

# Prozessmesstechnik und Sensorik

Vorlesung:  
Technische Temperaturmessung

# Prüfungsfragen

- Beschreiben Sie die Funktionsprinzipien folgender Temperatursensoren:
  - Widerstandsthermometer / Thermistor
  - Thermoelement
  - Thermosäule
  - Rauschthermometer
- Beschreiben Sie R- $\vartheta$ -Kennlinien von Pt-Widerstandsthermometern sowie NTC und PTC-Thermistoren!



## Temperatur als Prozessparameter

In technischen Prozessen ist die Temperatur ein wesentlicher Prozessparameter.  
Sie bestimmt die

- **(lokalen) Stoffeigenschaften** z. B. Dichte, Zähigkeit, Oberflächenspannung, Aggregatzustand
- **die Dynamik von Prozessen** z. B. chemische Kinetik, biochemische Prozesse, Stoff- und Wärmeübergang

und ist eine wichtige sicherheitsrelevante Größe bei Stoffumwandlungsprozessen  
(z.B. Wärmefreisetzung durch exotherme Reaktionen)

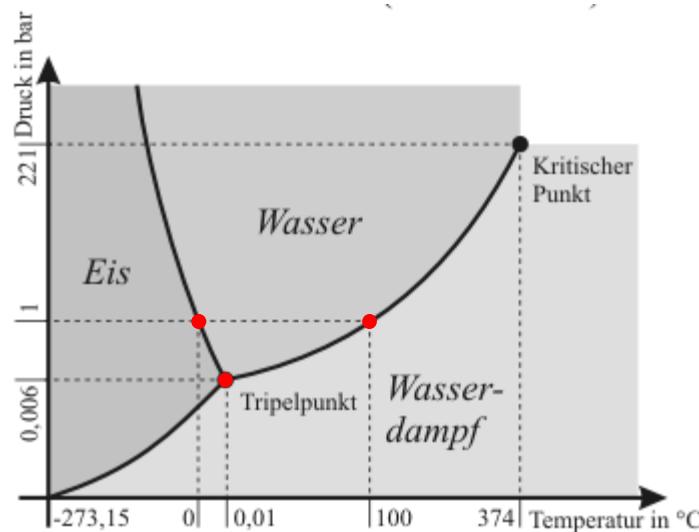
Beispiele:

- Prozessführung in Chemiereaktoren
- Lebensmittelkontrolle
- Überwachung von Kernreaktoren
- Überwachung und Steuerung von Verbrennungsanlagen und Schmelzöfen
- Überwachung und Steuerung von Tieftemperaturprozessen

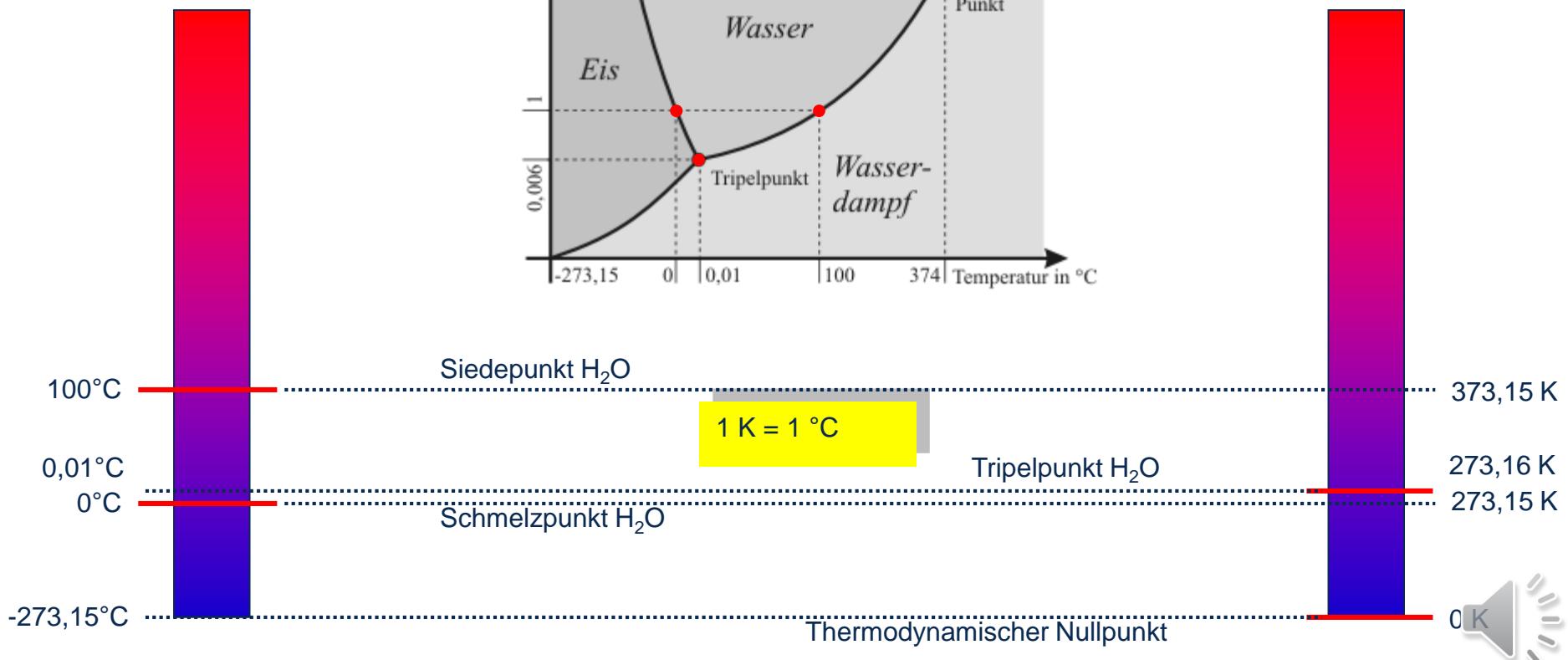


## Temperatur-Skalen

Celsius-Skale  
Temperatur:  $t$  in °C



Kelvin-Skale  
Temperatur:  $T$  in K



## Die internationale Temperaturskala ITS 90

### - Kalibrierung von Temperatursensoren -

Element	Art des Fixpunktes	Temperatur	
He	Dampfdruck	3 K .. 5 K	-270,15 °C .. -286,15 °C
H <sub>2</sub>	Dampfdruck (32,9 kPa)	≈ 17 K	≈ -256,15 °C
H <sub>2</sub>	Dampfdruck (102,2 kPa)	≈ 20,3 K	≈ -252,85 °C
H <sub>2</sub>	Tripelpunkt	13,8033 K	-259,3467 °C
Ne	Tripelpunkt	24,5561 K	-248,5939 °C
O <sub>2</sub>	Tripelpunkt	54,3584 K	-218,7916 °C
Ar	Tripelpunkt	83,8058 K	-189,3442 °C
Hg	Tripelpunkt	234,315 K	-38,8344 °C
H <sub>2</sub> O	Tripelpunkt	273,16 K	+0,01 °C
Ga	Schmelzpunkt	302,9146 K	+29,7646 °C
In	Erstarrungspunkt	429,7485 K	+156,5985 °C
Sn	Erstarrungspunkt	505,078 K	+231,928 °C
Zn	Erstarrungspunkt	692,677 K	+419,527 °C
Al	Erstarrungspunkt	933,473 K	+660,323 °C
Ag	Erstarrungspunkt	1234,93 K	+961,78 °C
Au	Erstarrungspunkt	1337,33 K	+1064,18 °C
Cu	Erstarrungspunkt	1357,77 K	+ 1084,62 °C



