



Name: _____

Abiturprüfung 2014

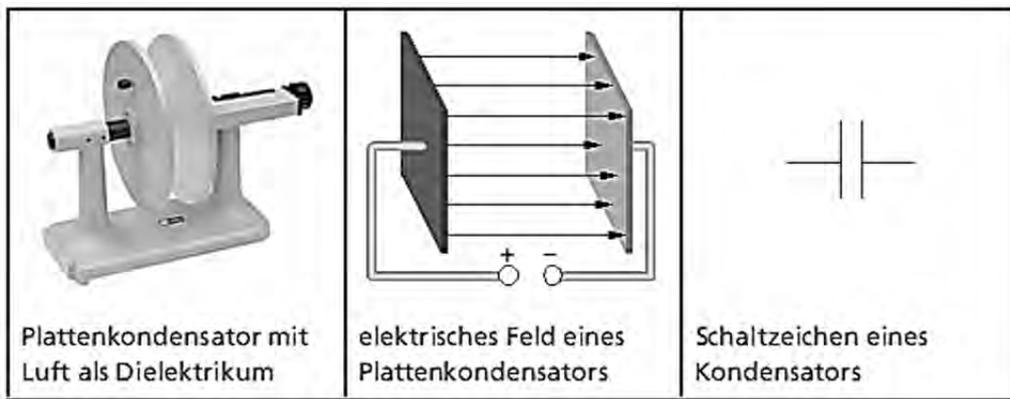
Physik, Grundkurs

Aufgabenstellung:

Aufgabe: Der Kondensator, seine Eigenschaften und Anwendungen

In einem Schülerlexikon der Physik findet sich sinngemäß folgende Umschreibung/Definition des Kondensators:

Ein Kondensator ist ein elektrisches Bauelement, mit dem elektrische Ladung und damit elektrische Energie gespeichert wird. Die einfachste Form eines Kondensators ist ein Plattenkondensator, der aus zwei sich gegenüberstehenden, voneinander isolierten Metallplatten besteht, zwischen denen sich Luft befindet. Wird zwischen diesen Metallplatten eine elektrische Spannung angelegt, dann sammeln sich auf ihren Oberflächen getrennt voneinander positive und negative Ladungen an. Zwischen den Platten baut sich ein elektrisches Feld auf, in dem Feldenergie gespeichert ist.



(angelehnt an DUDEN, Basiswissen Schule, Physik-Abitur, Paetec-Verlag, Berlin 2003)



Name: _____

Teilaufgabe 1

- a) Die zentrale Kenngröße eines Kondensators ist seine Kapazität C .
Geben Sie die formale Definition dieser physikalischen Größe sowie ihre Maßeinheit in den Grundeinheiten (m, kg, s, A) an.
- b) *Beschreiben Sie die Bedeutung der Eigenschaft „Kapazität eines Kondensators“ in anschaulichen Worten, so dass man diese Beschreibung dem obigen Text des Schülerlexikons hinzufügen könnte.*

(8 Punkte)

Teilaufgabe 2

- a) Ein ideal isolierter Plattenkondensator mit Plattenradius $r = 12 \text{ cm}$ und Plattenabstand $d = 5 \text{ mm}$ wird an eine Spannung von $U = 4000 \text{ V}$ angeschlossen. Zwischen den Platten befindet sich Luft.
Berechnen Sie die Kapazität dieses Kondensators sowie die Ladung auf den Platten nach dem Anschließen an die Spannungsquelle.
[Kontrollergebnis: $Q = 3,2 \cdot 10^{-7} \text{ As}$]
- b) Der obige aufgeladene Kondensator wird nun von der Spannungsquelle getrennt und anschließend der Plattenabstand auf $d = 20 \text{ mm}$ erhöht.
Bestimmen Sie die elektrische Spannung zwischen den Platten nach dem Auseinanderziehen unter der Voraussetzung, dass der Plattenkondensator ideal isoliert ist, und erklären Sie, warum bei realer Durchführung (nicht ideal isolierter Plattenkondensator) dieses Vorgangs meistens ein kleinerer Spannungswert als der berechnete gemessen wird.
- c) Bei einem weiteren Versuch bleibt der Kondensator aus Teilaufgabe 2a) an der Spannungsquelle angeschlossen, während seine Platten auseinandergezogen werden.
Stellen Sie eine begründete Vermutung über die Veränderung der Plattenladung nach dem Auseinanderziehen auf.

(16 Punkte)



Name: _____

Teilaufgabe 3

a) Ein Kondensator ist nicht nur ein Ladungs-, sondern auch ein Energiespeicher. Mit dem folgenden Experiment soll die in einem Kondensator der Kapazität $C = 75000 \mu\text{F}$ gespeicherte Energie abgeschätzt werden:

Ein großer Elektrolytkondensator mit der Kapazität $C = 75000 \mu\text{F}$ wird in Schalterposition (1) zunächst auf eine Spannung von $U_0 = 8 \text{ V}$ aufgeladen und dann nach dem Umschalten in Schalterposition (2) über ein Glühlämpchen entladen (siehe Abbildung 1). Das Glühlämpchen leuchtet, solange die anliegende Spannung $U > 4 \text{ V}$ ist. Bei einer anliegenden Spannung $U = 6 \text{ V}$ beträgt die Leistung des Glühlämpchens $P = 0,2 \text{ W}$. Nach Umlegen des Schalters leuchtet das Glühlämpchen mit abnehmender Helligkeit insgesamt $\Delta t = 8,5 \text{ s}$ lang.

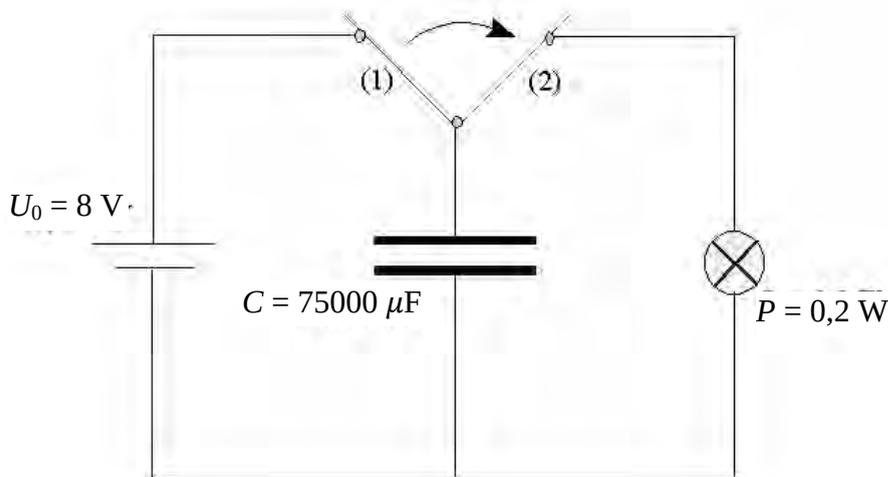


Abbildung 1: Experiment zur Abschätzung der in einem geladenen Kondensator gespeicherten Energie
Begründen Sie, dass die bis zum Zeitpunkt $t = 8,5 \text{ s}$ vom Kondensator an das Lämpchen abgegebene Energie in etwa dem Wert $\Delta E = P \cdot \Delta t \approx 0,2 \text{ W} \cdot 8,5 \text{ s} = 1,7 \text{ J}$ entspricht.

b) Zeigen Sie, dass der „exakte Wert“ der elektrischen Energie im Kondensator vor Beginn der Messung $E_{\text{Kond}} = 2,4 \text{ J}$ beträgt.

c) Begründen Sie die Differenz zwischen den Energiewerten aus 3a) und 3b).

