

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

Schriftliche Kernfachprüfung 02. September 2014

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	Vorname	Matrikelnummer
	Zutreffendes bitte ankreuzen	
	<input type="checkbox"/> Erstprüfung	
	<input type="checkbox"/> Wiederholungsprüfung	
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 2013 (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 Immatrikulationsbescheinigung 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 20 Antwort-Wahl-Fragen (Teil 1), 3 Kurzaufgaben (Teil 2), sowie 3 Rechenaufgaben (Teil 3). Insgesamt sind 60 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.

Viel Erfolg!

Teil 1: Antwort-Wahl-Fragen (20 Punkte)

1. Mit der Schrödingergleichung
 - kann der Aufenthaltsort eines Elektrons in der Atomhülle zu jedem Zeitpunkt exakt bestimmt werden.
 - lassen sich Welleneigenschaften massebehafteter Teilchen beschreiben.
 - lässt sich die Aufenthaltswahrscheinlichkeit von Elektronen in Atomorbitalen berechnen.
 - kann die Geschwindigkeit eines Elektrons in der Atomhülle zu jedem Zeitpunkt exakt bestimmt werden.

2. Dehnmessstreifen (DMS): Die k-Faktoren von Gold und Platin
 - unterscheiden sich wesentlich.
 - haben beide etwa den Wert von 2.
 - sind größer als 10.
 - sind deutlich kleiner als die von Halbleitern.

3. Was versteht man unter spontaner Polarisation?
 - Das Auftreten einer hohen Dielektrizitätskonstante.
 - Die Ausbildung eines Dipolmoments ohne äußeres elektrisches Feld.
 - Die Verschiebung von Elektronen oder Ionen durch das Einwirken eines elektrischen Feldes.

4. Quantenmechanisches Atommodell: Die Wahrscheinlichkeitsdichte eines Elektrons im Wasserstoffatom
 - ist am größten für $r = 0$ (am Ort des Kerns).
 - ist am größten für $r = a_0$ (a_0 : Bohrscher Radius).
 - ist am größten für $r \rightarrow \infty$ (im Unendlichen).
 - ist überall gleich groß.

5. Metalle
 - sind gute elektrische Leiter aber schlechte Wärmeleiter.
 - sind gute elektrische Leiter und gute Wärmeleiter.
 - bei $T = 0$ K wird der spezifische Widerstand von den im Werkstoff vorhandenen Defekten, Verunreinigungen und Fremdatomen bestimmt.
 - haben eine sehr große Dielektrizitätszahl.

6. Ein Stab aus reinem Si wird an eine ideale Spannungsquelle angeschlossen. Eine Wärmeabgabe ist nicht möglich. Wie verhält sich der Strom mit der Zeit?
 - Der Strom fällt ab.
 - Der Strom steigt an.
 - Der Strom bleibt konstant

7. Warum sinkt der Beitrag der Orientierungspolarisation zur gesamten Polarisation mit steigender Temperatur für Temperaturen unterhalb der Curie-Temperatur?
 - Die Zahl der permanenten Dipole nimmt ab.
 - Die elektrostatische Abstoßung der permanenten Dipole wird größer.
 - Die thermische Bewegung der permanenten Dipole nimmt zu.

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

8. Ein Plattenkondensator sei mit einem aus zwei gleich dicken Schichten bestehenden Dielektrikum gefüllt. Für die Dielektrizitätszahlen dieser Materialien gilt $\epsilon_{r1} > \epsilon_{r2}$. In welchem Material wird mehr elektrische Feldenergie gespeichert?
- Im Material mit der Dielektrizitätszahl ϵ_{r1} .
- Im Material mit der Dielektrizitätszahl ϵ_{r2} .
- Die Feldenergie ist in beiden Materialien gleich groß.
9. Das Wiedemann-Franz Gesetz beschreibt die Proportionalität von elektrischer Leitfähigkeit und Wärmeleitung für
- Metalle
- Ionenleiter
- Nur für Einkristalle
- Halbleiter
10. Die quantentheoretisch erlaubten Zustände in einem Atom
- werden in der Reihenfolge ihrer Hauptquantenzahl $n = 1, 2, 3 \dots$ besetzt.
- werden in der Reihenfolge ihrer Energieniveaus besetzt.
- werden nach dem Pauli-Prinzip besetzt.
11. Können in einem Dielektrikum mit Ionen- und Elektronenpolarisierbarkeit die beiden Polarisationsmechanismen messtechnisch getrennt erfasst werden?
- Nur wenn das Dielektrikum keine Orientierungspolarisation aufweist.
- Nein, weil sich unterhalb der Resonanzfrequenz der Ionenpolarisation die beiden Anteile überlagern.
- Ja, durch Messung der Dielektrizitätszahl ϵ_r in verschiedenen, geeigneten Frequenzbereichen.
12. Ein reines Metall zeigt gegenüber einem solchen mit geringen Verunreinigungen einen niedrigeren spezifischen Widerstand, weil
- die mittlere Geschwindigkeit der Ladungsträger kleiner ist.
- die Ladungsträgerdichte größer ist.
- die Ladungsträgerbeweglichkeit größer ist.
13. Die Anzahl von Punktdefekten in Kristallgittern
- ist nicht von der Temperatur abhängig.
- nimmt im Allgemeinen mit steigender Temperatur ab.
- nimmt im Allgemeinen mit steigender Temperatur zu.
- ist bei gleicher Temperatur in unterschiedlichen Kristallgittern gleich.
14. Chemische Bindung
- Elementhalbleiter besitzen einen hohen ionischen Bindungsanteil.
- Bei einer kovalenten Bindung werden die Bindungswinkel zwischen den Atomen durch die Hybridorbitale festgelegt.
- Atome eines Elements gehen untereinander immer rein kovalente Bindungen ein.

15. Ein Kaltleiter taucht in Heizöl von 25 °C. Wie verschiebt sich seine Strom-Spannungs-Kennlinie, wenn die Temperatur des Heizöls ansteigt?
- Hin zu höheren Stromwerten.
 - Überhaupt nicht.
 - Hin zu niedrigen Stromwerten.
16. Halbleiter
- sind Werkstoffe mit ausschließlich ionischer Bindung.
 - sind Werkstoffe mit überwiegend oder ausschließlich kovalenter Bindung.
 - sind bei T = 0 K elektrisch isolierend.
17. Welche der Aussagen über ferromagnetische und ferroelektrische Werkstoffe sind richtig?
- Hysterese tritt bei ferroelektrischen und ferromagnetischen Werkstoffen unterhalb der Curie-Temperatur auf.
 - Die Hystereseschleifen B(H) und P(E) gehen für hohe H- bzw. E-Werte jeweils in eine Sättigungsgerade mit Steigung null über.
 - Beide weisen Domänenbildung auf.
18. Bariumtitanat wird zum Halbleiter, wenn La³⁺-Ionen an Stelle von Ba²⁺ Ionen eingebaut werden. Welche Ionen können die gleiche Wirkung bei Einbau an Stelle von Ti⁴⁺-Ionen erzielen?
- Eisen (Fe³⁺)
 - Zirkon (Zr⁴⁺)
 - Tantal (Ta⁵⁺)
19. Ein Kondensator ist mit trockener Luft gefüllt. Beim Einbringen von feuchter Luft wird seine Kapazität
- größer.
 - kleiner.
 - nicht geändert.
20. Die paramagnetische Suszeptibilität
- nimmt mit steigender Temperatur ab.
 - ist temperaturunabhängig.
 - nimmt mit steigender Temperatur zu.
 - ist in Supraleitern im supraleitenden Zustand besonders hoch

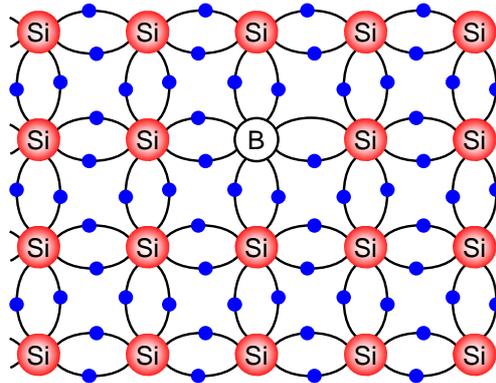
Punkte AWF

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

Teil 2: Kurzaufgaben (10 Punkte)

Kurzaufgabe K1: Halbleiter

a) In *Bild K1-1* ist die Bindungsstruktur eines idealen Siliziumkristalls, der mit Bor dotiert wurde, dargestellt. Zeichnen Sie analog zu den bereits eingezeichneten Bindungselektronen die entsprechenden Bindungselektronen zwischen Siliziumgitter und Bor-Atom ein. Wirkt Bor in Silizium als Donator oder Akzeptor? (1 Punkt)



