



Grundlagen und Erfahrungen mit der nichtinvasiven Wärmeenergie- und Wärmeleistungsmessung

EMATEM-Sommerschule 2009, Seon, D

Vortrag: Univ.-Prof. DDr. *Franz Adunka*, MBG, Maria Wörth, Ö

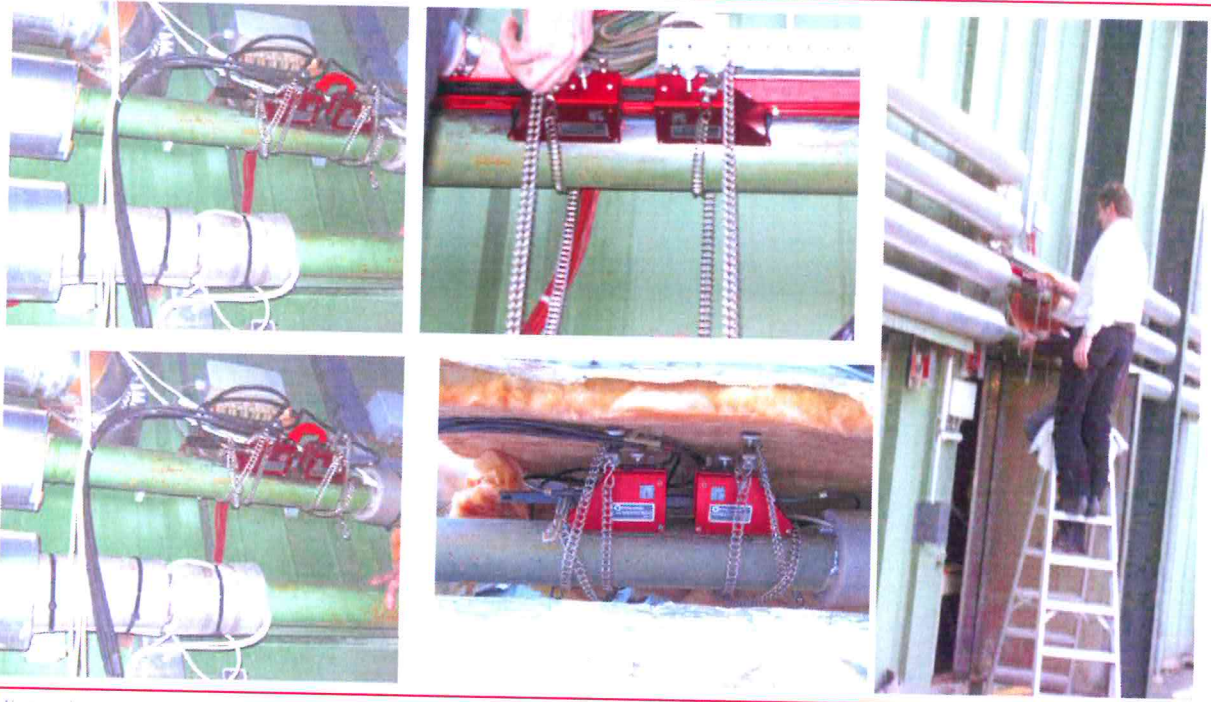
Josef Enzinger, Enzinger GmbH, Matzendorf, Ö



Vorgeschichte ...

- ❑ Fernwärmeunternehmen wollen Augenblickswerte in ihren Netzen genau kennen
- ❑ Invasive Messung nur mit großem Aufwand (Einbau !!) möglich
- ❑ Kosten hoch
- ❑ Nichtinvasive Messung ungenau (Meinung)

Beispiel: Holzrocknungsanlage



Vortragender:
Univ.-Prof. Dr. Dr. Franz Adunka

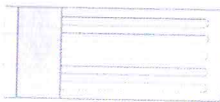
EMATEM Sommerschule 2009
Vortrag: Erfahrungen mit der nichtinvasiven Ultraschall Wärmeenergiemessung

Seite 3

Aufbau eines clamp-on-Messsystems



- Oberflächenthermometer in Folienform
- Dicke: 0,3 mm
- Pt 100



Vortragender:
Univ.-Prof. Dr. Dr. Franz Adunka

EMATEM Sommerschule 2009
Vortrag: Erfahrungen mit der nichtinvasiven Ultraschall Wärmeenergiemessung

