

Passive Bauelemente

Der Beginn der Prüfung wird von der Prüfungsaufsicht bekannt gegeben. Wenn Sie vor dem offiziellen Beginn diese Seite umschlagen und die Aufgaben einsehen, wird dies als Täuschungsversuch gewertet. Füllen Sie folgenden Kasten vollständig aus.

Nachname Musterlösung	Vorname Extern	Matrikelnummer
	Zutreffendes bitte ankreuzen ☐ Erstprüfung ☐ Wiederholungsprüfung	EDV-Nummer
Wiederholer/innen bitte ausfüllen		
Straße/Nummer	Postleitzahl/Ort	
Telefon	E-Mail	

Zur Prüfung zugelassene / mitzubringende Hilfsmittel

- Es sind keine Hilfsmittel außer den angegebenen erlaubt.
- Formelsammlung für PB SS 2006 (ohne handschriftliche Notizen)
- Zwei handschriftlich (einseitig) beschriebene DIN-A4-Seiten
- Taschenrechner und Schreibzeug (Lineal, Stifte etc., keine Bleistifte verwenden)

Hinweise zum Ablauf der Prüfung

- Halten Sie Ihren Studierendenausweis und Ihre Zulassungsbescheinigung bereit.
- Nach Prüfungsbeginn kontrollieren Sie bitte zuerst, ob das vorliegende Prüfungsheft vollständig ist.
- Die Prüfungsdauer beträgt 3 Zeitstunden.
- Jegliche Kommunikation ist während der Prüfung untersagt.
- Während der Prüfung werden Fragen zu Aufgaben oder Stoffgebiet nicht beantwortet.
- Beachten Sie Tafelanschriften und Folien, die zu Beginn oder während der Prüfung gezeigt werden.

Hinweise zum Bearbeiten der Aufgaben

- Die Prüfung besteht aus 10 Kurzaufgaben (Teil 1) und 3 Rechenaufgaben (Teil 2). In den beiden Teilen sind jeweils 30 Punkte erreichbar.
- Falls Ihnen die deutsche Sprache Schwierigkeiten bereitet, können Sie Begründungstexte alternativ in englischer Sprache formulieren.
- Wenn Sie den Unterpunkt einer Rechenaufgabe nicht gelöst haben, rechnen Sie mit den angegebenen Größen / Zahlenwerten weiter.
- Lösungen auf eigenen Blättern, unzureichend gekennzeichnete Lösungen und Lösungen auf Blättern ohne Angabe von Name, Matrikelnummer oder Aufgabennummer werden nicht gewertet.
- Für die Lösung ist der dafür vorgesehene Bereich unterhalb der jeweiligen Aufgabenstellung zu verwenden. Falls der vorhandene Platz nicht ausreichen sollte, verwenden Sie das hinten beigefügte Zusatzblatt. Bei Bedarf werden von der Prüfungsaufsicht weitere Blätter ausgegeben. Für jede Aufgabe muss eine separate Zusatzseite verwendet werden. Sind auf einer Seite Teile mehrerer Aufgaben gelöst worden, wird entsprechend der Aufgabennummer in der Kopfzeile gewertet.
- Die Ergebnisse und Begründungen sind in die dafür vorgesehenen Bereiche, Felder oder Diagramme zu schreiben bzw. anzukreuzen. Beschriften Sie keinesfalls die grau hinterlegten Korrekturfelder.

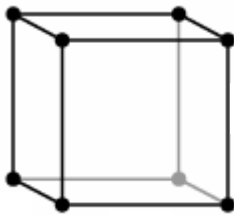
Teil 1: Kurzaufgaben (30 Punkte)

Kurzaufgabe K1: Elementarzellen

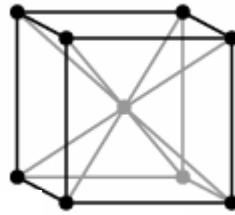
Strontium (Sr) ist ein häufiger Dotierungsstoff von Kathodenmaterialien der Hochtemperaturbrennstoffzelle. In reiner, metallischer Form liegt es in einem Gitter mit kubischer Grundstruktur vor. Die Koordinationszahl von Strontium beträgt 12.

a) Kreuzen Sie das zugehörige Gitter an und berechnen Sie die Gitterkonstante a . Der Atomradius von Strontium beträgt 215 pm. (2 Punkte)

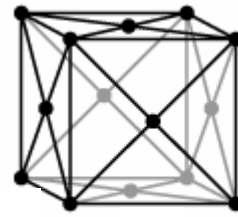
Kubisch-primitives Gitter



Kubisch-raumzentriertes Gitter



Kubisch-flächenzentriertes Gitter



Kubisch-flächenzentriertes Gitter

Gitterkonstante: $a = \sqrt{2} \cdot d = 2\sqrt{2} \cdot r = 608,11 \cdot 10^{-12} \text{ m}$

b) Cer findet im Elektrolyten von Hochtemperaturbrennstoffzellen Anwendung. Berechnen Sie die Dichte von reinem, metallischem Cer, wenn dies in kubisch-flächenzentrierter Form vorliegt. Der Atomradius von Cer beträgt 183 pm. (1 Punkt)

$$\rho_{\text{Ce}} = \frac{4 \text{ Atome}}{(2\sqrt{2} \cdot r)^3} \cdot \frac{1}{N_A} \cdot M_{\text{Ce}} = \frac{4 \text{ Atome}}{(2\sqrt{2} \cdot 183 \cdot 10^{-12} \text{ m})^3} \cdot \frac{1 \text{ mol}}{6,022 \cdot 10^{23} \text{ Atome}} \cdot 140,1 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \cdot \frac{\text{kg}}{1000 \text{ g}} = 6710,7 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Punkte K1

Nachname	Vorname(n)	Matrikelnummer
----------	------------	----------------

Kurzaufgabe K2: Chemische Bindungen

a) Welches Atom bzw. Ion der folgenden Paare hat jeweils den größeren Radius? Begründen Sie jeweils kurz Ihre Antwort. **(1 Punkt)**

Na	Antwort: Na	Begründung: Die gleiche Kernladung wirkt bei Na^+ auf insgesamt weniger Elektronen, daher werden die äußeren e^- näher an den Kern gezogen.
Na^+		

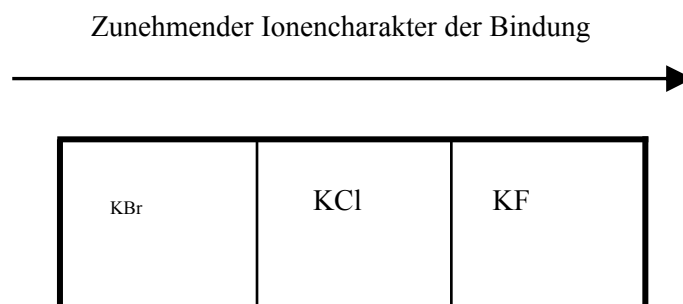
Br	Antwort: Br^-	Begründung: Die gleiche Kernladung wirkt bei Br auf insgesamt weniger Elektronen, daher werden die äußeren e^- näher an den Kern gezogen.
Br^-		

S^{2-}	Antwort: S^{2-}	Begründung: Bei identischer Besetzung der Elektronenschalen hat Chlor die größere Kernladungszahl.
Cl^-		

b) Welche Art von Bindung geht Neon (Ne) bei Temperaturen unter -246°C ein, wenn es von der Gasphase in den flüssigen Aggregatzustand übergeht? **(1 Punkt)**

Interatomare Bindung aufgrund der Ausbildung momentaner Dipolmomente: Van der Waals Bindung.

c) Ordnen Sie die drei binären Verbindungen KBr, KF, KCl nach zunehmendem Ionencharakter der chemischen Bindung und begründen Sie kurz Ihre Antwort. **(1 Punkt)**



Der Ionencharakter einer Verbindung steigt mit zunehmender Differenz der Elektronegativitäten der an der Verbindung teilhabenden Atome. (Folienskript Seite 25)

Die Elektronegativität der Elemente innerhalb einer gleichen Hauptgruppe steigt mit abnehmender Periode: $\text{XF} [\text{Periode 2}] > \text{XCl} [\text{Periode 3}] > \text{XBr} [\text{Periode 4}]$. χ_i bezeichnet hier die Elektronegativität des Elements i.

