

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 <input type="checkbox"/> Erstprüfung <input type="checkbox"/> 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 2007 (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.

Viel Erfolg!

Teil 1: Kurzaufgaben (30 Punkte)

Kurzaufgabe K1: Atommodell

a) Was besagt das Ausschließungsprinzip von Wolfgang Pauli? (1 Punkt)

In einem Atom dürfen die Elektronenzustände nicht in allen vier Quantenzahlen übereinstimmen.

b) Ein Elektron befinde sich in einem Potential(topf):

$$V(x) = \begin{cases} \infty & 0 \geq x \geq L \\ 0 & 0 < x < L \end{cases}$$

Im Inneren des Potentialtopfs ($0 < x < L$) gilt die zeitunabhängige Schrödinger-Gleichung:

$$-\left(\frac{\hbar^2}{2m}\right)\frac{\partial^2\Psi}{\partial x^2} = E\Psi \quad \text{mit den Lösungen} \quad \Psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \quad (n = 1, 2, 3, \dots).$$

Geben Sie, für $n=5$ und $L=5$, die Orte innerhalb des Potentialtopfs an, in denen die Wahrscheinlichkeit ein Elektron anzutreffen gleich null ist. (2 Punkte)

Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Elektrons am Ort x ist $|\Psi(x)|^2 dx$. Deshalb sind die Orte, in denen die Wahrscheinlichkeit Null ist ein Elektron anzutreffen, die Nullstellen der Wellenfunktion $\Psi(x)$. Für den Fall $n=5$ und $L=5$ liegen diese bei:

$$x_1 = \frac{1}{5}L = 1; \quad x_2 = \frac{2}{5}L = 2; \quad x_3 = \frac{3}{5}L = 3; \quad x_4 = \frac{4}{5}L = 4.$$

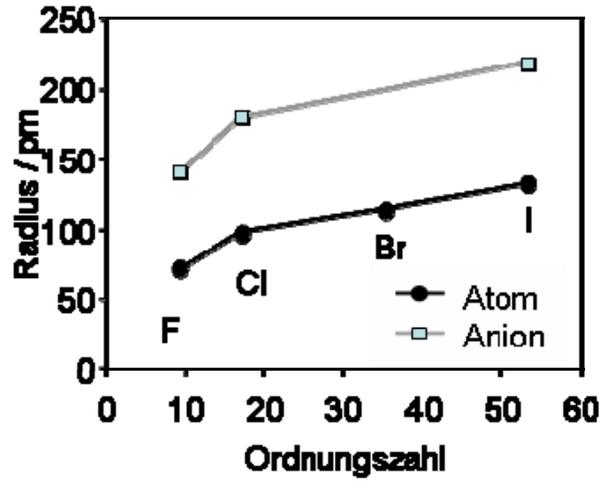
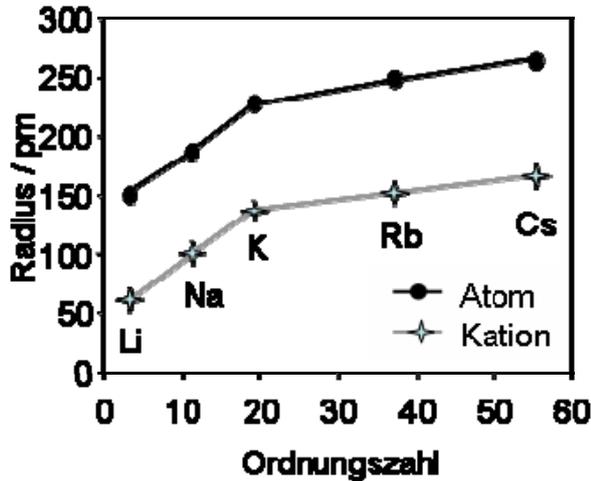
Punkte K1

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

Kurzaufgabe K2: Chemische Bindungen

Bei Aufnahme von Elektronen bzw. bei Abgabe von Elektronen verändert sich der Atomradius und es entstehen größere oder kleinere Ionen.

a) Tragen Sie die folgenden Elemente der 1. und 17. Gruppe in die freien Felder der Graphik ein: Cs, F, Cl, Na, I, Br, K, Li, Rb. Um welchen Ionentyp (Anion oder Kation) handelt es sich in der jeweiligen Graphik? (1 Punkt)



b) Beschreiben Sie kurz die Bindungs-Mechanismen der beiden Bindungstypen Van-der-Waals-Bindung und Wasserstoffbrücken-Bindung. (1 Punkt)

Van-der-Waals-Bindung:

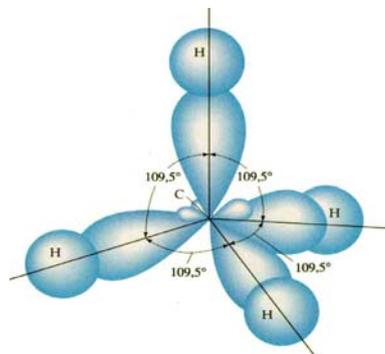
Bindung aufgrund Ausbildung momentaner Dipolmomente.

Wasserstoffbrücken-Bindung:

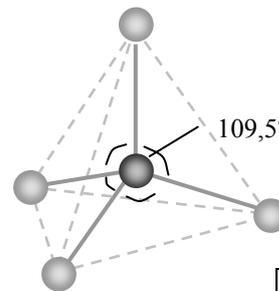
Bindung aufgrund der permanenten Dipolmomente.

c) Skizzieren Sie die Hybridisierungsstruktur von Methan (CH₄) und benennen Sie diese. (1 Punkt)

| |
|----------------------------------|
| Hybridisierungs-Typ |
| sp ³ oder tetraedisch |



oder



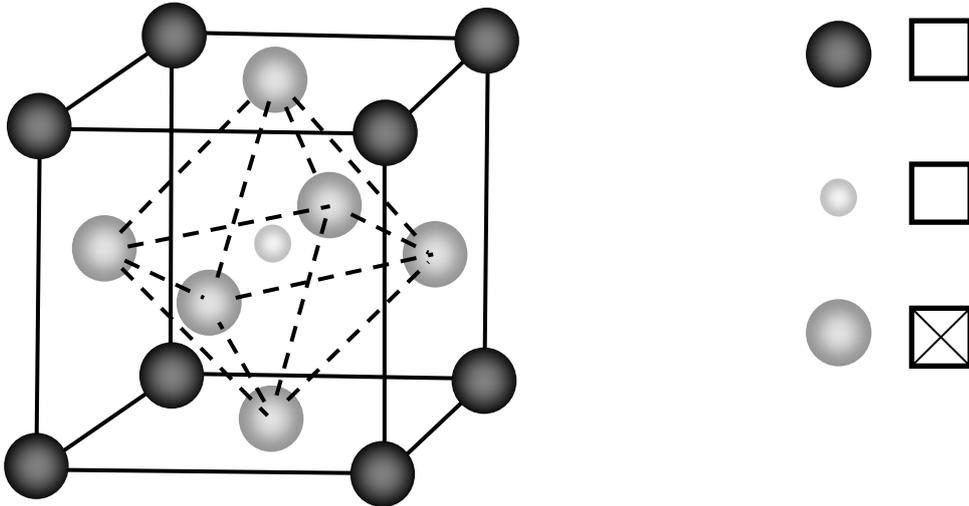
| |
|-----------|
| Punkte K2 |
|-----------|

Kurzaufgabe K3: Kristallgitter Elementarzelle

Metalloxide:

a) Vervollständigen Sie: Perowskite sind komplex zusammengesetzte Metalloxide mit **Kationen** unterschiedlicher Größe. (1 Punkt)

b) Die folgende Graphik zeigt eine solche Perowskitstruktur. Auf welchen Gitterplätzen sitzen die Sauerstoffionen? Kreuzen Sie den zutreffenden Gitterplatz an. (1 Punkt)



Metalle:

In reiner, metallischer Form liegt Tantal in einem kubischen Kristallgittertyp mit der Kantenlänge $a = 330$ pm vor. Die Dichte beträgt $16,6 \text{ g/cm}^3$.

c) Wie viele Ta-Atome enthält eine Elementarzelle, und in welchem Kristallgitter liegt Tantal vor (**Begründung**)?

Anzahl der Ta Atome pro Elementarzelle:

$$n = \frac{\rho \cdot V \cdot N_A}{M_{\text{Ta}}} = \frac{\rho \cdot a^3 \cdot N_A}{M_{\text{Ta}}} = \frac{16,6 \text{ g/cm}^3 \cdot (330 \text{ pm})^3 \cdot 6,022 \cdot 10^{23} \text{ / mol}}{180,95 \text{ g/mol}} \approx 2$$

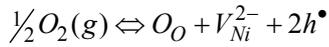
→ Kristallgitter: Kubisch raumzentriert. Einziges kubisches Gitter mit 2 Atomen pro Elementarzelle.

