



Ankündigung

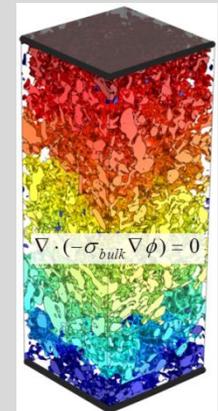


Freitag 30.01.2015,
09:45 Uhr – 11:15 Uhr

Institutsführung IWE



- ➔ Labor Li-Ionen Batterien groß (Automobilbereich)
- ➔ Labor Li-Ionen Batterien klein (Experimentalzellen)
- ➔ Labor Brennstoffzellen
- ➔ Rasterelektronenmikroskop
- ➔ Elektroauto I3



Treffpunkt: 09:45 Uhr, Gebäude 50.40, 3. Stock

Passive Bauelemente Wintersemester 2014/15

Veranstaltungszeiten

Gewicht: 3 SWS
4,5 ECTS

Zeit und Ort: Montag, 15.45 – 17.15 Uhr, 90 min, Hörsaal Daimler
Freitag, 09.45 – 11.15 Uhr, 90 min, Hörsaal Neue Chemie

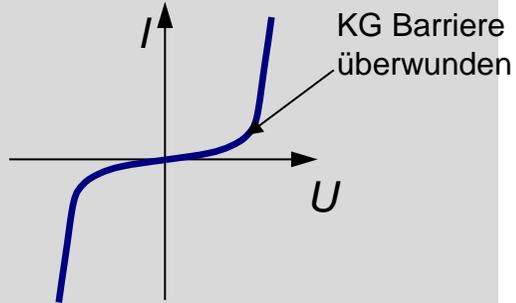
Termin		Veranstaltung	Termin		Veranstaltung
Montag	20.10.2014	frei	Montag	29.12.2014	frei
Freitag	24.10.2014	frei	Freitag	02.01.2015	frei
Montag	27.10.2014	frei	Montag	05.01.2015	frei
Freitag	31.10.2014	Vorlesung 1	Freitag	09.01.2015	frei
Montag	03.11.2014	frei	Montag	12.01.2015	Vorlesung 9
Freitag	07.11.2014	Vorlesung 2	Freitag	16.01.2015	Vorlesung 10
Montag	10.11.2014	Vorlesung 3	Montag	19.01.2015	Vorlesung 11
Freitag	14.11.2014	Übung 1	Freitag	23.01.2015	Übung 6
Montag	17.11.2014	Vorlesung 4	Montag	26.01.2015	Vorlesung 12
Freitag	21.11.2014	Vorlesung 5	Freitag	30.01.2015	Institutsführung
Montag	24.11.2014	Übung 2	Montag	02.02.2015	Übung 7
Freitag	28.11.2014	Vorlesung 6	Freitag	06.02.2015	Vorlesung 13
Montag	01.12.2014	frei	Montag	09.02.2015	Übung 8
Freitag	05.12.2014	Übung 3	Freitag	13.02.2015	frei
Montag	08.12.2014	Vorlesung 7			
Freitag	12.12.2014	Übung 4			
Montag	15.12.2014	Vorlesung 8	Donnerstag	19.02.2015	Klausurtermin
Freitag	19.12.2014	Übung 5			
Montag	22.12.2014	frei			
Freitag	25.12.2014	frei			

**Klausurvorbereitung
am 12.02.2015, nachmittags
→ Termin wird auf Homepage
rechtzeitig bekannt gegeben**

Übung 5

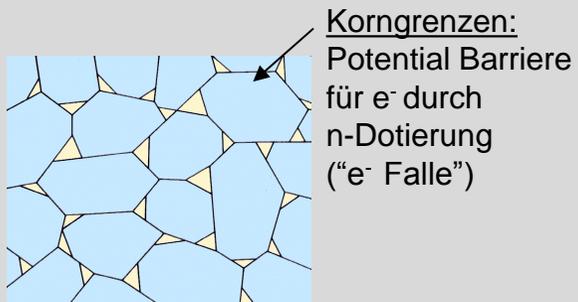
Varistor

→ R fällt mit Spannung

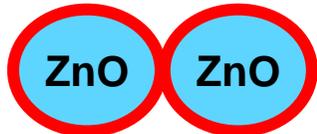


Bsp: n-dot. ZnO (Metalloxid)

Korngrenzeffekte

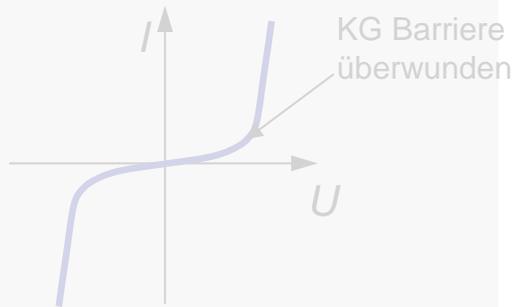


KG → Akzeptor (e- Falle)



Varistor

→ R fällt mit Spannung



Bsp: n-dot. ZnO (Metalloxid)

Korngrenzeffekte

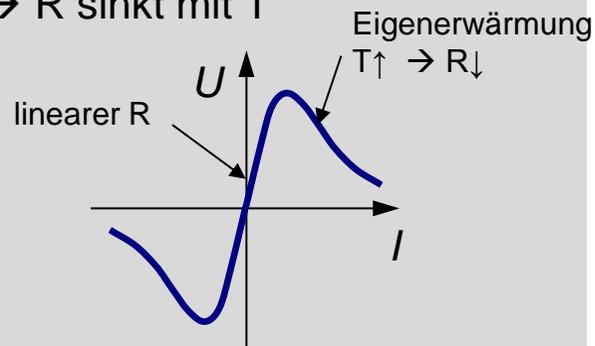


KG → Akzeptor (e- Falle)



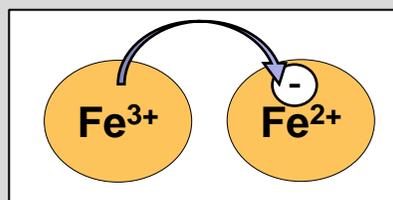
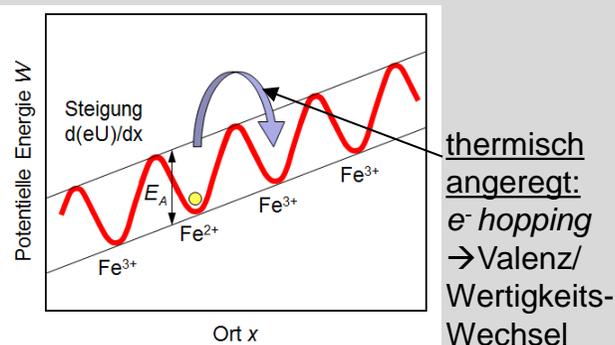
Heißleiter NTC

→ R sinkt mit T



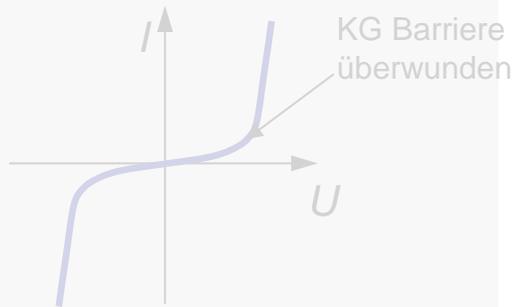
Bsp: (Ni,Mn)₃O₄ (Spinell = AB₃O₄)

Eigenerwärmung



Varistor

→ R fällt mit Spannung

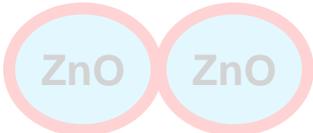


Bsp: n-dot. ZnO (Metalloxid)

Korngrenzeffekte

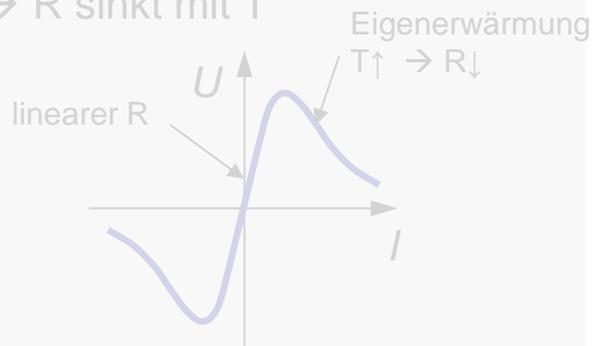


KG → Akzeptor (e- Falle)



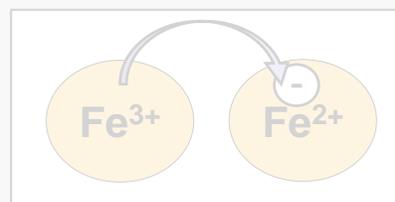
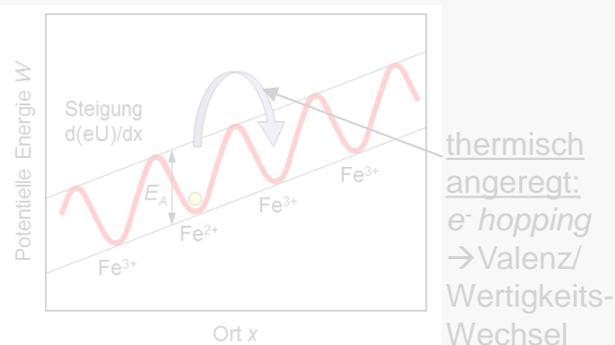
Heißeleiter NTC

→ R sinkt mit T



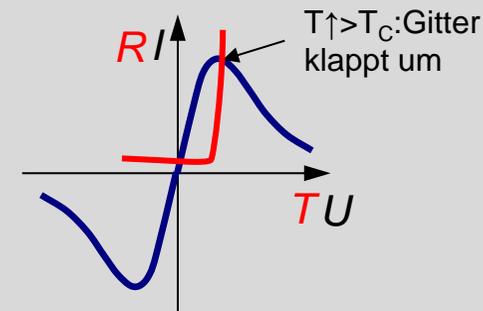
Bsp: (Ni,Mn)₃O₄ (Spinell = AB₃O₄)

Eigenerwärmung



Kaltleiter PTC

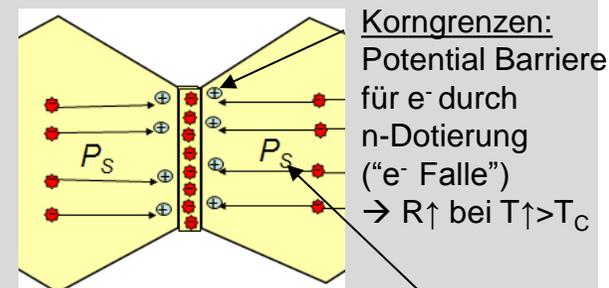
→ R steigt mit T



Bsp: n-dot. BaTiO₃ (Ferroelektrika / Perowskit = ABO₃)

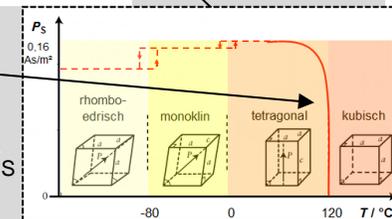
Korngrenzeffekte

Eigenerwärmung



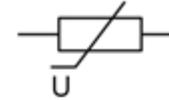
thermisch angeregt:

Gitter klappt um
→ Polarisation P_s setzt aus



A1: Varistor

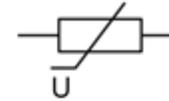
Ein Varistor (variable resistor) hat im Vergleich zu einem Thermistor (PTC/NTC) eine vernachlässigbare Temperaturabhängigkeit des Widerstands. Eingesetzt wird er zum Beispiel als Überspannungsschutz, da erst ab einer bestimmten Spannung (U_K) seinen Widerstand verringert und elektrisch gut leitend wird. Diese Eigenschaften sind maßgeblich durch Sperrschichten an den Korngrenzen verursacht, welche entsprechend im Herstellungsprozess beeinflusst werden können.



a) Gegeben ist die Strom-Spannungskennlinie eines ZnO-Varistors (Bild 1). Welchen Bereich der Kennlinie beschreibt die Varistorgleichung aus der Formelsammlung? Tragen Sie den Gültigkeitsbereich in das Diagramm ein. **(1 Punkt)**

A1: Varistor

Ein Varistor (variable resistor) hat im Vergleich zu einem Thermistor (PTC/NTC) eine vernachlässigbare Temperaturabhängigkeit des Widerstands. Eingesetzt wird er zum Beispiel als Überspannungsschutz, da erst ab einer bestimmten Spannung (U_K) seinen Widerstand verringert und elektrisch gut leitend. Eigenschaften sind maßgeblich durch Sperrschichten an den Korngrenzen, die entsprechend im Herstellungsprozess beeinflusst werden können.



a) Gegeben ist die Strom-Spannungskennlinie eines ZnO-Varistors (Bild 1). Von der Kennlinie beschreibt die Varistorgleichung aus der Formelsammlung? Gültigkeitsbereich in das Diagramm ein. (1 Punkt)

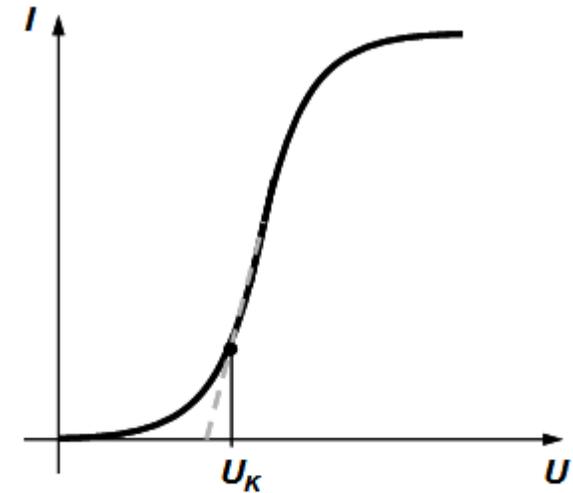


Bild 1: ZnO-Varistorkennlinie.

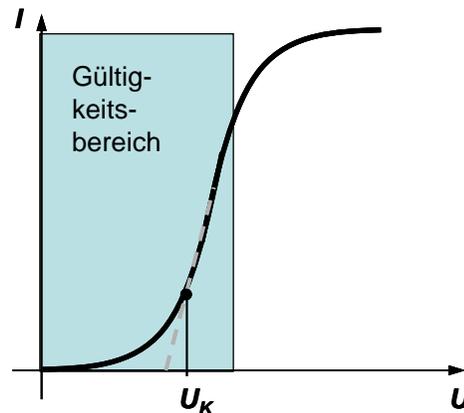
Varistoren Kennlinie

$$I = \pm I_0 \cdot \left| \frac{U}{U_0} \right|^\alpha$$

α : Nichtlinearitätskoeffizient

I_0 : Nennansprechstrom

$U_0 = U_K$: Nennansprechspannung



Vergleich

$$f(x) = A \cdot x^n$$

⇒ “nur Mathematik”

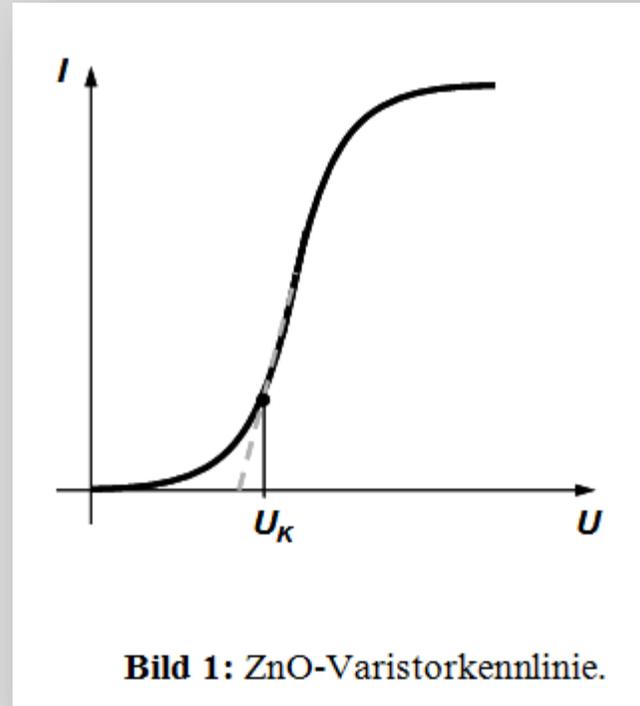
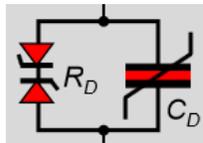


Bild 1: ZnO-Varistorkennlinie.

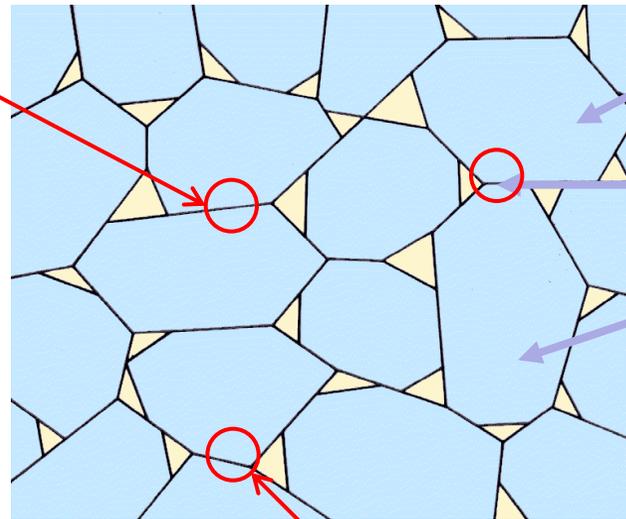
b) Geben Sie eine physikalisch sinnvolle Erklärung für den Verlauf der Kennlinie außerhalb des Gültigkeitsbereichs der Varistorgleichung an. Machen Sie sich dazu bewusst, welcher Mechanismus bei Varistoren für das typische Verhalten verantwortlich ist. **(1 Punkt)**

Schema des Gefüges einer ZnO-Varistorkeramik

Sperrschichten werden abgebaut!



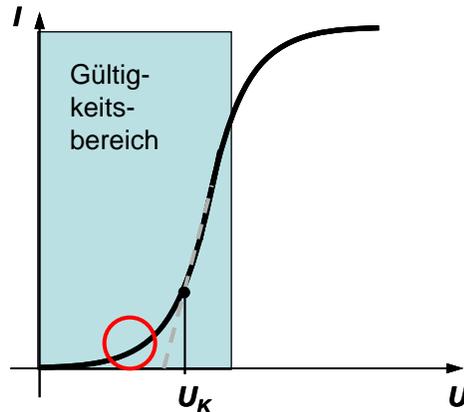
R_D (vgl. Diode) und C_D spannungsabhängig



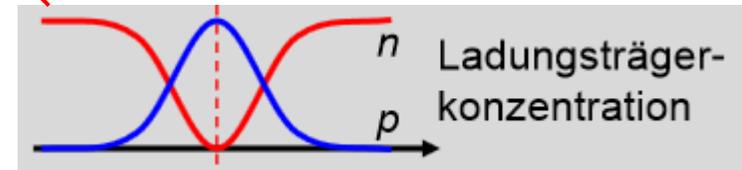
ZnO-Korn

n-dotierte KG

σ KG

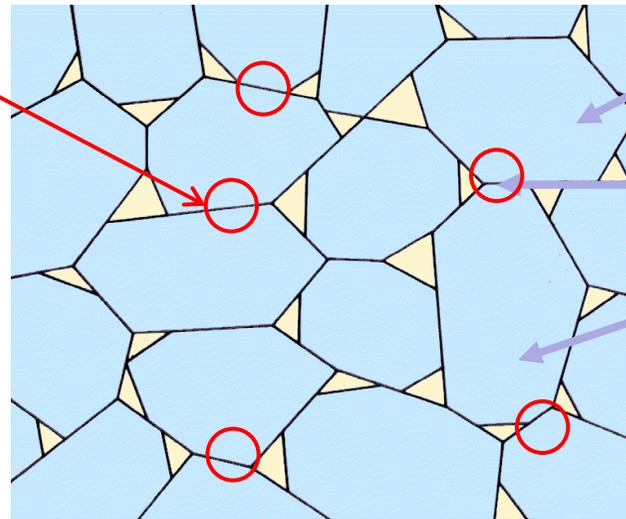


Sperrschichten werden abgebaut!



Schema des Gefüges einer ZnO-Varistorkeramik

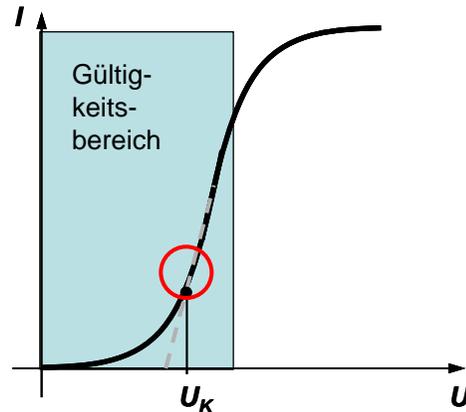
Mehr Sperrschichten
werden abgebaut!