Daraus folgt:

$$(\text{XF} - \text{XK}) > (\text{XCl} - \text{XK}) > (\text{XBr} - \text{XK}).$$

Punkte K2

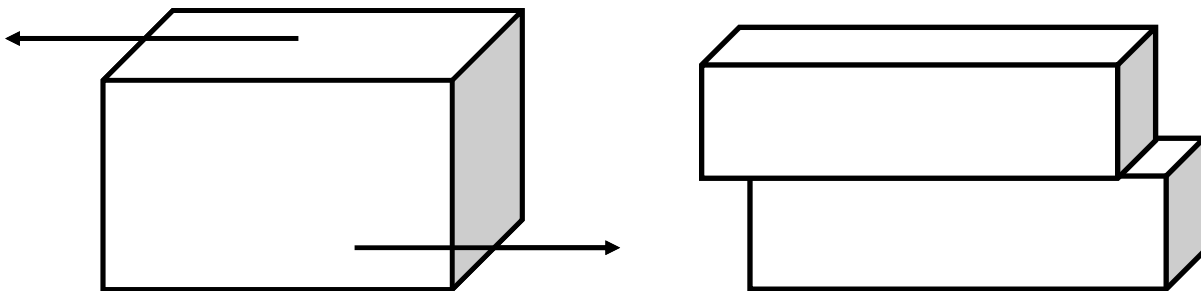
Kurzaufgabe K3: Kristallfehler

a) Auch in metallischen Werkstoffen treten häufig (immer) 1-dim. Kristallfehler auf. Bitte nennen Sie zwei 1-dim. Kristallfehler. **(1 Punkt)**

Stufenversetzung, Schraubenversetzung.

b) Was passiert mit Versetzungen in einem metallischen Werkstoff unter mechanischer Beanspruchung? Wie verhält sich der Werkstoff makroskopisch? Bitte zeichnen Sie in einer Skizze die Veränderung der gegebenen Ausgangsform. **(1 Punkt)**

Die Versetzungslinien wandern durch das Einwirken von Schubspannungen, die entlang Gleitebenen wirken. Makroskopisch wird der Werkstoff verformt.



c) Ordnen Sie den 3 Diagrammen jeweils das zugehörige Bruchverhalten eines metallischen Werkstoffs (Normaltyp, duktil, spröde) zu. **(1 Punkt)**

Spannung $\sigma_M \rightarrow$ Dehnung $\varepsilon_M \rightarrow$ F_{max}	Spannung $\sigma_M \rightarrow$ Dehnung $\varepsilon_M \rightarrow$ F_{max}	Spannung $\sigma_M \rightarrow$ Dehnung $\varepsilon_M \rightarrow$ F_{max}
normaltyp	duktil Fließgrenze setzt sehr spät ein, kaum elastische Verformung	spröde Geringe Dehnung möglich Bruch des Materials

Punkte K3

Nachname	Vorname(n)	Matrikelnummer
----------	------------	----------------

Kurzaufgabe K4: Metalle

Der Prüflingenieur Dr. Fahsenwinckl erhält drei längliche Proben mit identischer Geometrie, deren elektrischen Widerstand er bestimmen soll. Unglücklicherweise verwechselt sein Laborassistent die Proben.

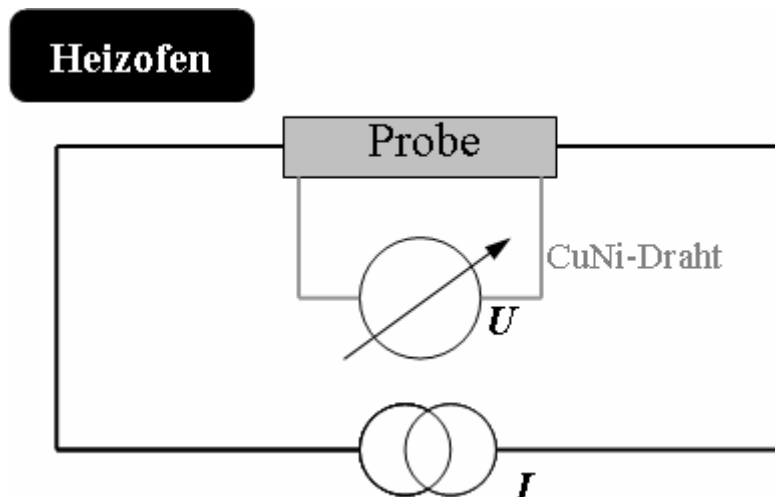
Probe	Material
A	Cu
B	Cu + 1 % Ni
C	Cu + 1 % Co

a) Es werden Widerstandsmessungen durchgeführt, mit deren Hilfe Sie die Zuordnung angeben sollen. Geben Sie die Zuordnung an und begründen Sie kurz. (2 Punkte)

Gemessener Widerstand	Probe
17,4 mΩ	C, Co größerer Abstand zu Cu im PSE als Ni
6,14 mΩ	B, Ni näher an Cu als Co im PSE
3,17 mΩ	A, niedrigster Widerstand reines Cu

Die Messungen müssen bei der gleichen Temperatur erfolgen. Dann ist die Betrachtung des Widerstandes zur Zuordnung erlaubt.

b) Bei der Messung der reinen Kupferprobe verwendet der Assistent die skizzierte Vierpunktanordnung. Da es im Labor kalt ist, schaltet er einen Heizofen in der Laborecke ein. Dabei stellt er fest, dass nach Abschalten des Messstroms I noch ein Spannungssignal U_{Rest} gemessen wird. Was für ein Effekt tritt hier auf? (1 Punkt)



Thermoelektrischer Effekt (Seebeck Effekt) Elektronen bewegen sich vom heißen zum kalten Ende der Probe, dadurch entsteht eine Spannung

Punkte K4

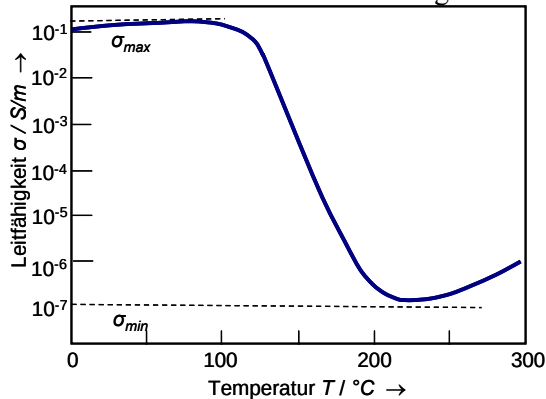
Kurzaufgabe K5: Textanalyse

Im Folgenden ist eine Publikation über die elektronische Leitung in halbleitenden Keramiken abgedruckt. Ihre Aufgabe ist die Arbeit zu beurteilen. Bearbeiten Sie dazu die unten stehenden Fragestellungen.

Elektronische Leitung in halbleitenden Keramiken

H. Desiato und D. Adams

Zur Untersuchung der elektronischen Leitung in halbleitenden Keramiken wurde folgende Kennlinie gemessen:



Im Bereich von 120 – 200 °C nimmt die Leitfähigkeit des Materials um 6 Größenordnungen ab, das heißt, das Material hat dort einen sehr hohen negativen Widerstandstemperaturkoeffizienten. Daher zählt dieses Material im o.g. Bereich zu den Kaltleitern.

Der Verlauf der Kennlinie ist durch temperaturabhängige Potentialbarrieren an den Korngrenzen der Keramik zu erklären. Das Material geht bei der Curie-Temperatur vom ferroelektrischen Zustand in den paraelektrischen Zustand über. Im paraelektrischen Zustand kompensieren Polarisationsladungen aufgrund permanenter Dipole die negativen Korngrenzladungen. Im ferroelektrischen Zustand kommt es durch spontane Ladungsverschiebungen zu Raumladungen, die die negativen Korngrenzladungen kompensieren. Die Potentialbarriere sinkt ab, da die relative Dielektrizitätszahl ϵ_r beim Übergang in den ferroelektrischen Zustand ansteigt. Aufgrund der wesentlich geringeren Potentialbarrieren an den Korngrenzen sinkt der Widerstand des Materials.

a) Finden Sie einen Fehler in den Zeilen 1-23. Geben Sie die Zeilennummer(n) an und beschreiben Sie, worin der Fehler besteht. **(1 Punkt)**

Zeile 19-21: Material hat sehr hohen positiven Widerstands-Temperaturkoeffizienten, da die Leitfähigkeit stark abfällt und der Widerstand daher stark ansteigt.

b) Finden Sie einen Fehler in den Zeilen 24-43. Geben Sie die Zeilennummer(n) an und beschreiben Sie, worin der Fehler besteht. **(1 Punkt)**

Zeile 30-37:

paraelektrischen Zustand: Raumladungen kompensieren die negativen Korngrenzladungen

ferroelektrischen Zustand: Durch spontane Ladungsverschiebungen kommt es zu Flächenladungen aufgrund permanenter Dipole, die die negativen Korngrenzladungen kompensieren.

c) Geben Sie zwei Anwendungen an, in denen dieses Material eingesetzt werden kann. **(1 Punkt)**

Übertemperaturschutz in Motorwicklungen

Exakte Temperaturmessung im Bereich $T = 150 - 200$ °C

Selbstregelnde Heizelemente

Punkte K5

Nachname	Vorname(n)	Matrikelnummer
----------	------------	----------------

Kurzaufgabe K6: Nichtlineare Widerstände

Gegeben sei ein temperaturabhängiger Widerstand. In Abbildung 1 ist der Verlauf des Widerstandswertes über dem Kehrwert der Temperatur aufgetragen.