Punkte K3

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

Kurzaufgabe K4: Kröger-Vink-Notation

a) NiO ist ein p-Halbleiter und bildet Kationenleerstellen. Beschreiben Sie den Einbau von Sauerstoff in einen NiO-Kristall mittels Kröger-Vink-Notation. (1 Punkt)

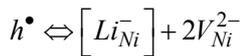


b) Wie lautet das Massenwirkungsgesetz für diese Reaktion? (1 Punkt)

$$K = \frac{[V_{Ni}^{2-}][h^\bullet]^2}{p_{O_2}^{1/2}}$$

c) Wie wirkt sich der Einbau von Li₂O in den NiO-Kristall auf die elektrische Leitfähigkeit von NiO aus? Geben Sie eine kurze Begründung. (1 Punkt)

Ein Li⁺-Ion ersetzt ein Ni²⁺-Ion. Dadurch werden weitere Löcher erzeugt:



Da

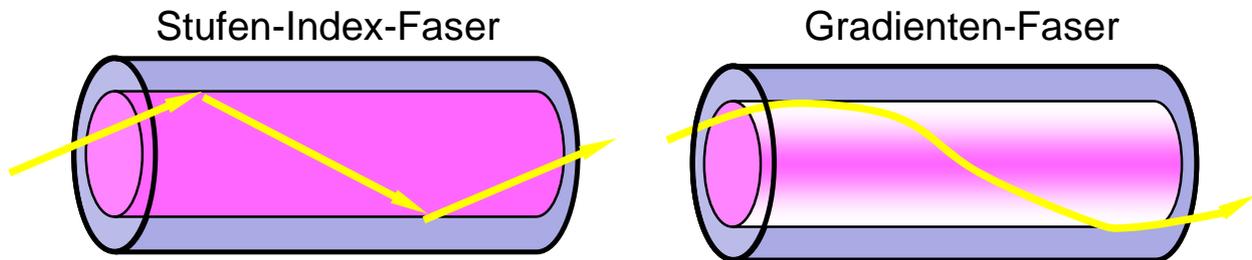
$$\sigma \sim h^\bullet$$

Erhöht sich die elektrische Leitfähigkeit durch den Einbau von LiO₂

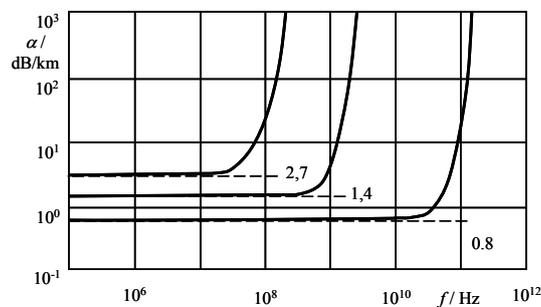
Punkte K4

Kurzaufgabe K5: Lichtwellenleiter

a) Zur Informationsübertragung über weite Strecken werden Glasfasern eingesetzt. Für die technische Anwendung wurden verschiedene Glasfasertypen entwickelt. Skizzieren Sie für die gegebenen Stufen-Index- und Gradienten-Faser den Strahlverlauf innerhalb der Faser. (1 Punkt)



b) Bei der Übertragung über eine Gradienten-Faser tritt bei einer Frequenz von $f = 100$ MHz eine Dämpfung von $D = 15$ dB zwischen Sender und Empfänger auf. Wie weit sind Sender und Empfänger voneinander entfernt? Begründen Sie, welchen der drei Dämpfungsverläufe eine Gradienten-Faser aufweist. (1 Punkt)

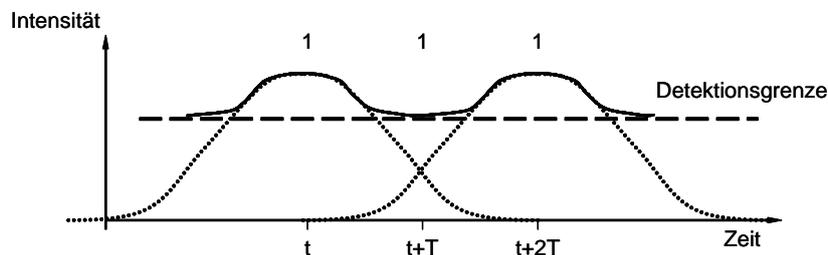


Die Mono-Mode-Faser weist die geringste Dämpfung auf, die Multi-Mode Stufen-Index-Faser die höchste.

$$D = \alpha \cdot l$$

$$l = \frac{D}{\alpha} = \frac{15 \text{ dB}}{1,4 \text{ dB/km}} = 10,71 \text{ km}$$

c) Bei der Übertragung über lange Strecken wird eine Stufen-Index-Faser verwendet. Das empfangene Signal ist gegenüber dem gesendeten verbreitert (Dispersion). Dadurch kann bei der Übertragung der Bitfolge 101 das mittlere Bit fälschlicherweise als 1 detektiert werden. Nennen Sie zwei Möglichkeiten, wie Sie diesem Problem begegnen können. (1 Punkt)



Übertragungsrate absenken

Mono-Mode-Faser verwenden → Stufen-Index-Faser ohne Modendispersion, da nur eine Mode vorhanden
Gradientenfaser hat zu hohe Dämpfung für lange Strecken

Detektionsgrenze erhöhen

Repeater verwenden

Punkte K5

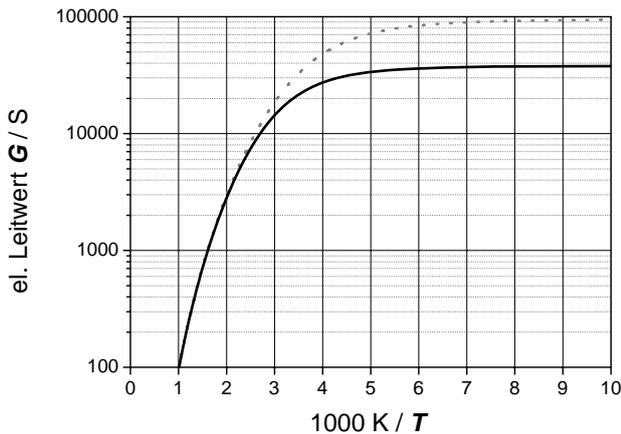
Kurzaufgabe K6: Drude-Leitung

Bild 1

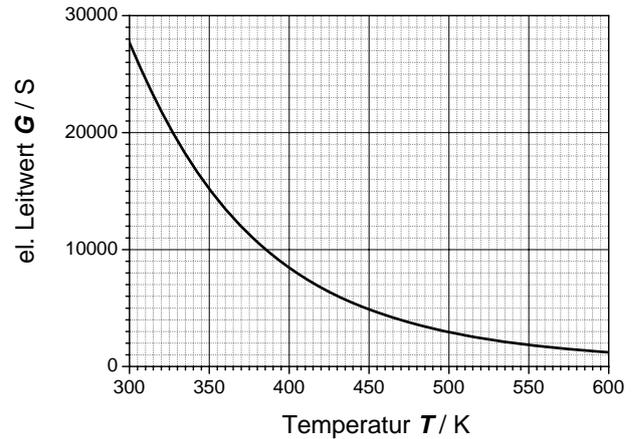


Bild 2

a) In Bild 1 sind die Messkurven für den elektrischen Leitwert G von zwei Metallproben identischer Geometrie aufgetragen. Probe A ist aus dem reinen Metall, Probe B enthält leichte Verunreinigungen durch Fremdatome. Ordnen Sie den Kurven im Schaubild die jeweilige Probe zu und begründen Sie kurz Ihre Antwort. **(1 Punkt)**

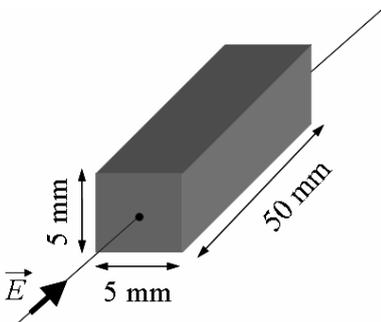
Matthiessensche Regel: gestrichelte Kurve ist das reine Metall, durchgezogene Kurve das verunreinigte.

b) Bestimmen Sie aus Bild 2 einen Wert für den technischen Temperaturkoeffizienten α_G des Leitwerts bei der Temperatur $\theta = 225 \text{ }^\circ\text{C}$. **(1 Punkt)**

$$\Theta = 225 \text{ }^\circ\text{C} \Rightarrow T \approx 500 \text{ K}$$

$$\text{Aus Definition: } \alpha_G(\Theta) = \frac{1}{G(\Theta)} \cdot \left. \frac{\Delta G}{\Delta T} \right|_{T=\Theta} \approx \frac{1}{3000 \text{ S}} \cdot \frac{5000 \text{ S} - 2000 \text{ S}}{450 \text{ K} - 550 \text{ K}} \approx -1 \text{ \% K}^{-1}$$

c) Bei der Temperatur $\theta = 225 \text{ }^\circ\text{C}$ wird die Elektronenbeweglichkeit in der reinen Metallprobe (Geometrie s. Abbildung) zu $\mu = 31 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ bestimmt. Berechnen Sie die Elektronenkonzentration n_e in der Probe. **(1 Punkt)**



$$\text{Leitwert: } G = \frac{1}{R} = \sigma \cdot \frac{A}{l} = en_e \mu \cdot \frac{A}{l}$$

$$\Rightarrow n_e = \frac{G}{e \mu} \cdot \frac{l}{A} \quad \text{Wert für } G \text{ aus Schaubild ablesen:}$$

$$n_e = \frac{3000 \text{ S}}{1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 31 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}} \cdot \frac{5 \text{ cm}}{(5 \cdot 10^{-1} \text{ cm})^2} \approx 1,21 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$$

