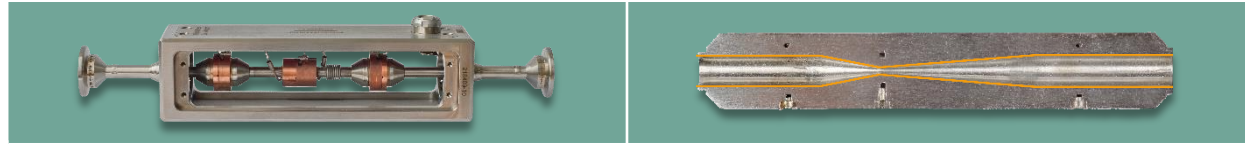
# Einbau in B250-Kontrollkryostat

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





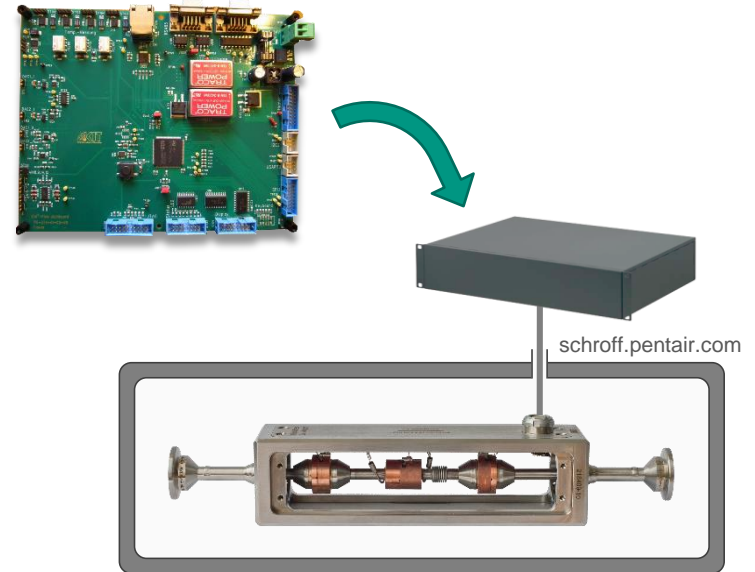
# Vergleich der Messsysteme



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	-	$\Delta p$ , $p_{\text{abs}}$ und $T$
Aufwand / Kosten	Serienprodukt ↓	Unikate ↑