Wirkung:

Akzeptor

Bild K1-1: Bor-dotiertes Siliziumgitter

Punkte K1.a

b) In *Bild K1-2* ist der typische Temperaturverlauf der Leitfähigkeit eines n-dotierten Halbleiters gegeben. Zeichnen Sie qualitativ den entsprechenden Temperaturverlauf für einen p-dotierten Halbleiter. Weisen Sie zudem die Bereiche für Störstellenreserve, Störstellenerschöpfung, sowie den intrinsischen Bereich korrekt zu. (2 Punkte)

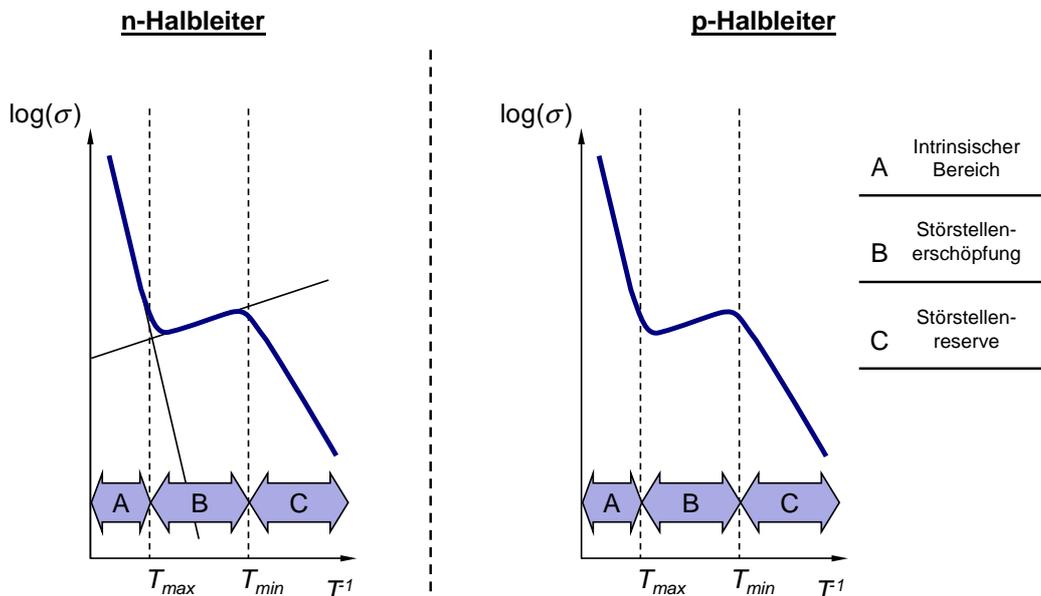


Bild K1-2: Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit dotierter Halbleiter

Punkte K1.b

Kurzaufgabe K2: Defektchemie

a) Lanthan (La) dotiertes Bariumtitanat ((Ba,La)TiO₃) enthält bei ausreichend geringen Sauerstoffpartialdrücken der Umgebung die folgenden Spezies:



Formulieren Sie die vollständige Elektroneutralitätsbedingung. (1 Punkt)

Elektroneutralitätsbedingung:

Lösung:

$$2 \cdot [V_{\text{O}}^{\bullet\bullet}] + [La_{\text{Ba}}^{\bullet}] + p = n + 2 \cdot [V_{\text{Ba}}^{\prime\prime}]$$

Punkte K2.a

b) Gegeben ist nun die spezifische Leitfähigkeit σ von Lanthan (La) dotiertem Bariumtitanat (Ba,La)TiO₃ als Funktion des Sauerstoffpartialdruckes pO_2 der umgebenden Gas-Atmosphäre (siehe *Bild K2-1*). Erklären Sie anschaulich die Ursache der unterschiedlichen Verläufe der Leitfähigkeit in den Bereichen A und B. (2 Punkte)

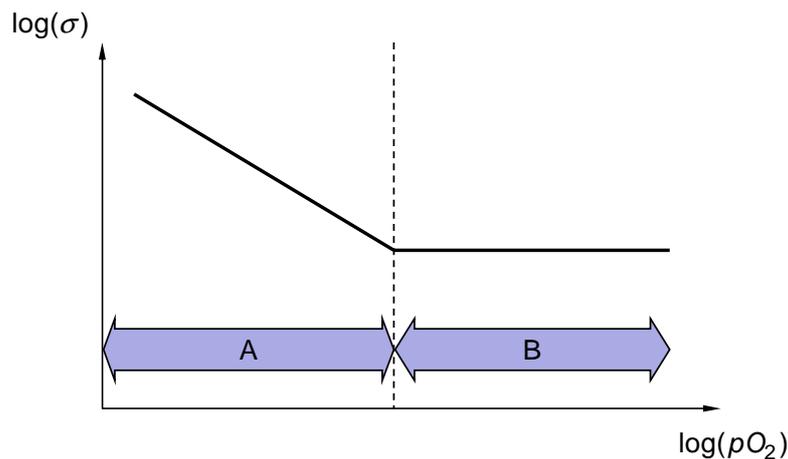


Bild K2-1: Abhängigkeit der spezifischen Leitfähigkeit vom Sauerstoffpartialdruck der umgebenden Gas-Atmosphäre

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

Ursache des Abfalls der Leitfähigkeit in Bereich A:

Lösung:

Die erhöhte Leitfähigkeit bei sehr geringen Sauerstoffpartialdrücken war bedingt durch den stattgefundenen Ausbau von Sauerstoff und der damit einhergehenden Freisetzung von Elektronen. Bei Erhöhung des Sauerstoffpartialdrucks wird dieser Prozess wieder umgekehrt: Sauerstoff wird wieder eingebaut und die dafür nötigen Elektronen gebunden, weswegen die Leitfähigkeit absinkt.

Ursache der konstanten Leitfähigkeit in Bereich B:

Lösung:

Eine konstante Leitfähigkeit kann nur durch einen Mechanismus verursacht werden, der unabhängig vom Sauerstoffpartialdruck und somit unabhängig vom eingebauten oder ausgebauten Sauerstoff wirkt. Da Lanthan in Bariumtitanat partialdruckunabhängig als Donator wirkt, wird die Leitfähigkeit in diesem Bereich dominiert durch die durch Dotierung eingebrachten Elektronen.

Punkte K2.b

Kurzaufgabe K3: Nichtlineare Widerstände

Wesentliches Merkmal von nichtlinearen Widerständen ist, dass der Widerstandswert von verschiedenen externen Parametern wie Druck, Temperatur oder einer anliegenden Spannung abhängt. Zu den wichtigsten nichtlinearen Bauteilen zählen der Varistor, der NTC und der PTC.

a) Ordnen Sie die angegebenen Bezeichnungen des Typ, den physikalischen Effekt und den Werkstoff in *Tabelle K3-1* dem entsprechenden Bauteil zu. (1 Punkt)

Typ

- A: Heißeleiter
- B: spannungsabhängiger Widerstand
- C: Kaltleiter

Physikalischer Effekt

- A: Korngrenzphänomene und Eigenerwärmung
- B: Hoppingleitung und Eigenerwärmung
- C: Korngrenzphänomene

Werkstoff/-klasse

- A: Metalloxid; n-dotiertes ZnO
- B: Spinell; (Ni,Mn)₃O₄
- C: Ferroelektrika; n-dotiertes BaTiO₃

Bauteil	Typ	Physikalischer Effekt	Werkstoff/-klasse
Varistor	B:spannungsabhängiger Widerstand	C:Korngrenzphänomene	A:Metalloxid; n-dotiertes ZnO
NTC	A:Heißeleiter	B: Hoppingleitung und Eigenerwärmung	B:Spinell; (Ni,Mn) ₃ O ₄
PTC	C:Kaltleiter	A:Korngrenzphänomene und Eigenerwärmung	C:Ferroelektrika; n-dotiertes BaTiO ₃

Tabelle K3-1

Punkte K3.a

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

Im folgenden *Bild K3-1* dargestellt sind typische Strom-Spannungs-Kennlinien der nichtlinearen Bauteile NTC, PTC und Varistor.