ZnO-Korn

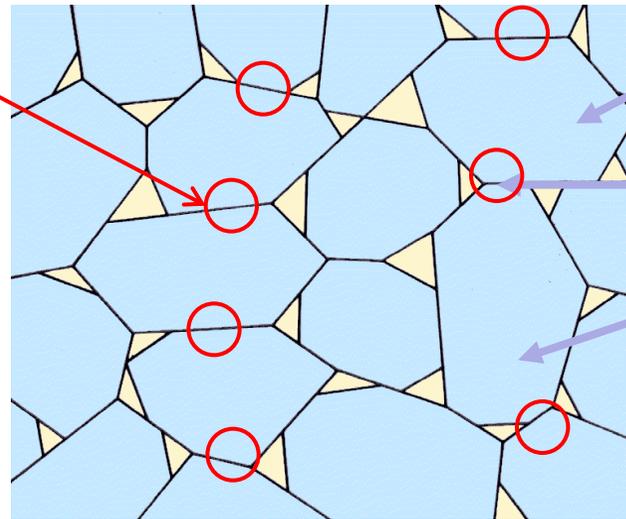
n-dotierte KG

σ KG



Schema des Gefüges einer ZnO-Varistorkeramik

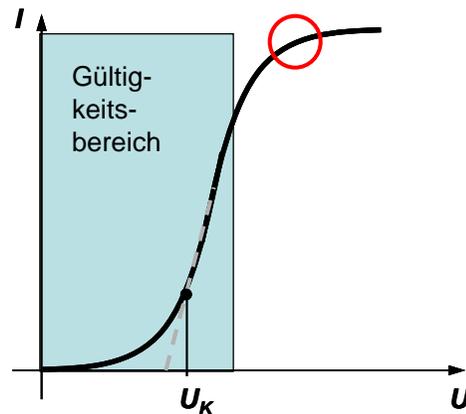
Alle Sperrschichten sind abgebaut!



ZnO-Korn

n-dotierte KG

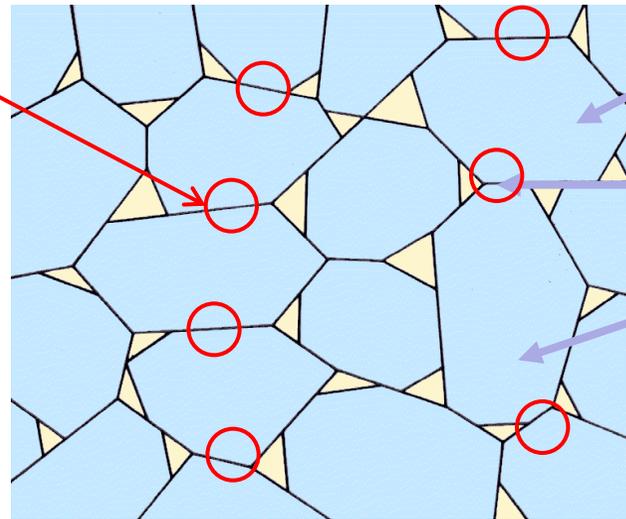
σ KG



Alle Potenzialbarrieren an den Korngrenzen bei Überschreiten der Durchbruchspannung/Korngrenze durchbrochen

Schema des Gefüges einer ZnO-Varistorkeramik

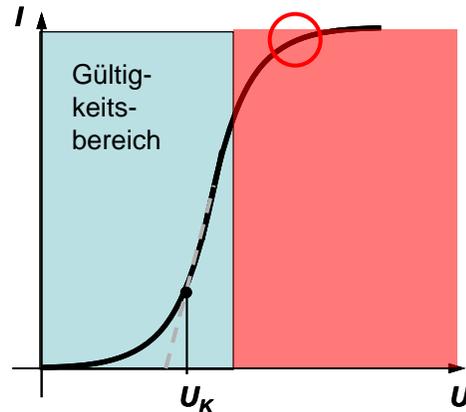
Alle Sperrschichten sind abgebaut!



ZnO-Korn

n-dotierte KG

σ KG



Alle Potenzialbarrieren an den Korngrenzen bei Überschreiten der Durchbruchspannung/Korngrenze durchbrochen

→ alle Körner tragen zur Leitung bei

→ α sinkt auf 1

→ Widerstand der Körner begrenzt Strom

$$I = \pm I_0 \cdot \left| \frac{U}{U_0} \right|^\alpha \Rightarrow I = \frac{U^{\alpha \rightarrow 1}}{R}$$

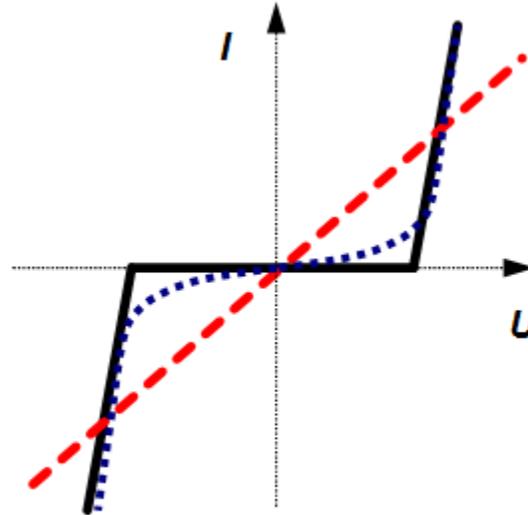


Bild 2: Verschiedene ZnO-Varistorkennlinien.

c) Sie wollen einen Varistor als Überspannungsschutz für einen Verbraucher installieren und es liegen Ihnen drei Varistorkennlinien vor (rot, blau und schwarz in Bild 2). Ordnen Sie die Werte für den Nichtlinearitätskoeffizient $\alpha = 100$, 3 und 1 den Kennlinien zu. Welcher Varistor ist geeignet, um Ihren Verbraucher bis hin zu hohen Spannungen abzusichern?

Varistoren Kennlinie

$$I = \pm I_0 \cdot \left| \frac{U}{U_0} \right|^\alpha$$

↖ ⊙ α ↗ geometrieabhängig

$\alpha=1$ 

$\alpha=3$ 

$\alpha=100$ 

α : Nichtlinearitätskoeffizient

I_0 : Nennansprechstrom

$U_0 = U_K$: Nennansprechspannung

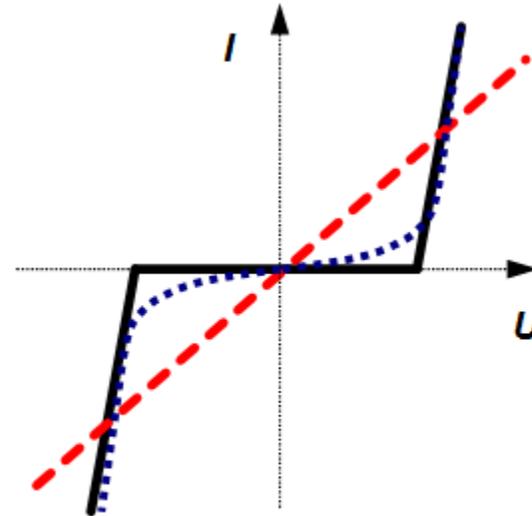


Bild 2: Verschiedene ZnO-Varistorkennlinien.

Varistoren Kennlinie

$$I = \pm I_0 \cdot \left| \frac{U}{U_0} \right|^\alpha$$

geometrieabhängig

$\alpha=1$ 

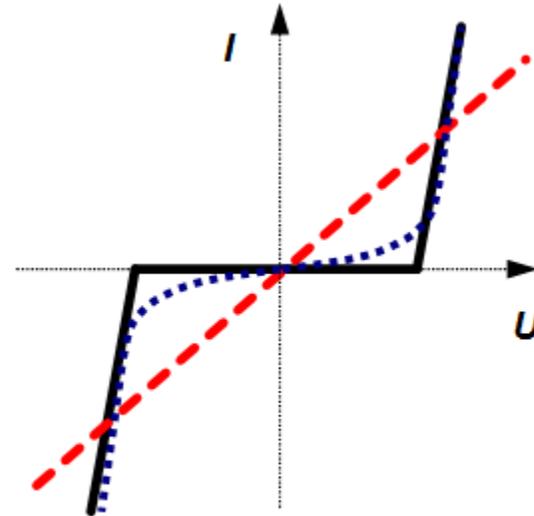
$\alpha=3$ 

$\alpha=100$ 

α : Nichtlinearitätskoeffizient

I_0 : Nennansprechstrom

$U_0 = U_K$: Nennansprechspannung



Nichtlinearitätskoeffizient:

„Wie sehr neigen alle Korngrenzen dazu gleichzeitig den Strom durchzulassen“

→ Abhängig von KG-Barriere

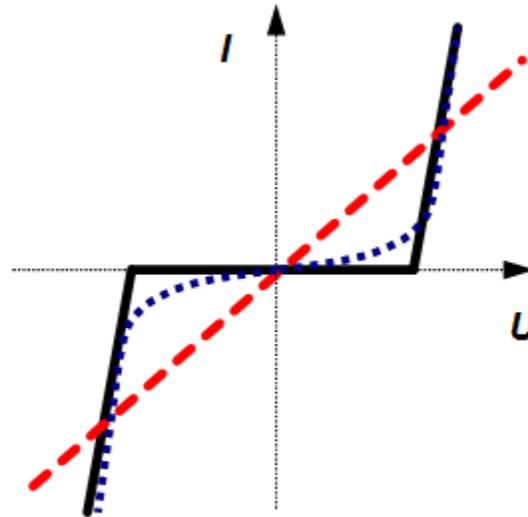


Bild 2: Verschiedene ZnO-Varistorkennlinien.

Hinweis: Für ein besseres Verständnis von α überlegen Sie sich, was für ein Widerstandsverhalten die rote Kennlinie aufweist und wie die Relation zwischen Spannung und Strom hier ist!

Varistoren
Kennlinie

$$I = \pm I_0 \cdot \left| \frac{U}{U_0} \right|^\alpha$$

mit $\alpha=1$

$$I = \pm \underbrace{\frac{I_0}{|U_0|}}_{\text{konst.}} \cdot |U|$$

Bekannt:
ohmsches Gesetz mit
linearem Verhalten.

$$I = \frac{1}{R} \cdot U$$

d) Stellen Sie die Elektroneutralitätsbedingung für niedrige Temperaturen in einem ZnO-Varistor auf. Zeichnen Sie qualitativ die Verteilung der Zinkleerstellenkonzentration $[V_{Zn}'']$ und der Elektronenkonzentration n über das gesamte ZnO-Korn in Bild 3 ein.

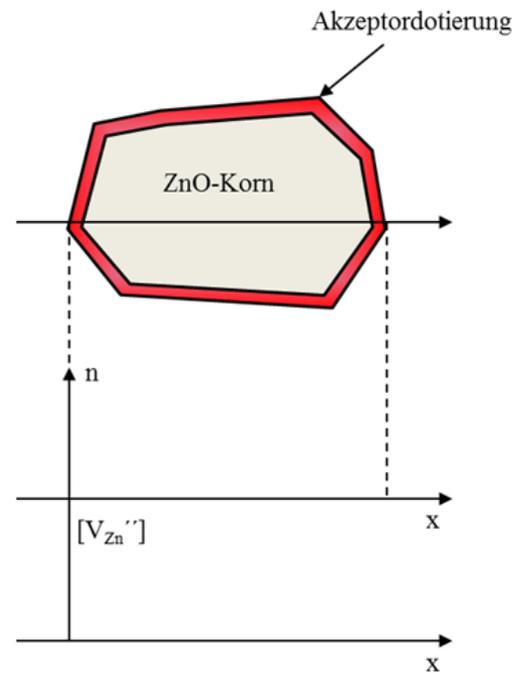
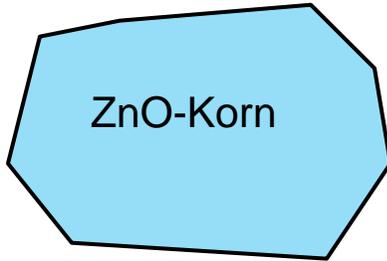
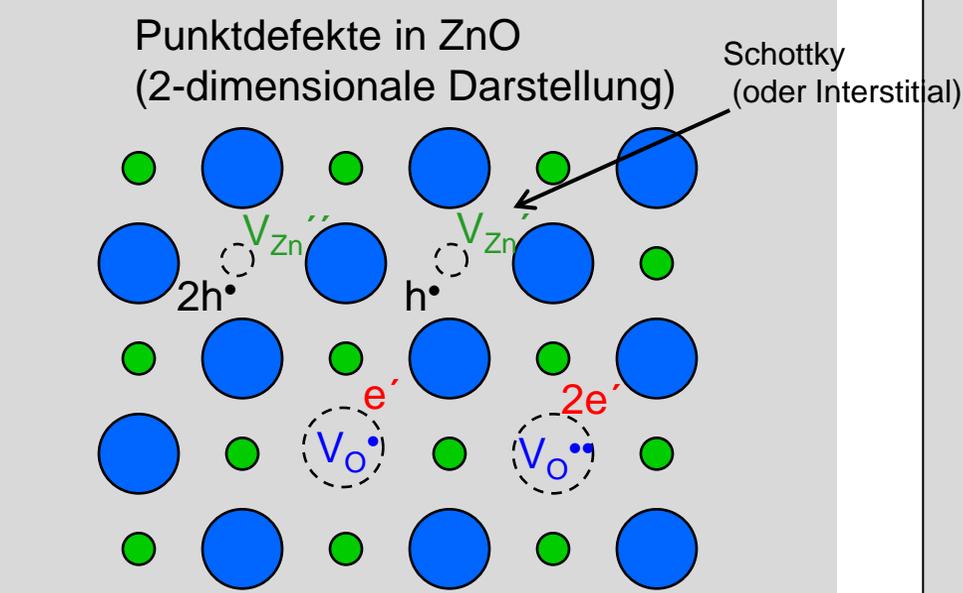


Bild 3: Verteilung der Zinkleerstellen- und Elektronenkonzentration in einem ZnO-Korn.



Aufstellen der allgemeinen ENB

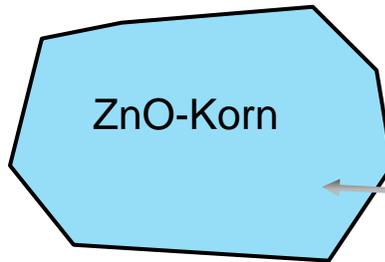
Punktdefekte in ZnO
(2-dimensionale Darstellung)



Schottky
(oder Interstitial)

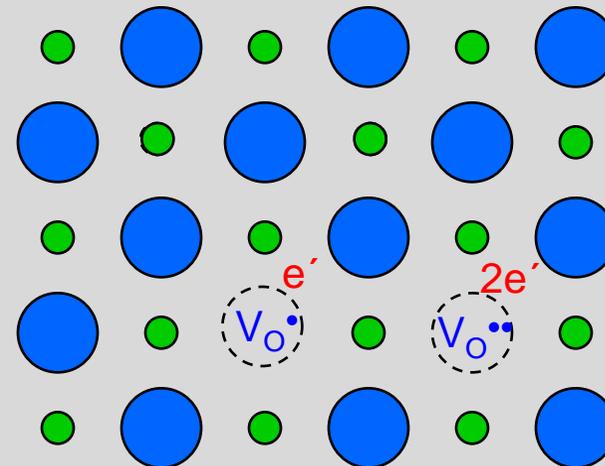
Elektroneutralitätsbedingung

$$n + [V_{Zn}'] + 2[V_{Zn}''] = p + [V_O\bullet] + 2[V_O\bullet\bullet]$$



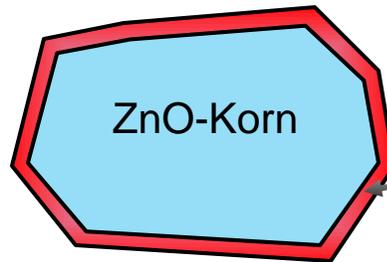
Hohe Temperatur $\approx 1300\text{ }^{\circ}\text{C}$

Punktdefekte in ZnO
(2-dimensionale Darstellung)



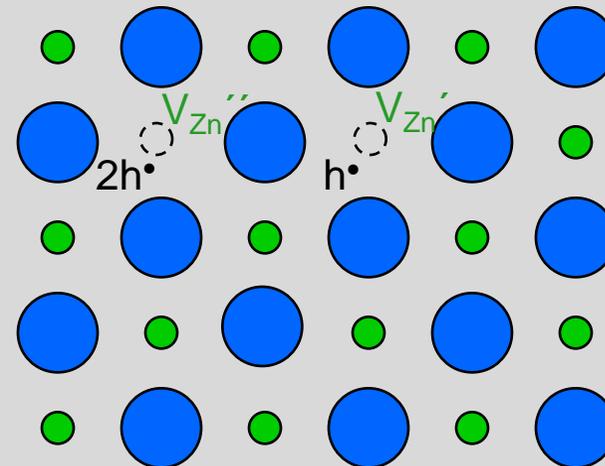
Elektroneutralitätsbedingung

$$n + [V_{Zn}'] + 2[V_{Zn}''] = p + [V_O\cdot] + 2[V_O\bullet\bullet]$$



Abkühlvorgang 1300 → 20°C

Punktdefekte in ZnO
(2-dimensionale Darstellung)



Elektroneutralitätsbedingung

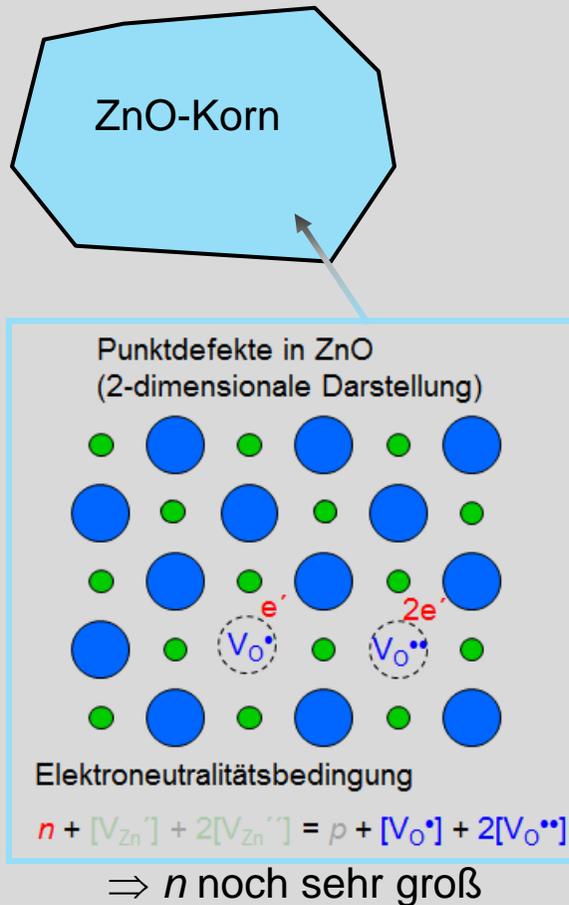
$$n + [V_{Zn}'] + 2[V_{Zn}''] = p + [V_O\cdot] + 2[V_O\bullet\bullet]$$

Passive Bauelemente Wintersemester 2014

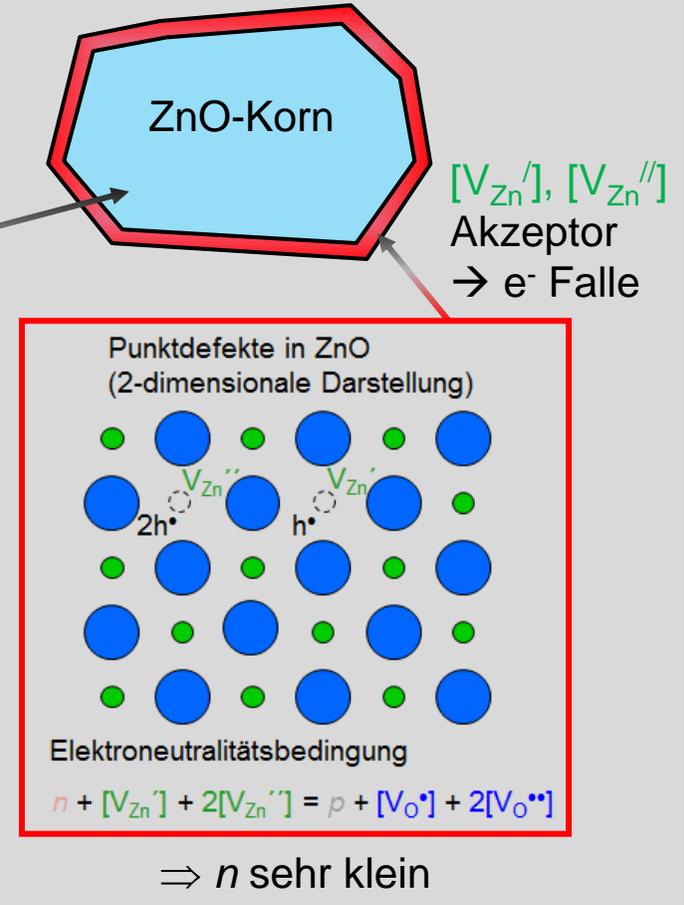
Übung 5 - Einstellung der Korngrenzeigenschaften