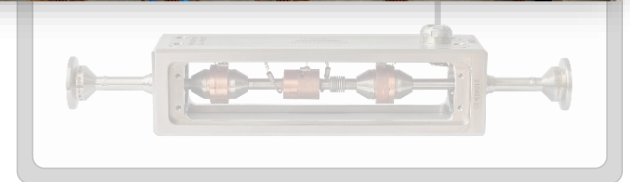
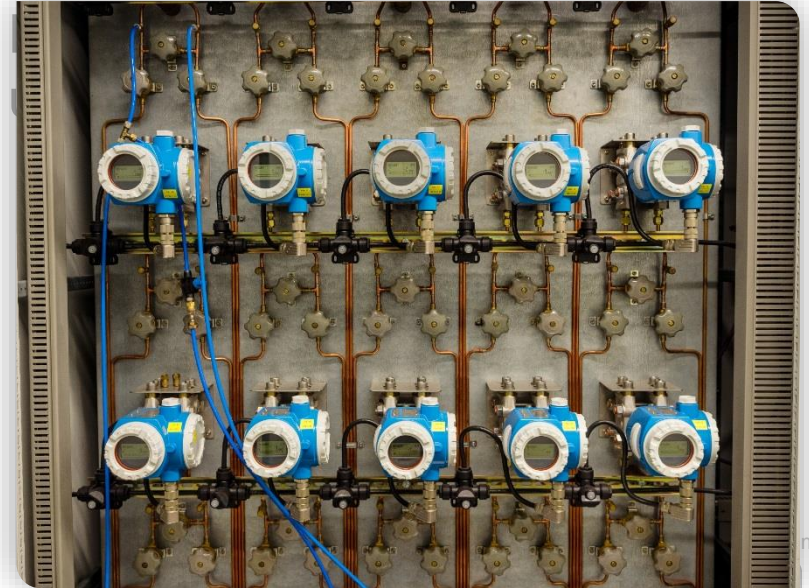
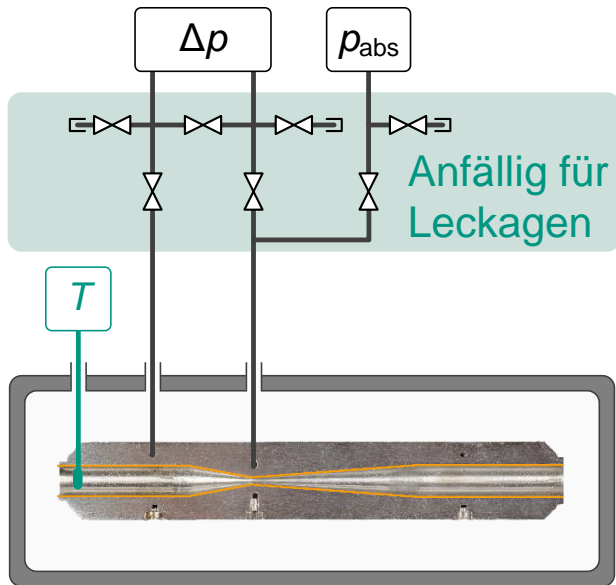
# Vergleich der Messsysteme