Punkte K6

Kurzaufgabe K7: Nichtlineare Widerstände

a) In Abb. 1 ist die Strom-Spannungs-Kennlinie eines NTCs gegeben. In welchem Bereich bewirkt die Eigenerwärmung des Bauteils eine Widerstandsänderung des NTCs? (Kreuzen Sie „Bereich 1“ oder „Bereich 2“ an!) (1 Punkt)

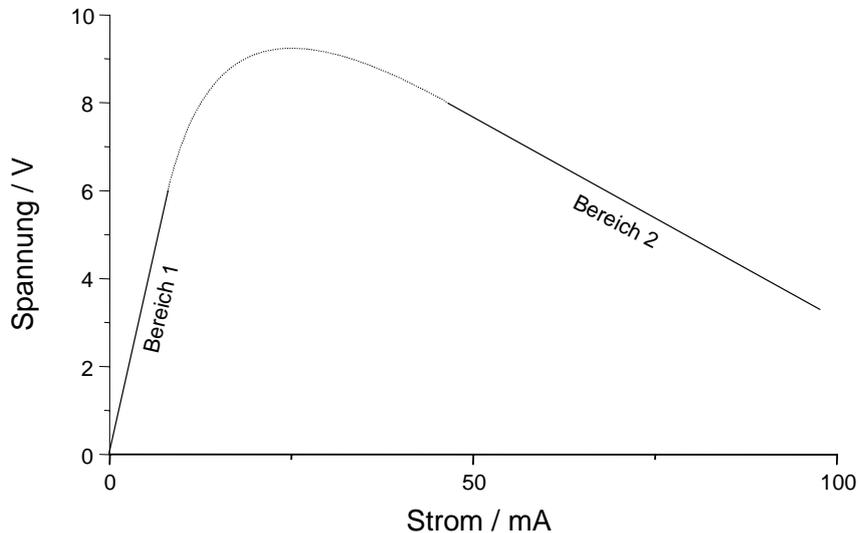


Abb. 1: Verlauf der Strom-Spannungs-Kennlinie eines NTC-Widerstandes

LÖSUNG: Bereich 2

b) Verzögerungsschaltungen werden häufig mit einem NTC realisiert. Die Schaltung in Abb. 2 besteht aus einer Lampe, einem Relais (Spule und zwei miteinander mechanisch gekoppelte Schalter) und einem NTC. Warum leuchtet die Lampe erst verzögert auf, nachdem eine äußere Spannung angelegt wurde? Zu welchem Zweck wird der NTC nach Ablauf der Verzögerungszeit kurzgeschlossen? (2 Punkte)

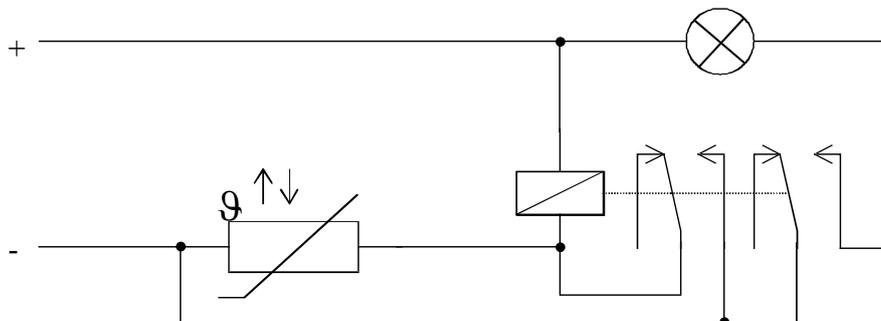


Abb. 2: Verzögerungsschaltung mit NTC-Widerstand

NTC hochohmig; Stromfluss --> Erwärmung NTC

NTC niederohmig; genug Spulenstrom --> Relais schaltet

NTC wird nach Ablauf der Verzögerungszeit kurzgeschlossen. Dadurch wird eine Aufheizung des NTC durch den Spulenstrom im Betriebsfall vermieden. Der NTC kann sich während des eingeschalteten Zustandes des Relais wieder abkühlen und den nächsten Einschaltvorgang ohne nennenswerte Totzeit wieder verzögern.

Kein Punkt für „kurzgeschlossen, um Leistung zu sparen“

Punkte K7

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

Kurzaufgabe K8: Textanalyse Varistor

Im Folgenden ist ein wissenschaftlicher Text über die Funktion von ZnO-Varistoren abgedruckt. Ihre Aufgabe ist es, den Text zu beurteilen. Bearbeiten Sie dazu die unten stehenden Fragestellungen.

Varistoren sind spannungsabhängige Widerstände, die z.B. aus polykristallinem, n-leitendem ZnO realisiert werden. Jedes Kornpaar bildet einen Mikrovaristor, dessen Potentialbarriere beim Überschreiten der Durchbruchspannung (bei ZnO-Varistoren ca. 2,5-3,5 V pro Korngrenze) durchbrochen wird. Bild 1 zeigt die Strom-Spannungskennlinie eines Varistors und den dazugehörigen mathematischen Zusammenhang.

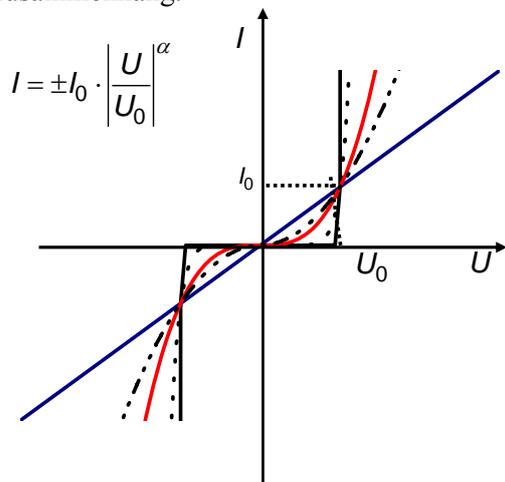


Bild 1: Strom-Spannungskennlinie eines Varistors

Für $\alpha=1$ ist die Kennlinie des Varistors somit ideal rechteckig, während die Kennlinie für $\alpha=100$ die Form einer Geraden annimmt. Die Ladungsträgerkonzentration in ZnO wird durch einen kontrollierten Abkühlprozess gesteuert. Wird die gesinterte Keramik abgekühlt, verschieben sich die Leerstellenkonzentrationen vom Kornrand ausgehend in Richtung des Niedertemperaturgleichgewichts mit einer wesentlich geringeren Elektronenkonzentration. Dabei entstehen in den Randzonen der Körner leitende Bereiche, während im Korninnern die Elektronenkonzentration erhalten bleibt. Die Korngrenzen bilden vereinfacht gesagt einen n-p-n Übergang, den die Elektronen im spannungslosen Zustand nur schwer überwinden können, da der Korngrenzbereich eine Potentialbarriere von ca. 0,6 eV bildet. Liegt eine Spannung von 3 V an, so verschiebt sich der Bandverlauf und die Elektronen können durch einen Tunneling-Prozess die Korngrenze überwinden.

a) Finden Sie einen Fehler in den Zeilen 1 bis 30. Geben Sie die Zeilennummer(n) an und beschreiben Sie, worin der Fehler besteht. **(1 Punkt)**

Z26-28: für große α -Werte ist die Kennlinie rechteckig, für $\alpha=1$ ist die Kennlinie eine Gerade

b) Finden Sie einen Fehler in den Zeilen 30 bis 52. Geben Sie die Zeilennummer(n) an und beschreiben Sie, worin der Fehler besteht. **(1 Punkt)**

Z.40: leitende Bereiche. Korngrenzen werden bei kontroll. Abkühlung isolierend.

c) Nennen Sie 2 konkrete Anwendungsbereiche, in denen Varistoren zum Einsatz kommen. **(1 Punkt)**

Hauselektronik: Blitzschutz für Fernseher, Video, Waschmaschine

Übertragung el.Energie: Hochspannungsableiter

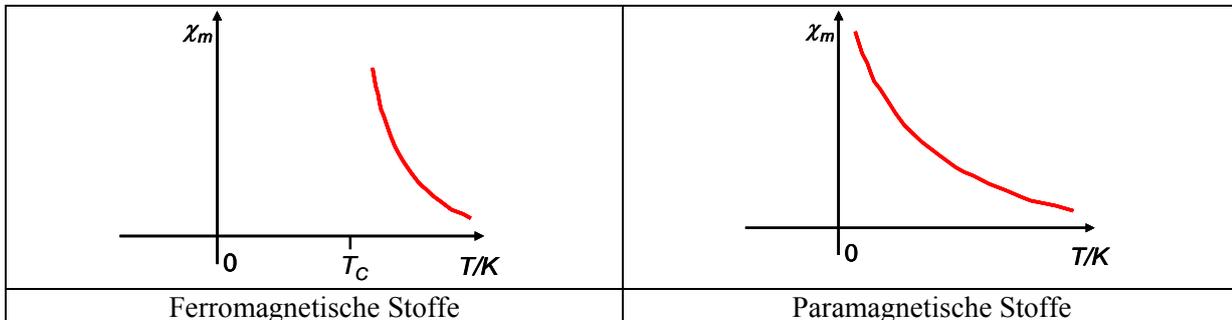
Automobilelektronik: Überspannungsschutz elektronische Zündung, Boardcomputer, ..

