Karlsruher Institut für Technologie

# Übung 3

# Thermoelemente

## A1: Thermoelement

Die von T.J.Seebeck im Jahre 1822 entdeckte Thermospannung wird heute noch im Rahmen von hochpräzisen Temperaturmessungen eingesetzt. Im Folgenden soll deshalb beispielhaft die Konzeption einer Temperaturmessung mit einem Thermoelementpaar für den Einsatz in einem Sinterofen entwickelt werden.

1. a) In einem Experiment (*Bild 1*) soll zunächst der Seebeck-Koeffizient $\eta_B$ von Leiter B bestimmt werden, der später in einem Thermoelement verbaut werden soll. Das eine Ende des Leiters B wird dazu auf $T_2$=420 °C erwärmt, während das andere Ende bei einer konstanten Temperatur von $T_1$=20°C gehalten wird. Eine Spannung $|U_{Th}|$ = 6mV wird gemessen. Aus welchem Material besteht Leiter B?
*Hinweis: Tabelle 1 zeigt die Seebeck-Koeffizienten für verschieden Materialien.*

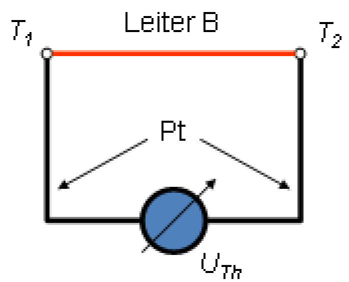
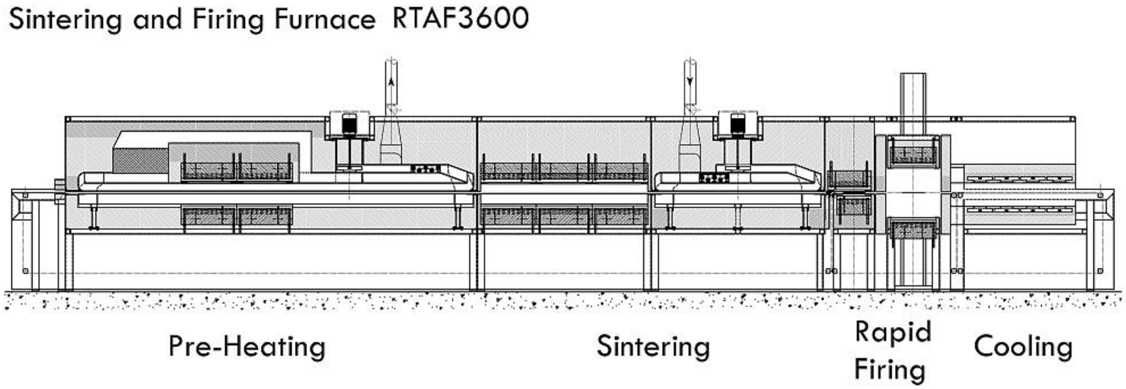



*Bild 1: Messung der Thermospannung eines Leiters.*

*Tabelle 1: Thermokraft (Seebeck-Koeffizient η) verschiedener Materialien*

| Material | Konstantan | Ni | Pt | PtRh | Cu | Fe | NiCr |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| η / (µV/K) | - 35,0 | - 15,0 | 0 | 6,9 | 7,8 | 19,2 | 25,4 |

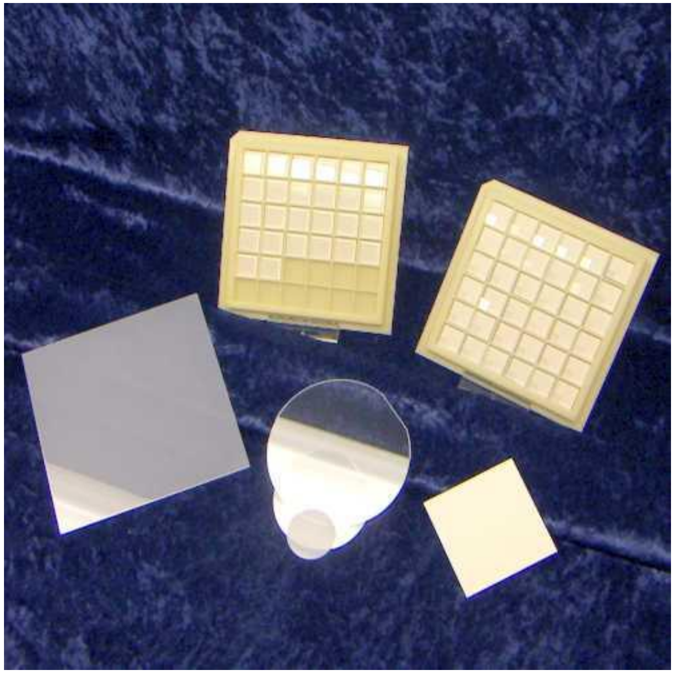
# Passive Bauelemente Wintersemester 2014
# Übung 3




[1]

[2]

[3]



Karlsruher Institut für Technologie

## A1: Thermoelement

Die von T.J.Seebeck im Jahre 1822 entdeckte Thermospannung wird heute noch im Rahmen von hochpräzisen Temperaturmessungen eingesetzt. Im Folgenden soll deshalb beispielhaft die Konzeption einer Temperaturmessung mit einem Thermoelementpaar für den Einsatz in einem Sinterofen entwickelt werden.

1. a) In einem Experiment (*Bild 1*) soll zunächst der Seebeck-Koeffizient $\eta_B$ von Leiter B bestimmt werden, der später in einem Thermoelement verbaut werden soll. Das eine Ende des Leiters B wird dazu auf $T_2$=420 °C erwärmt, während das andere Ende bei einer konstanten Temperatur von $T_1$=20°C gehalten wird. Eine Spannung $|U_{Th}| = 6$mV wird gemessen. Aus welchem Material besteht Leiter B?
*Hinweis: Tabelle 1 zeigt die Seebeck-Koeffizienten für verschieden Materialien.*

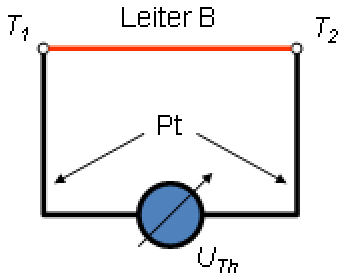


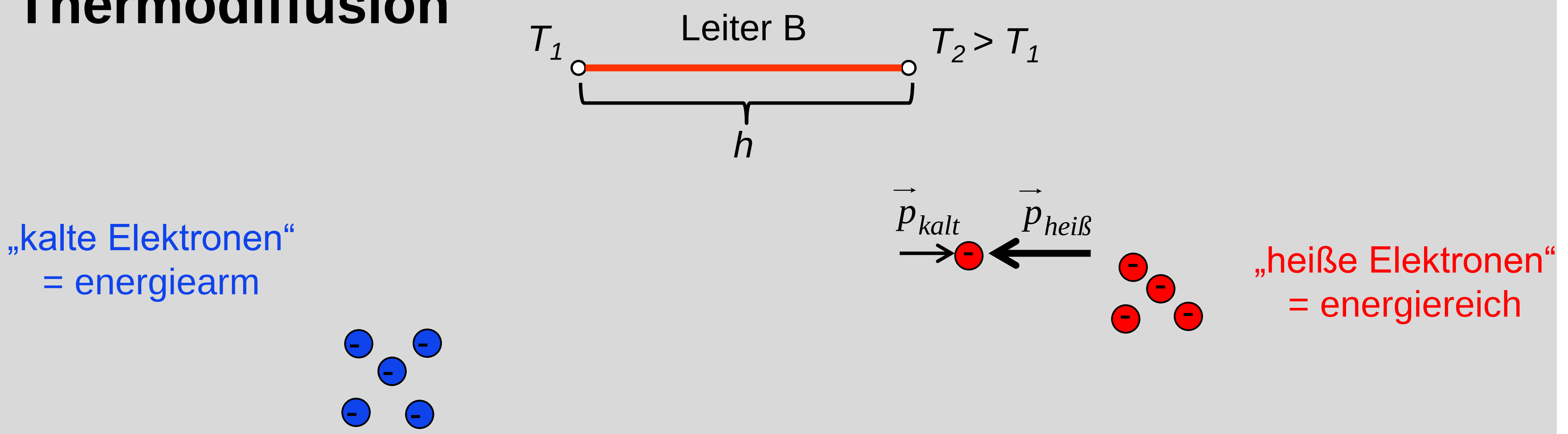

*Bild 1: Messung der Thermospannung eines Leiters.*

*Tabelle 1: Thermokraft (Seebeck-Koeffizient η) verschiedener Materialien*

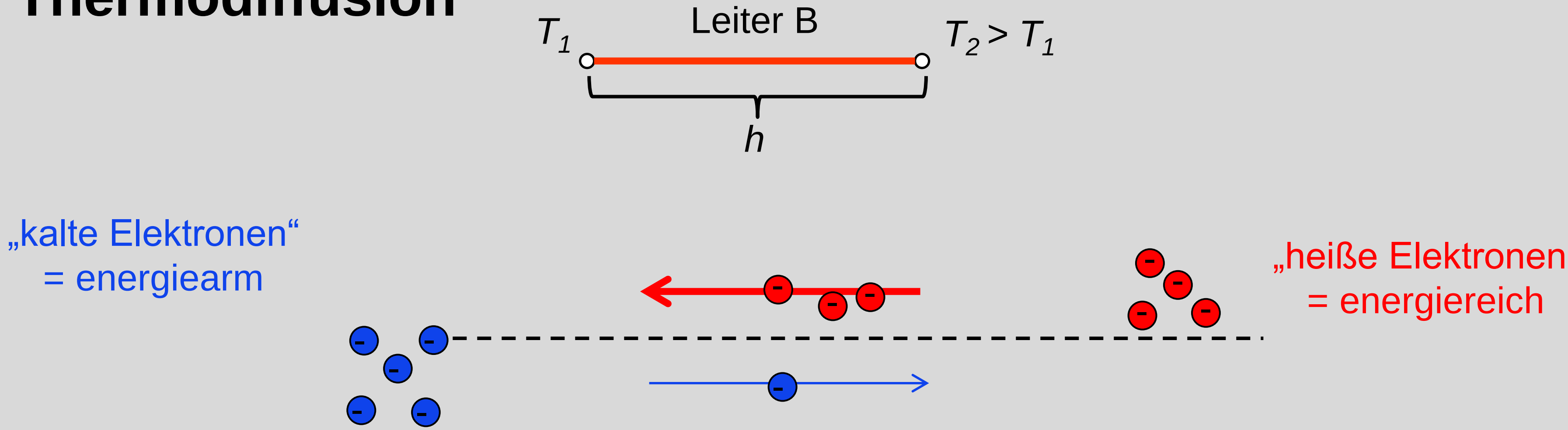
| Material | Konstantan | Ni | Pt | PtRh | Cu | Fe | NiCr |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| η / (µV/K) | - 35,0 | - 15,0 | 0 | 6,9 | 7,8 | 19,2 | 25,4 |

Karlsruher Institut für Technologie

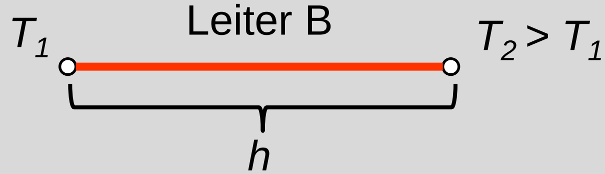
# Thermodiffusion



# Thermodiffusion

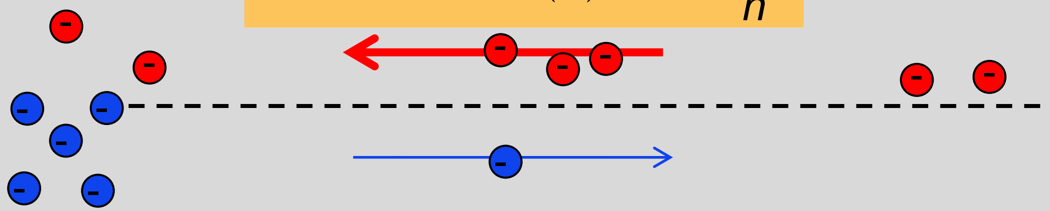


# Thermodiffusion



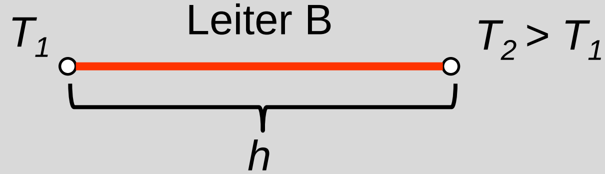

$$J_{\mathrm{Diff}} = D_T \cdot \nabla T(x) \approx D_T \cdot \frac{\Delta T}{h}$$

„kalte Elektronen“
= energiearm



„heiße Elektronen“
= energiereich

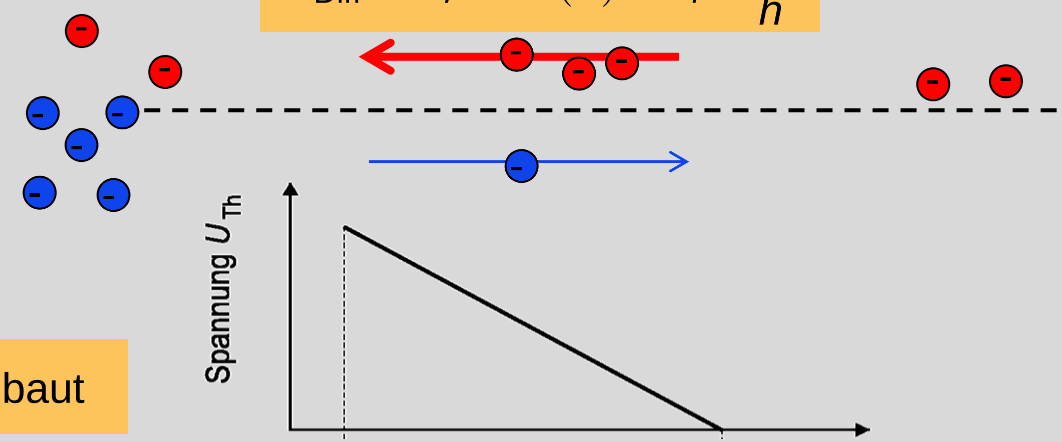
# Thermodiffusion




$$J_{\text{Diff}} = D_T \cdot \nabla T\left(x\right) \approx D_T \cdot \frac{\Delta T}{h}$$

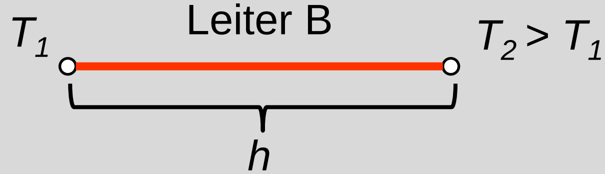
„kalte Elektronen“
= energiearm

„heiße Elektronen“
= energiereich




E-Feld wird aufgebaut

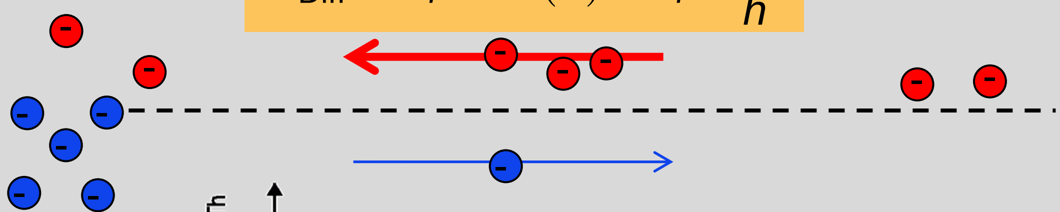
# Thermodiffusion

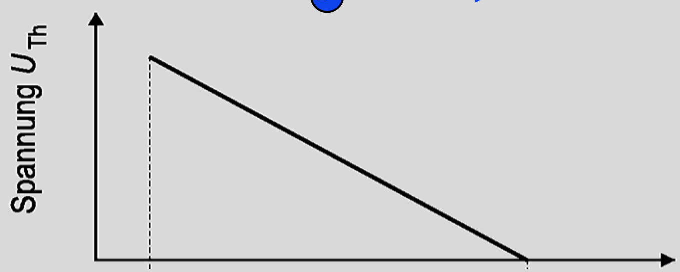



$$J_{\mathrm{Diff}} = D_T \cdot \nabla T(x) \approx D_T \cdot \frac{\Delta T}{h}$$

„kalte Elektronen“
= energiearm

„heiße Elektronen“
= energiereich

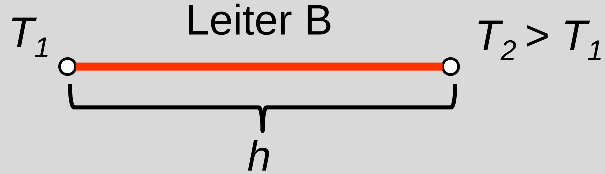





E-Feld wird aufgebaut

$$E = \frac{U}{d} \longrightarrow J_{\mathrm{Drift}} = -\sigma_{el} \cdot \nabla \Phi(x) \approx -\sigma_{el} \cdot \frac{U_{Th}}{h}$$

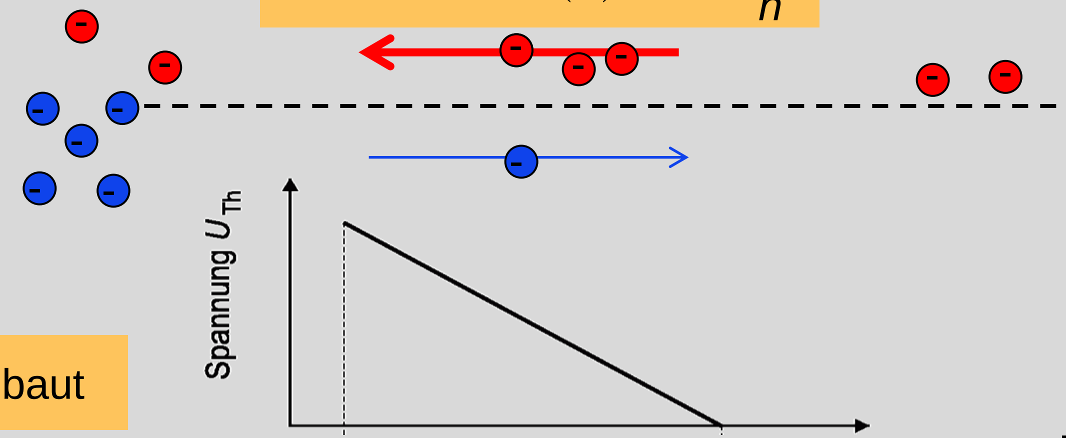
# Thermodiffusion




$$J_{\text{Diff}} = D_T \cdot \nabla T(x) \approx D_T \cdot \frac{\Delta T}{h}$$

„kalte Elektronen“
= energiearm

„heiße Elektronen“
= energiereich




E-Feld wird aufgebaut

$$E = \frac{U}{d} \longrightarrow J_{\text{Drift}} = -\sigma_{el} \cdot \nabla \Phi(x) \approx -\sigma_{el} \cdot \frac{U_{Th}}{h}$$

**Im GG:**

$U_{\text{Thermospannung}}$ baut sich auf!

Leiter B

$T_1$ $T_2 > T_1$

$\underbrace{\hspace{4cm}}_{h}$

$$J_{\mathrm{Diff}} = D_T \cdot \nabla T(x) \approx D_T \cdot \frac{\Delta T}{h}$$

**Im Gleichgewichtsfall ist**

$$J_{\mathrm{Diff}} + J_{\mathrm{Drift}} = 0$$

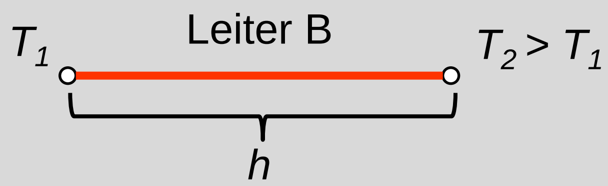
*„Es fließt genau so viel hin, wie zurück."*

**Im GG:**

$$J_{\mathrm{Drift}} = -\sigma_{el} \cdot \nabla\Phi(x) \approx -\sigma_{el} \cdot \frac{U_{Th}}{h}$$

$U_{\mathrm{Thermospannung}}$ baut sich auf!