- Eigenentwicklung einer Mess- und Auswerteelektronik



# Vergleich der Messsysteme

- Messfehler durch Leckagen
- Lecktests notwendig



Kryogene Experimente

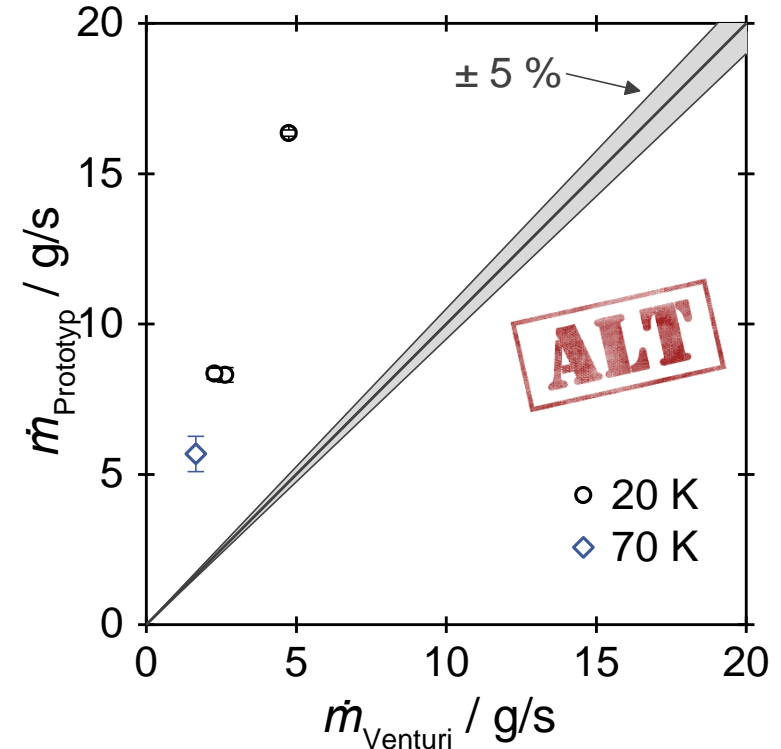
# ERGEBNISSE

# 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?

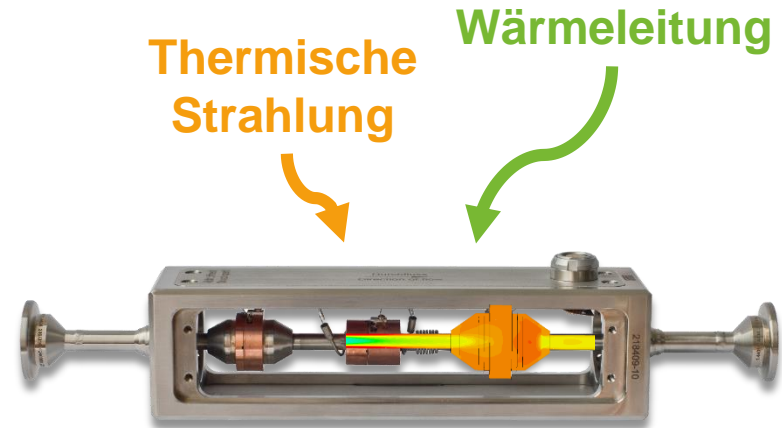


# Erste Messreihe 2015 – Analyse

## 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)

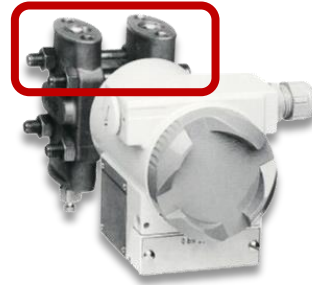
Prototypmesssystem  
misst richtig!