# Messprinzipien und Sensoren

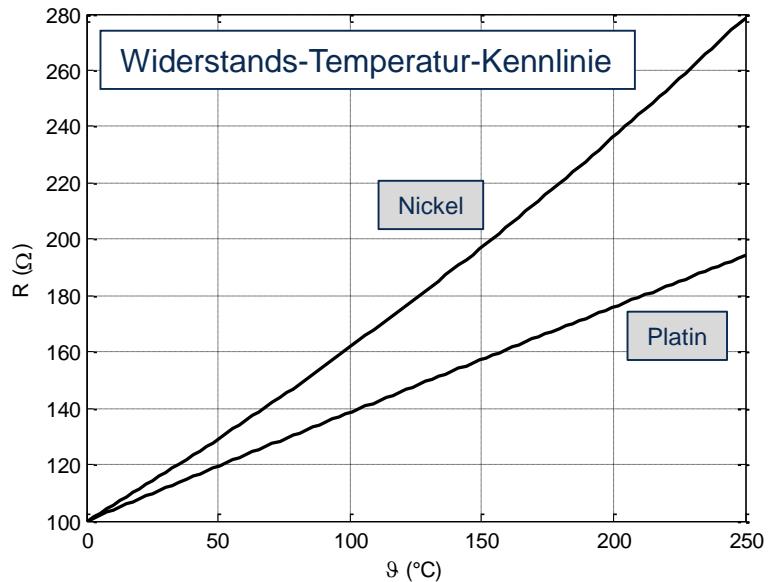
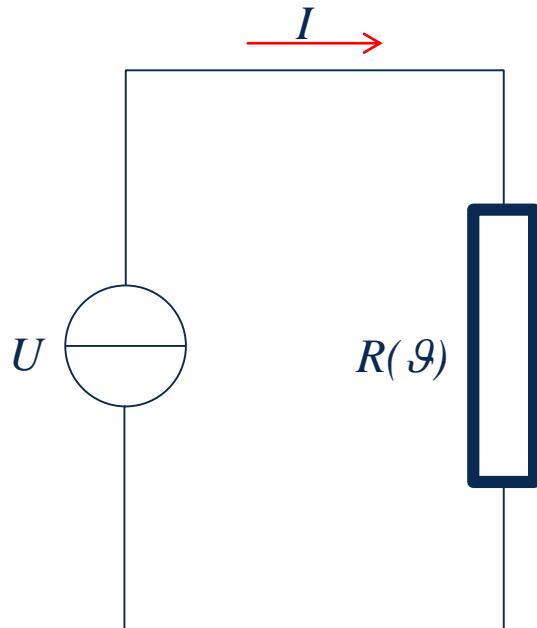
Messprinzip / Sensor	(Primäre) gemessene physikalische Größe
Kontaktmessung	
Dampfdruckthermometer	Druck
Gasthermometer	Volumen
Flüssigkeitsthermometer	Volumen
Bimetall-Thermometer	Materialdehnung
Widerstandstemperatursensor	Elektrischer Widerstand
Thermoelement	Thermospannungsdifferenz (Seebeck-Effekt)
Faseroptischer Temperatursensor	Materialdehnung
Akustisches Thermometer	Schallgeschwindigkeit
Rauschthermometer	Rauschleistung des elektrischen Widerstandes
Strahlungsmessung	
Strahlungspyrometer	Infrarot-Strahlungsleistung



# Widerstandsthermometer



## Grundprinzip und Kennlinie



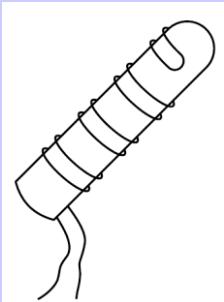
$$R(t) = \frac{U}{I}$$

$$R(t) = R(t_0)[1 + A(t - t_0) + B(t - t_0)^2 + \dots]$$

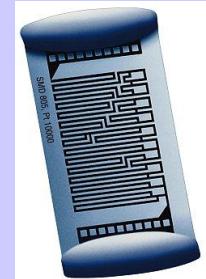


## Bauformen von Temperaturwiderständen und Thermistoren

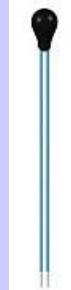
$$R = \frac{U}{I} = \rho \frac{L}{A}$$



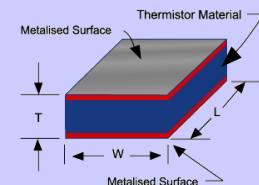
Pt-Drahtwiderstand,  
bifilar gewickelt und  
in Glas oder Keramik  
versiegelt



Pt-Widerstände in  
Dünffilmtechnik



Typische Thermistorbauformen



Miniatur-NTC für Hybridtechnik



Miniatur-NTC für Herzkatheter



## Standardisierte Bauformen von Prozesssensoren



Quelle: wikipedia



### Anschlusskopf

**DIN 43 729**

### Normung:

Kopfform, wichtige Kopfmaße

### Nicht genormt:

Konstruktionsdetails und Deckelbefestigung

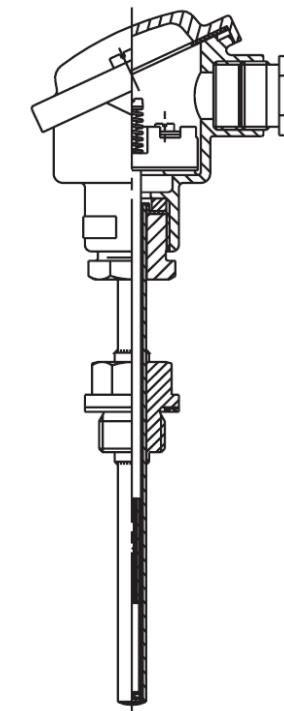
Material (Gusseisen, Aluminium oder Kunststoff)

Schutzart (z.B. IP 54 – spritzwasserdicht)

### Bauform

**DIN 43 764 – DIN 43 769**

Standardisierte Thermometer und Schutzrohre



### Schutzrohr

**DIN 43 772**

### Normung:

Form

Schutzrohr-Innendurchmesser

Anschlussgewinde

Gesamtlänge

Einbaulänge

Werkstoff



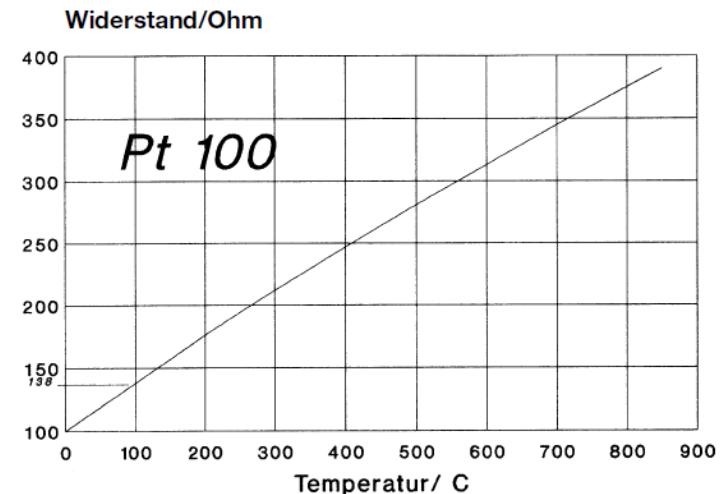
## Platin-Messwiderstand IEC 751 / DIN EN 60751

### Eigenschaften:

- chemisch inert
- leichte Bearbeitbarkeit
- hochreine Darstellung
- gute Reproduzierbarkeit

### Norm DIN EN 60 751:

- Pt100 - 100 Ω
- Pt500 - 500 Ω
- Pt1000 - 1000 Ω
- Pt10 - 10 Ω



### Gültigungsbereich -200°C ... 0°C

$$R(t) = R_0[1 + At + Bt^2 + C(t - 100°C)t^3]$$

### Gültigungsbereich 0°C ... 850°C:

$$R(t) = R_0[1 + At + Bt^2]$$

$t_0=0°C$	Platin
A	$+3,9083 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
B	$-5,775 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$
C	$-4,183 \cdot 10^{-12} \text{ } ^\circ\text{C}^{-4}$



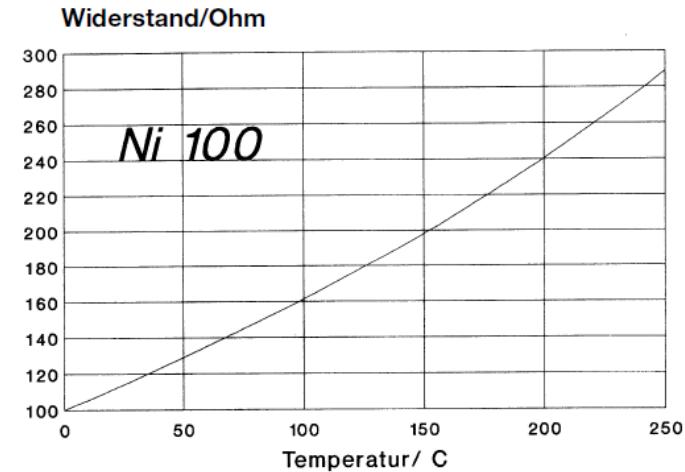
## Nickel-Messwiderstand

### Eigenschaften:

- wird seltener eingesetzt
- kostengünstig
- höherer Temperaturbeiwert
- maximaler Messbereich  
-60°C...+250°C

### Norm DIN EN 43 760:

- Ni100 - 100 Ω
- Ni500 - 500 Ω
- Ni1000 - 1000 Ω
- Ni10 - 10 Ω



Gültigkeitsbereich 0°C ... 250°C:

$$R(t) = R_0 [1 + At + Bt^2 + Ct^4 + Dt^6]$$

$t_0=0^\circ\text{C}$	Nickel
A	$+0,5485 \cdot 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
B	$+0,665 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$
C	$+2,805 \cdot 10^{-11} \text{ } ^\circ\text{C}^{-4}$
D	$+2,111 \cdot 10^{-17} \text{ } ^\circ\text{C}^{-6}$



## Temperaturbeiwert

Insbesondere für Metallwiderstände ist die Widerstands-Temperatur-Kennlinie in guter Näherung linear

$$R(t) = R(t_0)[1 + \mathbf{A}(t - t_0)]$$

Material	Temperaturbeiwert A	Einsatzbereich
Nickel	$6,17 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$	-60°C bis 150°C
Kupfer	$4,27 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$	-50°C bis 150°C
Platin	$3,9083 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$	-220°C bis 850°C