Punkte K8

Kurzaufgabe K9: Magnetismus

In einem Labor wird eine magnetische Probe untersucht. Dabei wird die magnetische Suszeptibilität χ_m bei Temperaturen zwischen 180 °C und 300 °C gemessen.

a) Zeichnen Sie qualitativ den Verlauf der Suszeptibilität χ_m über der Temperatur T für ferromagnetische und paramagnetische Stoffe in die vorgegebenen Diagramme ein. (1 Punkt)



b) Handelt es sich bei dem untersuchten Werkstoff in Abb. 1 um einen Ferromagneten oder Paramagneten? Begründen Sie Ihre Antwort rechnerisch. (2 Punkte)

Hinweis: Verwenden Sie das Curie-Weiß-Gesetz.

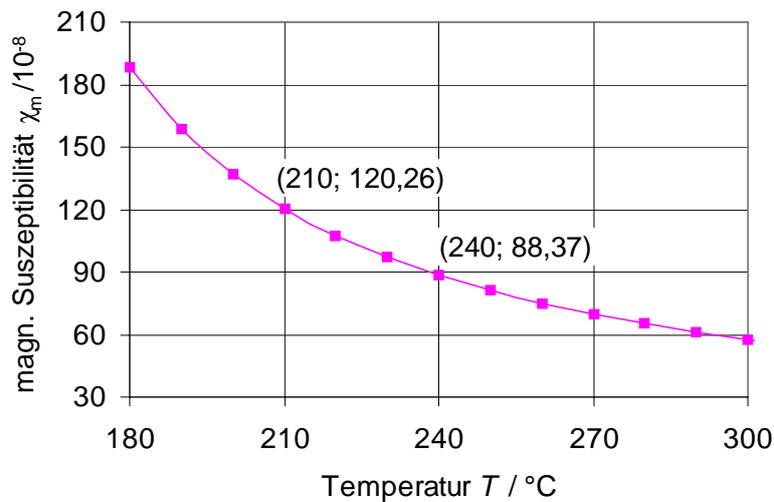


Abb. 1

Curie-Weiß-Gesetz: $\chi_m = C / (T - T_C)$

2 Gleichungen 2 Unbekannte C und T_C

Mit dem Curie Weiß Gesetz lässt sich die Kurve abbilden.

Im Paramagnetischen Fall: $\chi_m = C / T$ lässt sich die gezeigte Kurve nicht abbilden

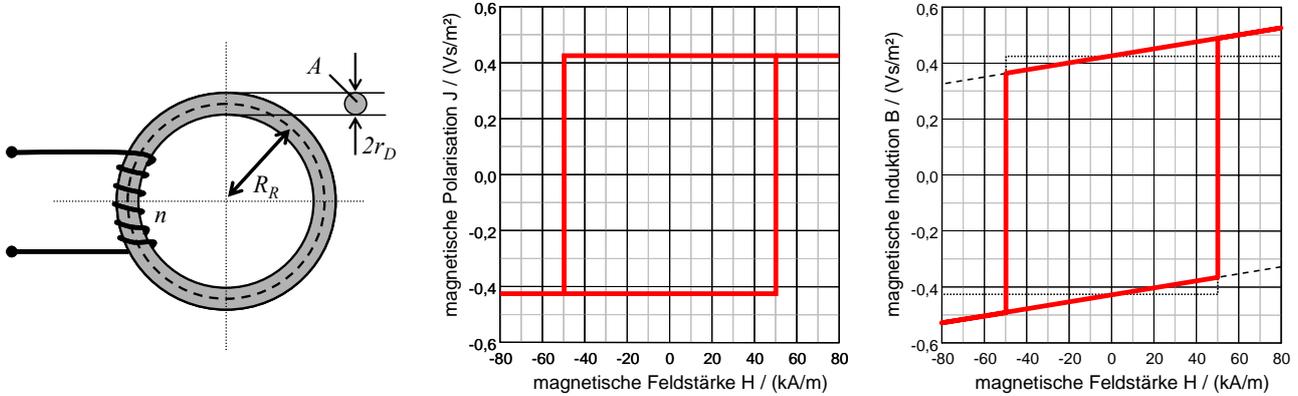
→ Werkstoff muss ferromagnetisch sein.

Punkte K9

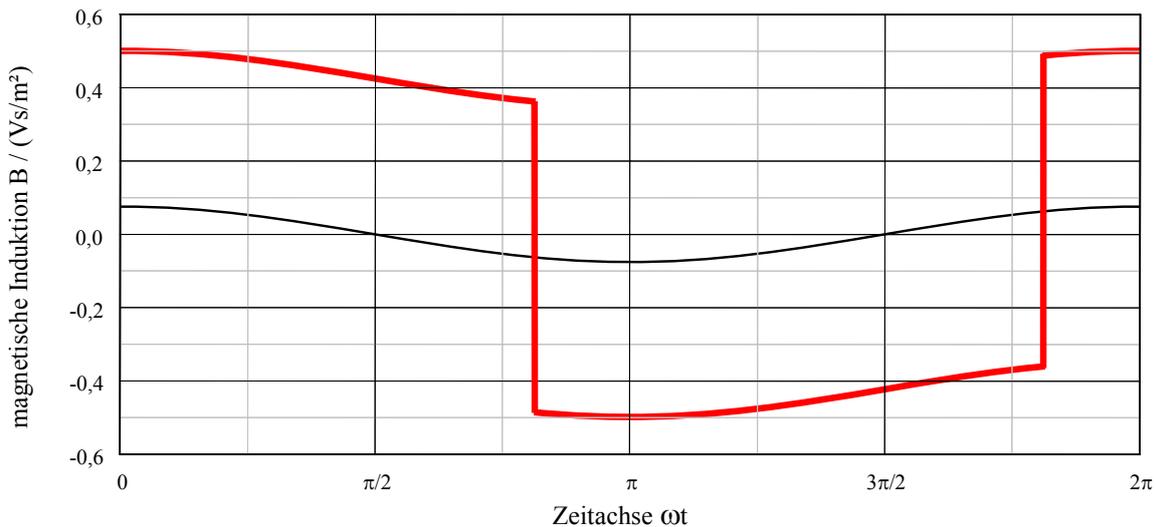
| | | |
|----------|------------|----------------|
| Nachname | Vorname(n) | Matrikelnummer |
|----------|------------|----------------|

Kurzaufgabe K10: Magnetismus im Wechselfeld

Eine Spule mit $n = 2000$ Windungen ist um einen Ringkern gewickelt. Die Abmessungen betragen $R_R = 4$ cm und $r_D = 0,5$ cm. Streufelder können vernachlässigt werden, d.h. der magnetische Fluss ϕ fließt vollständig in dem Ringkern mit der Querschnittsfläche A . Die magnetische Induktion sei über die gesamte Querschnittsfläche A konstant.



a) In der Spule wird ein Strom $i(t) = I_0 \cdot \cos(\omega t)$ mit $I_0 = 7,5$ A eingeprägt. Berechnen Sie den Verlauf der magnetischen Feldstärke $H(t)$ und zeichnen Sie den Verlauf der magnetischen Induktion $B(t)$ in dem Werkstoff in das folgende Diagramm ein. (2 Punkte)



magnetische Feldstärke H :

$$n \cdot i(t) = \oint H(t) ds = H(t) \cdot 2\pi R_R \Rightarrow H(t) = \frac{n \cdot i(t)}{2\pi R_R} = \frac{n \cdot I_0}{2\pi R_R} \cdot \cos(\omega t) \approx 60 \text{ kA/m} \cdot \cos(\omega t)$$

magnetische Induktion B :

$B(t) = \mu_0 \cdot H(t) + J(H(t))$, bei $J(H(t))$ Umlaufrichtung der Hysteresekurve beachten!

$J(H(t))$ springt von $+0,425$ Vs/m² auf $-0,425$ Vs/m² wenn H kleiner $-50 \cdot 10^3$ A/m wird, bzw. von $-0,425$ Vs/m² auf $+0,425$ Vs/m² wenn H größer $+50 \cdot 10^3$ A/m wird.

c) Berechnen Sie die Hystereseverlustleistung $P_H = V \cdot f \cdot \oint H dB$ bei einer Frequenz $f = 50$ Hz. (1 Punkt)

Hinweis: Das Volumen des Ringkerns kann mit $V \approx 2 \cdot \pi \cdot R_R \cdot \pi \cdot r_D^2$ angenähert werden.