(16 Punkte)



Name: _____

Teilaufgabe 4

- a) Seit einigen Jahren ist es technisch möglich, Kondensatoren mit extrem hoher Kapazität herzustellen, sogenannte „Supercaps“. Die Abbildung 2 zeigt den Prototyp eines Brennstoffzellenautos, in dem 90 in Reihe geschaltete Supercaps als Zwischenspeicher für elektrische Energie verwendet werden.

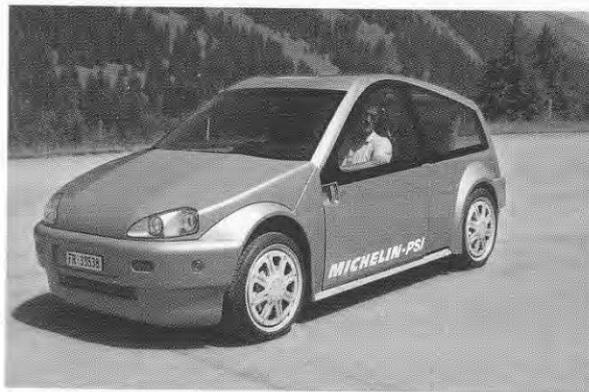


Abbildung 2: Brennstoffzellenauto mit Kondensatoreinheit
(Quelle: *Physik für Mittelschulen*, hep-Verlag, Bern 2010)

Die Kondensatoreinheit des Wagens hat eine Gesamtkapazität von $C_{\text{ges}} = 29 \text{ F}$ und im voll aufgeladenen Zustand liegt an dem Modul eine Spannung von $U = 225 \text{ V}$ an.

Bestimmen Sie die Kapazität C_{Sc} eines einzelnen Supercaps sowie die in der voll aufgeladenen Kondensatoreinheit gespeicherte Gesamtenergie E_{ges} .

[Kontrollergebnis: $E_{\text{ges}} = 734 \text{ kJ}$]

- b) Der Elektromotor des Fahrzeugs benötigt bei maximaler Beschleunigung eine elektrische Leistung von $P = 40 \text{ kW}$. Die Kondensatoreinheit trägt in diesen Situationen kurzfristig zur Bereitstellung der Energie an den Elektromotor bei.

Bestimmen Sie die Höchstdauer einer maximalen Beschleunigung unter der Annahme, dass das Modul voll aufgeladen ist und allein die Energie aufbringt.

(10 Punkte)



Name: _____

Zugelassene Hilfsmittel:

- Physikalische Formelsammlung
- Wissenschaftlicher Taschenrechner (ohne oder mit Grafikfähigkeit, auch mit CAS-Funktionalität)
- Wörterbuch zur deutschen Rechtschreibung

Unterlagen für die Lehrkraft

Abiturprüfung 2014

Physik, Grundkurs

1. Aufgabenart

Bearbeitung einer Aufgabe, die fachspezifisches Material enthält

2. Aufgabenstellung¹

Aufgabe: Der Kondensator, seine Eigenschaften und Anwendungen

(50 Punkte)

Hinweis: Kombinierbar entweder mit HT 3 oder HT 4

3. Materialgrundlage

- entfällt

4. Bezüge zu den Vorgaben 2014

1. *Inhaltliche Schwerpunkte*

- Ladungen und Felder
 - Elektrisches Feld, elektrische Feldstärke, Spannung

2. *Medien/Materialien*

- entfällt

5. Zugelassene Hilfsmittel

- Physikalische Formelsammlung
- Wissenschaftlicher Taschenrechner (ohne oder mit Grafikfähigkeit, auch mit CAS-Funktionalität)
- Wörterbuch zur deutschen Rechtschreibung

¹ Die Aufgabenstellung deckt inhaltlich alle drei Anforderungsbereiche ab.

6. Modelllösungen

Die jeweilige Modelllösung stellt eine mögliche Lösung bzw. Lösungsskizze dar. Der gewählte Lösungsansatz und -weg der Schülerinnen und Schüler muss nicht identisch mit dem der Modelllösung sein. Sachlich richtige Alternativen werden mit entsprechender Punktzahl bewertet (Bewertungsbogen: Zeile „Sachlich richtige Lösungsalternative zur Modelllösung“).

Sollte die Auswertung der Messdaten mit Hilfe eines grafikfähigen TR oder CAS erfolgen, so muss der Prüfling die entstandenen Graphen für die korrigierende Lehrkraft skizzenhaft in seiner Reinschrift dokumentieren.

Teilaufgabe 1

a) Liegt an einem Kondensator eine elektrische Spannung U an, so ist in ihm die elektrische Ladung Q gespeichert.

Seine Kapazität C ist dann definiert als der Quotient von Q und U .

$$C = \frac{Q}{U} \quad \left(= \frac{\text{gespeicherte Ladung}}{\text{anliegende Spannung}} \right)$$

Die Maßeinheit der Kapazität wird mit 1 Farad = 1 F bezeichnet und ergibt sich aus:

$$[Q] = 1 \text{ As} \quad \text{und} \quad [U] = 1 \text{ V} = 1 \frac{\text{kg m}^2}{\text{As}^3} \quad \text{zu:} \quad [C] = 1 \text{ F} = 1 \frac{\text{As}}{\text{V}} = 1 \frac{\text{A}^2 \text{s}^4}{\text{kg m}^2} .$$

b) Mögliche Umschreibung der Eigenschaft Kapazität:

Die Kapazität eines Kondensators gibt an, wie viel elektrische Ladung Q bei einer anliegenden Spannung U in ihm gespeichert werden kann. Sie ist ein Maß dafür, wie viel „Speicherplatz für Ladung“ in dem Kondensator vorhanden ist.

Hinweis für die korrigierende Lehrkraft:

Es handelt sich um ein Beispiel für die geforderte Umschreibung der Kapazität. Sinn-gemäße und fachlich korrekte Schülertexte sind genauso als richtig zu bewerten.