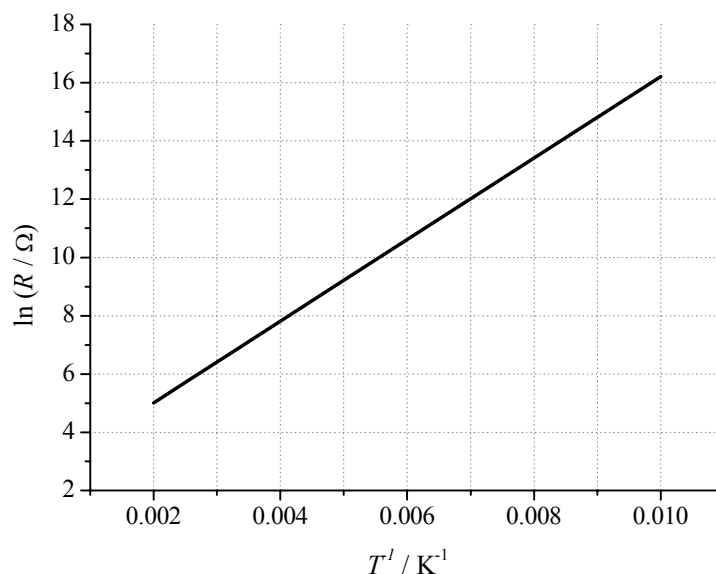


Abbildung 1 Temperaturabhängigkeit des Widerstandswertes

a) Um welchen temperaturabhängigen Widerstandstyp handelt es sich? Begründen Sie Ihre Antwort.

(1 Punkt)

NTC, der Widerstand sinkt mit steigender Temperatur

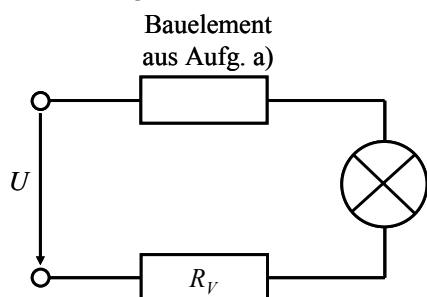
b) Bestimmen Sie aus dem Diagramm die Gleichung $R = f(T)$ des temperaturabhängigen Widerstandes bezogen auf die Nenntemperatur $T_N = 500 \text{ K}$. **(1 Punkt)**

$$R(T) = R_N \cdot e^{B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_N} \right)}$$

Aus dem Diagramm ablesen $R_N = 150 \Omega$,

$$\ln R(T) = \ln R_N + B \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_N} \right) \Rightarrow B = \frac{\ln R(T) - \ln R_N}{\frac{1}{T} - \frac{1}{T_N}} = \frac{12 - 5}{0.007 - 0.002} = 1400$$

c) Erfüllt die angegebene Schaltung mit dem Bauteil aus Teilaufgabe a) als Einschaltverzögerung ihren Zweck? Begründen Sie Ihre Antwort. **(1 Punkt)**

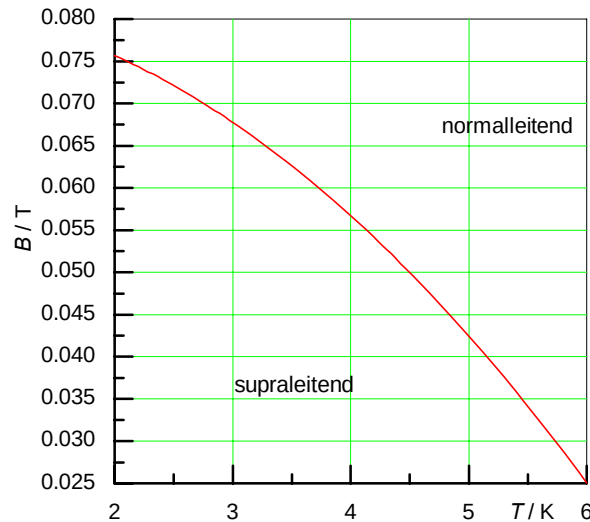


ja. Der NTC erwärmt sich $\rightarrow$ der Widerstand sinkt $\rightarrow$ die Lampe leuchtet

Punkte K6

Kurzaufgabe K7: Supraleitung

a) An dem Diagramm für einen Supraleiter 1. Art kann in Abhängigkeit von einem äußeren Magnetfeld und von der Temperatur abgelesen werden, in welchem Bereich das Material supraleitend ist. Berechnen Sie für dieses Material die Sprungtemperatur und die kritische Flussdichte bei $T = 0$ K. (2 Punkte)



$$B_c(T) = B_0 \cdot \left[1 - \left(\frac{T}{T_C} \right)^2 \right]$$

Aus dem Diagramm ablesen: $T_1 = 3$ K, $B_{C,1} = 0,0675$ T, $T_2 = 5$ K und $B_{C,2} = 0,0425$ T

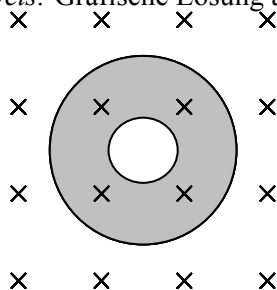
$$B_{C,1} \cdot \left[1 - \left(\frac{T_2}{T_C} \right)^2 \right] = B_{C,2} \cdot \left[1 - \left(\frac{T_1}{T_C} \right)^2 \right] \quad \text{weil } B_0 = B_0$$

$$B_{C,1} - B_{C,2} = \frac{1}{T_C^2} [B_{C,1} \cdot T_2^2 - B_{C,2} \cdot T_1^2]$$

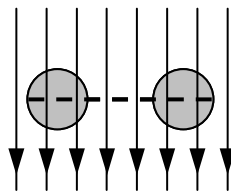
$$T_C = + \sqrt{\frac{1}{B_{C,1} - B_{C,2}} [B_{C,1} \cdot T_2^2 - B_{C,2} \cdot T_1^2]} = 7,2 \text{ K und } B_0 = \frac{B_{C,1}}{1 - T_1^2 / T_C^2} = 0,082 \text{ T}$$

b) Ein Torus aus diesem Material wird innerhalb eines Magnetfeldes abgekühlt (siehe Skizze). Ändert sich das Magnetfeld B innerhalb der Öffnung des Torus, wenn das Material supraleitfähig wird, und wenn ja, wie? (1 Punkt)

Hinweis: Grafische Lösung ausreichend, ergänzen Sie das Schnittbild für $T < T_C$

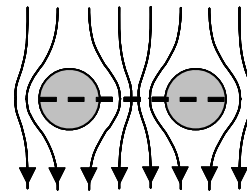


Schnittbild:



$T > T_C$

Schnittbild:



$T < T_C$

Das Magnetfeld im inneren nimmt zu, da die magnetischen Flusslinien aus dem Torusmaterial heraus auch in die Öffnung des Toruses hinein gedrängt werden (Meißner Ochsenfeld-Effekt)

Punkte K7

Nachname	Vorname(n)	Matrikelnummer
----------	------------	----------------

Kurzaufgabe K8: Dielektrika

a) In einem Folienkondensator befindet sich das Dielektrikum Epoxydharz. Welche Verlustleistung tritt in dem Dielektrikum auf? (2 Punkte)

- Wechselspannung: $U_{eff} = 1 \text{ V}$, $f = 60 \text{ Hz}$
- Epoxydharz: Dielektrizitätszahl $\epsilon_r = 3,5$, Verlustfaktor $\tan \delta = 10^{-2}$
- Plattenkondensator: Fläche $A = 10 \text{ cm}^2$, Dicke $d = 10 \text{ }\mu\text{m}$

$$C = 3,1 \mu\text{F}$$

$$\tan \delta = \frac{P_W}{P_B} = \frac{P_W}{U_B \cdot I_B} = \frac{P_W}{(U_B)^2 \cdot \omega \cdot C} = \frac{P_W}{(U_B)^2 \cdot 2\pi f \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d}}$$

$$P_W = (1\text{V})^2 \cdot 2\pi \cdot 60 \frac{1}{\text{s}} \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}} \cdot 3,5 \cdot \frac{10^{-3} \text{m}^2}{10^{-5} \text{m}} \cdot 0,01$$

$$P_W = 1,17 \cdot 10^{-8} \text{ W}$$

b) Ordnen Sie die Temperaturkoeffizienten der Elektronen-, Ionen- und Orientierungspolarisation zu! (1 Punkt)