Karlsruher Institut für Technologie




$$J_{\mathrm{Diff}} = D_T \cdot \nabla T(x) \approx D_T \cdot \frac{\Delta T}{h}$$

**Im Gleichgewichtsfall ist**

$$J_{\mathrm{Diff}} + J_{\mathrm{Drift}} = 0$$

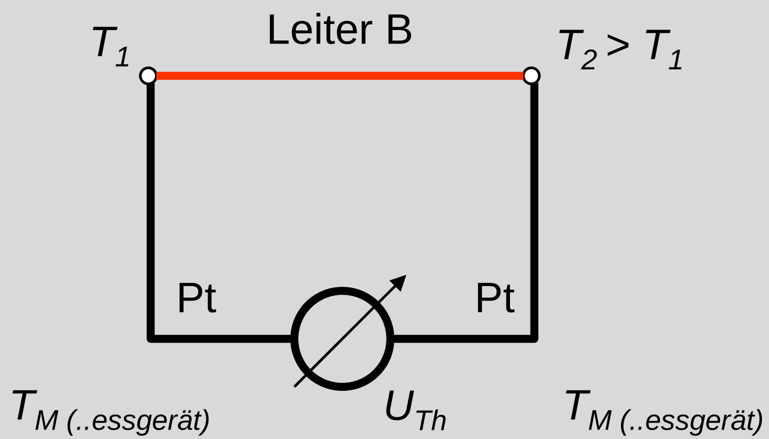
$$\rightarrow U_{Th} = \frac{D_T}{\sigma_{el}} \cdot \Delta T = \eta \cdot \Delta T$$

$D_T$: Thermodiffusionskoeffizient
$\eta$: Seebeck-Koeffizient

$$J_{\mathrm{Drift}} = -\sigma_{el} \cdot \nabla \Phi(x) \approx -\sigma_{el} \cdot \frac{U_{Th}}{h}$$

**Im GG:**

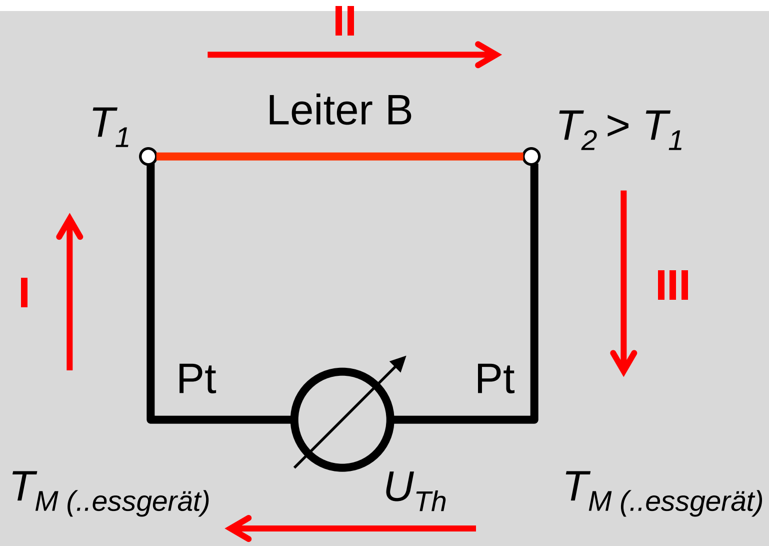
$U_{\mathrm{Thermospannung}}$ baut sich auf!




*„Wie ist das dann mit einem Messgerät?“*

$$U_{Th} = \eta \cdot \Delta T$$

Karlsruher Institut für Technologie

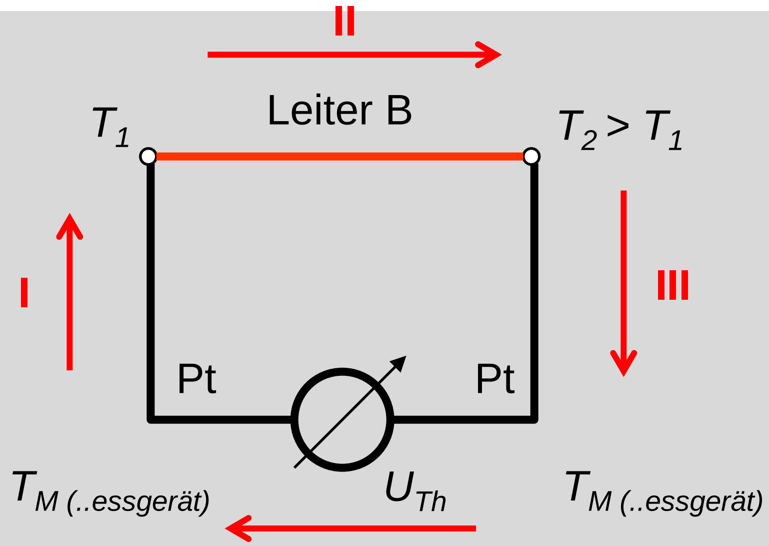



*„Wie ist das dann mit einem Messgerät?"*

$$U_{Th} = \eta \cdot \Delta T$$

$\rightarrow U_{Th} +$

Karlsruher Institut für Technologie



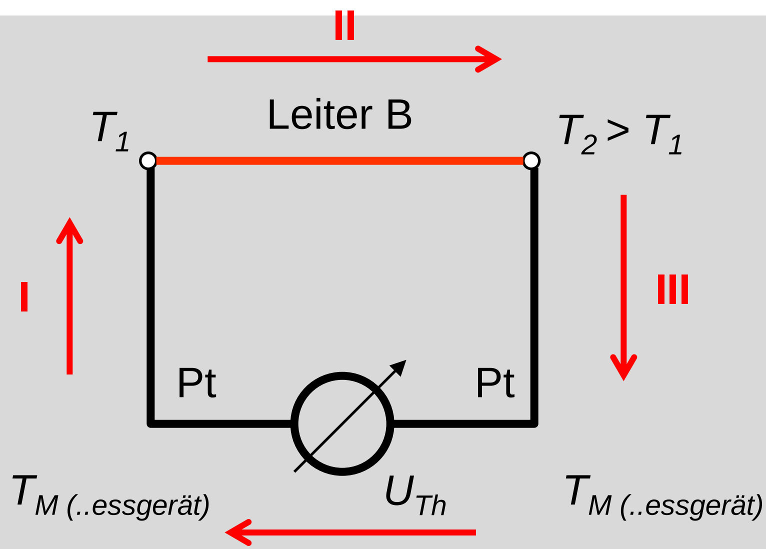

*„Wie ist das dann mit einem Messgerät?“*

$$U_{Th} = \eta \cdot \Delta T$$

$$\rightarrow U_{Th} + \eta_{Pt} \cdot (T_1 - T_M)$$

I

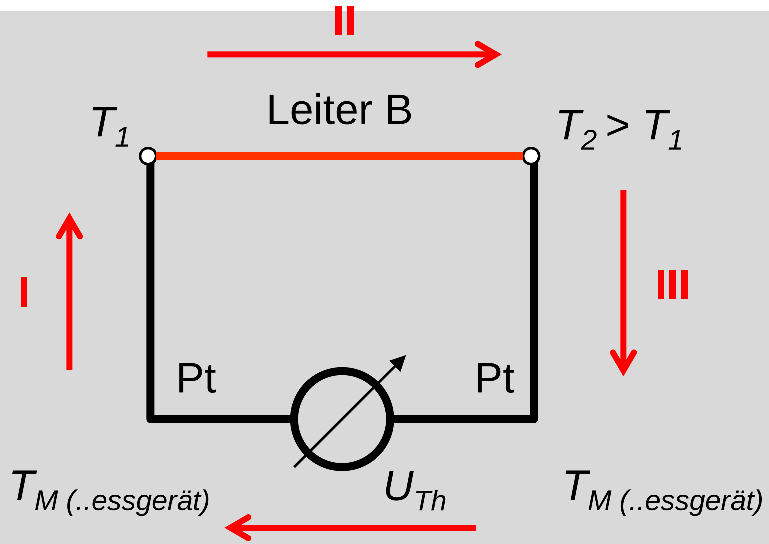
# Passive Bauelemente Wintersemester 2014
# Übung 3




*„Wie ist das dann mit einem Messgerät?“*

$$U_{Th} = \eta \cdot \Delta T$$

$$\rightarrow U_{Th} + \underbrace{\eta_{Pt} \cdot (T_1 - T_M)}_{\mathrm{I}} + \underbrace{\eta_B \cdot (T_2 - T_1)}_{\mathrm{II}} \cdot$$

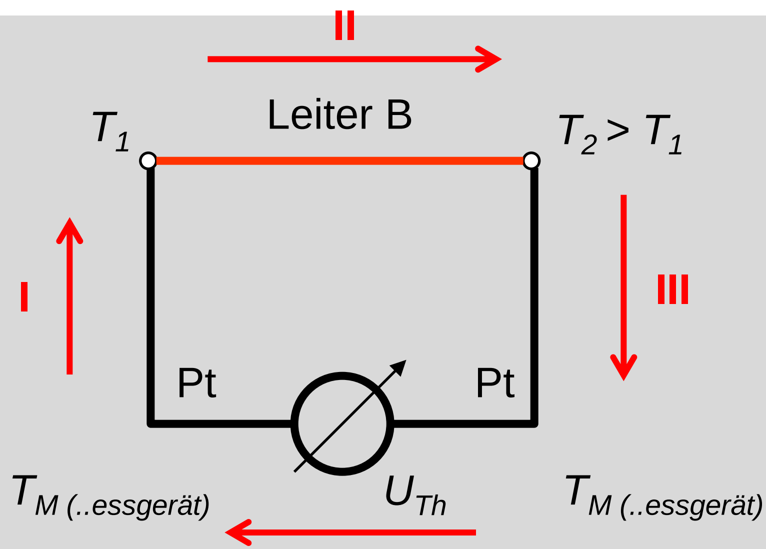



*„Wie ist das dann mit einem Messgerät?“*

$$U_{Th} = \eta \cdot \Delta T$$

$$\rightarrow U_{Th} + \underbrace{\eta_{Pt} \cdot (T_1 - T_M)}_{\text{I}} + \underbrace{\eta_B \cdot (T_2 - T_1)}_{\text{II}} + \underbrace{\eta_{Pt} \cdot (T_M - T_2)}_{\text{III}} = 0$$

# Passive Bauelemente Wintersemester 2014
# Übung 3



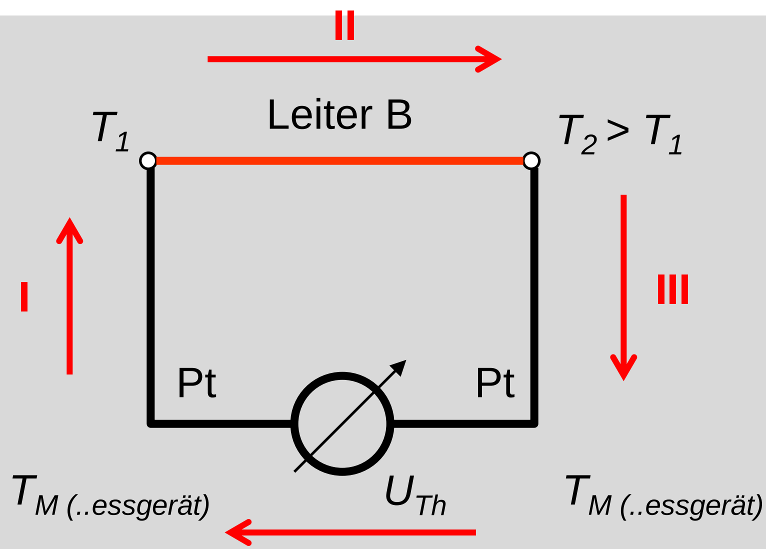

*„Wie ist das dann mit einem Messgerät?“*

$$U_{Th} = \eta \cdot \Delta T$$

$$\rightarrow U_{Th} + \eta_{Pt} \cdot (T_1 - T_M) + \eta_B \cdot (T_2 - T_1) + \eta_{Pt} \cdot (T_M - T_2) = 0$$

$$T_1 = T_{Messgerät}$$

# Passive Bauelemente Wintersemester 2014
# Übung 3




*„Wie ist das dann mit einem Messgerät?“*

$$U_{Th} = \eta \cdot \Delta T$$

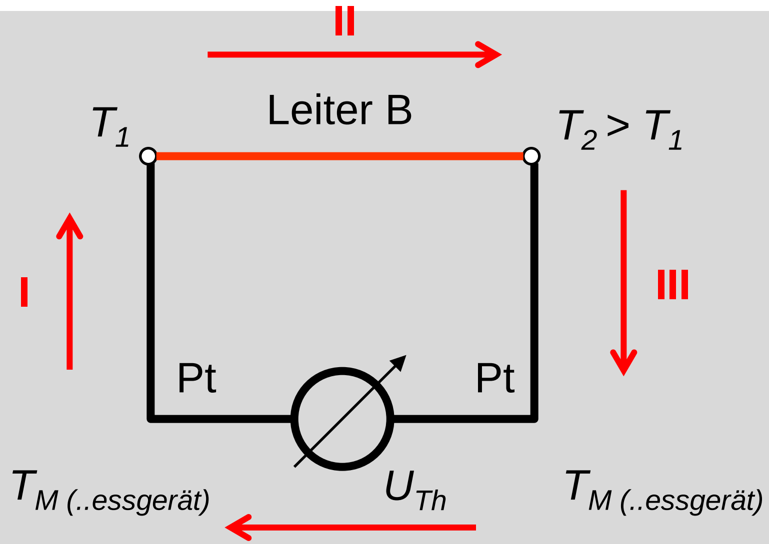
$$\rightarrow U_{Th} + \eta_{Pt} \cdot (T_1 - T_M) + \eta_B \cdot (T_2 - T_1) + \eta_{Pt} \cdot (T_M - T_2) = 0$$

$$T_1 = T_{Messgerät}$$

$$\rightarrow U_{Th} + \eta_{Pt} \cdot (T_1 - T_1) + \eta_B \cdot (T_2 - T_1) - \eta_{Pt} \cdot (T_2 - T_1) = 0$$

# Passive Bauelemente Wintersemester 2014
# Übung 3

Karlsruher Institut für Technologie



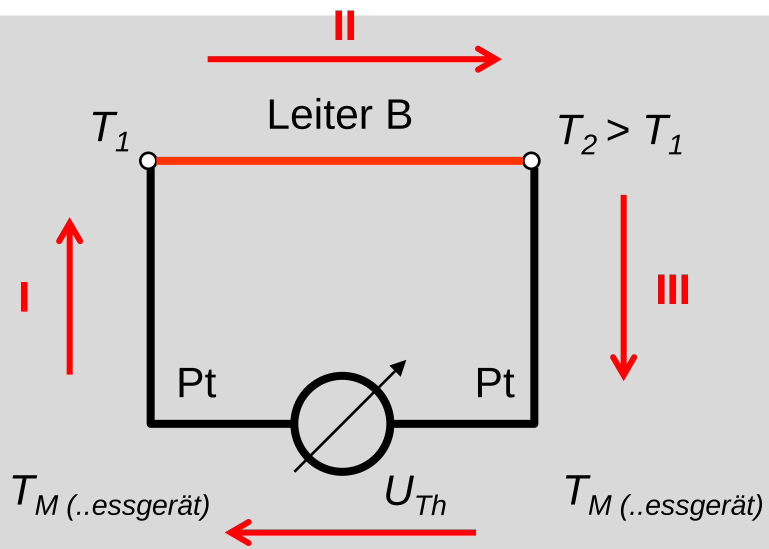

*„Wie ist das dann mit einem Messgerät?“*

$$U_{Th} = \eta \cdot \Delta T$$

$$\rightarrow U_{Th} + \eta_{Pt} \cdot (T_1 - T_M) + \eta_B \cdot (T_2 - T_1) + \eta_{Pt} \cdot (T_M - T_2) = 0$$

$$T_1 = T_{Messgerät}$$

$$\rightarrow U_{Th} + \eta_{Pt} \cdot (\cancel{T_1 - T_1}) + \eta_B \cdot \underline{(T_2 - T_1)} - \eta_{Pt} \cdot \underline{(T_2 - T_1)} = 0$$




*„Wie ist das dann mit einem Messgerät?“*

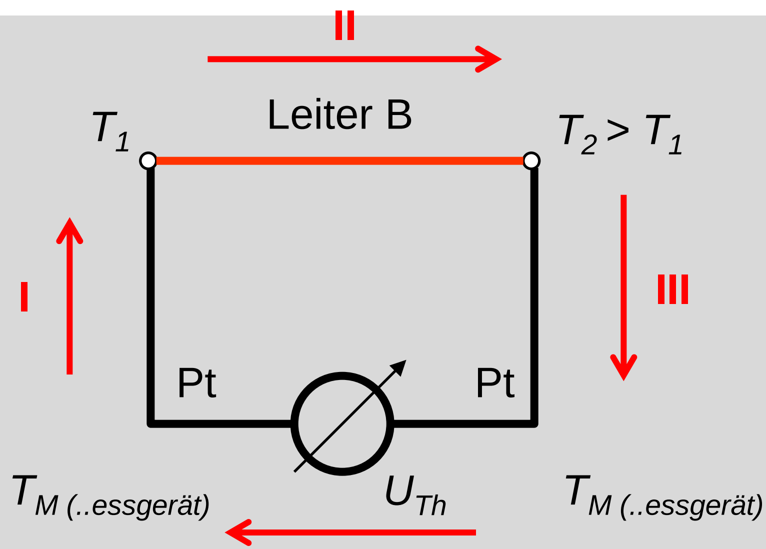
$$U_{Th} = \eta \cdot \Delta T$$

$$\rightarrow U_{Th} + \eta_{Pt} \cdot (T_1 - T_M) + \eta_B \cdot (T_2 - T_1) + \eta_{Pt} \cdot (T_M - T_2) = 0$$

$$T_1 = T_{Messgerät}$$

$$\rightarrow U_{Th} + \eta_{Pt} \cdot (T_1 - T_1) + \eta_B \cdot (T_2 - T_1) - \eta_{Pt} \cdot (T_2 - T_1) = 0$$

$$\rightarrow -U_{Th} = (\eta_B - \eta_{Pt}) \cdot (T_2 - T_1)$$




*„Wie ist das dann mit einem Messgerät?“*

$$U_{Th} = \eta \cdot \Delta T$$

$$\rightarrow U_{Th} + \eta_{Pt} \cdot (T_1 - T_M) + \eta_B \cdot (T_2 - T_1) + \eta_{Pt} \cdot (T_M - T_2) = 0$$

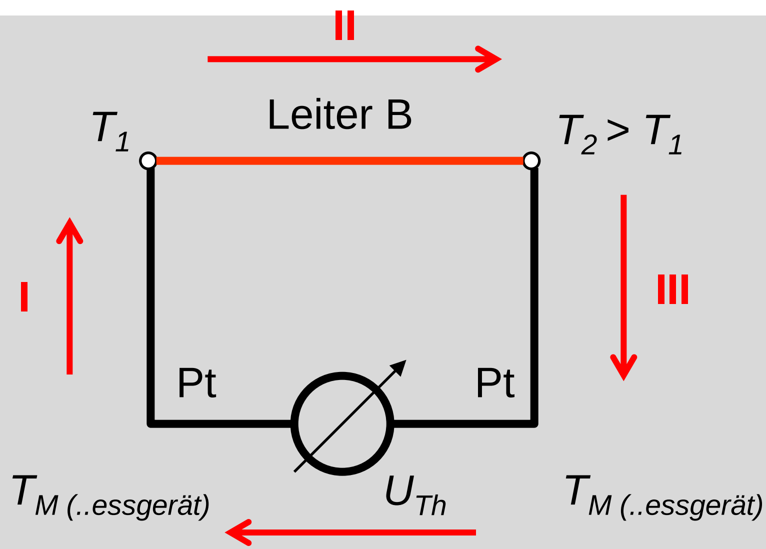
$$T_1 = T_{Messgerät}$$

$$\rightarrow U_{Th} + \eta_{Pt} \cdot (T_1 - T_1) + \eta_B \cdot (T_2 - T_1) - \eta_{Pt} \cdot (T_2 - T_1) = 0$$

$$\rightarrow -U_{Th} = (\eta_B - \eta_{Pt}) \cdot (T_2 - T_1)$$

$$\rightarrow U_{Th} = (\eta_{Pt} - \eta_B) \cdot \Delta T$$

Karlsruher Institut für Technologie




*„Wie ist das dann mit einem Messgerät?“*

$$U_{Th} = \eta \cdot \Delta T$$

*Tabelle 1: Thermokraft (Seebeck-Koeffizient η) verschiedener Materialien*

| Material | Konstantan | Ni | Pt | PtRh | Cu | Fe | NiCr |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| η / (µV/K) | - 35,0 | - 15,0 | 0 | 6,9 | 7,8 | 19,2 | 25,4 |

