Prüftemperatur und Einsatztemperatur

Karsten Tawackolian,
Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Fachbereich „Wärme“

14. September 2011

PTB KROHNE

EMRP
European Metrology Research Programme
Programme of EURAMET
The EMRP is jointly funded by the EMRP participating countries within EURAMET and the European Union

Vorstellung

PTB

Karsten Tawackolian

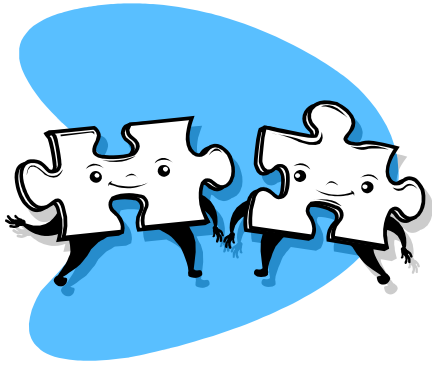
- **Universitätsabschluss**
  - TU-Berlin, Physikalische Ingenieurwissenschaft
  - Vertiefungen Numerische Simulation, Maschinendynamik Strömungsdynamik
  - Studentischer Mitarbeiter
    - Hermann-Föttinger Institut für Strömungsmechanik
      Center for numerical methods in thermo fluid dynamics, Prof. Thiele

- **Seit Januar 2007 Doktorand PTB Fachbereich „Wärme und Vakuum“**
  - Forschungsthema: Metrologische Beschreibung von Durchflusssensoren
    - Strömungsdynamik mit LDV/PIV-Messungen und CFD-Verfahren
  - Betreuung der Kooperation des FB mit dem Hersteller KROHNE
    - Eigene Projekte: Magnetisch-Induktive und Ultraschall-Sensoren
  - Betreuung eines EU-Projektes: Sensoren für den Kraftwerkseinsatz
    - Charakterisierung von Sensoren auf Prüfständen
    - Untersuchung von Kalibriermethoden

Inhalt des Vortrages

Übersicht über Temperatureffekte

1. Problemstellung und Motivation
2. Theoretische Grundlagen
3. Vorstellung des EMRP-Projektes
4. Zusammenfassung

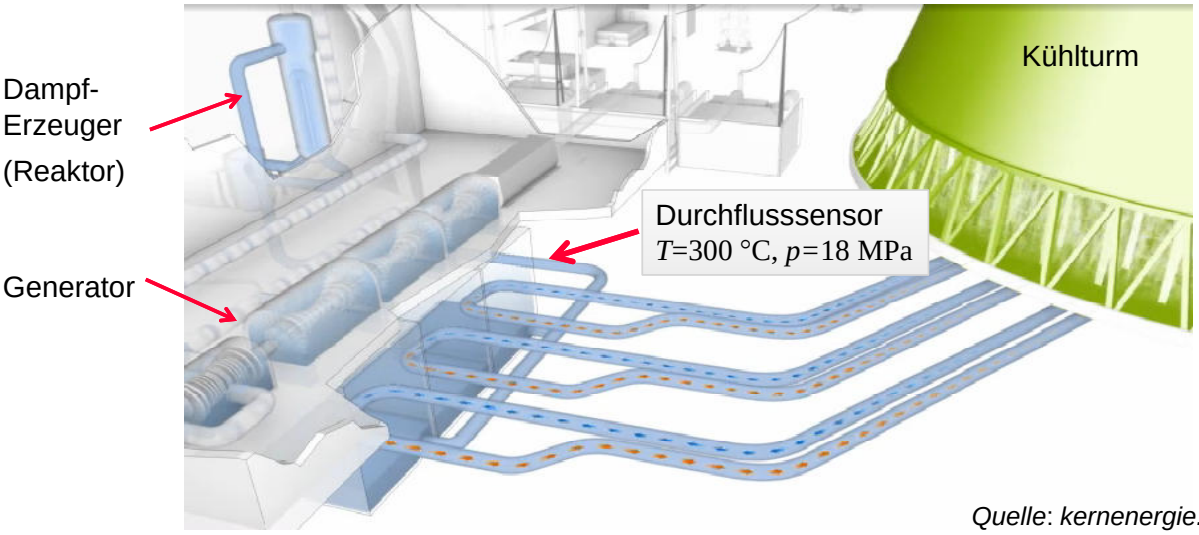


Arbeiten am FB zum Workpackage

1. Workpackage der PTB
2. Erste Ergebnisse
3. Zusammenfassung

Motivation des EMRP-Projektes

- **Speisewasserkreislauf in einem Kraftwerk** (Eigenbedarf ca. 10 %)