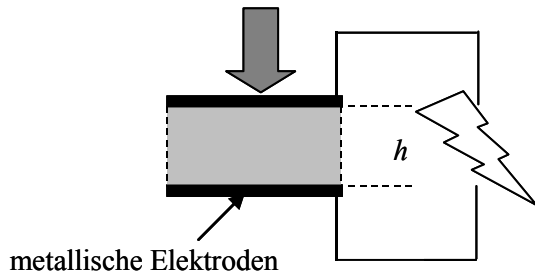
- $TK_\alpha \cong 0 \frac{1}{\text{K}}$ Elektronen - polarisation
- $TK_\alpha \cong 10^{-4} \frac{1}{\text{K}}$ Ionen - polarisation
- $TK_\alpha = -T^{-1}$ Orientierungs - polarisation

Punkte K8

Kurzaufgabe K9: Piezoelektrizität

Piezofeuerzeuge nutzen zur Funkenerzeugung Piezoelektrizität statt eines konventionellen Reibsteins. Dazu wird eine Feder im Piezo-Zündelement gespannt, die bei vollständig eingedrücktem Taster blitzartig entspannt wird. Daraufhin wird ein Stößel zum Zeitpunkt $t = 0$ mit großer Kraft auf einen Piezokristall geschlagen und es kommt zum Funkenüberschlag an den dicht beieinander liegenden Elektroden.

Mechanische Spannung (Stößel)



Zündspannung	U	=	14 kV
Dielektrizitätszahl	ϵ_r	=	6500
Piezoelektrische Ladungskonstante	d	=	$830 \cdot 10^{-12} \text{ m/V}$
Höhe	h	=	$400 \text{ } \mu\text{m}$

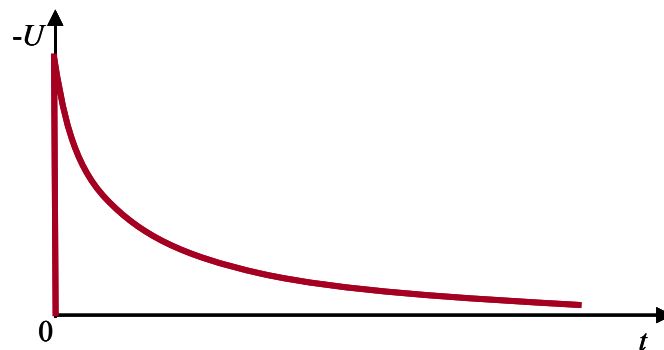
a) Welche mechanische Spannung σ_M muss der Piezokristall zum Zeitpunkt $t = 0$ erfahren, um die benötigte Zündspannung U für den Funkenüberschlag zu erreichen? **(1 Punkt)**

$$D = d_p \cdot \sigma_M + \epsilon_0 \cdot \epsilon_r^T \cdot E$$

$$U = E \cdot h = -\frac{d_p}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r^T} \cdot \sigma_M \cdot h$$

$$\sigma_M = \frac{U}{h} \cdot \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r^T}{d_p} = 14000 \text{ V} \cdot \frac{1}{400 \cdot 10^{-6} \text{ m}} \cdot \frac{8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}} \cdot 6500}{830 \cdot 10^{-12} \frac{\text{m}}{\text{V}}} = 2,4268 \cdot 10^9 \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

b) An die Elektroden wird nun ein Spannungsmessgerät angeschlossen, wodurch der Funkenüberschlag vermieden wird. Zeichnen Sie für $t > 0$ den qualitativen Verlauf der Spannung U am Messgerät für den Fall, dass der Stößel bei $t = 0$ konstant auf den Piezokristall drückt. **(1 Punkt)**



c) Nennen Sie 2 weitere Anwendungen für piezoelektrische Werkstoffe. **(1 Punkt)**

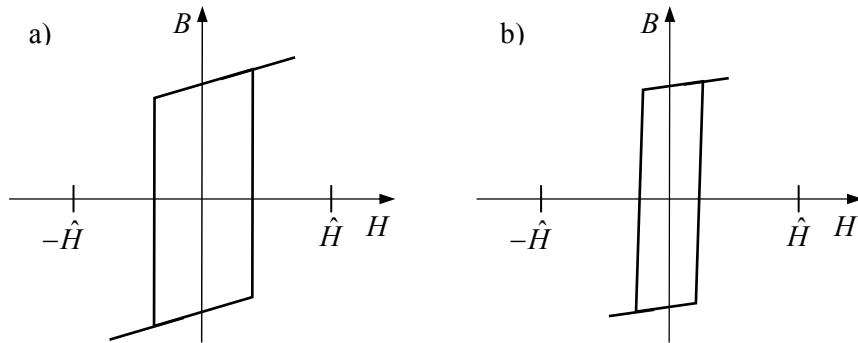
Schallerzeugung (Schwingquarz), Oberflächenfilter, Antriebe, Kraft-, Druckaufnehmer, ...

Punkte K9

Nachname	Vorname(n)	Matrikelnummer
----------	------------	----------------

Kurzaufgabe K10: Magnetismus

Für einen Transformator stehen zwei Eisenkerne mit den angegebenen $B(H)$ -Kurven zur Verfügung. Primärseitig wird eine sinusförmige Spannung so eingeprägt, dass bei der Betriebsfrequenz die $B(H)$ -Kurve zwischen $-\hat{H}$ und $+\hat{H}$ durchlaufen wird.



a) Das Diagramm in Bild 1 zeigt die Kupfer-, Wirbelstrom- und Hystereseverluste (P_{cu} , P_w , P_{hys}) des Transformators für beide Eisenkerne über der Frequenz. Überlegen Sie sich, welcher Verlustanteil ab einer gewissen Frequenz ausfällt und geben Sie an, für welchen Eisenkern dies zuerst geschieht. **(1 Punkt)**

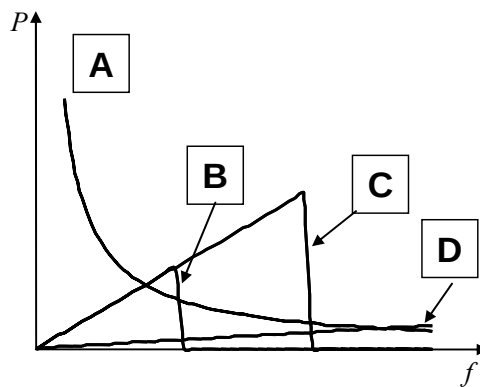


Bild 1: Frequenzabhängigkeit der Verlustanteile

Die Hystereseverluste fallen ab einer gewissen Frequenz aus, da die Koerzitivfeldstärke ab einer gewissen Frequenz nicht mehr erreicht wird (Strom zu klein). Dies geschieht zuerst für den Eisenkern a) da die Koerzitivfeldstärke dort als erstes nicht mehr erreicht wird.

b) Ordnen Sie die Verluste (P_{cu} , P_w , P_{hys}) den angegebenen Kurven zu und begründen Sie die Zuordnung. **(2 Punkte)**

A müssen die Kupferverluste sein (nehmen ab da der Strom mit zunehmender Frequenz abnimmt) 1 Punkt
B und C sind die Hystereseverluste und D die Wirbelstromverluste, da diese nicht ausfallen und mit zunehmender Frequenz ansteigen.