Teilaufgabe 2

a) Gegeben: $r = 12 \text{ cm} = 0,12 \text{ m}$, $d = 5 \text{ mm} = 0,005 \text{ m}$, $U = 4000 \text{ V}$, $\epsilon_r = 1$ (Luftkondensator).

Gesucht: Kapazität C des luftgefüllten Plattenkondensators und die darauf befindliche Ladung Q .

$$\text{Formeln: } C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d} \quad \text{und} \quad Q = C \cdot U$$

$$\text{Rechnung: } C = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}} \cdot \frac{\pi \cdot (0,12 \text{ m})^2}{0,005 \text{ m}} = 8,0 \cdot 10^{-11} \text{ F}, \text{ daraus ergibt sich}$$

$$Q = 8,0 \cdot 10^{-11} \text{ F} \cdot 4000 \text{ V} = 3,2 \cdot 10^{-7} \text{ As}.$$

b) Durch das Auseinanderziehen der Platten von $d = 5 \text{ mm}$ auf den vierfachen Wert $d = 20 \text{ mm}$ bei ansonsten unveränderten Eigenschaften des Plattenkondensators verringert sich die Kapazität des Plattenkondensators auf ein Viertel des Ausgangswertes.

Da für die Spannung $U = \frac{Q}{C}$ gilt, folgt, dass bei gleichbleibender Ladung (der Kondensator

wurde von der elektrischen Quelle zuvor getrennt) zwischen den Platten die vierfache Spannung, also $U = 4 \cdot 4000 \text{ V} = 16000 \text{ V}$ anliegt.

Bei einem Realexperiment ist es kaum möglich, die Platten des Kondensators auseinanderzuziehen, ohne dass dabei Ladung teilweise abfließt. Daher wird nach dem Auseinanderziehen in der Regel eine etwas geringere Spannung zwischen den Platten gemessen, als theoretisch berechnet wurde.

c) Wird der Kondensator vor dem Auseinanderziehen nicht von der elektrischen Quelle getrennt, wird die elektrische Spannung zwischen den Platten während des Auseinanderziehens durch die Quelle konstant gehalten. Nach $Q = C \cdot U$ wird die Ladung auf dem Kondensator dann geringer, da C kleiner wird. Die Ladung fließt beim Auseinanderziehen der Platten aus dem Kondensator in die elektrische Quelle zurück.

Teilaufgabe 3

- a) Gegeben: $U_0 = 8 \text{ V}$, Lämpchen leuchtet, solange $U > 4 \text{ V}$, Leistung des Lämpchens bei $U = 6 \text{ V}$ ist $P = 0,2 \text{ W}$, Brenndauer des Lämpchens $\Delta t = 8,5 \text{ s}$.

Die nach dem Umschalten im Lämpchen umgesetzte Energie entspricht näherungsweise der mittleren Leistung des Lämpchens multipliziert mit der Leuchtdauer $\Delta E = P \cdot \Delta t$.

Kurz nach dem Einschalten ist die anliegende Spannung zwar größer als die, bei der das Lämpchen seine mittlere Leistung besitzt, dafür ist gegen Ende der Leuchtdauer die anliegende Spannung und damit seine Leistung kleiner als beim Mittelwert. Im Mittel über der Leuchtdauer kann demnach grob davon ausgegangen werden, dass das Lämpchen für die Zeitdauer $\Delta t = 8,5 \text{ s}$ mit seiner mittleren Leistung von $P = 0,2 \text{ W}$ bei $U = 6 \text{ V}$ betrieben wird. Demnach ist die umgesetzte Energie näherungsweise:

$$\Delta E = P \cdot \Delta t \approx 0,2 \text{ W} \cdot 8,5 \text{ s} = 1,7 \text{ J}.$$

- b) Die vor Beginn dieser Messung im Kondensator gespeicherte Energie beträgt:

$$E_{\text{Kond}} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U_0^2 = \frac{1}{2} \cdot 0,075 \text{ F} \cdot (8,0 \text{ V})^2 = 2,4 \text{ J}.$$

- c) Die Differenz zwischen dem Energiegehalt aus 3a) und 3b) erklärt sich dadurch, dass sich beim Szenario von 3a) auch nach der Leuchtdauer des Lämpchens noch Energie im Kondensator befindet. Es liegt dann noch eine elektrische Spannung von $U \approx 4 \text{ V}$ an.

Teilaufgabe 4

a) Gegeben: $C_{\text{ges}} = 29 \text{ F}$ bestehend aus 90 in Reihe geschalteten identischen Supercap-Kondensatoren, anliegende Gesamtspannung: $U = 225 \text{ V}$.

Gesucht: Kapazität C_{Sc} eines einzelnen Supercap-Kondensators und die gespeicherte Gesamtenergie im Kondensatormodul.

$$\text{Formel für die Kondensator-Reihenschaltung: } \frac{1}{C_{\text{ges}}} = \frac{1}{C_{\text{Sc}}} + \frac{1}{C_{\text{Sc}}} + \dots + \frac{1}{C_{\text{Sc}}} = \frac{90}{C_{\text{Sc}}}$$

Daraus ergibt sich die Kapazität eines einzelnen Supercaps zu

$$C_{\text{Sc}} = 90 \cdot C_{\text{ges}} = 90 \cdot 29 \text{ F} = 2610 \text{ F}.$$

Die im Kondensatormodul gespeicherte Gesamtenergie ergibt sich zu

$$E_{\text{ges}} = \frac{1}{2} \cdot 29 \text{ F} \cdot (225 \text{ V})^2 = 7,34 \cdot 10^5 \text{ J}.$$

b) Gegeben: $P_{\text{Motor}} = 40 \text{ kW}$ Motorleistung bei maximaler Beschleunigung des Elektro-PKW.

Wird diese Motorleistung allein aus dem Kondensatormodul aufgebracht, so ist dies im

$$\text{Idealfall für insgesamt } \Delta t = \frac{E_{\text{ges}}}{P_{\text{Motor}}} = \frac{7,34 \cdot 10^5 \text{ J}}{40000 \text{ W}} = 18,4 \text{ s} \text{ möglich.}$$

7. Teilleistungen – Kriterien / Bewertungsbogen zur Prüfungsarbeit

Name des Prüflings: _____ Kursbezeichnung: _____

Schule: _____

Teilaufgabe 1

| | Anforderungen | Lösungsqualität | | | |
|--|--|-------------------------------|-----------------|----|----|
| | | maximal erreichbare Punktzahl | EK ² | ZK | DK |
| | Der Prüfling | | | | |
| a) | gibt die formale Definition der physikalischen Größe Kapazität und ihre Maßeinheit in Grundeinheiten an. | 4 | | | |
| b) | beschreibt die Bedeutung der Eigenschaft „Kapazität eines Kondensators“ in anschaulichen Worten, so dass man diese Beschreibung dem obigen Text des Schülerlexikons hinzufügen könnte. | 4 | | | |
| Sachlich richtige Lösungsalternative zur Modelllösung: (8) | | | | | |
| Summe Teilaufgabe 1 | | 8 | | | |