Quelle: *kernenergie.ch*

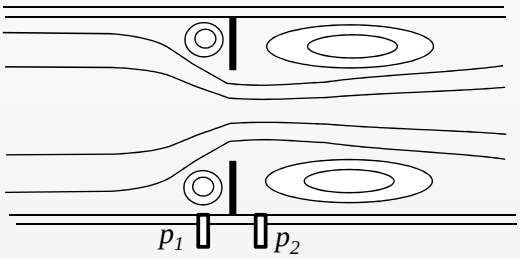
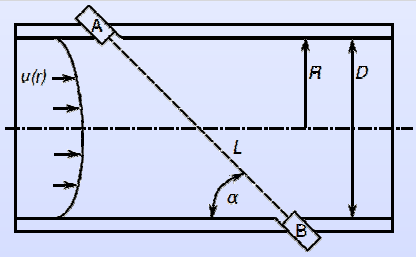
- **Metrologische Fragestellung**
  - Durchflussmessungen von Heisswasser unter extremen Betriebsbedingungen

Durchflussmessungen in Kraftwerken

- **Anlagenbetrieb**
  - Aufgrund von Veränderungen im Prozess wird ein Kraftwerk kontinuierlich geregelt
  - Steuerung Steuerstäbe, Speisewasserpumpen
  - Bestimmung der thermischen Reaktorleistung anhand eines physikalischen Modells des Reaktorkerns („Core Monitoring System“)

- **Abnahmemessungen**
  - Vertraglich: Anlagenbauer -- Anlagenbetreiber
    Hohe Vertragsstrafen – „Payable Debts“
  - Gesetzlich: Lizensierte Leistungsniveau „Rating“
  - Steuerlich: Abgaben, Förderung
  - Voraussetzung : Rückgeführte Sensoren

Eingesetzte Messprinzipien

Klassisch: Wirkdruckgeber	Neu: Ultraschall-Sensoren
	
Durchfluss Q	
$Q = \frac{A}{\sqrt{1-\beta^4}} C(Re)\sqrt{2\Delta p/\rho}$	$Q = A\, C(Re) \sum_i w_i \frac{L_i}{2\cos\alpha_i} \frac{\Delta t_i}{t_{ui} t_{di}}$
Druckabfall, Strömung $C(Re)$, Geometrische Parameter	Laufzeiten, Strömung $C(Re)$, Geometrische Parameter
Normung	
EN-ISO 5167-2	Befindet sich in Entwicklung
Messbereich	
1:4	**1:20**

Ein Projekt entsteht

- **Wie können die Sensoren kalibriert werden?**
  - Es existiert weltweit kein Prüfstand für die Bedingungen

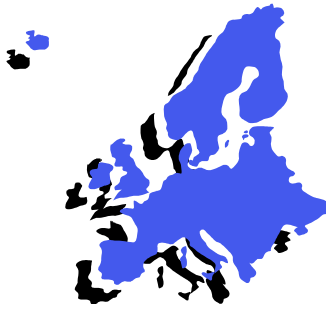
- **Kooperation der Metrologieinstitute**

PTB (Berlin) - Ultraschall-Durchflusssensor

SP (Borås) – Messblende

BEV (Wien) - Magnetisch-Induktiver Sensor

DTI (Århus) – Venturi-Rohr



- **Weiterhin (unabhängig vom EMRP)**

NMIJ (Tsukuba) – Ultraschall-Durchflusssensor

- Projektdauer: 9/2010 bis 8/2013

- Weitere Informationen unter http://www.power-plant-efficiency.de

Kalibrierung an Messanlagen

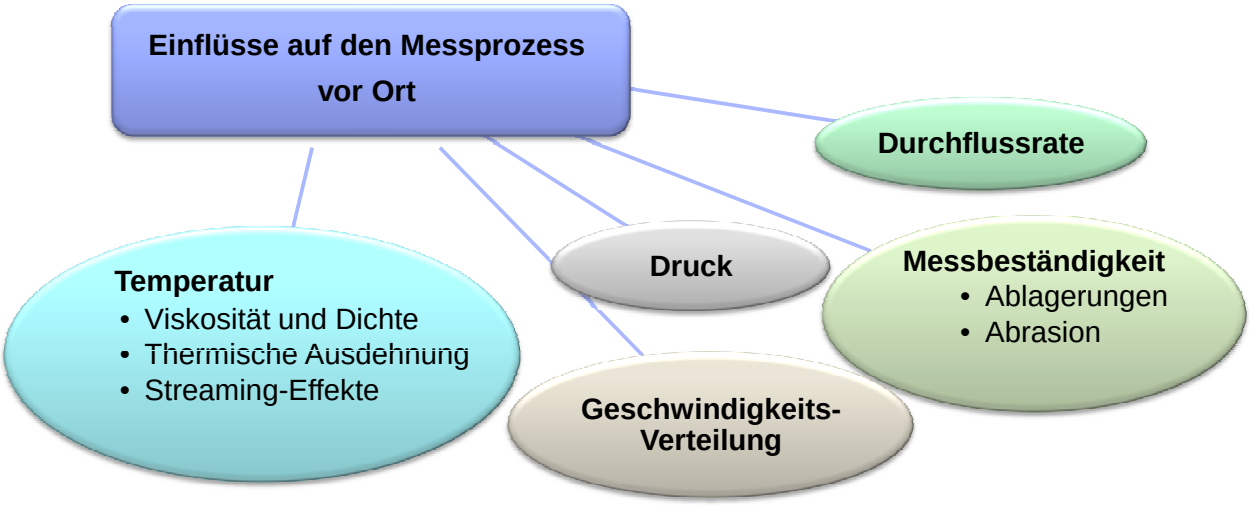
- Statisch gravimetrisches Wiegen (DIN EN 24185)
  - Aufwändig und teuer
  - Erfahrung: nur so hinreichend genaue Bestimmung (MU < 0,2 %) möglich