## Grenzabweichungen

### Toleranzklassen nach DIN EN 60 751

Klasse AA:  $\Delta t = \pm (0,1 + 0,0017 |t|)$

Klasse A:  $\Delta t = \pm (0,15 + 0,002 |t|)$

Klasse B:  $\Delta t = \pm (0,3 + 0,005 |t|)$

Klasse C:  $\Delta t = \pm (0,6 + 0,01 |t|)$

Gültigkeitsbereich -50°C bis 250°C\*/ 0°C bis 150°C\*\*

Gültigkeitsbereich -100°C bis 450°C\* / -30°C bis 300°C\*\*

Gültigkeitsbereich -196°C bis 600°C \*/ -50°C bis 500°C\*\*

Gültigkeitsbereich -196°C bis 600°C\* / -50°C bis 600°C\*\*

\*für drahtgewickelte Widerstände, \*\* für Schichtwiderstände

### Erweiterte Toleranzklassen (herstellerspezifisch, keine Norm)

1/3 Klasse  $\Delta t = \pm (0,10 + 0,0017 t)$

Gültigkeitsbereich -70°C bis 250°C

Klasse A:  $\Delta t = \pm (0,15 + 0,0020 t)$

Gültigkeitsbereich -200°C bis 600°C

Klasse B:  $\Delta t = \pm (0,30 + 0,0050 t)$

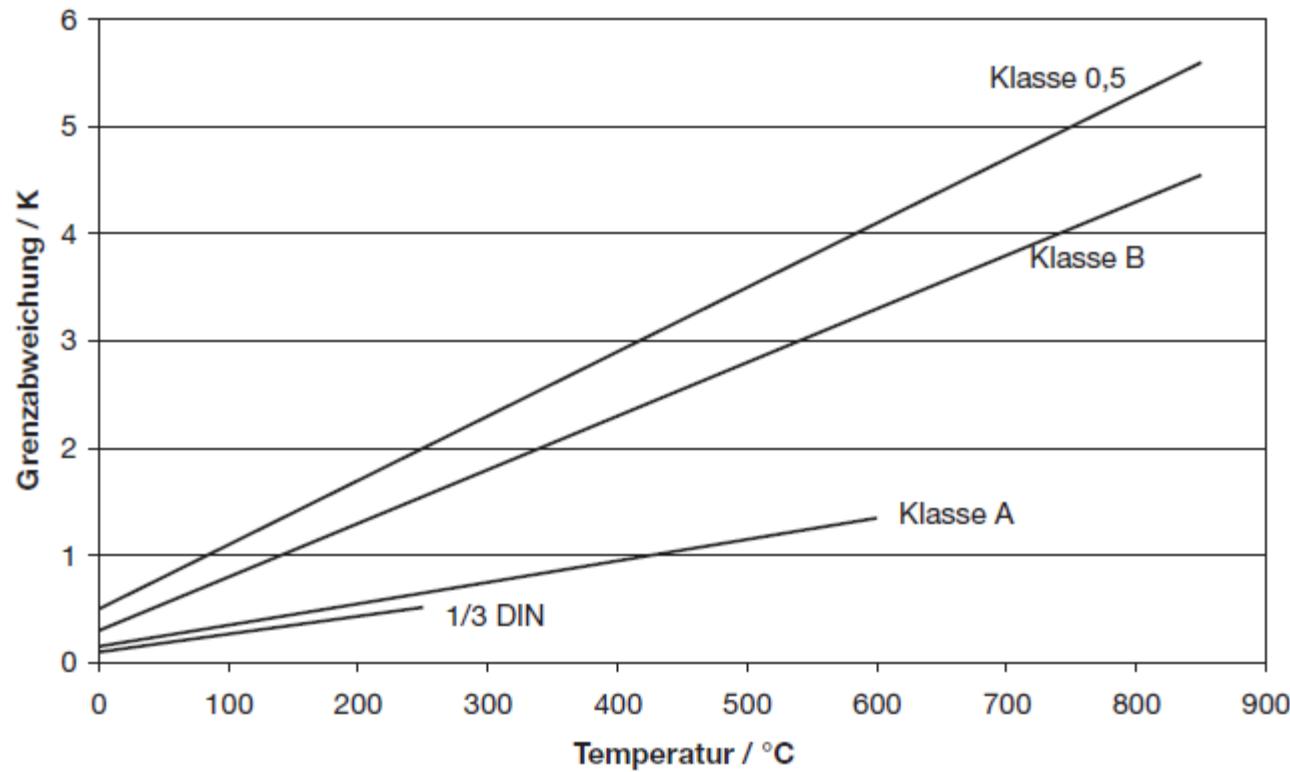
Gültigkeitsbereich -200°C bis 850°C

Klasse 0,5:  $\Delta t = \pm (0,50 + 0,0060 t)$

Gültigkeitsbereich -200°C bis 850°C



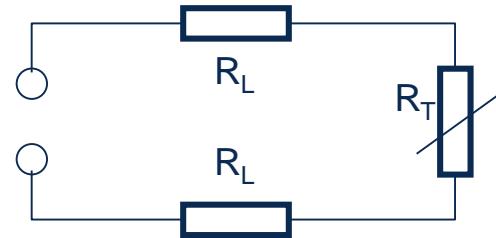
# Grenzabweichungen



# Beschaltung von Widerstandsthermometern

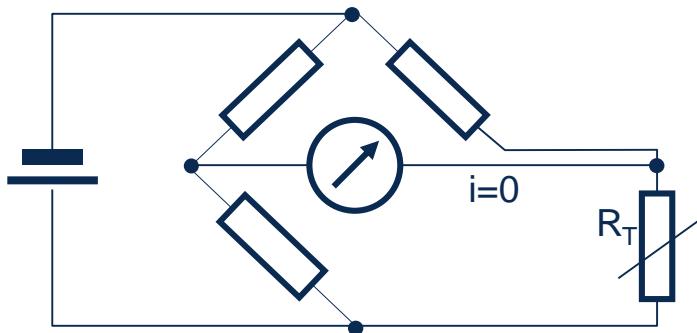
Problem: Metallschichtwiderstände haben einen vergleichsweise geringen Widerstandswert. Die Zuleitungswiderstände müssen berücksichtigt werden.

Zweileiter-Beschaltung

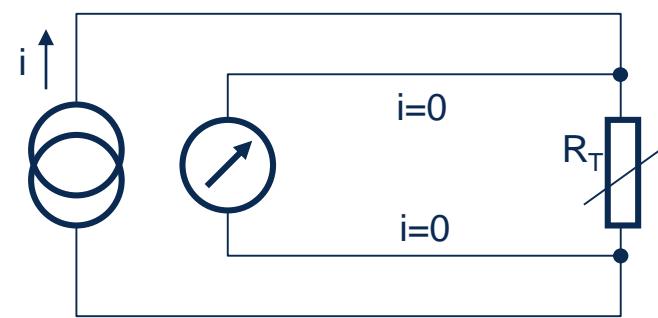


$$R = 2R_L + R_T$$

Dreileiter-Beschaltung



Vierleiter-Beschaltung



# Thermistoren



## Grundtatsachen

In Thermistoren werden keramische Halbleitermaterialien (Metalloxide) als Widerstandsmaterial verwendet. Diese sind deutlich temperatursensitiver und hochohmiger.

Ihr Einsatzbereich ist wegen der Eigenschaften der verwendeten Materialien typischerweise auf -90°C bis +130°C beschränkt.

Die Kennlinie eines Thermistors ist stark nichtlinear

Mit der Temperatur  
abnehmender Widerstand  
zunehmender Widerstand

(negative temperature coefficient) **NTC-Thermistor** oder **Heißleiter**  
(positive temperature coefficient) **PTC-Thermistor** oder **Kaltleiter**

NTC-Thermistoren werden zum Messen der Temperatur bevorzugt eingesetzt, da sie eine höhere Temperaturstabilität besitzen



## Grundtatsachen

In Thermistoren werden keramische Halbleitermaterialien (Metalloxide) als Widerstandsmaterial verwendet. Diese sind deutlich temperatursensitiver und hochohmiger.

Ihr Einsatzbereich ist wegen der Eigenschaften der verwendeten Materialien typischerweise auf -90°C bis +130°C beschränkt.