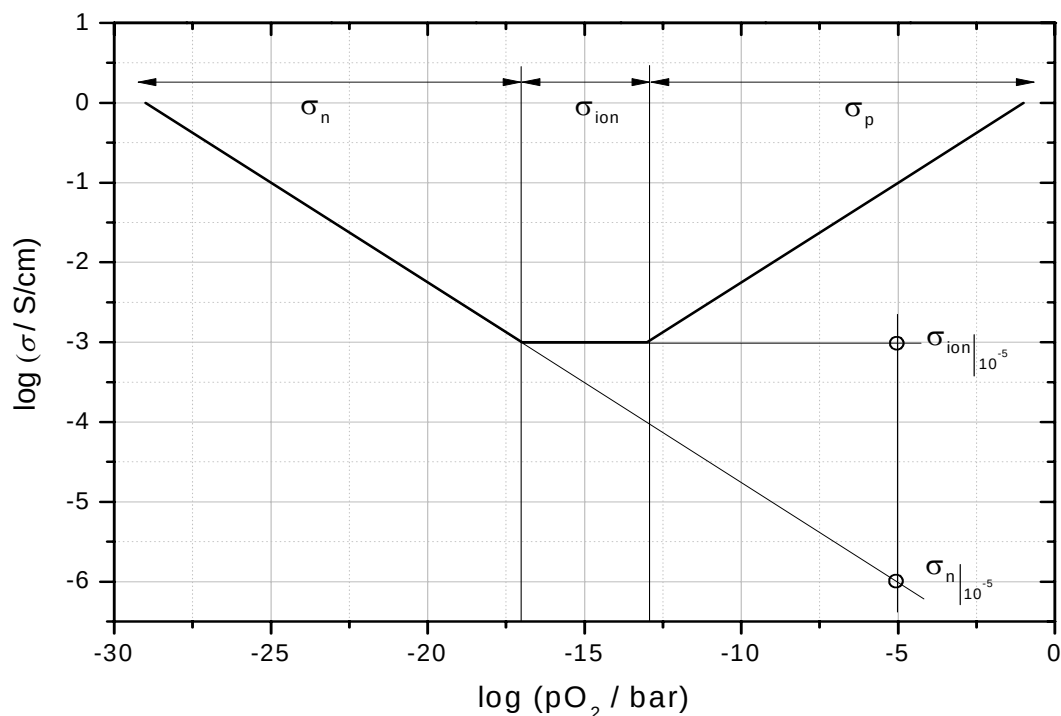
Punkte K10

Teil 2: Rechenaufgaben (30 Punkte)

Rechenaufgabe A1: Defektchemie

Gegeben ist die Leitfähigkeit $\sigma = \sigma_p + \sigma_n + \sigma_{ion}$ von Strontiumtitanat (SrTiO_3) als Funktion des Sauerstoffpartialdrucks $p\text{O}_2$ der umgebenden Gasatmosphäre bei einer Temperatur von 800 °C. Das SrTiO_3 ist mit einem Akzeptor der Konzentration $[\text{Fe}'] = 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ dotiert.

Hinweis: Die Beweglichkeiten $\mu_p = \mu_n$ werden als konstant angenommen.



a) Kennzeichnen Sie eindeutig die Partialdruckbereiche mit dominierender p-, n- und ionischer Leitfähigkeit. Ermitteln Sie den Leitfähigkeitswert von σ_n und σ_{ion} bei einem Sauerstoffpartialdruck von $p\text{O}_2 = 10^{-5} \text{ bar}$ aus dem Diagramm. **(3 Punkte)**

Hinweis: Die ionische Leitfähigkeit ist keine Funktion von $p\text{O}_2$, grafische Lösung ist möglich.

Grafische Lösung, Werte aus Diagramm: Bereiche für σ_n , σ_{ion} und σ_p eingezeichnet (1 Punkt)

$\sigma_n(p\text{O}_2 = 10^{-5} \text{ bar}) = 10^{-6} \frac{\text{S}}{\text{cm}} \quad (1 \text{ Punkt})$ $\sigma_{ion}(p\text{O}_2 = 10^{-5} \text{ bar}) = 10^{-3} \frac{\text{S}}{\text{cm}} \quad (1 \text{ Punkt})$	Punkte A1.a
---	-------------

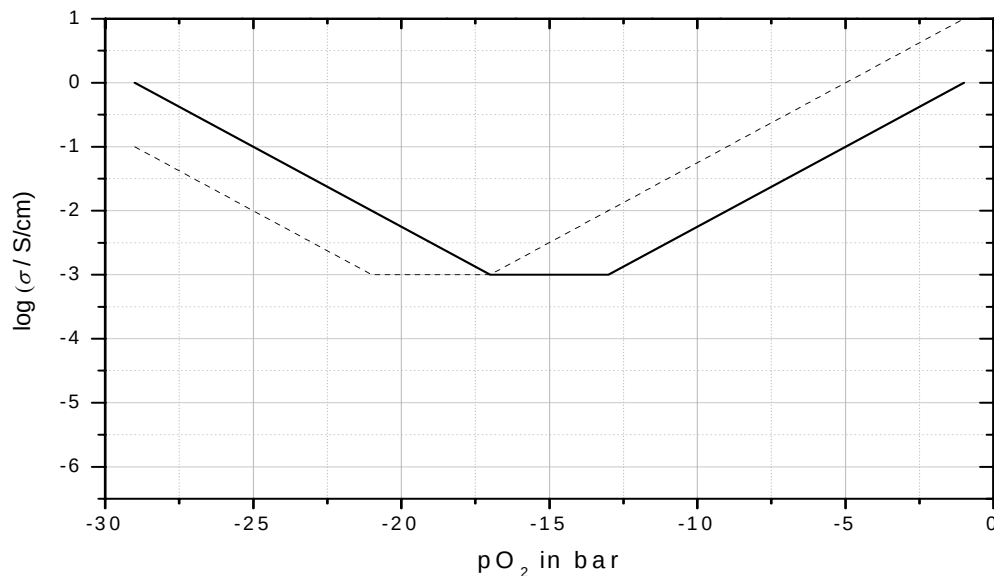
Nachname	Vorname(n)	Matrikelnummer
----------	------------	----------------

b) Geben Sie die vollständige Elektroneutralitätsbedingung (ENB) unter Verwendung aller relevanten Ladungsträger $V_O^{\bullet\bullet}, e^{\prime}, h^{\bullet}, Fe^{\prime}$ an. **(1 Punkt)**

ENB: $2[V_O^{\bullet\bullet}] + p = n + [Fe^{\prime}]$ (1 Punkt)	Punkte A1.b
--	-------------

c) Skizzieren Sie den Verlauf der Leitfähigkeit bei ca. 10-facher Akzeptorkonzentration $[Fe^{\prime}]$ qualitativ in das gegebene Diagramm. **(2 Punkte)**

Hinweis: $[V_O^{\bullet\bullet}]$ sei konstant bezüglich pO_2 .



Aus ENB: $2[V_O^{\bullet\bullet}] + p = n + [Fe^{\prime}]$ und $[V_O^{\bullet\bullet}] = const.$

Bei dominierender p-Leitung: $[Fe^{\prime}] \uparrow \Rightarrow p \uparrow \Rightarrow \sigma_p \uparrow$ (n=Minoritätsträger)

Bei dominierender, ionischer Leitung: $\sigma_{ion} = \text{konstant}$ bezüglich pO_2

Bei dominierender n-Leitung: $[Fe^{\prime}] \uparrow \Rightarrow n \downarrow \Rightarrow \sigma_n \downarrow$ (p=Minoritätsträger)

p-Leitung dominierend: $\sigma_p \uparrow$ (n=Minoritätsträger) für p (1 Punkt)	Punkte A1.c
ionische Leitung dominierend: $\sigma_{ion} = \text{konstant}$	
n-Leitung dominierend: $\sigma_n \downarrow$ (p=Minoritätsträger) für ion und n (1 Punkt)	

d) Bei hoher Temperatur gelten folgende Reaktionen:



Geben Sie zunächst die zugehörigen Massenwirkungsgesetze (MWG) an. Verwenden Sie für Reaktion (1) ΔG_0 als freie Reduktionsenthalpie und K_0 als Konstante, für die Reaktion (2) den Bandabstand E_g und die Konstante K_2 . Führen Sie dann geeignete Vereinfachungen ein und formen Sie die Massenwirkungsgesetze so um, dass Sie einen Ausdruck für $n =$ und $n \cdot p =$ erhalten. **(2 Punkte)**

Hinweis: Betrachten Sie die Konzentration $[\text{O}_o]$ als Konstante. Verwenden Sie die Beziehungen $[\text{O}_{2(g)}] = p\text{O}_2$ und $2[\text{V}_o^{\bullet\bullet}] \approx [\text{Fe}']$. Verwenden Sie für die Boltzmannkonstante k und für die Temperatur T .

$$\text{MWG (1)} \quad \Rightarrow \quad \frac{[\text{O}_{2(g)}]^{\frac{1}{2}} \cdot [\text{V}_o^{\bullet\bullet}] \cdot n^2}{[\text{O}_o]} = K_0 \cdot e^{-\frac{\Delta G_0}{k \cdot T}}$$

$$\text{mit } [\text{O}_{2(g)}] = p\text{O}_2 \text{ und } 2[\text{V}_o^{\bullet\bullet}] = [\text{Fe}']$$

$$n = \sqrt{\frac{K_0 \cdot 2[\text{O}_o]}{[\text{Fe}']}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \frac{\Delta G_0}{k \cdot T}} \cdot p\text{O}_2^{\frac{1}{4}}, \text{ mit } \sqrt{\frac{K_0 \cdot 2[\text{O}_o]}{[\text{Fe}']}} = K_0' \text{ folgt:}$$

$$n = K_0' \cdot e^{-\frac{1}{2} \frac{\Delta G_0}{k \cdot T}} \cdot p\text{O}_2^{\frac{1}{4}}$$

$$\text{MWG (2)} \quad \Rightarrow \quad n \cdot p = K_2 \cdot e^{-\frac{E_g}{k \cdot T}}$$

$n = K_0' \cdot e^{-\frac{1}{2} \frac{\Delta G_0}{k \cdot T}} \cdot p\text{O}_2^{\frac{1}{4}} \quad (1 \text{ Punkt})$ $n \cdot p = K_2 \cdot e^{-\frac{E_g}{k \cdot T}} \quad (1 \text{ Punkt})$	Punkte A1.d
--	-------------

Hinweis: Falls Sie den Aufgabenteil d) nicht gelöst haben, rechnen Sie bitte mit $n = K_n \cdot e^{R_n(T) \cdot \Delta G_0} \cdot p\text{O}_2$ und $n \cdot p = K_{np} e^{R_{np}(T) \cdot E_g}$ weiter.