- Was wird über den Sensor ausgesagt?
  Strömungskoeffizienten (Prozessbedingt) + geom. Koeffizienten (Fertigungsbedingt)

Wirkdruckgeber	**Ultraschall-Sensoren**
Durchfluss Q	
$Q = \frac{A}{\sqrt{1-\beta^4}} C(Re) \sqrt{2\Delta p / \rho}$	$Q = A\, C(Re) \sum_i w_i \frac{L_i}{2\cos\alpha_i} \frac{\Delta t_i}{t_{ui} t_{di}}$
Druckabfall, Strömung $C(Re)$, Geometrische Parameter	Laufzeiten, Strömung $C(Re)$, Geometrische Parameter

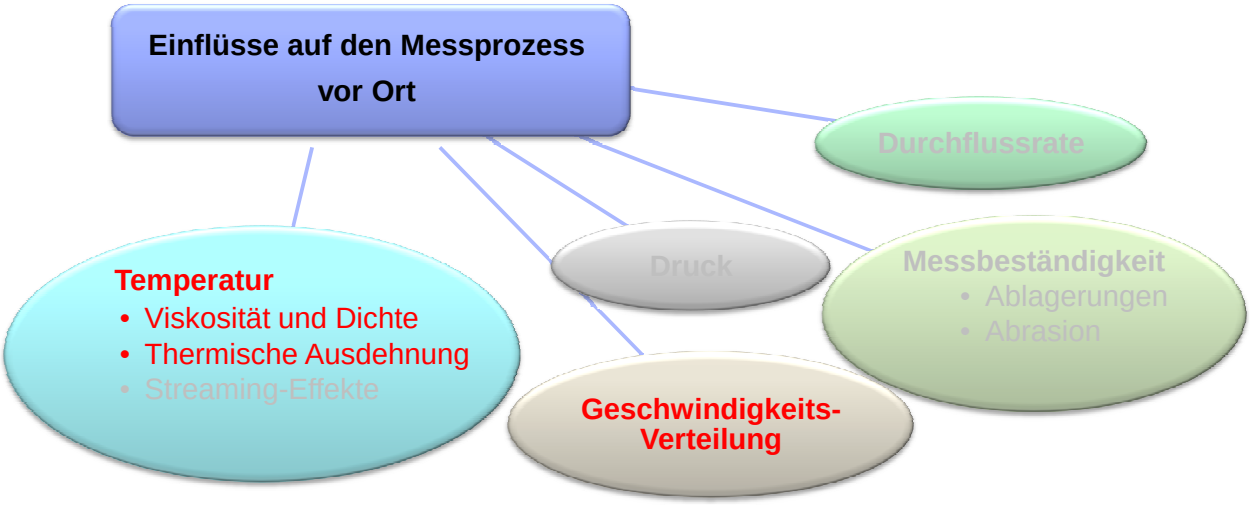
- Weitere relevante Einflüsse unabhängig von der Strömung
  - in Abhängigkeit von der Temperatur

Parameter

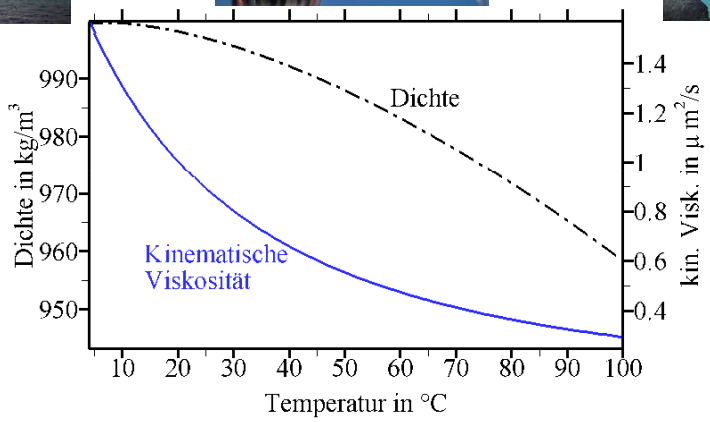


- **Ziel des Projektes**
  - Reduzierung der Messunsicherheit bei der Durchflussmessung unter Prozessbedingungen (im Kraftwerk) von 2 % auf 0,5 %

Parameter



T-Abhängigkeit d. Viskosität und Dichte von Wasser



- Zwischen 20 ℃ (0,1 MPa) und 300 ℃ (18 MPa) ändert sich die kinematische Viskosität um den Faktor 8

"Revised Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam" und "New International Formulation for the Viscosity of H2O"

