

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

## Schriftliche Kernfachprüfung 19. Februar 2015

# 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
	<b>Zutreffendes bitte ankreuzen</b>	
	<input type="checkbox"/> Erstprüfung	
	<input type="checkbox"/> Wiederholungsprüfung	
<b>Wiederholer/innen bitte ausfüllen</b>		
Straße/Nummer	Postleitzahl/Ort	
Telefon	E-Mail	

### Zur Prüfung zugelassene / mitzubringende Hilfsmittel

- Es sind keine Hilfsmittel außer den angegebenen erlaubt.
- Formelsammlung für PB SS 2014/15 (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. Zwei identische Widerstände mit gleichem Temperaturkoeffizienten (TK) werden parallel geschaltet. Der TK des Gesamtwiderstands ist dann im Vergleich zum TK des Einzelwiderstandes:
  - kleiner.
  - größer.
  - unverändert.
  
2. Welche Aussagen zur Funktionsweise einer Lambdasonde sind wahr?
  - Mit einer Lambda-Sonde lässt sich in der Abgassensorik der Anteil von Sauerstoff ( $pO_2$ ) im Abgas bestimmen.
  - Zwei Elektroden sind durch einen gasdurchlässigen Festelektrolyt getrennt.
  - Der Festelektrolyt in einer Lambdasonde sollte eine hohe Elektronenleitung aufweisen.
  - Dass Elektrolytmaterial leitet die Sauerstoffionen nur bei hohen Betriebstemperaturen ( $600 < T < 900^\circ\text{C}$ ) ausreichend gut.
  
3. Bei der ionischen Hopping-Leitung im Kristall
  - ist die Beweglichkeit der Ionen direkt proportional zu deren Diffusionskonstante.
  - nimmt die Diffusionskonstante mit steigender Temperatur ab.
  - kann durch gezielte Dotierung des Kristallgitters die Leitfähigkeit verändert werden.
  - darf der Kristall nicht gleichzeitig eine elektronische Leitfähigkeit aufweisen.
  
4. Dehnmessstreifen (DMS):
  - DMS aus Halbleiterwerkstoffen haben bei identischer Geometrie eine größere Messempfindlichkeit als DMS aus Metallen.
  - Die Änderung der Elektronenbeweglichkeit spielt bei DMS keine Rolle.
  - DMS haben die Eigenschaft: je größer die Dehnung, desto größer der k-Wert.
  - DMS finden in der Drucksensorik Anwendung.
  
5. Durch welche Eigenschaften zeichnet sich ein einkristalliner Festkörper aus?
  - Es gibt eine Fernordnung der Atome im gesamten Festkörper.
  - Lediglich ein Korn im Festkörper ist kristallisiert, der Rest liegt in amorpher Form vor.
  - Alle Einkristalle sind supraleitend.
  - In einem einkristallinen Festkörper existieren keine Korngrenzen.
  
6. Ein Kondensator mit ferroelektrischem Dielektrikum wird bei einer Temperatur  $T < T_C$  aufgeladen und von der Spannungsquelle getrennt. Beim Erwärmen des Kondensators auf  $T \gg T_C$ 
  - steigt die Spannung an.
  - bleibt die Spannung gleich.
  - sinkt die Spannung ab.
  
7. Resonanzverhalten wird bei der Relaxation der folgenden Polarisationsmechanismen beobachtet:
  - Elektronenpolarisation
  - Ionenpolarisation
  - Orientierungspolarisation
  - Raumladungspolarisation

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

8. Die Polarisierbarkeit  $\alpha_{el}$  eines Atoms
- steigt mit zunehmenden Atomradius.
  - steigt mit abnehmenden Atomradius.
  - ist über die Clausius-Mossotti-Beziehung mit der relativen Dielektrizitätskonstante verknüpft.
9. Bor wirkt in Silizium
- als Donator.
  - als Akzeptor.
  - als neutrale Verunreinigung.
10. Eine Tomate reagiert auf einen sehr starken Permanentmagneten
- mit Anziehung.
  - mit Abstoßung.
  - gar nicht.
11. Für die Suszeptibilität eines supraleitenden Materials gilt unterhalb der Sprungtemperatur:
- $\chi_m = 1$
  - $\chi_m = 0$
  - $\chi_m = -1$
  - $\chi_m$  ist für Supraleiter nicht definiert
12. Folgende Aussagen zur Defektchemie sind korrekt:
- Das Massenwirkungsgesetz beschreibt das Konzentrationsverhältnis der an einer Reaktion beteiligten Stoffe zu jedem Zeitpunkt ab Beginn der Reaktion.
  - Die Elektroneutralitätsbedingung besagt, dass in einem Festkörper stets gleich viele Elektronen wie Löcher vorhanden sein müssen.
  - Setzt man ein halbleitendes Metalloxid einer Umgebung mit sehr geringem Sauerstoffpartialdruck aus erhöht sich (vollständige Ionisierung vorausgesetzt) die Zahl der freien Elektronen im Material.
13. Bei einer gegebenen Temperatur sind in einem Kristall Schottky-Defekte der Gleichgewichtskonzentration  $n_s$  vorhanden. Bei Erhöhung der Temperatur
- verkleinert sich  $n_s$
  - vergrößert sich  $n_s$
  - werden aus den Schottky Defekten Frenkel-Paare
14. Kristalle in rein kovalenter Bindungsstruktur
- weisen bei  $T = 0$  K eine sehr hohe Leitfähigkeit auf.
  - sind aufgrund von Energieminimierung bei der Bildung von Molekülorbitalen stabil.
  - werden beispielsweise vom Silizium ausgebildet.
  - enthalten stets auch ionische Bindungsanteile.
15. Die Grüneisen-Regel beschreibt
- die Temperaturabhängigkeit des spezifischen Widerstands.
  - die Abhängigkeit des spezifischen Widerstands von Verunreinigungen.
  - den Zusammenhang zwischen elektronischer und thermischer Leitfähigkeit.

16. Bei steigender Frequenz ändert sich die Polarisierbarkeit eines dielektrischen Materials. Hierbei verschwindet zuletzt die
- Ionenpolarisation
  - Raumladungspolarisation
  - Elektronenpolarisation
  - Orientierungspolarisation
17. Die Suszeptibilität eines ferroelektrischen Materials
- weist beim Phasenübergang kubisch-tetragonal ein Maximum auf.
  - nimmt bei Vorliegen in kubischer Phase zu höheren Temperaturen hin ab.
  - ist temperaturunabhängig.
18. Varistoren
- werden als Überspannungsschutz eingesetzt.
  - besitzen eine allein durch die Bandlücke des Materials gegebene, nicht beeinflussbare Nennansprechspannung.
  - werden in ihren elektrischen Eigenschaften durch Körner sowie Korngrenzen bestimmt.
19. Quantenzahlen
- charakterisieren erlaubte Lösungen der Schrödingergleichung für das Coulomb-Potential.
  - sind eng mit der Energie eines Quantenzustands verknüpft.
  - sind stets Vielfache von  $2\pi$ .
  - beschreiben Form und Ausrichtung von Atomorbitalen.
20. Durch Verschiebung und periodische Wiederholung welches Grundgitters kann das kubisch-raumzentrierte Gitter erzeugt werden?
- tetragonal
  - triklin
  - orthorhombisch
  - kubisch

Punkte AWF

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

## Teil 2: Kurzaufgaben (10 Punkte)

### Kurzaufgabe K1: Bindungsmechanismen

a) Ordnen sie in *Bild K1-1* den dargestellten Situationen im Kristallgitter die Bezeichnung des vorherrschenden Bindungsmechanismus zu. Nennen Sie zudem je einen typischen Vertreter der Bindungsmechanismen. (2 Punkte)

Diagram 1: Metallic bonding. Diagram 2: Covalent bonding. Diagram 3: Ionic bonding.

Metallische Bindung  
Vertreter: Fe

Kovalente Bindung  
Vertreter: Si

Ionische Bindung  
Vertreter: NaCl

*Bild K1-1: Situationen im Kristall und zuzuordnende Bindungsmechanismen*

1 Punkt für Zuordnung, 1 Punkt für Vertreter.

Kohlenstoff/ Diamant als Vertreter für kovalente Bindung auch ok.