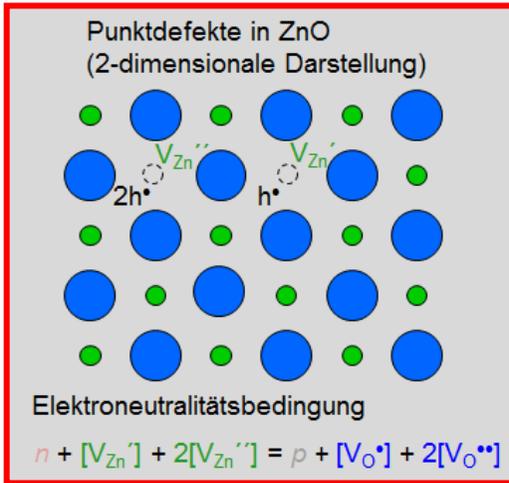
Hohe Temperatur (Herstellung $\approx 1300\text{ }^\circ\text{C}$)

Niedrige Temperatur (Betrieb $< 100\text{ }^\circ\text{C}$)

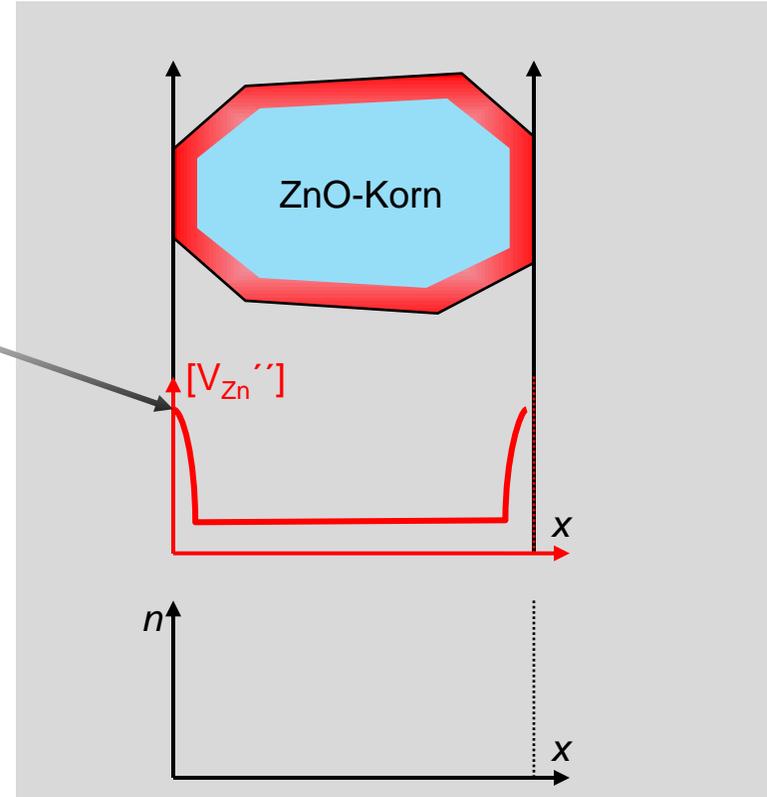


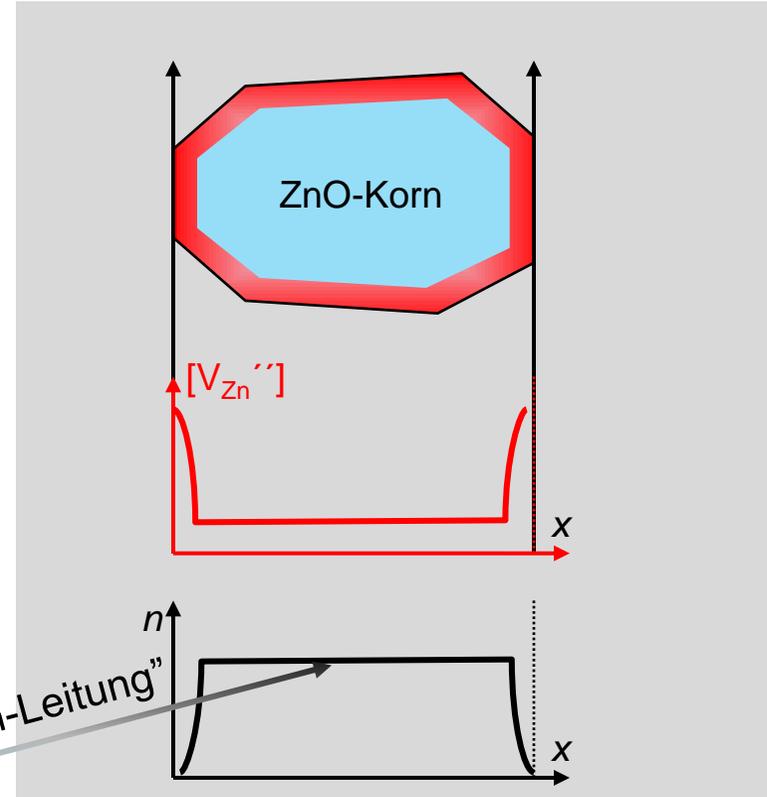
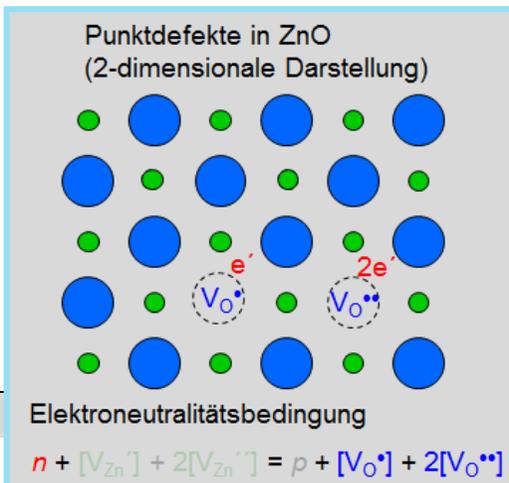
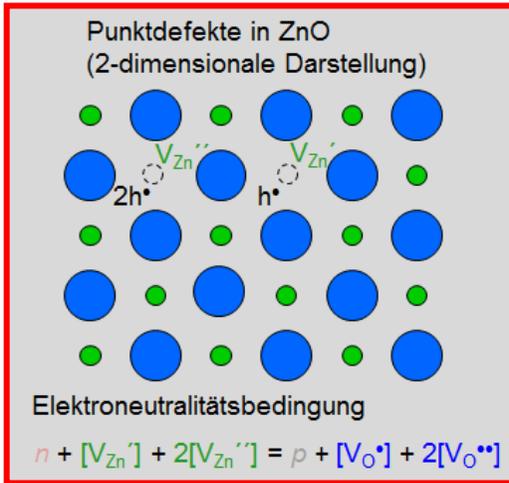
“eingefrorene n-Leitung”



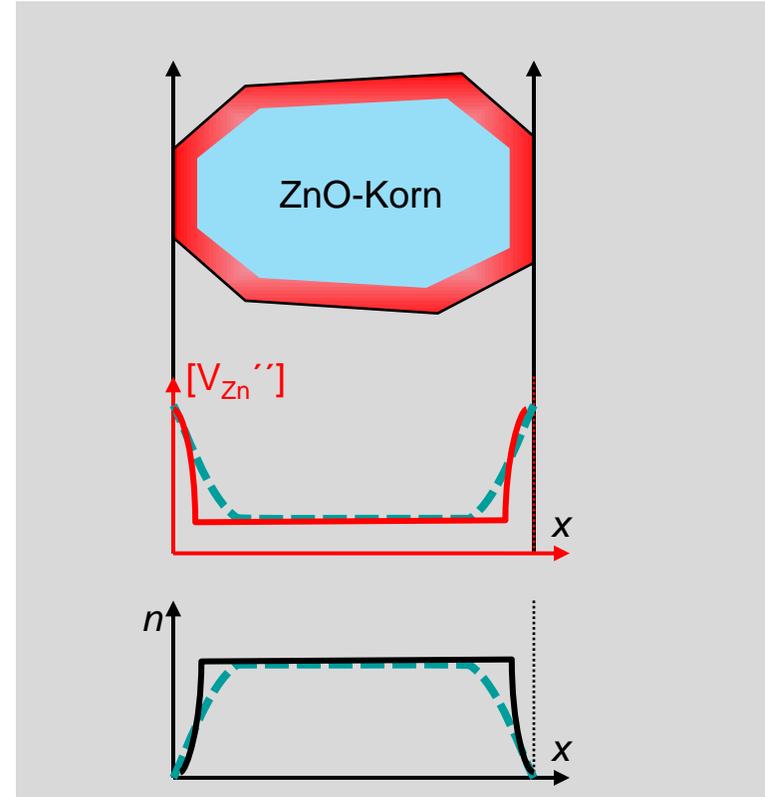


$[V_{Zn}'], [V_{Zn}''']$





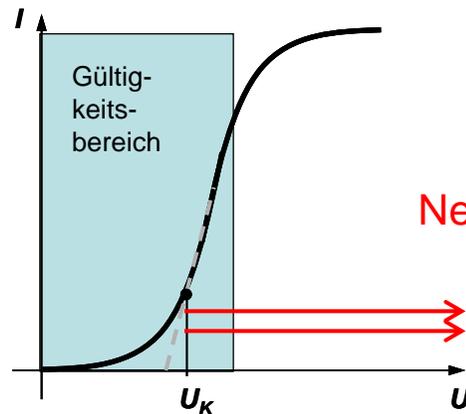
Klausurhinweis:
Für die Klausur: „Qualitativ
muss es richtig sein“.



e) Geben Sie nun zwei Maßnahmen an, die zu einer Erhöhung der Durchbruchspannung U_K bei ZnO-Varistoren führen. **(1 Punkt)**

$U_0 = U_K$: Nennansprechspannung

Ab hier fließt eine definierte
Ladungsmenge ($I_0 = 1A$).

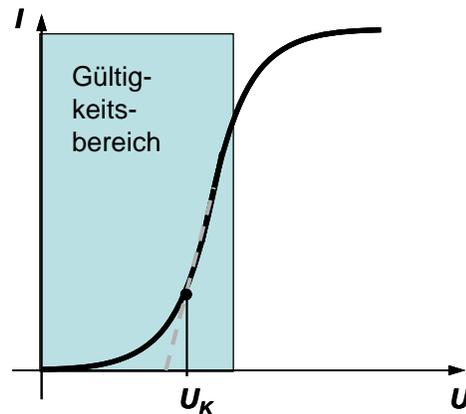
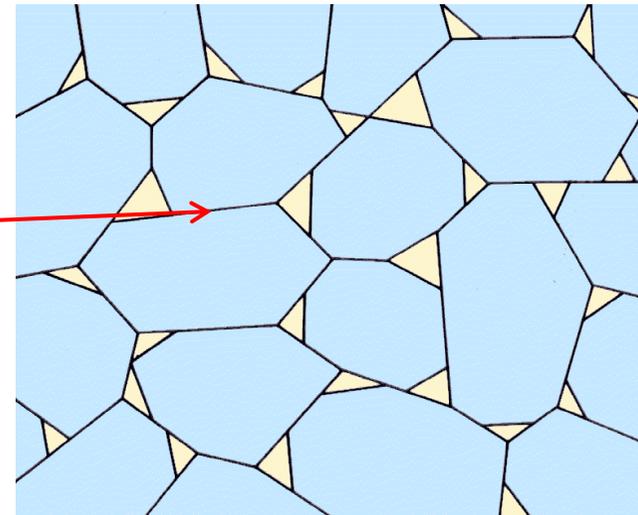
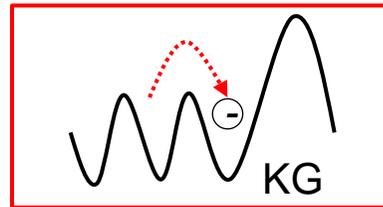


Nennansprechspannung erhöhen!

$U_0=U_K$: Nennansprechspannung

Ab hier fließt eine definierte
Ladungsmenge ($I_0=1A$).

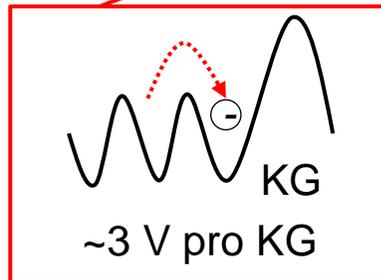
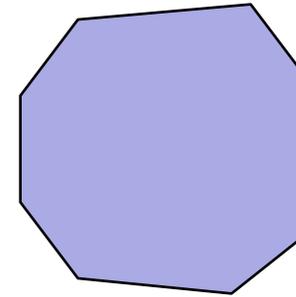
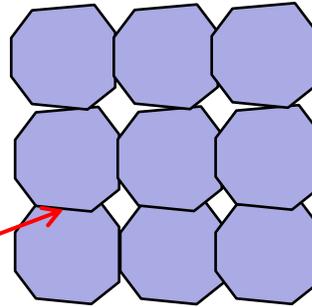
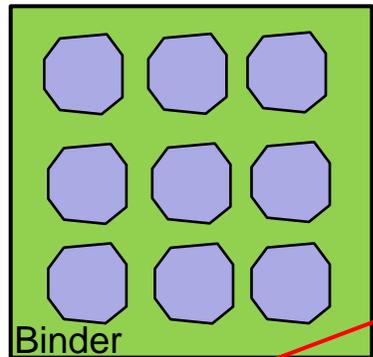
„Der Varistor erhält seine Eigenschaften
durch Sperrschichten an den Korngrenzen.“



$U_0 = U_K$: Nennansprechspannung

Ab hier fließt eine definierte
Ladungsmenge ($I_0 = 1A$).

Sintern: Körner „wachsen“ zusammen. → **Weniger Korngrenzen.**



Temperatur / Zeit

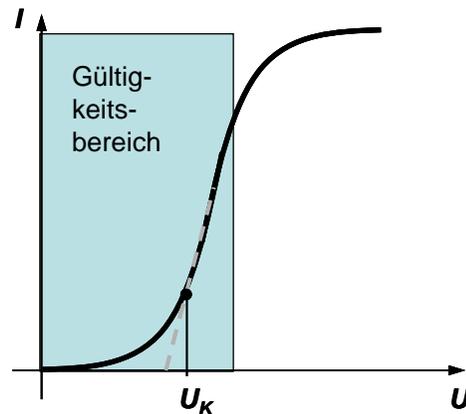
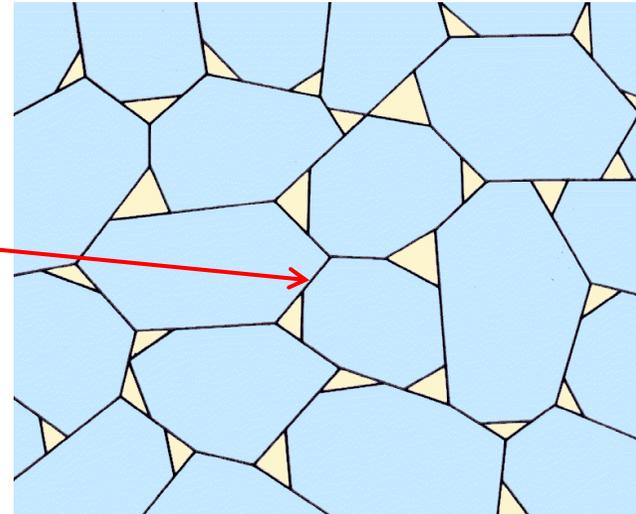
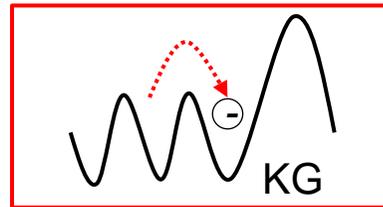
1) Einsatz kleinerer Körner durch geringere
Sintertemperatur = mehr Korngrenzen.

$$\rightarrow U_0 \sim (n_{\text{Korngrenzen}}) \cdot 3 \text{ V}$$

$U_0=U_K$: Nennansprechspannung

Ab hier fließt eine definierte
Ladungsmenge ($I_0=1A$).

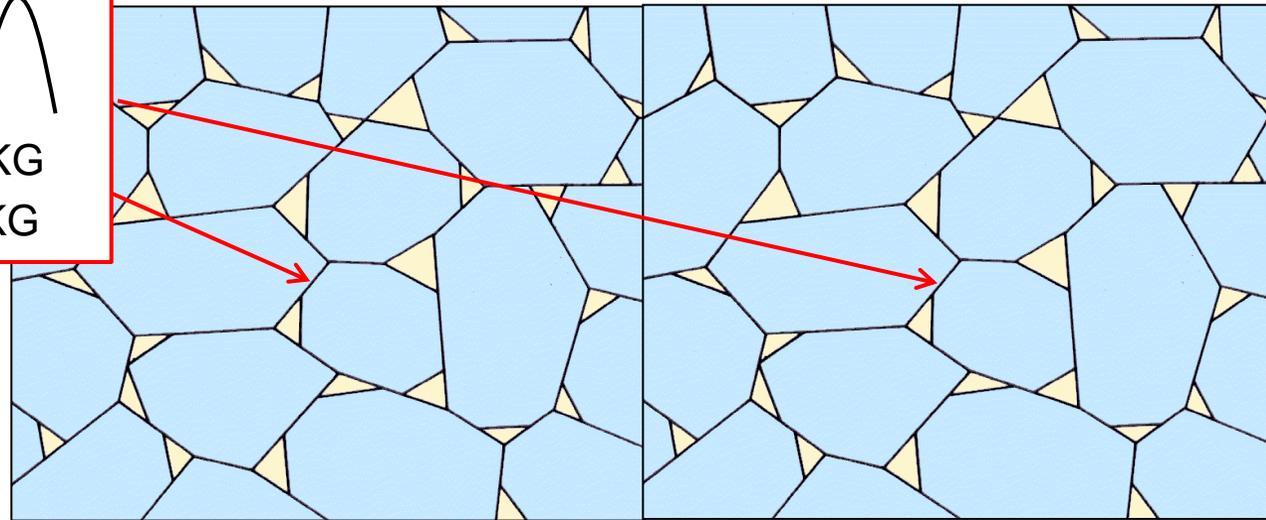
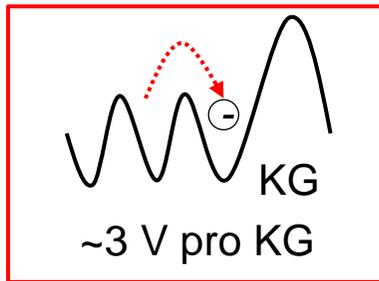
„Der Varistor erhält seine Eigenschaften
durch Sperrschichten an den Korngrenzen.“



2) Erhöhung der Varistordicke bei gleicher Korngröße
oder Serienschaltung von Varistoren gleicher Bauform

$U_0 = U_K$: Nennansprechspannung

Ab hier fließt eine definierte
Ladungsmenge ($I_0 = 1A$).



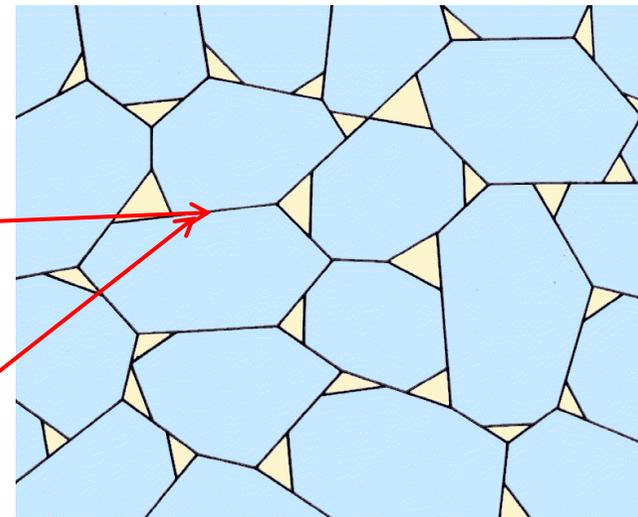
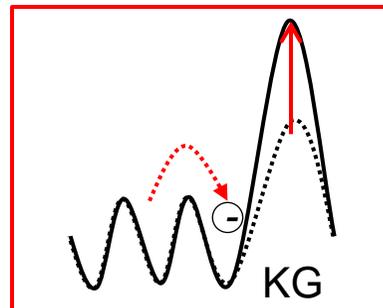
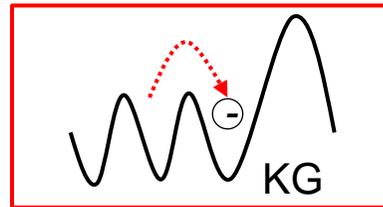
2) Erhöhung der Varistordicke bei gleicher Korngröße
oder Serienschaltung von Varistoren gleicher Bauform

$$\rightarrow U_0 \sim (n_{\text{Varistoren}}) \cdot U_K$$

$U_0=U_K$: Nennansprechspannung

Ab hier fließt eine definierte
Ladungsmenge ($I_0=1A$).