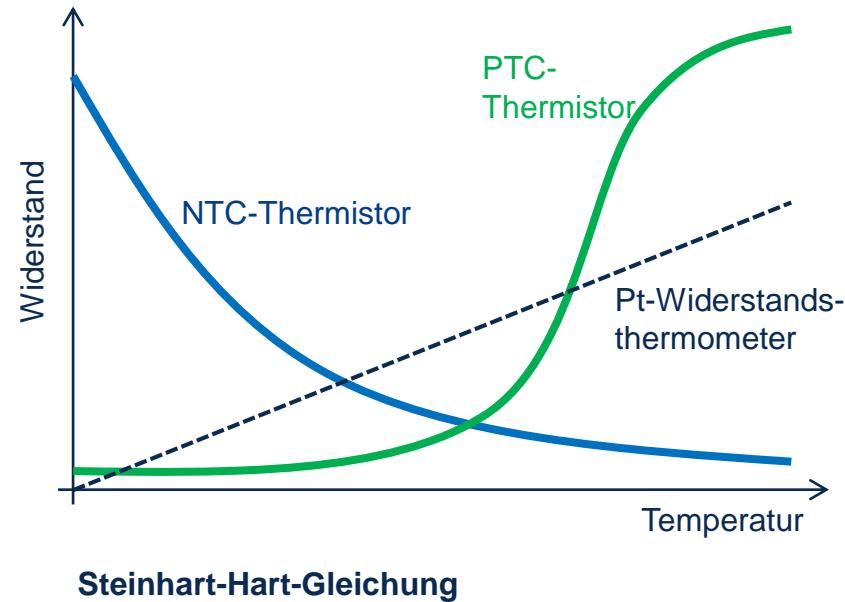
Die Kennlinie eines Thermistors ist stark nichtlinear

Mit der Temperatur abnehmender Widerstand:  
(negative temperature coefficient)

**NTC-Thermistor oder Heißleiter**

Mit der Temperatur zunehmender Widerstand:  
(positive temperature coefficient) **PTC-Thermistor**  
oder **Kaltleiter**

NTC-Thermistoren werden zum Messen der Temperatur bevorzugt eingesetzt, da sie eine höhere Temperaturstabilität besitzen.



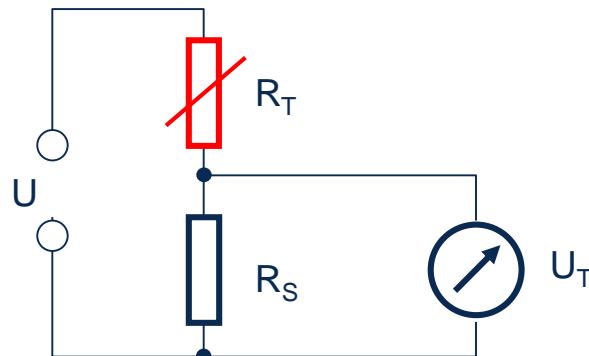
$$\frac{1}{t} = a + b \ln(R) + c [\ln(R)]^3$$



# Beschaltung von Thermistoren

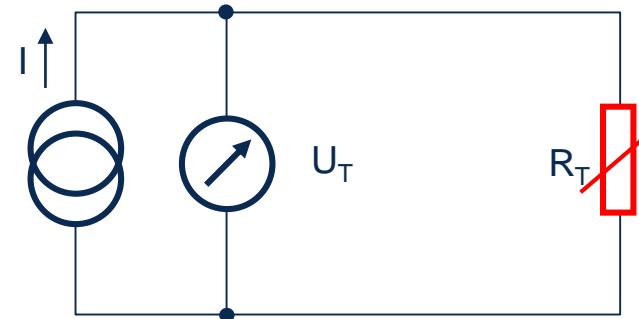
Wegen seiner hohen Sensitivität und Widerstandswerten im Kiloohmbereich ist die Beschaltung des Thermistors unkritisch. Beachtet werden muss die Eigenerwärmung. Der Messstrom sollte <10mA sein.

Variante 1:  
Spannungsteilerschaltung



$$R_T = R_S \left( \frac{U}{U_T} - 1 \right)$$

Variante 2:  
Spannungsabfall an Konstantstromquelle



$$R_T = \frac{U_T}{I}$$



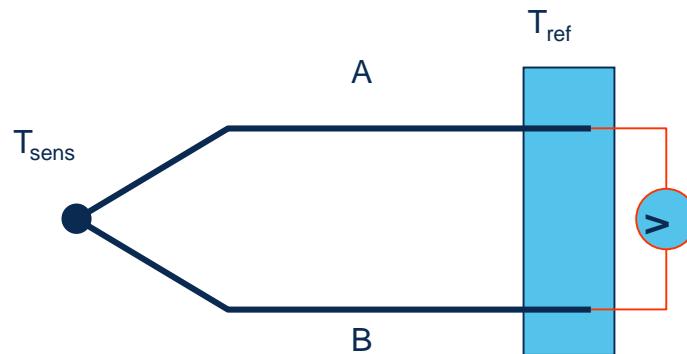
# Thermoelemente



## Funktionsprinzip des Thermoelements

Seebeck-Effekt: Ein Temperaturgradient entlang eines Drahtes hat eine elektromotorische Kraft zur Folge. Entlang des Drahtes entsteht ein Spannungsgefälle. Physikalische Ursache dafür ist die Thermodiffusion.

Für zwei Drähte verschiedenen Materials ist die Zustandsdichte (Elektronenzahl oberhalb des chemischen Potenzials) und Elektronenbeweglichkeit (Leitfähigkeit) verschieden. Zwischen den offenen Drahtenden entsteht eine Differenzspannung.



$$dU = \alpha \, dT$$

$\alpha$  - Seebeck-Koeffizient

$$\Delta U = \int_{T_{sens}}^{T_{ref}} \alpha_A(T) - \alpha_B(T) \, dT$$

$$\approx (\alpha_A - \alpha_B)(T_{ref} - T_{sens})$$



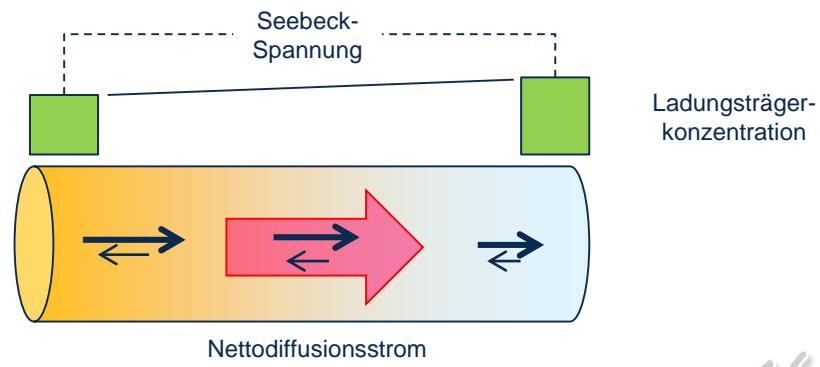
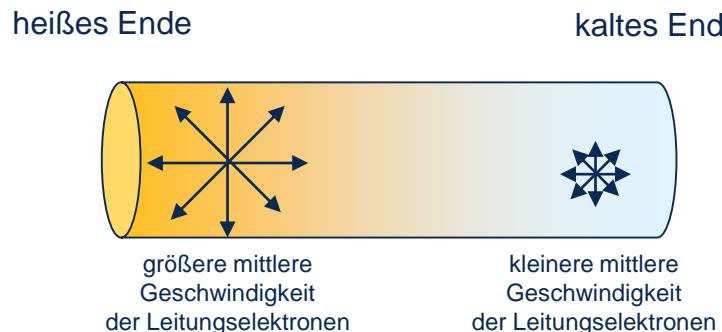
## Thermodiffusion

Die im Leitungsband des Metallgitters beweglichen Leitungselektronen haben am „heißen Ende“ des Leiters ein höhere mittlere kinetische Energie und damit mittlere Geschwindigkeit.

Durch Diffusion bewegen sich (im Mittel schnellere) Elektronen von der heißen zur kalten Leiterseite. Umgekehrt bewegen sich durch Diffusion (im Mittel langsamere) Elektronen von der kalten zur heißen Leiterseite.

In jedem Bilanzvolumen des Leiters ergibt sich ein erhöhter Nettodiffusionsstrom in Richtung des kalten Endes.