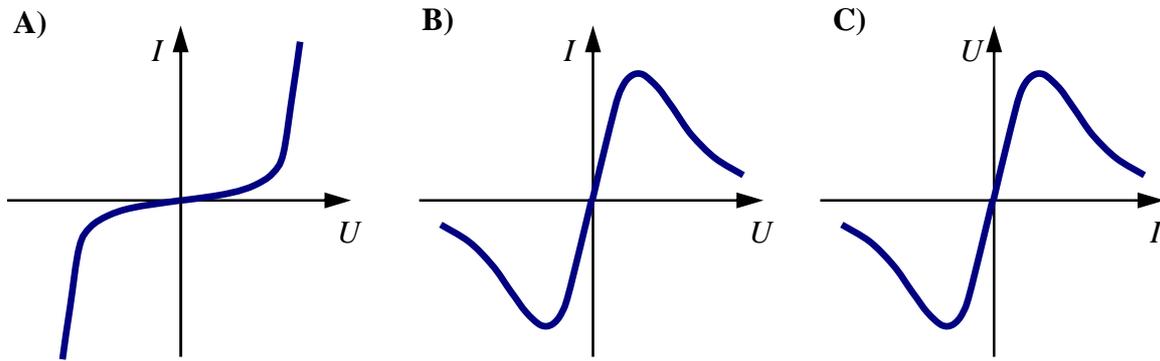


Bild K3-1

b) Ordnen Sie der jeweiligen Kennlinie das zugehörige Bauteil zu. (1 Punkt)

Kennlinie A: Varistor

Kennlinie B: PTC

Kennlinie C: NTC

Punkte K3.b

c) Varistoren, NTCs und PTCs haben viele Einsatzgebiete, die auf ihr materialspezifisches Verhalten zurückzuführen sind. Ordnen Sie in *Tabelle K3-2* jedem Bauteil sein typisches Einsatzgebiet, sowie das hierfür ausgenutzte materialspezifische Verhalten zu. (2 Punkte)

Einsatzgebiet

- A: Temperaturfühler
- B: Überspannungsschutz
- C: selbstregelndes Heizelement

Materialspezifisches Verhalten

- A: Alle Korngrenzen werden „durchgeschaltet“. Der Widerstand ist nur noch bestimmt durch die Korn-Leitfähigkeit.
- B: Aufgrund einer spontanen Gitteränderung (tetragonal → kubisch) bei T_C werden Korngrenzsperrschicht nicht mehr kompensiert.
- C: Elektronen nehmen thermische Energie aus der Umgebung auf, dementsprechend steigt die Wahrscheinlichkeit des Platzwechsels eines Elektrons.

Bauteil	Einsatzgebiet	Materialspezifisches Verhalten
Varistor	B: Überspannungsschutz	A: Alle Korngrenzen werden „durchgeschaltet“. Der Widerstand ist nur noch bestimmt durch die Korn-Leitfähigkeit.
NTC	A: Temperaturfühler	C: Elektronen nehmen thermische Energie aus der Umgebung auf, so steigt die Wahrscheinlichkeit des Platzwechsels (Wertigkeitswechsel).
PTC	C: selbstregelndes Heizelement	B: Aufgrund einer spontanen Gitteränderung (tetragonal → kubisch) bei T_C werden Korngrenzsperrschicht nicht mehr kompensiert.

Tabelle K3-2

Punkte K3.c

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

Teil 3: Rechenaufgaben (30 Punkte)

Rechenaufgabe A1: Thermoelement

In dieser Aufgabe soll ein Thermoelement konstruiert werden, das zur Temperaturmessung in einem Sinterofen genutzt werden soll.

a) Gegeben sei ein Leiterstück aus Nickel der Länge d und dem Drahtdurchmesser δ . Bestimmen Sie die Konzentration n der Leitungselektronen in dem Nickel-Leiterstück. **(1 Punkt)**

Hinweise: Nehmen Sie an, dass jedes Nickelatom genau ein Elektron als Leitungselektron abgibt. Der Draht habe einen kreisförmigen Querschnitt.

Dichte von Nickel	ρ_{Ni}	=	8,9 g/cm ³
Länge des Leiterstücks	d	=	10 cm
Durchmesser des Leiterstücks	δ	=	2 mm

Lösung:

Es gilt aus dem Periodensystem:

$$m_{\text{mol, Ni}} = 58.69 \text{ g}$$

Damit befinden sich

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

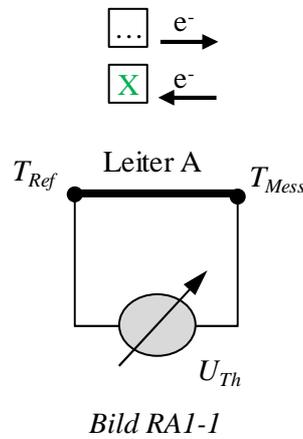
mol Nickelatome in einer Volumeneinheit. Dies entspricht einer absoluten Anzahl von

$$n = \frac{\rho_{\text{Ni}}}{m_{\text{mol, Ni}}} N_A = \frac{8,9 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}}{58,69 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}} \cdot 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1} \approx 9,1 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3} \text{ (1Punkt)}$$

Nickelatomen pro Volumen, was wegen des Hinweises gleich der Anzahl der Leitungselektronen ist.

$n \approx 9,1 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ (1Punkt)	Punkte R1.a
---	-------------

b) Das Leiterstück aus Aufgabenteil a) werde nun am einen Ende von Raumtemperatur T_{Ref} auf eine Temperatur T_{Mess} erhitzt. Kreuzen Sie in *Bild RA1-1* an, in welche Richtung sich die Elektronen (e^-) beim Erhitzen bewegen und benennen Sie den Effekt, der hierfür verantwortlich ist. (1 Punkt)



Verantwortlicher Effekt:

Seebeck-Effekt oder Thermodiffusion

Punkte R1.b

c) Erklären Sie, warum sich nach kurzer Zeit eine zeitlich konstante Verteilung von Elektronen entlang des Leiters einstellt. (1 Punkt)

Lösung:

- $j_{Diffusion} + j_{Drift} = 0$ (Formel: okay)
- es wird ein el. Feld aufgebaut, das der Thermodiffusion der Elektronen entgegen wirkt (Erklärung: okay)

Punkte R1.c

Erklärung oder Formel (1 Punkt)

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

Je nach verwendetem Material für das Leiterstück in *Bild RA1-1* entsteht eine andere Thermospannung U_{Th} . Der entsprechende Zusammenhang wird beschrieben durch die Gleichung:

$$U_{Th} = \eta \cdot \Delta T \quad (Gl. RA1-1)$$

mit der Temperaturdifferenz $\Delta T = T_{mess} - T_{Ref}$ und der materialspezifischen Größe η .

d) Bei dem in *Bild RA1-2* dargestellten Thermoelementpaar sind zwei unterschiedliche Leiter verbaut. Leiten Sie mit Hilfe von Gleichung *Gl. RA1-1* einen allgemeinen Ausdruck für die Spannung U_{Mess} her, die vom Messgerät gemessen wird. (1 Punkt)

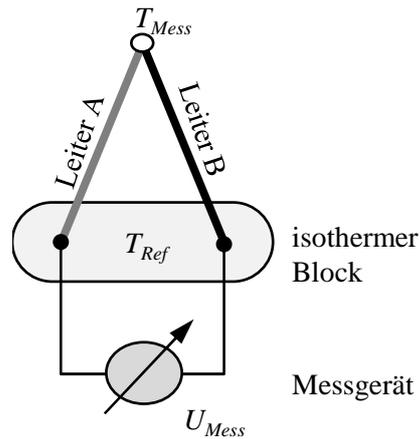


Bild RA1-2

Lösung

$$\begin{aligned}
 U_{Th} &= U_A - U_B \\
 &= \eta_A \Delta T - \eta_B \Delta T \\
 &= \eta_A - \eta_B (\Delta T) \\
 \text{mit } \eta_A - \eta_B &= \eta_{AB} \\
 &= \eta_{AB} \Delta T
 \end{aligned}$$

Herleitung (1 Punkt)

Punkte R1.d

e) Welche zwei Materialien würden Sie für Leiter A und B aus *Tabelle RA1-1* auswählen, um für das Thermoelementpaar in *Bild RA1-2* eine möglichst empfindliche Temperaturmessung durchzuführen? Begründen Sie kurz Ihre Antwort. **(1 Punkt)**

<i>Material</i>	$\eta / (\mu\text{V/K})$
Ni	- 15,0
Pt	0
Rh	6,9
Cu	7,8
Fe	19,2
NiCr	25,4

Tabelle RA1-1

Lösung:

Es sollte Ni und NiCr ausgewählt werden, da dessen Seebeck-Koeffizient die größte Differenz zum Seebeck-Koeffizienten von Nickel aufweist. Bei gegebener Temperaturdifferenz wird die messbare Spannung U damit maximal. (1Punkt)

Ni, NiCr und Erklärung: größte Differenz (1Punkt)