*„Platin wird als Referenzmaterial verwendet!“*

$$\rightarrow U_{Th} = (\eta_{Pt} - \eta_B) \cdot \Delta T$$

$$U_{Th} = (\eta_{Pt} - \eta_B) \cdot \Delta T$$

---

Gesuchte Größe:

$\eta_B$

Formel umstellen:

$$\rightarrow \eta_B = -\frac{U_{Th}}{\Delta T} + \eta_{Pt}$$

Karlsruher Institut für Technologie

$$U_{Th} = (\eta_{Pt} - \eta_B) \cdot \Delta T$$

---

Gesuchte Größe:

$$\eta_B$$

Formel umstellen:

$$\boxed{\rightarrow \eta_B = -\frac{U_{Th}}{\Delta T} + \eta_{Pt}}$$

Gegebene Größen:

$$U_{Th} = 6mV \quad \Delta T = (T_2 - T_1) = 420°C - 20°C \quad \rightarrow \Delta T = 400K \quad \eta_{Pt} = 0\frac{\mu V}{K}$$

Karlsruher Institut für Technologie

$$U_{Th} = (\eta_{Pt} - \eta_B) \cdot \Delta T$$

---

Gesuchte Größe:

$\eta_B$

Formel umstellen:

$$\rightarrow \eta_B = -\frac{U_{Th}}{\Delta T} + \eta_{Pt}$$

Gegebene Größen:

$U_{Th} = 6mV \quad \Delta T = (T_2 - T_1) = 420°C - 20°C \quad \rightarrow \Delta T = 400K \quad \eta_{Pt} = 0\frac{\mu V}{K}$

In Formel einsetzen und berechnen:

$$\eta_B = -\frac{6mV}{(400K)} + 0\frac{\mu V}{K} = -15\frac{\mu V}{K}$$

# Passive Bauelemente Wintersemester 2014
# Übung 3

$$U_{Th} = (\eta_{Pt} - \eta_B) \cdot \Delta T$$

---

Gesuchte Größe:

$$\eta_B$$

Formel umstellen:

$$\rightarrow \eta_B = -\frac{U_{Th}}{\Delta T} + \eta_{Pt}$$

Gegebene Größen:

$$U_{Th} = 6mV \quad \Delta T = (T_2 - T_1) = 420°C - 20°C \quad \rightarrow \Delta T = 400K \quad \eta_{Pt} = 0\frac{\mu V}{K}$$

In Formel einsetzen und berechnen:

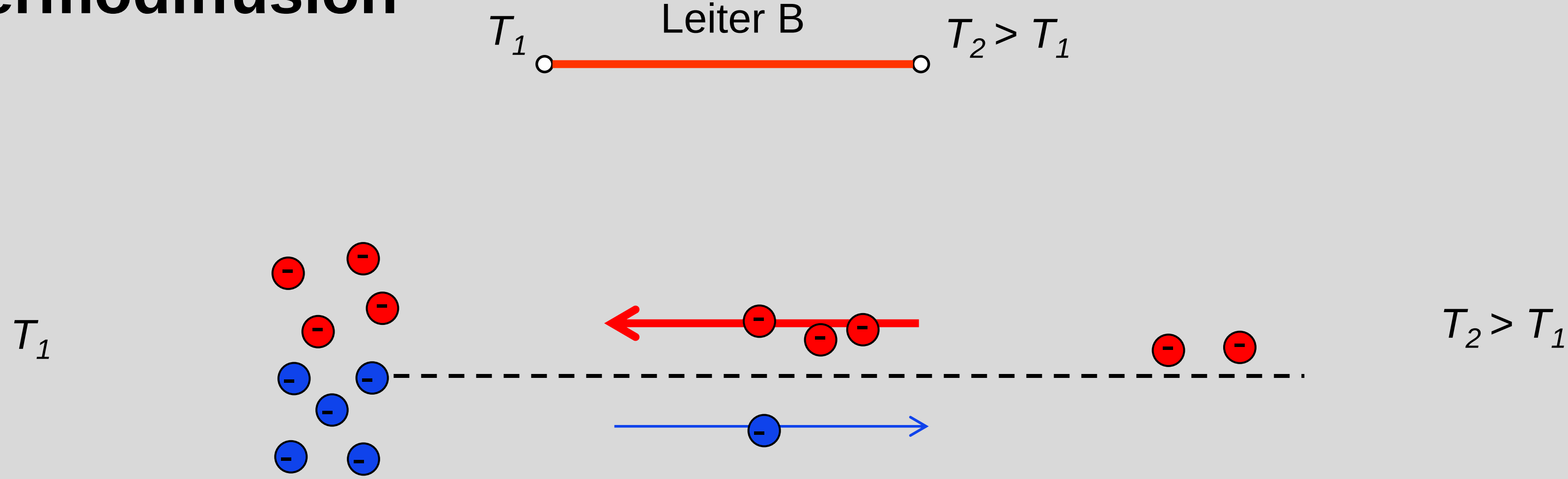
$$\eta_B = -\frac{6mV}{(400K)} + 0\frac{\mu V}{K} = -15\frac{\mu V}{K}$$

*Tabelle 1: Thermokraft (Seebeck-Koeffizient η) verschiedener Materialien*

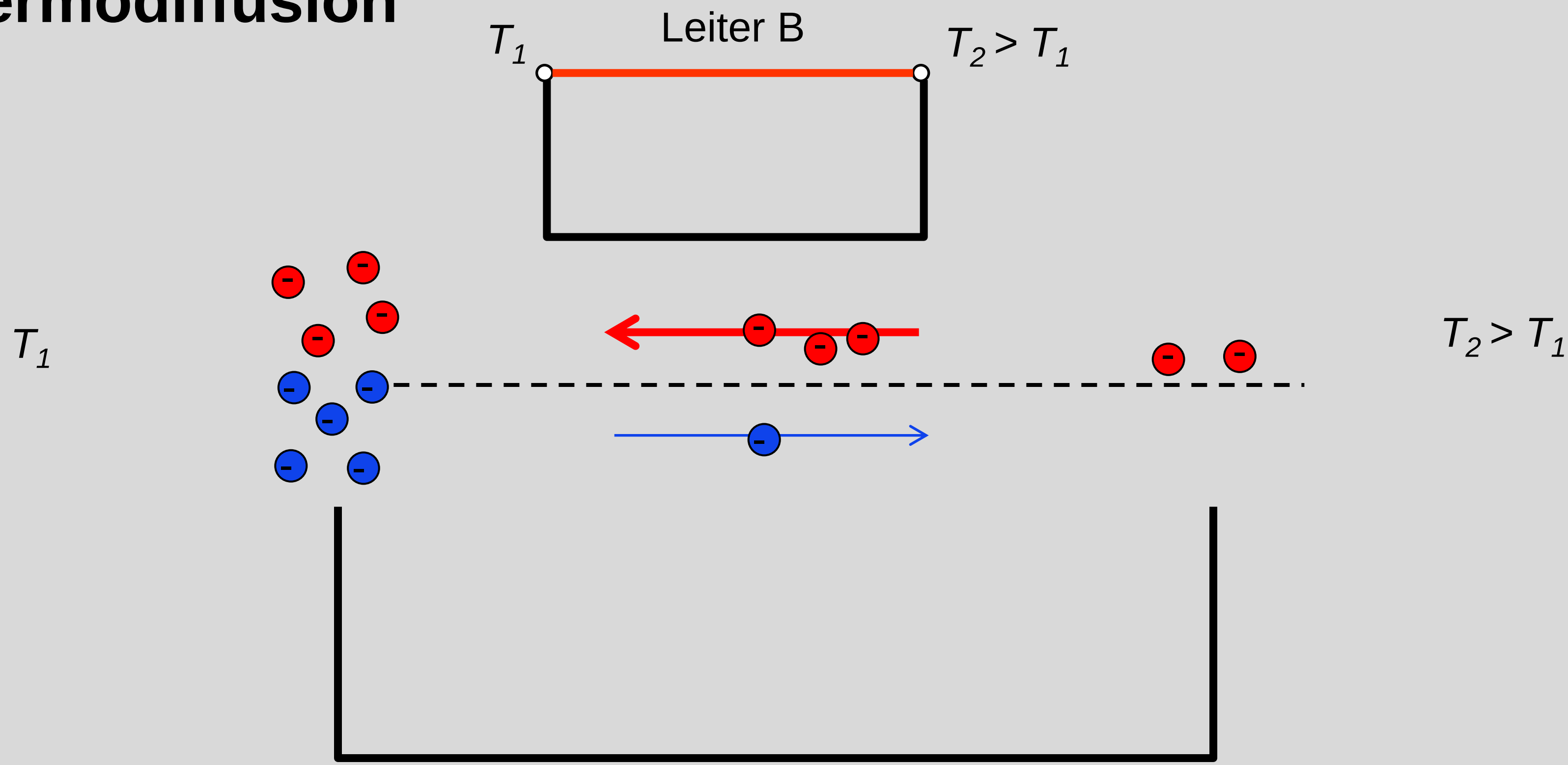
| Material | Konstantan | Ni | Pt | PtRh | Cu |
|---|---|---|---|---|---|
| η / (µV/K) | - 35,0 | - 15,0 | 0 | 6,9 | 7,8 |

b) Machen Sie sich klar, welcher Mechanismus für die Entstehung der Thermospannung verantwortlich ist und erklären Sie damit in welche Richtung ein Strom fließen würde, wenn man das Spannungsmessgerät in *Bild 1* kurzschließen würde.

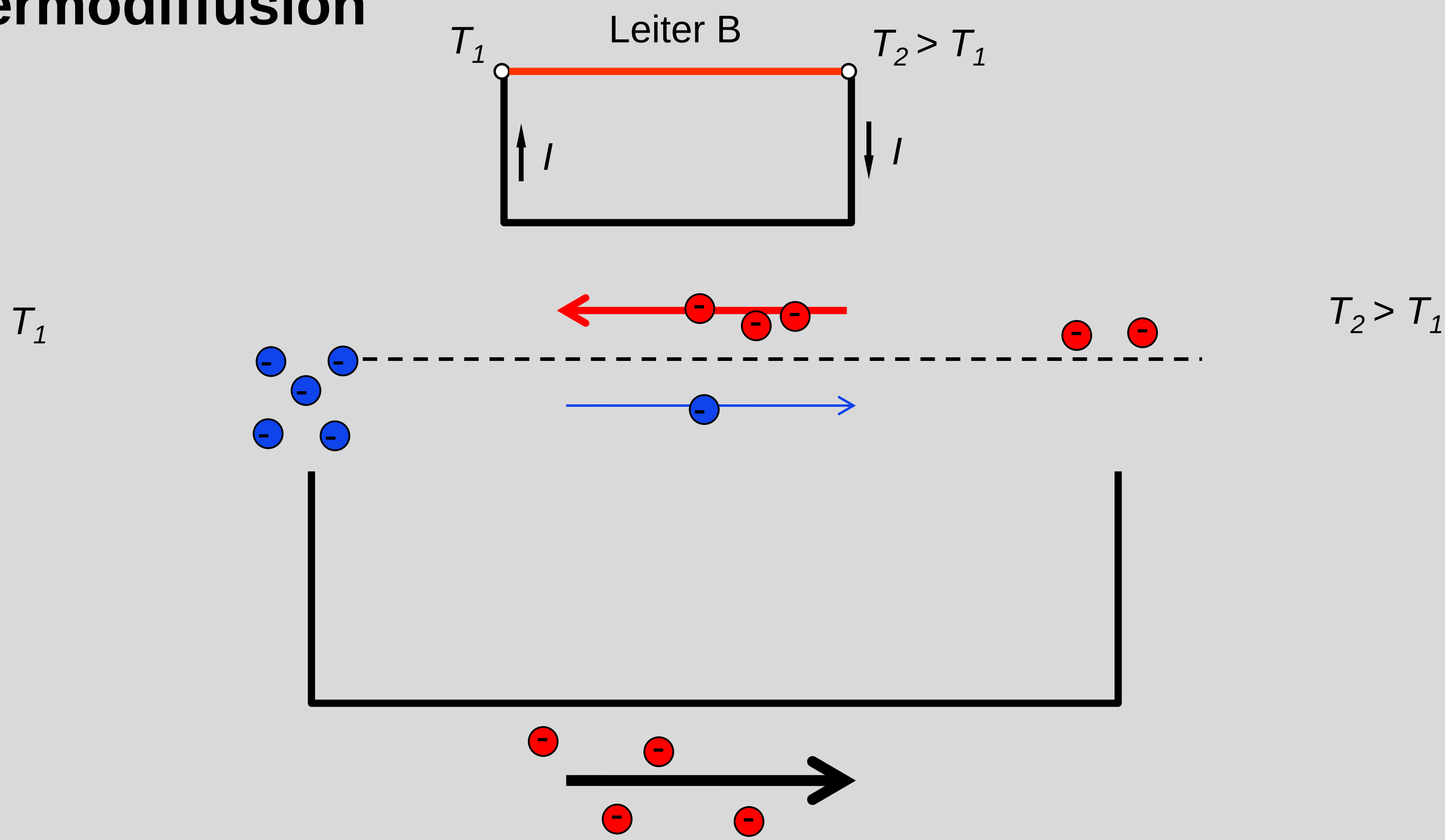
# Thermodiffusion



# Thermodiffusion



# Thermodiffusion



c) Leiter B sei für die folgenden Teilaufgaben aus Nickel. Betrachten Sie das in *Bild 2* skizzierte Thermoelementpaar. Welches Material würden Sie für Leiter A aus *Tabelle 1* auswählen, um eine möglichst empfindliche Temperaturmessung zu gewährleisten?

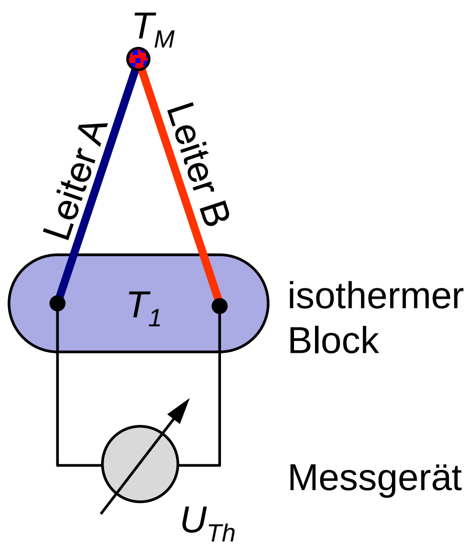



*Bild 2*

„Was hat das Thermoelement mit der Anordnung zu tun, die wir zuvor untersucht haben?“

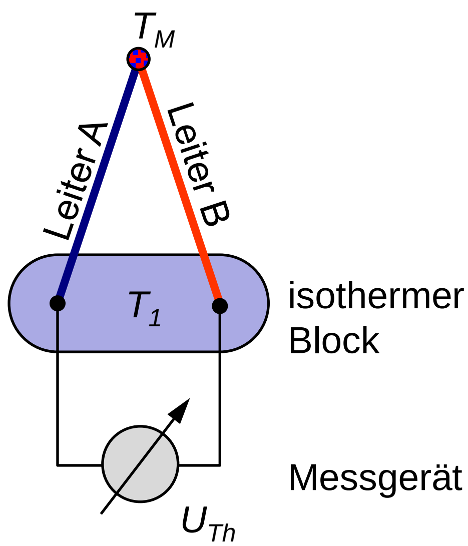
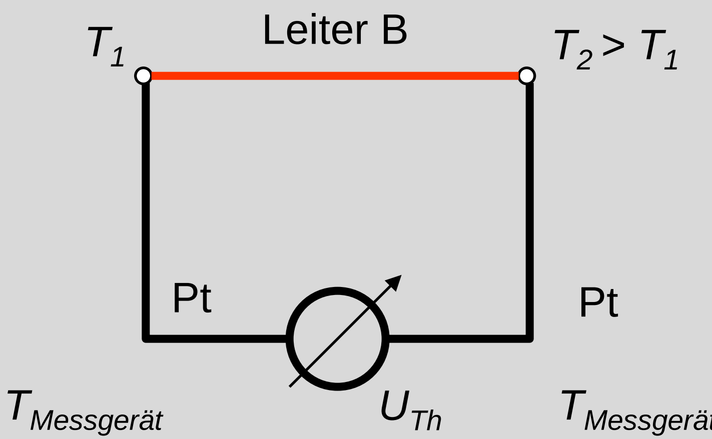



*Bild 2*



Karlsruher Institut für Technologie

„Was hat das Thermoelement mit der Anordnung zu tun, die wir zuvor untersucht haben?"

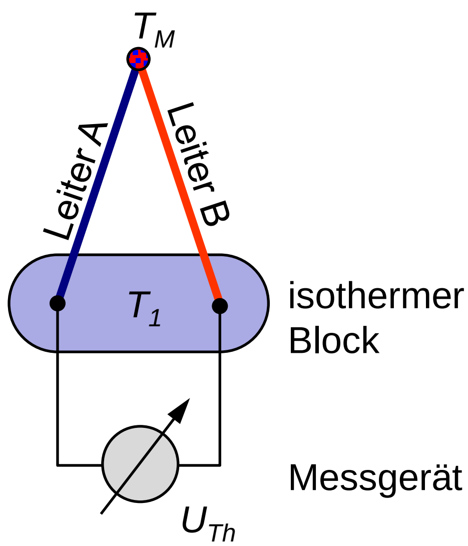
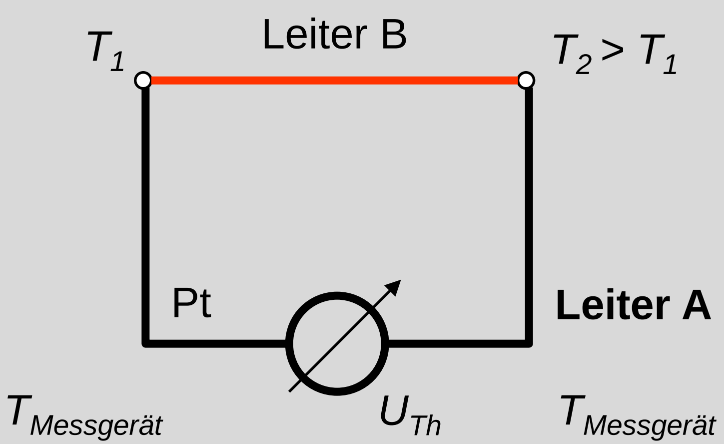



Bild 2



„Was hat das Thermoelement mit der Anordnung zu tun, die wir zuvor untersucht haben?“

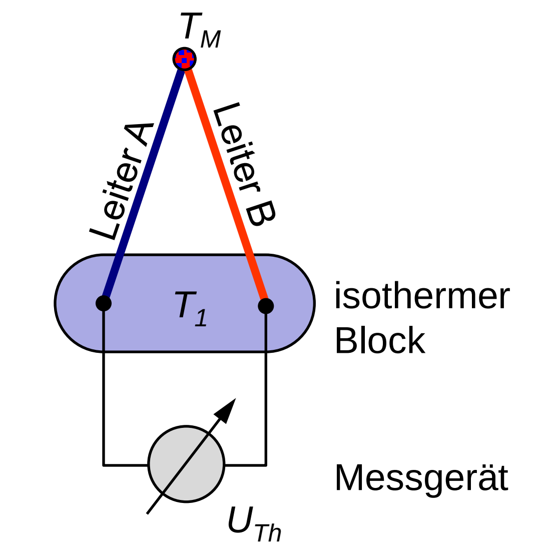
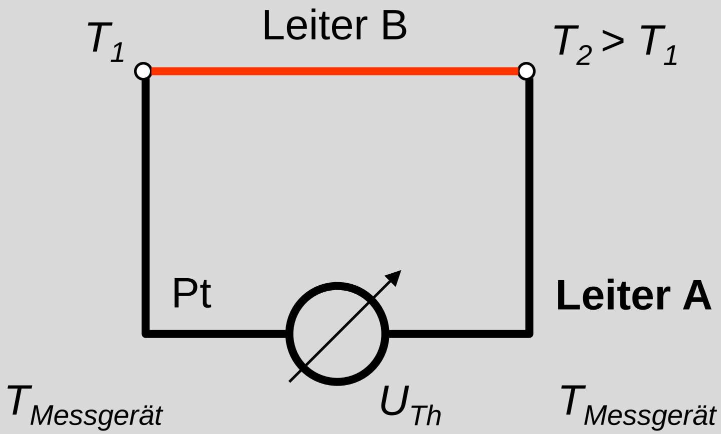