Die Ladungsträgerkonzentration am kalten Ende steigt damit solange, bis das sich durch die Ladungstrennung aufbauende elektrostatische Gegenfeld den Diffusionsstrom begrenzt. Die Potenzialdifferenz des elektrischen Gegenfeld am offenen Leiter ist die Seebeck-Spannung



# Seebeck-Koeffizienten

Material	$\alpha$ ( $\mu\text{V/K}$ ) bei 273 K
Bismut	-72
Konstantan	-35
Nickel	-15
Platin	0
Aluminium	3,5
Rhodium	6
Kupfer	6,5
Gold	6,5
Silber	6,5
Eisen	19
Nickel-Chrom	25

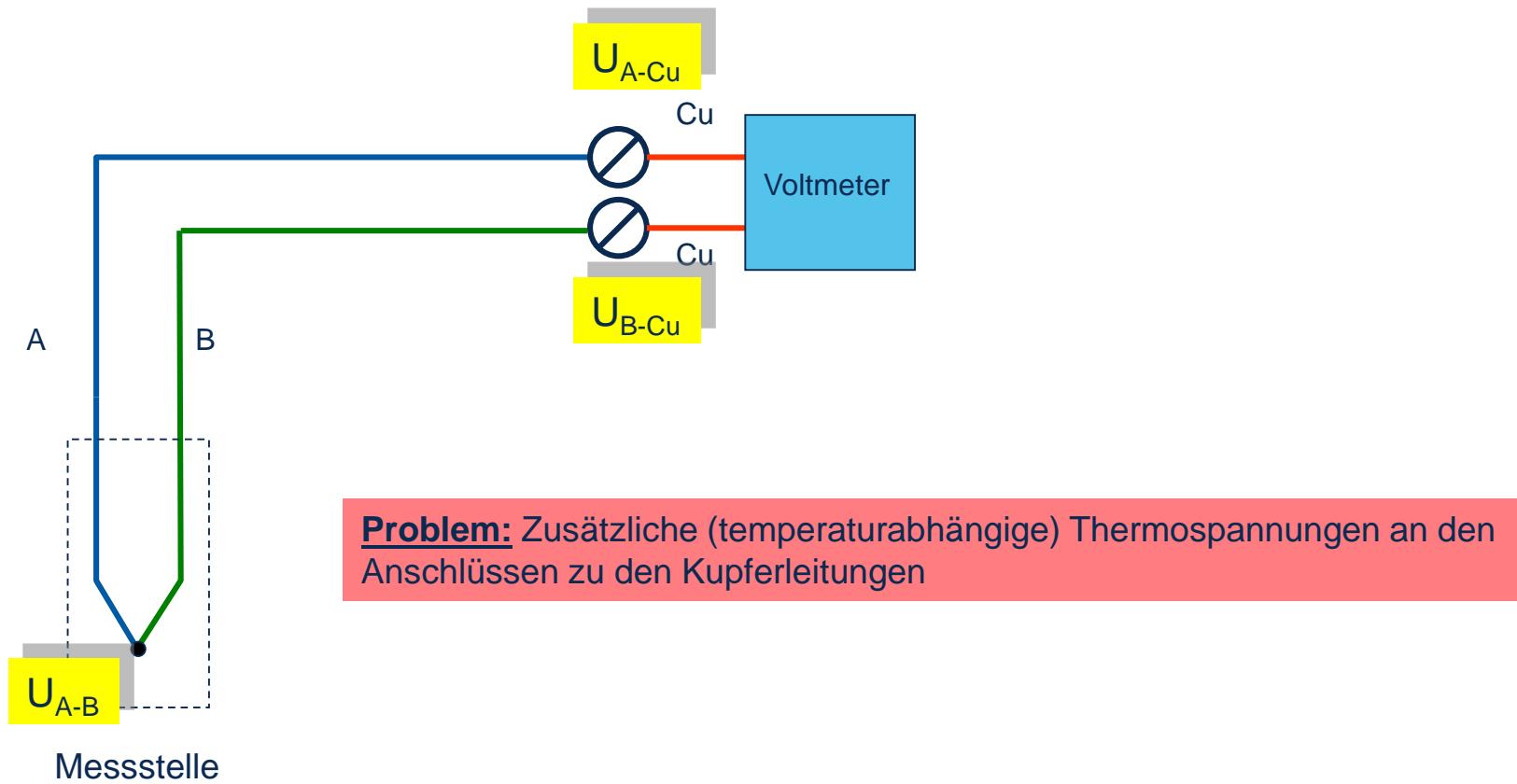


## Thermoelement-Materialien

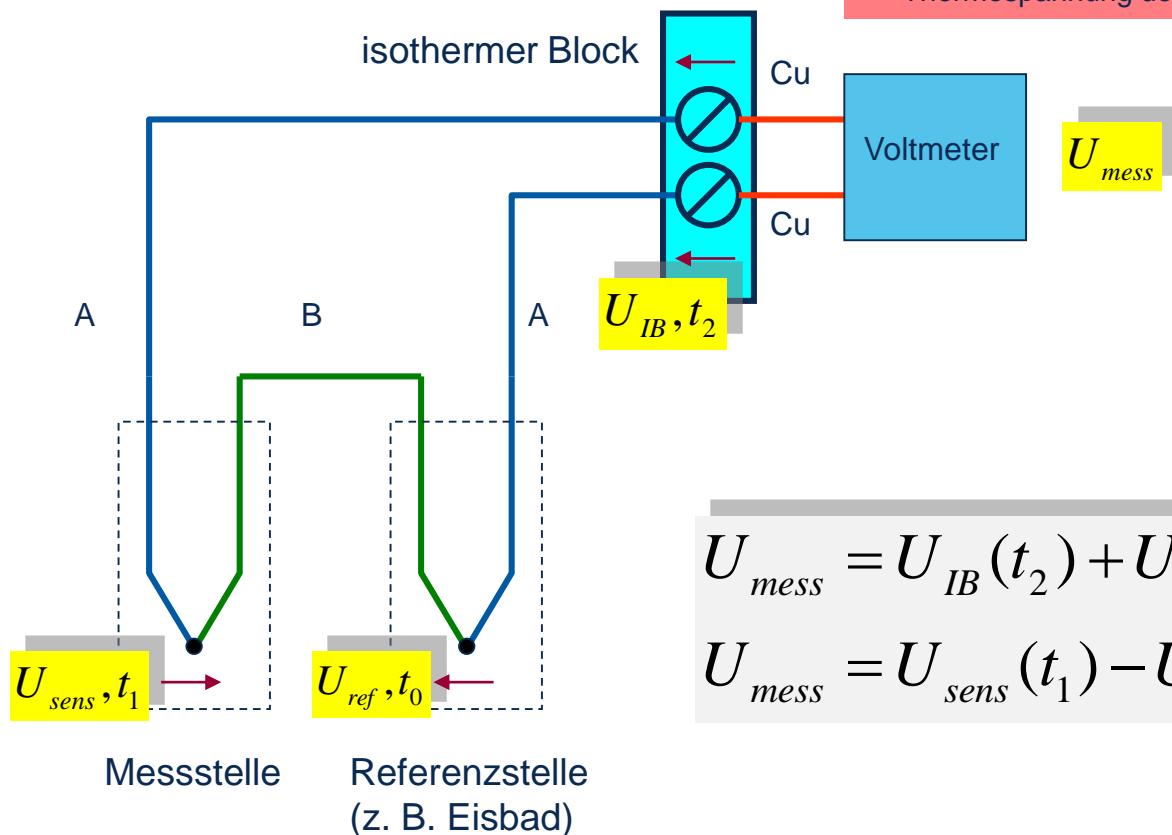
Typ	Metall 1	Metall 2	$\alpha$ ( $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ )	Einsatzbereich
B	70% Platin + 30% Rhodium	94% Platin + 6% Rhodium	5,96 @ 600°C	0°C .. 1820°C
E	90% Nickel + 10% Chrom	Konstantan	58,67 @ 0°C	-270°C .. 1000°C
J	Fe	Konstantan	50,38 @ 0°C	-210°C .. 1200°C
K	90% Nickel + 10% Chrom	Nickel	39,45 @ 0°C	-270°C .. 1372°C
N	Nicrosil	Nisil	25,93 @ 0°C	-270°C .. 1300°C
R	87% Platin + 13% Rhodium	Platin	11,36 @ 600°C	-50°C .. 1768°C
S	90% Platin + 10% Rhodium	Platin	10,21 @ 600°C	-50°C .. 1768°C
T	Kupfer	Konstantan	38,75 @ 0°C	-270°C .. 400°C



# Messung der Thermospannung



## Messung der Thermospannung



### Lösung I:

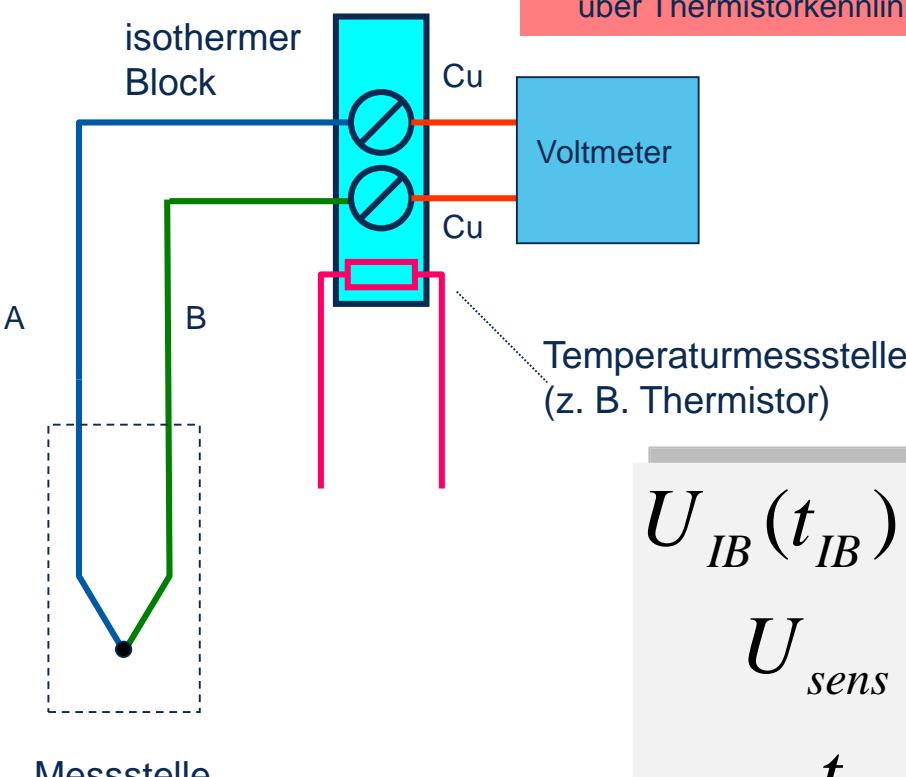
- Serieller Zusammenschluss von zwei gleichartigen Thermoelementen
- Kompensation der Thermospannungen am isothermen Block
- Thermospannung der Referenzmessstelle ist a-priori bekannt

$$U_{mess} = U_{IB}(t_2) + U_{sens}(t_1) - U_{ref}(t_0) - U_{IB}(t_2)$$

$$U_{mess} = U_{sens}(t_1) - U_{ref}(t_0)$$



# Messung der Thermospannung



## Lösung II:

- Temperaturmessung am isothermen Block mittels Thermistor
- Softwarebasierte Berechnung der Thermospannung an der Messstelle über Thermistorkennlinie  $f(R_{term})$  und Thermospannungskennlinie  $U_{IB}(t_{IB})$