# Erste Messreihe 2015 – Analyse

## Venturirohr

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



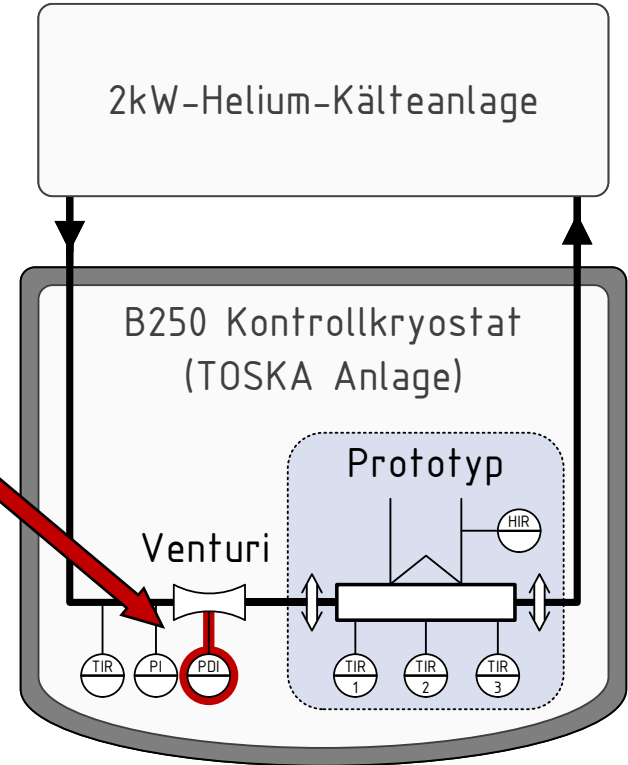
**Leckage**

- Druckmesstechnik

➔ Messung zu kleiner  $\Delta p$ -Werte

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

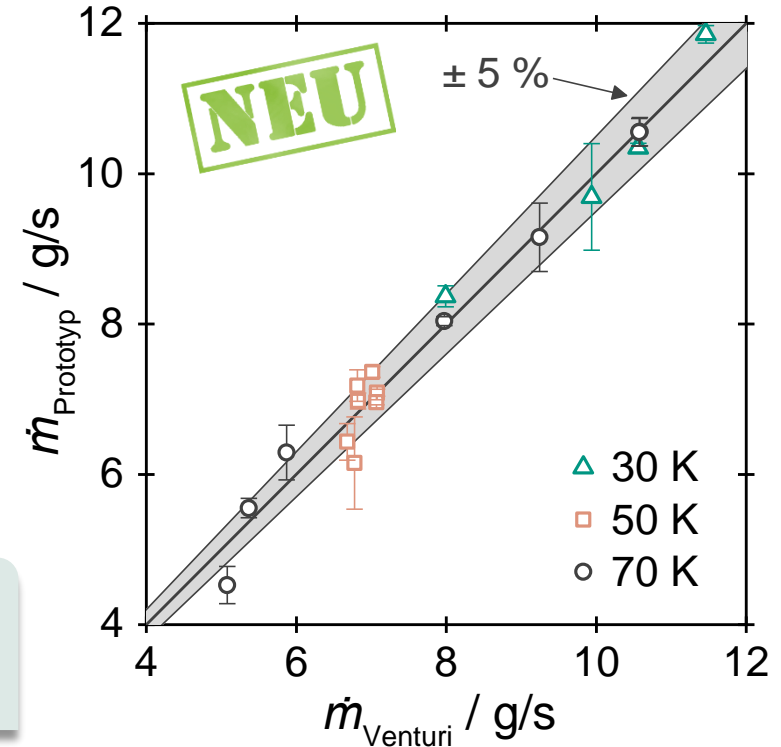
**Leckage war Ursache für Abweichungen!**