*Bild 2*




$T_1 = T_{Messgerät}$

„Was hat das Thermoelement mit der Anordnung zu tun, die wir zuvor untersucht haben?“

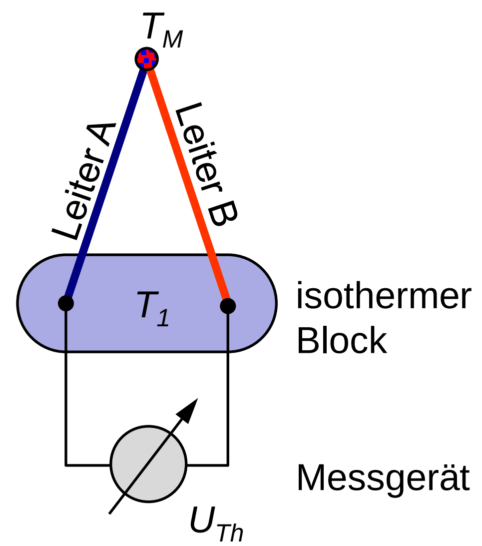
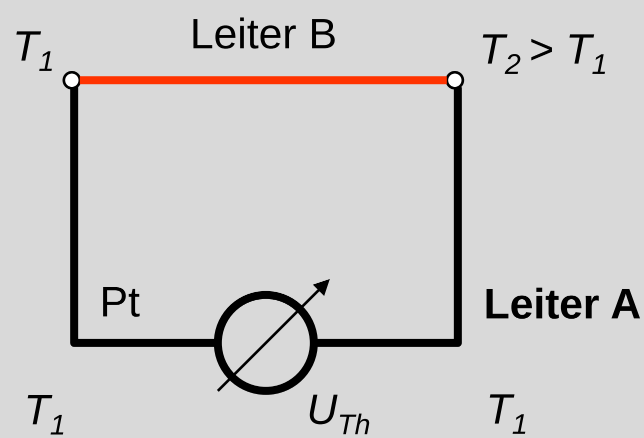



*Bild 2*




$T_1 = T_{Messgerät}$

# Passive Bauelemente Wintersemester 2014
# Übung 3

„Was hat das Thermoelement mit der Anordnung zu tun, die wir zuvor untersucht haben?“

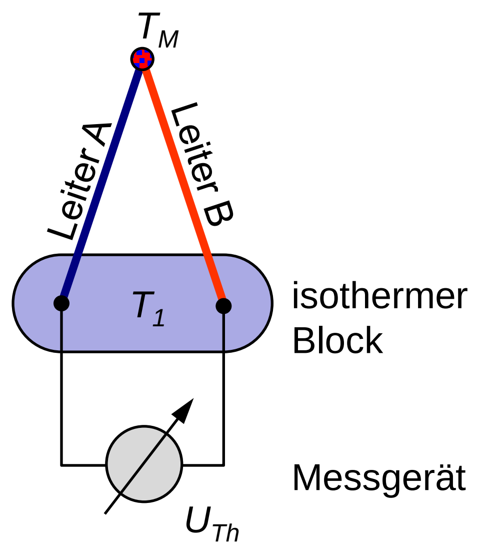
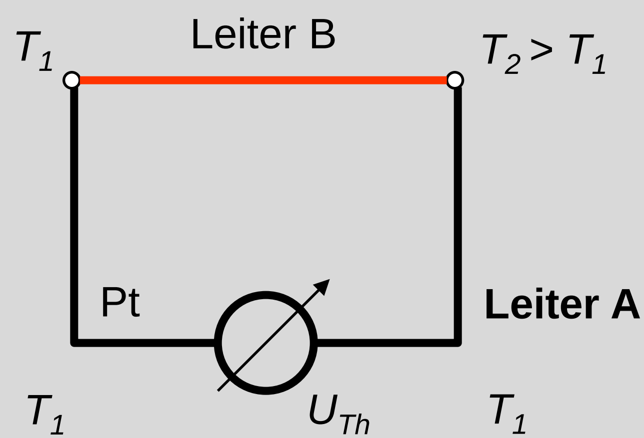



*Bild 2*




$T_1 = T_{Messgerät}$

$$\eta_{Pt} = 0 \frac{\mu V}{K}$$

„Was hat das Thermoelement mit der Anordnung zu tun, die wir zuvor untersucht haben?“

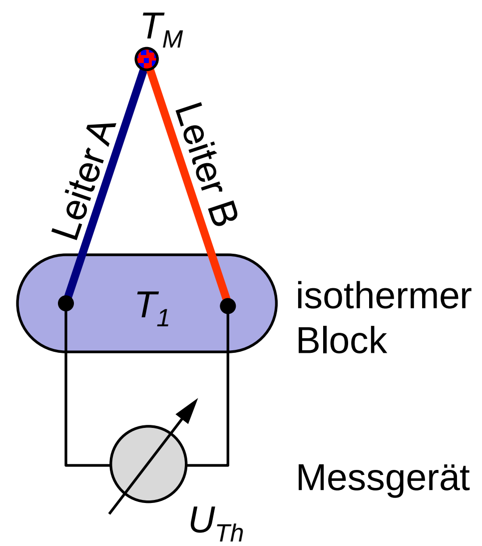
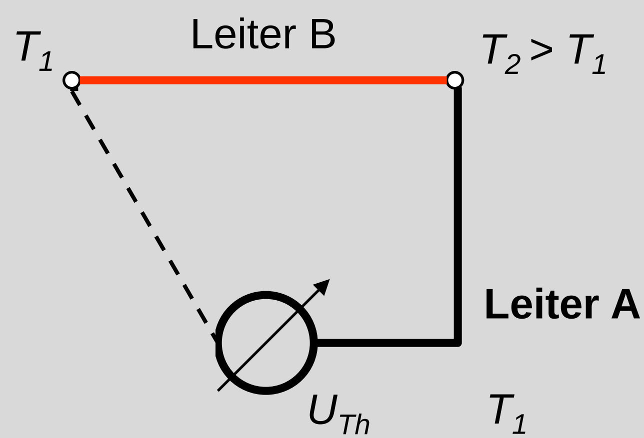



*Bild 2*




$T_1 = T_{Messgerät}$

$$\eta_{Pt} = 0 \frac{\mu V}{K}$$

„Was hat das Thermoelement mit der Anordnung zu tun, die wir zuvor untersucht haben?“

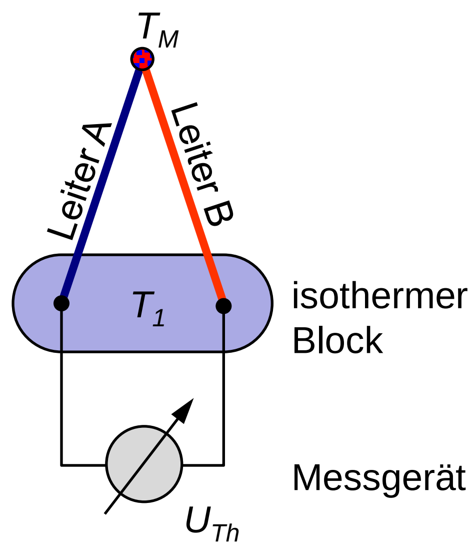
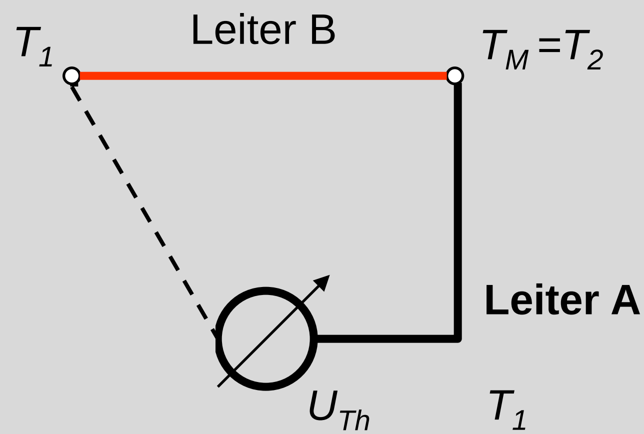



*Bild 2*



# Passive Bauelemente Wintersemester 2014
# Übung 3

„Was hat das Thermoelement mit der Anordnung zu tun, die wir zuvor untersucht haben?“

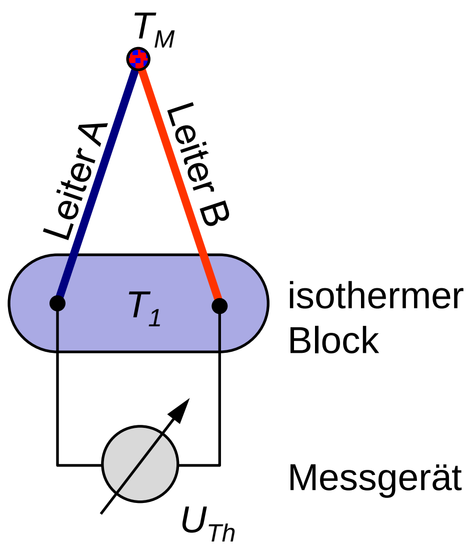
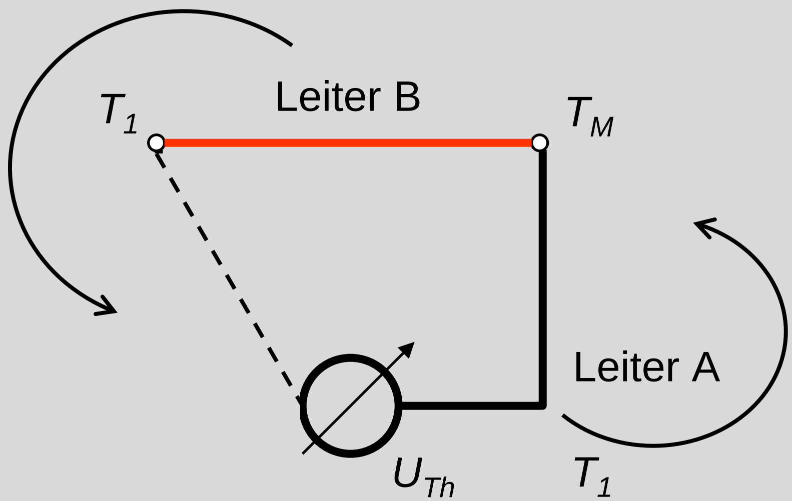



*Bild 2*



„Was hat das Thermoelement mit der Anordnung zu tun, die wir zuvor untersucht haben?“

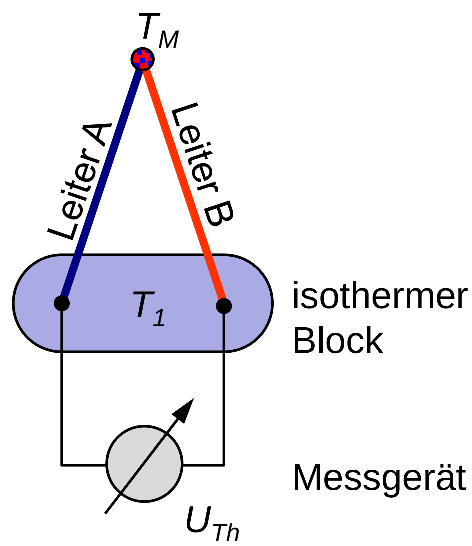
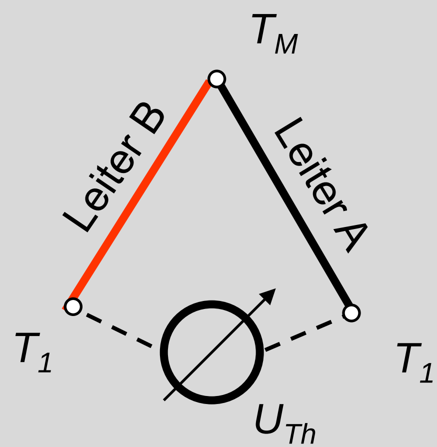



*Bild 2*




„Zum Schluss nur noch das Messgerät umpolen ;)“

# Passive Bauelemente Wintersemester 2014
# Übung 3

c) Leiter B sei für die folgenden Teilaufgaben aus Nickel. Betrachten Sie das in *Bild 2* skizzierte Thermoelementpaar. Welches Material würden Sie für Leiter A aus *Tabelle 1* auswählen, um eine möglichst empfindliche Temperaturmessung zu gewährleisten?

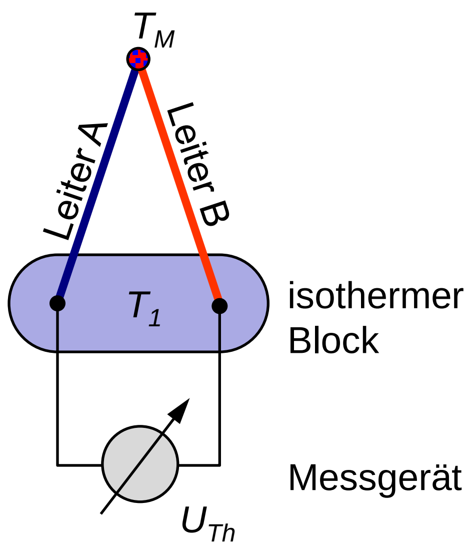



*Bild 2*

Was bedeutet eine möglichst gute Temperaturempfindlichkeit?

aus kleiner Änderung in $\Delta T$

$\rightarrow$ folgt große Änderung in $U_{Th}$

c) Leiter B sei für die folgenden Teilaufgaben aus Nickel. Betrachten Sie das in *Bild 2* skizzierte Thermoelementpaar. Welches Material würden Sie für Leiter A aus *Tabelle 1* auswählen, um eine möglichst empfindliche Temperaturmessung zu gewährleisten?

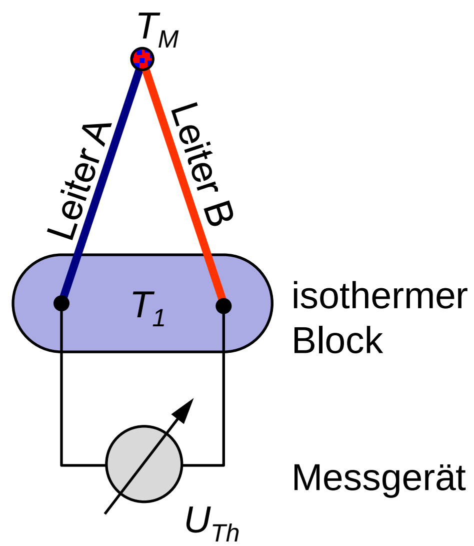



*Bild 2*

Was bedeutet eine möglichst gute Temperaturempfindlichkeit?

aus kleiner Änderung in $\Delta T$

$\rightarrow$ folgt große Änderung in $U_{Th}$

Wir wissen, dass:

$$U_{Th} = \eta \cdot \Delta T$$

# Passive Bauelemente Wintersemester 2014
# Übung 3

Karlsruher Institut für Technologie

c) Leiter B sei für die folgenden Teilaufgaben aus Nickel. Betrachten Sie das in *Bild 2* skizzierte Thermoelementpaar. Welches Material würden Sie für Leiter A aus *Tabelle 1* auswählen, um eine möglichst empfindliche Temperaturmessung zu gewährleisten?

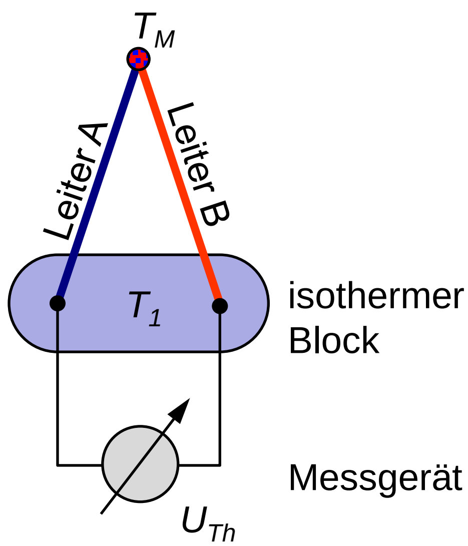



*Bild 2*

Was bedeutet eine möglichst gute Temperaturempfindlichkeit?

aus kleiner Änderung in $\Delta T$

$\rightarrow$ folgt große Änderung in $U_{Th}$

Wir wissen, dass:

$U_{Th} = \eta \cdot \Delta T$

$\rightarrow \eta_{AB} = \eta_A - \eta_B$ $\rightarrow$ muss möglichst groß werden

Karlsruher Institut für Technologie

c) Leiter B sei für die folgenden Teilaufgaben aus Nickel. Betrachten Sie das in *Bild 2* skizzierte Thermoelementpaar. Welches Material würden Sie für Leiter A aus *Tabelle 1* auswählen, um eine möglichst empfindliche Temperaturmessung zu gewährleisten?

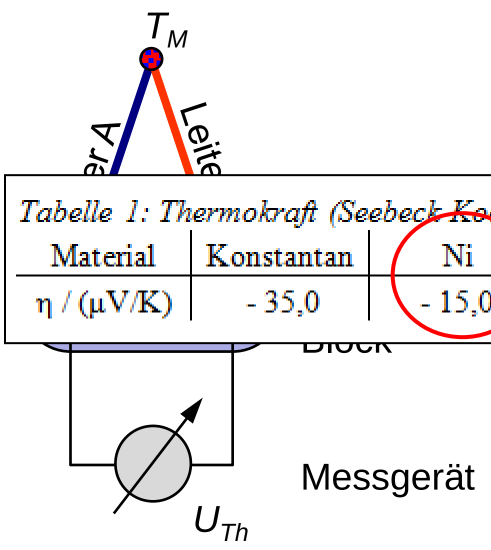



*Bild 2*

*Tabelle 1: Thermokraft (Seebeck-Koeffizient η) verschiedener Materialien*

| Material | Konstantan | Ni | Pt | PtRh | Cu | Fe | NiCr |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| η / (µV/K) | - 35,0 | - 15,0 | 0 | 6,9 | 7,8 | 19,2 | 25,4 |

Was bedeutet eine möglichst gute Temperaturempfindlichkeit?

aus kleiner Änderung in $\Delta T$

Wir wissen, dass:

$$U_{Th} = \eta \cdot \Delta T$$

$$\rightarrow \eta_{AB} = \eta_A - \eta_B \rightarrow$$ muss möglichst groß werden

c) Leiter B sei für die folgenden Teilaufgaben aus Nickel. Betrachten Sie das in *Bild 2* skizzierte Thermoelementpaar. Welches Material würden Sie für Leiter A aus *Tabelle 1* auswählen, um eine möglichst empfindliche Temperaturmessung zu gewährleisten?

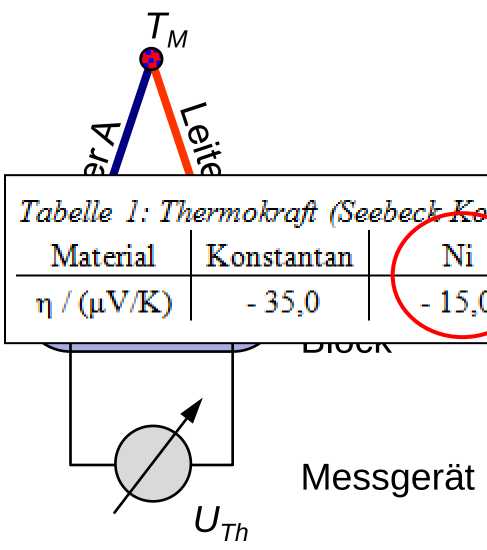



*Bild 2*

Was bedeutet eine möglichst gute Temperaturempfindlichkeit?

aus kleiner Änderung in $\Delta T$

*Tabelle 1: Thermokraft (Seebeck-Koeffizient $\eta$) verschiedener Materialien*

| Material | Konstantan | Ni | Pt | PtRh | Cu | Fe | NiCr |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\eta$ / (µV/K) | - 35,0 | - 15,0 | 0 | 6,9 | 7,8 | 19,2 | 25,4 |

Wir wissen, dass:

$$U_{Th} = \eta \cdot \Delta T$$

$\rightarrow \eta_{AB} = \eta_A - \eta_B \rightarrow$ muss möglichst groß werden

*Tabelle 1:* $\rightarrow \eta_{NiCr:Ni} = \eta_{NiCr} - \eta_{Ni}$

$$= 25,4 \frac{\mu V}{K} - (-15 \frac{\mu V}{K}) = 40,4 \frac{\mu V}{K}$$

# Passive Bauelemente Wintersemester 2014
# Übung 3

d) Wie groß ist die Temperatur $T_M$, bei einer gemessenen Thermospannung von $U_{Th}$ = 25 mV, wenn für Leiter A Eisen verwendet wird ($T_1$=20°C)?