Punkte R1.d

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

Sie haben sich nun ein Thermoelement, wie in *Bild RA1-2* skizziert gebaut. Als Materialien haben Sie für Leiterstück A - Platin (Pt) und für Leiterstück B - Nickel (Ni) gewählt und möchten nun die Temperaturverteilung in Ihrem Ofen vermessen. Ihr isothermer Block habe eine Temperatur von $T_{Ref} = 27\text{ °C}$ und die erste Spannungsmessung zeigt $U_{Th} = 1,095\text{mV}$.

f) Berechnen Sie die Temperatur T_{Mess} für diesen Messpunkt. **(1 Punkt)**

Lösung: Für die Verwendung von Ni und Pt gilt:

$$\begin{aligned}
 U_{Th} &= |\eta_{AB} \cdot \Delta T| = |(\eta_A - \eta_B) \cdot \Delta T| \\
 &= |(\eta_{Pt} - \eta_{Ni}) \cdot \Delta T| \\
 \rightarrow \Delta T &= T_{mess} - T_{ref} \\
 T_{mess} &= T_{ref} + \frac{U_{Th}}{|\eta_{Pt} - \eta_{Ni}|} \\
 \rightarrow 1,095\text{mV} &= 1095\mu\text{V}, \eta_{Ni} = -15 \frac{\mu\text{V}}{\text{K}}, \eta_{Pt} = 0 \frac{\mu\text{V}}{\text{K}}, T_{ref} = 27\text{ °C} \\
 T_{mess} &= 27\text{ °C} + \frac{1095\mu\text{V}}{\left| (0 - 15) \frac{\mu\text{V}}{\text{K}} \right|} = T_{mess} = 27\text{ °C} + 75\text{K} \\
 T_{mess} &= 100\text{ °C}
 \end{aligned}$$

$T_{Mess} = 100\text{ °C}$, <i>nur richtiges Ergebnis (1Punkt)</i>	Punkte R1.f
---	-------------

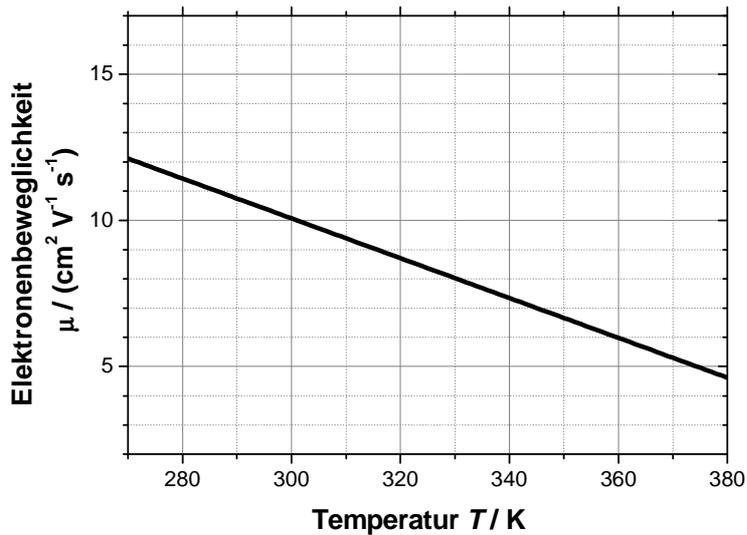


Bild RA1-3: Elektronenbeweglichkeit $\mu(T)$ von Ni im Bereich zwischen 270 ... 380 K

g) In Bild RA1-3 ist die Elektronenbeweglichkeit μ von Nickel (näherungsweise) skizziert. Bestimmen Sie den technischen Temperaturkoeffizienten α der Elektronenbeweglichkeit bei $T_{ref} = 27^\circ\text{C}$. Lesen Sie hierfür benötigte Zahlenwerte aus dem Schaubild ab. **(1 Punkt)**

Lösung:

$$T_{ref} = 27^\circ\text{C} \rightarrow T_{ref} = (27 + 273)\text{K} = 300\text{K}$$

Der technische Temperaturkoeffizient entspricht der mittleren Steigung der Kennlinie bezogen auf die Beweglichkeit am Referenzpunkt. Bei Ermittlung der mittleren Steigung unter Verwendung der abgelesenen Wertpaare

$$(T, \mu) \approx \left(300\text{ K}, 10 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}\right), \left(360\text{ K}, 6 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}\right)$$

findet man für den Temperaturkoeffizienten:

$$\alpha_{300\text{ K}} = \frac{1}{\mu(300\text{ K})} \cdot \frac{\Delta\mu}{\Delta T} = \frac{1}{10 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}} \cdot \frac{6 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}} - 10 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}}{360\text{ K} - 300\text{ K}} \approx -6,7 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1} \quad (1\text{Punkt})$$

$\alpha_{T_{ref}=27^\circ\text{C}} \approx -6,7 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, <u>nur richtiges Ergebnis</u> (1Punkt)	Punkte R1.g
--	-------------

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

h) Berechnen Sie den elektrischen Widerstand R des Leiterstücks aus Nickel. Berücksichtigen Sie dabei den Temperaturgradienten $T(x)$ im Draht. Nehmen Sie vereinfachend an, dass die Temperatur im Draht linear mit der Länge abfällt. Die thermische Längenausdehnung des Drahtes sei vernachlässigbar. Verwenden Sie zur Berechnung die Größen aus *Tabelle RA1-2*. (4 Punkte)

Länge Leiterstück d	= 200 mm
Drahtdurchmesser δ	= 250 μm
T_{Ref}	= 27 $^{\circ}\text{C}$
T_{Mess}	= 150 $^{\circ}\text{C}$
Ladungsträgerkonzentration n im Leiterstück	= $1 \cdot 10^{23} \text{ cm}^{-3}$
Temperaturkoeffizient der Elektronenbeweglichkeit $\alpha_{T_{\text{ref}}}$	= $-0,007 \text{ K}^{-1}$
Elektronenbeweglichkeit $\mu_{T_{\text{ref}}}$	= $10 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$

Tabelle RA1-2

Hinweis: $T = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ entspreche vereinfachend $T = 273 \text{ K}$.

Mathematische Hilfestellung: $\int \frac{dx}{a \pm bx} = \pm \frac{1}{b} \ln(a \pm bx)$

Lösung:

Es ergibt sich für den Widerstand eines infinitesimal kleinen Abschnitts des Leiters an der Stelle x an der eine Temperatur T herrscht:

$$R = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{d}{A} = \frac{1}{n \cdot e \cdot \mu} \cdot \frac{1}{A} \cdot d \rightarrow dR = \frac{1}{\sigma(T(x)) \cdot A} dx = \frac{1}{en\mu(T(x)) \cdot A} dx \quad (1\text{Punkt } R(T))$$

n ist gegeben. Aus Hinweis folgt für die Temperaturverteilung im Draht

$$T(x) = T_{\text{ref}} + (T_{\text{Mess}} - T_{\text{ref}}) \cdot \frac{x}{d} ,$$

womit sich mit Hilfe der Definition des technischen Temperaturkoeffizienten eine Verteilung der Beweglichkeit über x zu

$$\mu(T(x)) = \mu_{T_{\text{ref}}} \left(1 + \alpha_{T_{\text{ref}}} (T(x) - T_{\text{ref}}) \right) \quad (1\text{Punkt } \mu(T))$$

ergibt.

Für den Gesamtwiderstand folgt damit:

$$\begin{aligned}
 R &= \int_0^d \frac{1}{e \cdot n \cdot A \cdot \mu(T(x))} dx = \int_0^d \frac{1}{e \cdot n \cdot A \cdot \mu_{T_{ref}}} \cdot \frac{1}{1 + \alpha_{T_{ref}} (T(x) - T_{ref})} dx \\
 &= \frac{1}{e \cdot n \cdot A \cdot \mu_{T_{ref}}} \cdot \int_0^d \frac{1}{1 + \alpha_{T_{ref}} \cdot \left(T_{ref} + \frac{(T_{Mess} - T_{ref})}{d} \cdot x - T_{ref} \right)} dx \\
 &= \frac{1}{e \cdot n \cdot A \cdot \mu_{T_{ref}}} \cdot \frac{1}{\alpha_{T_{ref}} \cdot \frac{(T_{Mess} - T_{ref})}{d}} \cdot \ln \left(1 + \alpha_{T_{ref}} \cdot \left((T_{Mess} - T_{ref}) \cdot \frac{x}{d} \right) \right) \Bigg|_{x=0}^{x=d} \\
 &= \frac{1}{e \cdot n \cdot A \cdot \mu_{T_{ref}}} \cdot \frac{1}{\alpha_{T_{ref}} \cdot \frac{(T_{Mess} - T_{ref})}{d}} \cdot \ln \left(\frac{1 + \alpha_{T_{ref}} \cdot \left((T_{Mess} - T_{ref}) \cdot \frac{d}{d} \right)}{1 + \alpha_{T_{ref}} \cdot \left((T_{Mess} - T_{ref}) \cdot \frac{0}{d} \right)} \right) \\
 &= \frac{1}{e \cdot n \cdot A \cdot \mu_{T_{ref}}} \cdot \frac{d}{\alpha_{T_{ref}} \cdot (T_{Mess} - T_{ref})} \cdot \ln \left(1 + \alpha_{T_{ref}} \cdot (T_{Mess} - T_{ref}) \right)
 \end{aligned}$$