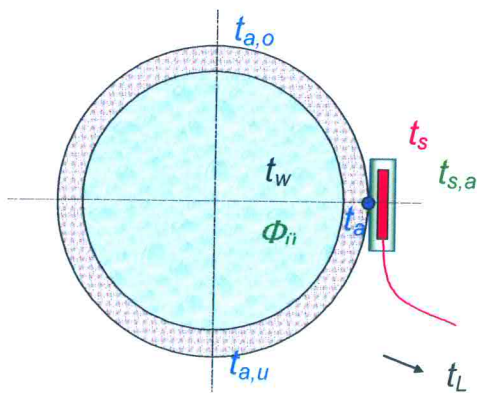
Seite 4

Nichtinvasive Temperaturmessung

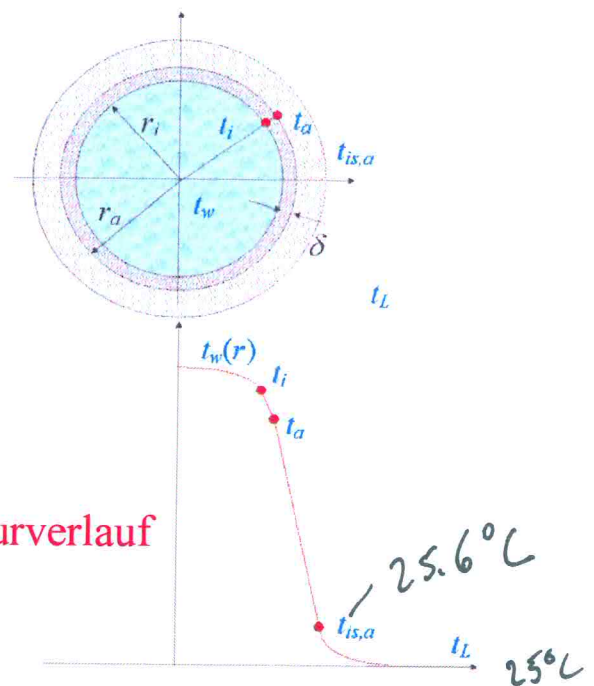
Probleme

- Was misst ein Oberflächen-Temperatursensor?
- Von welchen Einflüssen hängt die Messgenauigkeit ab?

Temperaturverhältnisse im, am und um das Rohr



Temperaturen um das Rohr



Temperaturverlauf

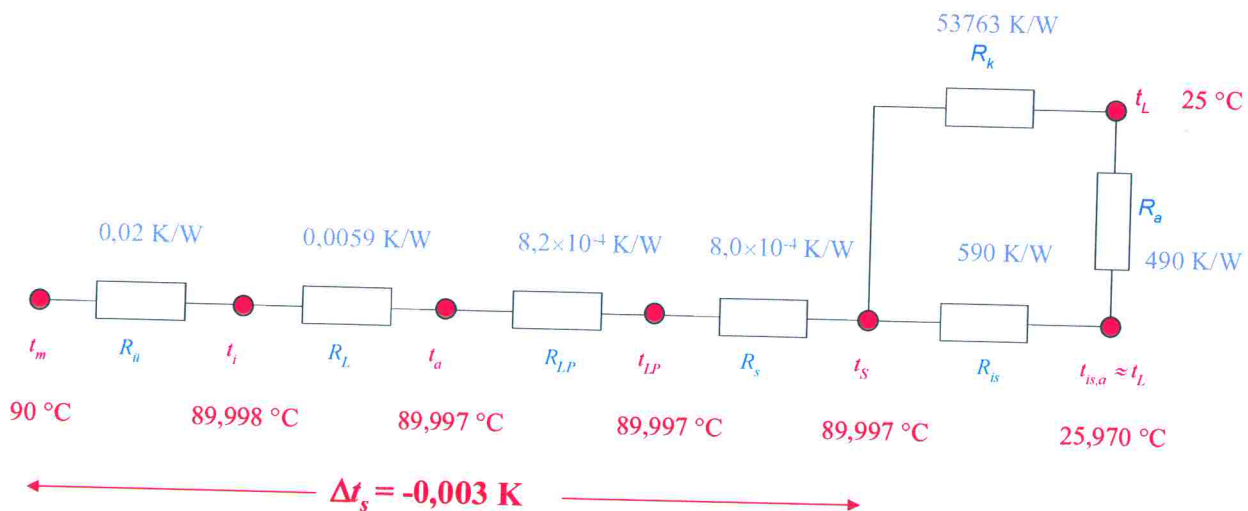
Standarddaten

Rohrleitungsgrößen

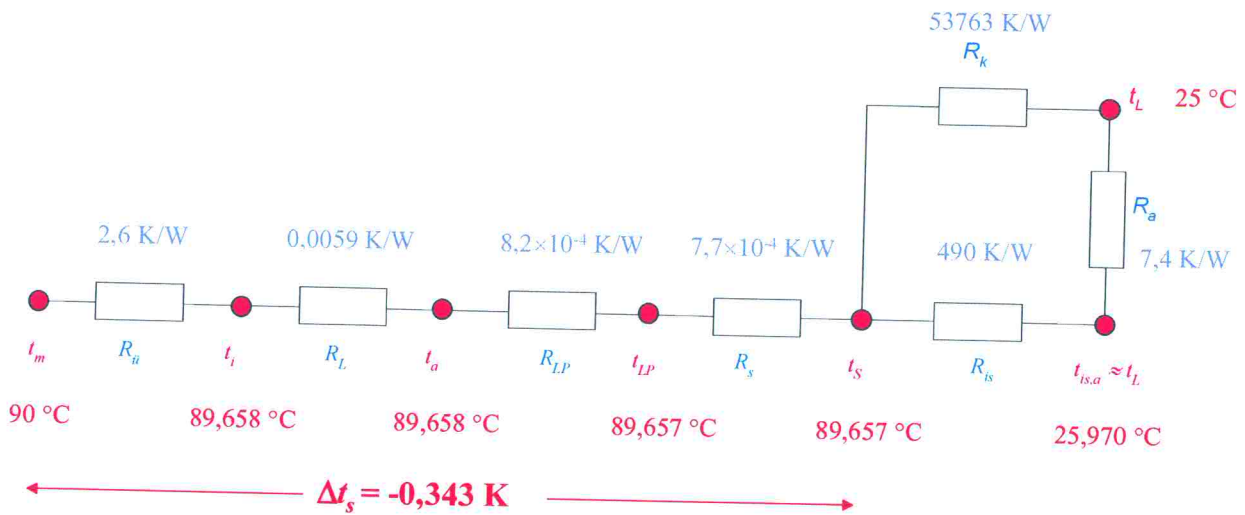
DN	d_a in mm, darunter r m	d_i in mm, darunter m	δ_R in mm, darunter r m	δ_{is} in mm, darunter r m	A_i in m ²	A_a in m ²	A_m in m ²	A_{is} in m ²	A_{is} in m ²	δ_{wLP} in mm, darunter m	A_K in mm ² , darunter r m ²
50	51	46,4	2,3	18						0,5	
	0,051	0,0464	0,002	0,018	0,007	0,008	0,01	0,014	0,011	0,0005	