Punkte K1.a

b) Welcher Bindungsmechanismus ist in Wasser für die hohe Siedetemperatur verantwortlich? (1 Punkt)

Wasserstoffbrückenbindung (1 Punkt)

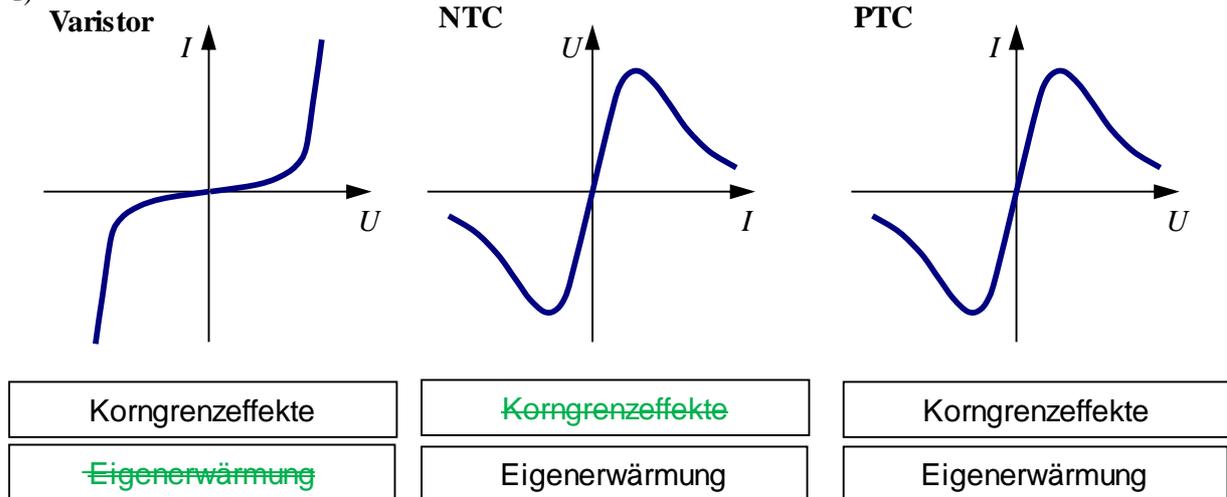
Punkte K1.b

## Kurzaufgabe K2: Nichtlineare Widerstände

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

a) Die charakteristischen Kennlinien der genannten Bauteile sind in Abbildung a-1) dargestellt. Streichen Sie in den Kästchen die physikalischen Effekte durch, die für das jeweilige Bauteil nicht relevant sind. (1 Punkt)

a-1)

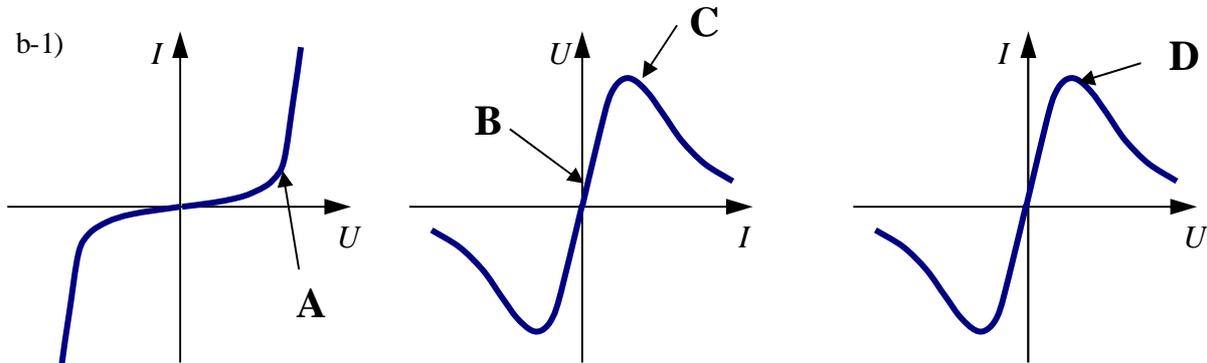


1 Punkt: Alles Durchstreichen richtig

Punkte K2.a

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

b) Ordnen Sie den markierten charakteristischen Punkten A, B, C und D den für das Verhalten des Bauteils an diesen Punkten verantwortlichen physikalischen Effekt bzw. die korrekte Bezeichnung des Bereichs zu. (1 Punkt)

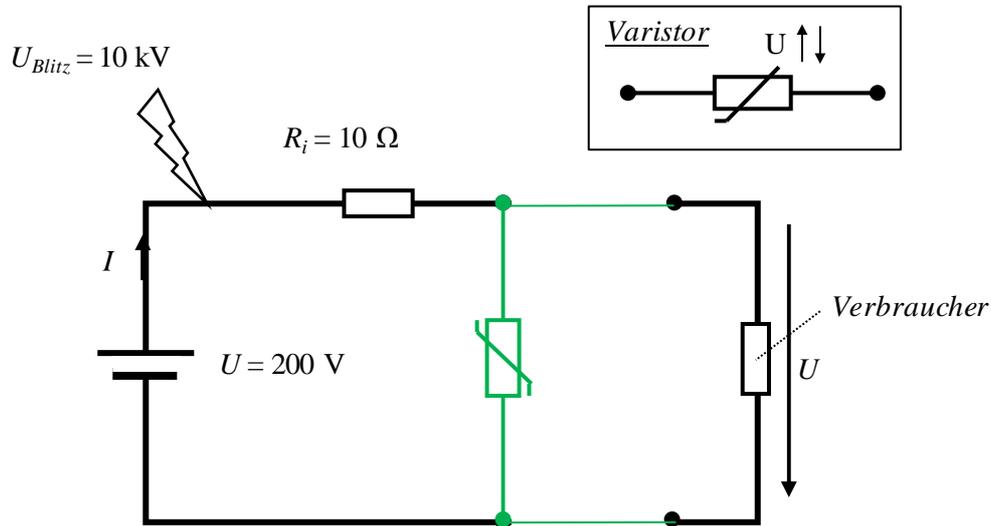


<b>D</b>	<b>A</b>	<b>C</b>	<b>B</b>
Phasenumwandlung von tetragonal zu kubisch	Spannungsabhängiger Korngrenzeffekt	Eigenerwärmung	linearer Bereich

1 Punkt: Alle Zuweisungen richtig

Punkte K2.b
-------------

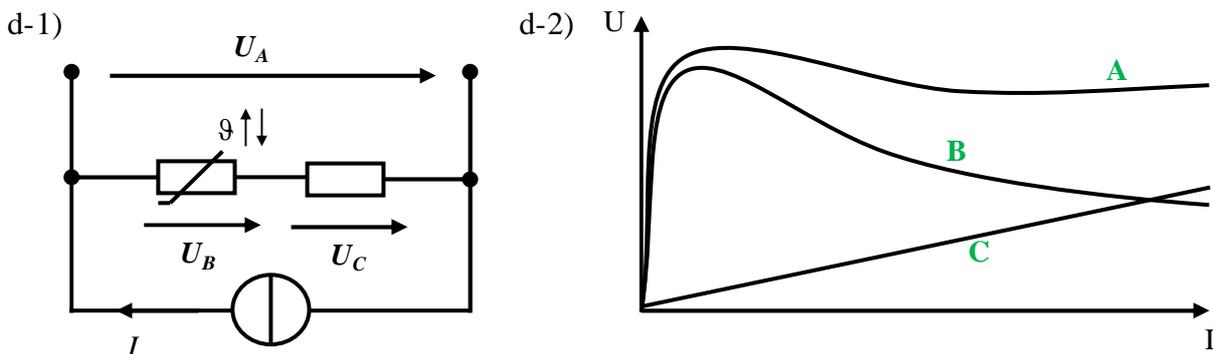
c) Varistoren werden häufig als Überspannungsschutz eingesetzt. Bei einem Blitzeinschlag mit  $U_{Blitz}$ , wie in Abbildung c-1) skizziert, soll mit Hilfe eines Varistors verhindert werden, dass der Verbraucher beschädigt wird. Zeichnen Sie den Varistor so in das gegebene Schaltbild ein, dass er seine Aufgabe als Überspannungsschutz erfüllt. Erläutern Sie kurz, warum der Varistor den Verbraucher hierdurch bei hohen Spannungen schützt. (1 Punkt)