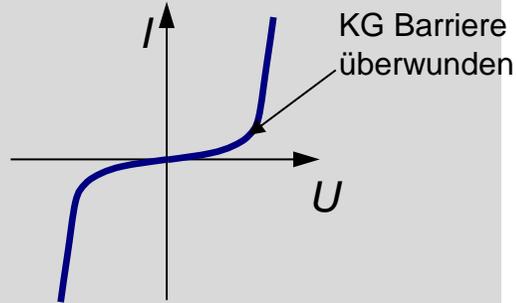
„Der Varistor erhält seine Eigenschaften
durch Sperrschichten an den Korngrenzen.“



3) stärkere Akzeptordotierung an
Korngrenzen.

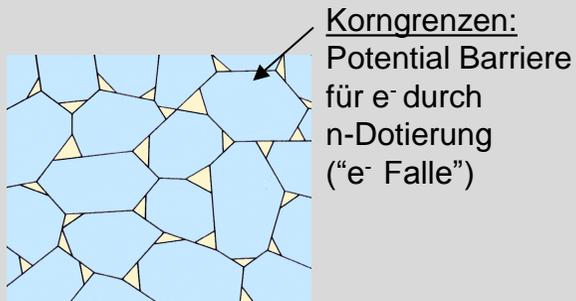
Varistor

→ R fällt mit Spannung

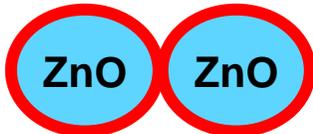


Bsp: n-dot. ZnO (Metalloxid)

Korngrenzeffekte



KG → Akzeptor (e⁻ Falle)



Zusammenfassung

Varistor:

Varistor Kennlinie

Beschreibt das Strom Verhalten eines Varistors in Abhängigkeit von der angelegten Spannung. ✓

Varistor Gleichung

Def. Nennansprechspannung/-strom ($I_0/U_{0=K}$) bei 1A Strom fließt.
 α : wie „sehr sich der Varistor nicht-linear verhält“. ✓

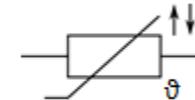
Varistor Funktionsweise

Sperrschichten an den Korngrenzen, die beeinflussbar durch:

- Dotierung (=mehr Akzeptoren → größere Sperrschichten)
- Sinterprozess (geringere Korngrößen → höhere U_0)
- Durchbruchspannung kann mit Dioden assoziiert werden. ✓

A2: Heißleiter NTC

Heißleiter (NTC) werden als Sensoren für verschiedenste Anwendungen eingesetzt, beispielsweise als Temperaturfühler. Die Eigenschaften des NTCs können beim Herstellungsprozess in Form von Mischungsverhältnissen von den verwendeten Oxiden, Dotierung und Umgebungsbedingungen beim Sintern (reduzierende Atmosphäre um Sauerstoffleerstellen zu generieren) bzw. dem Abkühlvorgang produktspezifisch angepasst werden.



a) Die Abhängigkeit des elektrischen Widerstands R von der Temperatur T_{Th} (in °C) ist im folgenden Diagramm (Bild 4) für einen solchen Heißleiter gezeigt. Bestimmen Sie die Aktivierungsenergie E_A und den Koeffizienten A zur Beschreibung der Temperaturabhängigkeit von R gemäß der Beziehung $R(T_{Th}) = A \cdot \exp(E_A / (k_B \cdot T_{Th}))$. (3 Punkte)

A2: Heißleiter NTC

Heißleiter (NTC) werden als Sensoren für verschiedenste Anwendungen eingesetzt, beispielsweise als Temperaturfühler. Die Eigenschaften des NTCs können beim Herstellungsprozess in Form von Mischungsverhältnissen von den verwendeten Oxiden, Dotierung und Umgebungsbedingungen beim Sintern (reduzieren) bzw. dem Abkühlvorgang

a) Die Abhängigkeit des elektrischen Widerstands R von der Temperatur T_{Th} ist im Diagramm (Bild 4) für einen bestimmten Heißleiter dargestellt. Die Kurve ist durch die Gleichung $R(T_{Th}) = A \cdot \exp(E_A / (k_B \cdot T_{Th}))$ beschrieben, wobei A ein Materialkoeffizient und E_A die Aktivierungsenergie ist. (3 Punkte)

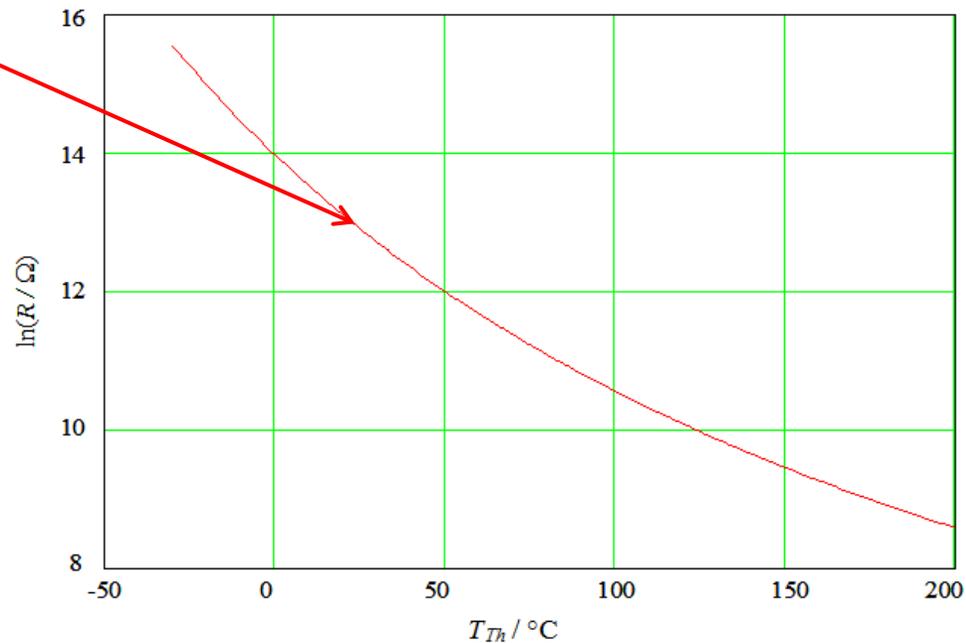
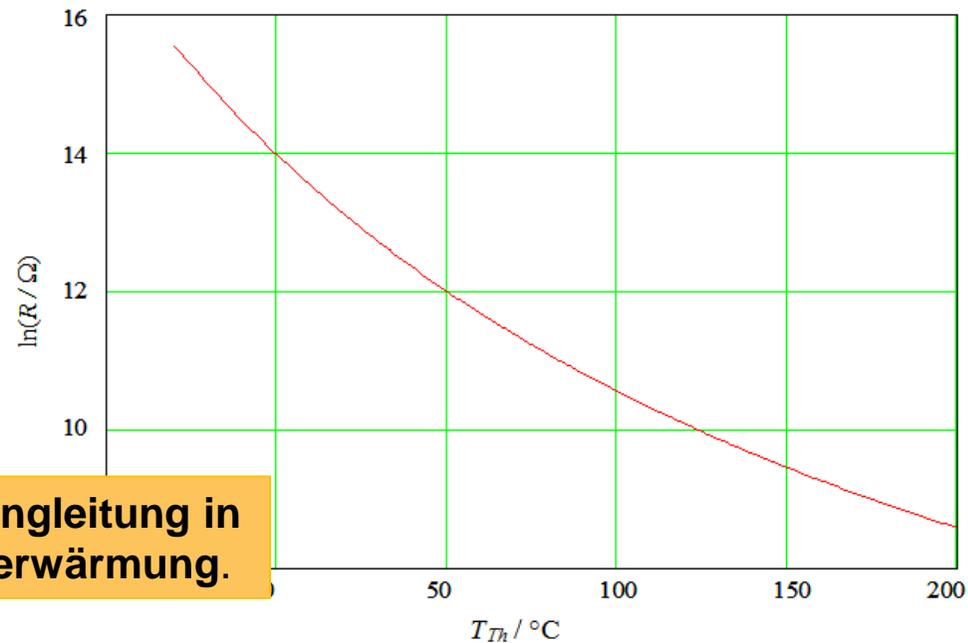


Bild 4: Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstands R

A2: Heißleiter NTC

Heißleiter (NTC) werden als Sensoren für verschiedenste Anwendungen eingesetzt, beispielsweise als Temperaturfühler. Die Eigenschaften des NTCs können beim Herstellungsprozess in Form von Mischungsverhältnissen von den verwendeten Oxiden, Dotierung und Umgebungsbedingungen beim Sintern (reduzierten) bzw. dem Abkühlvorgang

a) Die Abhängigkeit des elektrischen Widerstands R von der Temperatur T_{Th} ist im Diagramm (Bild 4) für einen bestimmten Heißleiter dargestellt. Die Kurve zeigt die Abhängigkeit des natürlichen Logarithmus des Widerstands $\ln(R/\Omega)$ von der Temperatur $T_{Th}/^\circ\text{C}$. Die Kurve ist durch die Gleichung $R(T_{Th}) = A \cdot \exp(E_A/(k_B \cdot T_{Th}))$ beschrieben. (3)

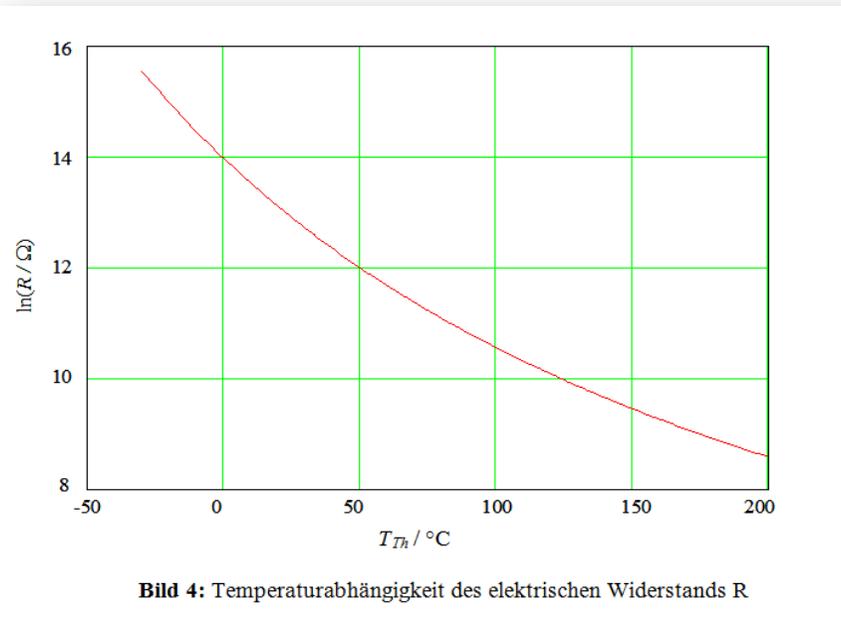


Hier relevant ist die Hoppingleitung in Metalloxiden durch Eigenerwärmung.

Bild 4: Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstands R

Gesucht: Aktivierungsenergie: E_A Konstante: A

$$R(T_{Th}) = A \cdot e^{\left(\frac{E_A}{k_B \cdot T_{Th}}\right)}$$

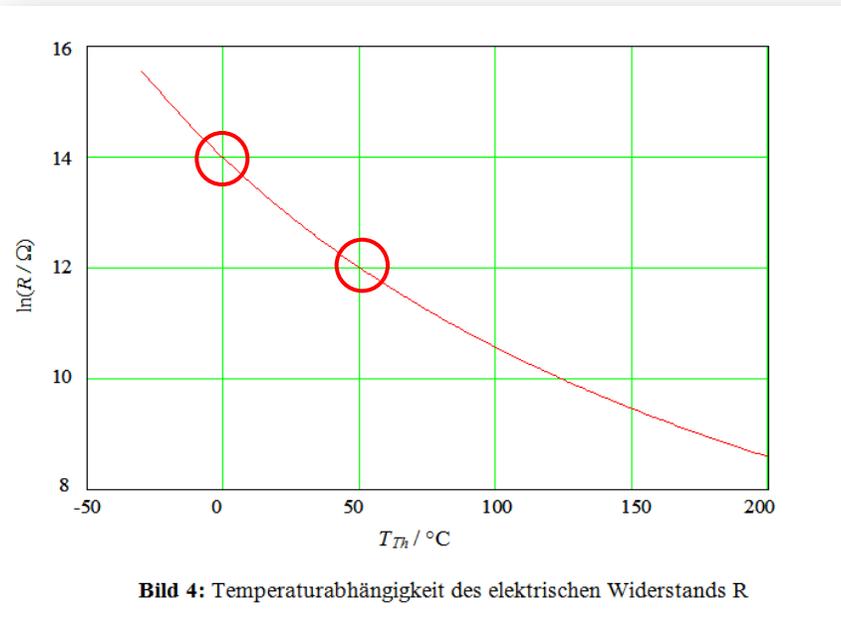


Gesucht: Aktivierungsenergie: E_A Konstante: A

$$R(T_{Th}) = A \cdot e^{\left(\frac{E_A}{k_B \cdot T_{Th}}\right)}$$

Es muss gelten

$$\frac{y_1}{y_2} = \frac{y(x_1)}{y(x_2)} \rightarrow \frac{R_1}{R_2} = \frac{A \cdot e^{\frac{E_A}{kT_1}}}{A \cdot e^{\frac{E_A}{kT_2}}}$$



Gesucht: Aktivierungsenergie: E_A Konstante: A

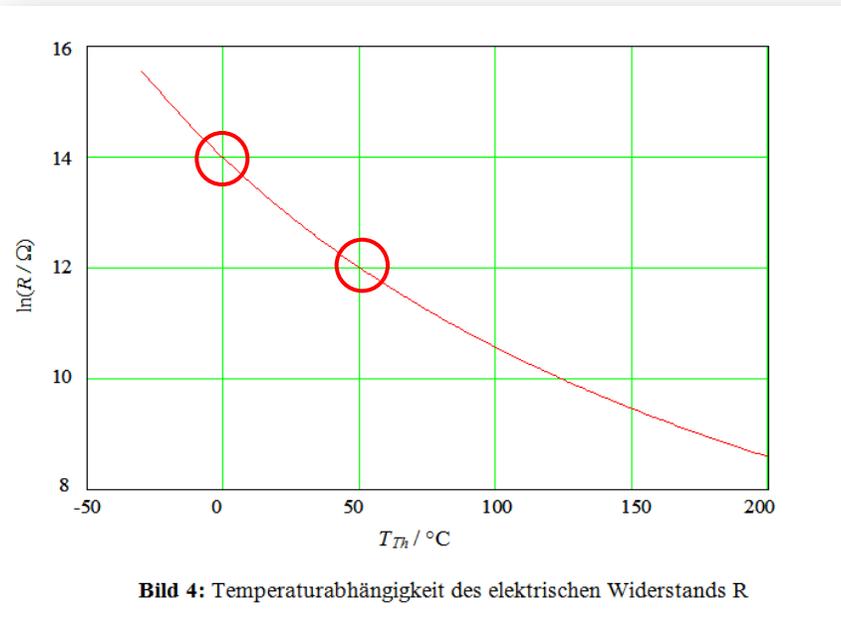
$$R(T_{Th}) = A \cdot e^{\left(\frac{E_A}{k_B \cdot T_{Th}}\right)}$$

Es muss gelten

$$\frac{y_1}{y_2} = \frac{y(x_1)}{y(x_2)} \rightarrow \frac{R_1}{R_2} = \frac{A \cdot e^{\frac{E_A}{kT_1}}}{A \cdot e^{\frac{E_A}{kT_2}}}$$

Umformen nach E_A

$$\rightarrow E_A = \ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right) \cdot \frac{k_B}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}}$$



Gesucht: Aktivierungsenergie: E_A

Konstante: A

$$E_A = \ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right) \cdot \frac{k_B}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}}$$

Widerstand berechnen

$$\ln R(T_{Th}) \rightarrow e^{\ln R(T_{Th})} = R(T_{Th})$$

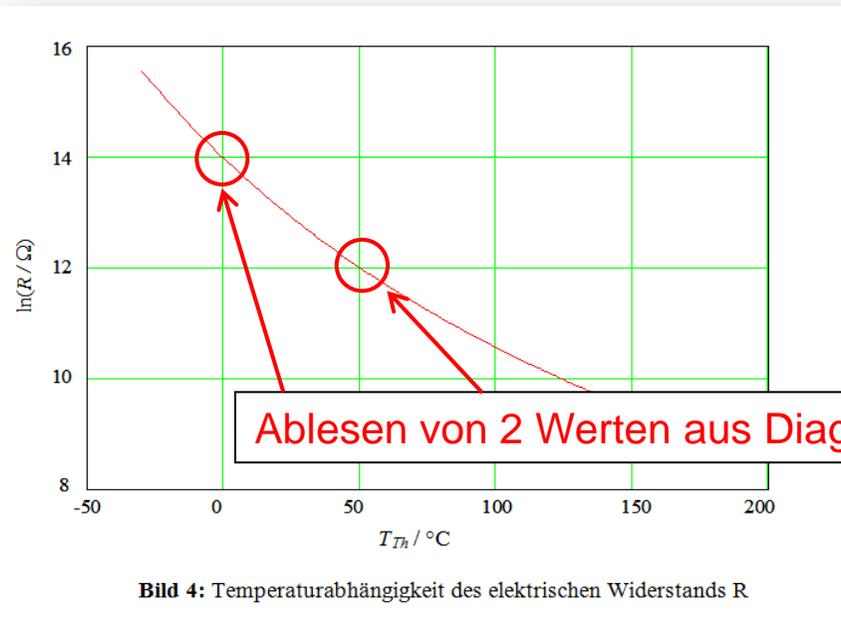
Temperatur in Kelvin

$$\ln R_1 = 14 \rightarrow R_1 = 1,203 \text{ M}\Omega$$

$$T_1 = 0 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow T_1 = 273,15 \text{ K}$$

$$\ln R_2 = 12 \rightarrow R_2 = 162,8 \text{ k}\Omega$$

$$T_2 = 50 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow T_2 = 323,15 \text{ K}$$



Gesucht: Aktivierungsenergie: E_A

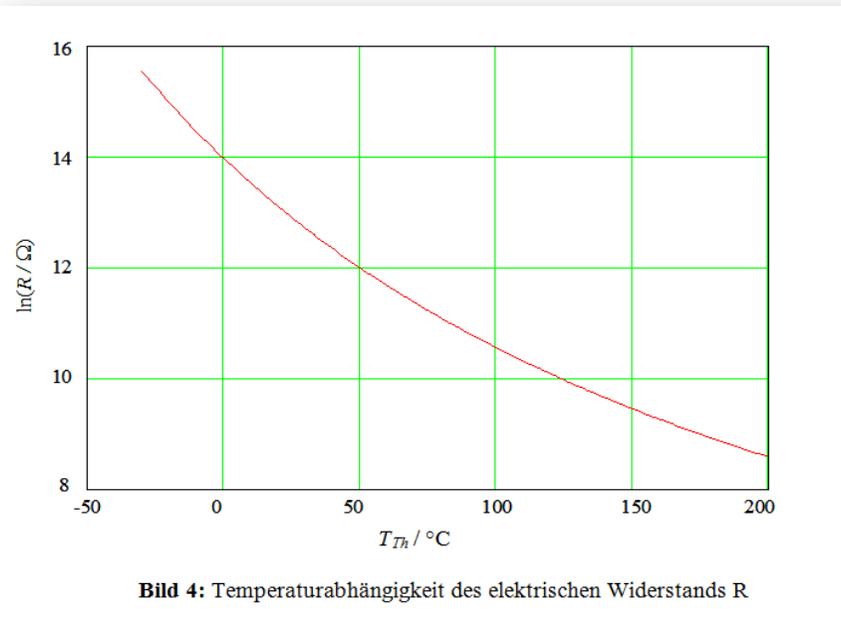
Konstante: A

$$E_A = \ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right) \cdot \frac{k_B}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}}$$

Aktivierungsenergie: E_A

$$\rightarrow E_A = 0,304 eV$$

Je nach dem welchen k_B -Wert man nimmt und wie viele Nachkommastellen man beachtet weicht das Ergebnis etwas ab. Für die Klausur: k_B -Wert aus der Formelsammlung beziehen!