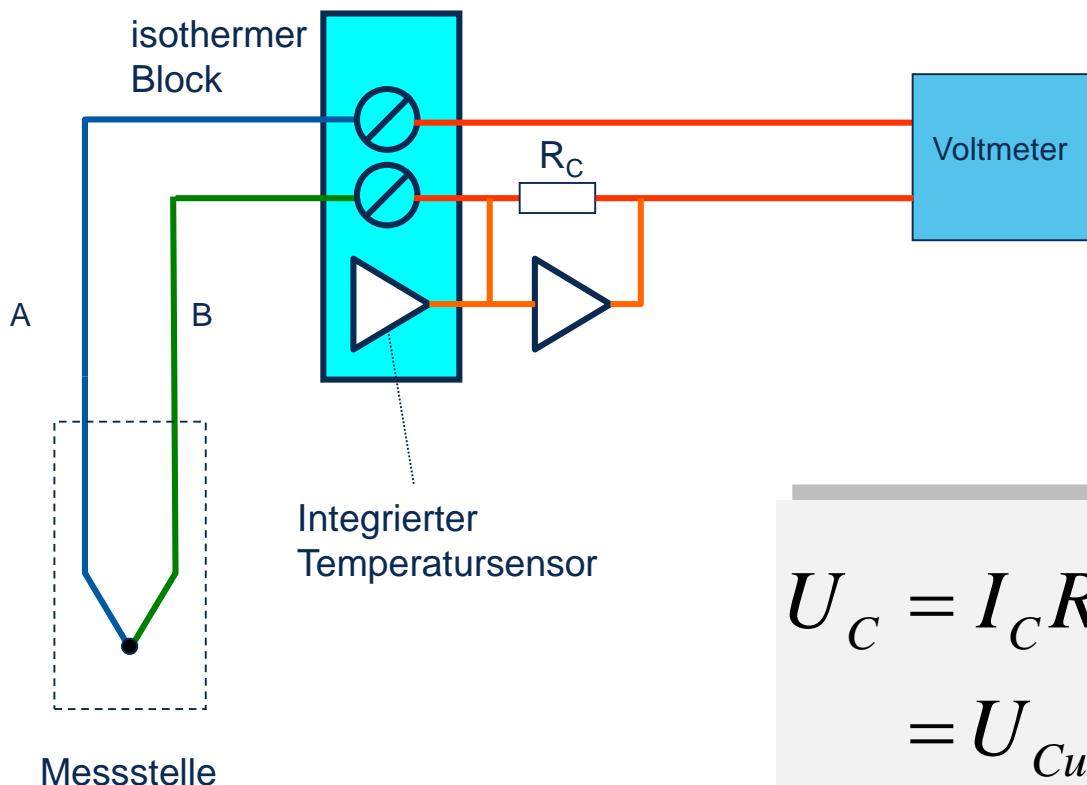
$$U_{IB}(t_{IB}) = U_{Cu-A}(t_{IB}) - U_{B-Cu}(t_{IB})$$

$$U_{sens} = U_{mess} - U_{IB}(t_{IB})$$

$$t_{IB} = f(R_{term})$$



## Messung der Thermospannung



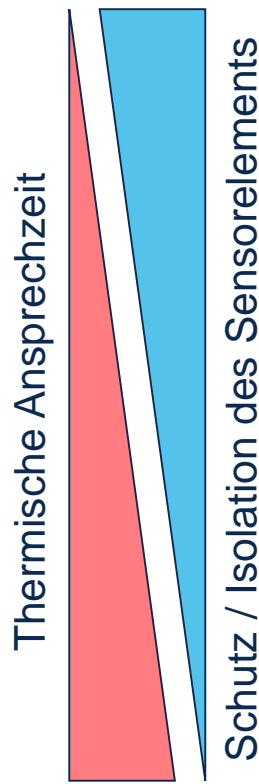
### Lösung III:

Hardwarekompensation mittels Eispunktreferenz-IC

$$\begin{aligned}
 U_C &= I_C R_C = -U_{IB}(0^\circ C) \\
 &= U_{Cu-A}(0^\circ C) - U_{B-Cu}(0^\circ C)
 \end{aligned}$$