Hystereseverlustenergiedichte: Fläche der Hystereseschleife

$$\text{hier } w_H = J_S \cdot H_C = 4 \cdot 0,425 \text{ Vs/m}^2 \cdot 50 \cdot 10^3 \text{ A/m} = 85000 \text{ Ws/m}^3$$

$$P_H = V \cdot f \cdot w_H = 2 \cdot \pi^2 \cdot R_R \cdot r_D^2 \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 85000 \text{ Ws/m}^3 = 83,9 \text{ W}$$

Punkte K10

Teil 2: Rechenaufgaben (30 Punkte)

Rechenaufgabe A1: Dilatometer

Bild 1 zeigt einen typischen Versuchsaufbau zur Messung des thermischen Ausdehnungsverhaltens. Zu Beginn hat die gesamte Anordnung Raumtemperatur ($T_0 = 25\text{ °C}$). Der Ferritkern ist vollständig in eine feststehende zylindrische Spule ($n = 10\,000$, $d_{\text{Spule}} = 2\text{ mm}$) eingetaucht.

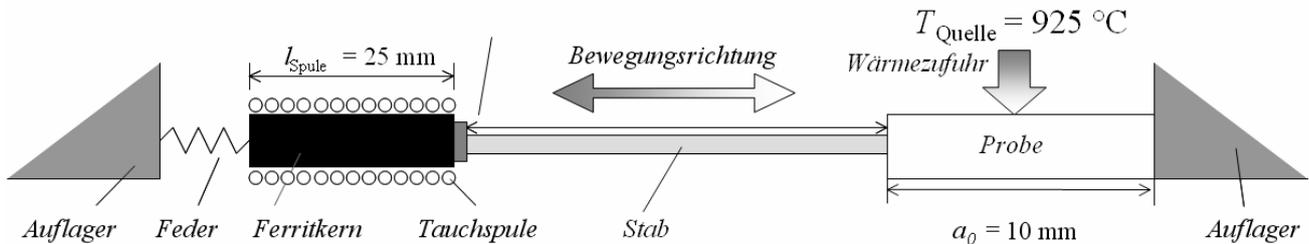


Bild 1: Schubstangen-Dilatometer

Die Probe mit der ursprünglichen Probenlänge a_0 wird nun auf $T_{\text{Quelle}} = 925\text{ °C}$ homogen erwärmt. Die Längenausdehnung der Probe wird hierbei vollständig auf einen keramischen Stab übertragen, dessen eigene Wärmeausdehnung vernachlässigt werden kann. Der lineare Ausdehnungskoeffizient der Probe beträgt $\alpha_L = 1,5 \cdot 10^{-5}\text{ K}^{-1}$; lineares thermisches Ausdehnungsverhalten $\Delta a/a_0 = \alpha_L \cdot \Delta T$ kann vorausgesetzt werden.

a) Durch die thermische Ausdehnung der Probe wird der Ferritkern teilweise aus der langen Spule herausgeschoben. Berechnen Sie die verbleibende Länge des Ferritkerns in der Spule. (2 Punkte)

Hinweise: Vernachlässigen Sie dabei den Einfluss der Feder.

$$\frac{\Delta a}{a_0} = \alpha_{\text{Probe}} \cdot \Delta T = 1,5 \cdot 10^{-5}\text{ K}^{-1} \cdot 900\text{ K} = 1,35 \cdot 10^{-2}$$

$$\Rightarrow \Delta a = 1,35 \cdot 10^{-2} \cdot a_0 = 1,35 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-2}\text{ m} = 1,35 \cdot 10^{-4}\text{ m}$$

$$l_{\text{Spule, neu}} = l_{\text{Spule}} - \Delta a = 25 \cdot 10^{-3}\text{ m} - 1,35 \cdot 10^{-4}\text{ m} = 24,865 \cdot 10^{-3}\text{ m}$$

$$= 24,865\text{ mm}$$

| | |
|--|-------------|
| $l_{\text{Spule, neu}} = 24,865\text{ mm}$ | Punkte A1.a |
|--|-------------|

Hinweis: Wenn Sie diesen Punkt nicht gelöst haben, rechnen Sie mit $l_{\text{Spule, neu}} = 24,5\text{ mm}$ weiter.

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

b) Berechnen Sie die Windungszahl n_{neu} auf der verbliebenen Länge des Ferritkerns in der Spule und die sich hieraus ergebende Induktivität L der Spule. **(2 Punkte)**

Hinweise: Für den Ferritkern gilt: $\mu_r = 1000$. Vernachlässigen Sie den luftgefüllten Bereich der Tauchspule.

$$\frac{l_{\text{Spule}}}{l_{\text{Spule,neu}}} = \frac{n}{n_{\text{neu}}}$$

$$\Rightarrow n_{\text{neu}} = n \cdot \frac{l_{\text{Spule,neu}}}{l_{\text{Spule}}} = 10^4 \cdot \frac{24,865 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{25 \cdot 10^{-3} \text{ m}} = 9946$$

$$L = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \pi \cdot \frac{d_{\text{Spule}}^2}{4} \cdot \frac{n^2}{l_{\text{Spule}}}$$

$$L = 1000 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}} \cdot \pi \cdot \frac{(2 \cdot 10^{-3} \text{ m})^2}{4} \cdot \frac{9946^2}{24,865 \cdot 10^{-3} \text{ m}}$$

$$L = 4 \cdot \pi^2 \cdot \frac{9946^2}{24,865} 10^{-7} \text{ H}$$

$$L = 15,7 \text{ H}$$

| | | |
|-------------------------|----------------------|-------------|
| $n_{\text{neu}} = 9946$ | $L = 15,7 \text{ H}$ | Punkte A1.b |
|-------------------------|----------------------|-------------|

Durch den Kontakt mit der heißen Probe erhitzt sich der keramische Stab im Aufbau nach Bild 1 in der Realität jedoch am einen Ende auf $T_{\text{Quelle}} = 925 \text{ °C}$, während er am anderen Ende auf Raumtemperatur ($T_0 =$

25 °C) bleibt. Es wird im Stab ($0 \leq x_0 \leq l_0$) vereinfacht folgende quadratische Temperaturverteilung $T(x_0)$ angenommen: $T(x_0) = \frac{T_{\text{Quelle}} - T_0}{l_0^2} \cdot x_0^2 + T_0$.

c) Bestimmen Sie die Längenänderung Δl des keramischen Stabes durch die Erwärmung. Bei Raumtemperatur hat der Stab die Länge $l_0 = 200$ mm. (3 Punkte)
Hinweise: Betrachten Sie hierzu den Stab in infinitesimale Teilstücke der ursprünglichen Länge dx_0 zerlegt und berechnen sie deren jeweilige Ausdehnung aufgrund der Temperaturdifferenz (Bild 2). Integrieren Sie anschließend über alle Längenelemente dx und bestimmen Sie durch Integration die neue Länge l des Stabes. Die Veränderung des Temperaturprofils durch die Ausdehnung des Keramikstabes ist vernachlässigbar. Der lineare Ausdehnungskoeffizient der Keramik beträgt $\alpha_L^{(\text{ker})} = 10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

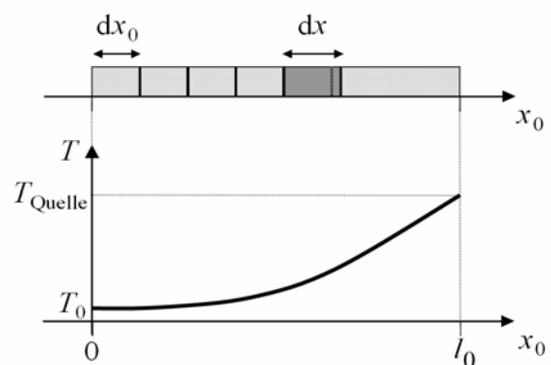


Bild 2: Ausdehnung der Längenelemente und Temperaturverteilung entlang des Keramikstabes

Der Stab wird gedanklich unterteilt in Stücke der Länge dx_0 , so dass gilt:

$$l_0 = \int_0^{l_0} dx_0$$

Durch Erwärmung dehnt sich jedes Element dx_0 auf die Länge dx aus:

$$dx = dx_0 \cdot (1 + \alpha_L^{(\text{ker})} \Delta T)$$

$\Delta T = T - T_0$ ist hierbei die Temperaturdifferenz zwischen Teilstück dx und der Ausgangstemperatur T_0 . Der Keramikstab ist an der Position $x_0 = l_0$ mit der Wärmequelle ($T_{\text{Quelle}} = 925$ °C) verbunden. Die Längenelemente dx haben die Temperatur $T(x_0)$ über ihre gesamte Breite.