- $q_p = 15 \text{ m}^3/\text{h}$
- $t_w = 90 \text{ }^\circ\text{C}$
- $t_L = 25 \text{ }^\circ\text{C}$
- $v_w = 5E-07 \text{ m}^2/\text{s}$
- $\lambda_R = 50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
- $\lambda_{is} = 0,035 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
- $\lambda_{LP} = 350 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
- $\lambda_w = 0,67 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
- $Pr = 2,2$
- $L_k = 1 \text{ m}$
- $\lambda_{Cu} = 372 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
- $A_k = 1,0E-07 \text{ m}^2 = 0,1 \text{ mm}^2$
- $\alpha_u = 12 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$
- $A_s = 1,05E-03 \text{ m}^2$

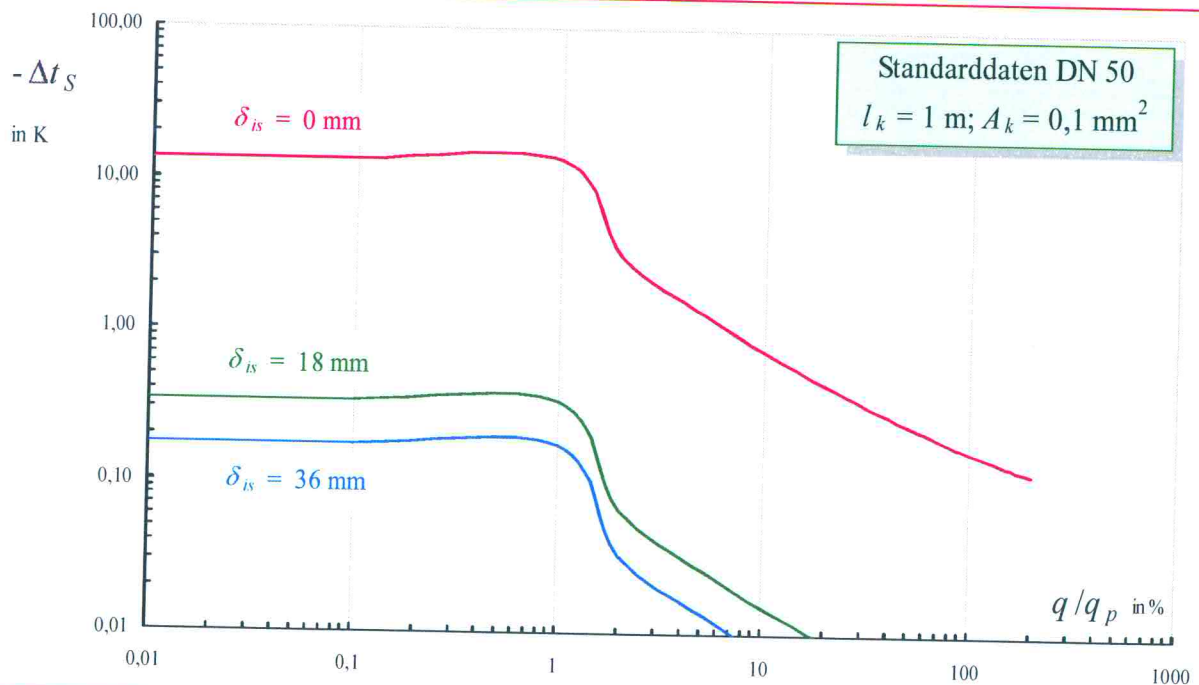
Thermisches Ersatzschaltbild für $q = q_p$