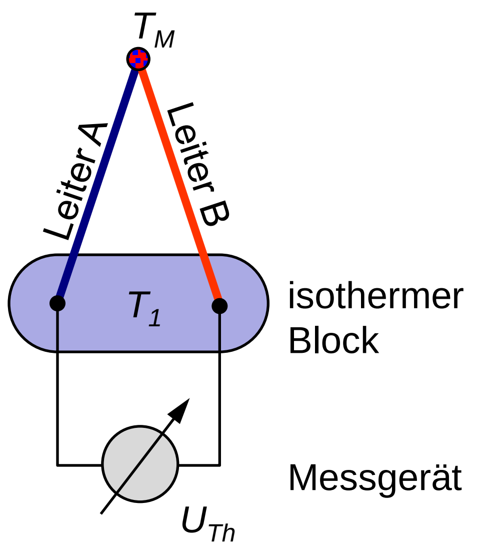



*Bild 2*

$$(1) \quad U_{Th} = \eta \cdot \Delta T$$

---

Gesuchte Größe:

$T_M = T_2$ mit $\Delta T = (T_M - T_1)$

In Formel (1) einsetzen:

$$\rightarrow U_{Th} = \eta \cdot \Delta T = \eta \cdot (T_M - T_1)$$

$$(1)\quad U_{Th} = \eta \cdot \Delta T$$

---

Gesuchte Größe:

$T_M = T_2$ mit $\Delta T = (T_M - T_1)$

In Formel (1) einsetzen:

$$\rightarrow U_{Th} = \eta \cdot \Delta T = \eta \cdot (T_M - T_1)$$

Nach $T_M$ auflösen:

$$\rightarrow (T_M - T_1) = \frac{U_{Th}}{\eta}$$

$$\boxed{T_M = \frac{U_{Th}}{\eta} + T_1}$$

(2) $$T_M = \frac{U_{Th}}{\eta} + T_1$$

---

mit

$$\eta = \eta_{Fe:Ni} = \eta_{Fe} - \eta_{Ni}$$

η einsetzen in (2):

$$\rightarrow T_M = \frac{U_{Th}}{\eta_{Fe} - \eta_{Ni}} + T_1$$

(2) $$T_M = \frac{U_{Th}}{\eta} + T_1$$

---

mit

$$\eta = \eta_{Fe:Ni} = \eta_{Fe} - \eta_{Ni}$$

η einsetzen in (2):

$$\rightarrow T_M = \frac{U_{Th}}{\eta_{Fe} - \eta_{Ni}} + T_1$$

In Formel einsetzen und berechnen:

$$T_M = \frac{25 \cdot 10^3 \, \mu V}{(19{,}2 \frac{\mu V}{K}) - (-15 \frac{\mu V}{K})} + 20°C \approx 751°C$$

Gegebene Größen:

$$U_{Th} = 25 mV = 25 \cdot 10^3 \, \mu V$$

$$T_1 = 20°C$$

| Material | Konstantan | Ni | Fe |
|---|---|---|---|
| η / (µV/K) | - 35,0 | - 15,0 | 19,2 |

Karlsruher Institut für Technologie

e) Sie erwarten eine Temperatur in ihrem Sinterofen bis zu 1200°C. Welche Materialien würden Sie vorzugsweise für die beiden Leiter wählen, um auch den Aufheizvorgang (ab $T_1$=20°C) möglichst korrekt mitverfolgen zu können? Begründen Sie Ihre Wahl.

## Auswahlkriterien

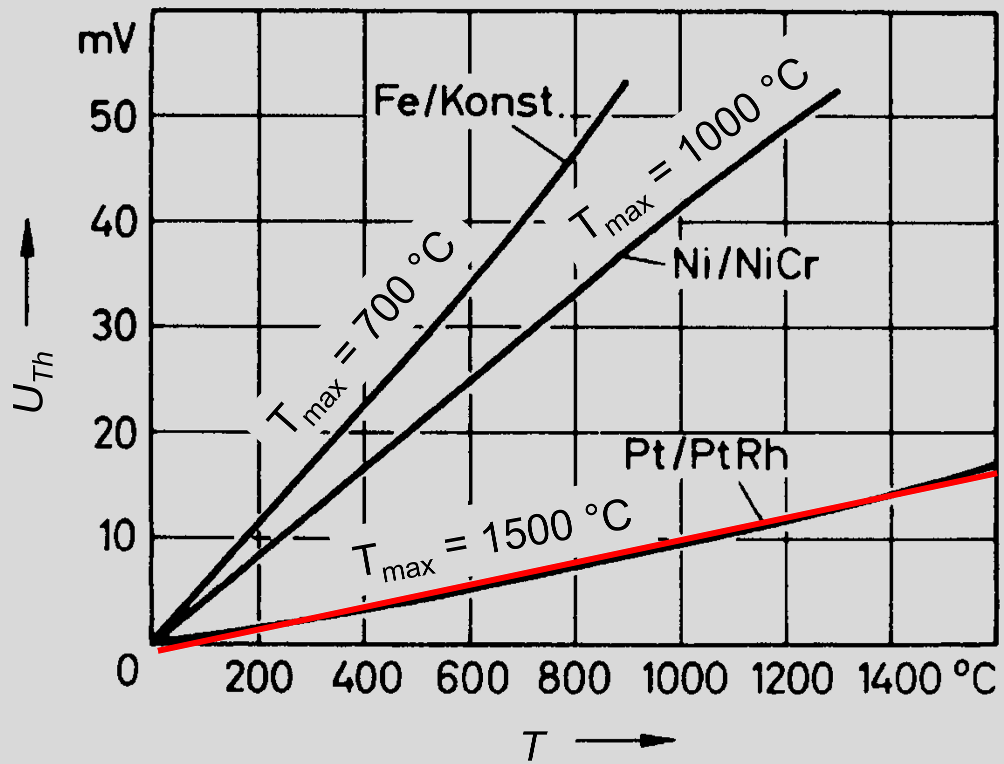
– Hohe Thermospannung $U_{Th}$

→ $\eta_{AB} = \eta_A - \eta_B$ groß

– Linearer Zusammenhang zwischen $U_{Th}$ und $T$

[Münch 1993]

## Gebräuchliche Thermopaare



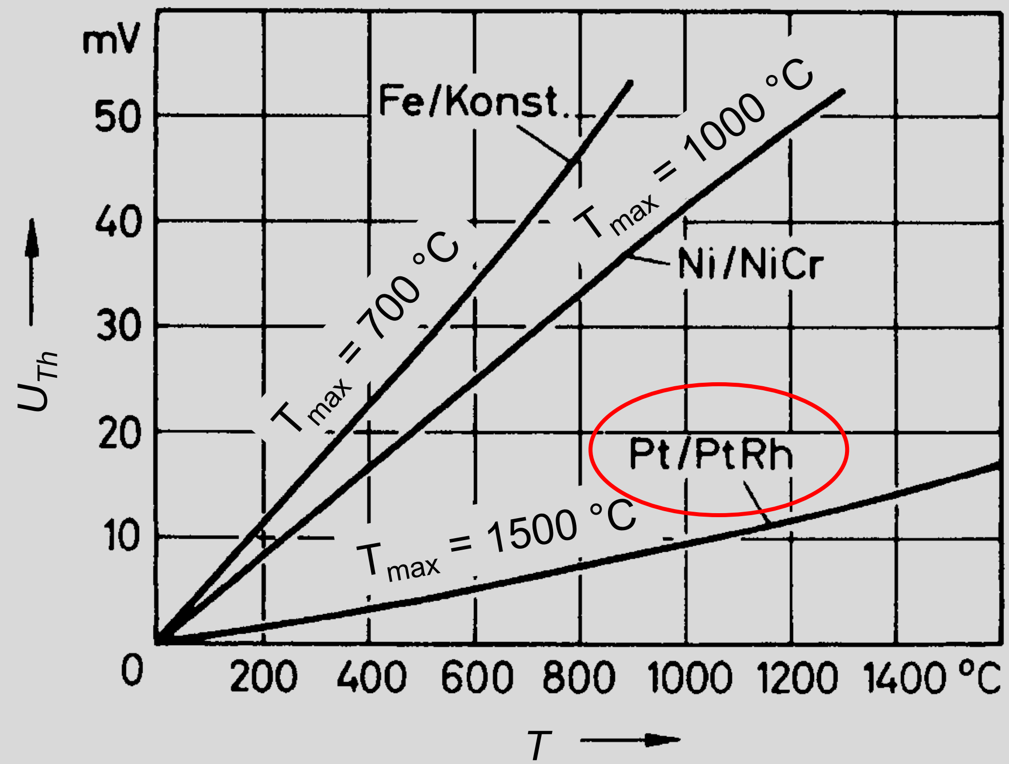
## Auswahlkriterien

- Hohe Thermospannung $U_{Th}$
  → $\eta_{AB} = \eta_A - \eta_B$ groß
- Linearer Zusammenhang zwischen $U_{Th}$ und $T$

[Münch 1993]

→ Verwendung gleicher Metalle mit Verunreinigung Bsp: Pt/PtRh

## Gebräuchliche Thermopaare



Karlsruher Institut für Technologie

## Auswahlkriterien

– Hohe Thermospannung $U_{Th}$

→ $\eta_{AB} = \eta_A - \eta_B$ groß

– Linearer Zusammenhang zwischen $U_{Th}$ und $T$

[Münch 1993]

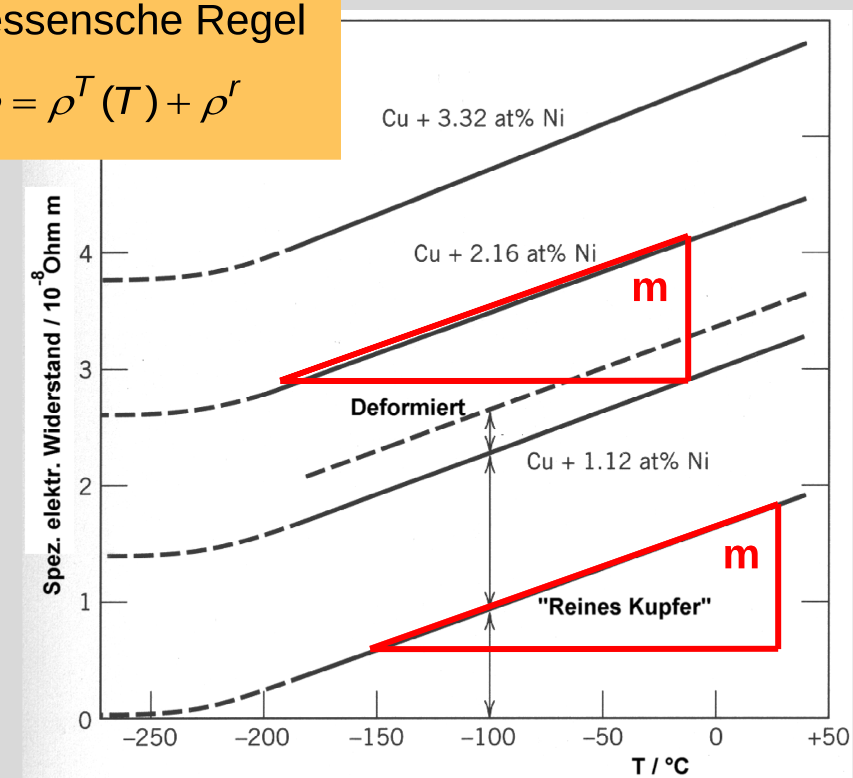
→ Verwendung gleicher Metalle mit Verunreinigung Bsp: Pt/PtRh

→ gleiches „lineares Verhalten (=Steigung m)“ aber $\sigma_{Pt} > \sigma_{PtRh}$ *(VL4).*

## Matthiessensche Regel

Matthiessensche Regel

$$\rho = \rho^T(T) + \rho^r$$



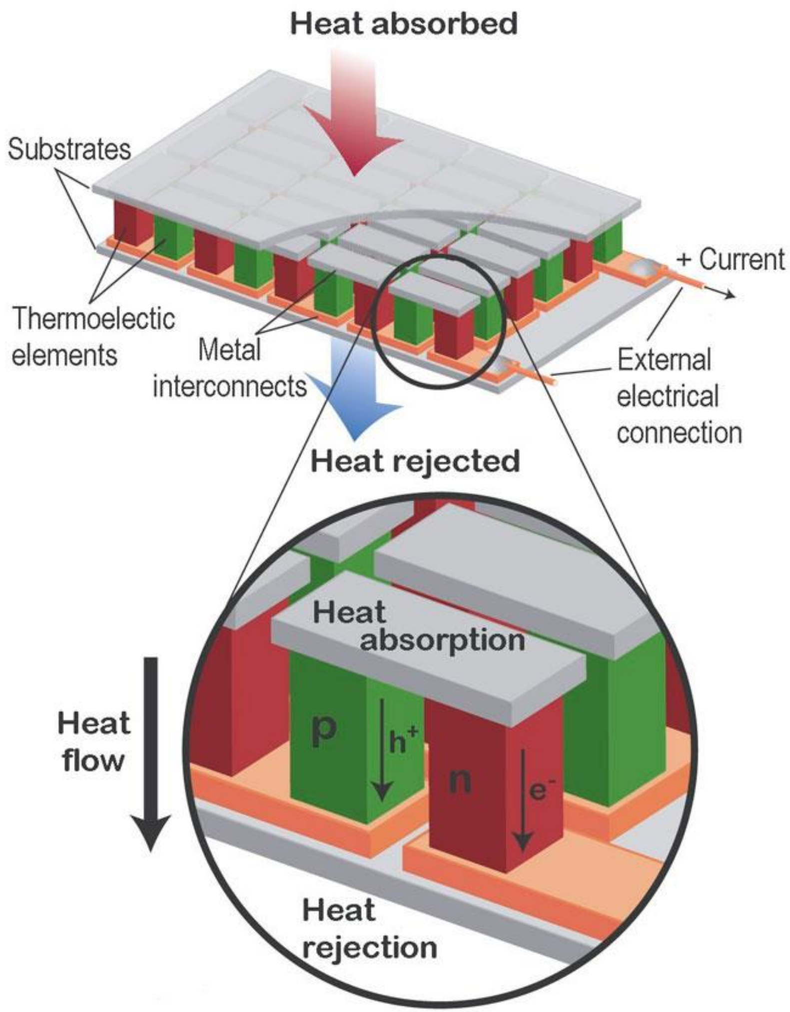
# Passive Bauelemente Wintersemester 2014
# Übung 3

Karlsruher Institut für Technologie

f) Könnte man mit Hilfe des Seebeck-Effekts möglicherweise sogar thermische in elektrische Energie wandeln?

## Exkurs!

Nicht Klausurrelevant




**Überbegriff:**
“Thermoelectric (Generator)”

two thermoelectric semiconductors:

- n-type and p-type

**Material Voraussetzungen:**
must be good at conducting electricity but poor at conducting heat

# Passive Bauelemente Wintersemester 2014
# Übung 3

2. a) Es sei erneut ein Thermoelement, bestehend aus zwei Leitern gegeben. Einer der Leiter bestehe aus Nickel. Wie viele Leitungselektronen *N* befinden sich im Nickel-Drahtstück bzw. wie groß ist ihre Konzentration *n*?

*Hinweis: Nehmen Sie an, dass jedes Nickelatom ein Elektron als Leitungselektron abgibt. Die Dichte von Nickel beträgt $\rho_{Ni} = 8{,}9\ g/cm^3$. Der Draht habe einen kreisförmigen Querschnitt mit dem Durchmesser $A = 2\ mm$ und die Länge $l = 100 mm$. Entnehmen Sie weitere eventuell benötigte Konstanten der PB Formelsammlung.*

Karlsruher Institut für Technologie

2. a) Es sei erneut ein Thermoelement, bestehend aus zwei Leitern gegeben. Einer der Leiter bestehe aus Nickel. Wie viele Leitungselektronen $N$ befinden sich im Nickel-Drahtstück bzw. wie groß ist ihre Konzentration $n$?

*Hinweis: Nehmen Sie an, dass jedes Nickelatom ein Elektron als Leitungselektron abgibt. Die Dichte von Nickel beträgt $\rho_{Ni} = 8{,}9\ g/cm^3$. Der Draht habe einen kreisförmigen Querschnitt mit dem Durchmesser $A = 2\ mm$ und die Länge $l = 100mm$. Entnehmen Sie weitere eventuell benötigte Konstanten der PB Formelsammlung.*

# Für die Klausur:

*„Warum wird so eine Aufgabe aus dem Zusammenhang gerissen gestellt?"*
*→ Weil das Ergebnis für die folgende Aufgabe benötigt wird!*

Karlsruher Institut für Technologie

2. a) Es sei erneut ein Thermoelement, bestehend aus zwei Leitern gegeben. Einer der Leiter bestehe aus Nickel. Wie viele Leitungselektronen $N$ befinden sich im Nickel-Drahtstück bzw. wie groß ist ihre Konzentration $n$?

*Hinweis: Nehmen Sie an, dass jedes Nickelatom ein Elektron als Leitungselektron abgibt. Die Dichte von Nickel beträgt $\rho_{Ni} = 8{,}9\ g/cm^3$. Der Draht habe einen kreisförmigen Querschnitt mit dem Durchmesser $A = 2\ mm$ und die Länge $l=100mm$. Entnehmen Sie weitere eventuell benötigte Konstanten der PB Formelsammlung.*

Aus dem Hinweis:

Anzahl $N\,(e^-) = \textit{Anzahl}\ N\,(\mathrm{Ni})$

2. a) Es sei erneut ein Thermoelement, bestehend aus zwei Leitern gegeben. Einer der Leiter bestehe aus Nickel. Wie viele Leitungselektronen $N$ befinden sich im Nickel-Drahtstück bzw. wie groß ist ihre Konzentration $n$?