Reynoldszahl - Ein dimensionsloser Parameter

Bilanz einer Rohrströmung
Impuls- und Massenerhaltung

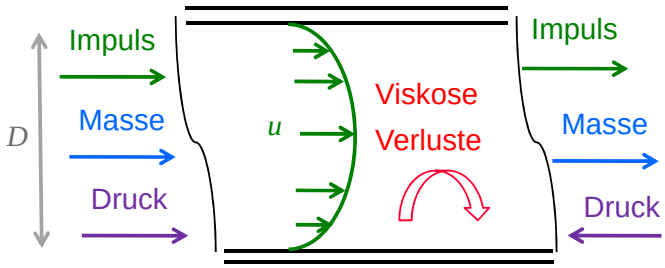
$$u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i} + \upsilon \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

u : Geschwindigkeit

p : Druck *ρ: Dichte*

ν : Viskosität *D: Rohrdurchmesser*



In dimensionslosen Größen

$X = x/D \quad U = u/u_0 \quad P = p/(\rho (u_o)^2)$

$$U_j \frac{\partial U_i}{\partial X_j} = -\frac{\partial P}{\partial X_i} + \left(\frac{u_0 D}{\upsilon}\right)^{-1} \frac{\partial^2 U_i}{\partial X_j \partial X_j}$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial X_i} = 0$$

Reynoldszahl $Re = \frac{u_o D}{\upsilon}$

$f(T)$

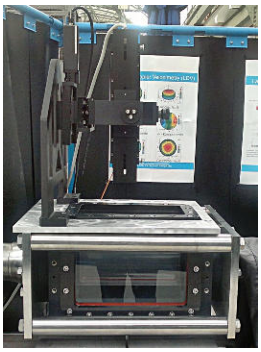
Reduktion der Parameter von 3 auf 1

Inkompressible Form
- nicht für Gas-Anwendungen

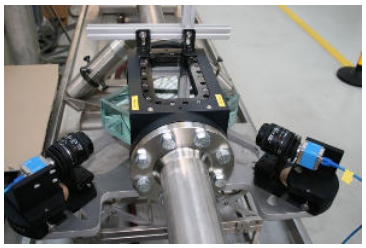
Geschwindigkeitsverteilung

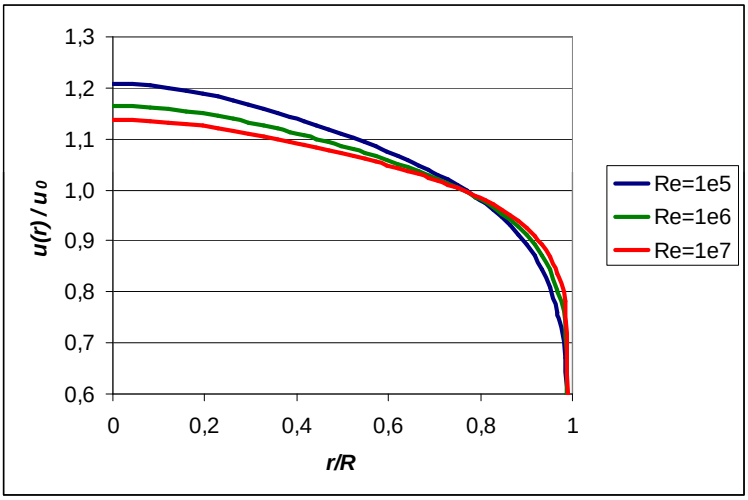
- Vollentwickeltes Strömungsprofil: Voraussetzung für das Messprogramm
  - Enormer Aufwand: Lange Einlaufstrecken
- Verifizierung der Geschwindigkeitsverteilung (1)
  - Laser-Doppler-Velozimetrie und Stereo Particle Image Velozimetrie

LDV-Setup



SPIV-Setup



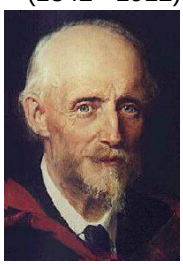


(1) „Strömungsanalyse mit zwei Messtechniken und Simulationen“, T. Eichler, K. Tawackolian, EuroHeat&Power 10/2010

Bedeutung der Reynoldszahl

- Vortex-DFS — Strouhal-Zahl $St = \frac{f D}{u} = f(Re)$ *(1)*
- Turbinenrad — Roshko-Zahl $Ro = \frac{f D^2}{\upsilon} = St\, Re$ *(1)*
- Messblenden — Discharge coefficient $C=C(Re)$ *(2)*
  Reader-Harris-Gallagher-Gleichung
- Ultraschall-DFS — Flow profile coefficient $C=C(Re)$
  Erläuterung im Folgenden

Osborne Reynolds
(1842 - 1912)

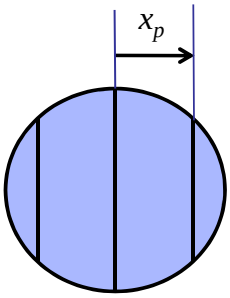


(1) Analogiebetrachtungen zum Strömungsverhalten von Wasser, Gas und anderen Flüssigkeiten, Dr.-Ing. Gudrun Wendt, EMATEM - Sommerschule 2006