Nachname	Vorname(n)	Matrikelnummer
----------	------------	----------------

e) Geben Sie für den p-leitenden Bereich die Abhängigkeit der Defektkonzentration p als Funktion von Temperatur T , Sauerstoffpartialdruck pO_2 , Reduktionsenthalpie ΔG_0 und Bandabstand E_g an. Welche Bedingung muss für den Bandabstand E_g gelten, damit die Löcherkonzentration p temperaturunabhängig wird? (2 Punkte)

MWG (2) in MWG(1):

$$p = \frac{K_2}{K_0} \cdot e^{-\frac{E_g}{k \cdot T}} \cdot e^{-\frac{\Delta G_0}{2 \cdot k \cdot T}} \cdot pO_2^{\frac{1}{4}}$$

$$p = \frac{K_2}{K_0} \cdot e^{-\frac{1}{2 \cdot k \cdot T} (2E_g - \Delta G_0)} \cdot pO_2^{\frac{1}{4}}$$

Mit Hinweis: $p = \frac{K_{np}}{K_n} \cdot e^{R_{np(T)} E_g - R_n(T) \Delta G_0} \cdot pO_2^{-1}$

Bedingung für Temperaturunabhängigkeit:

$$2 \cdot E_g - \Delta G_0 = 0$$

$$E_g = \frac{1}{2} \Delta G_0$$

Mit Hinweis: $E_g = \frac{R_{np(T)}}{R_{np(T)}} \cdot \Delta G_0$

$p = \frac{K_2}{K_0} \cdot e^{-\frac{1}{2 \cdot k \cdot T} (2E_g - \Delta G_0)} \cdot pO_2^{\frac{1}{4}} \quad (1 \text{ Punkt})$ $E_g = \frac{1}{2} \Delta G_0 \quad (1 \text{ Punkt})$	Punkte A1.e
---	-------------

Rechenaufgabe A2: Pyroelektrika

Ein $A = 200 \text{ mm}^2$ großer Pyrodetektor wird in einem Bewegungsmelder zur Überwachung eines Hauseingangs eingesetzt (Bild 1). Ein Besucher läuft frontal auf die Haustür zu und befindet sich zum Zeitpunkt $t = 0$ in dem vom Bewegungsmelder überwachten Bereich.

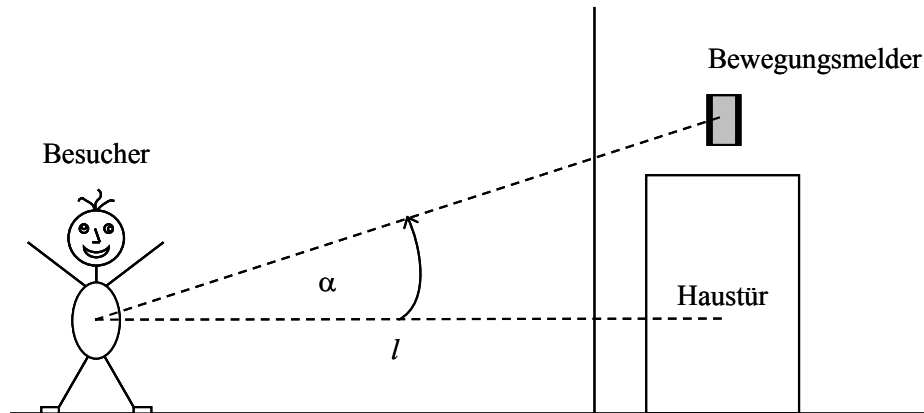


Bild 1: Besucher und Bewegungsmelder

a) Der Abstand zur Haustür betrage $l = 2 \text{ m}$, der Winkel $\alpha = 30^\circ$. Die vom Besucher radial abgestrahlte Wärmeleistung beträgt $P = 60 \text{ W}$. Berechnen Sie die auf den Detektor auftreffende Wärmeleistung P_S . (3 Punkte)

Hinweis: Der Besucher kann als punktförmige Wärmequelle betrachtet werden.

Abstand Besucher – Sensor:

$$l' = \frac{l}{\cos \alpha} \quad (1 \text{ Punkt})$$

am Sensor eintreffende Leistung:

$$P_S = P \cdot \frac{A_{\text{Sensor} \perp \text{Strahlung}}}{A_{\text{Kugel}}} \quad (1 \text{ Punkt})$$

$$A_{\text{Sensor} \perp \text{Strahlung}} = A \cdot \cos \alpha$$

$$A_{\text{Kugel}} = 4\pi l'^2 = 4 \cdot \pi \cdot \frac{l^2}{(\cos \alpha)^2}$$

$$\rightarrow P_S = \frac{P \cdot A \cdot \cos \alpha}{4 \cdot \pi \cdot \frac{l^2}{(\cos \alpha)^2}} = \frac{P \cdot A \cdot (\cos \alpha)^3}{4 \cdot \pi \cdot l^2} = 0.155 \text{ mW} \quad (1 \text{ Punkt})$$

$P_S = 0.155 \text{ mW}$	Punkte A2.a
--------------------------	-------------

Hinweis: Wenn Sie diesen Punkt nicht gelöst haben, rechnen Sie mit $P_S = 0,100 \text{ mW}$ weiter.

Nachname	Vorname(n)	Matrikelnummer
----------	------------	----------------

In Bild 2 sind Kennlinien der remanenten Polarisation P_R über der Temperatur T von drei verschiedenen Materialien A, B und C gegeben.

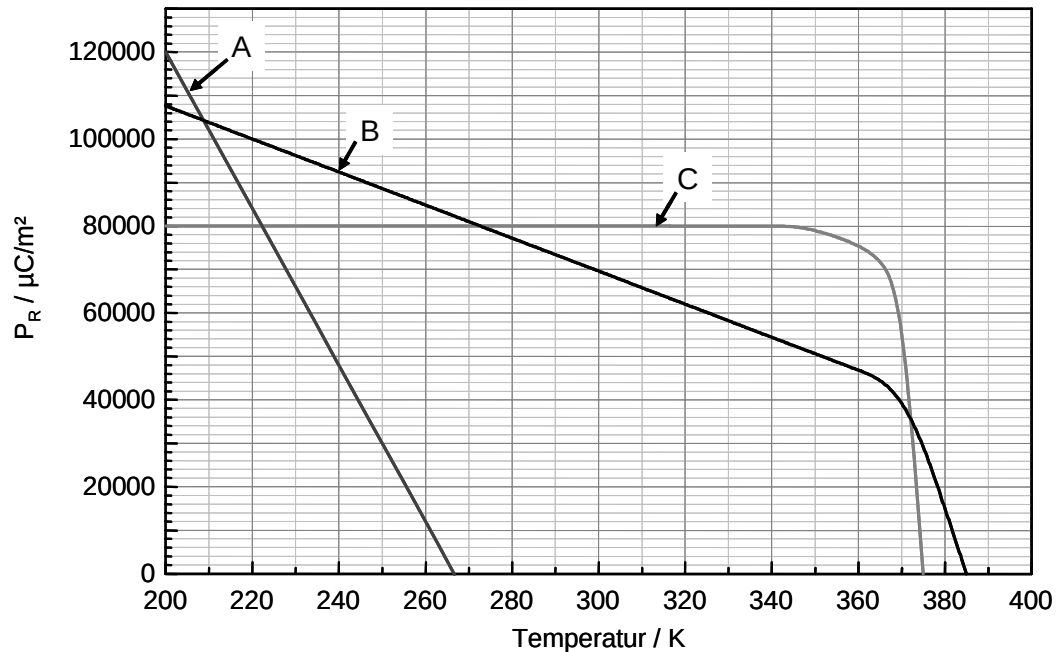


Bild 2: Kennlinien der remanenten Polarisation

b) Der Pyrodetektor wird bei einer Umgebungstemperatur von $T_U = 25\text{ °C}$ eingesetzt. Welcher der drei Werkstoffe aus Bild 2 ist für die Verwendung als Pyrodetektor geeignet? Geben Sie eine kurze Begründung für Ihre Wahl an und berechnen Sie den Pyrokoeffizienten π_P . (2 Punkte)

$$\pi_P = \left| \frac{dP_r}{dT} \right|_{\text{linear}} = \left| \frac{\Delta P_r}{\Delta T} \right| = \left| \frac{100000 \frac{\mu\text{C}}{\text{m}^2} - 62000 \frac{\mu\text{C}}{\text{m}^2}}{220 \text{ K} - 320 \text{ K}} \right|$$

$$= \frac{38000 \frac{\mu\text{C}}{\text{m}^2}}{100 \text{ K}} = 380 \frac{\mu\text{C}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

geeignetes Material: B, da nur Material B pyroelektrisches Verhalten bei 25 °C zeigt (1 P)	Punkte A2.b
Pyrokoeffizient: $\pi_P = 380 \frac{\mu\text{C}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$ (1 P)	