**1 Punkt: Korrekt eingezeichnet und :** „Der Varistor wird bei hohen Spannungen sehr gut leitfähig und verhindert so in Parallelschaltung zum Verbraucher, dass hohe Ströme durch den Verbraucher fließen.“

Punkte K2.c

d) Ein NTC Bauelement ist in Abb. d-1) verbaut um einen bestimmten Zweck zu erfüllen. Mit einer Stromquelle soll ein linear ansteigender Strom  $I$  aufgeprägt werden. Ordnen Sie zunächst die U-I Kennlinien in Abb. d-2) den Spannung  $U_{A-C}$  zu und geben Sie dann den Zweck an. (1 Punkt)



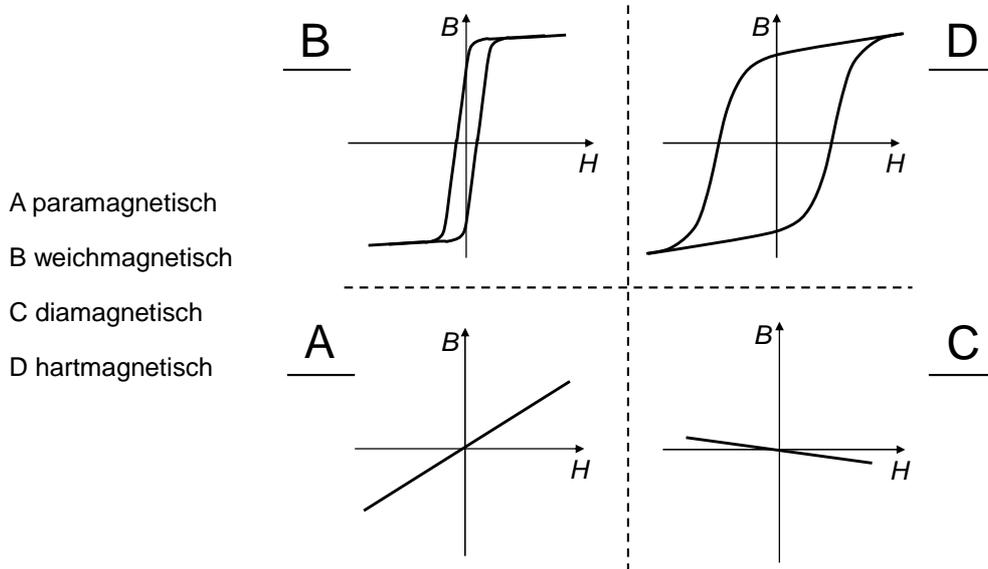
**1 Punkt: Zuweisung richtig und Zweck ausschließlich „Spannungsstabilisierung“**  
 Achtung: hier war eine Stromquelle eingezeichnet - keine Stromstabilisierung!  
 Auch nicht relevant: Erklärungen über den Mechanismus eines NTCs

Punkte K2.d

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

**Kurzaufgabe K3: Magnetismus**

In *Bild K3-1* dargestellt sind  $B(H)$ -Verläufe (A) eines paramagnetischen Materials, (B) eines weichmagnetischen Materials, (C) eines diamagnetischen Materials sowie (D) eines hartmagnetischen Materials.



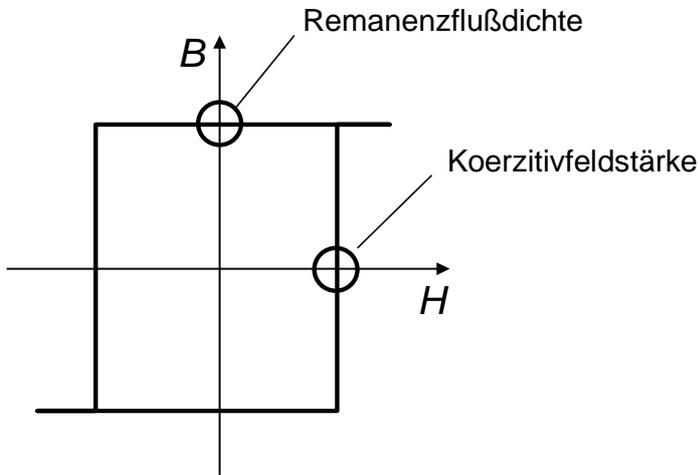
*Bild K3-1:  $B(H)$ -Verläufe verschiedener Materialien*

a) Ordnen Sie den Hysteresekurven die korrekten Bezeichnungen zu. (1 Punkt)

**1 Punkt: Alle Zuweisungen korrekt!**

Punkte K3.a
-------------

b) Zeichnen Sie die idealisierte Hysterese Kennlinie eines typischen Magnetspeichermaterials und markieren Sie in Ihrer Zeichnung die Punkte *Koerzitivfeldstärke* und *Remanenzflußdichte*. Erläutern Sie zusätzlich in wenigen Worten die beiden Aspekte, die an der gezeichneten Kennlinie charakteristisch für Magnetspeichermaterialien sind. (2 Punkte)



Was ist warum charakteristisch?

Die entsprechende Hysterese Kennlinie weist eine hohe Remanenzflußdichte auf, damit die beiden Speicherzustände gut unterschieden werden können. Eine hohe Koerzitivfeldstärke sorgt zudem dafür, dass der Speicher nicht durch kleinere Störfelder kippt.

1 Punkt für korrekt benannte Punkte. 1 Punkt für korrekte Hysterese plus Begründung.

Punkte K3.b
-------------

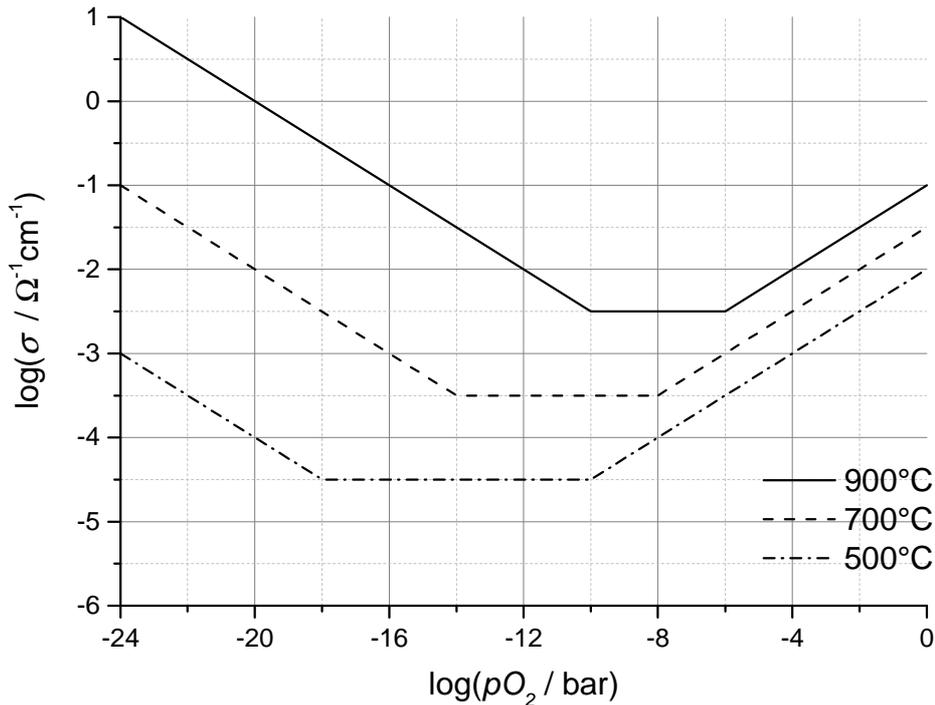
Nachname	Vorname(n)	Matrikelnummer
----------	------------	----------------

### Teil 3: Rechenaufgaben (30 Punkte)

#### Rechenaufgabe A1: Defektchemie

Das gegebene Diagramm zeigt die elektrische Gesamtleitfähigkeit  $\sigma = \sigma_{ion} + \sigma_n + \sigma_p$  des Mischleiters  $\text{Sr}(\text{Ti}_{0,9}\text{Fe}_{0,1})\text{O}_{3,8}$  als Funktion des Sauerstoffpartialdrucks  $p\text{O}_2$  für drei unterschiedliche Temperaturen.