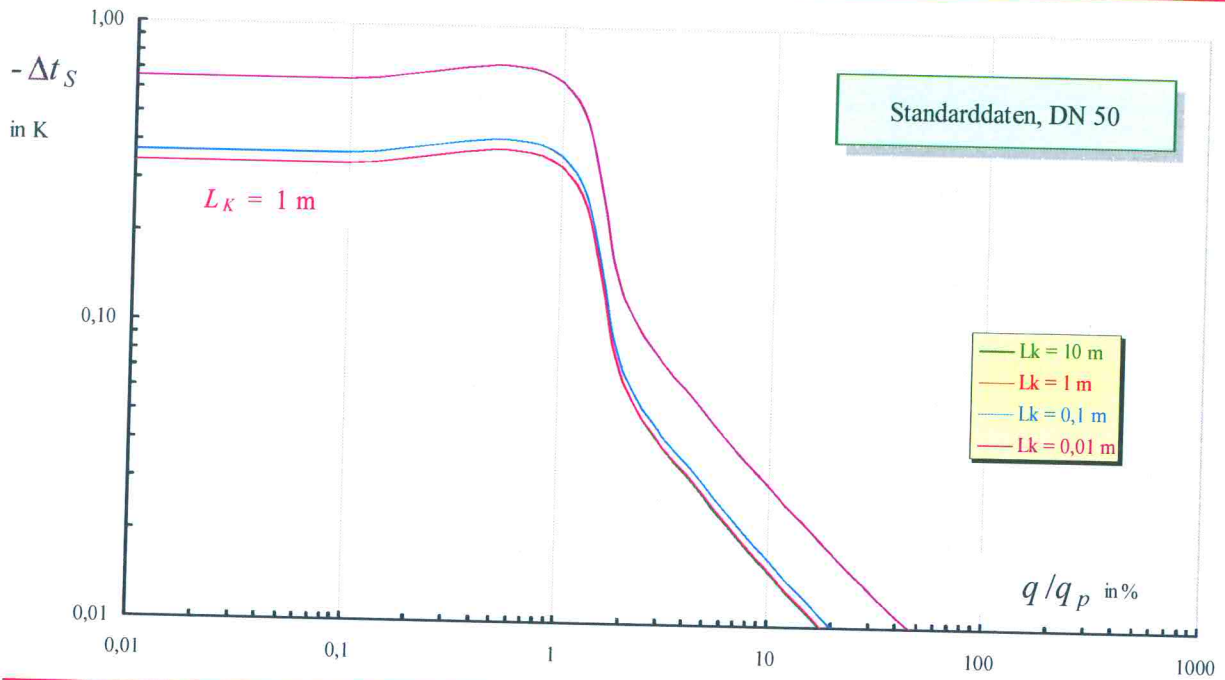
Widerstände und Temperaturen für $q = 0,01 q_p$