Hinweis: Wenn Sie diesen Punkt nicht gelöst haben, rechnen Sie mit $\pi_p = 375 \frac{\mu\text{C}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$ weiter.

c) Für $t \leq 0$ s befindet sich der Pyrodetektor im thermischen Gleichgewicht mit der Umgebung $T_S = T_U$. Zum Zeitpunkt $t = 0$ fällt die vom Besucher abgestrahlte Wärmeleistung P_S aus Teil a) auf den Pyrodetektor und dessen Temperatur T_S steigt über die Umgebungstemperatur T_U an. Berechnen Sie den Verlauf der Sensortemperatur $T_S(t)$. **(3 Punkte)**

Hinweise:	Masse Wärmekapazität Wärmeableitungskoeffizient Abgeführte thermische Leistung	$m = 120 \text{ mg}$ $c = 420 \text{ J/kgK}$ $k_{ab} = 10 \text{ mW/K}$ $P_{ab} = k_{ab} \cdot (T_S - T_U)$
	Temperaturänderung	$\frac{dT(t)}{dt} = \frac{P(t)}{c \cdot m}$
	Lösung für die DGL $\frac{dy(x)}{dx} = a \cdot y_0 + a \cdot b - a \cdot y(x)$	$y(x) = y_0 + b \cdot (1 - e^{-a \cdot x})$

Bestimmung von y_0 : $T_S(0) = T_U \rightarrow y_0 = T_U$

Leistungsbilanz: $P(t) = P_S - P_{ab}(t)$

$$\begin{aligned} \frac{dT_S(t)}{dt} &= \frac{P_S - k_{ab}(T_S(t) - T_U)}{c \cdot m} \\ &= \frac{k_{ab}}{c \cdot m} \cdot T_U + \frac{k_{ab}}{c \cdot m} \cdot \frac{P_S}{k_{ab}} - \frac{k_{ab}}{c \cdot m} \cdot T_S(t) \end{aligned}$$

Vergleich mit DGL liefert: $a = \frac{k_{ab}}{c \cdot m}$, $b = \frac{P_S}{k_{ab}}$

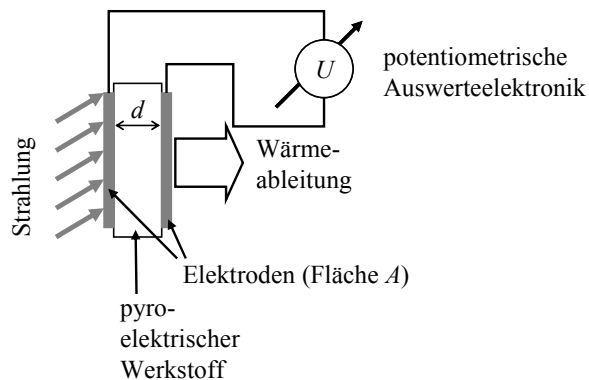
Temperaturverlauf: $T_S(t) = T_U + \frac{P_S}{k_{ab}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{k_{ab}}{c \cdot m} \cdot t}\right)$

$T_S(t) = T_U + \frac{P_S}{k_{ab}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{k_{ab}}{c \cdot m} \cdot t}\right) = 298,15 \text{ K} + 0,0155 \text{ K} \cdot \left(1 - e^{-0,198 \frac{1}{s} \cdot t}\right)$	Punkte A2.c
--	-------------

Hinweis: Falls Sie diesen Punkt nicht gelöst haben, rechnen Sie mit $\Delta T_S(t) = 0,01 \cdot \left(1 - e^{-0,2 \cdot 10^{-3} \cdot t}\right)$ weiter.

Nachname	Vorname(n)	Matrikelnummer
----------	------------	----------------

Der Pyrodetektor ist an den Seiten mit metallischen Elektroden versehen und an eine potentiometrische Auswertelektronik angeschlossen (Bild 3). Aufgrund von Leckströmen befinden sich Ladungen auf den Elektroden und bei der Temperatur $T_S = T_U$ wird keine Spannung gemessen.



Eigenschaften des Pyrodetektors

Dicke: $d = 80 \mu\text{m}$

Elektrodenfläche: $A = 200 \text{ mm}^2$

Dielektrizitätszahl: $\epsilon_r = 290$

Bild 3

d) Aufgrund der Erwärmung des Pyrodetektors $T_S(t)$ durch den Besucher wird eine Spannung $U(t)$ gemessen. Um Fehlalarme zu vermeiden, wird eine Ansprechspannung U_A eingestellt. Diese soll unter den zuvor betrachteten Bedingungen nach einer Zeit $t_A = 1 \text{ sec}$ erreicht werden. Berechnen Sie die notwendige Ansprechspannung U_A . (2 Punkte)

Hinweis: Das Spannungsmessgerät wird als ideal angenommen ($R_i \rightarrow \infty$).

Spannungsverlauf:
$$U(t) = \frac{\pi_P \cdot A}{C} \cdot \Delta T_S(t) \quad (1P)$$

Ansprechspannung:
$$U_A = U(t_A) = \frac{\pi_P \cdot A}{C} \cdot \Delta T_S(t_A) = \frac{\pi_P \cdot A}{\epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d}} \cdot \Delta T_S(t_A) = \frac{\pi_P \cdot d}{\epsilon_0 \epsilon_r} \cdot \Delta T_S(t_A) \quad (1P)$$

$$\Delta T_S(t_A) = \frac{P_S}{k_{ab}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{k_{ab} \cdot t}{c \cdot m}} \right) = \frac{0.155 \text{ mW}}{10 \frac{\text{mW}}{\text{K}}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{10 \frac{\text{mW}}{\text{K}}}{420 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 120 \text{ mg}} \cdot 1 \text{ s}} \right) = 3.075 \cdot 10^{-3} \text{ K}$$

$$U_A = U(t_A) = \frac{380 \frac{\mu\text{C}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \cdot 80 \mu\text{m}}{8.854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}} \cdot 290} \cdot 3.075 \cdot 10^{-3} \text{ K} = 0.036 \text{ mV}$$

$U_A = \frac{\pi_P \cdot A}{C} \cdot \Delta T_S(t_A) = 36 \text{ mV}$	Punkte A2.d
---	-------------

Rechenaufgabe A3: Sperrschichtkondensatoren

In Bild 1 ist ein Typ-3-Keramikkondensator (Sperrschichtkondensator) modellhaft dargestellt. Dieser besteht aus „leitfähigen“ Körnern und „isolierenden“ Korngrenzen (Sperrschichten).