*Hinweis:* Die ionische und elektronische Beweglichkeit darf für die Berechnungen als konstant bezüglich  $p\text{O}_2$  und Temperatur angenommen werden. Alle Defekte seien stets vollständig ionisiert.



a) Der Mischleiter besteht aus den folgenden in Kröger-Vink-Notation beschriebenen Spezies:



Wie lautet die zugehörige Elektroneutralitätsbedingung für diesen Mischleiter? (1 Punkt)

Lösung:

*Falsch ist es, sobald ungeladene Spezies in der ENB stehen!*

*Eckige Klammer [...] muss vorhanden sein!*

<b>Lösung: 1 Punkt Elektroneutralitätsbedingung:</b> $2[V_{\text{Sr}}^{\prime\prime}] + 4[V_{\text{Ti}}^{\prime\prime\prime}] + [Fe_{\text{Ti}}^{\prime}] + n = 2[V_{\text{O}}^{\bullet\bullet}] + p$	Punkte A1.a
---	-------------

b)  $\text{Sr}(\text{Ti}_{0.9}\text{Fe}_{0.1})\text{O}_{3.8}$  sei ein kubischer Perowskit mit einer Gitterkonstante von  $a = 0,4 \text{ nm}$ . Der gesamte Fe-Gehalt wirkt vollständig als Akzeptor, als vereinfachte ENB soll  $[\text{Fe}'_{\text{Ti}}] = 2[\text{V}_\text{O}^{\bullet\bullet}]$  angenommen werden. Berechnen Sie mit diesen Annahmen die Sauerstoffleerstellenkonzentration  $[\text{V}_\text{O}^{\bullet\bullet}]$ . Welchem Nichtstöchiometriekoeffizienten  $\delta$  entspricht diese? (2 Punkte)

Lösung:

$$[\text{V}_\text{O}^{\bullet\bullet}] = \frac{1}{2}[\text{Fe}'_{\text{Ti}}] = 0.1 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{a^3} = 0.1 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1.56 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3} = 7.8 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$$

$$\delta = \frac{[\text{V}_\text{O}^{\bullet\bullet}]}{[\text{Ti}_\text{Ti}^{\text{X}}] + [\text{Fe}'_{\text{Ti}}]} = \frac{1}{2} \frac{[\text{Fe}'_{\text{Ti}}]}{[\text{Ti}_\text{Ti}^{\text{X}}] + [\text{Fe}'_{\text{Ti}}]} = \frac{0.1}{2} = 0.05$$

<p><b><u>Lösung:</u></b>  <math>[\text{V}_\text{O}^{\bullet\bullet}] = 7.8 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}</math> (1 Punkt)   <math>\delta = 0.05</math> (1 Punkt)</p>	Punkte A1.b
--	-------------

c) Die spez. Leitfähigkeit  $\sigma$  der Probe kann durch folgenden allgemeinen Ausdruck beschrieben werden:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot e^{-\frac{\Delta G_0}{kT}} \cdot \left( \frac{p\text{O}_2}{\text{bar}} \right)^m$$

Ermitteln Sie die Werte der materialspezifischen Konstanten  $\Delta G_0$ ,  $\sigma_0$  und  $m$  für den  $n$ -leitenden Bereich unter Zuhilfenahme von Daten aus dem gegebenen Diagramm. (3 Punkte)

**Lösung für  $\Delta G_0$ :**

Mit  $\sigma_1 = \sigma_0 \cdot e^{-\frac{\Delta G_0}{kT_1}} \cdot p\text{O}_2^m$  und  $\sigma_2 = \sigma_0 \cdot e^{-\frac{\Delta G_0}{kT_2}} \cdot p\text{O}_2^m$

ergibt sich aus dem Verhältnis:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = e^{-\frac{\Delta G_0}{k} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)}$$

die Beziehung  $\log \sigma_1 - \log \sigma_2 = \frac{1}{\ln(10)} \cdot \frac{-\Delta G_0}{k} \cdot \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)$

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

Durch Umformung und mit den angegebenen Daten aus der Grafik kann der Zahlenwert von  $\Delta G_0$  berechnet werden:

$$\Delta G_0 = -\ln(10) \cdot k \cdot \frac{\log \sigma_1 - \log \sigma_2}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}} = -2.303 \cdot 8.617 \cdot 10^{-5} \frac{\text{eV}}{\text{K}} \cdot \frac{1 - (-1)}{\frac{1}{(900 + 273.15)\text{K}} - \frac{1}{(700 + 273.15)\text{K}}} = 2.26 \text{eV}$$

**1 Punkt: Endergebnis**

**Lösung für m:**

Aus den Kennlinien im Diagramm kann die Steigung  $m$  mit Hilfe von  $\sigma \propto pO_2^m$  leicht abgelesen werden:

$$\rightarrow m = -\frac{1}{4} \quad \text{1 Punkt: Endergebnis}$$

**Lösung für  $\sigma_0$ :**

Durch umformen von

$$\sigma_1 = \sigma_0 \cdot e^{-\frac{\Delta G_0}{kT_1}} \left( \frac{pO_2}{\text{bar}} \right)^m$$

und einsetzen der Zahlenwerte aus der Grafik ergibt sich:

$$\sigma_0 = \sigma_1 \cdot e^{\frac{\Delta G_0}{kT_1}} \left( \frac{pO_2}{\text{bar}} \right)^{-m} = 53.7 \text{ kS/cm}$$

**1 Punkt: Endergebnis**

<p><b><u>1 Punkt:</u></b></p> <p><math>\Delta G_0 = 1.49 \text{ eV}</math> (500/700°C) oder (je nach gewählter Temperatur)</p> <p><math>\Delta G_0 = 2.26 \text{ eV}</math> (700/900°C) oder</p> <p><math>\Delta G_0 = 2.25 \text{ eV}</math> (500/900°C)</p> <p><b><u>1 Punkt:</u></b> <math>m = -\frac{1}{4}</math></p> <p><b><u>1 Punkt:</u></b></p> <p><math>\sigma_0 = 5.37 \text{ S/cm}</math> (500/700°C) oder (je nach gewählter Temperatur)</p> <p><math>\sigma_0 = 53.7 \text{ kS/cm}</math> (700/900°C) oder</p> <p><math>\sigma_0 = 45.97 \text{ kS/cm}</math> (500/900°C)</p>	Punkte A1.c
--	-------------

d) Bestimmen Sie mithilfe von Werten aus dem gegebenen Diagramm die Aktivierungsenergie  $E_{ion}$  der ionischen Leitfähigkeit gemäß:  $\sigma_{ion} = \sigma_{ion,0} \cdot e^{-\frac{E_{ion}}{kT}}$ . (1 Punkte)

**Lösung für  $E_{ion}$ :**

Mit  $\sigma_{ion,1} = \sigma_{ion,0} \cdot e^{-\frac{E_{ion}}{kT_1}}$  und  $\sigma_{ion,2} = \sigma_{ion,0} \cdot e^{-\frac{E_{ion}}{kT_2}}$

ergibt sich aus dem Verhältnis:

$$\frac{\sigma_{ion,1}}{\sigma_{ion,2}} = e^{-\frac{E_{ion}}{k} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)}$$

die Beziehung  $\log \sigma_{ion,1} - \log \sigma_{ion,2} = \frac{1}{\ln(10)} \cdot \frac{-E_{ion}}{k} \cdot \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)$

Durch Umformung und mit den angegebenen Daten aus der Grafik kann der Zahlenwert von  $E_{ion,0}$  berechnet werden:

$$E_{ion,0} = -\ln(10) \cdot k \cdot \frac{\log \sigma_1 - \log \sigma_2}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}} = -2.303 \cdot 8.617 \cdot 10^{-5} \frac{eV}{K} \cdot \frac{-3.5 - (-2.5)}{\frac{1}{(700 + 273.15)K} - \frac{1}{(900 + 273.15)K}} = 1.13 eV$$

Zur Berechnung genügen zwei Werte bei unterschiedlichen Temperaturen aus dem ionenleitenden Bereich der Kennlinie, dies ist der Bereich mit  $pO_2$ -unabhängigen Verlauf.