(1 Punkt für Ansatz)

$$= \frac{1}{e \cdot n \cdot A \cdot \mu_{T_{ref}}} \cdot \frac{d}{\alpha_{T_{ref}} \cdot (T_{Mess} - T_{ref})} \cdot \ln \left(1 + \alpha_{T_{ref}} \cdot (T_{Mess} - T_{ref}) \right)$$

$$\rightarrow A = \pi \left(\frac{\delta}{2} \right)^2$$

$$= \frac{1}{1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot \pi \left(\frac{250 \mu\text{m}}{2} \right)^2 \cdot 1 \cdot 10^{23} \text{ cm}^{-3} \cdot 10 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}} \cdot \frac{200 \text{ mm}}{(-7 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}) \cdot (150^\circ\text{C} - 27^\circ\text{C})} \cdot \ln \left(1 + (-7 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}) \cdot (150^\circ\text{C} - 27^\circ\text{C}) \right)$$

$$\rightarrow R = 0.5829 \Omega$$

(1 Punkt für Endergebnis)

$R \approx 0.5 \text{ m}\Omega$ (1 Punkt $R(T)$), (1 Punkt $\mu(T)$), (1 Punkt für Ansatz), (1 Punkt für Endergebnis)	Punkte R1.h
---	-------------

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

Rechenaufgabe A2: Magnete

In *Bild A2-1* ist die Hysteresekurve eines ferromagnetischen Materials skizziert. Die Punkte P1: Sättigungsflussdichte, P2: Remanenzflussdichte und P3: Koerzitivfeldstärke sind bereits zugeordnet.

a) In den Kreisen A-E ist jeweils die Domänenanzahl und -ausrichtung skizziert. Ordnen Sie die Kreise B-E der korrekten Stelle in der Hysteresekurve in *Bild A2-1* zu, so wie es für Kreis A bereits geschehen ist. (1 Punkt)

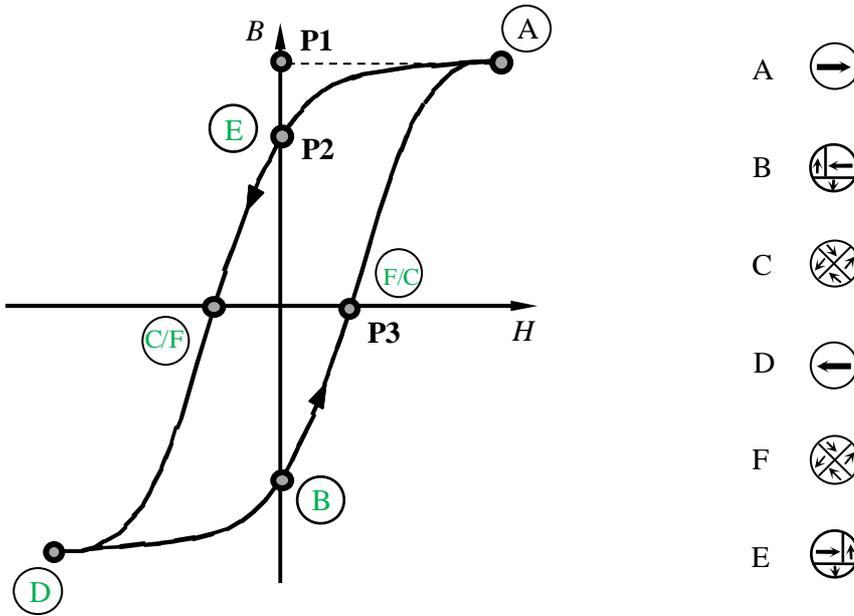


Bild A2-1

(1Punkt, alle richtig)

Punkte A2.a

Bild A2-2 zeigt nun die Magnetisierungskurve $M(H)$ eines ferromagnetischen Werkstoffs bei $T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$.

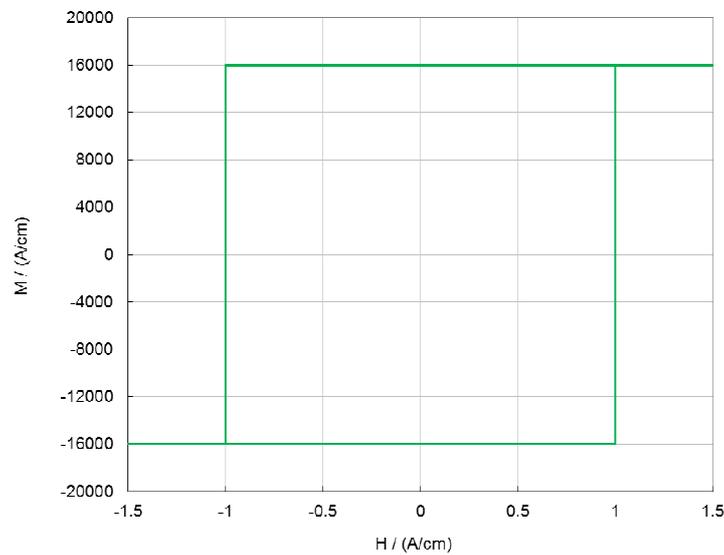


Bild A2-2

b) Geben Sie den Wert für die Sättigungsmagnetisierung M_S und die Koerzitivfeldstärke H_C für den Werkstoff aus Bild A2-2 an. Berechnen Sie anschließend die Remanenzflussdichte B_R und geben Sie die Steigung m_B von $B(H)$ an. Zeichnen Sie dann die magnetische Flussdichte B in Abhängigkeit der magnetischen Feldstärke H in Bild A2-2 ein. (3 Punkte)

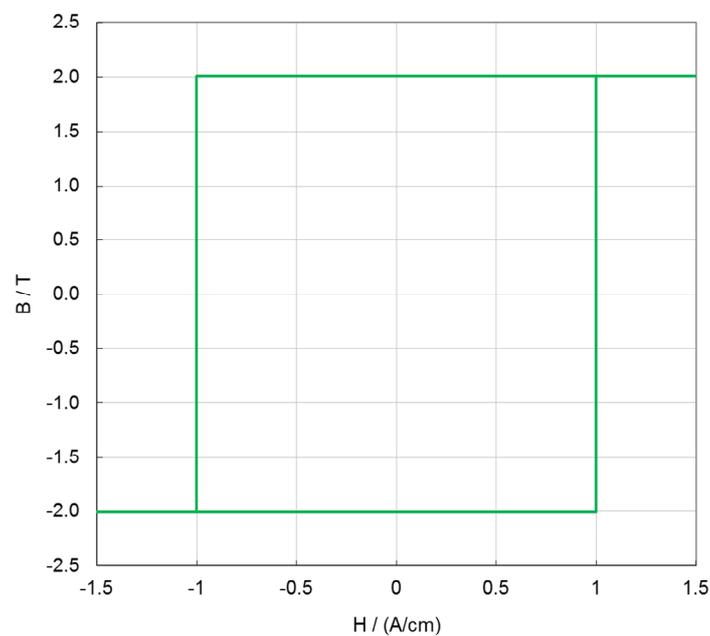


Bild A2-3

Lösung b)

Bild A2-2 ablesen: (1 Punkt, beide richtig)

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

$$M_S = 1,6 \cdot 10^4 \text{ A/cm}$$

$$H_C = 1 \text{ A/cm}$$

Es gilt $B = \mu_0 (H + M)$, daraus kann die gesuchte Kurve berechnet und skizziert werden.

Steigung $m_B = \mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ A/cm}$ (Formelsammlung)

$$B_R = \mu_0 (0 \text{ A/cm} + 1,6 \cdot 10^4 \text{ A/cm}) \approx 2,01 \text{ T} \text{ (1Punkt, korrektes Ergebnis)}$$

Zeichnung (1Punkt, richtig zeichnen)

$H_C = 1 \text{ A/cm}$ $M_S = 1,6 \cdot 10^4 \text{ A/cm}$ (1Punkt, beide richtig) $B_R = 2,01 \text{ T}$ und $m_B = \mu_0$ oder $1,26 \cdot 10^{-6} \text{ A/cm}$ (1Punkt, beide Ergebnis korrekt) <u>Zeichnung (1Punkt, richtig zeichnen)</u>	Punkte A2.b
---	-------------

Die Abhängigkeit der Sättigungsmagnetisierung M_S von der Temperatur ist für verschiedene Werkstoffe (Fe, Co und Ni) in *Bild A2-4* dargestellt.