² EK = Erstkorrektur; ZK = Zweitkorrektur; DK = Drittkorrektur

Teilaufgabe 2

| Anforderungen | | Lösungsqualität | | | |
|---|---|-------------------------------|----|----|----|
| | | maximal erreichbare Punktzahl | EK | ZK | DK |
| | Der Prüfling | | | | |
| a1) | berechnet die Kapazität dieses Kondensators. | 3 | | | |
| a2) | berechnet die Ladung auf den Platten nach dem Anschließen an die Spannungsquelle. | 2 | | | |
| b1) | bestimmt die elektrische Spannung zwischen den Platten nach dem Auseinanderziehen unter der Voraussetzung, dass der Plattenkondensator ideal isoliert ist. | 3 | | | |
| b2) | erklärt, warum bei realer Durchführung dieses Vorgangs meistens ein kleinerer Spannungswert als der berechnete gemessen wird. | 3 | | | |
| c1) | stellt eine Vermutung über die Ladung der Platten nach dem Auseinanderziehen auf, unter der Voraussetzung, dass der Kondensator nicht von der Spannungsquelle getrennt wurde. | 2 | | | |
| c2) | begründet diese Vermutung. | 3 | | | |
| Sachlich richtige Lösungsalternative zur Modelllösung: (16) | | | | | |
| Summe Teilaufgabe 2 | | 16 | | | |

Teilaufgabe 3

| Anforderungen | | Lösungsqualität | | | |
|---|---|-------------------------------|----|----|----|
| | | maximal erreichbare Punktzahl | EK | ZK | DK |
| | Der Prüfling | | | | |
| a) | begründet, dass die nach $\Delta t = 8,5 \text{ s}$ vom Kondensator an das Lämpchen abgegebene Energie in etwa dem Wert $\Delta E = P \cdot \Delta t \approx 0,2 \text{ W} \cdot 8,5 \text{ s} = 1,7 \text{ J}$ entspricht. | 6 | | | |
| b) | zeigt, dass der exakte Wert der elektrischen Energie im Kondensator vor Beginn der Messung $E_{\text{Kond}} = 2,4 \text{ J}$ beträgt. | 5 | | | |
| c) | begründet die Differenz zwischen den Energiewerten aus 3a) und 3b). | 5 | | | |
| Sachlich richtige Lösungsalternative zur Modelllösung: (16) | | | | | |
| Summe Teilaufgabe 3 | | 16 | | | |

Teilaufgabe 4

| | Anforderungen | Lösungsqualität | | | |
|---|---|-------------------------------|----|----|----|
| | | maximal erreichbare Punktzahl | EK | ZK | DK |
| | Der Prüfling | | | | |
| a1) | bestimmt die Kapazität eines einzelnen Supercaps. | 3 | | | |
| a2) | bestimmt die in der voll aufgeladenen Kondensatoreinheit gespeicherte Gesamtenergie. | 2 | | | |
| b) | bestimmt die Höchstdauer einer maximalen Beschleunigungssituation unter der Annahme, dass das Modul voll aufgeladen ist und allein die Energie aufbringt. | 5 | | | |
| Sachlich richtige Lösungsalternative zur Modelllösung: (10) | | | | | |
| Summe Teilaufgabe 4 | | 10 | | | |

| | | | | |
|------------------------|-----------|--|--|--|
| Summe insgesamt | 50 | | | |
|------------------------|-----------|--|--|--|

Festlegung der Gesamtnote (Bitte nur bei der letzten bearbeiteten Aufgabe ausfüllen.)

| | Lösungsqualität | | | |
|---|-------------------------------|----|----|----|
| | maximal erreichbare Punktzahl | EK | ZK | DK |
| Übertrag der Punktsumme aus der ersten bearbeiteten Aufgabe | 50 | | | |
| Übertrag der Punktsumme aus der zweiten bearbeiteten Aufgabe | 50 | | | |
| Punktzahl der gesamten Prüfungsleistung | 100 | | | |
| aus der Punktsumme resultierende Note | | | | |
| Note ggf. unter Absenkung um ein bis zwei Notenpunkte gemäß § 13 Abs. 2 APO-GOST | | | | |
| Paraphe | | | | |

ggf. arithmetisches Mittel der Punktsummen aus EK und ZK: _____

ggf. arithmetisches Mittel der Notenurteile aus EK und ZK: _____

Die Klausur wird abschließend mit der Note: _____ (____ Punkte) bewertet.

Unterschrift, Datum:

Grundsätze für die Bewertung (Notenfindung)

Für die Zuordnung der Notenstufen zu den Punktzahlen ist folgende Tabelle zu verwenden:

| Note | Punkte | Erreichte Punktzahl |
|--------------------|---------------|----------------------------|
| sehr gut plus | 15 | 100 – 95 |
| sehr gut | 14 | 94 – 90 |
| sehr gut minus | 13 | 89 – 85 |
| gut plus | 12 | 84 – 80 |
| gut | 11 | 79 – 75 |
| gut minus | 10 | 74 – 70 |
| befriedigend plus | 9 | 69 – 65 |
| befriedigend | 8 | 64 – 60 |
| befriedigend minus | 7 | 59 – 55 |
| ausreichend plus | 6 | 54 – 50 |
| ausreichend | 5 | 49 – 45 |
| ausreichend minus | 4 | 44 – 39 |
| mangelhaft plus | 3 | 38 – 33 |
| mangelhaft | 2 | 32 – 27 |
| mangelhaft minus | 1 | 26 – 20 |
| ungenügend | 0 | 19 – 0 |



Name: _____

Abiturprüfung 2014

Physik, Grundkurs

Aufgabenstellung:

Aufgabe: Induktionseffekte beim Gleichstrom-Elektromotor bzw. -Generator

Gleichstrom-Elektromotoren werden in der Industrie oder in Fahrzeugen aller Art verwendet. Sie zeichnen sich meist durch gut regelbare Drehfrequenz, Laufruhe, kompakte Bauweise und extreme Robustheit aus. In der folgenden Aufgabe sollen einige physikalische Aspekte der Funktionsweise solcher Motoren untersucht werden.

Teilaufgabe 1: Prinzipielle Funktionsweise eines Gleichstrom-Elektromotors

Die Abbildung 1 zeigt einen Gleichstrom-Elektromotor in seiner einfachsten Form. Er besteht aus einem Permanentmagneten, in dessen Magnetfeld eine Spule bzw., wie hier abgebildet, sogar nur eine einzige Leiterschleife drehbar gelagert ist. Neben diversen mechanischen Halterungen sind zusätzlich nur noch die Stromzuführung und ein sogenannter Kommutator (= Stromwender) notwendig.