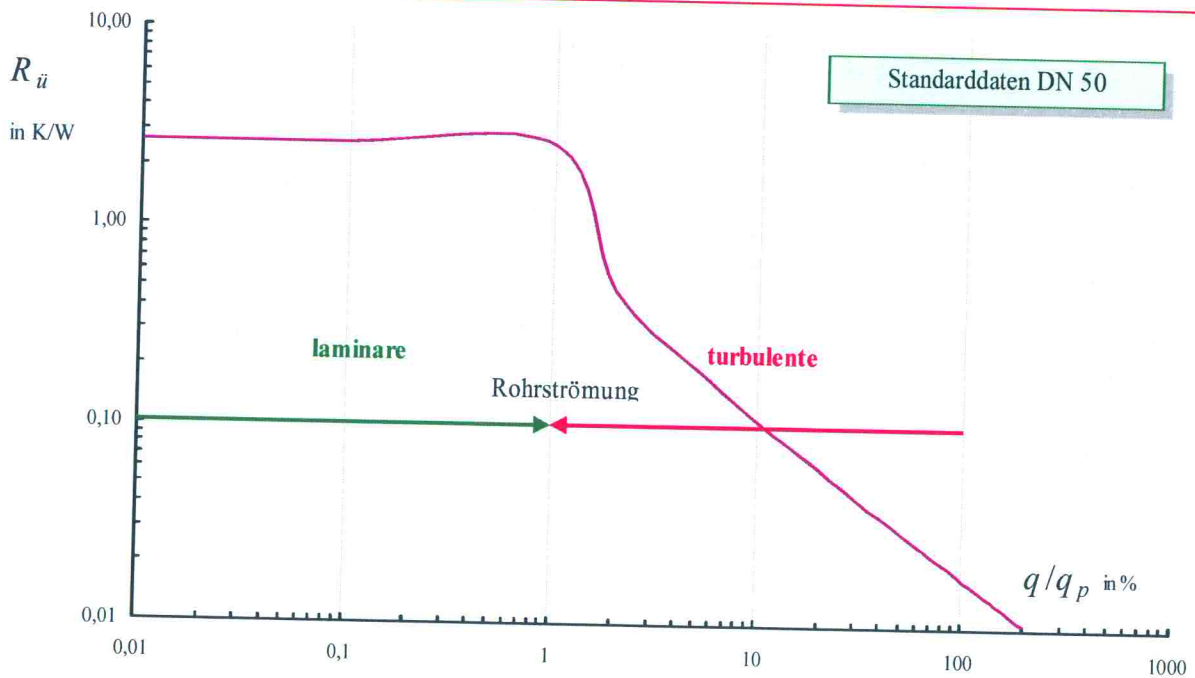
Einfluss: Isolation



Einfluss: Anschlusskabels, $A_k = 0,1 \text{ mm}^2$



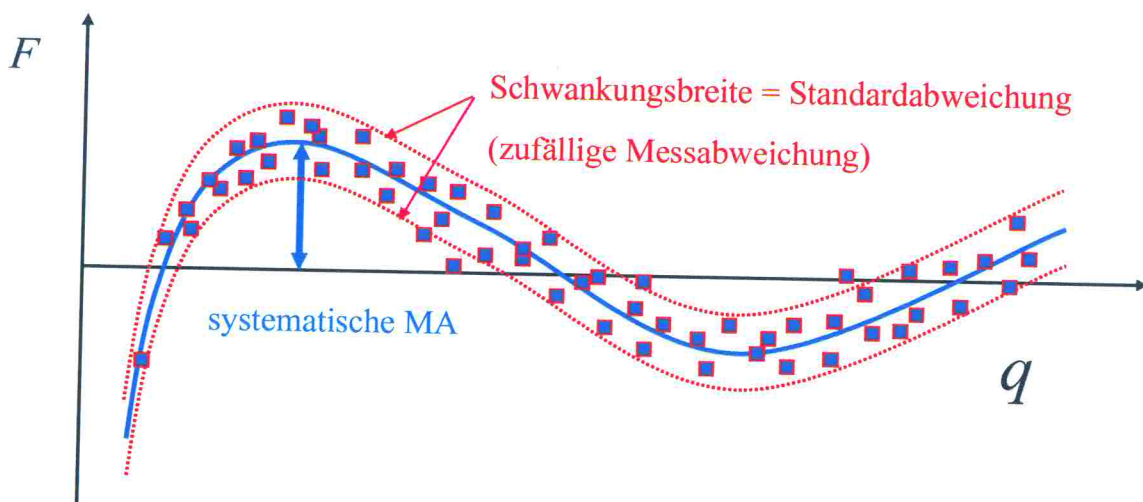
Einfluss $R_{\ddot{u}} = (A_i \alpha_{\ddot{u}})^{-1}$



Wichtige Anmerkung

- **Systematische Anteile** wie Messabweichungen von Temperatur- und Durchflusssensoren werden als korrigierbar verstanden und hier nicht weiter berücksichtigt!
- Dagegen werden die **Wiederholbarkeit** und die **Reproduzierbarkeit** sehr wohl als Unsicherheitsanteile berücksichtigt

Erläuterung an Hand Messgerät



Temperaturdifferenzmessung

- Paarungsfehler durch Kalibrierung der TS eliminiert
- Reproduzierbarkeit (in Anlage) vorhanden →
- Frage: Wie groß ist der Paarungs-Einbaufehler ΔF_E ?
Annahme: Der Einbaufehler ist (annähernd) prop. $t \Rightarrow$

$$F_{E,V} \approx k_V t_V \quad F_{E,R} \approx k_R t_R$$

$$\Delta F_E \approx k_V t_V - k_R t_R$$

$$\frac{\Delta F_E}{\Delta t} \approx \frac{k_V t_V - k_R t_R}{\Delta t} = k_V \frac{(t_V - \frac{k_R}{k_V} t_R)}{t_V - t_R}$$

Fortsetzung

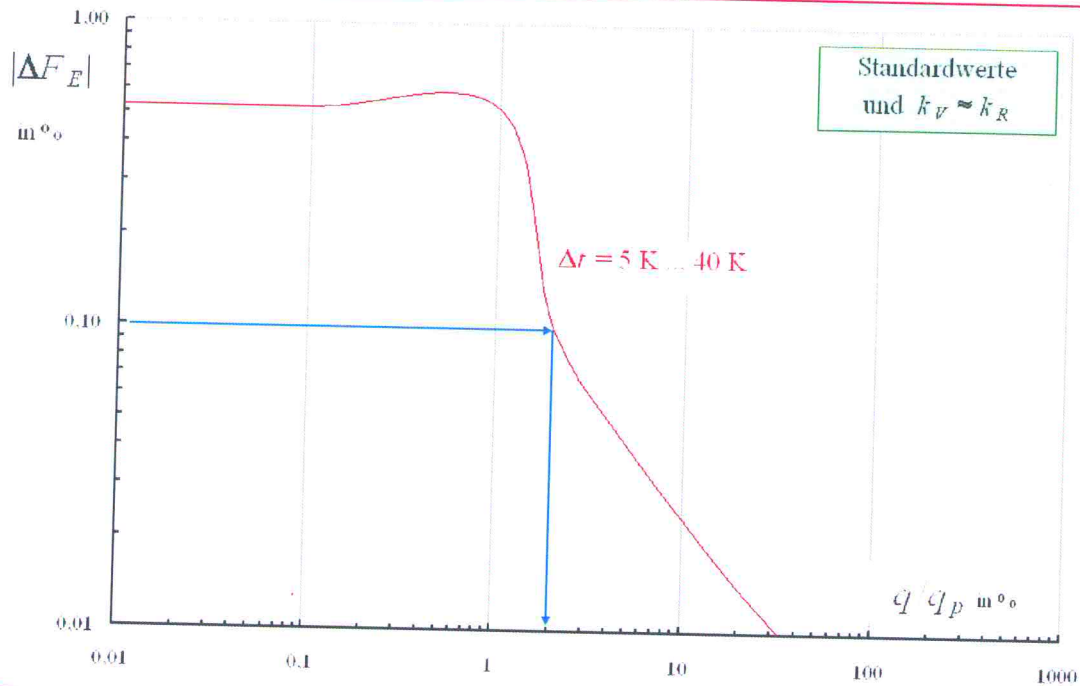
Für $k_V \approx k_R$ ist

$$\Delta F_E \approx k \Delta t$$

Der Einbau-Differenzfehler (in Kelvin) ist von der Temperaturdifferenz annähernd linear abhängig, aber:

Der relative Einbau-Differenzfehler $\Delta F_E / \Delta t \approx k(\text{onst})$

Temperatur-Differenzmessung



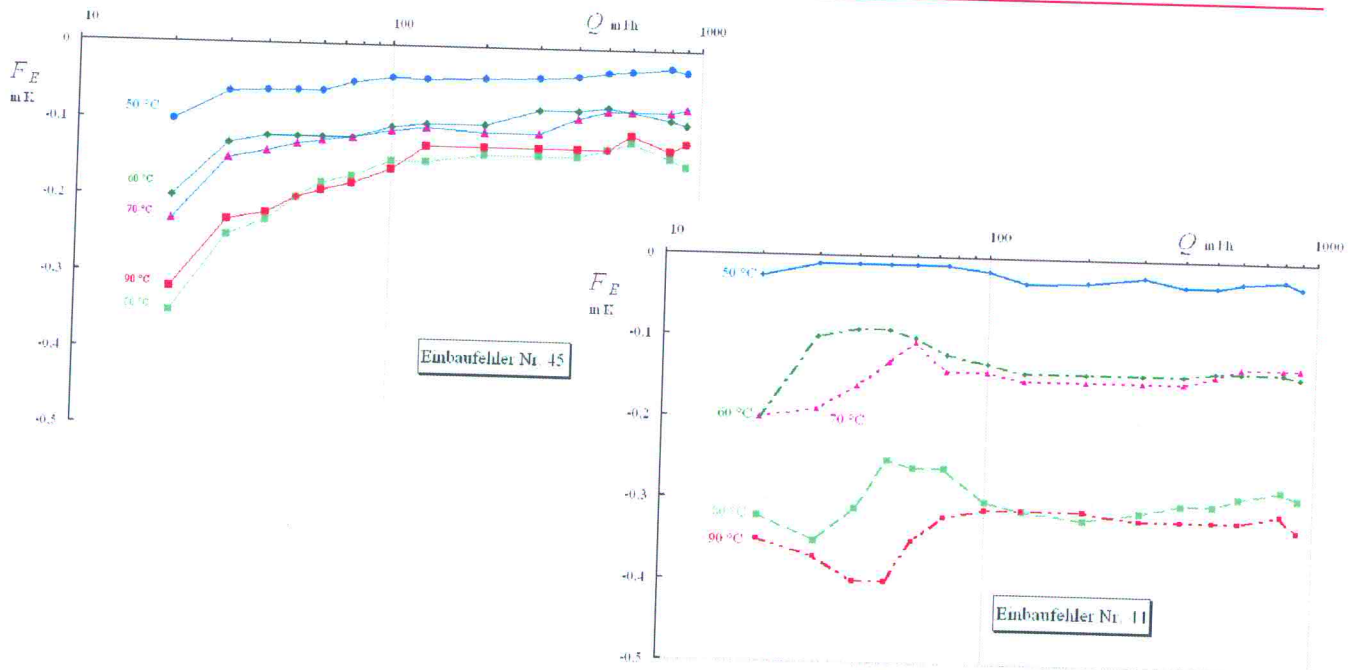
Reproduzierbarkeit

Thermometer werden vor und nach Messkampagne kalibriert (Koeffizienten bestimmt), Unterschiede liegen im Band:
 $\pm 0,2 \%$

$$u_{R,t}^2 = \frac{0,002^2}{3} \quad \text{oder} \quad u_{R,t} = 0,16 \%$$

$$u_{R,t} = 0,16 \%$$

Vergleich: Invasive Temperaturmessung

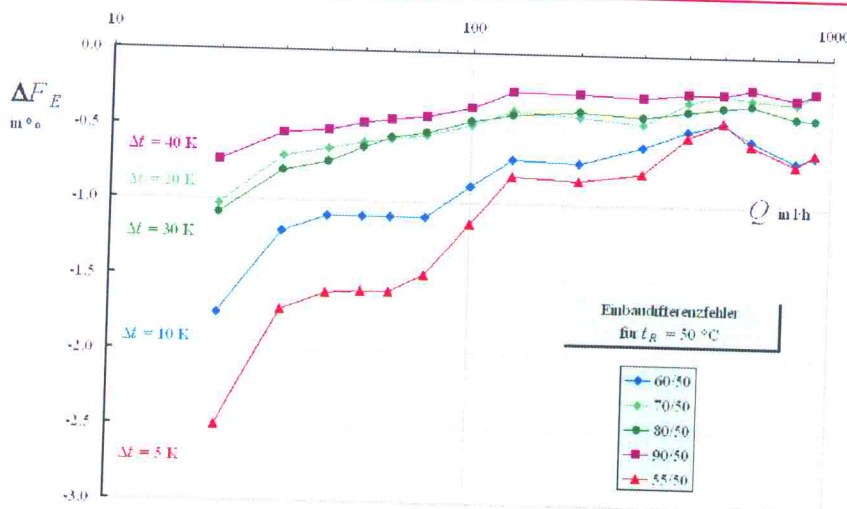


Vortragender:
Univ.-Prof. Dr. Dr. Franz Adunka

EMATEM Sommerschule 2009
Vortrag: Erfahrungen mit der nichtinvasiven Ultraschall Wärmemessung

Seite 19

Vergleich: Invasive Temperatur-Differenzmessung



Ist $k_V \approx k_R \approx k$, dann ist Einbau-Differenzfehler ca. proportional k .