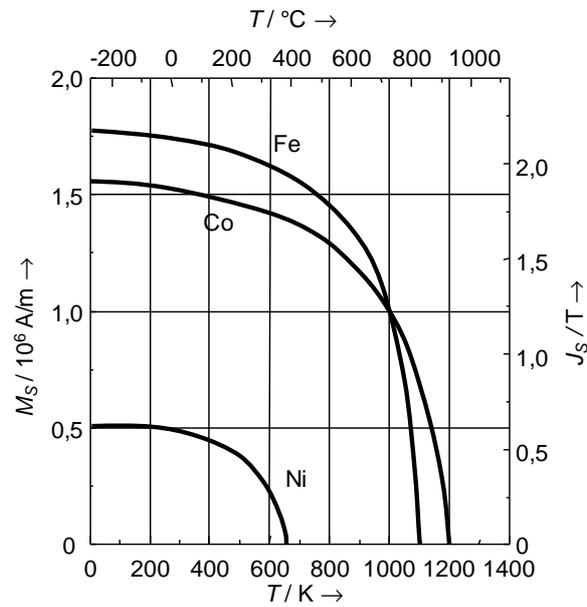


Bild A2-4

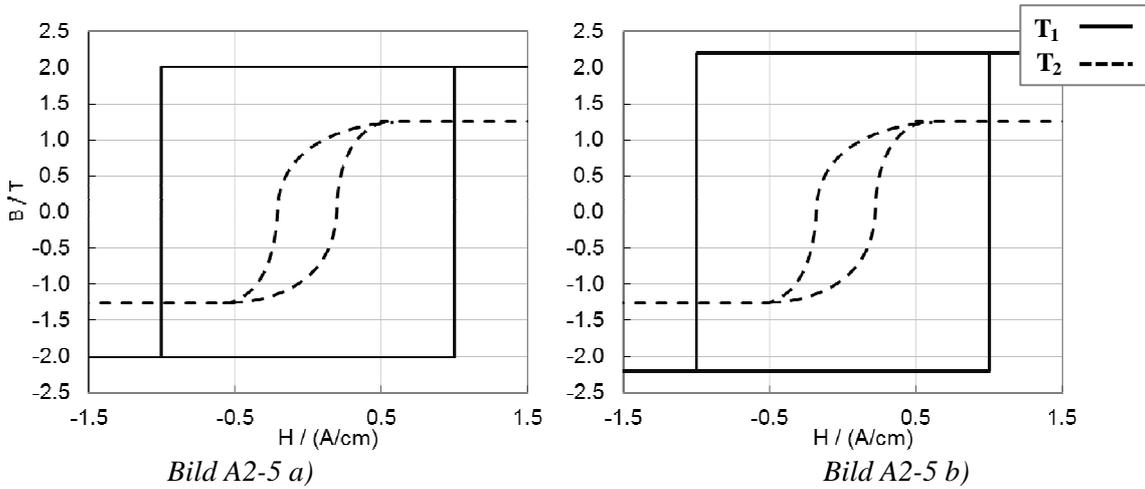
c) Entsprechend dieses Schaubilds, um welchen Werkstoff handelte es sich in *Bild A2-2* bzw. im Aufgabenteil b)? (1 Punkt)

Lösung: Vergleich M_S Ablesen bei $T=0\text{K}$. Es handelt sich um Co, Cobalt. (1Punkt)

Punkte A2.c

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

Bild A2-5 zeigt nun die magnetische Flussdichte $B(H)$ zweier der drei ferromagnetischen Werkstoffe (Fe, Co, Ni). Die durchgezogene Hysterese (—) wurde bei Temperatur T_1 , die gestrichelte Hysterese (---) wurde bei Temperatur T_2 gemessen.



d) Welche Hysterese in Bild A2-5 a) wurde bei der höheren Temperatur gemessen? Geben Sie eine kurze physikalische Erklärung. Welcher Werkstoff wurde in Bild A2-5 b) vermessen und wie hoch war Temperatur T_2 genau? (2 Punkte)

Lösung:

(---) bei höherer Temperatur → weil sie eine geringere Sättigungsmagnetisierung hat. (1 Punkt)

Eisen, 1000K → (---) ist bei beiden identisch, in Bild A2-4 gibt es nur einen Überschneidungspunkt, Cobalt und Eisen. Eisen hat die höhere Sättigungsmagnetisierung bei 0K.

Oder Berechnen:
$$\frac{B(T_2)}{\mu_0} - H = \frac{1.25T}{1,26 \cdot 10^{-6} \text{ Acm}^{-1}} - (1 \text{ Acm}^{-1}) = 0.99 \cdot 10^6 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

(1 Punkt)

Punkte A2.d

Der ferromagnetische Werkstoff aus Aufgabenteil b) wird nun zum Bau eines Ringkerntrafos benutzt (siehe Bild A2-6). Der Ring hat einen Durchmesser von $2R_R = 9\text{ cm}$ und der Kerndurchmesser beträgt $2r_D = 1\text{ cm}$. Streufelder können vernachlässigt werden und es wird angenommen, dass der magnetische Fluss Ψ vollständig im Spulenquerschnitt fließt.

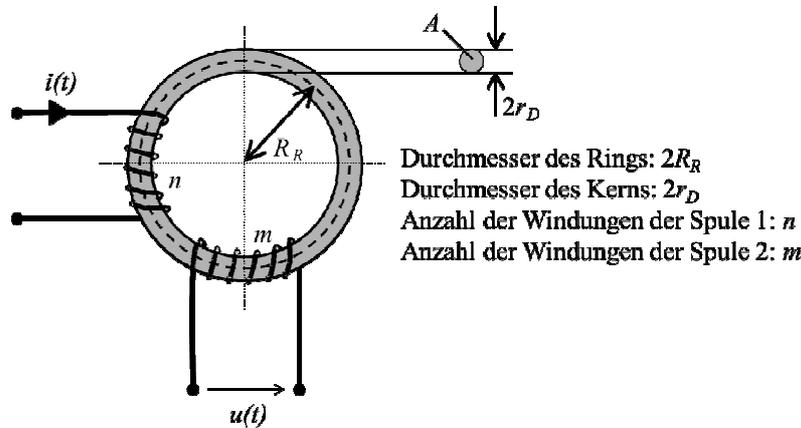


Bild A2-6

e) Der Spule 1 mit $n = 85$ Windungen wird ein Wechselstrom $i(t) = i_0 \cos(2\pi \cdot f \cdot t)$ ($i_0 = 200\text{ mA}$, $f = 50\text{ Hz}$) aufgeprägt. Zeichnen Sie den Verlauf des Wechselstroms $i(t)$ und der magnetischen Feldstärke $H(t)$ in die beiden oberen Diagramme in Bild A2-7 ein. Zeichnen Sie in das untere Diagramm in Bild A2-7 qualitativ den Verlauf der induzierten Spannung $u(t)$ in Spule 2 ($m=200$ Windungen). (2 Punkte)

Hinweis: Wenn Sie Koerzitivfeldstärke in b) nicht bestimmt haben, gehen sie davon aus, dass $H_C = 2\text{ A/cm}$ sei.