Kommutator, er besteht aus zwei gebogenen, elektrisch leitenden Halbschalen, die gegeneinander isoliert sind und auf einem zylinderförmigen und drehbar gelagerten Isolator befestigt sind. Die beiden Enden der Leiterschleife sind mit jeweils einer Halbschale leitend verbunden. Über die Schleifkontakte und die beiden Halbschalen ist die Leiterschleife an die Spannungsquelle angeschlossen.

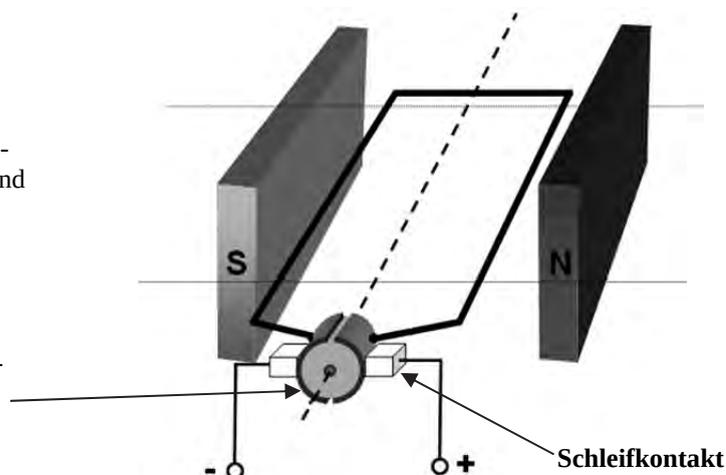


Abbildung 1: Prinzipieller Aufbau eines einfachen Gleichstrom-Elektromotors



Name: _____

- a) Ermitteln Sie die Drehrichtung der Leiterschleife in der in Abbildung 1 dargestellten Situation und begründen Sie Ihr Ergebnis.
- b) Erläutern Sie die Funktion bzw. die Notwendigkeit des Kommutators.

(9 Punkte)

Teilaufgabe 2: Der Elektromotor als Gleichspannungs-Generator

Jeder Gleichstrom-Elektromotor (mit permanentem Magnetfeld) kann auch als Gleichspannungs-**Generator** verwendet werden.

- a) Grundlegendes Funktionsprinzip von Generatoren ist die elektromagnetische Induktion, die stets auftritt, wenn ein Leiter durch ein Magnetfeld bewegt wird. In der Abbildung 2 ist die idealisierte Situation dargestellt, in der ein Leiter der Länge ℓ sich mit der (konstanten) Geschwindigkeit \vec{v} durch ein homogenes Magnetfeld der Stärke \vec{B} bewegt, dabei gilt stets $\vec{v} \perp \vec{B}$ und $\vec{\ell} \perp \vec{v}$.

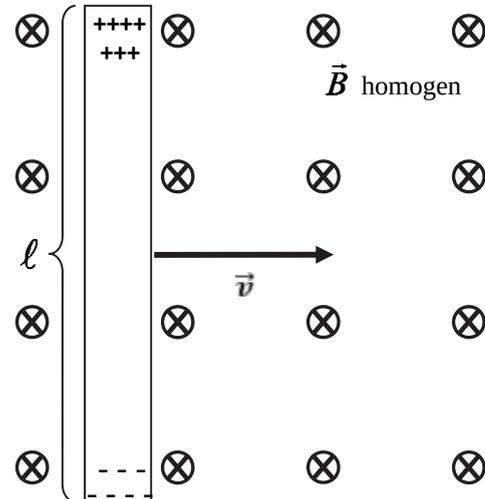


Abbildung 2: Bewegter Leiter im Magnetfeld

Erläutern Sie, wieso dabei eine Spannung U_{ind} zwischen den Enden des Leiters auftritt, und leiten Sie, unter Bezug auf Abbildung 2, die hier gültige Beziehung $U_{ind} = \ell \cdot v \cdot B$ her.



Name: _____

- b) Wird die Leiterschleife eines Generators, der dem in Abbildung 1 (siehe oben) skizzierten Aufbau entspricht, gleichförmig gedreht, so liefert ein solcher Generator eine Induktionsspannung, deren zeitlicher Verlauf durch den Betrag einer Sinusfunktion (siehe Abbildung 3) beschrieben werden kann.

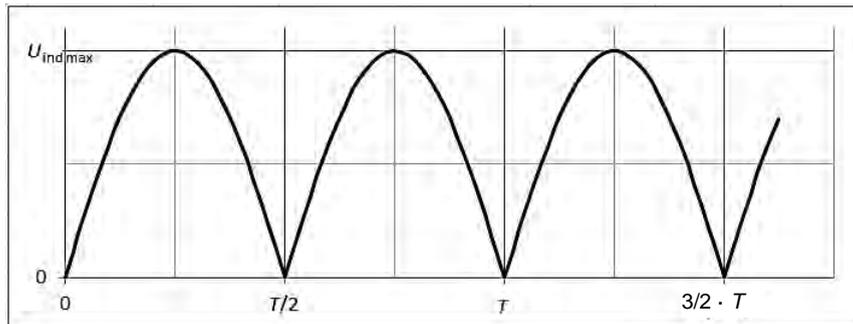


Abbildung 3: Zeitlicher Verlauf einer pulsierenden Induktionsspannung

Begründen Sie, warum sich gerade dieser zeitliche Verlauf der Induktionsspannung ergibt.

(15 Punkte)

Teilaufgabe 3: Ein technisch ausgereifter Gleichstrom-Generator (bzw. -Motor)

Bei technisch ausgereiften Generatoren (bzw. Motoren) wird nicht nur **eine** Leiterschleife verwendet, sondern eine räumlich ausgedehnte Spule mit vielen Windungen (siehe Abbildung 4). Bei dem hier untersuchten Generator (Motor) wird, wie in der Abbildung 4 dargestellt, durch weitere konstruktive Maßnahmen dafür gesorgt, dass die Stärke B des Permanentmagnetfeldes, durch welches sich die Leiterstücke bewegen müssen, im Bereich der beiden „Luftspalte“ (siehe Abbildung 4) dem Betrage nach möglichst überall gleich groß ist und die Feldlinien zudem stets senkrecht zur Bewegungsrichtung der Leiterabschnitte stehen. Außerhalb der beiden Luftspalte durchlaufen die Leiterstücke dagegen nahezu magnetfeldfreie Bereiche. Dies wird insbesondere durch die Form des im Zentrum feststehenden (also nicht rotierenden) Magneten sowie durch die eisenhaltige Umhüllung des Generators (Motors) erreicht (siehe Abbildung 4).