Die Gesamtlänge l des Stabs errechnet sich zu:

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

$$l = \int_0^l dx = \int_0^{l_0} dx_0 (1 + \alpha_L^{(\text{ker})} \cdot \Delta T)$$

$$l = \int_0^{l_0} dx_0 \left(1 + \alpha_L^{(\text{ker})} \cdot \frac{T_{\text{Quelle}} - T_0}{l_0^2} \cdot x_0^2 \right)$$

$$l = \left[x_0 + \alpha_L^{(\text{ker})} \cdot \frac{T_{\text{Quelle}} - T_0}{l_0^2} \cdot \frac{1}{3} x_0^3 \right]_0^{l_0}$$

$$l = l_0 + \alpha_L^{(\text{ker})} \cdot \frac{T_{\text{Quelle}} - T_0}{l_0^2} \cdot \frac{1}{3} l_0^3$$

$$l = l_0 \left(1 + \alpha_L^{(\text{ker})} \cdot \frac{T_{\text{Quelle}} - T_0}{3} \right)$$

$$l = 0,2 \text{ m} \cdot \left(1 + 10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1} \cdot \frac{900 \text{ K}}{3} \right)$$

$$l = 0,2 \text{ m} \cdot (1 + 3 \cdot 10^{-3}) = 0,2006 \text{ m}$$

$$\Delta l = l - l_0 = 0,2006 \text{ m} - 0,2 \text{ m} = 600 \text{ } \mu\text{m}$$

| | |
|---------------------------------------|-------------|
| $\Delta l = 600 \text{ } \mu\text{m}$ | Punkte A1.c |
|---------------------------------------|-------------|

d) Leiten Sie einen einfachen Zusammenhang zwischen dem Volumenausdehnungskoeffizienten $\alpha_V = \frac{\Delta V}{V_0} \cdot \frac{1}{\Delta T}$ und dem Längenausdehnungskoeffizienten α_L her. (2 Punkte)

Hinweis: Beim Erhitzen dehnt sich die Probe isotrop aus. Gehen Sie von einer quaderförmigen Probe ($V_0 = a_0 \cdot b_0 \cdot c_0$) aus, berechnen Sie das Volumen nach der Ausdehnung und vereinfachen Sie geeignet, indem Sie Terme höherer Ordnung vernachlässigen.

Durch Erwärmung dehnt sich der Quader aus und nimmt das Volumen

$$V = (a_0 + \Delta a) \cdot (b_0 + \Delta b) \cdot (c_0 + \Delta c) \text{ ein.}$$

$$\Rightarrow V = a_0 \cdot b_0 \cdot c_0 + a_0 \cdot b_0 \cdot \Delta c + a_0 \cdot \Delta b \cdot c_0 + \Delta a \cdot b_0 \cdot c_0 + a_0 \cdot \Delta b \cdot \Delta c + \Delta a \cdot b_0 \cdot \Delta c + \Delta a \cdot \Delta b \cdot c_0 + \Delta a \cdot \Delta b \cdot \Delta c$$

$$\Rightarrow \frac{V}{V_0} = 1 + \frac{\Delta c}{c_0} + \frac{\Delta b}{b_0} + \frac{\Delta a}{a_0} + \frac{\Delta b \cdot \Delta c}{b_0 \cdot c_0} + \frac{\Delta a \cdot \Delta c}{a_0 \cdot c_0} + \frac{\Delta a \cdot \Delta b}{a_0 \cdot b_0} + \frac{\Delta a \cdot \Delta b \cdot \Delta c}{a_0 \cdot b_0 \cdot c_0} \quad (1)$$

Allgemein gilt: $V = V_0(1 + \alpha_V \Delta T)$ und $l = l_0(1 + \alpha_L \Delta T)$ bzw. $\frac{\Delta l}{l_0} = \alpha_L \Delta T$.

Isotropie bedeutet: $\alpha_a = \alpha_b = \alpha_c \equiv \alpha_L$.

Einsetzen in (1) ergibt folglich:

$$1 + \alpha_V \Delta T = 1 + \alpha_L \Delta T + \alpha_L \Delta T + \alpha_L \Delta T + O(\Delta T^2) + O(\Delta T^3)$$

Vernachlässigung der Terme höherer Ordnung in ΔT liefert:

$$1 + \alpha_V \Delta T \approx 1 + 3 \cdot \alpha_L \Delta T$$

$$\Rightarrow \alpha_V \approx 3 \cdot \alpha_L$$

| | |
|-------------------------------|-------------|
| $\alpha_V \approx 3 \alpha_L$ | Punkte A1.d |
|-------------------------------|-------------|

e) Bei welchem der folgenden drei Metalle würden Sie den höchsten Längenausdehnungskoeffizienten erwarten? Begründen Sie kurz. (1 Punkt)

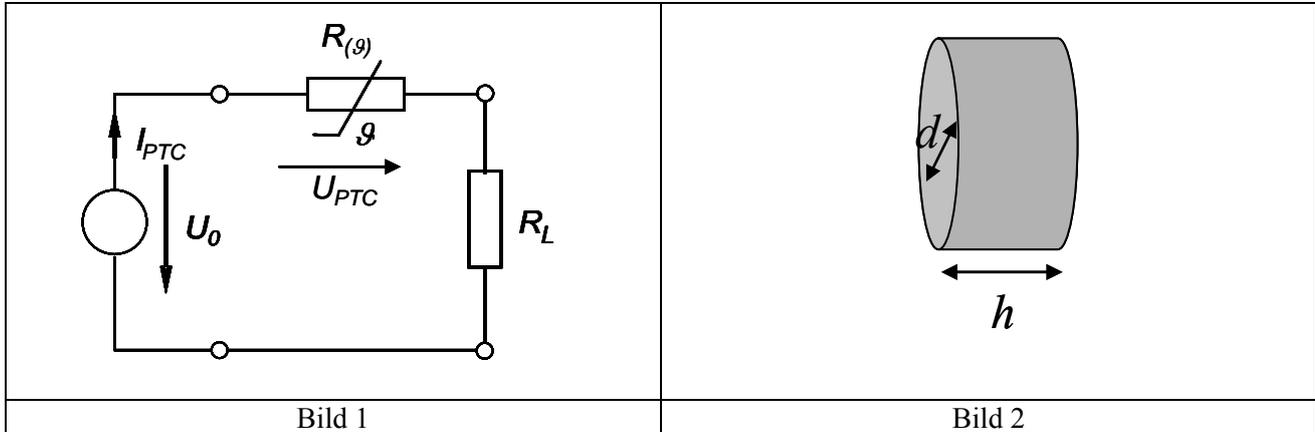
| Element | Schmelztemperatur / °C |
|---------|------------------------|
| W | 3400 |
| Al | 660 |
| Pt | 1770 |

| | |
|---|-------------|
| Aluminium, da bei Metallen $\alpha_L \sim 1/T_{\text{sm}}p$ korreliert. | Punkte A1.e |
|---|-------------|

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

Rechenaufgabe A2: Nichtlineare Widerstände PTC

Ein PTC wird als Schutzwiderstand vor einen Verbraucher R_L , siehe Bild 1, geschaltet. Zunächst wird der Kaltleiter als zylinderförmiger Körper mit der Oberfläche A mit den in der Tabelle angegebenen Dimensionen betrachtet.



| | | | |
|----------------------|---|------------------------------|--|
| Kaltleiterkonstanten | $\vartheta_b = 140 \text{ }^\circ\text{C}$ | Durchmesser des Kaltleiters | $d = 10 \text{ mm}$ |
| | $\vartheta_{R_{min}} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ | Dicke des Kaltleiters | $h = 5 \text{ mm}$ |
| | $R_{min} = 5 \text{ } \Omega$ | Masse des PTC | $m = 10 \text{ g}$ |
| | $p = 4$ | Spez. Wärmekapazität des PTC | $c = 1 \text{ Ws/gK}$ |
| | | Wärmeübergangszahl an Luft | $\alpha_L = 4 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ |
| Versorgungsspannung | $U_0 = 200 \text{ V}$ | | |
| Lastwiderstand | $R_L = 5 \text{ } \Omega$ | | |

Durch Konvektion abgeführte Leistung: $P_{th} = \alpha_L \cdot A_O \cdot (\vartheta - \vartheta_U)$

Temperaturabhängigkeit des PTC-Widerstands: $R(\vartheta) = 2 \cdot R_{min} \cdot e^{\left(\frac{\vartheta - \vartheta_{R_{min}}}{\vartheta_b - \vartheta_{R_{min}}}\right)^p}$

a) Der PTC wird an Luft bei der Temperatur $\vartheta_U = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ betrieben. Berechnen Sie den Strom I_{PTC} und die Spannung U_{PTC} am PTC, wenn der PTC aufgrund der Eigenerwärmung eine Temperatur von $\vartheta = 180 \text{ }^\circ\text{C}$ hat. **(3 Punkte)**

Es gibt 2 Lösungsmöglichkeiten, die jeweils mit voller Punktzahl bewertet wurden:

1. Lösung (thermisches Gleichgewicht):

Im Falle des thermischen Gleichgewichts ist die thermisch abgeführte Leistung = zugeführte elektrische Leistung am PTC:

$$P_{th} = \alpha_L \cdot A_O \cdot (\vartheta - \vartheta_U) = \frac{U_{PTC}^2}{R_\vartheta} = I_{PTC}^2 \cdot R_\vartheta$$