# 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!**

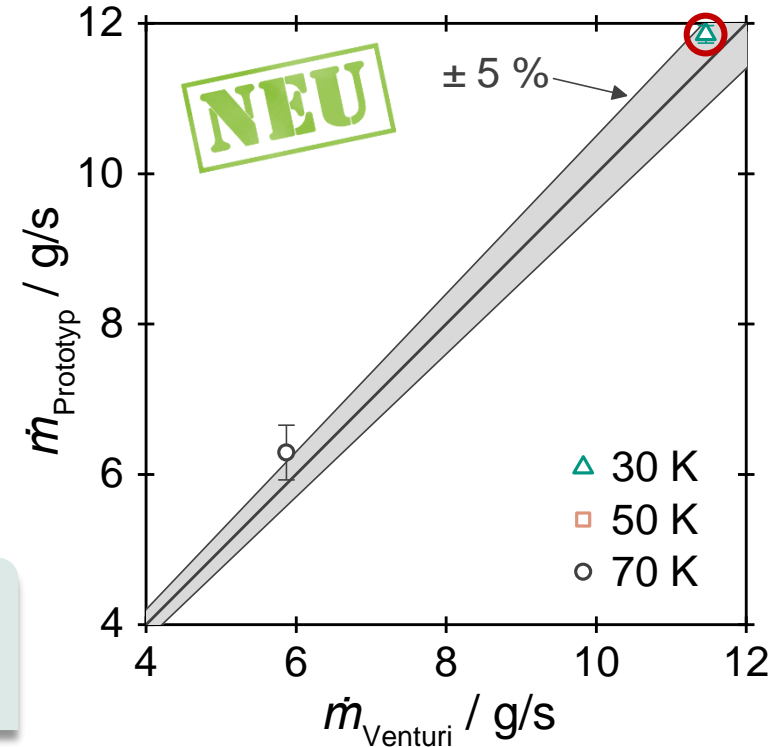




# Neue Ergebnisse

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

**Eigenkalibrierung funktioniert bei kryogenen Einsatzbedingungen!**

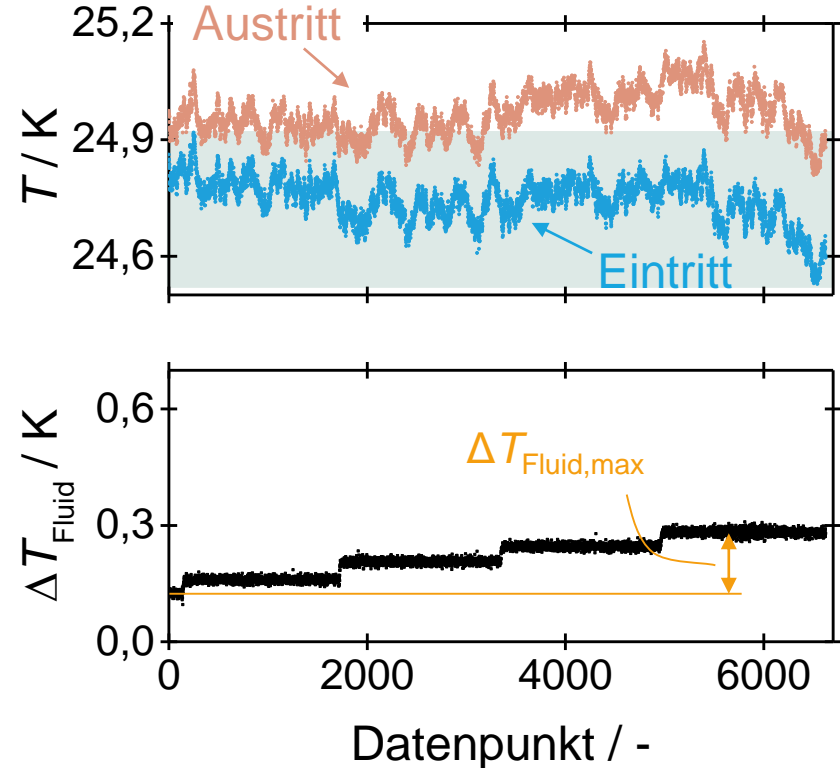


# Exemplarische Messungen

## Einfluss von $T$ -Schwankungen

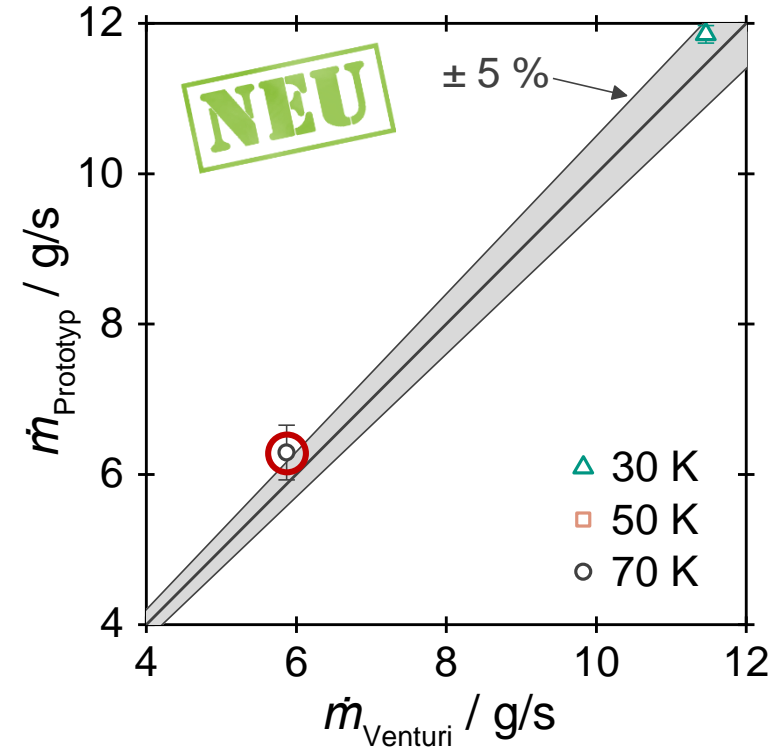
- Schwankungen am Eintritt:  $\sim 400$  mK
- $T$ -Änderung durch  $\dot{Q}$ :  
 $\Delta T_{\text{Fluid,max}} = T_{\text{Aus}} - T_{\text{Ein}} = 110$  mK
- Ergebnis Prototyp:  
 $\dot{m} = 11,9$  g/s ( $\pm 1,0$  %,  $k = 1$ )

$T$ -Schwankungen haben keinen Einfluss auf Eigenkalibrierung!