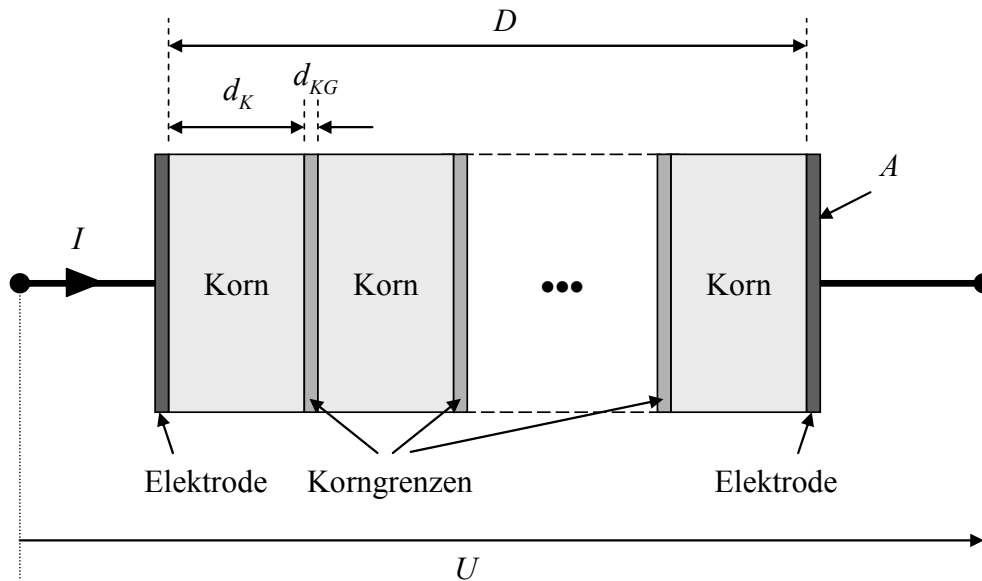


Bild1 Sperrschichtkondensator

Elektrodenfläche	$A = 20 \text{ mm}^2$
Kondensatordicke	$D = 500 \text{ } \mu\text{m}$
Korndicke	$d_K = 10 \text{ } \mu\text{m}$
Korngrenzdicke	$d_{KG} = 10 \text{ nm}$
Dielektrische Konstanten	$\epsilon_{r,K} = \epsilon_{r,KG} = 300$

a) Die Durchschlagspannung der Korngrenzen beträgt jeweils $U_{KG} = 2 \text{ V}$. Geben Sie die maximal mögliche Betriebsspannung an. **(1 Punkt)**

$$U_{\max} = n_{KG} \cdot U_{KG} = (n_K - 1) \cdot U_{KG} \approx \left(\frac{D}{d_K} \right) \cdot U_{KG} = \left(\frac{500 \text{ } \mu\text{m}}{10 \text{ } \mu\text{m}} - 1 \right) \cdot 2 \text{ V} = 98 \text{ V}$$

Alternativ: $n_K - 1 \approx n_K \rightarrow U_{\max} = 100 \text{ V}$

$U_{\max} = 98 \text{ V}$	Punkte A3.a
---------------------------	-------------

Die komplexe Impedanz des Kondensators wird in einem Frequenzbereich von 100 mHz bis 1 GHz aufgenommen. Real- und Imaginärteil sind in Bild 2 über der Frequenz dargestellt.

Nachname	Vorname(n)	Matrikelnummer
----------	------------	----------------

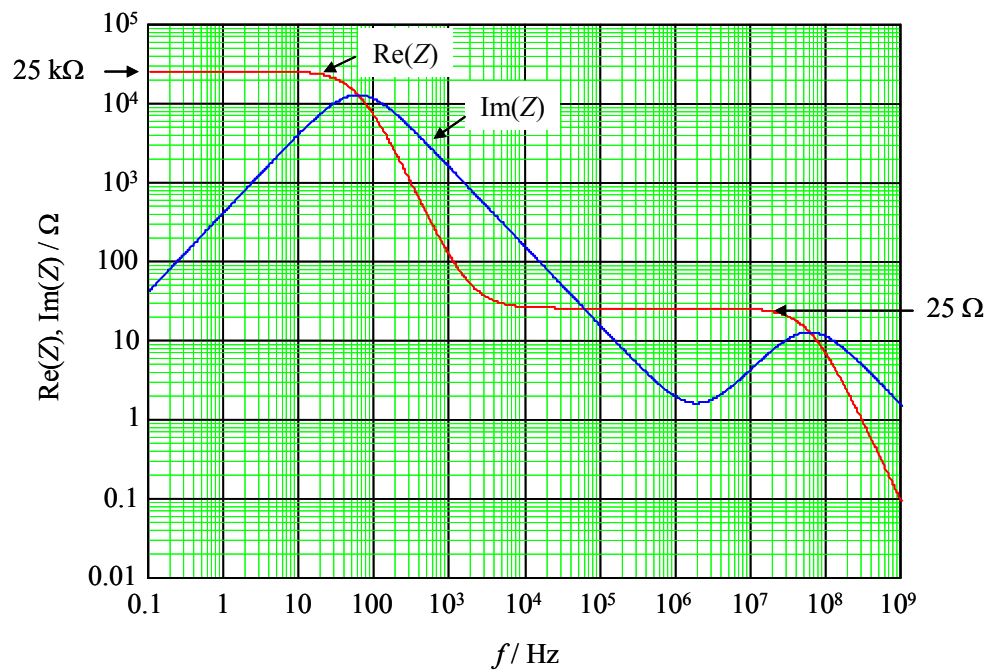
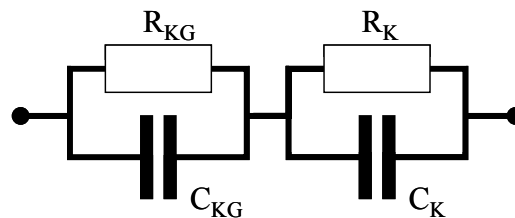


Bild 2

b) Skizzieren Sie ein Ersatzschaltbild für den Kondensator, welches die dielektrischen Eigenschaften und die Leitfähigkeiten der Korngrenzen und Körner berücksichtigt. **(2 Punkte)**



Punkte A3.b

c) Bestimmen Sie die elektrische Leitfähigkeit von Korngrenzen σ_{KG} und Körnern σ_K . **(4 Punkte)**

Hinweis: Lesen Sie geeignete Werte aus dem Diagramm (Bild 2) ab.

Anzahl Körner (bzw. Korngrenzen): $n_K \approx D/d_K = 500 \mu\text{m} / 10 \mu\text{m} = 50$

effektive Dicke der Körner: $D_K \approx 50 \cdot d_K = 500 \mu\text{m}$

effektive Dicke der Korngrenzen: $D_{KG} = (n_K - 1) \cdot d_{KG} \approx 0,5 \mu\text{m}$

R bei hohen Frequenzen: $R = 25 \Omega = R_K$

R bei niedrigen Frequenzen: $R = 25 \text{ k}\Omega = R_{KG} + R_K \approx R_{KG}$

Damit:

$$R_K = \frac{1}{\sigma_K} \cdot \frac{D_K}{A}$$

$$\sigma_K = \frac{1}{R_K} \cdot \frac{D_K}{A} = \frac{500 \mu\text{m}}{25 \Omega \cdot 20 \text{ mm}^2} = 10^{-2} \text{ S/cm}$$

$$R_{KG} = \frac{1}{\sigma_{KG}} \cdot \frac{D_{KG}}{A}$$

$$\sigma_{KG} = \frac{1}{R_{KG}} \cdot \frac{D_{KG}}{A} = \frac{0,5 \mu\text{m}}{25 \text{ k}\Omega \cdot 20 \text{ mm}^2} = 10^{-8} \text{ S/cm}$$

$\sigma_K = 10^{-2} \text{ S/cm} = 1 \text{ S/m}$ $\sigma_{KG} = 10^{-8} \text{ S/cm} = 10^{-6} \text{ S/m}$	Punkte A3.c
---	-------------

Hinweis: Wenn Sie diesen Punkt nicht gelöst haben, rechnen Sie mit $\sigma_{KG} = 2 \cdot 10^{-8} \text{ S/cm}$ und $\sigma_K = 2 \cdot 10^{-2} \text{ S/cm}$ weiter.

Nachname	Vorname(n)	Matrikelnummer
----------	------------	----------------

d) Die Kapazität des Kondensators $C_{ges} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_{r,ges} \cdot \frac{A}{D}$ bei niedrigen Frequenzen wird hauptsächlich durch die Korngrenzen bestimmt. Berechnen Sie $\epsilon_{r,ges}$, indem Sie den Kondensator als Reihenschaltung kleiner Minikondensatoren auffassen. **(2 Punkte)**

Mit $C_1 = C_2 = \dots = C_n = C_{KG}$ und $\frac{1}{C_{ges}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} = \frac{n}{C_n} = \frac{n}{C_{KG}}$

Folgt $C_{ges} = \frac{C_{KG}}{n_{KG}}$

$$C_{ges} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_{r,ges} \cdot \frac{A}{D} = \left(\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d_{KG}} \right) \cdot \frac{1}{n_{KG}} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{D_{KG}}$$

Daraus folgt $\epsilon_{r,ges} = \epsilon_r \cdot \frac{D}{D_{KG}} = 300 \cdot \frac{500 \mu\text{m}}{0,5 \mu\text{m}} = 300000$

$\epsilon_{r,ges} = 300000$	Punkte A3.d
-----------------------------	-------------

e) Ist es sinnvoll, den Kondensator bei einer Frequenz von $2 \cdot 10^9$ Hz zu betreiben? Geben Sie eine kurze Begründung für Ihre Antwort. **(1 Punkt)**

Der Betrieb des Kondensators bei dieser Frequenz ist nicht sinnvoll, da beide RC-Glieder bereits durch den jeweiligen Kondensator kurzgeschlossen sind.

Punkte A3.e