Die Gesamte Oberfläche des Heißeiters ist: $A_O = \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot \pi \cdot 2 + d \cdot \pi \cdot h = 3.14 \text{ cm}^2$

Der Widerstand des Kaltleiters ist: $R_{(\vartheta)} = A \cdot e^{\left(\frac{\vartheta - \vartheta_{R \min}}{\vartheta_b - \vartheta_{R \min}}\right)^p}$; $R_{(\vartheta=180^\circ\text{C})} = 777 \Omega$

Die Spannung am Kaltleiter ist: $U_{PTC} = \pm \sqrt{R_{(\vartheta=180^\circ\text{C})} \cdot [\alpha_L \cdot A_0 \cdot (180^\circ\text{C} - \vartheta_U)]} = 38.9 \text{ V}$

Strom durch Kaltleiter: $I_{PTC} = \pm \sqrt{\frac{[\alpha_L \cdot A_0 \cdot (180^\circ\text{C} - \vartheta_U)]}{R_{(\vartheta=180^\circ\text{C})}}} = 50 \text{ mA}$

2. Lösung (Nichtgleichgewicht):

Die Temperatur der PTC ist gegeben (180°C), es ist aber nicht bekannt, ob der PTC das thermische Gleichgewicht schon erreicht hat (noch in der Aufheizphase).

$$I_{PTC} = \frac{U_0}{R_{(\vartheta=180^\circ\text{C})} + R_L} = 0.26 \text{ A} \quad U_{PTC} = I_{PTC} \cdot R_{(\vartheta=180^\circ\text{C})} = 198 \text{ V}$$

Bemerkung: Die Temperatur wurde willkürlich gewählt, weshalb sich die beiden Ergebnisse unterscheiden. Bei der „Gleichgewichtstemperatur“ (hier 199°C) wären die Ergebnisse gleich.

| | |
|--------------------------------|-------------|
| $U_{PTC} =$ $I_{PTC} =$ | Punkte A2.a |
|--------------------------------|-------------|

b) Nun wird ein anderer PTC in Bild 1 als Schutzwiderstand zur Strombegrenzung in eine Maschine eingebaut. Der Lastwiderstand R_L ist jetzt der Rest-Widerstand der Maschine nach einem plötzlich aufgetretenen Defekt (Kurzschluss). In Normalbetrieb ist der Lastwiderstand der Maschine sehr viel größer, so dass der PTC vor Eintreten eines Defekts auf Umgebungstemperatur $\vartheta_U = 25^\circ\text{C}$ ist. Danach steigt die PTC-Temperatur durch Eigenerwärmung auf $\vartheta = 160^\circ\text{C}$. Bestimmen Sie den neuen Wärmeleitwert G_{th} des in die Maschine eingebauten PTC. (2 Punkte)

Hinweis: $P_{th} = G_{th} \cdot (\vartheta - \vartheta_U)$

Wichtig: G_{th} kann nicht aus den gegebenen geometrischen und der gegebenen Wärmeübergangszahl berechnet werden, da sich diese durch den Einbau (Befestigung an der Maschine) verändern.

$\vartheta = 160^\circ\text{C}$ (Neue Temperatur des PTC $\rightarrow U_{PTC}$ aus Aufgabenteil a) kann nicht verwendet werden)

$$P_{th} = G_{th} \cdot (\vartheta - \vartheta_U) = \frac{U_{PTC}^2}{R_g} = U_0^2 \cdot \frac{R_g}{(R_g + R_L)^2} \rightarrow G_{th} = U_0^2 \cdot \frac{R_g}{(R_g + R_L)^2 \cdot (\vartheta - \vartheta_U)} = 2.87 \text{ W / K}$$

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

| | |
|------------|-------------|
| $G_{th} =$ | Punkte A2.b |
|------------|-------------|

Hinweis: Wenn Sie die Aufgabe nicht gelöst haben, rechnen Sie mit $G_{th} = 1 \text{ W/K}$ weiter

c) Berechnen Sie die Auslösezeit τ , die zwischen dem unmittelbaren Auftreten des Defekts (siehe Aufgabenteil b), und der Strombegrenzung durch den PTC vergeht. Entnehmen Sie die PTC-Konstanten aus der Tabelle in Aufgabenteil a). **(3 Punkte)**

Hinweis: Setzen Sie zur Vereinfachung die Temperatur des PTC für den gesamten Vorgang $\vartheta = \vartheta_b$ und benutzen Sie zur Berechnung die folgende Abschätzung: $P_H \cdot \tau \approx c \cdot m \cdot (\vartheta - \vartheta_U)$; P_H : die zum Aufheizen benötigte Leistung.

Lösung:

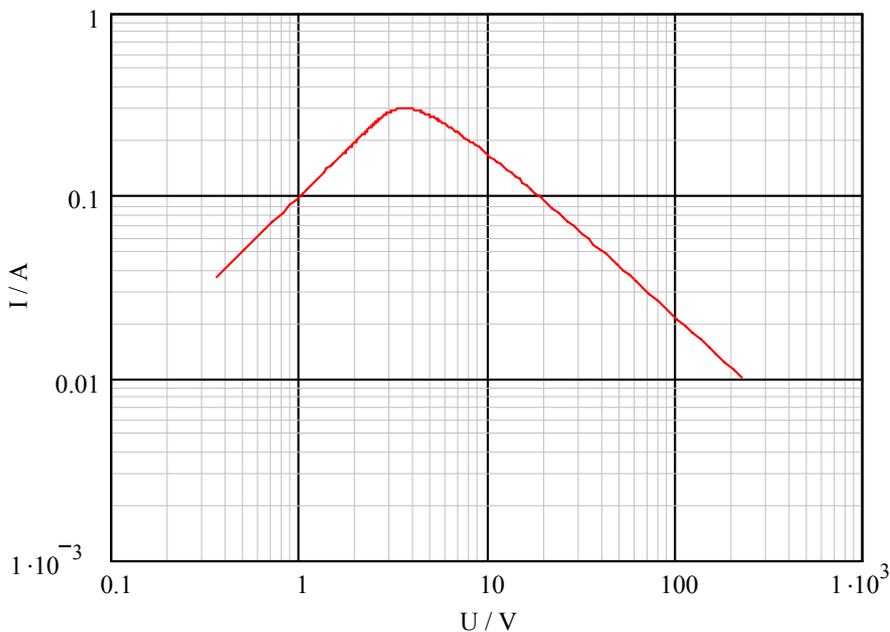
Die Gesamtleistung am PTC (P_{PTC}) setzt sich zusammen aus der Leistung, die zur Erwärmung der thermischen Masse des PTC nötig (P_H) ist und der Leistung, die an die Umgebung abgegeben wird (P_{th}).

$$P_{PTC} = \frac{U_{PTC}^2}{R_g} = U_0^2 \frac{R_g}{(R_g + R_L)^2} = P_H + P_{th} = \frac{c \cdot m \cdot (\vartheta_b - \vartheta_U)}{\tau} + G_{th} \cdot (\vartheta_b - \vartheta_U)$$

$$\rightarrow \tau = \frac{c \cdot m \cdot (\vartheta_b - \vartheta_U)}{U_0^2 \frac{R_g}{(R_g + R_L)^2} - G_{th} \cdot (\vartheta_b - \vartheta_U)} = 1.23s$$

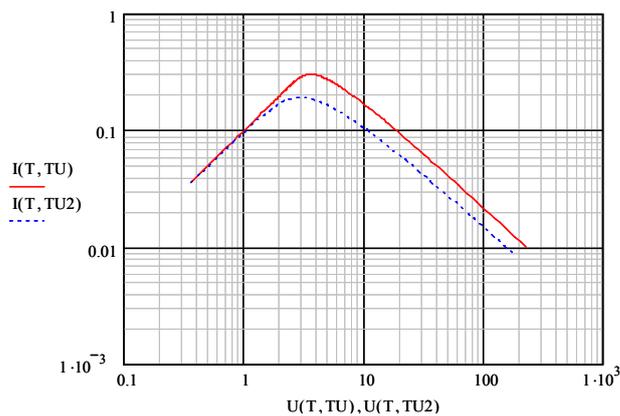
| | |
|----------|-------------|
| $\tau =$ | Punkte A2.c |
|----------|-------------|

d) Gegeben ist die I - U -Kennlinie eines Kaltleiters bei einer Umgebungstemperatur von $\vartheta_U = 25\text{ °C}$. Welcher Kennlinienbereich eignet sich für den Betrieb des PTCs als Temperatursensor, und in welchem Kennlinienbereich befindet sich der PTC in Eigenerwärmung? Kennzeichnen Sie eindeutig die zwei Bereiche (Sensor, Eigenerwärmung) in der gezeigten I - U -Kennlinie. Zeichnen Sie zudem qualitativ den Verlauf der I - U -Kennlinie dieses PTCs für eine höhere Umgebungstemperatur, z. B. $\vartheta_U = 80\text{ °C}$. (2 Punkte)