# Exemplarische Messungen

## Einfluss von $\dot{m}$ -Schwankungen



# Exemplarische Messungen

## Einfluss von $\dot{m}$ -Schwankungen

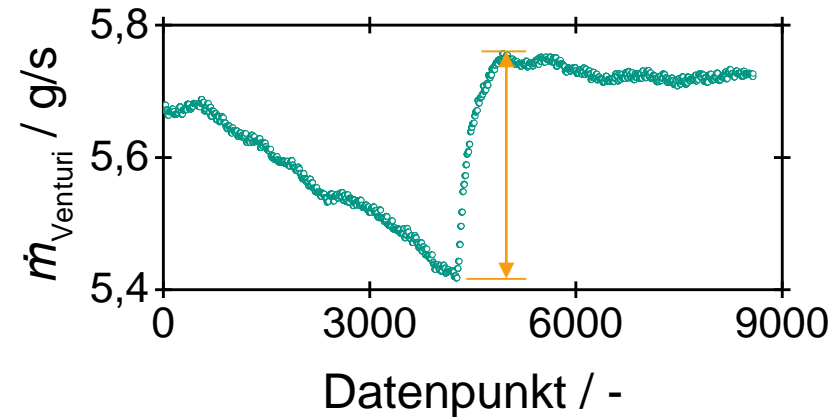
- Schwankungen im Durchfluss (Min.-Max.-Wert):

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

- Ergebnis Prototyp:

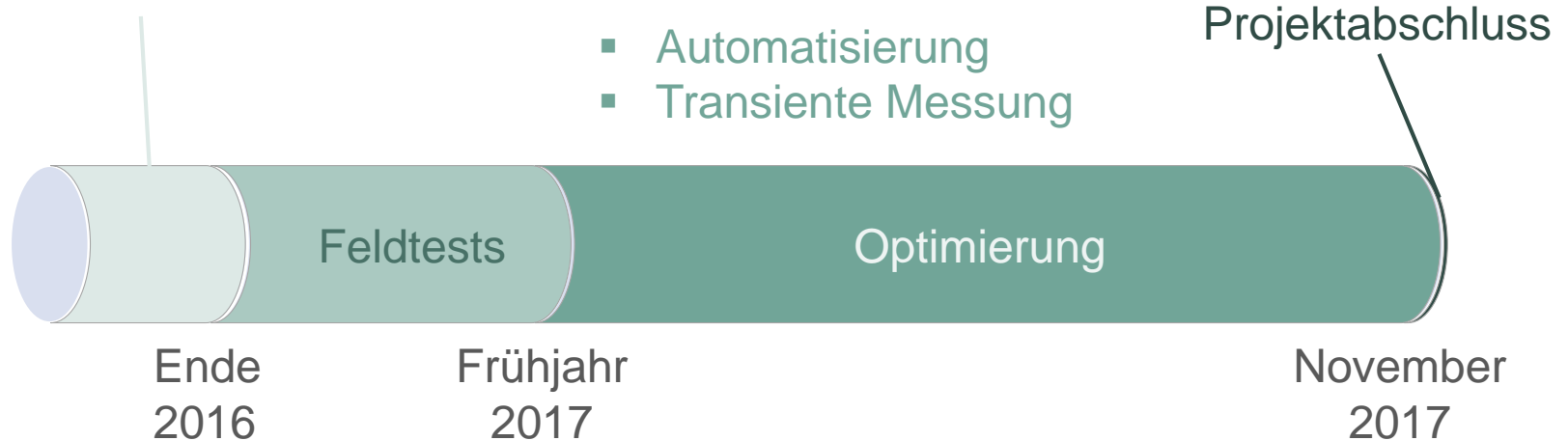
$$\dot{m} = 5,87 \text{ g/s} (\pm 5,78 \%, k = 1)$$

$\dot{m}$ -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!