**1 Punkt: Endergebnis**

$E_{ion} = 1.13 eV (700/900^\circ C) \mid E_{ion} = 0.74 eV (500/700^\circ C) \mid E_{ion} = 0.9 eV (500/900^\circ C) (1 \text{ Punkt})$	Punkte A1.d
--	-------------

e) Wie metallische Halbleiter besitzt auch der gegebene keramische Halbleiter eine Bandlücke, die über das Massenwirkungsgesetz  $n \cdot p = K_i \cdot e^{-\frac{E_g}{kT}}$  das Verhältnis zwischen Elektronen- und Löcherkonzentration bestimmt. Bestimmen Sie die Größe dieser Bandlücke. Zeichnen Sie hierzu zunächst geeignete Wertepaare ins Diagramm ein und berechnen Sie dann aus diesen die Größe der Bandlücke. (3 Punkte)

Hinweis: Es sei  $\mu_p = \mu_n = const.$

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

**Lösung für  $E_g$ :**

**1 Punkt Extrapolation und beide Punktpaare ablesen**

**1 Punkt  $\sigma_n \cdot \sigma_p = K \cdot \exp()$**

**1 Punkt Ergebnis.**

Ansatz:

$$n \cdot p = K_i \cdot e^{-\frac{E_g}{kT}} = \frac{\sigma_n}{e \cdot \mu_n} \cdot \frac{\sigma_p}{e \cdot \mu_p} = \frac{\sigma_n \cdot \sigma_p}{e^2 \cdot \mu^2}$$

$$\sigma_n \cdot \sigma_p = \underbrace{e^2 \cdot \mu^2 \cdot K_i}_{\tilde{K}} \cdot e^{-\frac{E_g}{kT}} = \tilde{K} \cdot e^{-\frac{E_g}{kT}}$$

Nun durch Extrapolation des n- bzw. p leitenden Bereichs Teilleitfähigkeiten an verschiedenen Temperaturen bestimmen.

$$\sigma_n (\log pO_2 = -12) \Big|_{T=900^\circ C} = 10^{-2} \frac{1}{\Omega cm}$$

$$\sigma_p (\log pO_2 = -12) \Big|_{T=900^\circ C} = 10^{-4} \frac{1}{\Omega cm}$$

$$\sigma_n (\log pO_2 = -16) \Big|_{T=700^\circ C} = 10^{-3} \frac{1}{\Omega cm}$$

$$\sigma_p (\log pO_2 = -16) \Big|_{T=700^\circ C} = 10^{-5.5} \frac{1}{\Omega cm}$$

Nun Leitfähigkeitsprodukte bei unterschiedlichen Temperaturen ins Verhältnis setzen:

$$n \cdot p = K_i \cdot e^{-\frac{E_g}{kT}} = \frac{\sigma_n}{e \cdot \mu_n} \cdot \frac{\sigma_p}{e \cdot \mu_p} = \frac{\sigma_n \cdot \sigma_p}{e^2 \cdot \mu^2}$$

$$\frac{[\sigma_n \cdot \sigma_p]_{T=900^\circ C}}{[\sigma_n \cdot \sigma_p]_{T=700^\circ C}} = e^{-\frac{E_g}{k \cdot (900+273)} + \frac{E_g}{k \cdot (700+273)}} \Rightarrow E_g = \frac{k}{\frac{1}{(700+273)} - \frac{1}{(900+273)}} \ln \left( \frac{[\sigma_n \cdot \sigma_p]_{T=900^\circ C}}{[\sigma_n \cdot \sigma_p]_{T=700^\circ C}} \right) = 2,83 eV$$

Lösung: $E_g = 1.86 eV$ (500/700°C)   $E_g = 2.83 eV$ (700/900°C)   $E_g = 2.25 eV$ (500/900°C)	Punkte A1.e
---	-------------

## Rechenaufgabe A2: Piezoelektrischer Effekt

Gegeben ist eine zylinderförmige, piezoelektrische Probe. An den beiden Stirnseiten des Zylinders ist die Probe vollflächig mit Elektroden bedampft.

Für die Probe gelten in allen folgenden Aufgabenteilen die Zahlenwerte:

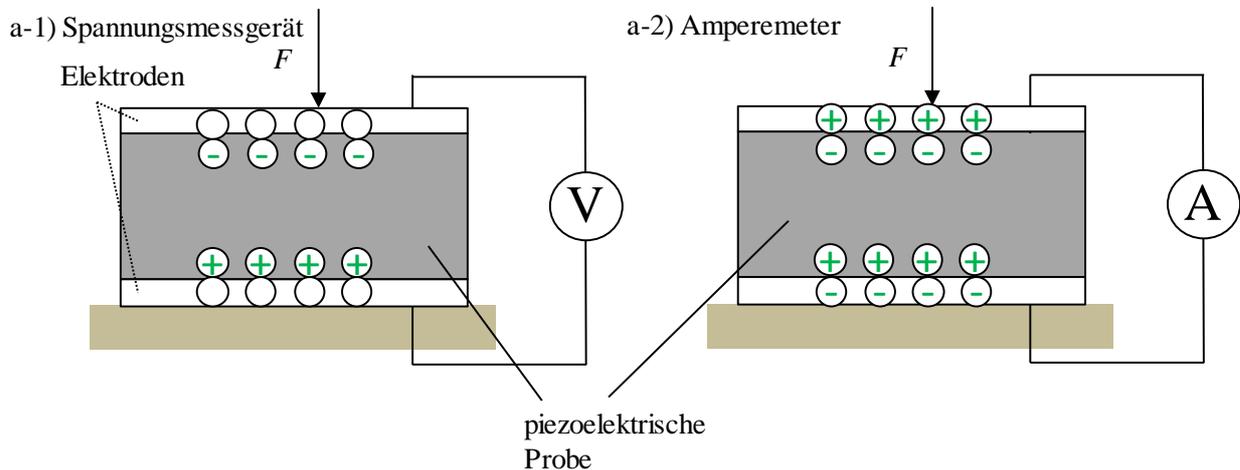
$$\text{Radius } r = 2\text{mm}$$

$$\text{Höhe } h = 1,5\text{mm}$$

$$\varepsilon_r^T = 1500$$

a) Die piezoelektrische Probe wird zunächst mit einem idealen Amperemeter und einem idealen Spannungsmessgerät charakterisiert (Abb. a-1) und a-2)). Was bedeutet die Aussage „ideal“ für den Innenwiderstand des jeweiligen Messgerätes? Zeichnen Sie die bei angelegter Kraft  $F$  stationär herrschende Ladungsverteilung ein. Kennzeichnen Sie die vorhandenen Plätze „O“ 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.

(3 Punkte)