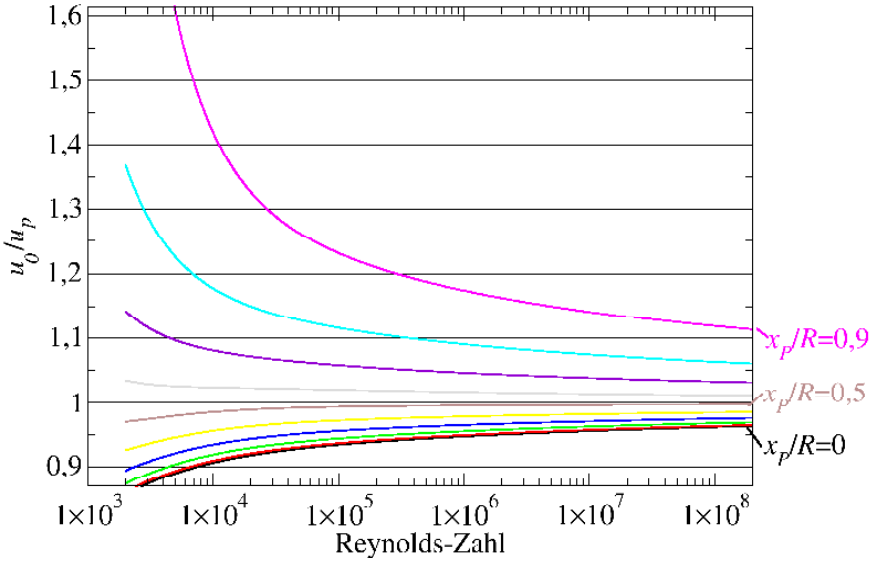
(2) Calculation of flow rate from differential pressure devices – orifice plates, Peter Lau, EMATEM – Sommerschule 2008

Re-Einfluss beim US-Verfahren - Einzelpfad

- Pfadgeschwindigkeiten
- Berechnet anhand des Gersten-Profiles

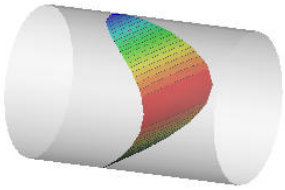


Parallele Pfadanordnung



Parallel-Gewichtete Mehrpfad-Anordnung

- Gaußsche Integration $u_0 = \sum_i u_{p,i} w_i$

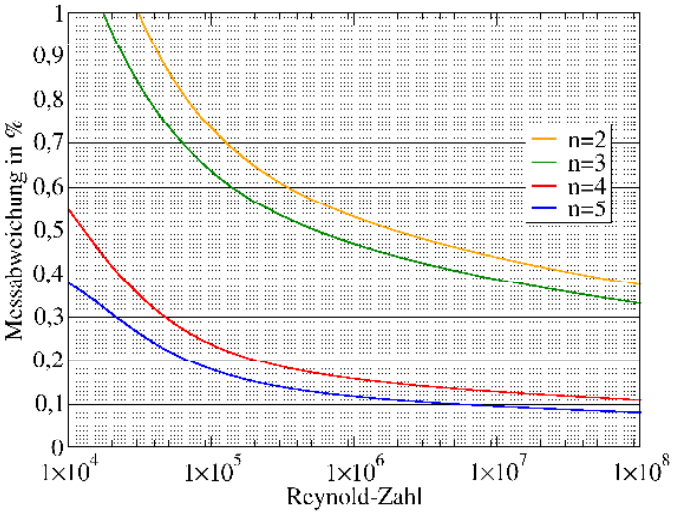


Exakt integrierbare Verteilung

Bei horizontaler Pfadanordnung

- Messabweichung infolge des Integrationsfehlers
- Berechnet anhand des Gersten-Profiles

Pfade	Stützstelle r_i/R	Gewicht w_i	Fehler -Ordn.
1	0	1	1
2	±0,5	1/2	3
3	0	1/2	5
	±0,707106	1/4	
4	±0,309017	0,138197	7
	±0,809017	0,361803	
5	0	1/3	9
	±0,5	1/4	
	±0,866025	1/12	



Thermische Ausdehnung: Theorie

- **Änderung des Rohrdurchmessers**

$$D_v = D_c\,(1+\alpha\Delta T)$$

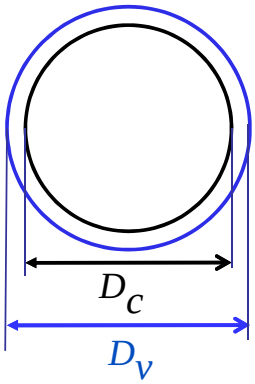
D_c Durchmesser bei der Kalibierung

Dv Durchmesser vor Ort

α Linearer Ausdehnungskoeffizient

12 bis 19 ppm/K bei Stahl

(PTFE: ca 200 ppm/K !)