Name: _____

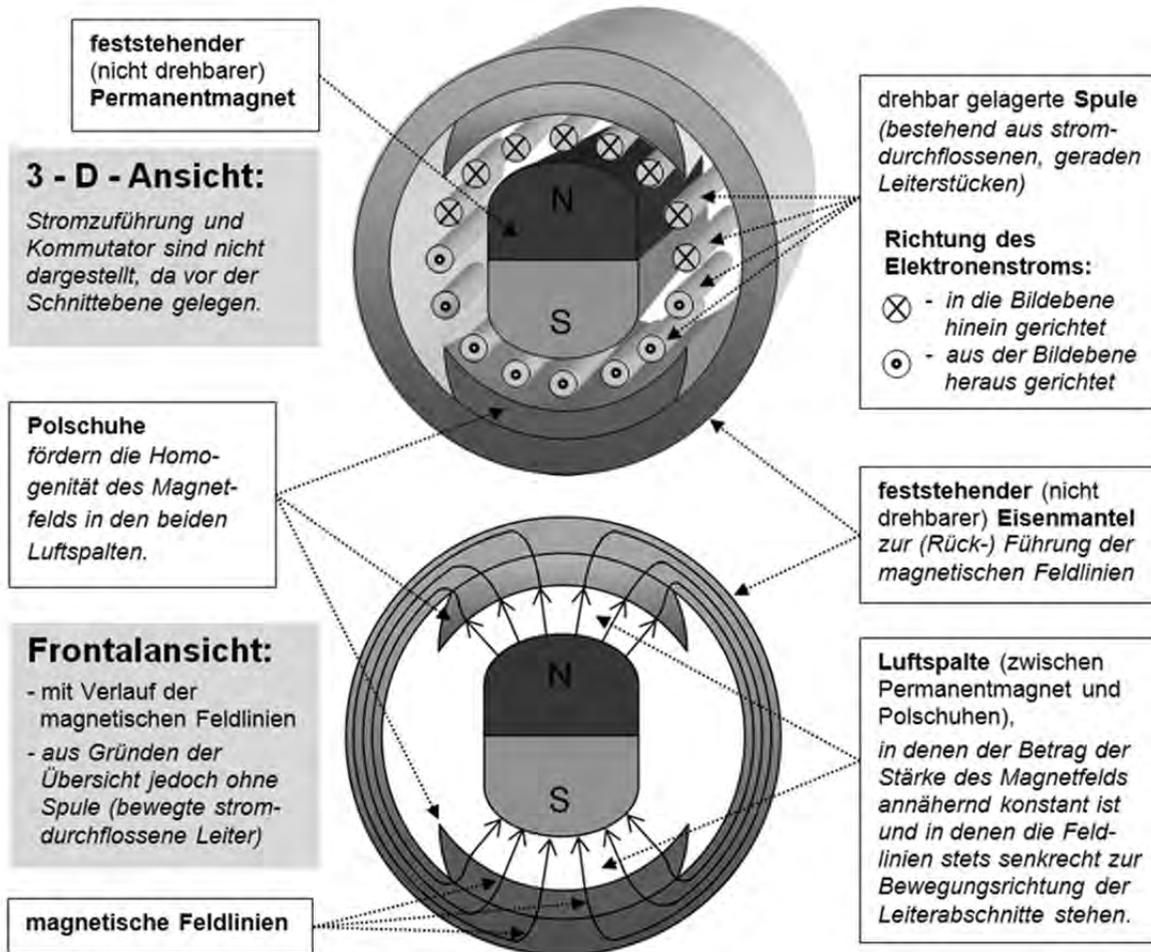


Abbildung 4: Schematisch dargestellter Schnitt durch einen technisch optimierten einfachen Gleichstrom-Generator (-Motor)

- a) Ein Generator, der dem in Abbildung 4 skizzierten Aufbau entspricht, liefert bei gleichförmiger Rotation der Spule, im Gegensatz zu dem einfachen Generator gemäß Abbildung 1, eine zeitlich nahezu konstante Gleichspannung.

Begründen Sie, möglichst unter Bezugnahme auf die Skizze in Abbildung 4 (bzw. unter Bezug auf den dieser Abbildung vorangestellten Text), warum die in der Spule induzierte Spannung (bei konstanter Drehfrequenz des Generators) nahezu konstant ist.



Name: _____

b) Die Spannung eines kleinen Generators, der dem in Abbildung 4 (siehe oben) skizzierten Aufbau entspricht, wurde in Abhängigkeit von der Drehfrequenz gemessen. Die Messwerte sind in der folgenden Tabelle wiedergegeben.

| | | | | | | | | | |
|-----------------------|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|
| f in s^{-1} | 0 | 10 | 20 | 30 | 35 | 40 | 50 | 60 | 70 |
| U_{ind} in V | 0 | 1,8 | 3,6 | 5,2 | 6,2 | 7,1 | 9,0 | 10,5 | 12,4 |

Tabelle: Gemessene Induktionsspannungen in Abhängigkeit von der Drehfrequenz

Bestätigen Sie durch grafische Auswertung der Messwerte, dass $U_{\text{ind}} \sim f$ gilt, und zeigen Sie, dass dieser als Generator betriebene Gleichstrom-Motor bei einer Drehfrequenz von $f = 1 s^{-1}$ eine (Induktions-)Spannung von ca. 0,177 V liefert.

(14 Punkte)

Teilaufgabe 4: Der belastete Gleichstrom-Elektromotor

Die in Teilaufgabe 3 vorgestellte „elektrische Maschine“ lässt sich nicht nur als Generator, sondern auch als (Gleichstrom-)Motor betreiben. In dieser Teilaufgabe soll ein beim Betrieb als Motor auftretendes Phänomen untersucht werden. Bei der Nutzung von Gleichstrom-Elektromotoren kann beobachtet werden, dass der durch einen solchen Motor fließende Strom, trotz konstanter Versorgungsspannung, immer dann anwächst, wenn sich die Drehfrequenz eines solchen Motors durch starke (Arbeits-)Belastung verringert. Dieser „automatische“ Stromanstieg bewirkt, dass der Motor, sobald er eine Arbeit zu verrichten hat, mehr Kraft, besser gesagt ein größeres Drehmoment, entwickelt. Somit wirkt ein solcher Motor (in gewissen Grenzen) einem belastungsbedingten Drehfrequenzabfall aus prinzipiellen physikalischen Gründen „automatisch“ entgegen. Dieses Phänomen soll im Folgenden teilweise erklärt werden.



Name: _____

- a) Wird der bereits in Teilaufgabe 3 betrachtete Gleichstrom-Generator nun mit einer Versorgungsspannung von $U = 12 \text{ V}$ als Motor betrieben, so erreicht dieser Motor, wenn er nicht durch eine von ihm zu verrichtende Arbeit gebremst/belastet wird, nach sehr kurzer Zeit seine (End-)Drehfrequenz f_{End} . Dabei fließt dann ein Strom der Stärke $I_0 = 0,017 \text{ A}$ durch den Motor. Wird der Motor dann belastet, so wird die Drehfrequenz kleiner und die Stromstärke wächst deutlich an. Wird der Motor bei (weiterhin) konstanter Betriebsspannung von $U = 12 \text{ V}$ sogar angehalten, fließt ein Strom der Stärke $I_{\text{max}} = 1,132 \text{ A}$.