Man erhält also vergleichbare Verhältnisse zur nichtinvasiven Messung

Vortragender:
Univ.-Prof. Dr. Dr. Franz Adunka

EMATEM Sommerschule 2009
Vortrag: Erfahrungen mit der nichtinvasiven Ultraschall Wärmemessung

Seite 20

Zusammenfassung Δt -Messung

- Für isolierte Rohre (im Beispiel: Armaflex) ist mit $\lambda_{is} = 0,035 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$, $q/q_p > 0,02$ und $\delta_{is} \geq 18 \text{ mm}$ ist $|F_p(\Delta t)| < 0,1 \%$
- Weitere **Voraussetzungen** sind:
 - Extrem dünne TS (Folienbauart)
 - Verwendung von Wärmeleitpaste: $\lambda_{WLP} > 35 = \text{W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$
- **Achtung: Der Paarungsfehler seitens der Kalibrierung = 0 gesetzt**

Messunsicherheit der Δt -Messung

- Wärmeleistung: $P = k \Delta t q$

- Messunsicherheit:

$$\frac{u^2(P)}{P^2} = \frac{\cancel{u^2 k}}{\cancel{k^2}} + \frac{u^2(\Delta t)}{(\Delta t)^2} + \frac{u^2(q)}{q^2}$$

- Kalibrierung der t -Sensoren:

$$u_{KS}(\Delta t)_1 = 0,03 \%$$

Fortsetzung

- Einbaufehler: gegeben durch Anschlusskabel im Bereich $10\% \leq q/q_p \leq 200\%$: $\Delta F_{p,E} \approx 0,03\%$.
Daraus folgt:

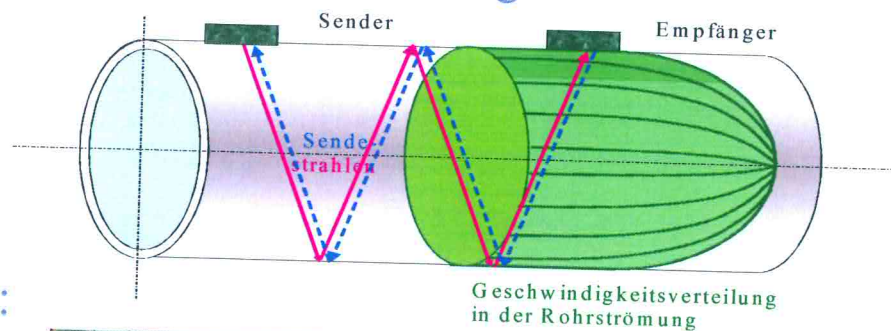
$$u_{KS}(\Delta t)_2 = \frac{0,03\%}{\sqrt{3}} = 0,006\%$$

- Für $\Delta t = 5\text{ K}$ folgt:

$$u_{KS}(\Delta t) = \sqrt{u_{KS}(\Delta t)_1 + u_{KS}(\Delta t)_2} \approx 0,03\%$$

Durchflussmessung mit clamp on

- Prinzip: Laufzeit-Differenzmessung mit US



- Anordnung:



Einfluss der Beruhigungsstrecke, 1

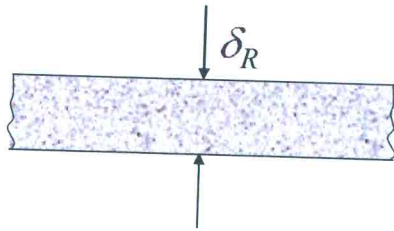


Einfluss der Beruhigungsstrecke, 2

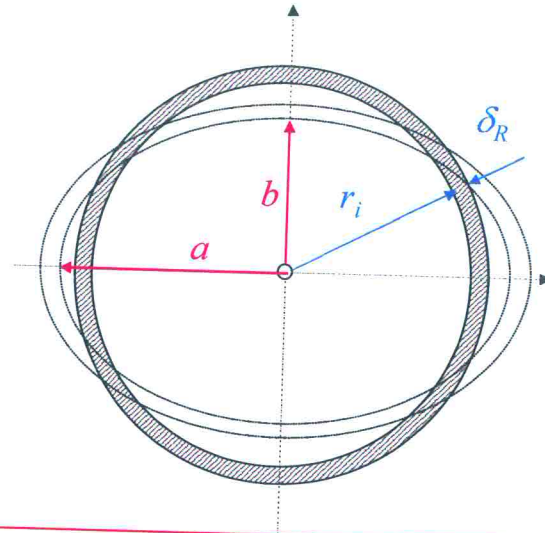
- unterhalb $L_B = 30 D$: $\pm 2 \%$ vom Messwert
- kalibriert wird bei $L_B = 60 D$, zusätzlich bei 20 D und 30 D

Einflüsse systematischer Natur (u.a.)