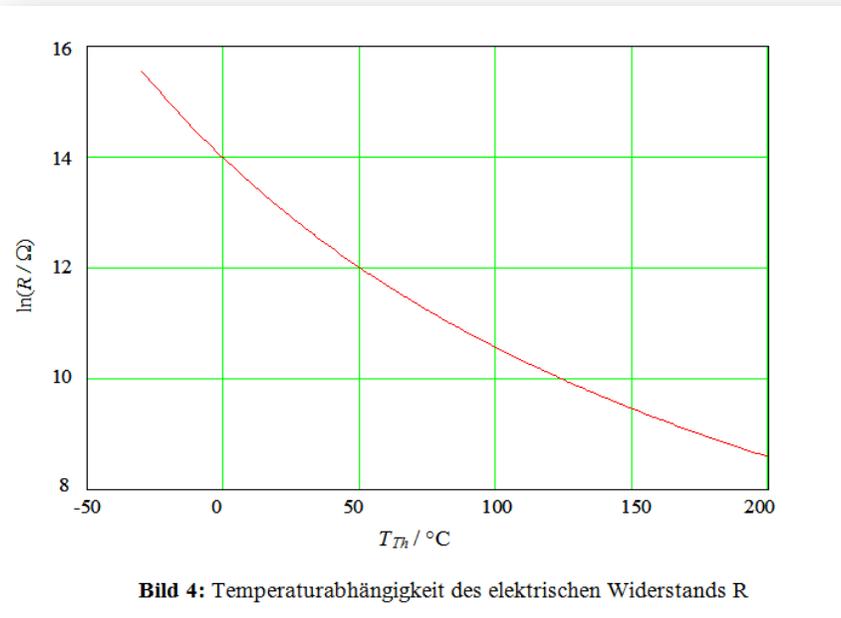


Fehlt noch: Konstante: A

$$R(T_{Th}) = A \cdot e^{\left(\frac{E_A}{k_B \cdot T_{Th}}\right)}$$

Umstellen nach A

$$A = \frac{R_1}{e^{\frac{E_A}{k_B \cdot T_1}}}$$



Fehlt noch: Konstante: A

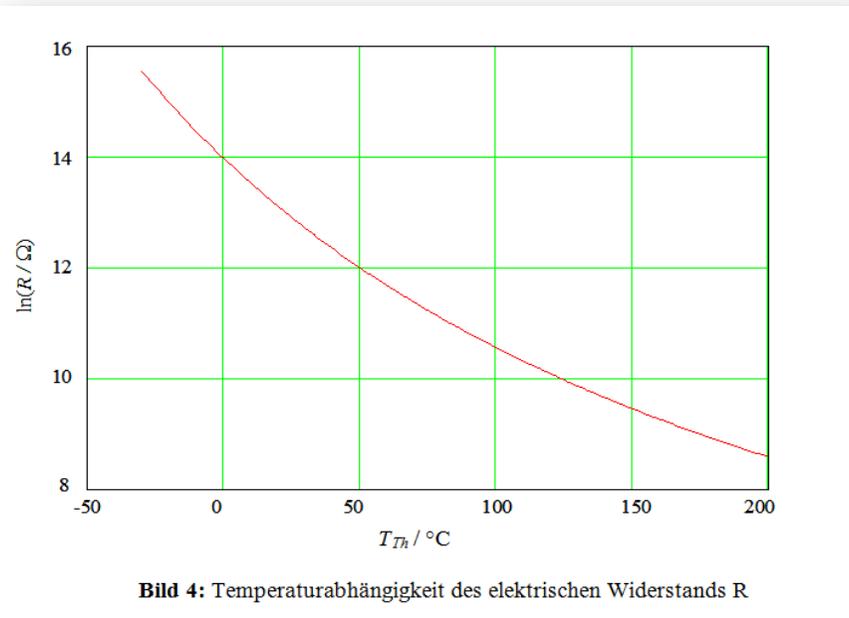
$$R(T_{Th}) = A \cdot e^{\left(\frac{E_A}{k_B \cdot T_{Th}}\right)}$$

Umstellen nach A

$$A = \frac{R_1}{e^{\frac{E_A}{k_B \cdot T_1}}} \quad \begin{array}{l} R_1 = 1,203 \text{ M}\Omega \\ T_1 = 273,15 \text{ K} \\ E_A = 0,304 \text{ eV} \end{array}$$

Funktionswertepaar (beliebig)
einsetzen

$$\rightarrow A \approx 2,93\Omega$$



b) Ein solcher Thermistor soll nun mit den unten angegebenen Kenndaten zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit v von Luft eingesetzt werden. In dem folgenden Diagramm (Bild 5) sind UI-Kennlinien für drei Strömungsgeschwindigkeiten v_1 , v_2 und v_3 gegeben. Berechnen Sie mit Hilfe der Kennlinien die Strömungsgeschwindigkeit v_3 .

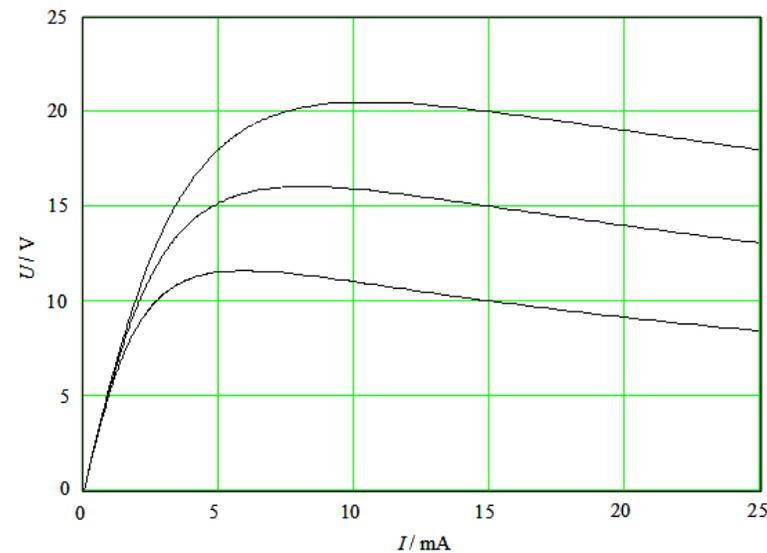


Bild 5: UI-Kennlinie eines Thermistors bei verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten v_i .

b) Ein solcher Thermistor soll nun mit den unten angegebenen Kenndaten zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit v von Luft eingesetzt werden. In dem folgenden Diagramm (Bild 5) sind UI-Kennlinien für drei Strömungsgeschwindigkeiten v_1 , v_2 und v_3 gegeben. Berechnen Sie mit Hilfe der Kennlinien die Strömungsgeschwindigkeit v_3 .

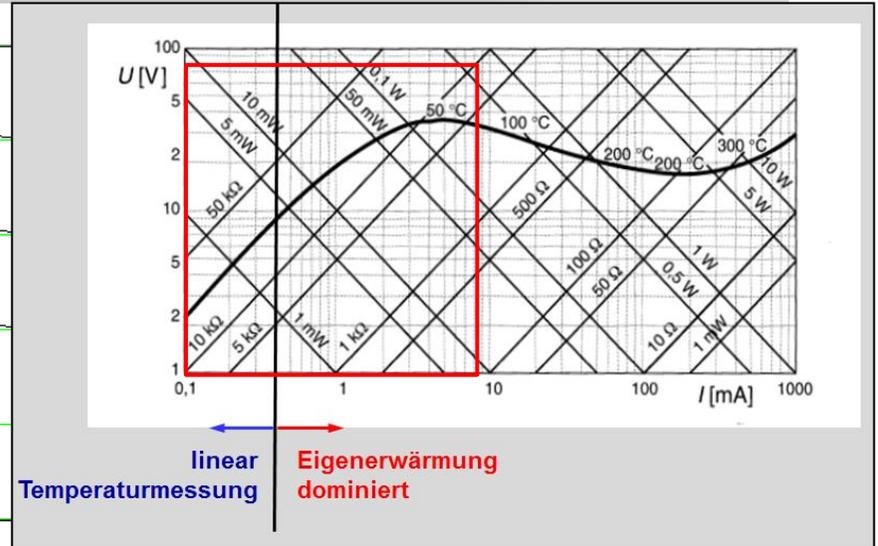
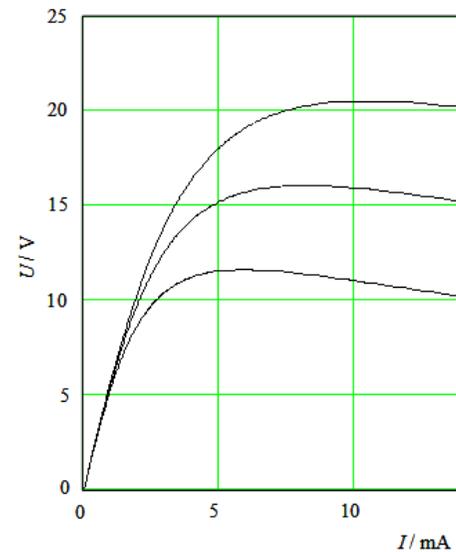


Bild 5: UI-Kennlinie eines Thermistors bei verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten $v_{i..}$

Hinweis: Die Leistung, die durch die Anströmung abgeführt wird, kann beschrieben werden durch

$$P_K = \alpha \cdot A_0 \cdot (T_{Th} - T_0).$$

Die Wärmeübergangszahl α ist eine Funktion der Strömungsgeschwindigkeit: $\alpha = \alpha_L + k_v \cdot \sqrt{v}$. Berechnen Sie zunächst die Koeffizienten α_L und k_v . Überlegen Sie sich dazu die Zuordnung von v_1 , v_2 und v_3 zu den Kennlinien - welches NTC wird am stärksten gekühlt? (4 Punkte)

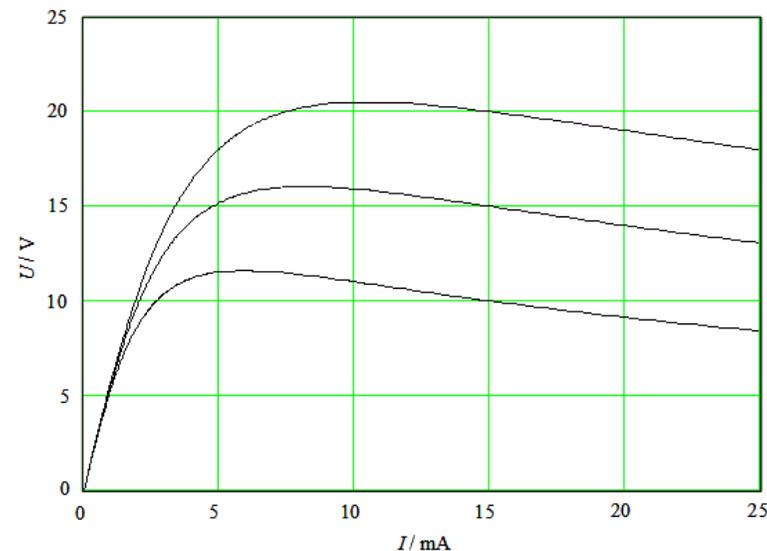
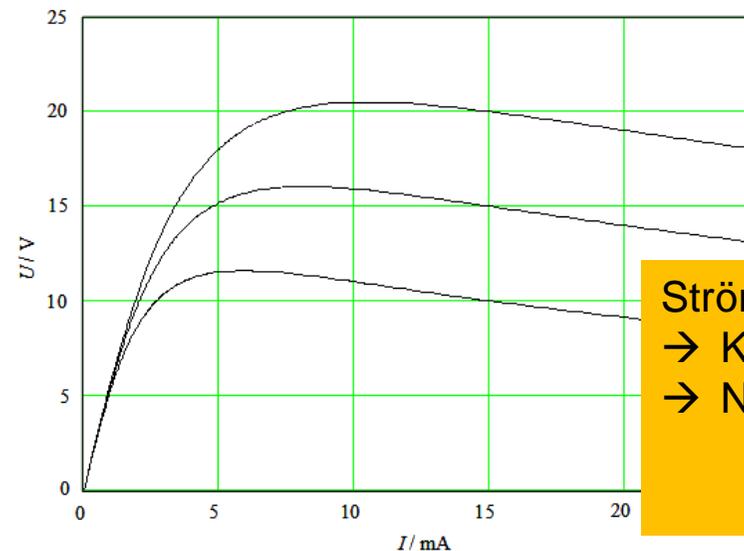


Bild 5: UI-Kennlinie eines Thermistors bei verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten v_i .

Hinweis: Die Leistung, die durch die Anströmung abgeführt wird, kann beschrieben werden durch

$$P_K = \alpha \cdot A_0 \cdot (T_{Th} - T_0).$$

Die Wärmeübergangszahl α ist eine Funktion der Strömungsgeschwindigkeit: $\alpha = \alpha_L + k_v \cdot \sqrt{v}$. Berechnen Sie zunächst die Koeffizienten α_L und k_v . Überlegen Sie sich dazu die Zuordnung von v_1 , v_2 und v_3 zu den Kennlinien - welches NTC wird am stärksten gekühlt? (4 Punkte)



Strömungsgeschwindigkeit
→ Kühlung von $T_{Th} \downarrow$
→ NTC Widerstand steigt $R \uparrow$

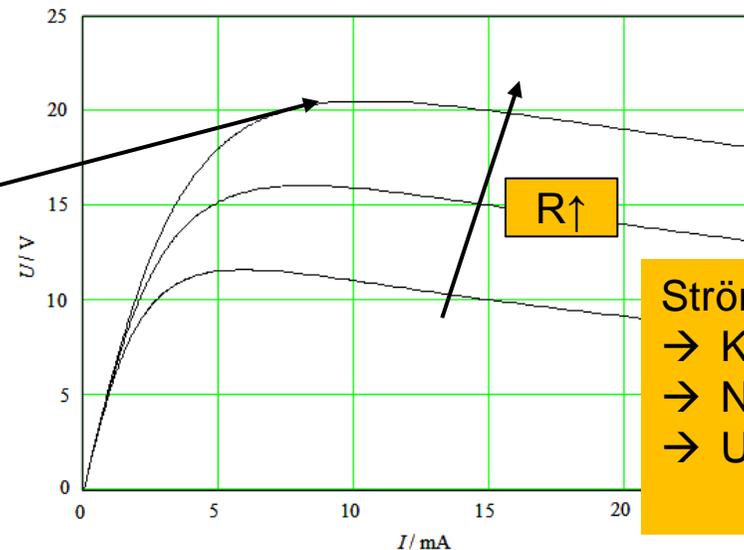
Bild 5: UI-Kennlinie eines Thermistors bei verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten v_i .

Hinweis: Die Leistung, die durch die Anströmung abgeführt wird, kann beschrieben werden durch

$$P_K = \alpha \cdot A_0 \cdot (T_{Th} - T_0).$$

Die Wärmeübergangszahl α ist eine Funktion der Strömungsgeschwindigkeit: $\alpha = \alpha_L + k_v \cdot \sqrt{v}$. Berechnen Sie zunächst die Koeffizienten α_L und k_v . Überlegen Sie sich dazu die Zuordnung von v_1 , v_2 und v_3 zu den Kennlinien - welches NTC wird am stärksten gekühlt? (4 Punkte)

→ Strömungsgeschwindigkeit am größten



Strömungsgeschwindigkeit
→ Kühlung von $T_{Th} \downarrow$
→ NTC Widerstand steigt $R \uparrow$
→ $U = R \cdot I$

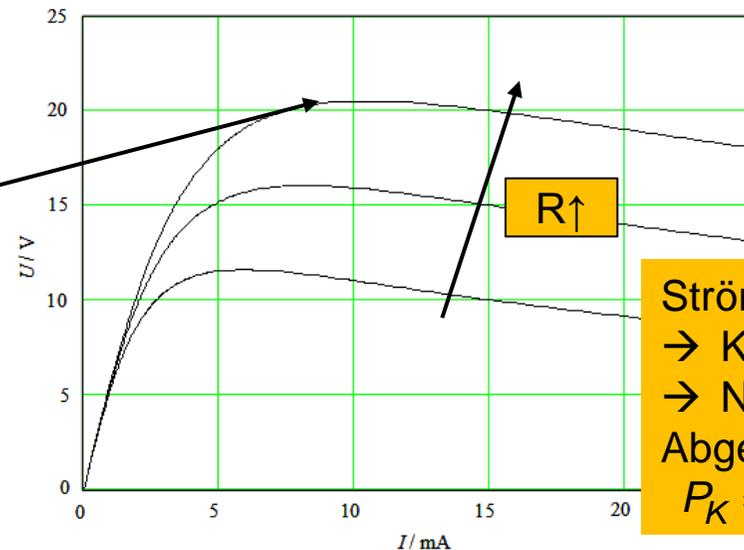
Bild 5: UI-Kennlinie eines Thermistors bei verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten v_i .

Hinweis: Die Leistung, die durch die Anströmung abgeführt wird, kann beschrieben werden durch

$$P_K = \alpha \cdot A_0 \cdot (T_{Th} - T_0).$$

Die Wärmeübergangszahl α ist eine Funktion der Strömungsgeschwindigkeit: $\alpha = \alpha_L + k_v \cdot \sqrt{v}$. Berechnen Sie zunächst die Koeffizienten α_L und k_v . Überlegen Sie sich dazu die Zuordnung von v_1 , v_2 und v_3 zu den Kennlinien - welches NTC wird am stärksten gekühlt? (4 Punkte)

→ Strömungsgeschwindigkeit am größten



Strömungsgeschwindigkeit
→ Kühlung von $T_{Th} \downarrow$
→ NTC Widerstand steigt $R \uparrow$
Abgeführte Leistung:
 $P_K = U \cdot I = R(T) \cdot I^2$

Bild 5: UI-Kennlinie eines Thermistors bei verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten v_i .

Hinweis: Die Leistung, die durch die Anströmung abgeführt wird, kann beschrieben werden durch

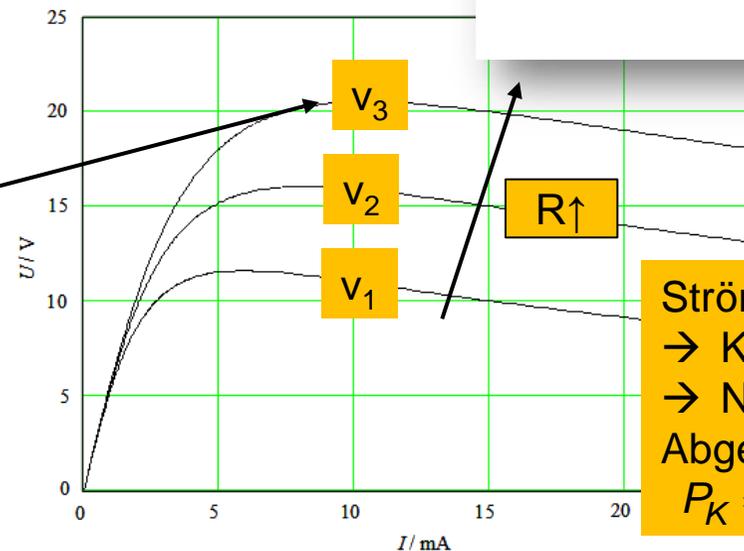
$$P_K = \alpha \cdot A_0 \cdot (T_{Th} - T_0).$$

Die Wärmeübergangszahl α ist eine Funktion der Strömungsgeschwindigkeit: $\alpha = \alpha_L + k_v \cdot \sqrt{v}$. Berechnen Sie zunächst die Koeffizienten α_L und k_v . Überlegen Sie sich dazu die Zuordnung von v_1 , v_2 und v_3 zu den Kennlinien - welches NTC wird am stärksten gekühlt? (4 Punkte)

Strömungsgeschwindigkeiten

$v_1 = 0 \text{ cm/s}$
 $v_2 = 21 \text{ cm/s}$
 $v_3 > v_2$

→ Strömungsgeschwindigkeit am größten



Strömungsgeschwindigkeit

→ Kühlung von $T_{Th} \downarrow$
 → NTC Widerstand steigt $R \uparrow$
 Abgeführte Leistung:
 $P_K = U \cdot I = R(T) \cdot I^2$

Bild 5: UI-Kennlinie eines Thermistors bei verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten v_i .