Berechnen Sie den Ohm'schen Widerstand R der (unbewegten) Spule des Motors und ermitteln Sie, welche Spannung U_0 erforderlich ist, um einen Strom der Stärke $I_0 = 0,017 \text{ A}$ durch den Widerstand R (der Spule) fließen zu lassen.

- b) Sobald sich die Spule eines Generators (aber auch die eines Motors) dreht, entsteht eine Induktionsspannung.

Geben Sie die Induktionsspannung an, die der bereits in Teilaufgabe 3 betrachtete Generator/Motor liefert, wenn er mit einer Drehfrequenz von $f = 35 \text{ s}^{-1}$ betrieben wird.

- c) Berechnen Sie, unter Berücksichtigung des Phänomens der Induktion, die Stärke I_{Teillast} des Stroms, der durch die Spule des Motors fließt, wenn dieser Motor wieder mit einer äußeren Versorgungsspannung von $U = 12 \text{ V}$ betrieben wird und sich wegen einer von ihm zu verrichtenden Arbeit (nur) mit einer Drehfrequenz von $f = 35 \text{ s}^{-1}$ drehen kann.

Hinweis: Rechnen Sie mit einem Ohm'schen Widerstand der Spule von $R \approx 10,60 \Omega$ und dem in Teilaufgabe 3b) angegebenen (Tabellen-)Wert für die drehfrequenzabhängige Induktionsspannung.

(12 Punkte)

Zugelassene Hilfsmittel:

- Physikalische Formelsammlung
- Wissenschaftlicher Taschenrechner (ohne oder mit Grafikfähigkeit, auch mit CAS-Funktionalität)
- Wörterbuch zur deutschen Rechtschreibung

Unterlagen für die Lehrkraft

Abiturprüfung 2014

Physik, Grundkurs

1. Aufgabenart

Bearbeitung einer Aufgabe, die fachspezifisches Material enthält

2. Aufgabenstellung¹

| |
|--|
| Aufgabe: Induktionseffekte beim Gleichstrom-Elektromotor bzw. -Generator (50 Punkte) |
|--|

| |
|--|
| Hinweis: Kombinierbar entweder mit HT 3 oder HT 4 |
|--|

3. Materialgrundlage

Versuchsmaterial und -aufbau

Hinweis zum Experiment:

Vorgeführt wird nur ein kurzer qualitativer Versuch zum „belastungsabhängigen“ Anstieg der Stromstärke gemäß der Teilaufgabe 4a).

Versuchsaufbau

Benötigt werden:

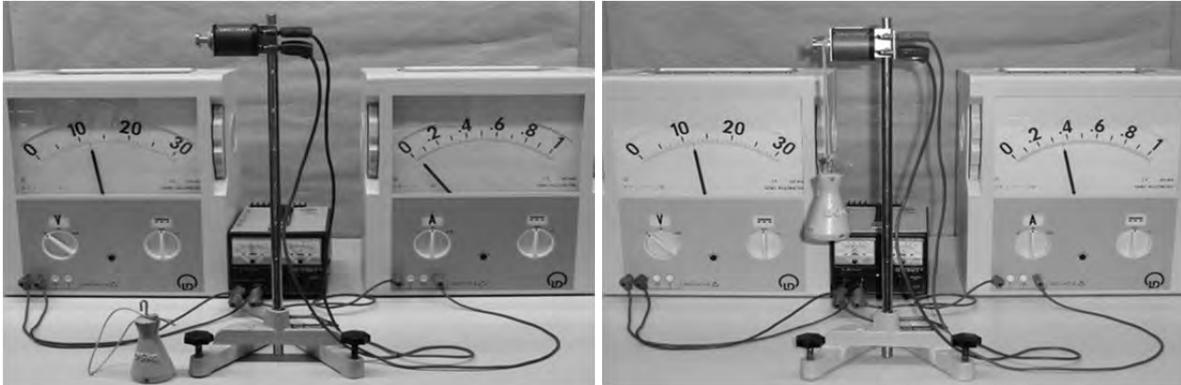
- 1 Gleichstrom-Elektromotor (mit nicht zu großem Drehmoment, da der Motor bei angelegter Betriebsspannung z. B. „von Hand“ gebremst werden soll)
Hier wurde der „STE Motor und Tachogenerator“ von Leybold Didactic (Bestellnummer 57943) verwendet.
- 1 passende Gleichspannungs-/Gleichstromquelle mit geregelter Ausgangsspannung, aber ohne Stromregelung (Strombegrenzung abschalten)
- 2 Demonstrations-Vielfachmessgeräte
- diverse Laborkabel und Stativmaterial
- eine „Bremseinrichtung“ zur Erzeugung eines konstanten mechanischen Widerstandes (Hier wurden ein Massestück sowie eine Schlaufe aus Paketkordel benutzt.)

¹ Die Aufgabenstellung deckt inhaltlich alle drei Anforderungsbereiche ab.

Aufbau

Der Aufbau erfolgt entsprechend den nachfolgenden Abbildungen.

Ein geschlossener Stromkreis aus regelbarer Gleichstromquelle, Amperemeter und Gleichstrommotor wird aufgebaut, die Spannung an der Quelle (= Betriebsspannung des Motors) kann mit einem Voltmeter gemessen werden.



Versuchsdurchführung

1. Die Lehrkraft erläutert den Aufbau.
2. Die Versorgungsspannung wird auf die Nennbetriebsspannung des Motors eingestellt, der Motor läuft ohne zusätzliche „Belastung“. Die gemessene Stromstärke ist „relativ klein“, durch Wahl eines geeigneten Messbereichs wird von der Lehrkraft gezeigt und verbalisiert, dass ein („kleiner“) Strom fließt.
3. Für die Stromstärkemessung wird nun ein Messbereich so gewählt, dass der Zeiger/die Anzeige sich deutlich im „unteren Bereich“ des gewählten Messbereichs befindet. Dies wird auch von der Lehrkraft so beschrieben.
4. Die Lehrkraft fordert die Prüflinge auf, die Messgeräte, insbesondere das Amperemeter, zu beobachten, wenn der Motor im Folgenden belastet wird bzw. die Belastung geändert wird. Es wird auch darauf hingewiesen, dass sich die Drehzahl bei Belastung („deutlich“) verringert (je nach Versuchsaufbau/Versuchsbedingungen nicht gut sichtbar).
5. Die Lehrkraft demonstriert, dass bei „Abbremsung“ des Motors/Reduzierung der Drehfrequenz des Motors (z. B. mit der Hand – siehe Sicherheitshinweise –) die Stromstärke stark zunimmt. Zudem wird demonstriert, dass bei „konstanter Belastung“ (Reduzierung der Drehfrequenz des Motors auf einen konstanten Wert unterhalb der „Leerlauf“-Drehzahl) die Stromstärke auf einem „konstant hohen Wert“ bleibt. Diese „konstante Belastung“ kann z. B. (wie in der oben stehenden Abbildung zu sehen ist) mit Hilfe eines „Reibbandes“ und eines Massestücks erfolgen, auch mit der Hand (siehe Sicherheitshinweise!) kann eine gleich bleibende Reduzierung der Drehfrequenz des Motors erfolgen.
6. Die Lehrkraft demonstriert, dass bei „Abbremsung“ des Motors bis zum Stillstand (z. B. mit der Hand – Sicherheitshinweise beachten!) die Stromstärke bis zu einem Maximalwert, welcher dann auch konstant bleibt, ansteigt.