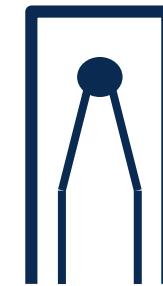
## Technische Ausführung



**geschlossene Bauform**



**Mantelthermoelement**

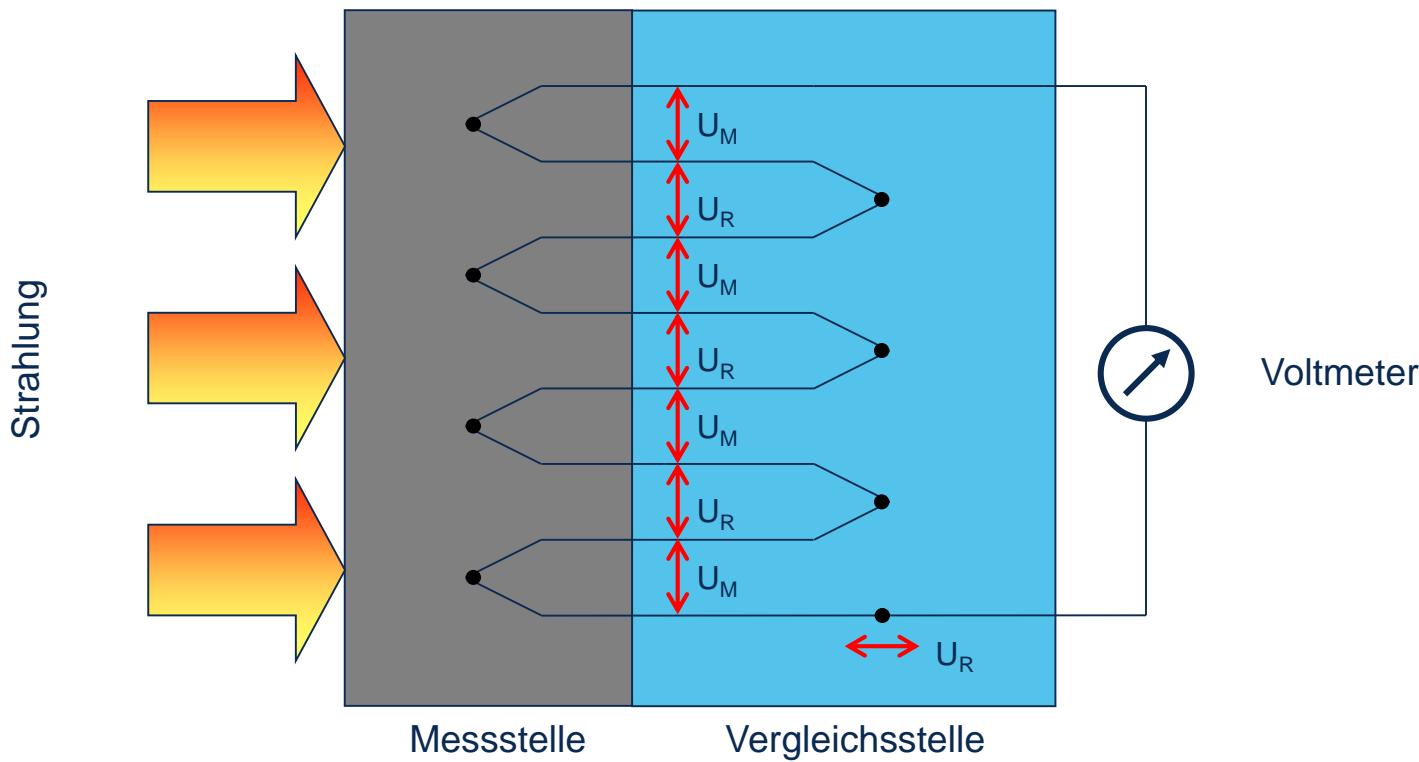


**offene Bauform**



# **Thermosäule (thermopile)**



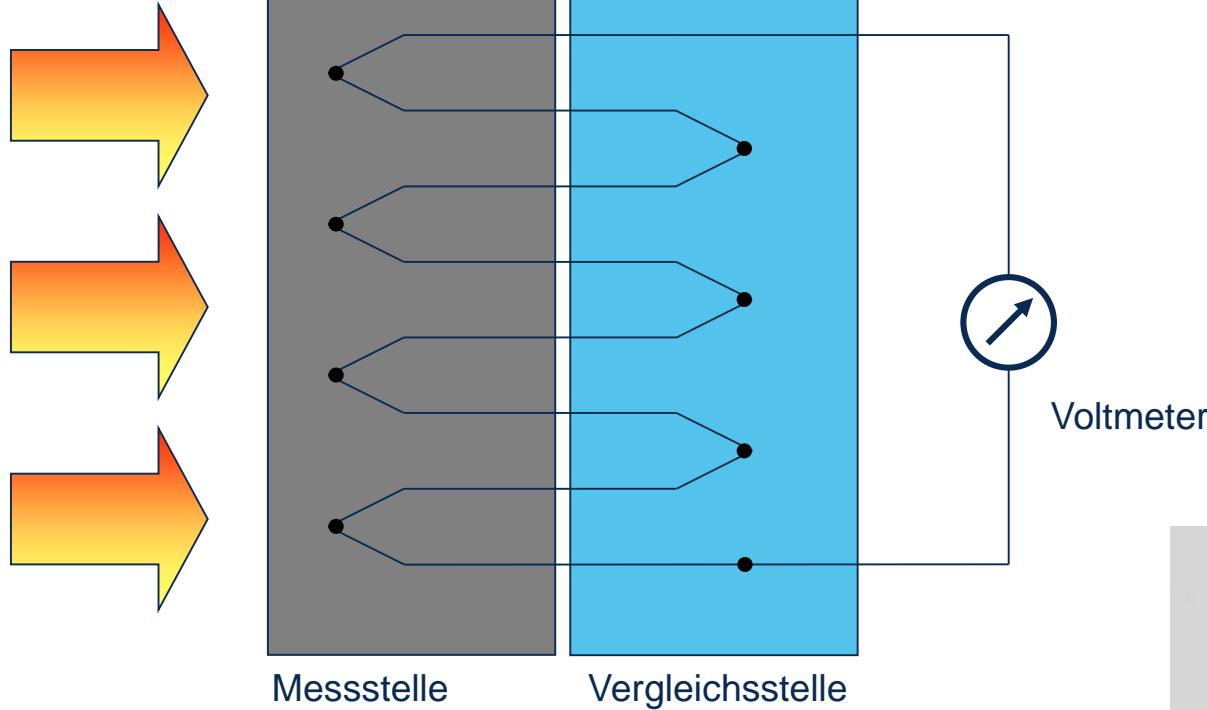


$$\begin{aligned}
 U_{sens} - U_{ref} &\approx U_M - U_R + U_M - U_R + \dots \\
 &= n(U_M - U_R) \\
 &= n\alpha\Delta T
 \end{aligned}$$

n - Anzahl der Thermopaare  
an der Messstelle



Strahlung



- Die Anzahl der Stufen  $n$  liegt bei etwa 10..100
- Die Ausgangsspannung beträgt bis zu mehreren 100 mV
- Neben der Messfunktion sind Thermosäulen Kandidaten für Energiewandler (Nutzung geringer thermischer Gradienten)



# Rauschthermometer



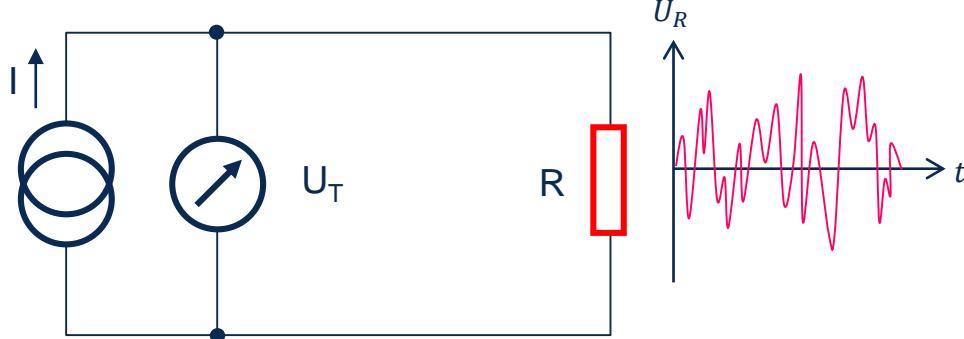
Aufgrund thermischer Dichteschwankungen der Ladungsträger schwankt die über einem Messwiderstand abfallende Spannung

Der thermisch bedingte Schwankungsanteil wird als Rauschspannung bezeichnet

$$U_R = \sqrt{4k_B T R \Delta f}$$

$$U_R = k\sqrt{T}$$

Beim Widerstandsrauschen handelt es sich um ein weißes Rauschen (konstante spektrale Leistungsdichte)



- |            |                       |
|------------|-----------------------|
| $U_R$      | - Rauschspannung      |
| $k_B$      | - Boltzmann-Konstante |
| $T$        | - Temperatur          |
| $R$        | - Widerstand          |
| $\Delta f$ | - Bandbreite          |