Zunächst gesucht: α_L

Abgeführte Leistung

$$P_K = \alpha \cdot A_0 \cdot (T_{Th} - T_0)$$

$$\alpha = \alpha_L + k_v \cdot \sqrt{v}$$

Einsetzen

Zunächst gesucht: α_L

Abgeführte Leistung

$$P_K = \alpha \cdot A_0 \cdot (T_{Th} - T_0)$$

$$\alpha = \alpha_L + k_v \cdot \sqrt{v}$$

Einsetzen und mit $P = U \cdot I$

$$P_K = (\alpha_L + k_v \cdot \sqrt{v}) \cdot A_0 \cdot (T_{Th} - T_0) = U \cdot I$$

Zunächst gesucht: α_L

Abgeführte Leistung

$$P_K = \alpha \cdot A_0 \cdot (T_{Th} - T_0)$$

$$\alpha = \alpha_L + k_v \cdot \sqrt{v}$$

Einsetzen und mit $P = U \cdot I$

$$P_K = (\alpha_L + k_v \cdot \sqrt{v}) \cdot A_0 \cdot (T_{Th} - T_0) = U \cdot I$$

Umformen

Ist noch unbekannt!

$$\alpha_L = \frac{U_{Th} \cdot I_{Th}}{A_0 \cdot (T_{Th} - T_0)} - k_v \cdot \sqrt{v}$$

Zunächst gesucht: α_L und T_{Th}

Abgeführte Leistung

$$P_K = \alpha \cdot A_0 \cdot (T_{Th} - T_0)$$

$$\alpha = \alpha_L + k_v \cdot \sqrt{v}$$

Einsetzen und mit $P = U \cdot I$

$$P_K = (\alpha_L + k_v \cdot \sqrt{v}) \cdot A_0 \cdot (T_{Th} - T_0) = U \cdot I$$

Zunächst gesucht: α_L und T_{Th}

Abgeführte Leistung

$$P_K = \alpha \cdot A_0 \cdot (T_{Th} - T_0)$$

$$\alpha = \alpha_L + k_v \cdot \sqrt{v}$$

Einsetzen und mit $P = U \cdot I$

$$P_K = (\alpha_L + k_v \cdot \sqrt{v}) \cdot A_0 \cdot (T_{Th} - T_0) = U \cdot I$$

Bekannter Zusammenhang: $U = R \cdot I$

$$P_K = U \cdot I = R(T_{Th}) \cdot I^2$$

Zunächst gesucht: α_L und T_{Th}

Abgeführte Leistung

$$P_K = \alpha \cdot A_0 \cdot (T_{Th} - T_0)$$

$$\alpha = \alpha_L + k_v \cdot \sqrt{v}$$

Einsetzen und mit $P = U \cdot I$

$$P_K = (\alpha_L + k_v \cdot \sqrt{v}) \cdot A_0 \cdot (T_{Th} - T_0) = U \cdot I$$

Bekannter Zusammenhang: $U = R \cdot I$

$$P_K = U \cdot I = R(T_{Th}) \cdot I^2$$

Einsetzen

$$R(T_{Th}) = A \cdot e^{\left(\frac{B}{T_{Th}}\right)}$$

Zunächst gesucht: α_L und T_{Th}

Abgeführte Leistung

$$P_K = \alpha \cdot A_0 \cdot (T_{Th} - T_0)$$

$$\alpha = \alpha_L + k_v \cdot \sqrt{v}$$

$$P_K = U \cdot I = A \cdot e^{\left(\frac{B}{T_{Th}}\right)} \cdot I^2$$

Einsetzen und mit $P = U \cdot I$

$$P_K = (\alpha_L + k_v \cdot \sqrt{v}) \cdot A_0 \cdot (T_{Th} - T_0) = U \cdot I$$

Bekannter Zusammenhang: $U = R \cdot I$

$$P_K = U \cdot I = R(T_{Th}) \cdot I^2$$

Einsetzen

$$R(T_{Th}) = A \cdot e^{\left(\frac{B}{T_{Th}}\right)}$$

Zunächst gesucht: α_L und T_{Th}

$$P_K = U \cdot I = A \cdot e^{\left(\frac{B}{T_{Th}}\right)} \cdot I^2$$

Umformen

$$T_{Th} = \frac{B}{\ln\left(\frac{U_{Th} \cdot 1}{I_{Th} \cdot A}\right)}$$

Werte ablesen und einsetzen

$U_1 = 10 \text{ V};$	$I_1 = 15 \text{ mA}$
$U_2 = 15 \text{ V};$	$I_2 = 15 \text{ mA}$
$U_3 = 20 \text{ V};$	$I_3 = 15 \text{ mA}$

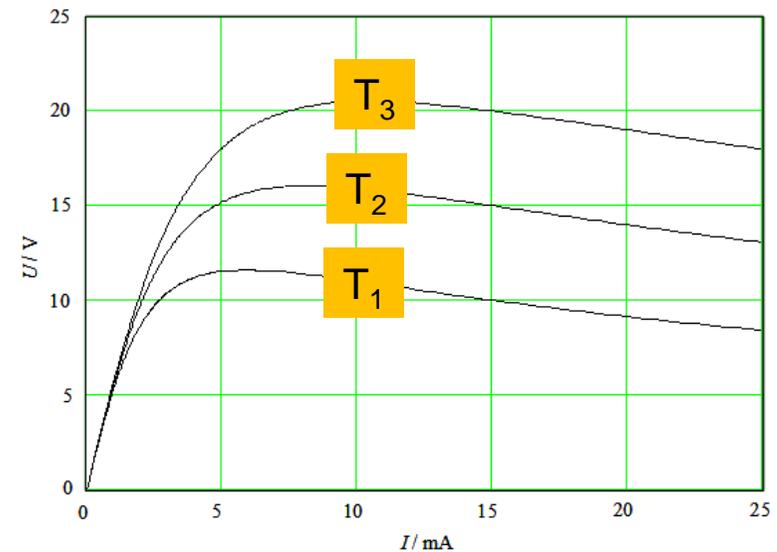


Bild 5: UI-Kennlinie eines Thermistors bei verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten $v_{1,2,3}$.

Zunächst gesucht: α_L und T_{Th}

$$P_K = U \cdot I = A \cdot e^{\left(\frac{B}{T_{Th}}\right)} \cdot I^2$$

Umformen

$$T_{Th} = \frac{B}{\ln\left(\frac{U_{Th}}{I_{Th}} \cdot \frac{1}{A}\right)}$$

Werte ablesen und einsetzen

$U_1 = 10 \text{ V};$	$I_1 = 15 \text{ mA}$
$U_2 = 15 \text{ V};$	$I_2 = 15 \text{ mA}$
$U_3 = 20 \text{ V};$	$I_3 = 15 \text{ mA}$

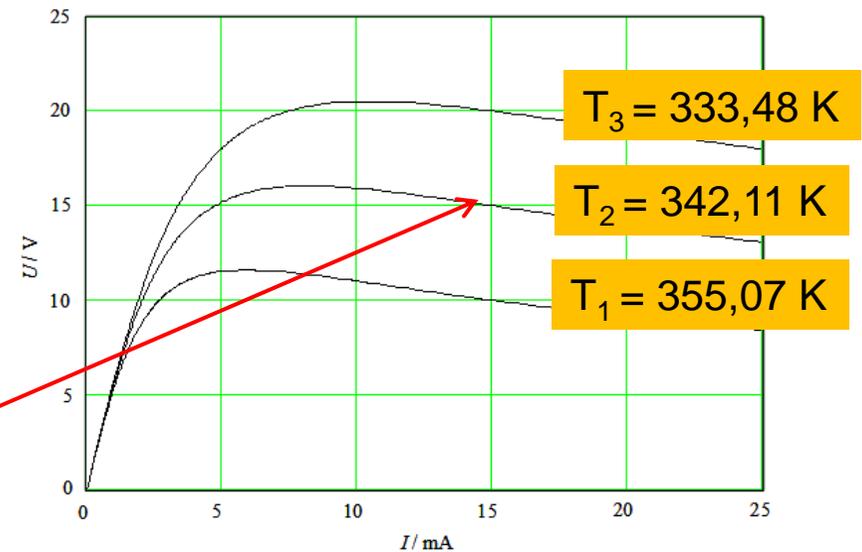


Bild 5: UI-Kennlinie eines Thermistors bei verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten $v_{i,}$

Gesucht: α_L

Gefunden: $T_{Th} = T_{1,2,3}$

$$\alpha_L = \frac{U_{Th} \cdot I_{Th}}{A_0 \cdot (T_{Th} - T_0)} - k_v \cdot \sqrt{v}$$

Gesucht: α_L

Gefunden: $T_{Th} = T_{1,2,3}$

$$\alpha_L = \frac{U_{Th} \cdot I_{Th}}{A_0 \cdot (T_{Th} - T_0)} - k_v \cdot \sqrt{v}$$

da $v_1 = 0$ m/s

$$\alpha_L = \frac{U_1 \cdot I_1}{A_0 \cdot (T_1 - T_0)}$$

Gesucht: α_L

Gefunden: $T_{Th} = T_{1,2,3}$

$$\alpha_L = \frac{U_{Th} \cdot I_{Th}}{A_0 \cdot (T_{Th} - T_0)} - k_v \cdot \sqrt{v}$$

da $v_1 = 0$ m/s

$$\alpha_L = \frac{U_1 \cdot I_1}{A_0 \cdot (T_1 - T_0)}$$

Werte ablesen und einsetzen

$$U_1 = 10 \text{ V};$$

$$I_1 = 15 \text{ mA}$$

$$T_1 = 355,07 \text{ K}$$

$$\alpha_L \approx 5 \cdot 10^{-3} \frac{\text{W}}{\text{cm}^2 \cdot \text{K}}$$

Jetzt gesucht: k_v

Abgeführte Leistung

$$P_K = \alpha \cdot A_0 \cdot (T_{Th} - T_0)$$

$$\alpha = \alpha_L + k_v \cdot \sqrt{v}$$

Jetzt gesucht: k_v

Abgeführte Leistung

$$P_K = \alpha \cdot A_0 \cdot (T_{Th} - T_0)$$

$$\alpha = \alpha_L + k_v \cdot \sqrt{v}$$

Bereits bestimmt

$$P_K = (\alpha_L + k_v \cdot \sqrt{v}) \cdot A_0 \cdot (T_{Th} - T_0) = U \cdot I$$

Jetzt gesucht: k_v

Abgeführte Leistung

$$P_K = \alpha \cdot A_0 \cdot (T_{Th} - T_0)$$

$$\alpha = \alpha_L + k_v \cdot \sqrt{v}$$

Bereits bestimmt

$$P_K = (\alpha_L + k_v \cdot \sqrt{v}) \cdot A_0 \cdot (T_{Th} - T_0) = U \cdot I$$

Umgeformt

$$k_v = \left(\frac{U \cdot I}{A_0 \cdot (T_{Th} - T_0)} - \alpha_L \right) \frac{1}{\sqrt{v}}$$

Jetzt brauchen wir ein Wertepaar bei dem $v \neq 0$ ist!
 $\rightarrow v_2$

Jetzt gesucht: k_v

$$k_v = \left(\frac{U_2 \cdot I_2}{A_0 \cdot (T_2 - T_0)} - \alpha_L \right) \frac{1}{\sqrt{v_2}}$$

$$\rightarrow v_2 = 21 \text{ cm / s}$$

$$U_2 = 15 \text{ V}; \quad I_2 = 15 \text{ mA}$$

Alle Werte bekannt - Einsetzen und ausrechnen

$$k_v \approx 1 \cdot 10^{-5} \frac{\text{W} \cdot \text{s}^{1/2}}{\text{K} \cdot \text{cm}^{3/2}}$$

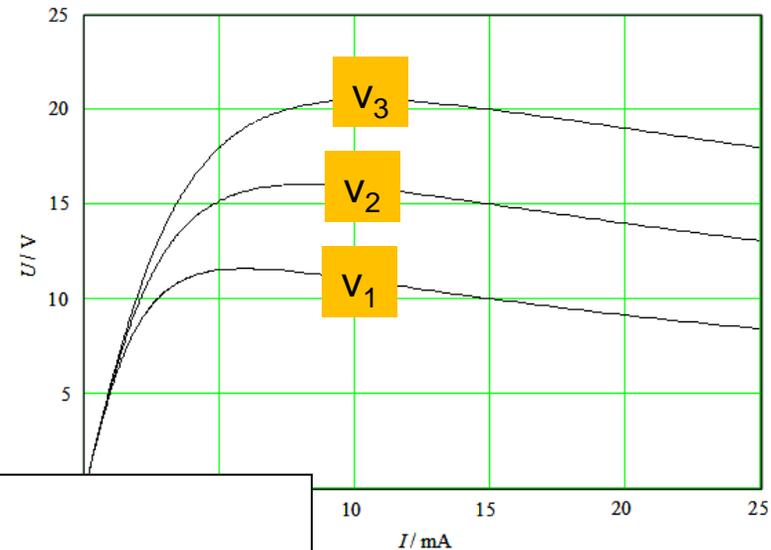
Hinweis: Die Leistung, die durch die Anströmung abgeführt wird, kann beschrieben werden durch

$$P_K = \alpha \cdot A_0 \cdot (T_{Th} - T_0).$$

Die Wärmeübergangszahl α ist eine Funktion der Strömungsgeschwindigkeit: $\alpha = \alpha_L + k_v \cdot \sqrt{v}$. Berechnen Sie zunächst die Koeffizienten α_L und k_v . Überlegen Sie sich dazu die Zuordnung von v_1 , v_2 und v_3 zu den Kennlinien - welches NTC wird am stärksten gekühlt? (4 Punkte)

$$\alpha_L \approx 5 \cdot 10^{-3} \frac{W}{cm^2 \cdot K}$$

$$k_v \approx 1 \cdot 10^{-5} \frac{W \cdot s^{1/2}}{K \cdot cm^{3/2}}$$



Hinweise beachtet!

Nicht vergessen: es fehlt noch die Bestimmung von v_3

ors bei verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten v_i .

Jetzt gesucht: v_3

$$P_K = (\alpha_L + k_v \cdot \sqrt{v}) \cdot A_0 \cdot (T_{Th} - T_0) = U \cdot I$$

Jetzt gesucht: v_3

$$P_K = (\alpha_L + k_v \cdot \sqrt{v}) \cdot A_0 \cdot (T_{Th} - T_0) = U \cdot I$$

Umgeformt

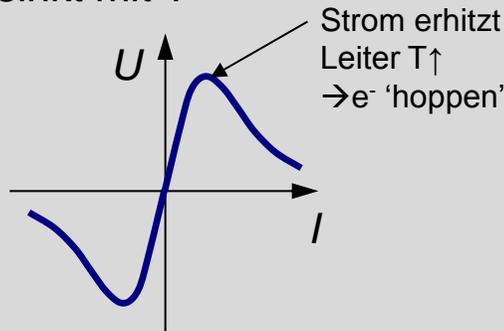
$$v_3 = \left[\left(\frac{U_3 \cdot I_3}{A_0 \cdot (T_3 - T_0)} - \alpha_L \right) \cdot \frac{1}{k_v} \right]^2$$

Werte einsetzen und berechnen

$$v_3 \approx 113,7 \frac{cm}{s}$$

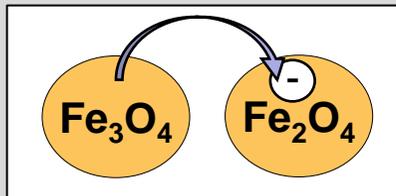
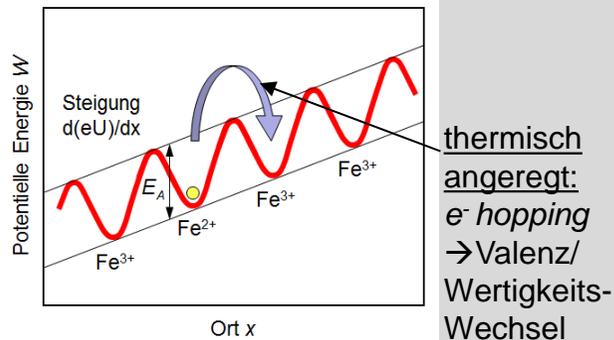
Heißleiter NTC

→ R sinkt mit T



Bsp: $(\text{Ni,Mn})_3\text{O}_4$ (Spinell = AB_3O_4)

Eigenerwärmung



Zusammenfassung:

Anwendung eines NTC Heißleiters:

Bestimmung der Anströmgeschwindigkeit mit Hilfe der NTC Kennlinien. ✓

Wichtige Beziehung der Leistung $P_{Out} = U \cdot I$ nutzen „abgeführte Leistung“ ↔ Werte UI-Kennlinie ✓

Rechnung Reihenfolge:

- 1) Bestimmung der Temperaturen T_i ✓
- 2) Hilfsmittel: „abgeführte Leistung“
→ fehlende Konstanten (α_L, k_V) ermittelt.
- 3) Geschwindigkeit bestimmt.

Übungsevaluation

A3: Kaltleiter PTC

Farbfernseh-Bildröhren enthalten magnetisierbare Teile. Daher wird bei jedem Einschalten eine Entmagnetisierung durchgeführt. Diese erfolgt im Prinzip mit einer Schaltung nach Bild 6 (links), bei der eine um die Bildröhre geschlungene Entmagnetisierungsspule aus Kupferdraht und zwei Kaltleiter-Widerstände (PTCs) eingesetzt werden. Bild 6 (rechts) zeigt die R-T-Kennlinie der beiden Kaltleiter.

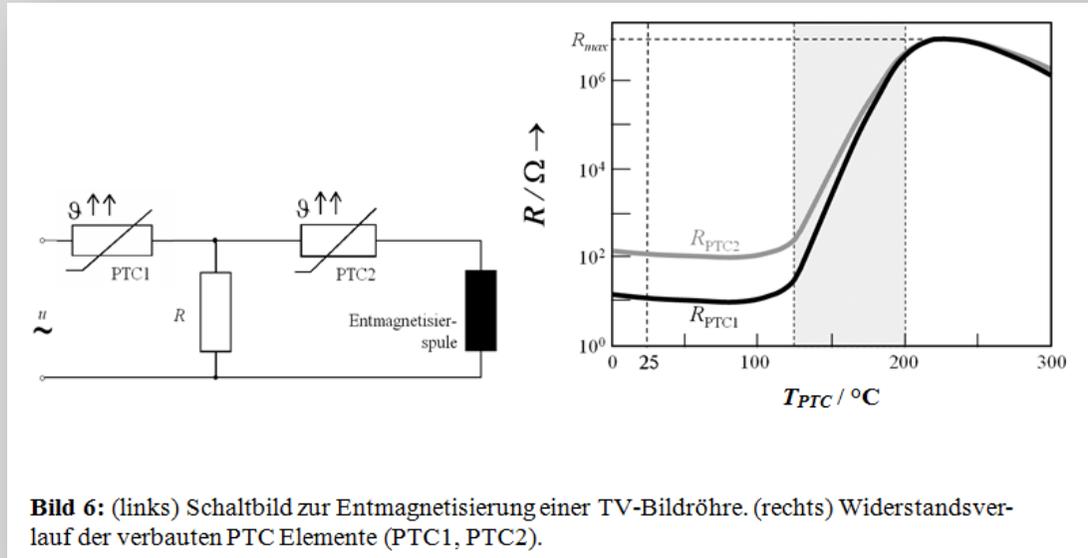
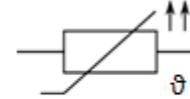
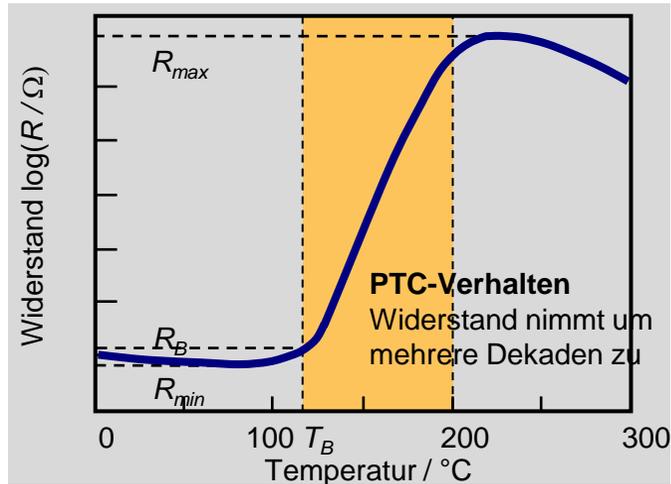


Bild 6: (links) Schaltbild zur Entmagnetisierung einer TV-Bildröhre. (rechts) Widerstandsverlauf der verbauten PTC Elemente (PTC1, PTC2).

Was passiert bei einem PTC Kaltleiter im Unterschied zu einem Varistor?

Temperatureinfluss auf das Bauelement in bestimmten Bereich



NTC PTC NTC

$$R_{KG} \sim \exp\left(\frac{E_A}{k_B \cdot T}\right)$$

Regler

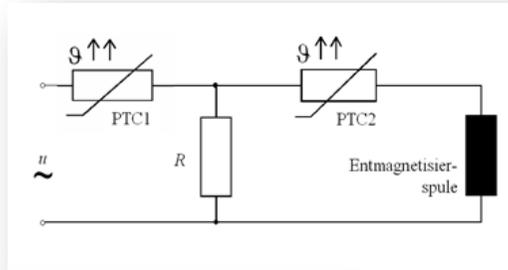
Eigenerwärmung



Anwendung hier:

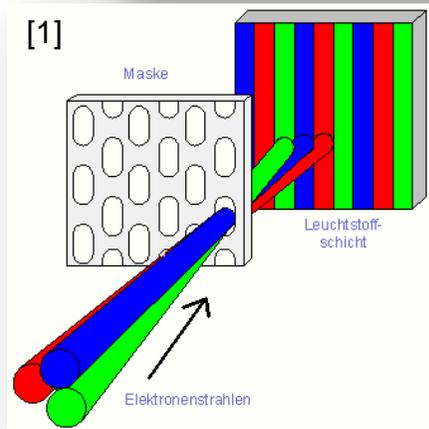
- **Stromstabilisierung**
- Schaltverzögerung
- Füllstandsüberwachung
- Strömungsmessung

Was passiert beim Entmagnetisieren?