(1) **Rohrwandstärke:** wird mit Messgerät erfasst



(2) **Rohrquerschnitt**



Messunsicherheitsbeiträge, 1

$$A_K = r_i^2 \pi; \quad A_E = a b \pi; \text{ da } A_K = A_E \text{ ist:}$$

$$r_i = \sqrt{a \times b}$$

$$d_i = d_a - \delta_R$$

$$\frac{u^2(d_i)}{d_i^2} = \frac{u^2(d_a)}{d_a^2} \frac{d_a^2}{d_i^2} + \frac{u^2(\delta_R)}{\delta_R^2} \frac{\delta_R^2}{d_i^2}$$

Messunsicherheitsbeiträge, 2

$$\text{DN 50, } d_a = 51 \text{ mm; } \delta_R = 2,3 \text{ mm: } \frac{u(d_i)}{d_i} = 1,39 \times 10^{-3}$$

Bekannte Unsicherheiten:

- Rohrwandstärke: $\Delta \delta_R \approx \pm 0,05 \text{ mm}$
- Rohr-Innendurchmesser d_i bzw. Querschnittsfläche A_i

$$\frac{u(A_i)}{A_i} = 2 \frac{u(d_i)}{d_i} = 2,78 \times 10^{-3}$$

Messunsicherheitsbeiträge, 3

$$\text{Für DN 50 ist: } \frac{u(A_i)}{A_i} = 0,28 \%$$

- Wiederholbarkeit: $F_{q,w} \approx \pm 0,5 \%$ (NV)

$$u_{q,w}^2 = 0,005^2 = 2,5 \times 10^{-5}$$

$$\text{oder: } u_{q,w} = 0,5 \%$$

Reproduzierbarkeit

Es wurden zahlreiche Messungen zur Wiederholbarkeit → und **Reproduzierbarkeit** an Rohren durchgeführt

Unter Berücksichtigung aller Einflüsse ergab sich eine Streuung der Werte im Bereich $\pm 0,5 \%$

$$u_{R,q}^2 = \frac{0,005^2}{3} = 2,89 \times 10^{-3} \Rightarrow u_{R,q} = 0,29 \%$$

Messunsicherheit der Wärmeleistungsmessung, 1

Wärmeleistung P und –menge E :

$$P = k \Delta t q \quad E = \int_{\tau_m} k(\tau) \Delta t(\tau) q(\tau) d\tau$$

Integration + f (Σ gezählte Signale, Unsicherheit des WK, ...), geschätzt $\pm 0,1$ bzw. $\pm 0,15 \%$

Messunsicherheit der Wärmeleistungsmessung, 2

$$u_{I,k} = \frac{0,1}{3} + \frac{0,15}{3} = 0,10_4 \%$$

Für $\Delta t = 5 \text{ K}$ entspricht dies:

$$u_{I,k} = 0,002 \text{ K}$$

Messunsicherheitsbudget

Voraussetzung: $\Delta t_{min} = 5 \text{ K}$

Unsicherheitsbeiträge	Formelzeichen	Varianz	Messunsicherheitsbeitrag		Verteilung
			relativ	in %	
Integration und Wärmekoeffizient k					
Temperatur-Differenzmessung					
* Temperaturdifferenzmessung, Momentanwert	u_{KS}	3,60E-09	6,00E-05	0,01	Rechteck
* Langzeitstabilität der Δt -Sensoren	u_{LZ}	1,16E-09	3,41E-05	0,00	Rechteck
* Kalibrierunsicherheit des Thermometerpaares	$u_{KS}(\Delta t)$	3,60E-05	6,00E-03	0,60	Normal
* Wiederholmessungen	u_{wm}^*	2,50E-05	5,00E-03	0,50	Normal
* Reproduzierbarkeit Δt	$u_{R,t}$	1,33E-06	1,15E-03	0,12	Rechteck
Durchflussmessung					
* Hydraulische Störungen	u_{HS}	3,36E-05	5,80E-03	0,58	Rechteck
* Unsicherheit der Bestimmung von A_i	$u(A_i)$	7,74E-06	2,78E-03	0,28	Rechteck
* Temperaturkompensation der US-Signale	u_{TK}	3,33E-07	5,77E-04	0,06	Rechteck
* Wiederholmessungen US	$u_{q,w}$	2,50E-05	5,00E-03	0,50	Normal
* Reproduzierbarkeit q-Sensor	$u_{R,q}$	8,33E-06	2,89E-03	0,29	Rechteck
Kombinierte Varianz	u_c	1,38E-04			
Erweiterte Messunsicherheit in %	U_E	2,35			

[Messunsicherheitsbudget.xls](#)

*) Dieser Wert entspricht einer Schätzung entsprechender Untersuchungen in der Firma Enzinger

Kontakt Firma Enzinger GmbH



Franz Hörting
Stellvertreter und Zeichnungs-
berechtigter der Eichstelle



Bahngasse 11c
A-2751 Matzendorf

Tel: +43-(0)2628-63 640
Mobil: +43-(0)699-10 89 01 76
Fax: +43-(0)2628-63640-9

office@enzinger-wwm.at



Josef Enzinger
Leiter und Zeichnungs-
berechtigter der Eichstelle

<http://www.enzinger-wwm.at>

Kontakt MBG



Univ.-Prof. Dr. phil. Dr. techn. **Franz Adunka**, vormals beim österreichischen Metrologieinstitut BEV, Wien, tätig, ist nun freischaffender Wissenschaftler und wirkt u.a. als Berater bei messtechnischen Problemen

Adresse: St. Anna Weg 4, 9082 Maria Wörth, Österreich

Tel.: +43 4273 21013, mobil: +43 7360 3853

E-Mail: prof.adunka@aon.at

Website: www.mbg-adunka.at