*Hinweis: Nehmen Sie an, dass jedes Nickelatom ein Elektron als Leitungselektron abgibt. Die Dichte von Nickel beträgt $\rho_{Ni} = 8{,}9\ g/cm^3$. Der Draht habe einen kreisförmigen Querschnitt mit dem Durchmesser $A = 2$ mm und die Länge $l$=100mm. Entnehmen Sie weitere eventuell benötigte Konstanten der PB Formelsammlung.*

Aus dem Hinweis:

Anzahl $N$ ( $e^-$ ) = Anzahl $N$ ( Ni )

*„Wieviel Nickel befindet sich im Leiter?“*

$$\frac{Anzahl\ \ N(Ni)}{Volumen} = \frac{N}{V} = \frac{N_A}{V_{mol,Ni}}$$

$N_A$ : **Avogadro-Konstante**
= *Anzahl Teilchen (Ni oder $e^-$) pro Mol*

Karlsruher Institut für Technologie

$$(1) \quad \frac{N}{V} = \frac{N_A}{V_{mol,Ni}}$$

---

Dichte von einem Mol Nickel…

$$\rho_{Ni} = \frac{m_{mol,Ni}}{V_{mol,Ni}}$$

$$(1)\quad \frac{N}{V} = \frac{N_A}{V_{mol,Ni}}$$

---

Dichte von einem Mol Nickel…

$$\rho_{Ni} = \frac{m_{mol,Ni}}{V_{mol,Ni}}$$

und umstellen nach $V_{mol,Ni}$…

$$\rightarrow V_{mol,Ni} = \frac{m_{mol,Ni}}{\rho_{Ni}}$$

Einsetzen in (1)…

$$\frac{N}{V} = \frac{N_A}{m_{mol,Ni}} \cdot \rho_{Ni}$$

Karlsruher Institut für Technologie

$$(1)\quad \frac{N}{V} = \frac{N_A}{V_{mol,Ni}}$$

---

Dichte von einem Mol Nickel…

$$\rho_{Ni} = \frac{m_{mol,Ni}}{V_{mol,Ni}}$$

und umstellen nach $V_{mol,Ni}$…

$$\rightarrow V_{mol,Ni} = \frac{m_{mol,Ni}}{\rho_{Ni}}$$

Einsetzen in (1)…

$$\frac{N}{V} = \frac{N_A}{m_{mol,Ni}} \cdot \rho_{Ni}$$

und umstellen nach N…

$$\rightarrow N = \frac{N_A}{m_{mol,Ni}} \cdot \rho_{Ni} \cdot V$$

$$(1)\quad \frac{N}{V} = \frac{N_A}{V_{mol,Ni}}$$

---

Dichte von einem Mol Nickel…

$$\rho_{Ni} = \frac{m_{mol,Ni}}{V_{mol,Ni}}$$

und umstellen nach $V_{mol,Ni}$…

$$\rightarrow V_{mol,Ni} = \frac{m_{mol,Ni}}{\rho_{Ni}}$$

Einsetzen in (1)…

$$\frac{N}{V} = \frac{N_A}{m_{mol,Ni}} \cdot \rho_{Ni}$$

und umstellen nach N…

$$\rightarrow N = \frac{N_A}{m_{mol,Ni}} \cdot \rho_{Ni} \cdot V$$

mit dem Volumen V….

$$V = \pi r^2 \cdot l = \pi \left(\frac{A}{2}\right)^2 \cdot l = \frac{\pi A^2}{4} \cdot l$$

$$(1)\quad \frac{N}{V} = \frac{N_A}{V_{mol,Ni}}$$

---

Dichte von einem Mol Nickel…

$$\rho_{Ni} = \frac{m_{mol,Ni}}{V_{mol,Ni}}$$

und umstellen nach $V_{mol,Ni}$…

$$\rightarrow V_{mol,Ni} = \frac{m_{mol,Ni}}{\rho_{Ni}}$$

Einsetzen in (1)…

$$\frac{N}{V} = \frac{N_A}{m_{mol,Ni}} \cdot \rho_{Ni}$$

und umstellen nach N…

$$\rightarrow N = \frac{N_A}{m_{mol,Ni}} \cdot \rho_{Ni} \cdot V$$

mit dem Volumen V….

$$V = \pi r^2 \cdot l = \pi \left(\frac{A}{2}\right)^2 \cdot l = \frac{\pi A^2}{4} \cdot l$$

folgt:

$$\boxed{\rightarrow N = \frac{N_A}{m_{mol,Ni}} \cdot \rho_{Ni} \cdot \frac{\pi A^2}{4} \cdot l}$$

Karlsruher Institut für Technologie

(2) $$\rightarrow N = \frac{N_A}{m_{mol,Ni}} \cdot \rho_{Ni} \cdot \frac{\pi A^2}{4} \cdot l$$

---

Karlsruher Institut für Technologie

(2) $$\rightarrow N = \frac{N_A}{m_{mol,Ni}} \cdot \rho_{Ni} \cdot \frac{\pi A^2}{4} \cdot l$$

---

Gegebene Größen:

$$\rho_{Ni} = 8{,}9g \cdot cm^{-3} \qquad m_{mol,Ni} = 58{,}69g \cdot mol^{-1}$$

$$l = 100mm = 10cm$$

$$A = 2mm = 0{,}2cm$$

$$N_A = 6{,}022 \cdot 10^{23}$$

28 58,69
**Ni**
Nickel

$$N = \frac{6{,}022 \cdot 10^{23}}{58{,}69g \cdot mol^{-1}} \cdot 8{,}9g \cdot cm^{-3} \cdot \frac{\pi(0{,}2cm)^2}{4} \cdot 10cm \approx 2{,}9 \cdot 10^{22}$$

$$N \approx 2{,}9 \cdot 10^{22}$$

---

Konzentration n:

$$n = \frac{N}{V}$$

$$N \approx 2{,}9 \cdot 10^{22}$$

---

Konzentration n:

$$n = \frac{N}{V}$$

Volumen:

$$V = \pi r^2 \cdot l = \pi \left(\frac{A}{2}\right)^2 \cdot l = \frac{\pi A^2}{4} \cdot l$$

$$N \approx 2{,}9 \cdot 10^{22}$$

---

Konzentration n:

$$n = \frac{N}{V}$$

Volumen:

$$V = \pi r^2 \cdot l = \pi \left(\frac{A}{2}\right)^2 \cdot l = \frac{\pi A^2}{4} \cdot l$$

Einsetzen und berechnen:

$$n = \frac{N}{V} = \frac{2{,}9 \cdot 10^{22}}{\frac{\pi A^2}{4} \cdot l} = \frac{2{,}9 \cdot 10^{22}}{\frac{\pi (0{,}2cm)^2}{4}} \approx 9{,}2 \cdot 10^{22} cm^{-3}$$

b) Berechnen Sie nun den elektrischen Widerstand $R$ des Nickel-Drahtstücks. Berücksichtigen Sie dabei den Temperaturgradienten im Draht. Nehmen Sie vereinfachend an, dass die Temperatur im Draht linear mit der Länge abfällt. Die thermische Längenausdehnung des Drahtes sei vernachlässigbar. Nehmen sie weiter an, dass $T_M$=90°C und $T_1$=20°C sei.

*Hinweis: Der lineare Temperaturkoeffizient der Beweglichkeit μ(T) von Nickel sei $TK_{Ni} = -6{,}7 \cdot 10^{-3}\ K^{-1}$.*

*Mathematische Hilfestellung:* $\int \frac{dx}{a \pm b \cdot x} = \pm \frac{1}{b} \ln(a \pm b \cdot x) + c$

# Passive Bauelemente Wintersemester 2014
# Übung 3

b) Berechnen Sie nun den elektrischen Widerstand *R* des Nickel-Drahtstücks. Berücksichtigen Sie dabei den Temperaturgradienten im Draht. Nehmen Sie vereinfachend an, dass die Temperatur im Draht linear mit der Länge abfällt. Die thermische Längenausdehnung des Drahtes sei vernachlässigbar. Nehmen sie weiter an, dass $T_M$=90°C und $T_1$=20°C sei.

*Hinweis: Der lineare Temperaturkoeffizient der Beweglichkeit μ(T) von Nickel sei* $TK_{Ni} = -6{,}7 \cdot 10^{-3}\,K^{-1}$.

*Mathematische Hilfestellung:* $$\int \frac{dx}{a \pm b \cdot x} = \pm \frac{1}{b} \ln(a \pm b \cdot x) + c$$

Karlsruher Institut für Technologie

Bekannter Zusammenhang….

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$

# Passive Bauelemente Wintersemester 2014
# Übung 3

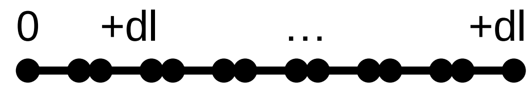
Karlsruher Institut für Technologie

**Bekannter Zusammenhang….**

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$


**noch allgemeiner:**

$$R = \int_0^l \rho(x) \frac{1}{A} dx$$



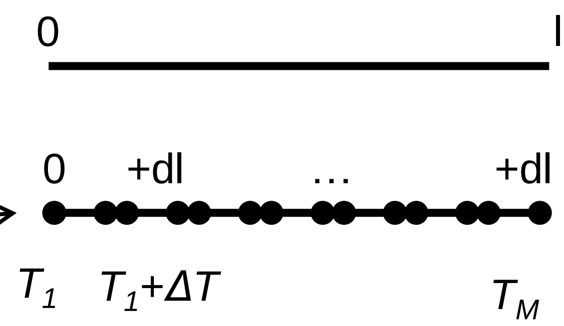
## Bekannter Zusammenhang….

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$

## noch allgemeiner:

$$R = \int_0^l \rho(x) \frac{1}{A} dx$$

$$\rho(T) = \frac{1}{e \cdot n \cdot \mu(T)}$$




*μ:* Beweglichkeit
*n:* Elektronenkonzentration

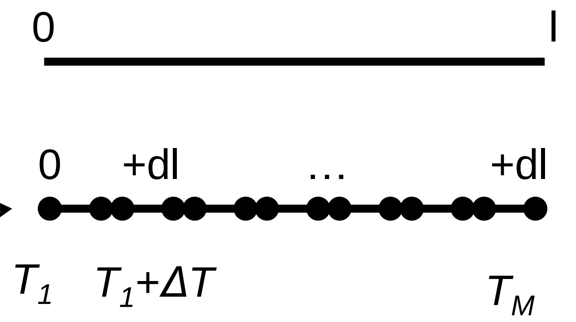
Karlsruher Institut für Technologie

Bekannter Zusammenhang….

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$

noch allgemeiner:

$$R = \int_0^l \rho(x)\frac{1}{A}dx$$




$$\rho(T) = \frac{1}{e \cdot n \cdot \mu(T)}$$

*μ:* Beweglichkeit
*n:* Elektronenkonzentration

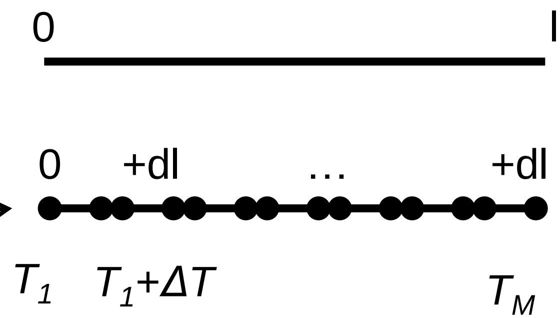
Für die Beweglichkeit gilt:

$$\mu(T) = \underbrace{\mu_0}_{100\%}(1+\underbrace{TK_{Ni}(T-T_1)}_{\%\ \text{Änderung pro}\ \Delta T\text{-Schritt}})$$

Karlsruher Institut für Technologie

Bekannter Zusammenhang….

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$




noch allgemeiner:

$$R = \int_0^l \rho(x) \frac{1}{A} dx$$

$$\rho(T) = \frac{1}{e \cdot n \cdot \mu(T)}$$

*μ:* Beweglichkeit
*n:* Elektronenkonzentration

Für die Beweglichkeit gilt:

$$\mu(T) = \underbrace{\mu_0}_{100\%}(1 + \underbrace{TK_{Ni}(T - T_1)}_{\%\ \text{Änderung pro}\ \Delta T\text{-Schritt}})$$

Karlsruher Institut für Technologie

b) Berechnen Sie nun den elektrischen Widerstand *R* des Nickel-Drahtstücks. Berücksichtigen Sie dabei den Temperaturgradienten im Draht. Nehmen Sie vereinfachend an, dass die Temperatur im Draht linear mit der Länge abfällt. Die thermische Längenausdehnung des Drahtes sei vernachlässigbar. Nehmen sie weiter an, dass $T_M$=90°C und $T_1$=20°C sei.

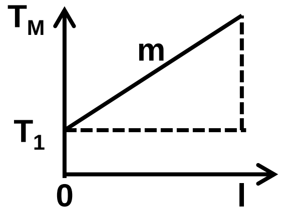
*Hinweis: Der lineare Temperaturkoeffizient der Beweglichkeit μ(T) von Nickel sei* $TK_{Ni} = -6{,}7 \cdot 10^{-3}\,K^{-1}$.

*Mathematische Hilfestellung:* $\int \frac{dx}{a \pm b \cdot x} = \pm \frac{1}{b} \ln(a \pm b \cdot x) + c$

„Wie ist überhaupt die Temperatur verteilt im Draht?“

Konstruiere eine Gerade:

$$T(x) = \underbrace{T_1}_{\text{y-Achsenabschnitt}} + \underbrace{\frac{(T_M - T_1)}{l}}_{\text{Steigung}} \cdot x$$




Jetzt alles zusammen einsetzen…

$$R=\int_0^l \rho(x)\frac{1}{A}dx$$

$$\rho(T)=\frac{1}{e\cdot n\cdot \mu(T)}$$

$$\mu(T)=\mu_0(1+TK_{Ni}(T-T_1))$$

$$T(x)=T_1+\frac{(T_M-T_1)}{l}\cdot x$$

Nacheinander einsetzen…

$$R = \int_0^l \rho(x) \frac{1}{A} dx$$

$$\rho(T) = \frac{1}{e \cdot n \cdot \mu(T)}$$

$$\mu(T) = \mu_0 (1 + TK_{Ni} (T - T_1))$$

$$T(x) = T_1 + \frac{(T_M - T_1)}{l} \cdot x$$

Nacheinander einsetzen…

$$\mu(T) = \mu_0 (1 + TK_{Ni} (T_1 + \frac{(T_M - T_1)}{l} \cdot x - T_1))$$

# Passive Bauelemente Wintersemester 2014
# Übung 3

$$R = \int_0^l \rho(x) \frac{1}{A} dx$$

$$\rho(T) = \frac{1}{e \cdot n \cdot \mu(T)}$$

$$\mu(T) = \mu_0 (1 + TK_{Ni} (T - T_1))$$

$$T(x) = T_1 + \frac{(T_M - T_1)}{l} \cdot x$$

Nacheinander einsetzen…

$$\mu(T) = \mu_0 (1 + TK_{Ni} (\cancel{T_1} + \frac{(T_M - T_1)}{l} \cdot x - \cancel{T_1}))$$

$$R = \int_0^l \rho(x) \frac{1}{A} dx$$

$$\rho(T) = \frac{1}{e \cdot n \cdot \mu(T)}$$

$$\mu(T) = \mu_0 (1 + TK_{Ni} (T - T_1))$$

$$T(x) = T_1 + \frac{(T_M - T_1)}{l} \cdot x$$

Nacheinander einsetzen…

$$\mu(T) = \mu_0 (1 + TK_{Ni} (\cancel{T_1} + \frac{(T_M - T_1)}{l} \cdot x - \cancel{T_1}))$$

**Konstanten** aus dem Integral ziehen…

$$R = \frac{1}{e \cdot n \cdot \mu_0 \cdot A} \cdot \int_0^l \frac{1}{1 + TK_{Ni} (T_M - T_1) \cdot \frac{x}{l}} dx$$

$$R = \frac{1}{e \cdot n \cdot \mu_0 \cdot A} \cdot \int_0^l \frac{1}{1 + TK_{Ni}(T_M - T_1) \cdot \frac{x}{l}} dx$$

$$R = \frac{1}{e \cdot n \cdot \mu_0 \cdot A} \cdot \int_0^l \frac{1}{\underbrace{1}_{a} + \underbrace{TK_{Ni}(T_M - T_1) \cdot \frac{x}{l}}_{b \cdot x}} dx$$

*Mathematische Hilfestellung:*

$$\int \frac{dx}{a \pm b \cdot x} = \pm \frac{1}{b} \ln(a \pm b \cdot x) + c$$

Karlsruher Institut für Technologie

$$R = \frac{1}{e \cdot n \cdot \mu_0 \cdot A} \cdot \int_0^l \frac{1}{\underbrace{1}_{a} + \underbrace{TK_{Ni}(T_M - T_1) \cdot \frac{x}{l}}_{b \cdot x}} dx$$

*Mathematische Hilfestellung:*

$$\int \frac{dx}{a \pm b \cdot x} = \pm \frac{1}{b} \ln(a \pm b \cdot x) + c$$

Integral auflösen:

$$R = \frac{1}{e \cdot n \cdot \mu_0 \cdot A} \cdot \frac{1}{\underbrace{TK_{Ni} \cdot \frac{(T_M - T_1)}{l}}_{b}} \cdot \ln\left( \underbrace{1}_{a} + \underbrace{TK_{Ni}(T_M - T_1) \cdot \frac{x}{l}}_{b \cdot x} \right) \Bigg|_{x=0}^{x=l}$$

$$R = \frac{1}{e \cdot n \cdot \mu_0 \cdot A} \cdot \int_0^l \frac{1}{\underbrace{1}_{a} + \underbrace{TK_{Ni}(T_M - T_1) \cdot \frac{x}{l}}_{b \cdot x}} dx$$

*Mathematische Hilfestellung:*

$$\int \frac{dx}{a \pm b \cdot x} = \pm \frac{1}{b} \ln(a \pm b \cdot x) + c$$

Integral auflösen:

$$R = \frac{1}{e \cdot n \cdot \mu_0 \cdot A} \cdot \frac{1}{TK_{Ni} \cdot \frac{(T_M - T_1)}{l}} \cdot \ln\left(1 + TK_{Ni}(T_M - T_1) \cdot \frac{x}{l}\right)\Bigg|_{x=0}^{x=l}$$

$$= \frac{l}{e \cdot n \cdot \mu_0 \cdot A \cdot TK_{Ni} \cdot (T_M - T_1)} \cdot \ln\left(1 + TK_{Ni}(T_M - T_1)\right)$$

Karlsruher Institut für Technologie

$$R = \frac{1}{e \cdot n \cdot \mu_0 \cdot A} \cdot \int_0^l \frac{1}{\underbrace{1}_{a} + \underbrace{TK_{Ni}(T_M - T_1) \cdot \frac{x}{l}}_{b \cdot x}} dx$$

*Mathematische Hilfestellung:*

$$\int \frac{dx}{a \pm b \cdot x} = \pm \frac{1}{b} \ln(a \pm b \cdot x) + c$$

Integral auflösen:

$$R = \frac{1}{e \cdot n \cdot \mu_0 \cdot A} \cdot \frac{1}{TK_{Ni} \cdot \frac{(T_M - T_1)}{l}} \cdot \ln\left(1 + TK_{Ni}(T_M - T_1) \cdot \frac{x}{l}\right)\Bigg|_{x=0}^{x=l}$$

$$= \frac{l}{e \cdot n \cdot \mu_0 \cdot A \cdot TK_{Ni} \cdot (T_M - T_1)} \cdot \ln(1 + TK_{Ni}(T_M - T_1))$$

Einsetzen:

$$R \approx 2{,}9 m\Omega$$

mit

$$n \approx 9{,}2 \cdot 10^{22} cm^{-3}$$

# Dehnmessstreifen (DMS)

Karlsruher Institut für Technologie

## A2: Piezoresistiver Effekt

Dehnmessstreifen (DMS) werden in der Sensorik als Druck und Kraftsensoren verwendet. Ein Platindraht (Pt) wird auf seine Eignung als Dehnmessstreifen (DMS) hin untersucht. Betrachtet wird ein Pt-Draht mit der Länge $l$ und dem Durchmesser $d$. Der Draht wird auf einer konstanten Temperatur von $T_U = 20$ °C gehalten und von einem Strom $I$ durchflossen (siehe *Bild 3*).

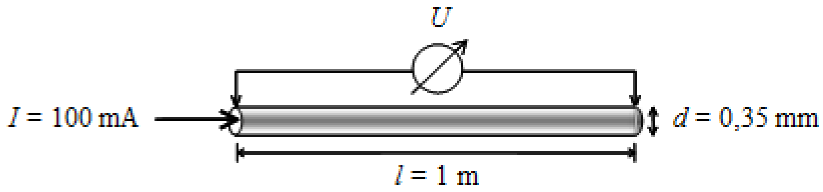



*Bild 3: Spannungsmessung über einem Pt-Draht.*

a) Über die Enden des Drahtes wird eine Spannung von $U = 102{,}17$ mV gemessen. Bestimmen Sie hieraus zunächst den spezifischen Widerstand $\rho_{Pt}$ von Platin bei 20 °C?

## Spezifischer Widerstand

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{l}{A}$$

Spezifischer Widerstand

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{l}{A}$$

Umstellen nach *ρ*…

$$\rho = \frac{1}{R} \cdot \frac{l}{A} = \frac{I}{U} \cdot \frac{l}{\pi (d/2)^2}$$

## Spezifischer Widerstand

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$

## Umstellen nach $\rho$…

$$\rho = R \cdot \frac{A}{l} = \frac{U}{I} \cdot \frac{\pi (d/2)^2}{l}$$

## Gegebene Größen einsetzen:

$$\rho = \frac{U}{I} \cdot \frac{\pi (d/2)^2}{l} = \frac{102.17mV}{100mA} \cdot \frac{\pi (0{,}035cm/2)^2}{100cm} \approx 9{,}83 \cdot 10^{-6}\,\Omega cm$$

b) Wird der Pt-Draht nun in Längsrichtung gedehnt ändern sich nicht nur seine Länge, sondern aufgrund der Verformung zusätzlich die Querschnittsfläche und der spezifische Widerstand des Materials.