Lösung:

$i(t)$: Amplitude 200 mA 50 Hz heißt 0.02 s pro Periode ($50 \cdot 0,02\text{ s} = 1\text{ s}$)

für $H(t)$ gilt:

$$2\pi R_R H(t) = n \cdot i_0 \cdot \cos(2\pi f \cdot t),$$

$$H(t) = i(t) \cdot n(\text{Windungen}) / 2\pi R_R (\text{Länge Spule})$$

$$H \text{ ist } H_{\max} = \frac{n \cdot i_0}{2\pi \cdot R_R} = 0.6 \frac{\text{A}}{\text{cm}} \quad (1\text{ Punkt})$$

da $H = 0.6\text{ A/cm} < H_C = 1\text{ A/cm}$ ist, ändert tritt keine Richtungsänderung der Magnetisierung auf, d.h. keine Spannung wird induziert. (1 Punkt)

Nachname

Vorname(n)

Matrikelnummer

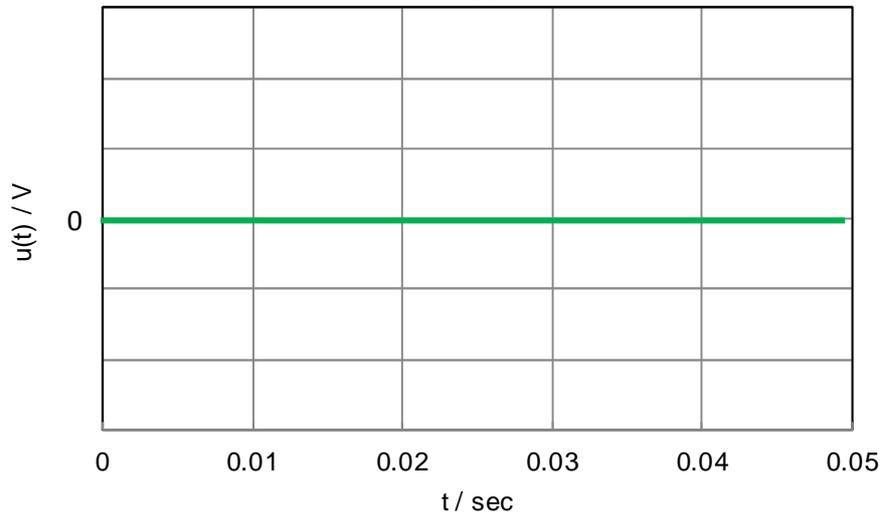
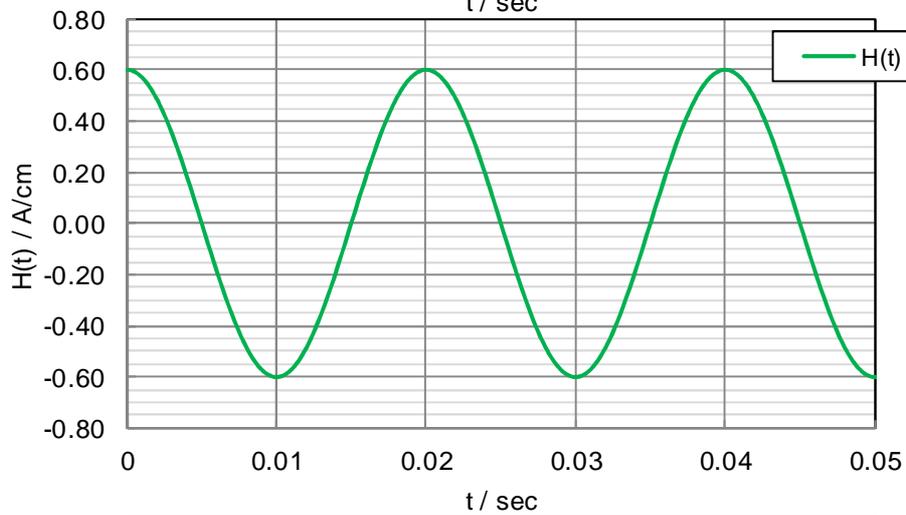
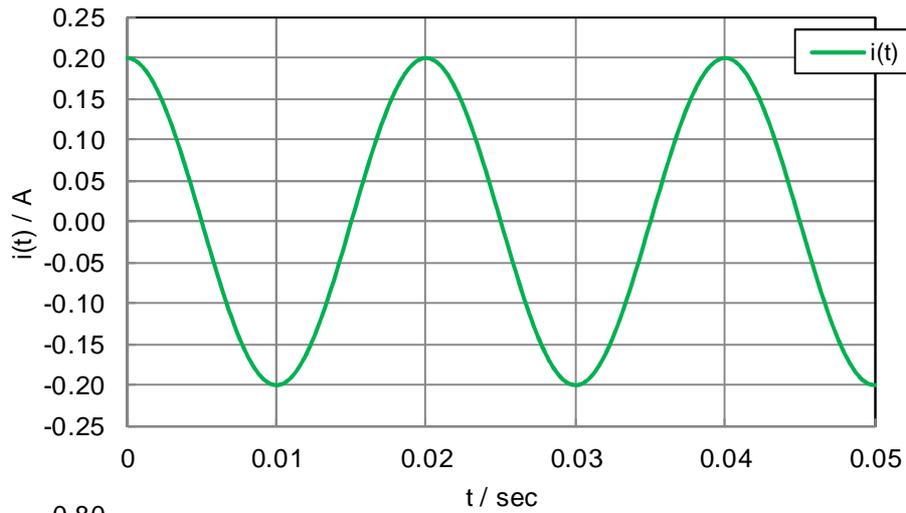


Bild A2-7

Diagramm $i(t)$ + Diagramm $H(t)$ (1Punkt, gezeichnet Amplitude / Periode genau)
Diagramm $u(t)$ (1Punkt)

Punkte A2.e

Rechenaufgabe A3: Piezoelektrischer Effekt

Gegeben sei der in *Bild A3-1* dargestellte Aufbau zur Charakterisierung einer scheibenförmigen piezoelektrischen Probe.

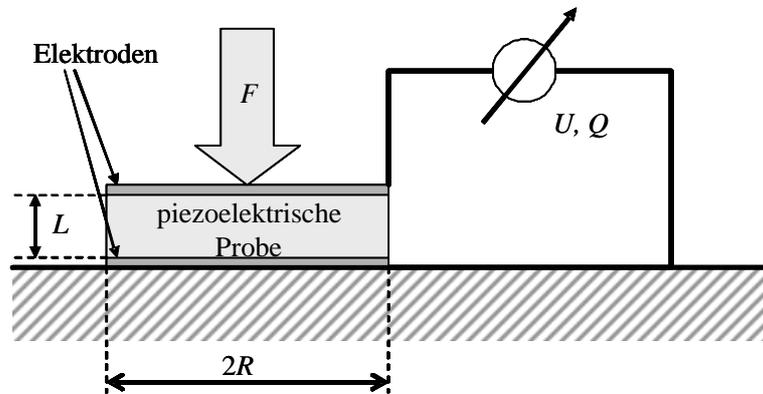


Bild A3-1

Die Probe habe die folgenden geometrischen Abmessungen:

Dicke	L	=	2 mm
Radius	R	=	1 cm

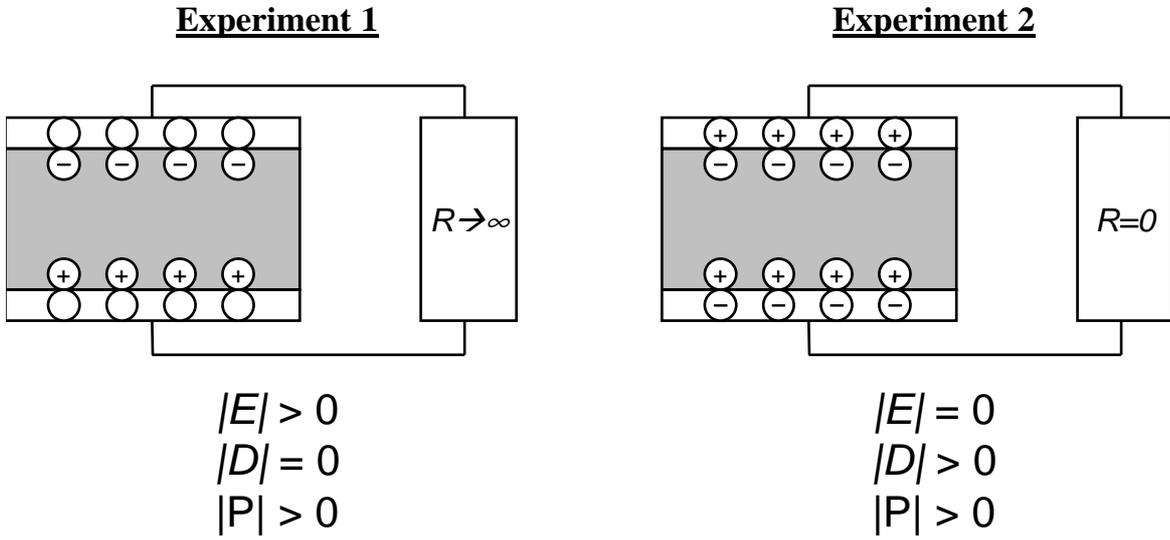
Die Beziehung zwischen Feldstärke E und Verschiebungsdichte D kann bei Anwesenheit von mechanischer Spannung mit Hilfe der Materialkonstanten d_p (piezoelektrische Ladungskonstante) und ϵ_r^T (Dielektrizitätszahl) beschrieben werden. Um diese Konstanten für die in *Bild A3-1* dargestellte piezoelektrische Probe zu bestimmen werden zwei Experimente durchgeführt:

Experiment 1: Die Probe wird mit einer axial angreifenden Kraft F belastet und mit einem idealen Voltmeter wird die Spannung zwischen den Elektroden gemessen.