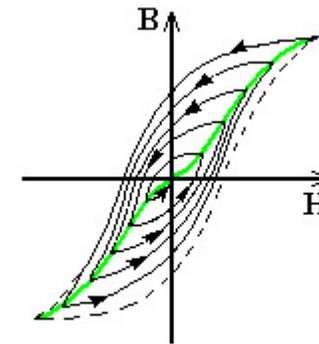


Die Magnetisierung der Schlitze soll langsam abklingen!

→ PTC Kaltleiter



Magnetisierte Schlitze lenken Elektronen ab.
→ Bildgebung verzerrt.



Entmagnetisierung

[2]

a) Berechnen Sie die Amplitude \hat{i}_A des durch PTC1 fließenden Stroms unmittelbar nach Anlegen der Spannung u . (3 Punkte)

Hinweise: Die induktiven Eigenschaften der Spule sollen vernachlässigt werden, berücksichtigen Sie nur deren Ohmschen Widerstand. Für die angelegte Spannung gilt: $u = \hat{u} \cdot \sin(\omega t)$.

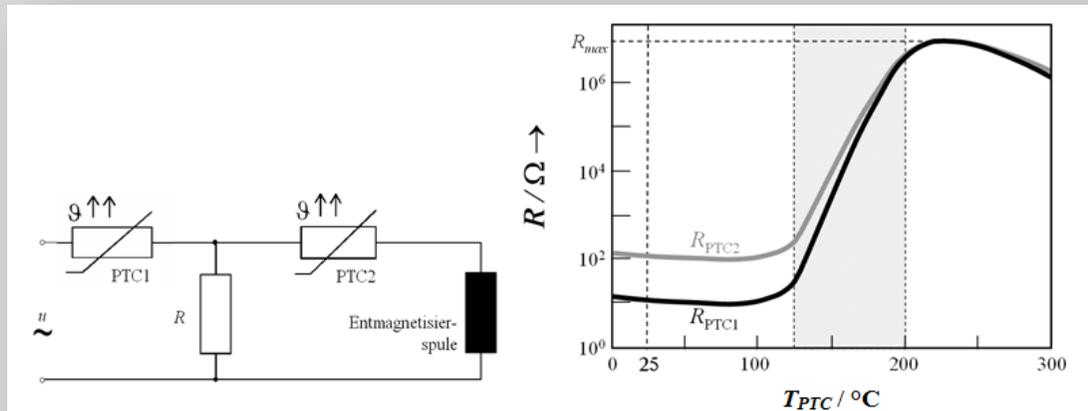
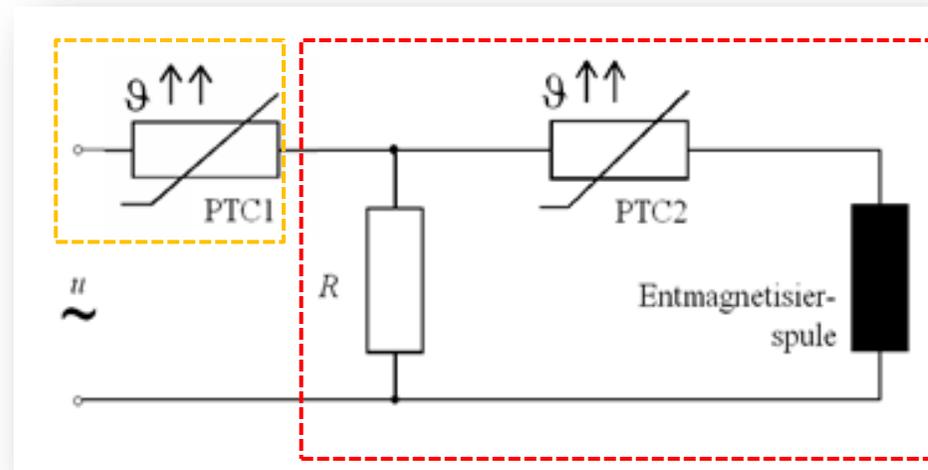


Bild 6: (links) Schaltbild zur Entmagnetisierung einer TV-Bildröhre. (rechts) Widerstandsverlauf der verbauten PTC Elemente (PTC1, PTC2).

Impedanz der Schaltung: Z

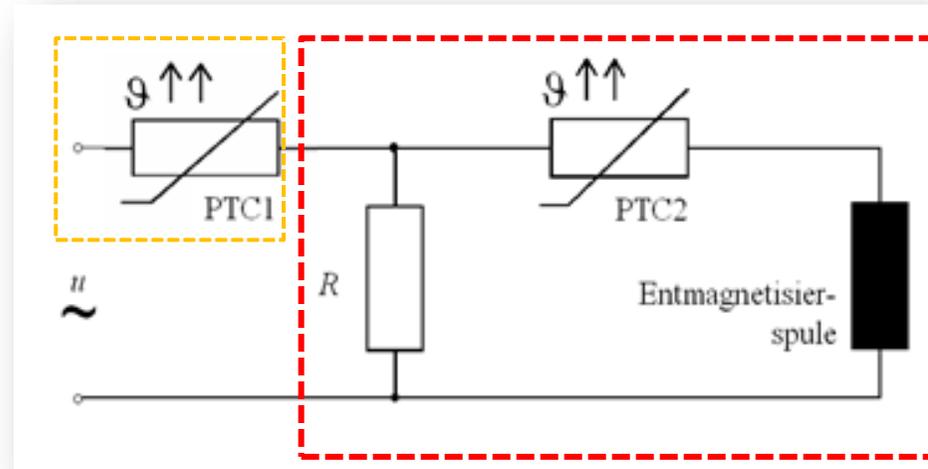
$$Z = R_{\text{PTC1}} + R_{\text{Parallel}}$$



Impedanz der Schaltung: Z

$$Z = R_{\text{PTC1}} + R_{\text{Parallel}}$$

$$R_{\text{Parallel}} = \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R_{\text{Seriell}}}}$$

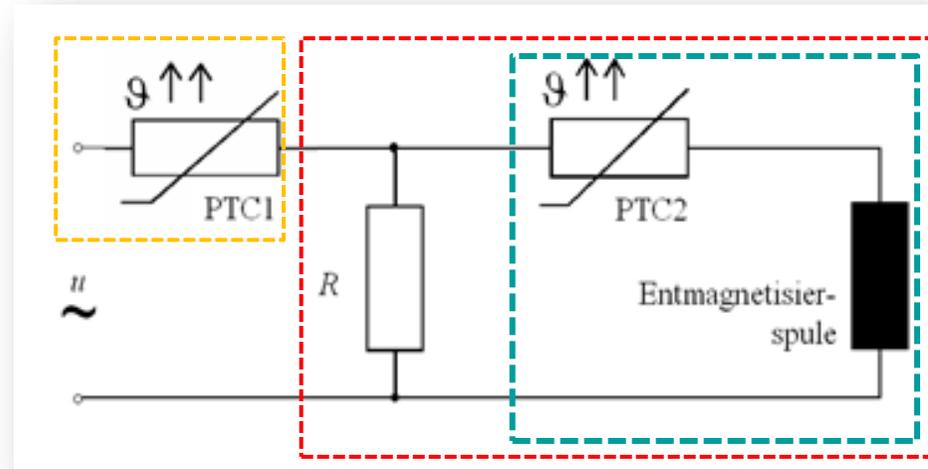


Impedanz der Schaltung: Z

$$Z = R_{\text{PTC1}} + R_{\text{Parallel}}$$

$$R_{\text{Parallel}} = \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R_{\text{Seriell}}}}$$

$$R_{\text{Seriell}} = R_{\text{PTC2}} + R_{\text{Spule}}$$



Impedanz der Schaltung: Z

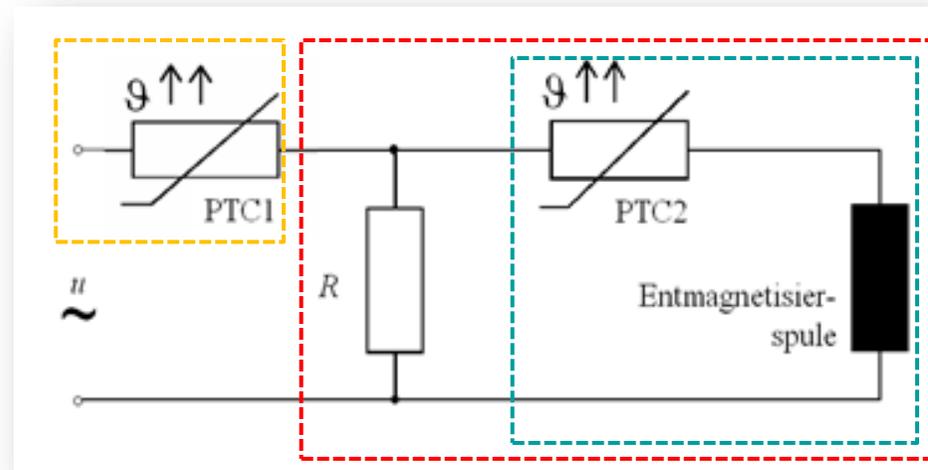
$$Z = R_{\text{PTC1}} + R_{\text{Parallel}}$$

$$R_{\text{Parallel}} = \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R_{\text{Seriell}}}}$$

$$R_{\text{Seriell}} = R_{\text{PTC2}} + R_{\text{Spule}}$$

Eingesetzt

$$Z = R_{\text{PTC1}} + \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R_{\text{PTC2}} + R_{\text{Spule}}}}$$



Impedanz der Schaltung: Z

$$Z = R_{\text{PTC1}} + \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R_{\text{PTC2}} + R_{\text{Spule}}}}$$

Zahlenwerte:	Amplitude der Spannung	\hat{u}	=	50 V
	Widerstand	R	=	500 Ω ✓
	Windungszahl der Spule	n	=	20
	Länge der Spule	l	=	10 mm
	Durchmesser der zylinderförmigen Spule	d	=	300 mm
	Durchmesser des Spulendrahtes	δ	=	1 mm
	el. Leitfähigkeit von Kupfer	σ_{Cu}	=	$6 \cdot 10^5$ S/m

Fehlen noch:

R_{Spule} (ohne Induktivität)

Kleines „Spulenmodell“ überlegen!

R_{PTC1}
 R_{PTC2}

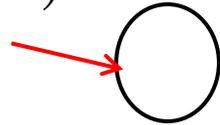
Ablesen aus Schaubild!

Kleines „Spulenmodell“ überlegen!

Umfang einer Wicklung

$$2\pi \cdot r = 2\pi \cdot (d / 2)$$

$$U = \pi \cdot d$$

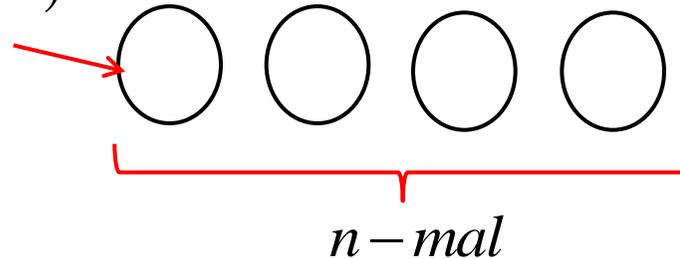


Kleines „Spulenmodell“ überlegen!

Umfang einer Wicklung

$$2\pi \cdot r = 2\pi \cdot (d/2)$$

$$U = \pi \cdot d$$



$$l_{\text{Draht}} = n \cdot \pi \cdot d$$

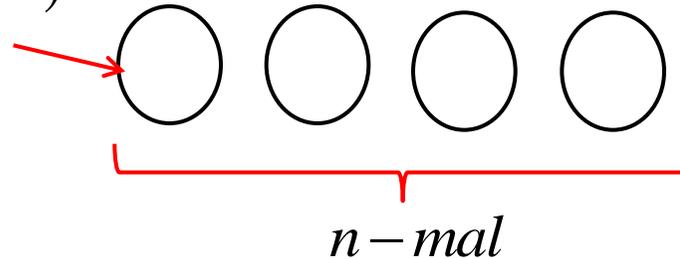
Länge der Spule $l=10\text{mm}$
irrelevant, da n bekannt ist!

Kleines „Spulenmodell“ überlegen!

Umfang einer Wicklung

$$2\pi \cdot r = 2\pi \cdot (d/2)$$

$$U = \pi \cdot d$$



$$l_{\text{Draht}} = n \cdot \pi \cdot d$$

Länge der Spule $l=10mm$
irrelevant, da n bekannt ist!

R_{Spule} (ohne Induktivität)

$$R_{\text{Spule}} = \frac{1}{\sigma_{\text{Cu}}} \cdot \frac{l_{\text{Draht}}}{A_{\text{Draht}}} = \frac{1}{\sigma_{\text{Cu}}} \cdot \frac{n \cdot \pi \cdot d}{\pi \cdot \left(\frac{\delta}{2}\right)^2} \approx 40 \Omega$$

Impedanz der Schaltung: Z

$$Z = R_{\text{PTC1}} + \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R_{\text{PTC2}} + R_{\text{Spule}}}} \checkmark$$

Zahlenwerte:	Amplitude der Spannung	\hat{u}	=	50 V	
	Widerstand	R	=	500 Ω	\checkmark
	Windungszahl der Spule	n	=	20	
	Länge der Spule	l	=	10 mm	
	Durchmesser der zylinderförmigen Spule	d	=	300 mm	
	Durchmesser des Spulendrahtes	δ	=	1 mm	
	el. Leitfähigkeit von Kupfer	σ_{Cu}	=	$6 \cdot 10^5$ S/m	

R_{Spule} (ohne Induktivität) \checkmark

$R_{\text{Spule}} \approx 40 \Omega$ \checkmark

Fehlen noch:

R_{PTC1}
 R_{PTC2}

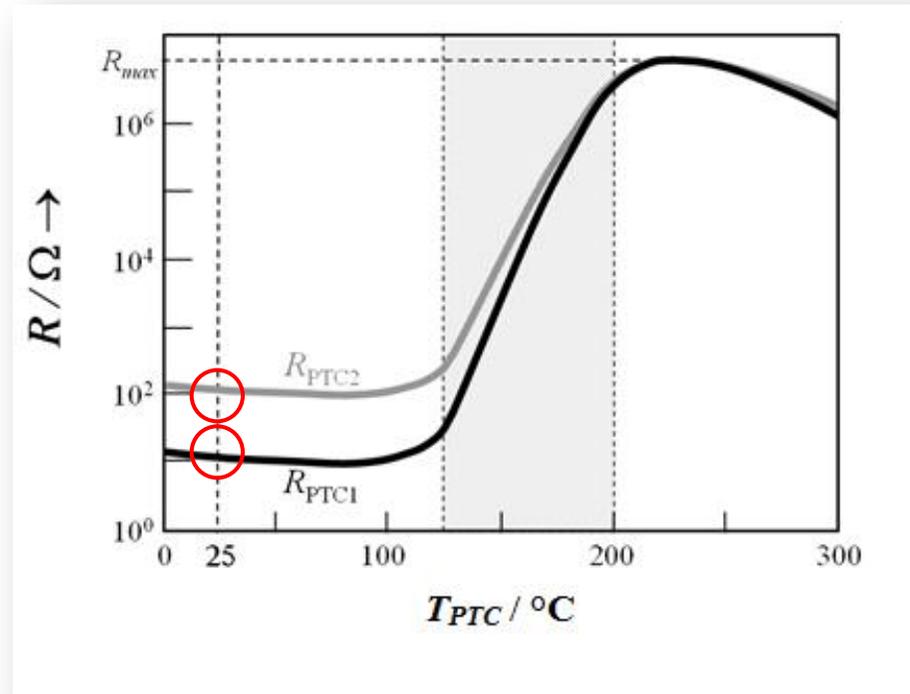
} Ablesen aus Schaubild!

R_{PTC1}
 R_{PTC2} } Ablesen aus Schaubild!

Anfangsbedingungen: RT

$$R_{PTC1} = 10^1 \Omega = 10 \Omega$$

$$R_{PTC2} = 10^2 \Omega = 100 \Omega$$



Impedanz der Schaltung: Z

$$Z = R_{PTC1} + \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R_{PTC2} + R_{Spule}}}$$

Zahlenwerte:	Amplitude der Spannung	\hat{u}	=	50 V
	Widerstand	R	=	500 Ω ✓
	Windungszahl der Spule	n	=	20
	Länge der Spule	l	=	10 mm
	Durchmesser der zylinderförmigen Spule	d	=	300 mm
	Durchmesser des Spulendrahtes	δ	=	1 mm
	el. Leitfähigkeit von Kupfer	σ_{Cu}	=	$6 \cdot 10^5$ S/m

$$R_{PTC1} = 10 \Omega \quad \checkmark \quad R_{PTC2} = 100 \Omega \quad \checkmark \quad R_{Spule} \approx 40 \Omega \quad \checkmark$$

Einsetzen

$$Z_{RT} \approx 119 \Omega$$

Impedanz der Schaltung: Z

$$Z = R_{PTC1} + \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R_{PTC2} + R_{Spule}}}$$

Zahlenwerte:	Amplitude der Spannung	$\hat{u} = 50 \text{ V}$ ✓
	Widerstand	$R = 500 \Omega$
	Windungszahl der Spule	$n = 20$
	Länge der Spule	$l = 10 \text{ mm}$
	Durchmesser der zylinderförmigen Spule	$d = 300 \text{ mm}$
	Durchmesser des Spulendrahtes	$\delta = 1 \text{ mm}$
	el. Leitfähigkeit von Kupfer	$\sigma_{Cu} = 6 \cdot 10^5 \text{ S/m}$

$$R_{PTC1} = 10 \Omega$$

$$R_{PTC2} = 100 \Omega$$

$$R_{Spule} \approx 40 \Omega$$

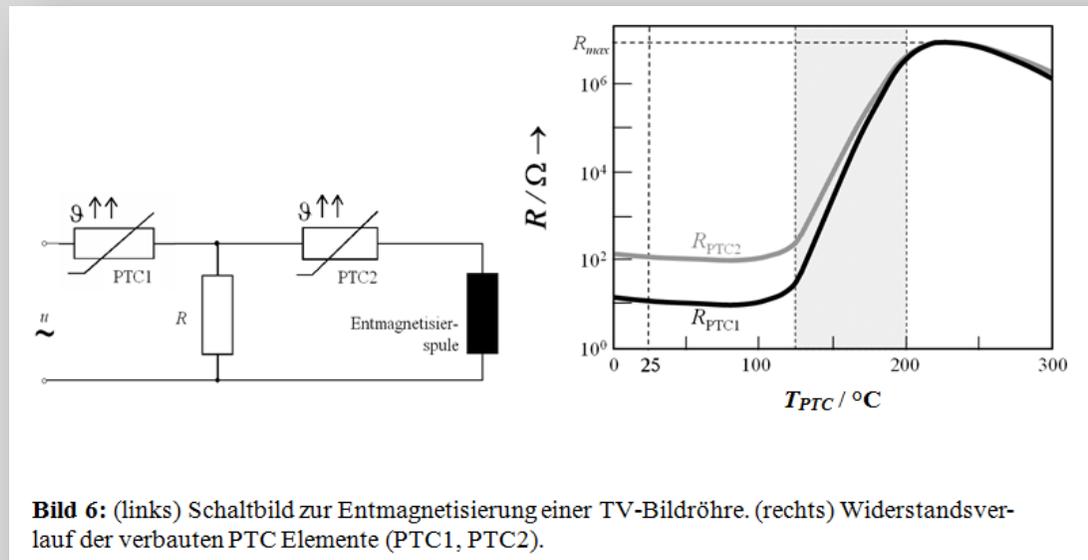
Einsetzen

$$Z_{RT} \approx 119 \Omega \checkmark$$

Amplitude berechnen

$$\text{Amplitude der Stromstärke } \hat{i}_{RT} = \frac{\hat{u}}{Z_{RT}} = \frac{50 \text{ V}}{119 \Omega} \approx 419 \text{ mA}$$

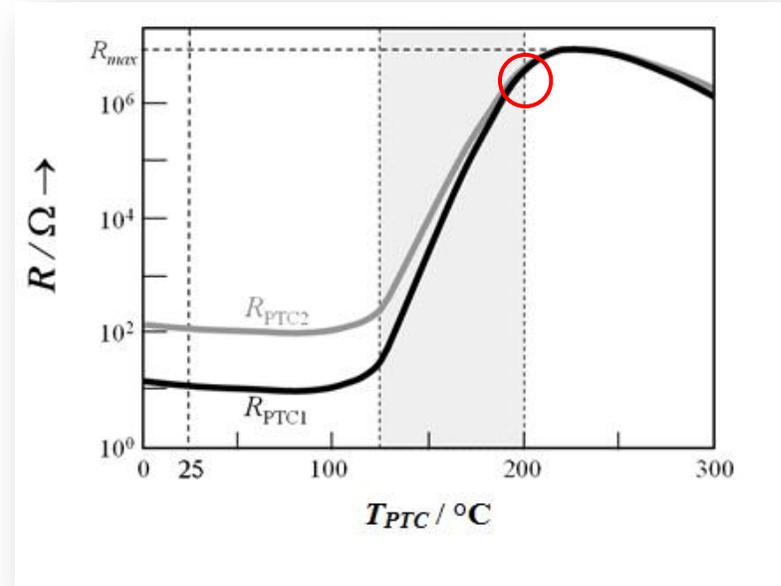
b) Schätzen Sie anhand der Kaltleiterkennlinien in Bild 6 einen Endwert für \hat{i}_E ab, wenn die beiden (thermisch gekoppelten) Kaltleiter PTC1 und PTC2 sich auf 200 °C erwärmt haben. (2 Punkte)



R_{PTC1}
 R_{PTC2} } Ablesen aus Schaubild!