Beispiel: Dehnungsbogen

Bild: Cschirp aus de.wikipedia.org

- **Korrekturterm aufgrund der Querschnittsänderung**

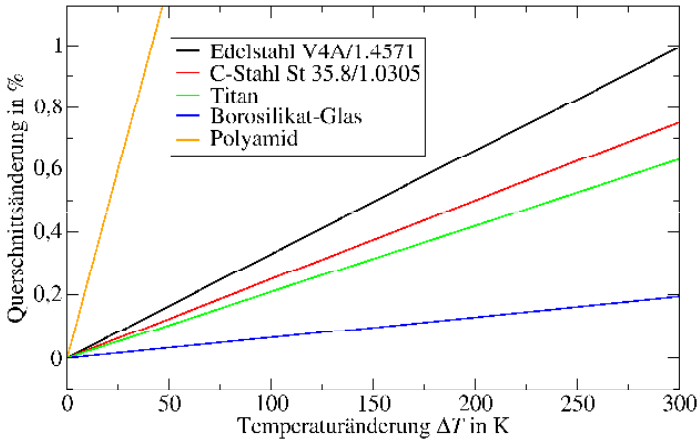
$$Q_c / Q_v = \Delta A / A = (1+\alpha\Delta T)^2$$

- **Korrekturterm beim Ultraschallverfahren**

$$Q_c / Q_v = \Delta A / A\,\Delta L / L = (1+\alpha\Delta T)^3$$

Thermische Ausdehnung: Rechenbeispiel

- Querschnittsänderung
  - Betrifft alle Geschwindigkeitsbasierten Verfahren



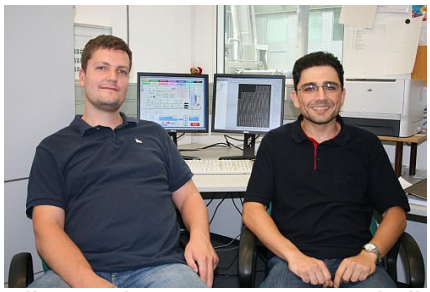
- Ultraschallverfahren

ΔT=210 K, α=16 ppm/K (Stahl) $\Delta Q/Q$=1 %

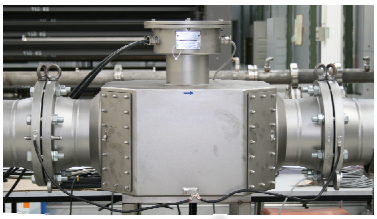
Messkampagnen 2009 und 2010

- Sensor für den Kraftwerkseinsatz (300 ℃)
  - Nennweite 8“ (DN 200)
  - Effekt der thermischen Ausdehnung
  - Package mit Rohrbündel-Gleichrichter