$$|E| > 0$$

$$|D| = 0$$

$$|P| > 0$$

$$|E| = 0$$

$$|D| > 0$$

$$|P| > 0$$

**1 Punkt: Ideal heißt: Amperemeter  $R=0$  und Spannungsmessgerät  $R=\text{unendlich}$ .**

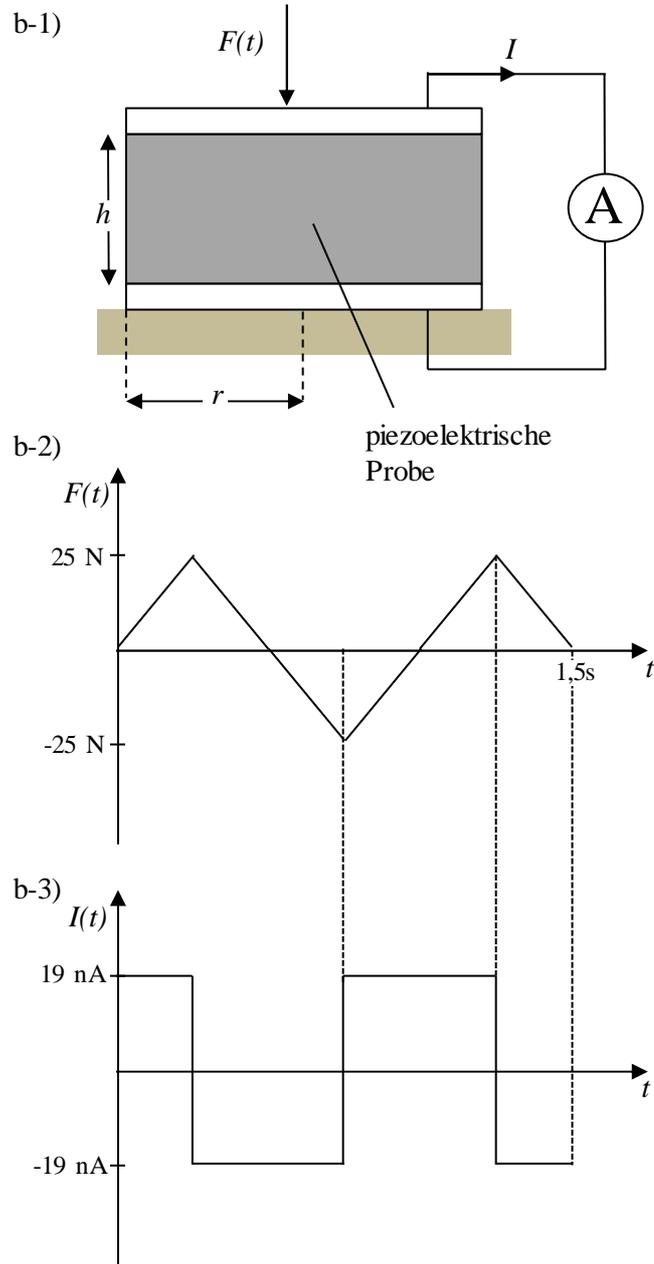
**1 Punkt: alle Ladungen richtig**

**1 Punkt: alle  $E$ ,  $D$ ,  $P$  richtig**

Punkte A2.a

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

b) Die Probe werde in der folgenden Anordnung (Abb. b-1)) untersucht: Bei Anregung mit der Kraft  $F(t)$  nach Abb. b-2), die homogen auf der Stirnfläche angreift, wird mit Hilfe eines idealen Amperemeters die Stromantwort nach Abb. b-3) aufgenommen. Bestimmen Sie mit Hilfe der gegebenen Verläufe die piezoelektrische Ladungskonstante  $d_p$ . (2 Punkte)



**Lösung:**

Grundgleichung:

$$\mathbf{D} = \mathbf{d}_p \cdot \sigma_M + \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \mathbf{E}$$

„ideales Amperemeter“ heißt:  $R_i=0$ , es fließen Ausgleichsladungen, sodass  $\mathbf{E}=0$  wird.

weiter gilt:  $\mathbf{D}=\mathbf{Q}/A$  und  $\sigma_M=\mathbf{F}/A$

eingesetzt in die Grundgleichung:

$$\mathbf{Q}/A = \mathbf{d}_p \cdot \mathbf{F}/A \quad | \cdot A \quad | \cdot d/dt$$

$$\text{also } I = \mathbf{d}_p \cdot d\mathbf{F}/dt \text{ (1Punkt)}$$

durch ablesen aus b-2) und b-3)  $d\mathbf{F}/dt = \pm 50\text{N}/0,5\text{sek} = \pm 100\text{N/s}$   
+ oder -, beides richtig  $\rightarrow I$  muss dann aber stimmen

$$\mathbf{d}_p = I / d\mathbf{F}/dt = \pm 19\text{nA} / \pm 100\text{N/s} = 190 \cdot 10^{-12} \text{ C/N} \text{ (1Punkt)}$$

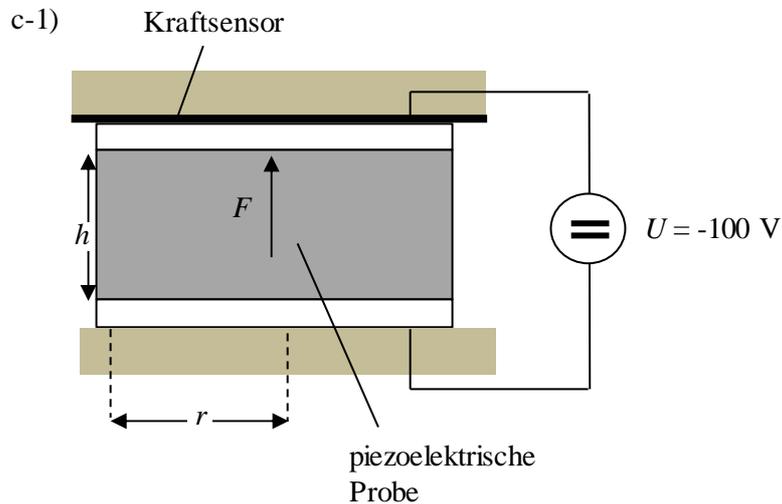
**1 Punkt:  $I = d\mathbf{F}/dt \cdot I$  aufgestellt**  
**1 Punkt: Ergebnis  $\mathbf{d}_p$  richtig**

$d_p = 190 \cdot 10^{-12} \frac{\text{C}}{\text{N}}$	Punkte A2.b
--	-------------

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

c) In einem zweiten Versuch werde die Probe so eingeklemmt, dass eine Längenänderung der piezoelektrischen Probe unterbunden ist (Abb. c-1)). Wird an die Probe eine konstante Spannung  $U = -100 \text{ V}$  angelegt, so wird mit Hilfe eines Kraftsensors eine zeitlich konstante Kraft der Probe auf den Sensor von  $F = 16 \text{ N}$  gemessen. Bestimmen Sie den Elastizitätsmodul  $s^E$ . (1 Punkt)

Hinweis: Die piezoelektrische Ladungskonstante sei  $d_p = 190 \cdot 10^{-12} \text{ C} \cdot \text{N}^{-1}$



**Lösung:**

Grundgleichung:

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

eine Längenänderung ist unterbunden:  $\epsilon_M = 0$  und es gilt  $E = U/h$  und  $\sigma_M = F/A$

eingesetzt in die Grundgleichung und umgestellt nach  $s^E$ :

$$s^E = -d_p \cdot U/h \cdot A / F = 9,95 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 \text{ N}^{-1}$$

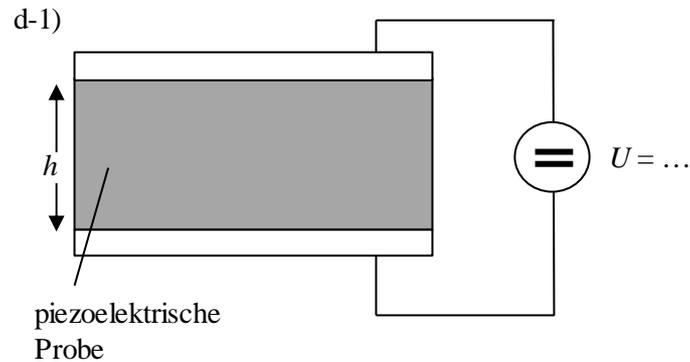
**1 Punkt: Ergebnis  $s^E$  richtig**

$$s^E = -d_p \cdot U/h \cdot A / F = 9,95 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 \text{ N}^{-1}$$

$s^E = 9,95 \cdot 10^{-12} \frac{\text{m}^2}{\text{N}}$	Punkte A2.c
---	-------------

d) Die Probe wird nun aus der Verklebung gelöst (Abb. d-1)), so dass sie sich beliebig dehnen oder stauchen kann (mechanisch unbelastet). Das Amperemeter wird durch eine konstante Spannungsquelle ersetzt. Welche Spannung müsste an eine Probe angelegt werden um eine absolute Dickenänderung um  $\Delta h = 0,2 \mu\text{m}$  gegenüber dem spannungslosen Zustand zu erzielen? (1 Punkt)

Hinweis: Die piezoelektrische Ladungskonstante sei  $d_p = 190 \cdot 10^{-12} \text{ C} \cdot \text{N}^{-1}$



**Lösung:**

Grundgleichung:

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

Da die Probe mechanisch unbelastet ist gilt  $\sigma_M = 0$  und  $E = U/h$

$$\epsilon_M = \Delta h / h = d_p \cdot U / h$$

umgestellt und eingesetzt folgt:

$$U = \epsilon_M \cdot h / d_p = \Delta h / d_p = 1053 \text{ V}$$

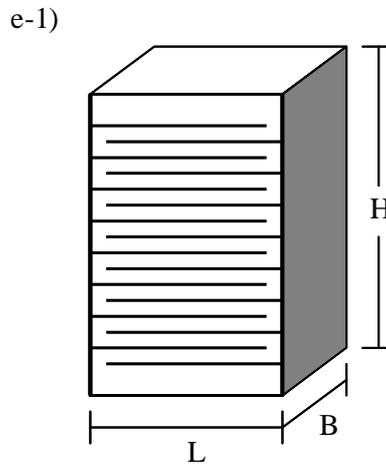
**1 Punkt: Ergebnis U richtig**

$$U = \epsilon_M \cdot h / d_p = \Delta h / d_p = 1053 \text{ V}$$

$U = 1053 \text{ V}$	Punkte A2.d
----------------------	-------------

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

Das in Aufgabenteil d) 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 (VSA) verschaltet:



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

e) Wie viele Schichten  $N$  des gegebenen Werkstoffs benötigt man, um eine Dickenänderung des Vielschichtaktors um  $\Delta H$  bei einer angelegten Spannung  $U_{VSA}$  zu erzielen? Die maximale elektrische Feldstärke sei  $E_{max}$  - wie dick  $h_{min,VSA}$  muss eine Einzelschicht mindestens sein? Was ergibt sich daraus für die minimale Gesamtdicke  $H_{Ges,min}$  des Vielschichtaktors? (3 Punkte)

*Hinweis: Verwenden Sie die folgenden Zahlenwerte*

Länge	$L = 20 \text{ mm}$
Breite	$B = 15 \text{ mm}$
Gewünschte Dickenänderung des VSA	$\Delta H = 5 \mu\text{m}$
Angelegte Spannung	$U_{VSA} = 50 \text{ V}$
Maximal zulässige Feldstärke	$E_{max} = 1 \text{ kV/mm}$
piezoelektrische Ladungskonstante	$d_{p,VSA} = 200 \cdot 10^{-12} \text{ C}\cdot\text{N}^{-1}$

*Lösung:*

*Die absolute Ausdehnung einer Einzelschicht hängt nur von der angelegten Spannung ab, denn (siehe auch Aufgabenteil d):*

$$\Delta h_{VSA} = d_{p,VSA} \cdot U = 0.01 \mu\text{m} \text{ (muss nicht ausgerechnet werden)}$$

*Bei einer gewünschten  $\Delta H=5\mu\text{m}$  Ausdehnung des VSA ergibt sich somit, dass man  $N$ -Schichten braucht.*

$$N = \Delta H / \Delta h_{VSA} = \Delta H / (d_{p,VSA} \cdot U_{VSA}) = 500 \text{ (1Punkt)}$$

*Der VSA kann als Parallelschaltung von Kondensatoren verstanden werden, deshalb ist  $U_{Ges} = U_{Einzel}$ . Aus der angelegten Spannung und der maximal zulässigen Feldstärke ergibt sich die minimale Schichtdicke für die Einzelschicht:*

$$h_{\min, \text{VSA}} = U_{\max, \text{VSA}} / E_{\max} = 50 \mu\text{m} \text{ (1Punkt)}$$

Die minimale Gesamtdicke  $H_{\text{Ges}, \min}$  des Vielschichtaktors betragt somit

$$H_{\text{Ges}, \min} = N \cdot h_{\min} = 25 \text{mm} \text{ (1Punkt)}$$

$$\text{1Punkt: } N = \Delta H / \Delta h = \Delta H / (d_p \cdot U) = 500$$

$$\text{1Punkt } h_{\min} = U_{\max} / E_{\max} = 50 \mu\text{m}$$

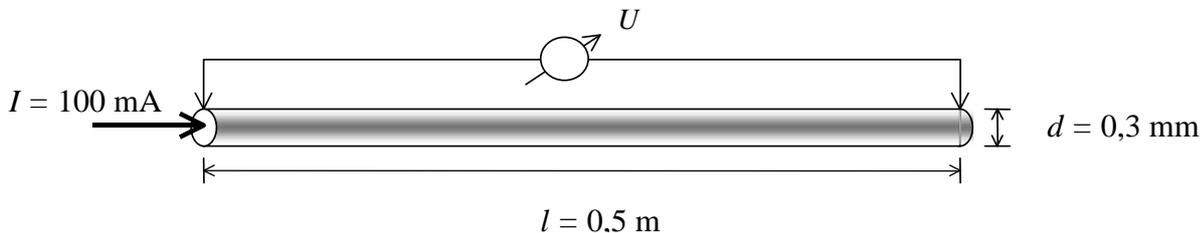
$$\text{1Punkt } H_{\text{Ges}, \min} = N \cdot h_{\min} = 25 \text{mm}$$

$N = 500$ $h_{\min, \text{VSA}} = 50 \mu\text{m}$ $H_{\text{Ges}, \min} = 25 \text{mm}$	Punkte A2.e
---	-------------

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

### Rechenaufgabe A3: Dehnmessstreifen (DMS)

a) Betrachtet wird ein Draht aus der Legierung Konstantan mit der Länge  $l$ , kreisförmigem Querschnitt und dem Durchmesser  $d$ . Der Draht wird auf einer konstanten Temperatur von  $T_U = 20\text{ °C}$  gehalten und von einem Strom  $I$  durchflossen (siehe Bild).



a) Über die Enden des Drahtes wird eine Spannung von  $U = 350\text{ mV}$  gemessen. Wie groß ist der spezifische Widerstand  $\rho$  von Konstantan? (1 Punkt)

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

$$\Rightarrow \rho = \frac{R \cdot A}{l} = \frac{U \cdot \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2}{I \cdot l} = \frac{0,35\text{ V} \cdot \pi \left(0,0003\text{ m}/2\right)^2}{0,1\text{ A} \cdot 0,5\text{ m}} = 4,9 \cdot 10^{-7}\text{ }\Omega\text{m}$$

$\rho_{\text{Konstantan}} = 4,9 \cdot 10^{-5}\text{ }\Omega\text{cm}$	Punkte A3.a
---	-------------

b) Der Konstantan-Draht wird nun in Längsrichtung um 1 % gedehnt. Dabei ändern sich aufgrund der Verformung seine Querschnittsfläche und der spezifische Widerstand des Konstantans. Die Messspannung steigt hierbei auf  $357,2\text{ mV}$  an. Wieviel Prozent der Widerstandsänderung des Drahtes resultieren aus der Änderung der Drahtabmessungen und wieviel Prozent aus der Änderung des spezifischen Widerstands  $\rho_{\text{Konstantan}}$ ? Wie groß ist schließlich der k-Faktor des Dehnmessstreifens? (3 Punkte)

Hinweis: Die Querkontraktionszahl (Poissonszahl)  $\nu$  habe den Zahlenwert  $0,3$ .

Lösung k-Faktor:

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \frac{\Delta l}{l}$$

$$\Rightarrow k = \frac{\Delta R}{R} \cdot \frac{l}{\Delta l} = \frac{\Delta U}{U} \cdot \frac{1}{\frac{\Delta l}{l}} = \frac{7,2\text{ mV}}{350\text{ mV}} \cdot \frac{1}{0,01} = 2,057$$

2,02 oder 2,01 sind falsch! Darauf kommt man, wenn man 357 statt 350 im Nenner einsetzt!

Lösung prozentuale Anteile:

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

Mit  $R = \rho \frac{l}{A}$  folgt:

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

Mit  $\nu = -\frac{1}{2} \left( \frac{dA/A}{dl/l} \right)$  und  $\nu = 0,3$  folgt weiter:

$$\frac{dR}{R} = (1 + 2\nu) \frac{dl}{l} + \frac{d\rho}{\rho} = 1,6 \cdot \frac{dl}{l} + \frac{d\rho}{\rho}$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta R}{R} = 1,6 \cdot \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta \rho}{\rho}$$

$$\Rightarrow \Delta R = 1,6 \cdot \frac{\Delta l}{l} \cdot R + \frac{\Delta \rho}{\rho} \cdot R$$

Diese Summe beschreibt, wie sich die Gesamtänderung des Widerstands zusammensetzt.