Endbedingungen:
PTC Elemente sind erhitzt

$$R_{PTC1} = R_{PTC2} \approx 10^6 \Omega$$



R_{PTC1}
 R_{PTC2} } Ablesen aus Schaubild!

Endbedingungen:
PTC Elemente sind erhitzt

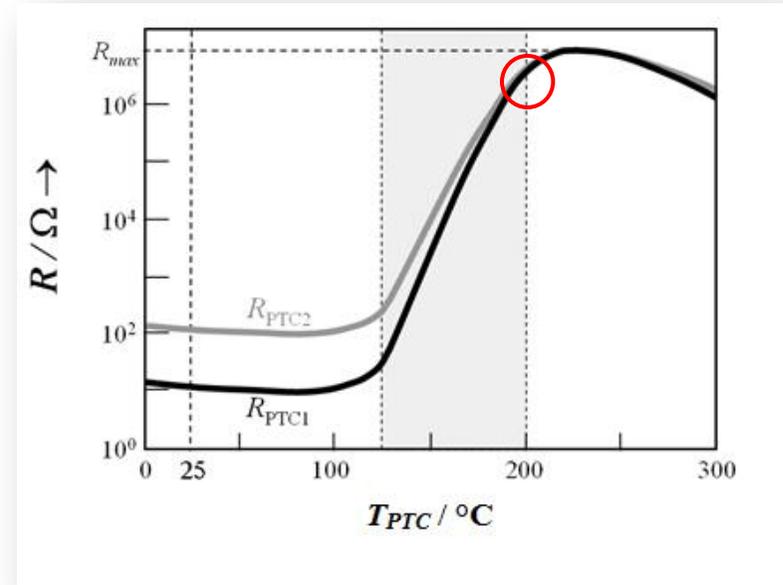
$$R_{PTC1} = R_{PTC2} \approx 10^6 \Omega$$

Impedanz der Schaltung: Z

$$Z = R_{PTC1} + \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R_{PTC2} + R_{Spule}}}$$

Einsetzen

$$Z_{200^\circ C} \approx 10^6 \Omega$$



R_{PTC1}
 R_{PTC2} } Ablesen aus Schaubild!

Endbedingungen:
PTC Elemente sind erhitzt

$$R_{PTC1} = R_{PTC2} \approx 10^6 \Omega$$

Impedanz der Schaltung: Z

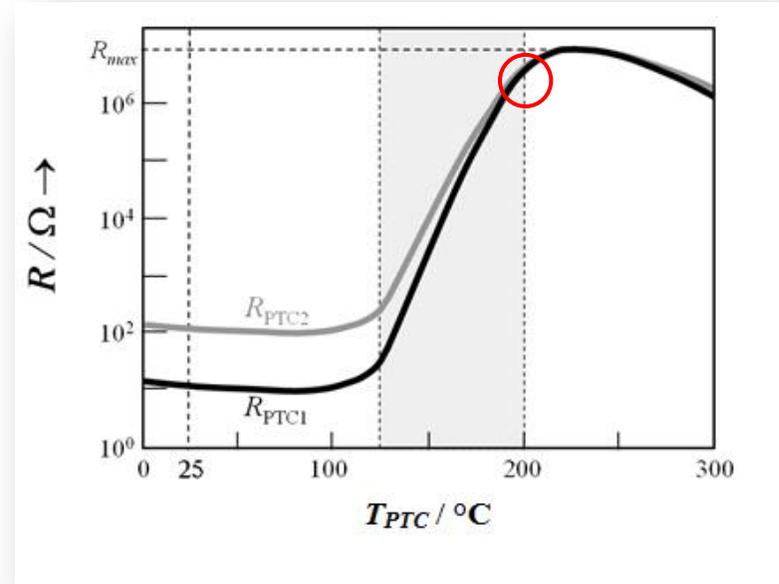
$$Z = R_{PTC1} + \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R_{PTC2} + R_{Spule}}}$$

Einsetzen

Amplitude berechnen

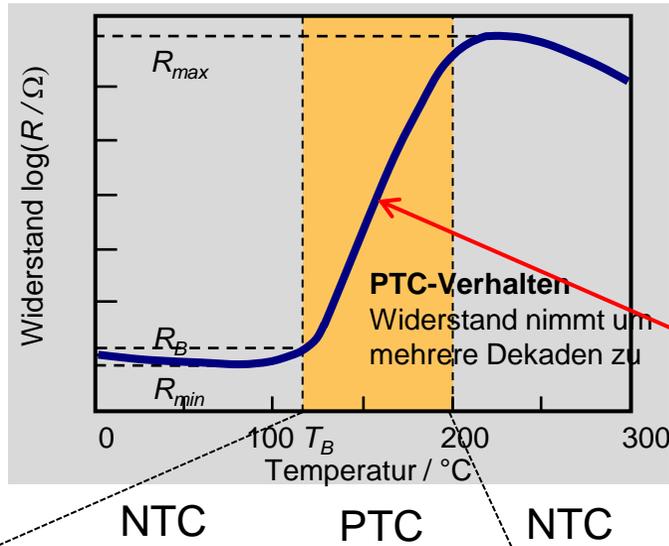
$$Z_{200^\circ\text{C}} \approx 10^6 \Omega$$

$$\text{Amplitude der Stromstärke } \hat{i}_{\text{End-T}} = \frac{\hat{u}}{Z_{200^\circ\text{C}}} = \frac{50 \text{ V}}{10^6 \Omega} \approx 0,05 \text{ mA}$$



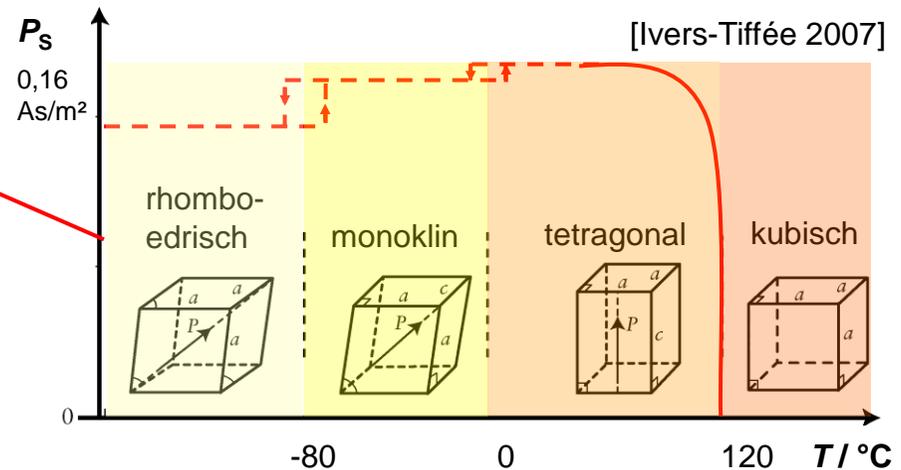
Was passiert bei einem PTC Kaltleiter im Unterschied zu einem Varistor?

Temperatureinfluss auf das Bauelement in bestimmten Bereich



Was passiert im PTC in diesem Temperaturbereich?

Sponante Änderung des Gitters

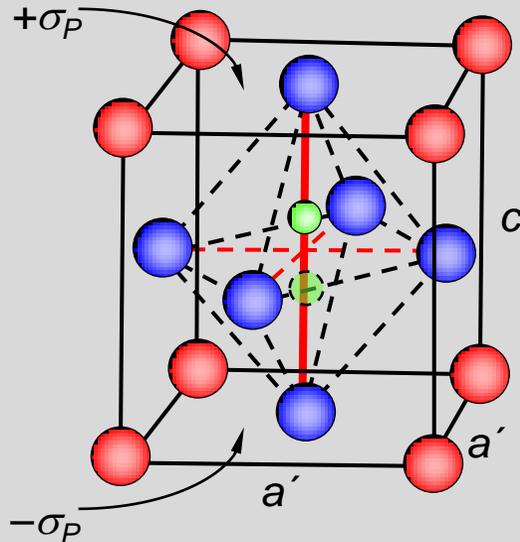


T_C ist Funktion der Korngröße
 → kein direktes Umklappen von allen Körnern gleichzeitig, sondern ein mit T voranschreitender Vorgang!

→ Polarisation P_s fällt weg
 → E_A steigt, weil KG nicht mehr durch P_s kompensiert werden.

- $T < T_C$:
- tetragonales Gitter
 - ferroelektrischer Zustand
 - permanente Flächenladungen σ_P
 - **spontane Polarisation P_S**

● Ti^{4+} kann verschoben werden → P_S



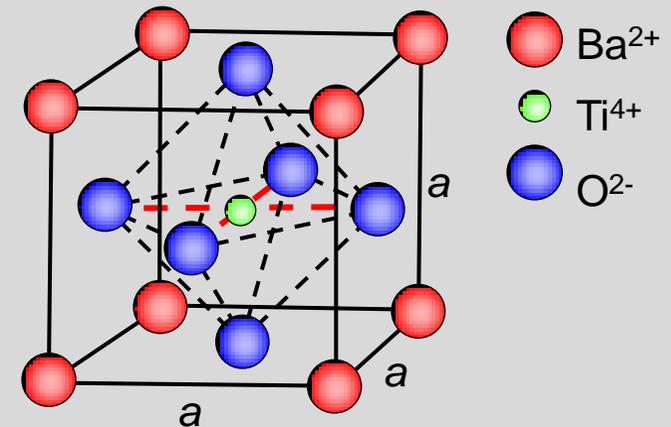
50

T_C : Phasenumwandlungstemperatur bzw. Curie-Punkt

150

- $T > T_C$:
- kubisches Gitter
 - paraelektrischer Zustand
 - **keine Polarisation P_S mehr**

● Ti^{4+} ist fest auf seinem Gitter Platz

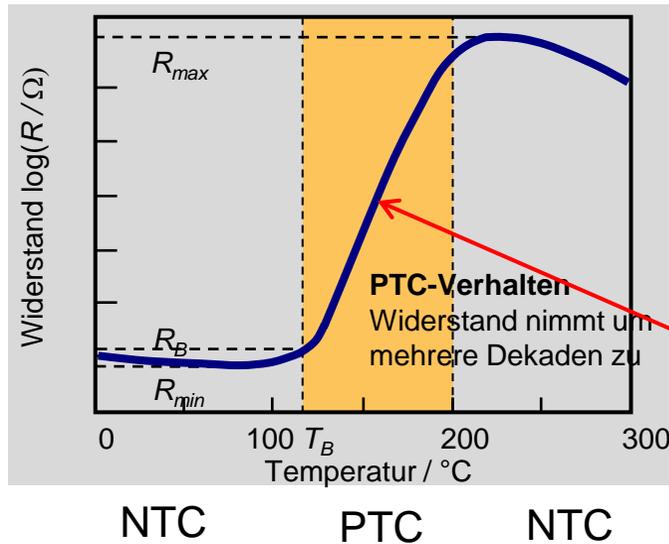


250

$T / ^\circ C$

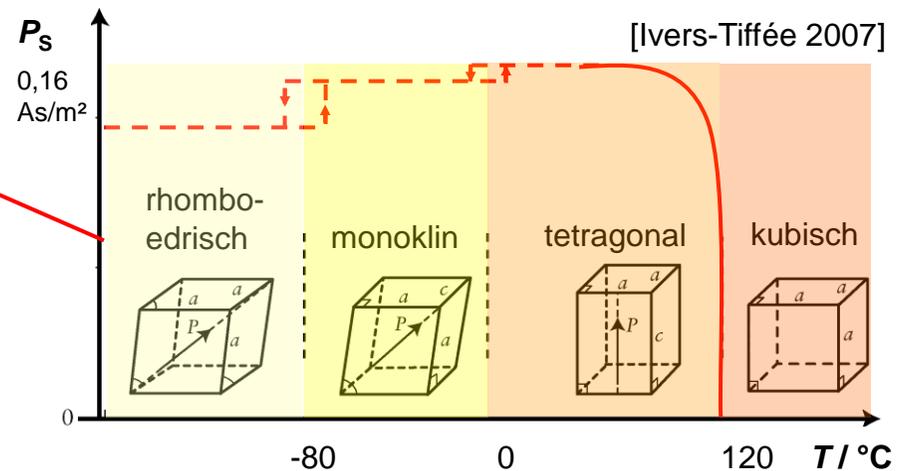
Was passiert bei einem PTC Kaltleiter im Unterschied zu einem Varistor?

Temperatureinfluss auf das Bauelement in bestimmten Bereich



Was passiert im PTC in diesem Temperaturbereich?

Sponante Änderung des Gitters

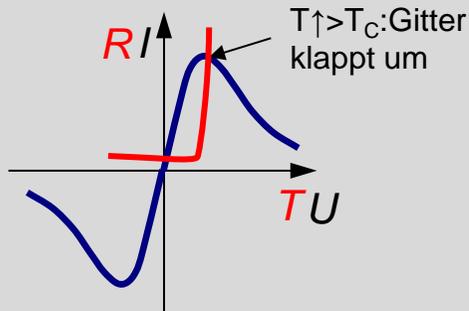


→ Polarisation P_s fällt weg

→ E_A steigt, weil KG nicht mehr durch P_s kompensiert werden.

Kaltleiter PTC

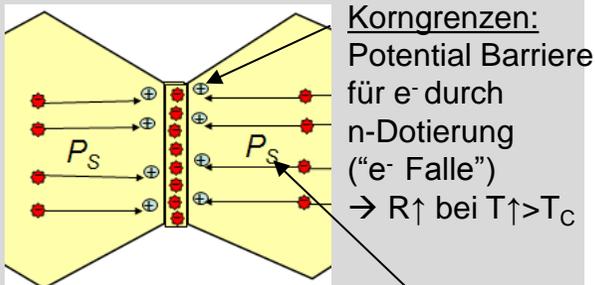
→ R steigt mit T



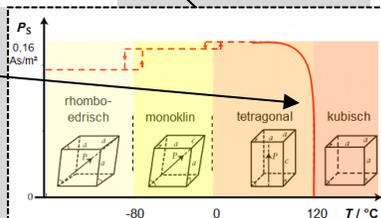
Bsp: n-dot. BaTiO₃ (Ferroelektrika / Perowskit = ABO₃)

Korngrenzeffekte

Eigenerwärmung



thermisch angeregt:
Gitter klappt um
→ Polarisation P_s setzt aus



Zusammenfassung:

Sinn: Bestimmung der Stromstärken.
Durch das Erwärmen des PTCs wird der fließende Strom gedrosselt!

$$\hat{i}_{RT} \approx 419 \text{ mA}$$

$$\hat{i}_{\text{End-T}} \approx 0,05 \text{ mA}$$

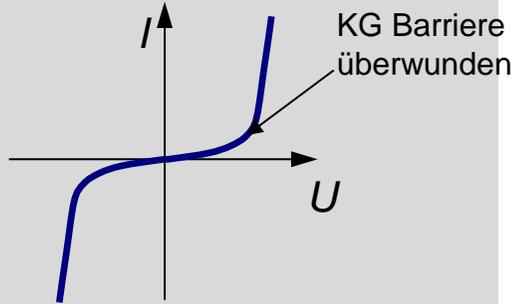
Diese Bauteileigenschaft kann durch den **Herstellungsprozess beeinflusst werden**, sodass das PTC für eine Vielzahl von Anwendungen (Temperaturbereiche) verwendet werden kann.

Wichtige Erkenntnis: Sprunghafter Anstieg des Widerstands in bestimmten Temperaturbereich durch spontane Gitterveränderung (spontane Polarisation führt zu erhöhtem E_A an der KG)

Vielen Dank!

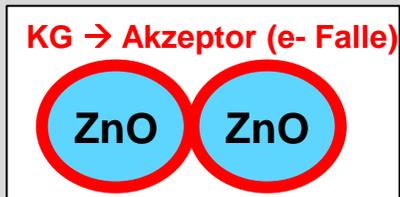
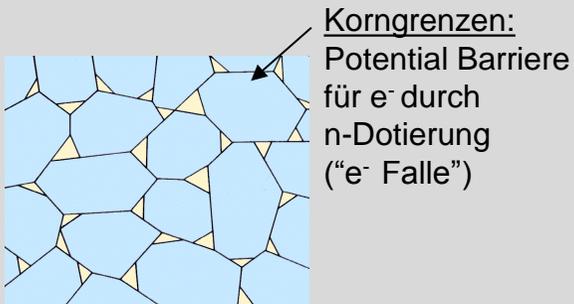
Varistor

→ R fällt mit Spannung



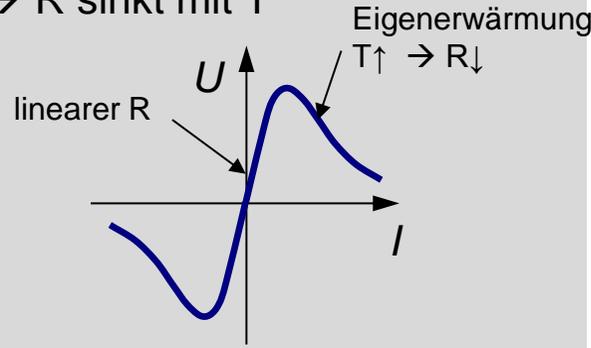
Bsp: n-dot. ZnO (Metalloxid)

Korngrenzeffekte



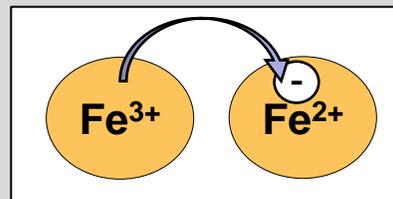
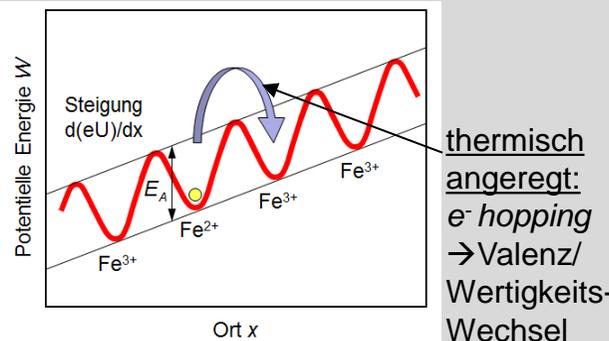
Heißeleiter NTC

→ R sinkt mit T



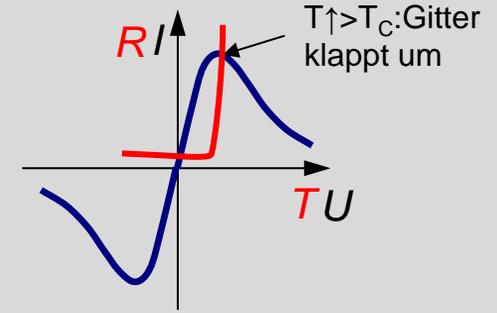
Bsp: (Ni,Mn)₃O₄ (Spinell = AB₃O₄)

Eigenerwärmung



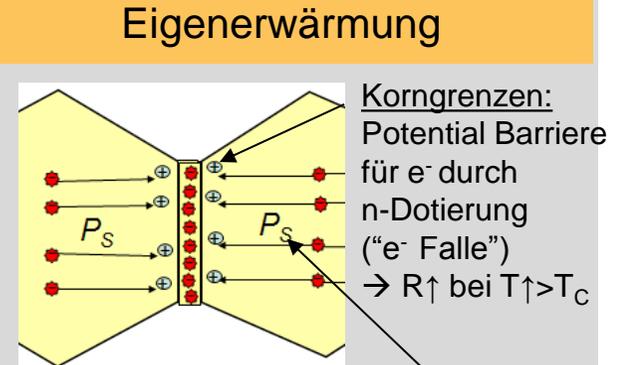
Kaltleiter PTC

→ R steigt mit T



Bsp: n-dot. BaTiO₃ (Ferroelektrika / Perowskit = ABO₃)

Korngrenzeffekte



thermisch angeregt:
Gitter klappt um
→ Polarisation P_s setzt aus