Lösung:

← Sensor →
← Eigenerwärmung →

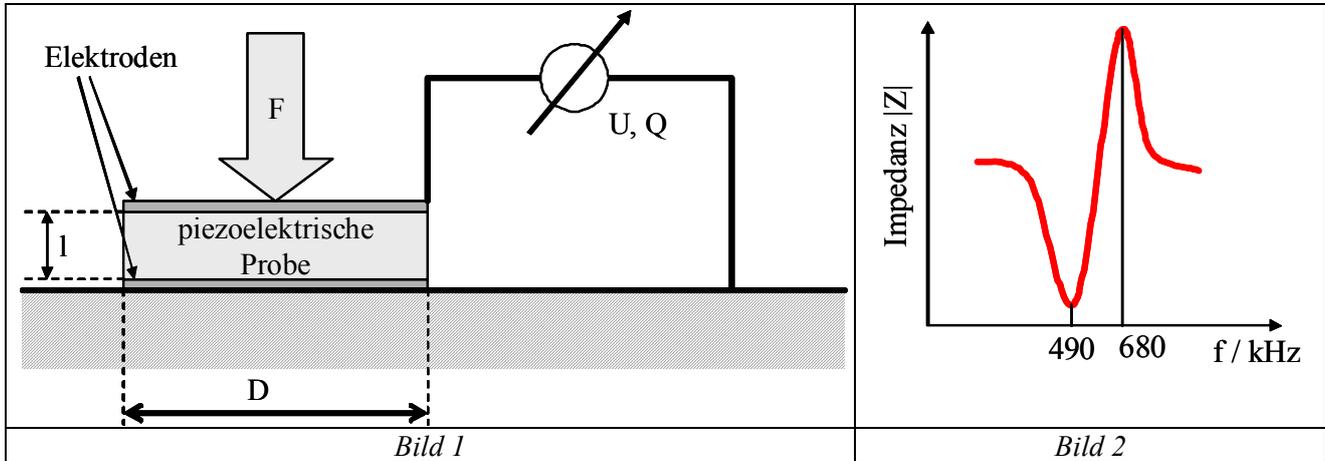


| | |
|--------------|-------------|
| Siehe Skizze | Punkte A2.d |
|--------------|-------------|

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

Rechenaufgabe A3: Piezoelektrizität

Die in Bild 1 dargestellte scheibenförmige piezoelektrische Probe mit den in der Tabelle angegebenen Geometriedaten werde mit einer axial angreifenden Kraft $F = 150 \text{ N}$ zweimal hintereinander belastet.



| | |
|-------------------------|--|
| Dicke | $l = 1,5 \text{ mm}$ |
| Durchmesser | $D = 1,2 \text{ cm}$ |
| | $\epsilon_r = 2000$ |
| | $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm}$ |
| Axial angreifende Kraft | $F = 150 \text{ N}$ |

a) Beim ersten Mal wird mit einem (idealen) Voltmeter eine Spannung $|U| = 27 \text{ V}$ zwischen den Elektroden gemessen. Beim zweiten Mal wird mit einem (idealen) Amperemeter die Ladung $|Q| = \int I dt = 6 \cdot 10^{-8} \text{ As}$, die auf die Elektroden fließt, ermittelt. Zusätzlich wird, ohne mechanische Belastung, die Impedanz in Abhängigkeit von der Frequenz (siehe Bild 2) gemessen.

Berechnen Sie die Materialkonstanten d , ϵ^T und k_{eff} . (3 Punkte)

$$D = d \cdot \sigma_M + e^T \cdot e_0 \cdot E$$

$$\text{Ladungsmessung: } E = 0 \text{ und } D = Q/A \Rightarrow d = \frac{D}{\sigma_M} = \frac{Q/A}{F/A} = \frac{Q}{F} = 4,0 \cdot 10^{-10} \frac{\text{C}}{\text{N}}$$

$$\text{Spannungsmessung: } D = 0 \text{ und } E = U/l \Rightarrow \epsilon^T = \frac{d \cdot \sigma_M}{\epsilon_0 \cdot E} = \frac{d \cdot (F/A)}{\epsilon_0 \cdot (U/l)} = 3330$$

$$k_{eff}^2 = \frac{f_P^2 - f_S^2}{f_P^2} = \frac{680^2 - 490^2}{680^2} = 0,475 \Rightarrow k_{eff} = 0,693$$

| | |
|---|-------------|
| $d = 4,0 \cdot 10^{-10} \frac{C}{N}$ $\varepsilon^T = 3330$ $k_{eff} = 0,693$ | Punkte A3.a |
|---|-------------|

Hinweis: Wenn Sie die Aufgabe nicht gelöst haben, rechnen Sie mit $d = 4,1 \cdot 10^{-10} \frac{C}{N}$, $\varepsilon^T = 3400$ und $k_{eff} = 0,7$ weiter

b) Berechnen Sie die Spannung U , die notwendig ist, um den unbelasteten Aktor um $\Delta l = 0,3 \mu m$ zu dehnen. **(1 Punkt)**

mit $\varepsilon_M = s^E \cdot \sigma_M + d \cdot E$ und $\sigma_M = 0$ folgt $E = \frac{\varepsilon_M}{d} = \frac{\Delta l}{l} \cdot \frac{1}{d} = \frac{0,3 \mu m}{1,5 mm \cdot 4 \cdot 10^{-10} C/N} = 500 \frac{kV}{m}$

$$U = E \cdot l = 750V$$

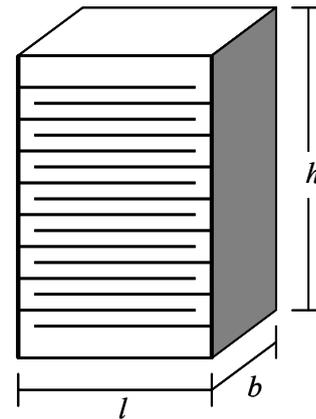
Mit angegebenen Werten : $U=731,7V$

| | |
|------------|-------------|
| $U = 750V$ | Punkte A3.b |
|------------|-------------|

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

Mit dem piezoelektrischen Werkstoff aus Teilaufgabe a) soll ein Vielschichtaktor zum Antrieb von Einspritzventilen für Dieselmotoren aufgebaut werden, der folgende Anforderungen erfüllen soll:

- maximale Betriebsspannung $U_{max} = 40 \text{ V}$
- maximale elektrische Feldstärke $E_{max} = 0,5 \text{ kV/mm}$
- Längenänderung $\Delta h = 10 \text{ }\mu\text{m}$
- $b = l = 5 \text{ mm}$



c) Wie viele Schichten sind dazu erforderlich? Welche minimale Höhe h_{min} ergibt sich für diesen Aktor? **(3 Punkte)**

Hinweis: Die Dicke der Elektroden soll im Folgenden vernachlässigt werden.

minimale Schichtdicke $d_{S,min}$:
$$d_{S,min} = \frac{U_{max}}{E_{max}} = 80 \mu\text{m}$$

Längenänderung pro Schicht Δh_S :
$$\Delta h_S = d \cdot E_{max} \cdot d_{S,min} = 0,016 \mu\text{m}$$

Anzahl der Schichten n :
$$n = \frac{\Delta h}{\Delta h_S} = 625$$

minimale Höhe des Aktors h_{min} :
$$h_{min} = n \cdot d_{S,min} = 50 \text{ mm}$$

| | |
|--|-------------|
| Anzahl der Schichten: $n = 625$ $h_{min} = 50 \text{ mm}$ | Punkte A3.c |
|--|-------------|

Hinweis: Wenn Sie die Aufgabe nicht gelöst haben, rechnen Sie mit $n = 600$ und $h_{min} = 60 \text{ mm}$ weiter

d) Mit welchem Strom I muss der Aktor angesteuert werden, wenn die geforderte Längenänderung in $t = 0,1$ ms erreicht werden soll? (2 Punkte)

Hinweis: Folgende Annahmen können gemacht werden:

- Elektrodenfläche = Grundfläche
- konstanter Strom

Kapazität der Anordnung: $C = n \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{b \cdot l}{d_{S,\min}} = 3,459 \mu F$

Ladung Q nach Anlegen der maximalen Spannung U_{\max} $Q = C \cdot U_{\max} = 0,138 mAs$

Strom I : $I = \frac{Q}{0,1ms} = 1,383 A$

| | |
|---------------|-------------|
| $I = 1,383 A$ | Punkte A3.d |
|---------------|-------------|

e) Um welchen Werkstoff könnte es sich bei der Probe aus Aufgabenteil a) handeln? (1 Punkt)

| | |
|--|-------------|
| PZT, Blei-Zirkonat-Titanat-Keramik, $Pb(Zr,Ti)O_3$ | Punkte A3.e |
|--|-------------|

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

A large grid of dashed lines for writing answers, consisting of 20 columns and 30 rows.

| |
|------------------|
| Erreichte Punkte |
|------------------|

A large grid of dashed lines, intended for drawing or calculation. The grid consists of 20 columns and 30 rows of squares.

Erreichte Punkte