Der relative Anteil der Widerstandsänderung durch Änderung der Drahtabmessung ist damit

$$\Delta_{mech,rel} = \frac{1,6 \cdot \frac{\Delta l}{l} \cdot R}{\Delta R}$$

Dies kann wegen  $U \propto R$  umgeformt werden zu:

$$\Rightarrow \Delta_{mech,rel} = \frac{1,6 \cdot \frac{\Delta l}{l} \cdot U}{\Delta U}$$

Es ergibt sich:

$$\Rightarrow \Delta_{mech,rel} = \frac{1,6 \cdot \frac{\Delta l}{l} \cdot U}{\Delta U} = 0,78$$

$$\Rightarrow \Delta_{mat,rel} = 1 - \Delta_{mech,rel} = 0,22$$

Prozentuale Änderung durch Änderung der Drahtabmessung: 78 % Prozentuale Änderung durch Änderung des spezifischen Widerstands: 22 % k-Faktor = 2,05	Punkte A3.b
---	-------------

Wenn Sie diesen Punkt nicht gelöst haben, rechnen Sie in den folgenden Aufgabenteilen mit einem k-Faktor von  $k = 2,05$ .

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

c) Um wieviel Prozent hat sich durch die Längsdehnung um 1% die Dichte  $n$  der Leitungselektronen im Draht geändert? (2 Punkte)

Hinweis: Die Querkontraktionszahl (Poissonzahl)  $\nu$  habe den Zahlenwert 0,3.

Dichte  $n = \frac{N}{V}$ , Volumen  $V = l \cdot A$

$$\nu = -\frac{1}{2} \cdot \frac{A}{\frac{\Delta A}{l}} \Rightarrow \frac{\Delta A}{A} = (-2\nu) \cdot \frac{\Delta l}{l}$$

$$\frac{n_{\text{neu}} - n_{\text{alt}}}{n_{\text{alt}}} = \frac{\frac{N}{V_{\text{neu}}} - \frac{N}{V_{\text{alt}}}}{\frac{N}{V_{\text{alt}}}} = \frac{V_{\text{alt}}}{V_{\text{neu}}} - 1 = \frac{l_{\text{alt}} \cdot A_{\text{alt}}}{l_{\text{neu}} \cdot A_{\text{neu}}} - 1 \quad \text{1 Punkt}$$

$$A_{\text{neu}} = A_{\text{alt}} + \Delta A = A_{\text{alt}} \left( 1 - 2\nu \cdot \frac{\Delta l}{l} \right)$$

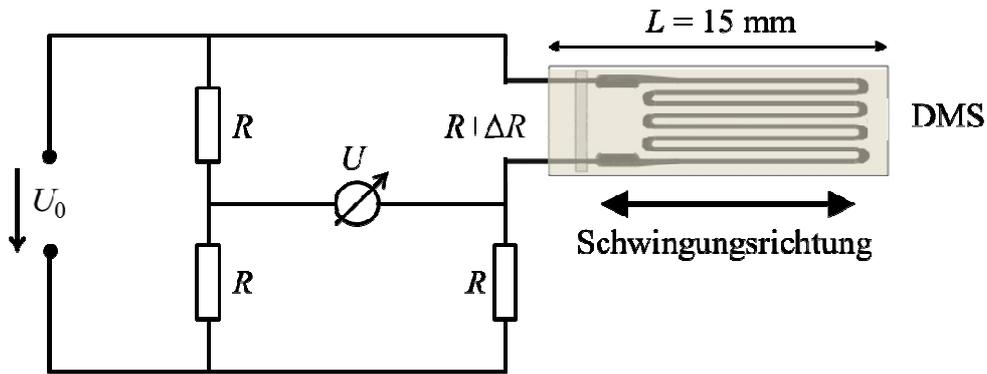
$$l_{\text{neu}} = l_{\text{alt}} + \Delta l = l_{\text{alt}} \cdot 1,01$$

$$\Rightarrow \frac{n_{\text{neu}} - n_{\text{alt}}}{n_{\text{alt}}} = \frac{l_{\text{alt}} \cdot A_{\text{alt}}}{\underbrace{l_{\text{alt}} \cdot 1,01}_{l_{\text{neu}}} \cdot \underbrace{A_{\text{alt}} \cdot \left( 1 - 2\nu \cdot \frac{\Delta l}{l} \right)}_{A_{\text{neu}}}} - 1 = \frac{1}{1,01 \cdot \left( 1 - 2\nu \cdot \frac{\Delta l}{l} \right)} - 1 = -0,004 \quad \text{1 Punkt Endergebnis}$$

Relative Änderung in $n$ : - 0,4 %	Punkte A3.c
------------------------------------	-------------

d) Der Konstantendraht werde nun zu einem Dehnmessstreifen geformt und in einer Brückenschaltung verbaut. Zur Messung mechanischer Dehnungsschwingungen sei dieser auf die Oberfläche einer vibrierenden Apparatur aufgeklebt. Das Spannungsmessgerät im Querzweig der Brücke zeigt eine periodische Spannung mit dem Scheitelwert 1,6 mV an. Die Spannung  $U_0$  betrage 20V. Wie groß ist die Amplitude  $\Delta L/L$  der relativen Längenänderung in einem Zweig des Dehnmessstreifens? (3 Punkte)

Hinweis: Berücksichtigen Sie in Ihrer Rechnung die gezeichnete Mäandrierung des Dehnmessstreifens.



Anwendung der Kirchhoffschen Regeln auf das gegebene Netzwerk liefert (1Punkt)

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{U_0}{\frac{U_0}{2} - U_{mess}} - 2 = \frac{2 \cdot U_{mess}}{\frac{U_0}{2} - U_{mess}} = \frac{4 \cdot U_{mess}}{U_0 - 2 \cdot U_{mess}}$$

Mit dem bekannten k-Faktor des DMS von 2,05 und der Anzahl paralleler Zweige  $p=8$  (selbst zählen) folgt (1Punkt)

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot p \cdot \frac{\Delta L}{L}$$

und somit

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{1}{k \cdot p} \cdot \frac{\Delta R}{R} = \frac{1}{k \cdot p} \cdot \left[ \frac{U_0}{\frac{U_0}{2} - U_{mess}} - 2 \right] = 1,95e-5 \text{ (1Punkt Endergebnis)}$$

$$\Delta L/L \approx 1,95 \cdot 10^{-5}$$

Punkte A3.d

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

e) Die Apparatur befinde sich nun bei einer Temperatur von 20 °C im schwingungsfreien Ruhezustand. Der elektrische Widerstand des DMS betrage  $R_0 = 85 \Omega$ , seine Länge  $L=15 \text{ mm}$  (siehe Zeichnung in d.)). Durch Sonneneinstrahlung steigt nun die Temperatur von Apparatur und DMS von 20 °C auf 40 °C. Wie groß ist die absolute Widerstandsänderung des DMS? (1 Punkt)

*Hinweis:*

*Der thermische Ausdehnungskoeffizient der Apparatur beträgt  $TK_{\text{Stahl}} = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ .*

Bei Erwärmung dehnt sich die Apparatur anhand des gegebenen thermischen Ausdehnungskoeffizienten aus. Der Dehnmesstreifen wird, da er auf die Apparatur geklebt ist, in genau gleichem Maße ausgedehnt. Für die Längenänderung des DMS gilt damit:

$$\Delta L = TK_{\text{Stahl}} \cdot L \cdot \Delta T = (1,2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}) \cdot 15 \text{ mm} \cdot 20 \text{ K} = 3,6 \mu\text{m}$$

Für die Widerstandsänderung bei  $p=8$  Zweigen des DMS folgt damit:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = k \cdot p \cdot \frac{\Delta L}{L}$$

$$\Rightarrow \Delta R = R_0 \cdot k \cdot p \cdot \frac{\Delta L}{L} = 0,3346 \Omega \quad (\text{1 Punkt für Zahlenwert})$$

$\Delta R = 0,3346 \Omega$	Punkte A3.e
----------------------------	-------------