$$k_B = 1,3806505 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$$



## Normen für Elektrische Temperaturaufnehmer



Quelle: wikipedia

### **DIN 16 160**

Thermometer - Begriffe

### **DIN 43 735**

Auswechselbare Messeinsätze

### **DIN 43 764 – DIN 43 769**

Standardisierte Thermometer

### **DIN 43 772**

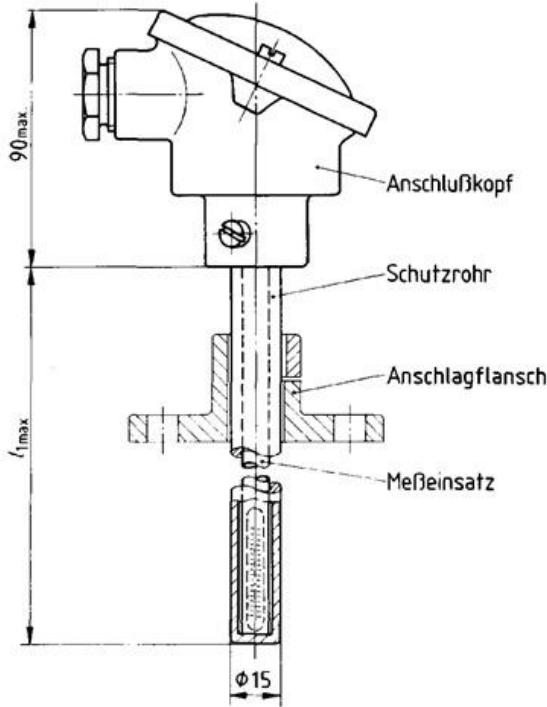
Schutzrohre

### **DIN 60 751**

Industrielle Platin-Widerstandsthermometer und  
Platin-Temperatursensoren

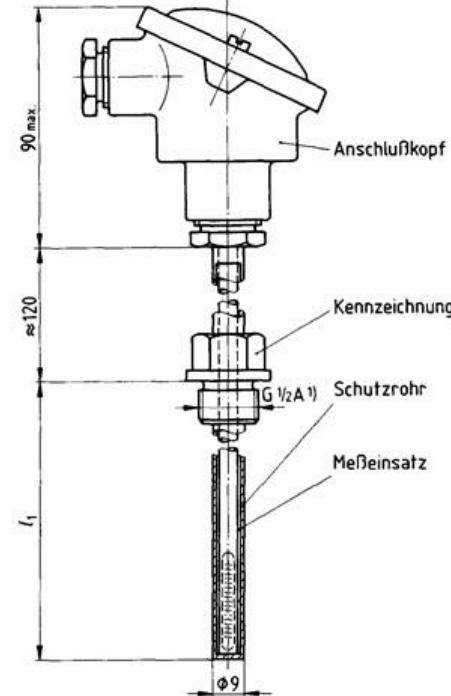


## Normen für Elektrische Temperaturaufnehmer



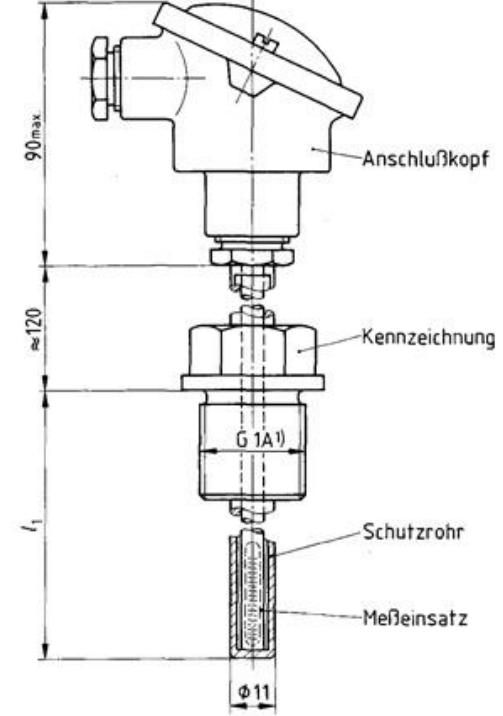
**DIN 43 764**

Thermometer ohne Befestigung mit auswechselbarem Messeinsatz



**DIN 43 765**

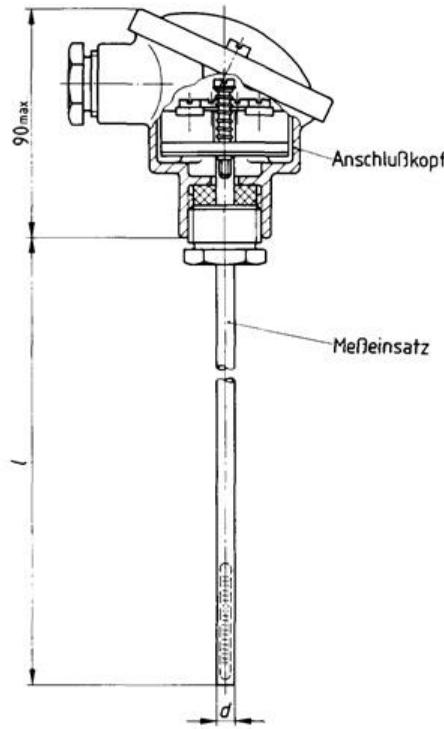
Einschraub-Thermometer mit Einschraubgewinde G 1/2



**DIN 43 767**

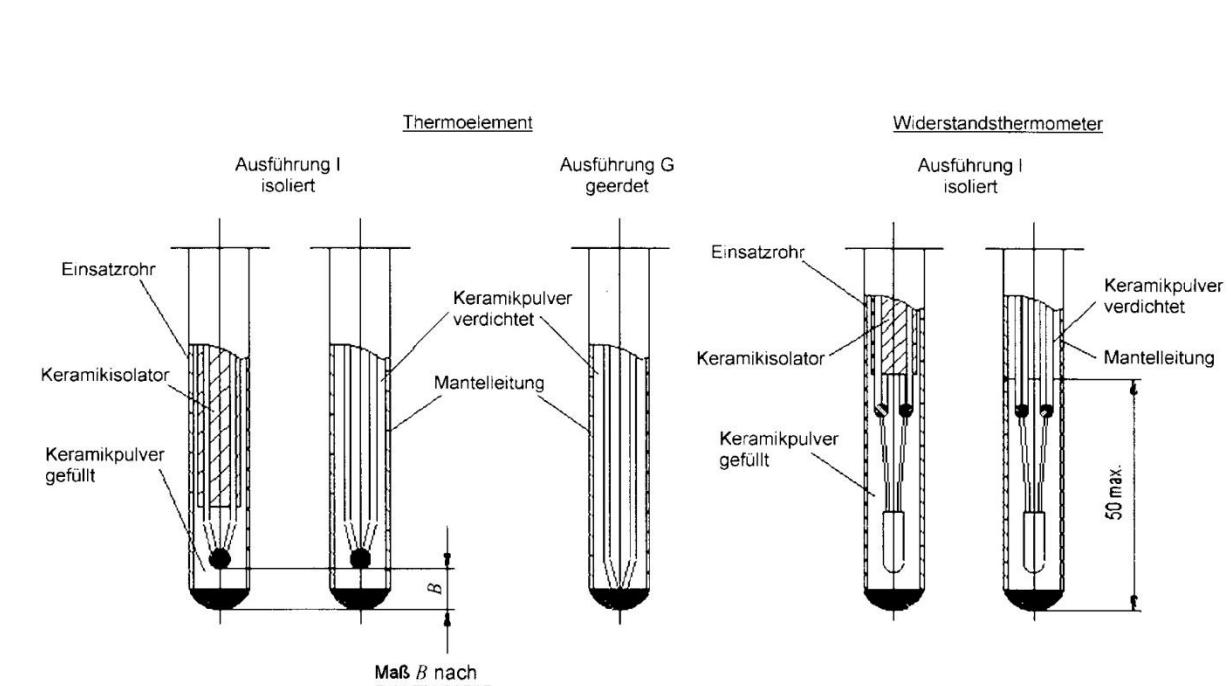
Einschweiß-Thermometer

## Normen für Elektrische Temperaturaufnehmer



**DIN 43 769**

Thermometer ohne zusätzliches Schutzrohr



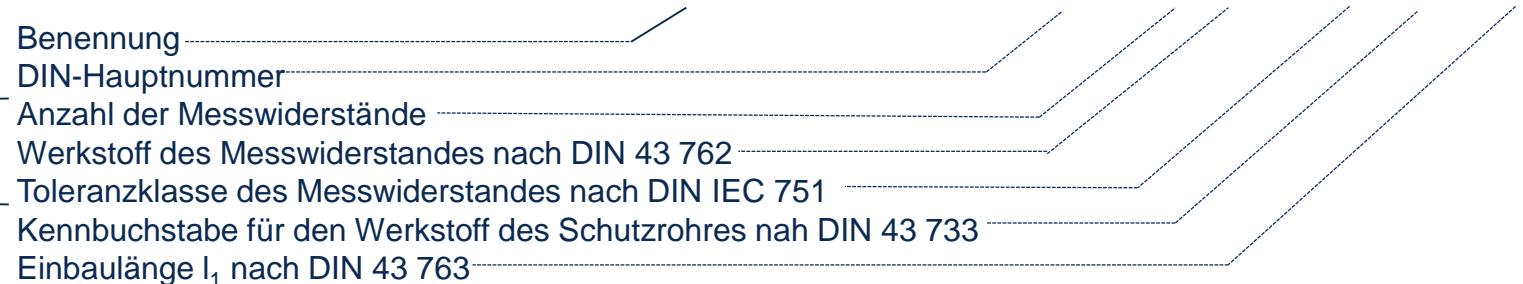
**DIN 43 735**

Auswechselbare Messeinsätze

## Bezeichnungen nach DIN (Beispiele aus DIN 43 765)

### Widerstandsthermometer DIN 43 765 – 1 Pt – B – H 400

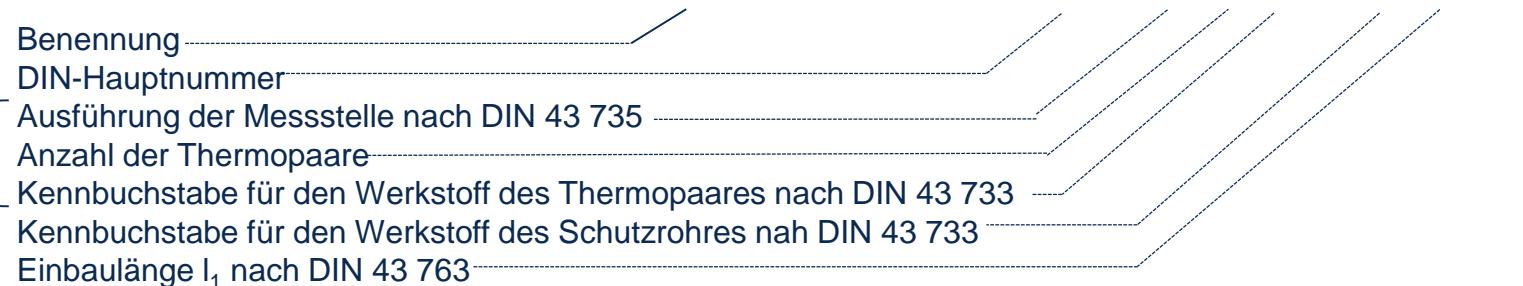
Messeinsatz



Benennung .....  
DIN-Hauptnummer .....  
Anzahl der Messwiderstände .....  
Werkstoff des Messwiderstandes nach DIN 43 762 .....  
Toleranzklasse des Messwiderstandes nach DIN IEC 751 .....  
Kennbuchstabe für den Werkstoff des Schutzrohres nah DIN 43 733 .....  
Einbaulänge  $l_1$  nach DIN 43 763 .....

### Thermoelement DIN 43 765 – A 2 K – N 250

Messeinsatz



Benennung .....  
DIN-Hauptnummer .....  
Ausführung der Messstelle nach DIN 43 735 .....  
Anzahl der Thermopaare .....  
Kennbuchstabe für den Werkstoff des Thermopaars nach DIN 43 733 .....  
Kennbuchstabe für den Werkstoff des Schutzrohres nah DIN 43 733 .....  
Einbaulänge  $l_1$  nach DIN 43 763 .....