Experiment 2: Die Probe wird auf dieselbe Art wie in Experiment 1 belastet, diesmal wird jedoch mit Hilfe eines idealen Amperemeters und entsprechender Stromintegration die auf die Elektroden fließende Ladung ermittelt.

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

a) Zeichnen Sie zunächst für Experiment 1 und für Experiment 2 die bei angelegter Kraft herrschende Ladungsverteilung ein. Kennzeichnen Sie die vorhandenen Plätze dazu mit „+“ oder „-“ bzw. lassen Sie sie frei wenn Sie denken, dass keine Ladungen vorhanden sind. Welche der Feldgrößen E, P, D sind jeweils gleich oder betragsmäßig größer als 0? Zeichnen Sie die entsprechenden Operatoren „=“ bzw. „>“ ein. (2 Punkte)



	Punkte A3.a
--	-------------

b) Die Experimente lieferten die folgenden Ergebnisse:

	$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm}$
Axial angreifende Kraft	$F = 120 \text{ N}$
Gemessene Spannung (Experiment 1)	$ U = 30 \text{ V}$
Gemessene Ladung (Experiment 2)	$ Q = 5,5 \cdot 10^{-8} \text{ As}$

Berechnen Sie mit Hilfe dieser Ergebnisse die Werte der gesuchten Materialkonstanten d_p und ϵ_r^T . (2 Punkte)

Lösung:

Grundgleichung:

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

Ladungsmessung: Elektroden sind über Strommessgerät kurzgeschlossen, somit $U=0$ und damit $E=0$.

Die Verschiebungsdichte D ist gleich der Flächenladungsdichte, die sich aus der Fläche der Platten und der geflossenen Ladung ergibt (geflossene Ladung kompensiert genau die induzierte Polarisationsladung des Dielektrikums).

$$\rightarrow D = Q/A, E=0 \Rightarrow d_p = \frac{D}{\sigma_M} = \frac{Q/A}{F/A} = \frac{Q}{F} = 4,583 \cdot 10^{-10} \frac{C}{N}$$

Spannungsmessung: Da über das Spannungsmessgerät keine Ladungen fließen können ergibt sich die Verschiebungsdichte zu 0 und das elektrische Feld bzw. die messbare Spannung hat ihren Ursprung allein in der induzierten Polarisationsladung.

$$\rightarrow D = 0, E = U/L \quad \Rightarrow \epsilon_r^T = \frac{d_p \cdot \sigma_M}{\epsilon_0 \cdot E} = \frac{d_p \cdot (F/A)}{\epsilon_0 \cdot (U/L)} = 1319$$

$d = 4,583 \cdot 10^{-10} \frac{C}{N}$ 1Punkt $\epsilon_r^T = 1319$ 1Punkt	Punkte A3.b
---	-------------

Hinweis: Wenn Sie die Aufgabe nicht gelöst haben, rechnen Sie mit $d_p = 4,5 \cdot 10^{-10} \frac{C}{N}$, $\epsilon_r^T = 1400$ und $k = 0,65$ weiter.

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

c) Aus einem anderen Experiment ist der Wert des Elastizitätsmoduls s^E der Probe bekannt:

$$\text{Elastizitätsmodul} \quad s^E = 3,652 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$$

Welche Spannung müsste theoretisch an die mechanisch unbelastete Probe angelegt werden um eine absolute Dickenänderung um $\Delta L = 0,3 \text{ }\mu\text{m}$ gegenüber dem spannungslosen Zustand zu erzielen?

(1 Punkt)

Lösung:

Grundgleichung:

$$\varepsilon_M = s^E \cdot \sigma_M + d_p \cdot E$$

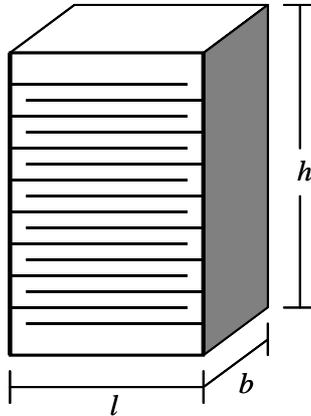
Da die Probe mechanisch unbelastet ist gilt $\sigma_M = 0$.

Aus $\varepsilon_M = E \cdot d_p = \frac{U}{L} \cdot d_p$ folgt dann durch Umstellen

$$U = \frac{L \cdot \varepsilon_M}{d_p} = 654 \text{ V}$$

$U = 654 \text{ V}$ 1 Punkt	Punkte A3.c
------------------------------------	-------------

Das in Aufgabenteil c) erhaltene Ergebnis legt nahe, dass aus einer einzelnen piezoelektrischen Scheibe kein praktisch einsetzbarer piezoelektrischer Aktor gebaut werden kann. In der Praxis werden daher mehrere solcher Einzelaktoren zu einem sogenannten Vielschichtaktor verschaltet:



Die elektrische Kontaktierung erfolgt dabei über die Seitenflächen, die Elektroden der Einzelaktoren entsprechen den verzahnt gezeichneten Linien im Inneren des Aktors.

d.) Wie viele Schichten des gegebenen Werkstoffs benötigt man, um eine Dickenänderung des Vielschichtaktors um ΔL bei einer angelegten Spannung U und einer maximalen elektrischen Feldstärke E_{max} zu erzielen? Wie dick muss eine Schicht mindestens sein ($L_{S,min}$)? Wie dick ist der Vielschichtaktor bei dieser minimalen Schichtdicke (L_{ges})? Verwenden Sie die folgenden Zahlenwerte:

Länge	l	=	10 mm
Breite	b	=	10 mm
Gewünschte Dickenänderung des VSA	ΔL	=	10 μm
Angelegte Spannung	U	=	100 V
Maximal zulässige Feldstärke	E_{max}	=	600 V/mm

(3 Punkte)

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

Lösung:

Aus der angelegten Spannung und der maximal zulässigen Feldstärke ergibt sich die minimale Schichtdicke:

$$L_{S,\min} = \frac{U_{\max}}{E_{\max}} = 166,7 \mu\text{m}$$

Die absolute Ausdehnung einer Einzelschicht hängt nur von der angelegten Spannung ab, denn:

$$\varepsilon_M = d_p \cdot E \Rightarrow \frac{\Delta L}{L} = d_p \cdot \frac{U}{L} \Rightarrow \Delta L = d_p \cdot U$$

Bei einer gewünschten Ausdehnung des Vielschichtaktors ergibt sich somit

$$N = \frac{\Delta L_{\text{ges}}}{\Delta L_{\text{einzel}}} = \frac{\Delta L_{\text{ges}}}{d_p \cdot U} = 219$$

Die Gesamtdicke des Vielschichtaktors beträgt somit

$$L_{\text{ges}} = N \cdot L_{S,\min} = 36,5 \text{mm}$$

Anzahl der Schichten: $N = 219$ 1Punkt $L_{S,\min} = 166,7 \mu\text{m}$ 1Punkt $L_{\text{ges}} = 36,5 \text{mm}$ 1Punkt	Punkte A3.d
--	-------------

Hinweis: Wenn Sie die Aufgabe nicht gelöst haben, rechnen Sie mit $N = 200$ und $L_{\text{ges}} = 30 \text{mm}$ weiter

e) Mit welchem Strom I muss der in Aufgabenteil d) dimensionierte Vielschichtaktor angesteuert werden, wenn die geforderte Längenänderung im unbelasteten Fall nach genau 1 ms erreicht werden soll? (2 Punkte)
Hinweis: Die Elektrodenfläche entspreche der Grundfläche des Vielschichtaktors. Nehmen Sie weiter an, dass der fließende Strom zeitlich konstant sei.

Lösung:

Der Aktor erreicht genau dann seine volle Längenänderung, wenn alle für den Aufbau des elektrischen Felds notwendigen Ladungen auf die Elektrodenplatten geflossen sind. Die auf einem einzelnen Elektrodenpaar sitzende Ladung ergibt sich zu

$$D = \frac{Q}{A} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r^T \cdot E_{\max} \Rightarrow Q = A \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r^T \cdot E_{\max}$$

Da diese Ladungsmenge auf alle N Elektrodenpaare fließen muss ergibt sich als Gesamtladung:

$$Q_{\text{ges}} = N \cdot Q = N \cdot A \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r^T \cdot E_{\max} \quad \text{1 Punkt für Formel}$$

Um diese Ladungsmenge innerhalb 1ms auf die Platten zu bringen benötigt man eine Stromstärke von

$$I = \frac{Q_{\text{ges}}}{1\text{ms}} = \frac{N \cdot A \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r^T \cdot E_{\max}}{1\text{ms}} = 153\text{mA}$$

$I = 153 \text{ mA}$ 1Punkt	Punkte A3.e
-----------------------------	-------------