Der Einfluss all dieser Änderungen auf den Wert des Widerstands kann mit Hilfe eines sogenannten „totalen Differentials" ausgedrückt werden:

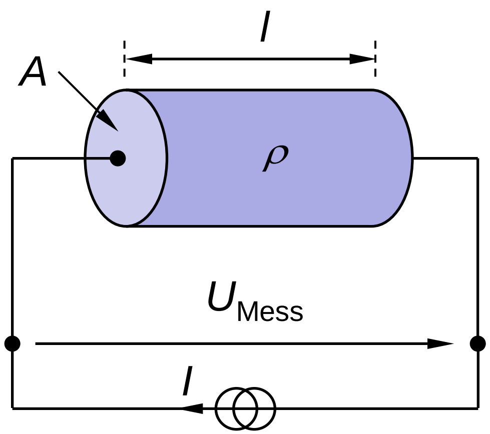
$$\mathrm{d}R = \frac{\partial R}{\partial l}\,\mathrm{d}l + \frac{\partial R}{\partial A}\,\mathrm{d}A + \frac{\partial R}{\partial \rho}\,\mathrm{d}\rho$$

Berechnen Sie aus dem totalen Differential die relative Widerstandsänderung $dR/R$ bei Längsdehnung in Abhängigkeit von $\mathrm{d}l/l$ , $\mathrm{d}A/A$ und $\mathrm{d}\rho/\rho$.

Karlsruher Institut für Technologie

## Widerstand

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$



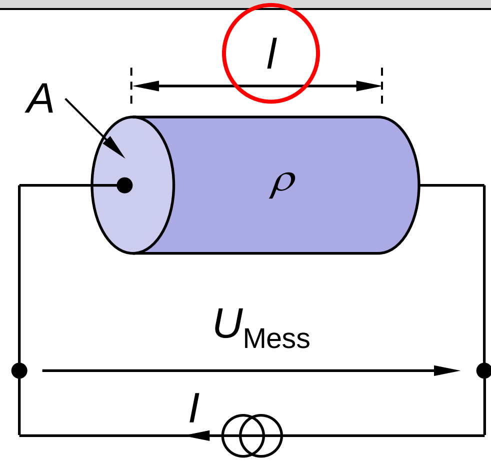

## Das totale Differential

$$dR = \frac{\partial R}{\partial l} dl + \frac{\partial R}{\partial A} dA + \frac{\partial R}{\partial \rho} d\rho$$

Beschreibt die Änderung des gesamten Widerstands durch Änderung…

## Widerstand

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$




## Das totale Differential

$$dR = \frac{\partial R}{\partial l} dl + \frac{\partial R}{\partial A} dA + \frac{\partial R}{\partial \rho} d\rho$$

Beschreibt die Änderung des gesamten Widerstands durch Änderung…

der Länge…

$$\frac{\partial R}{\partial l} = \frac{\rho}{A}$$

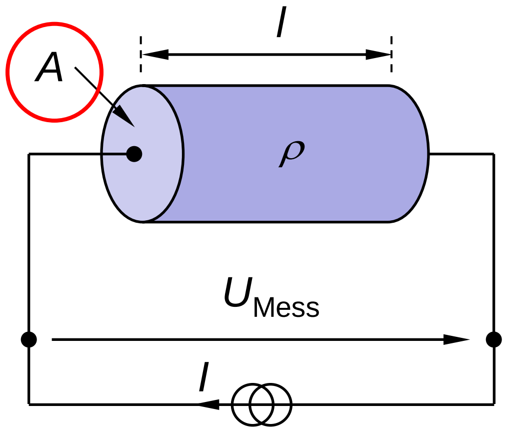
Karlsruher Institut für Technologie

### Widerstand

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$

### Das totale Differential

$$dR = \frac{\partial R}{\partial l} dl + \frac{\partial R}{\partial A} dA + \frac{\partial R}{\partial \rho} d\rho$$




**Beschreibt die Änderung des gesamten Widerstands durch Änderung…**

der Länge…

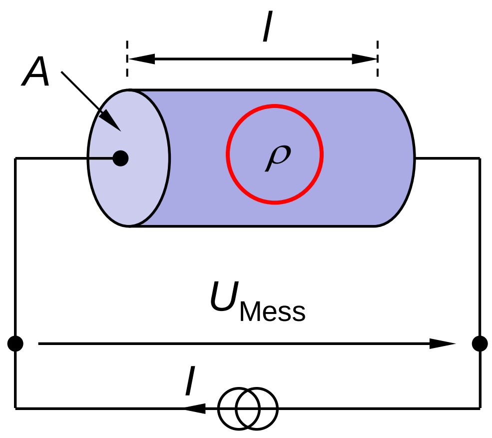
$$\frac{\partial R}{\partial l} = \frac{\rho}{A}$$

des Querschnitts…

$$\frac{\partial R}{\partial A} = -\frac{\rho l}{A^2}$$

Widerstand

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$




Das totale Differential

$$dR = \frac{\partial R}{\partial l} dl + \frac{\partial R}{\partial A} dA + \frac{\partial R}{\partial \rho} d\rho$$

Beschreibt die Änderung des gesamten Widerstands durch Änderung…

der Länge…

$$\frac{\partial R}{\partial l} = \frac{\rho}{A}$$

des Querschnitts…

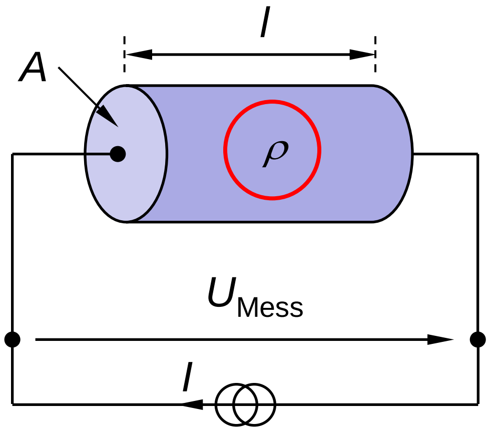
$$\frac{\partial R}{\partial A} = -\frac{\rho l}{A^2}$$

des spez. Widerstands…

$$\frac{\partial R}{\partial \rho} = \frac{l}{A}$$

Widerstand

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$




Das totale Differential

$$dR = \frac{\partial R}{\partial l} dl + \frac{\partial R}{\partial A} dA + \frac{\partial R}{\partial \rho} d\rho$$

Einsetzen

Einsetzen

Einsetzen

Bei Änderung des gesamten Widerstands durch Änderung…

der Länge…

$$\frac{\partial R}{\partial l} = \frac{\rho}{A}$$

des Querschnitts…

$$\frac{\partial R}{\partial A} = -\frac{\rho l}{A^2}$$

des spez. Widerstands…

$$\frac{\partial R}{\partial \rho} = \frac{l}{A}$$

Karlsruher Institut für Technologie

## Widerstand

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$

## Das totale Differential

$$dR = \frac{\partial R}{\partial l} dl + \frac{\partial R}{\partial A} dA + \frac{\partial R}{\partial \rho} d\rho = \frac{\rho}{A} dl - \frac{\rho l}{A^2} dA + \frac{l}{A} d\rho$$

Widerstand

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$

**umstellen** und einsetzen:

$$\frac{\rho}{A} = \frac{R}{l}$$

Das totale Differential

$$dR = \frac{\partial R}{\partial l}dl + \frac{\partial R}{\partial A}dA + \frac{\partial R}{\partial \rho}d\rho = \frac{\rho}{A}dl - \frac{\rho l}{A^2}dA + \frac{l}{A}d\rho$$

Karlsruher Institut für Technologie

## Widerstand

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$

**umstellen** und einsetzen:

$$\frac{\rho}{A} = \frac{R}{l}$$

## Das totale Differential

$$dR = \frac{\partial R}{\partial l} dl + \frac{\partial R}{\partial A} dA + \frac{\partial R}{\partial \rho} d\rho = \frac{\rho}{A} dl - \frac{\rho l}{A^2} dA + \frac{l}{A} d\rho$$

$$dR = \frac{R}{l} dl - \frac{R}{A} dA + \frac{R}{\rho} d\rho$$

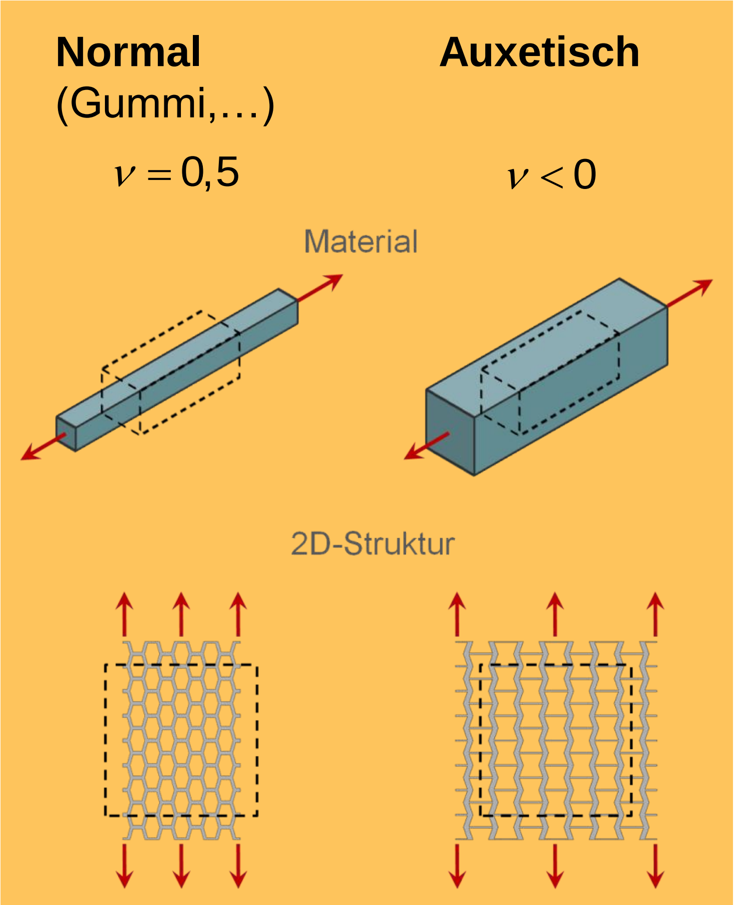
## Relative Widerstandsänderung:

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} - \frac{dA}{A} + \frac{d\rho}{\rho}$$

c) Da Längsdehnung und Querschnittsänderung in einem materialspezifischen, festen Verhältnis stehen, kann der Ausdruck des totalen Differentials aus b) mit Hilfe der sog. Querkontraktionszahl $\upsilon$ (Poisson-Zahl) weiter vereinfacht werden. Führen Sie diese Vereinfachung durch.

## Querkontraktion

$$\nu = -\frac{1}{2} \cdot \frac{dA/A}{dl/l} \quad \text{mit} \quad 0 \leq \nu \leq 0{,}5$$



## Querkontraktion

$$\nu = -\frac{1}{2} \cdot \frac{dA/A}{dl/l} \quad \text{mit} \quad 0 \le \nu \le 0{,}5$$

## Einsetzen in das hergeleitete totale Differential

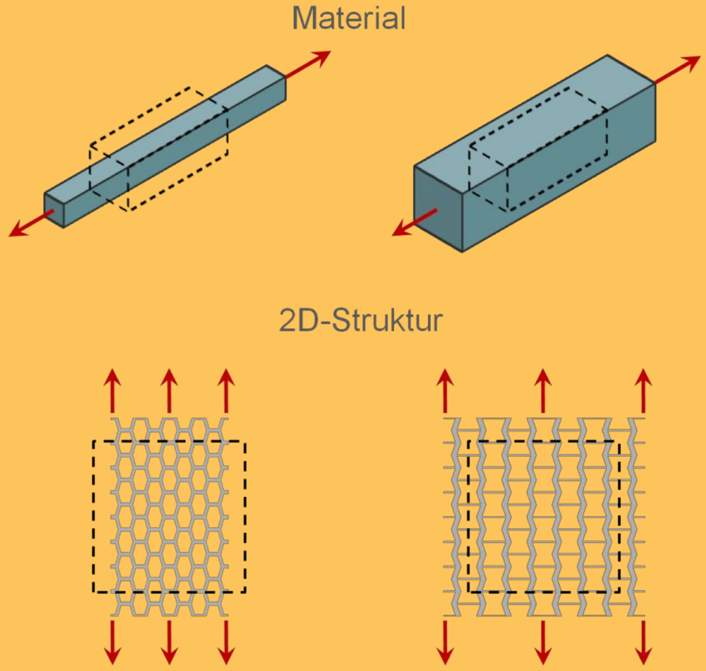
$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} - \frac{dA}{A} + \frac{d\rho}{\rho}$$

$$= \left(1 + 2\nu\right) \cdot \frac{dl}{l} + \frac{d\rho}{\rho}$$

Jetzt ist keine (direkte) Abhängigkeit durch die Querschnittsfläche mehr in der Gleichung!

**Normal** (Gummi,…) $\nu = 0{,}5$

**Auxetisch** $\nu < 0$



Karlsruher Institut für Technologie

**1. Vereinfachung**: Kenngröße mechanische Dehnung einführen

$$\frac{dR}{R} = (1+2\nu)\cdot\frac{dl}{l} + \frac{d\rho}{\rho}$$

$$\varepsilon_M = \frac{dl}{l}$$ : mechanische Dehnung

Karlsruher Institut für Technologie

**1. Vereinfachung**: Kenngröße mechanische Dehnung einführen

$$\frac{dR}{R} = (1+2\nu)\cdot\frac{dl}{l} + \frac{d\rho}{\rho}$$

$$\varepsilon_M = \frac{dl}{l}$$ : mechanische Dehnung

**2. Vereinfachung:** Beweglichkeit, statt spez. Widerstand

$$dR = \frac{\partial R}{\partial l}dl + \frac{\partial R}{\partial A}dA + \frac{\partial R}{\partial \rho}d\rho = \frac{\partial R}{\partial l}dl + \frac{\partial R}{\partial A}dA + \frac{\partial R}{\partial \mu}d\mu$$

Karlsruher Institut für Technologie

**1. Vereinfachung**: Kenngröße mechanische Dehnung einführen

$$\frac{dR}{R} = (1+2\nu)\cdot\frac{dl}{l} + \frac{d\rho}{\rho}$$

$$\varepsilon_M = \frac{dl}{l}$$ : mechanische Dehnung

**2. Vereinfachung:** Beweglichkeit, statt spez. Widerstand

$$dR = \frac{\partial R}{\partial l}dl + \frac{\partial R}{\partial A}dA + \frac{\partial R}{\partial \rho}d\rho = \frac{\partial R}{\partial l}dl + \frac{\partial R}{\partial A}dA + \frac{\partial R}{\partial \mu}d\mu$$

mit $\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{n \cdot e \cdot \mu}$ wird $R = \rho \cdot \frac{l}{A} = \frac{1}{n \cdot e \cdot \mu} \cdot \frac{l}{A}$

Karlsruher Institut für Technologie

**1. Vereinfachung**: Kenngröße mechanische Dehnung einführen

$$\frac{dR}{R} = (1+2\nu)\cdot\frac{dl}{l} + \frac{d\rho}{\rho}$$

$$\varepsilon_M = \frac{dl}{l}$$ : mechanische Dehnung

**2. Vereinfachung:** Beweglichkeit, statt spez. Widerstand

$$dR = \frac{\partial R}{\partial l}dl + \frac{\partial R}{\partial A}dA + \frac{\partial R}{\partial \rho}d\rho = \frac{\partial R}{\partial l}dl + \frac{\partial R}{\partial A}dA + \frac{\partial R}{\partial \mu}d\mu$$

mit $\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{n\cdot e\cdot \mu}$ wird $R = \rho\cdot\frac{l}{A} = \frac{1}{n\cdot e\cdot\mu}\cdot\frac{l}{A}$

partiell ableiten

$$\frac{\partial R}{\partial \mu} = -\frac{1}{n\cdot e\cdot \mu^2}\cdot\frac{l}{A} = -\frac{1}{\mu}\cdot R$$

Karlsruher Institut für Technologie

**1. Vereinfachung**: Kenngröße mechanische Dehnung einführen

$$\frac{dR}{R} = (1+2\nu)\cdot\frac{dl}{l} + \frac{d\rho}{\rho}$$

$$\varepsilon_M = \frac{dl}{l}$$ : mechanische Dehnung

**2. Vereinfachung:** Beweglichkeit, statt spez. Widerstand

$$dR = \frac{\partial R}{\partial l}dl + \frac{\partial R}{\partial A}dA + \frac{\partial R}{\partial \rho}d\rho = \frac{\partial R}{\partial l}dl + \frac{\partial R}{\partial A}dA + \frac{\partial R}{\partial \mu}d\mu$$

Einsetzen

mit $\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{n\cdot e\cdot \mu}$ wird $R = \rho\cdot\frac{l}{A} = \frac{1}{n\cdot e\cdot\mu}\cdot\frac{l}{A}$

partiell ableiten

$$\frac{\partial R}{\partial \mu} = -\frac{1}{n\cdot e\cdot \mu^2}\cdot\frac{l}{A} = -\frac{1}{\mu}\cdot R$$

Karlsruher Institut für Technologie

**1. Vereinfachung**: Kenngröße mechanische Dehnung einführen

$$\frac{dR}{R} = (1+2\nu)\cdot\frac{dl}{l} + \frac{d\rho}{\rho}$$

$$\varepsilon_M = \frac{dl}{l}$$ : mechanische Dehnung

**2. Vereinfachung:** Beweglichkeit, statt spez. Widerstand

$$\frac{dR}{R} = (1+2\nu)\cdot\varepsilon_M - \frac{d\mu}{\mu}$$

Karlsruher Institut für Technologie

**1. Vereinfachung**: Kenngröße mechanische Dehnung einführen

$$\frac{dR}{R} = (1+2\nu)\cdot\frac{dl}{l} + \frac{d\rho}{\rho}$$

$$\varepsilon_M = \frac{dl}{l}$$ : mechanische Dehnung

**2. Vereinfachung:** Beweglichkeit, statt spez. Widerstand

$$\frac{dR}{R} = (1+2\nu)\cdot\varepsilon_M - \frac{d\mu}{\mu}$$

**Definition: *k*-Faktor**

$$\underbrace{\frac{dR}{R} = (1+2\nu)\cdot\varepsilon_M}_{\text{Geometrie-Effekt}} \underbrace{- \frac{d\mu}{\mu}}_{\text{Werkstoff-Effekt}} \equiv k\cdot\varepsilon_M$$

Geometrie-Effekt

Werkstoff-Effekt

Karlsruher Institut für Technologie

d) Für (viele) Metalle gilt folgende empirische Regel: $\mathrm{d}\rho/\rho \approx 0{,}4 \cdot \mathrm{d}l/l$. Berechnen Sie damit den K-Faktor von Pt.
*Hinweis: Querkontraktionszahl* $\upsilon_{Pt} \approx 0{,}38$.

Karlsruher Institut für Technologie

***Definition: k*-Faktor**

$$\frac{dR}{R} = (1+2\nu)\cdot\varepsilon_M - \frac{d\mu}{\mu} \equiv k\cdot\varepsilon_M$$



Quelle: [1] http://www.applied-auxetics.de/auxetik.html

**Karlsruher Institut für Technologie**

### *Definition: k*-Faktor

$$\frac{dR}{R} = (1+2\nu)\cdot\varepsilon_M - \frac{d\mu}{\mu} \equiv k\cdot\varepsilon_M$$

Beziehungsweise:

$$\frac{dR}{R} = (1+2\nu)\cdot\frac{dl}{l} + \frac{d\rho}{\rho} \equiv k\cdot\varepsilon_M$$

Karlsruher Institut für Technologie

***Definition: k*-Faktor**

$$\frac{dR}{R} = (1+2\nu)\cdot\varepsilon_M - \frac{d\mu}{\mu} \equiv k\cdot\varepsilon_M$$

Beziehungsweise:

$$\frac{dR}{R} = (1+2\nu)\cdot\frac{dl}{l} + \frac{d\rho}{\rho} \equiv k\cdot\varepsilon_M$$

mit

$$\frac{d\rho}{\rho} \approx 0{,}4\cdot\frac{dl}{l}$$

### *Definition: k*-Faktor

$$\frac{dR}{R} = (1+2\nu)\cdot\varepsilon_M - \frac{d\mu}{\mu} \equiv k\cdot\varepsilon_M$$

Beziehungsweise:

$$\frac{dR}{R} = (1+2\nu)\cdot\frac{dl}{l} + \frac{d\rho}{\rho} \equiv k\cdot\varepsilon_M$$

mit

$$\frac{d\rho}{\rho} \approx 0{,}4\cdot\frac{dl}{l}$$

$$\rightarrow \frac{dR}{R} = (1+2\nu+0{,}4)\cdot\frac{dl}{l} \equiv k\cdot\varepsilon_M$$

Karlsruher Institut für Technologie

## *Definition: k*-Faktor

$$\frac{dR}{R} = (1+2\nu)\cdot\varepsilon_M - \frac{d\mu}{\mu} \equiv k\cdot\varepsilon_M$$

Beziehungsweise:

$$\frac{dR}{R} = (1+2\nu)\cdot\frac{dl}{l} + \frac{d\rho}{\rho} \equiv k\cdot\varepsilon_M$$

mit

$$\frac{d\rho}{\rho} \approx 0{,}4\cdot\frac{dl}{l}$$

$$\rightarrow \frac{dR}{R} = (1+2\nu+0{,}4)\cdot\frac{dl}{l} \equiv k\cdot\varepsilon_M$$

macht für den k-Faktor mit einsetzen:

$$k = 1+2\nu+0{,}4 = 1+2\nu_{Pt}+0{,}4 \approx 2{,}16$$

e) Welche der aufgeführten Punkte würde die Messgenauigkeit erhöhen und warum?

i. Die Verwendung eines Pt-Drahts mit doppelter Länge.
ii. Statt Pt-Draht einen Halbleiter verwenden.
iii. Parallelanordnung und serielle Verschaltung von mehreren Pt-Drähten.