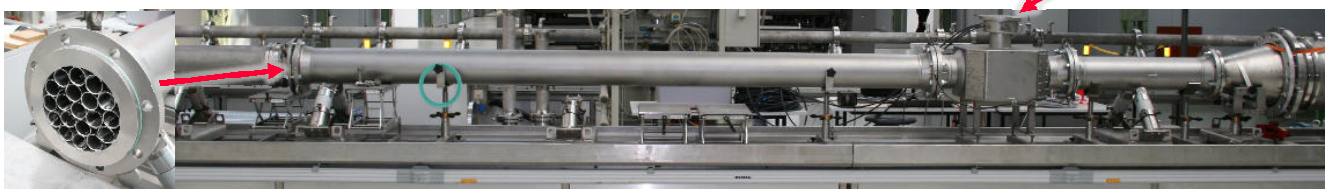
Flow Computer



Oliver Büker, Karsten Tawackolian



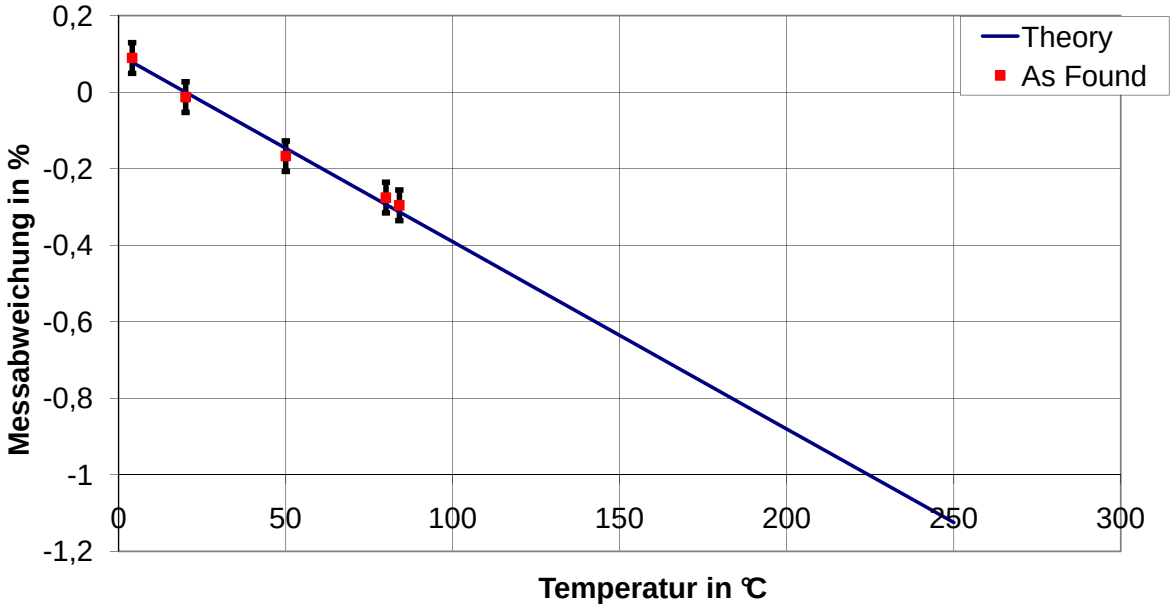
Sensor



Gleichrichter

Thermische Ausdehnung: Messung

- Bestätigung der Theorie



Temperatureinfluss auf Schaltungstechnik

- Betroffen ist analoge Schaltungstechnik
  - Insbesondere Halbleiter-Bauelemente (Diode, Transistor)

- Signalamplitudenbasierte Verfahren
  - Magnetisch-Induktives Verfahren, Wirkdruckgeber
  - Verstärkerschaltungen – Kennlinien
  - Thermisches Rauschen

- Zeitsignalbasierte Verfahren
  - Ultraschallverfahren
  - Verstärkerschaltungen - Delays
  - Signallaufzeit in Kabeln und Transducern

- Schlussfolgerung für Hochtemperatur-Anwendungen
  - Messumformer in getrennter Ausführung
  - Gegebenenfalls das Gehäuse temperieren

Temperatureinfluss auf Druck-Sensoren

- Die Druckmessung ist über Druckleitungen vom Prozess abgekoppelt.
  Es wirkt also nicht die volle Prozesstemperatur auf den Sensor.

- Kompensation des Temperatureinflusses im Umformer

- Unterschieden wird zwischen:

  Temperaturkoeffizient des Nullpunktes (bezogen auf den Nenndruck PN) in %/K

$$TK_0 = \frac{U_0(T) - U_0(T_0)}{U_N - U_0(T_0)} \frac{1}{T - T_0}$$

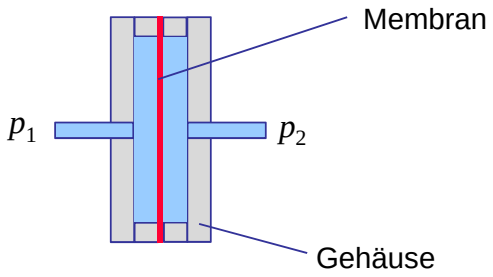
U Ausgangssignal (Strom oder Spannung)

  Temperaturkoeffizient der Empfindlichkeit e in %/K

$$TKe = \frac{e(T) - e(T_0)}{e(T_0)} \frac{1}{T - T_0}$$

Temperatureinfluss auf Δp-Sensoren

Piezoresistiver Δp-Sensor

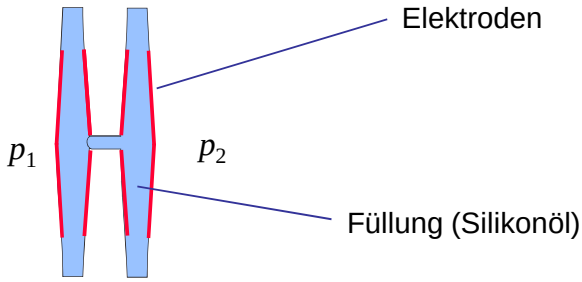


Gehäuse und Chip müssen konstruktiv angepasst sein um thermische Verspannungen zu vermeiden.

- TK_0: Die Temperaturabhängigkeit der einzelnen Widerstände wird näherungsweise durch eine Wheatstone-Brückensschaltung kompensiert. Aufgrund der Bauteilstreuung und Fertigungstoleranzen wird bei der Referenztemperatur auf Null getrimmt.
- TK_e: Der Temperatureinfluss auf die Empfindlichkeit ist hier abhängig von einer starken Änderung der Piezokonstanten mit der Temperatur (wiederum Abhängig von der Dotierung)
- Prinzipiell besteht eine hohe Temperaturempfindlichkeit weswegen bevorzugt das kapazitive Messprinzip genutzt wird.

Temperatureinfluss auf Δp-Sensoren

Kapazitiver Δp-Sensor



- TK_0: Ist der Aufbau nicht perfekt symmetrisch, so entsteht durch die unterschiedliche Ausdehnung des Füllmediums eine Veränderung des Nullpunktes
- Beim sogenannten Lageabgleich wird der Nullpunkt bei einer Temperatur gemessen (ohne Durchfluss) und kompensiert.
- TK_e: Die elastischen Konstanten der verformten Membrane sind temperaturabhängig.