Karlsruher Institut für Technologie

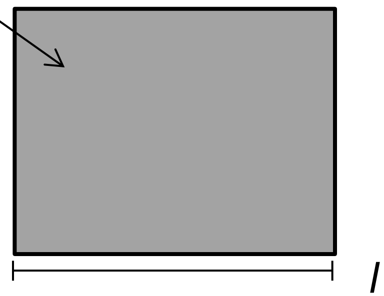
Was bedeutet die Messempfindlichkeit erhöhen?

$$\frac{dR}{R} = (1+2\nu)\cdot\frac{dl}{l} + \frac{d\rho}{\rho} \equiv k\cdot\varepsilon_M \qquad \rightarrow dR \quad \text{möglichst groß!}$$

Was bedeutet die Messempfindlichkeit erhöhen?

$$\frac{dR}{R} = (1+2\nu) \cdot \frac{dl}{l} + \frac{d\rho}{\rho} \equiv k \cdot \varepsilon_M \qquad \rightarrow dR \quad \text{möglichst groß!}$$

„Diese Platte soll längs gedehnt werden!“



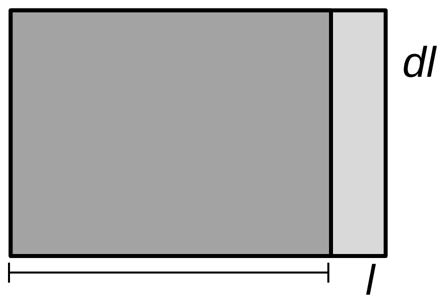

$$dR \sim R\frac{dl}{l}$$

i. Die Verwendung eines Pt-Drahts mit doppelter Länge?

Karlsruher Institut für Technologie

**Was bedeutet die Messempfindlichkeit erhöhen?**

$$\frac{dR}{R} = (1+2\nu)\cdot\frac{dl}{l} + \frac{d\rho}{\rho} \equiv k\cdot\varepsilon_M \qquad \rightarrow dR \quad \text{möglichst groß!}$$

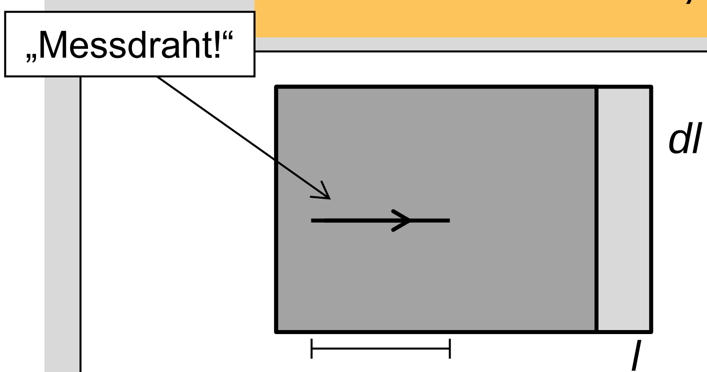



$$dR \sim R\frac{dl}{l}$$

i. Die Verwendung eines Pt-Drahts mit doppelter Länge?

Was bedeutet die Messempfindlichkeit erhöhen?

$$\frac{dR}{R} = (1+2\nu)\cdot\frac{dl}{l} + \frac{d\rho}{\rho} \equiv k\cdot\varepsilon_M \qquad \rightarrow dR \quad \text{möglichst groß!}$$



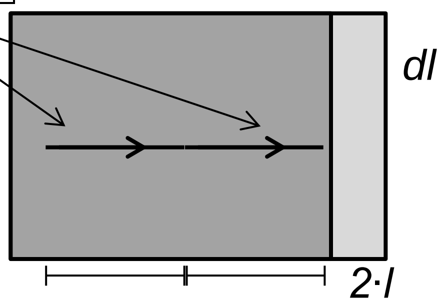

$$dR \sim R\,\frac{dl}{l}$$

i. Die Verwendung eines Pt-Drahts mit doppelter Länge?

Was bedeutet die Messempfindlichkeit erhöhen?

$$\frac{dR}{R} = (1+2\nu)\cdot\frac{dl}{l} + \frac{d\rho}{\rho} \equiv k \cdot \varepsilon_M \qquad \rightarrow dR \quad \text{möglichst groß!}$$

„2x Messdraht!“




$$dR \sim R\,\frac{dl}{l}$$

i. Die Verwendung eines Pt-Drahts mit doppelter Länge?

$$dR \sim \left(\rho \cdot \frac{2\cdot l}{A}\right)\frac{dl}{2\cdot l}$$

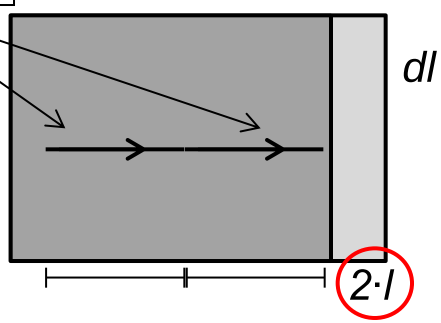
# Passive Bauelemente Wintersemester 2014
# Übung 3

Karlsruher Institut für Technologie

Was bedeutet die Messempfindlichkeit erhöhen?

$$\frac{dR}{R} = (1+2\nu)\cdot\frac{dl}{l} + \frac{d\rho}{\rho} \equiv k\cdot\varepsilon_M \qquad \rightarrow dR \quad \text{möglichst groß!}$$

„2x Messdraht!“



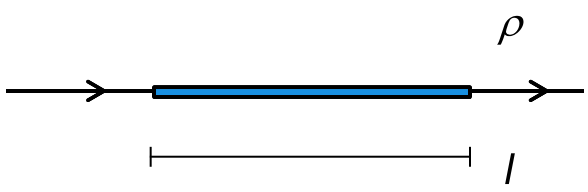

$$dR \sim R\frac{dl}{l}$$

~~i. Die Verwendung eines Pt-Drahts mit doppelter Länge?~~

$$dR \sim \left(\rho\cdot\frac{2\cdot l}{A}\right)\frac{dl}{2\cdot l}$$

Was bedeutet die Messempfindlichkeit erhöhen?

$$\frac{dR}{R} = (1+2\nu)\cdot\frac{dl}{l} + \frac{d\rho}{\rho} \equiv k\cdot\varepsilon_M \qquad \rightarrow dR \quad \text{möglichst groß!}$$



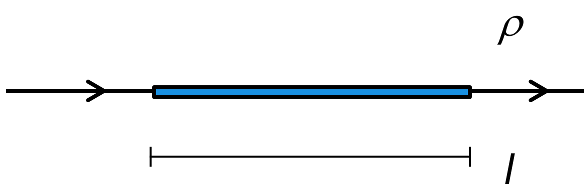

$$dR \sim R\cdot k\cdot\varepsilon_M$$

ii. Statt Pt einen Halbleiter verwenden?

Karlsruher Institut für Technologie

Was bedeutet die Messempfindlichkeit erhöhen?

$$\frac{dR}{R} = (1+2\nu)\cdot\frac{dl}{l} + \frac{d\rho}{\rho} \equiv k\cdot\varepsilon_M \qquad \rightarrow dR \quad \text{möglichst groß!}$$




$$dR \sim R\cdot k\cdot\varepsilon_M$$

ii. Statt Pt einen Halbleiter verwenden?

**Metallische Bindung**

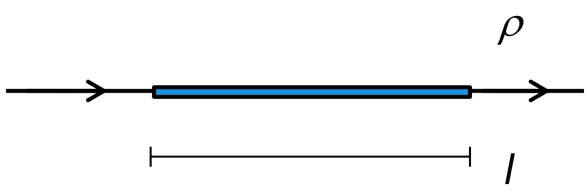
$k \approx 2$

**Halbleiter**

$|k| \approx 100 \ldots 200$

Was bedeutet die Messempfindlichkeit erhöhen?

$$\frac{dR}{R} = (1+2\nu)\cdot\frac{dl}{l} + \frac{d\rho}{\rho} \equiv k \cdot \varepsilon_M \qquad \rightarrow dR \quad \text{möglichst groß!}$$




$$dR \sim R \cdot k \cdot \varepsilon_M$$

ii. Statt Pt einen Halbleiter verwenden?

„Woher kommt dieser hohe k-Wert für Halbleiter?“

**Metallische Bindung**

$k \approx 2$

**Halbleiter**

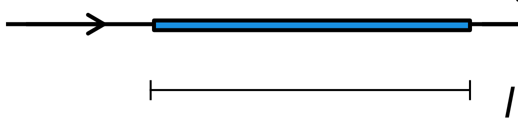
$|k| \approx 100 \ldots 200$

Karlsruher Institut für Technologie

Was bedeutet die Messempfindlichkeit erhöhen?

$$\frac{dR}{R} = (1+2\nu)\cdot\frac{dl}{l} + \frac{d\rho}{\rho} \equiv k\cdot\varepsilon_M \qquad \rightarrow dR \quad \text{möglichst groß!}$$

$$\rho = 1/\mu$$




$$dR \sim R\cdot k\cdot\varepsilon_M$$

$$dR \sim R\cdot\frac{d\rho}{\rho} \sim -R\cdot\frac{d\mu}{\mu}$$

„Woher kommt dieser hohe k-Wert für Halbleiter?"

ii. Statt Pt einen Halbleiter verwenden?

**Metallische Bindung**

$k \approx 2$

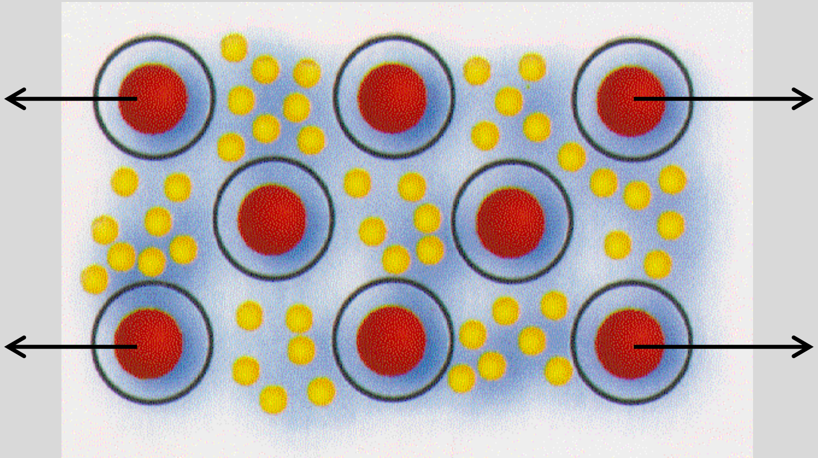
**Halbleiter**

$|k| \approx 100\ldots200$

$$\frac{d\mu}{\mu}$$ e- Beweglichkeit

## Metallische Bindung

$k \approx 2$

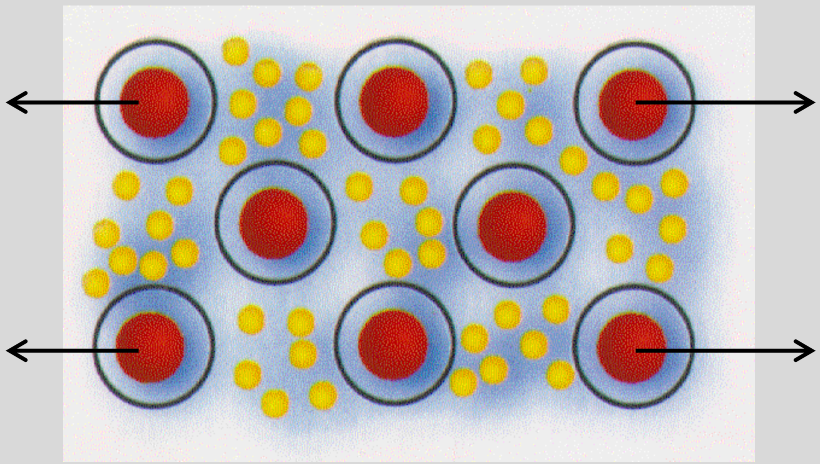


Für Dehnung von Metallen spielt die Beweglichkeit nur eine untergeordnete Rolle.

Karlsruher Institut für Technologie

$$\frac{d\mu}{\mu}$$ e- Beweglichkeit **bei HL deutlich stärker beeinflusst!**

## Metallische Bindung $k \approx 2$



Für Dehnung von Metallen spielt die Beweglichkeit nur eine untergeordnete Rolle.

## Halbleiter $|k| \approx 100 \ldots 200$

**Komplexer Zusammenhang**

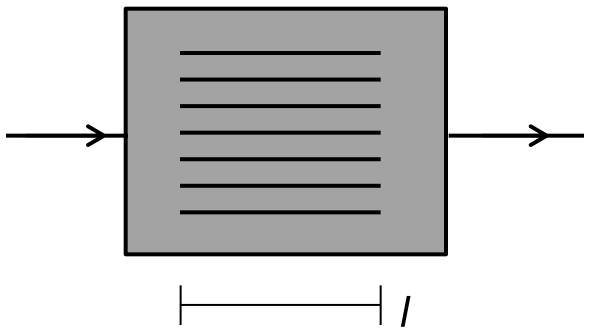
*„Bei beiden Effekten* ***modifiziert die mechanische Spannung den Bandverlauf im Halbleiter*** *durch piezoelektrisch induzierte Polarisation senkrecht zur Schichtebene. Der* ***modifizierte Bandverlauf bewirkt eine erhöhte bzw. erniedrigte Ladungsträgerdichte*** *und damit einen neuen Mechanismus der Piezoresistivität.“* [1]

n-dotiert: k < 0 p-dotiert k > 0

Karlsruher Institut für Technologie

Was bedeutet die Messempfindlichkeit erhöhen?

$$\frac{dR}{R} = (1+2\nu)\cdot\frac{dl}{l} + \frac{d\rho}{\rho} \equiv k \cdot \varepsilon_M \qquad \rightarrow dR \quad \text{möglichst groß!}$$

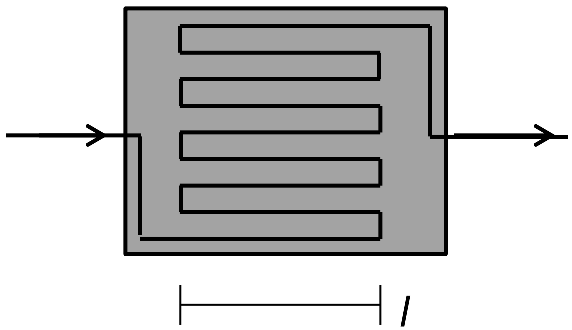



$$dR \sim R\frac{dl}{l}$$

iii. **Parallelanordnung** und serielle Verschaltung?

Was bedeutet die Messempfindlichkeit erhöhen?

$$\frac{dR}{R} = (1+2\nu)\cdot\frac{dl}{l} + \frac{d\rho}{\rho} \equiv k\cdot\varepsilon_M \qquad \rightarrow dR \quad \text{möglichst groß!}$$



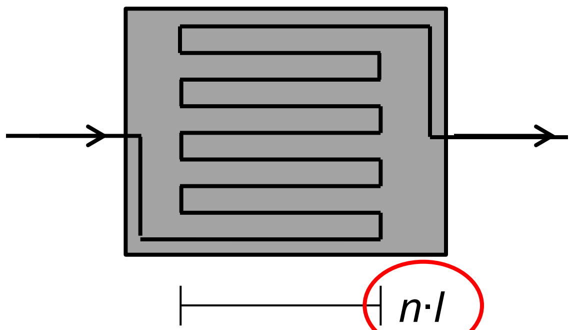

$$dR \sim R\frac{dl}{l}$$

iii. Parallelanordnung und **serielle Verschaltung**?

# Passive Bauelemente Wintersemester 2014
# Übung 3

Was bedeutet die Messempfindlichkeit erhöhen?

$$\frac{dR}{R} = (1+2\nu)\cdot\frac{dl}{l} + \frac{d\rho}{\rho} \equiv k\cdot\varepsilon_M \qquad \rightarrow dR \quad \text{möglichst groß!}$$



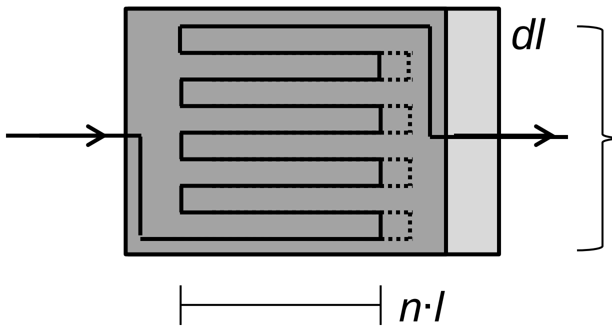

$$dR \sim R\frac{dl}{l} \sim \left(\rho\cdot\frac{n\cdot l}{A}\right)\cdot\frac{n\cdot dl}{n\cdot l}$$

*n = Anzahl parallel verschalteter Pt-Drähte*
*→vertikale Verschaltung*
*fällt bei Längsdehnung weg.*

iii. Parallelanordnung und serielle Verschaltung?

Was bedeutet die Messempfindlichkeit erhöhen?

$$\frac{dR}{R} = (1+2\nu)\cdot\frac{dl}{l} + \frac{d\rho}{\rho} \equiv k\cdot\varepsilon_M \qquad \rightarrow dR \quad \text{möglichst groß!}$$



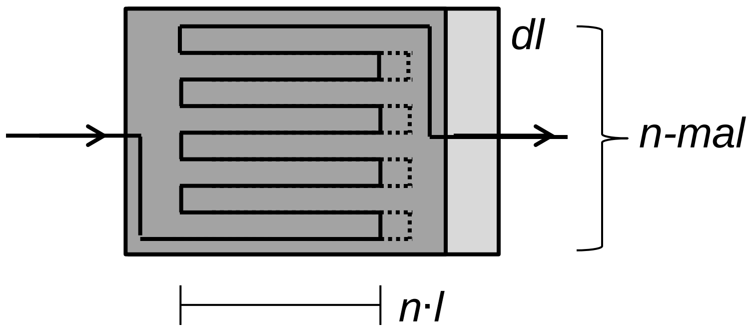

$$dR \sim R\frac{dl}{l} \sim \left(\rho\cdot\frac{n\cdot l}{A}\right)\cdot\frac{n\cdot dl}{n\cdot l}$$

*n = Anzahl parallel verschalteter Pt-Drähte*
*→vertikale Verschaltung*
*fällt bei Längsdehnung weg.*

iii. Parallelanordnung und serielle Verschaltung?

Was bedeutet die Messempfindlichkeit erhöhen?

$$\frac{dR}{R} = (1+2\nu)\cdot\frac{dl}{l} + \frac{d\rho}{\rho} \equiv k\cdot\varepsilon_M \qquad \rightarrow dR$$ möglichst groß!




$$dR \sim R\frac{dl}{l} \sim \left(\rho\cdot\frac{n\cdot l}{A}\right)\cdot\frac{n\cdot dl}{n\cdot l}$$

*n = Anzahl parallel verschalteter Pt-Drähte*
*→vertikale Verschaltung*
*fällt bei Längsdehnung weg.*

iii. Parallelanordnung und serielle Verschaltung?

$$dR \sim \left(\rho\cdot\frac{l}{A}\right)\cdot\frac{n\cdot dl}{l} \rightarrow \frac{dR}{R} \sim n\frac{dl}{l}$$

Messempfindlichkeit erhöht um Faktor n!

# Vielen Dank!