Temperatureinfluss auf Δp-Sensoren: Fazit

- Nichtlinieare Kennlinien und Temperatur-Abhängigkeit, intern kompensiert
  - Analoge, digitale oder gemischte Kompensation mit Vor- und Nachteilen

Typische Werte:

	Piezoresistiv	Kapazitiv
TK_0 in %/K	±0,02	±0,2
Tk_e in %/K	-0,15	-0,01

Der Nullpunkteinfluss ist zu beachten

Quelle: H.R. Tränkler, Sensortechnik, Springer 1998

Temperatur bei Prüfungen von Ultraschallsensoren

- Mechanische und elektronische Effekte
- Physikalische Veränderung der Bedingungen
  - Fluidic Load (Impedanzänderung)
- Veränderung der Transducer
  - Steifigkeit, Resonanzfrequenzen
  - Laufzeit im Transducer
- Thermische Spannungen
  - Gehäuse
  - Verschiedene Schichten: Bonding etc.
  - Ankopplung
- Instationäre Temperaturschwankungen vermeiden
  - Sensoren und Messkörper müssen vor der Kalibrierung temperiert sein (Spülen der Messstrecke)
- Resultierende Veränderung des Signals
  - Nur insofern relevant wie die Detektion der Laufzeit beeinflusst wird
  - Delays-Systematische Veränderung des „Nullpunktes“ der Laufzeitmessung

Nullpunkte bei der Ultraschall-Messung

- Systematische Einflüsse bei der Laufzeitbestimmung
- Messwertgleichung

$$Q = A\,C(Re)\sum_i w_i \frac{L_i}{2\cos\varphi_i}\frac{t_{ui}-t_{di}}{t_{ui}t_{di}}$$

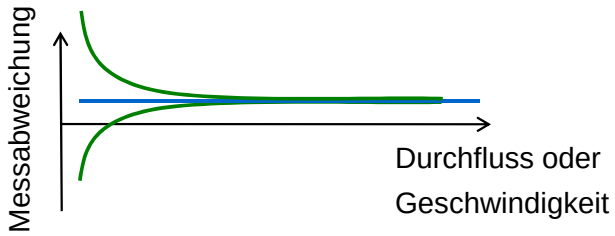
- Einführung der Nullpunkte in die Gleichung : $t=t^*-t_0$

Asymmetrischer Anteil

$$Q = A\,C(Re)\sum_i w_i \frac{L_i}{2\cos\varphi_i}\frac{(t^*_{ui}-t^*_{di})-(t_{0ui}-t_{0di})}{(t^*_{ui}-t_{0ui})(t^*_{di}-t_{0di})}$$

Anteil für eine Richtung

- Die Anteile wirken unterschiedlich auf die Fehlerkurve



Teilnehmende nationale Metrologieinstitute

- **Jeder Teilnehmer untersucht ein industriell wichtiges Messprinzip**

PTB (Berlin) - Ultraschall-Durchflusssensor

BEV (Wien) - Magnetisch-Induktiver Sensor

DTI (Århus) – Venturi-Rohr

SP (Borås) - Messblende

- **Measurement Capabilities der Teilnehmer**

	Max. DF in m³/h	Min. Temp. in °C	Max. Temp in °C	Max. NW in mm
BEV	180	4	90	150
DTI	400	12	85	250
PTB	1000	4	90	400
SP	421	10	90	300
PTB-HTPA	200	3	230	150

Messprogramm

- Nennweite DN 100 bzw. 4“
- Vorgeschriebene Re-Zahlen $5 \cdot 10^5$ und $1 \cdot 10^6$ (optional)
- Resultierende Prüfpunkte für einen Innendurchmesser 102,2 mm

Reynoldszahl $5 \cdot 10^5$

Temperatur in °C	10	20	30	50	70	85
Kin. Visk. in µ m²/s²	1,3081	1,0048	0,8018	0,5539	0,4133	0,3444
Geschw. in m/s	6,40	4,92	3,92	2,71	2,02	1,68
Durchfl. in m³/h	188,993	145,173	115,850	80,034	59,721	49,760

Reynoldszahl $1 \cdot 10^6$ (optional)

Temperatur in °C	10	20	30	50	70	85
Kin. Vis. in µ m²/s²	1,3081	1,0048	0,8018	0,5539	0,4133	0,3444
Flow Velocity in m/s	12,80	9,83	7,85	5,42	4,04	3,37
Flow Rate in m³/h	377,985	290,347	231,701	160,069	119,443	99,520

- LDV-Messungen zur Validierung des vollausgebildeten Strömungszustandes
- Störkörperuntersuchungen (neues Design)

Zusammenfassung

- Messungen von Heiswasser bei Betriebsbedingungen 300 °C, 18 MPa
  - Speisewasserkreislauf von Kraftwerken
- Hierfür existiert kein Prüfstand

- Messmöglichkeit auf verfügbaren Prüfständen: Reynolds-Zahl

- Weiterhin sind zu beachten
- Thermische Expansion
- Unter bestimmten Bedingungen weitere Einflüsse
  - Bei niedrigen Durchflüssen: Nullpunkt

- Einsatztest: EMRP-Projekt
  - Untersuchung verschiedene Messverfahren
  - PTB, FB Wärme: Ultraschall-Durchflusssensor