Die Punkte 5 und 6 der Versuchsdurchführung werden jeweils zweimal wiederholt, also insgesamt dreimal vorgeführt.

Die Sicherheitsbestimmungen der RISU NRW sind zu beachten.

Zudem sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass bei Verwendung eines Motors, der nicht „problemlos mit der Hand“ angehalten werden kann, die Abbremsung des Motors auch **nicht** unter Verwendung von Handschuhen erfolgen darf. Es sind geeignete Bremsvorrichtungen (z. B. „Reibbänder“ und Massestücke gemäß der Abbildung oben) zu verwenden. Weite Kleidung oder lange Haare dürfen nicht in die Nähe der rotierenden Motorteile kommen. Zudem ist auf einen hinreichenden Sicherheitsabstand sowie auf die Möglichkeit zur Notabschaltung des Motors zu achten.

4. Bezüge zu den Vorgaben 2014**1. Inhaltliche Schwerpunkte**

- Ladungen und Felder
 - Elektrisches Feld, elektrische Feldstärke, Spannung (Feldkraft auf Ladungsträger im homogenen Feld)
 - Magnetisches Feld, magnetische Feldgröße B , Lorentzkraft (Stromwaage)
 - Bewegung von Ladungsträgern in elektrischen und magnetischen Feldern
- Elektromagnetismus
 - Elektromagnetische Induktion, Induktionsgesetz mit zeitlicher Veränderung von A und B

2. Medien/Materialien

- entfällt

5. Zugelassene Hilfsmittel

- Physikalische Formelsammlung
- Wissenschaftlicher Taschenrechner (ohne oder mit Grafikfähigkeit, auch mit CAS-Funktionalität)
- Wörterbuch zur deutschen Rechtschreibung

6. Modelllösungen

Die jeweilige Modelllösung stellt eine mögliche Lösung bzw. Lösungsskizze dar. Der gewählte Lösungsansatz und -weg der Schülerinnen und Schüler muss nicht identisch mit dem der Modelllösung sein. Sachlich richtige Alternativen werden mit entsprechender Punktzahl bewertet (Bewertungsbogen: Zeile „Sachlich richtige Lösungsalternative zur Modelllösung“).

Sollte die Auswertung der Messdaten mit Hilfe eines grafikfähigen TR oder CAS erfolgen, so muss der Prüfling die entstandenen Graphen für die korrigierende Lehrkraft skizzenhaft in seiner Reinschrift dokumentieren.

Teilaufgabe 1: Prinzipielle Funktionsweise eines Gleichstrom-Elektromotors

a) Da der Elektronenstrom vom Minuspol durch die Leiterschleife zum Pluspol fließt, ist der physikalische Strom im linken Teil der Leiterschleife in die Bildebene hinein (nach hinten) gerichtet. Gemäß der Drei-Finger-Regel der linken Hand ist die Kraft, die auf den im Magnetfeld verlaufenden linken Teil der Leiterschleife wirkt, also nach unten gerichtet. Im rechten Teil der Leiterschleife ist der Strom nach vorne, aus der Bildebene heraus gerichtet. Gemäß der Drei-Finger-Regel der linken Hand ist die Kraft, die auf diesen rechten Leiterabschnitt wirkt, also nach oben gerichtet. Beide Kräfte sind entgegengesetzt gerichtet und sie bewirken zusammen eine Drehung der Leiterschleife gegen den Uhrzeigersinn.

Hinweis für die korrigierende Lehrkraft:

Die Anwendung der Drei-Finger-Regel der rechten Hand ist gleichwertig.

Auch eine Argumentation mit dem Magnetfeld einer stromdurchflossenen Leiterschleife und dessen Anziehung/Abstoßung im „äußeren“ Magnetfeld ist gleichwertig.

b) Sobald sich die Leiterschleife, bezogen auf die in Abbildung 1 dargestellte Ausgangssituation, um 90° (gegen den Uhrzeigersinn) gedreht hat, bewirken die angreifenden Kräfte keine weitere Drehung mehr, da sie dann nicht nur in entgegengesetzte Richtungen wirken, sondern auch auf ein und derselben Geraden verlaufen. Aufgrund ihrer Trägheit wird die rotierende Leiterschleife die oben beschriebene „ 90° -Position“ jedoch überschreiten.

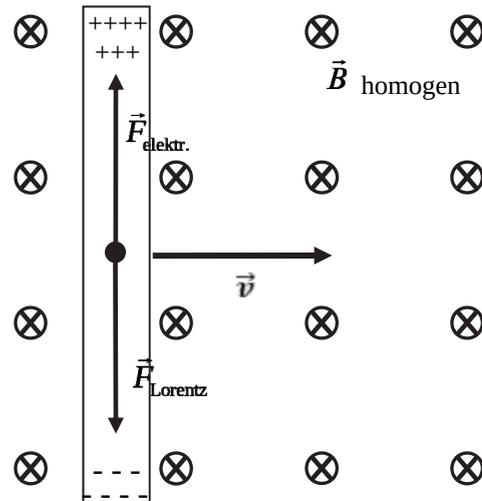
Damit die Drehung der Leiterschleife dann weiterhin mit gleichem Drehsinn erfolgen kann, müssen die Richtungen der in den Leiterabschnitten fließenden Ströme beim Überschreiten der „ 90° -Position“ umgekehrt werden, dies bewirkt der Kommutator.

Hinweis für die korrigierende Lehrkraft:

Das hier „umschriebene“ Konzept des Drehmoments wird nicht erwartet. Zudem sollte akzeptiert werden, wenn die Darstellung z. B. im Hinblick auf die Position der Leiterschleife beim „Umschalten der Stromrichtung“ durch den Kommutator weniger präzise ist.

Teilaufgabe 2: Der Elektromotor als Gleichspannungsgenerator

a) Der Leiter bewegt sich mit der konstanten Geschwindigkeit \vec{v} durch das (homogene) Magnetfeld der Stärke \vec{B} . Auf jedes mitbewegte Leitungselektron im Leiter wirkt die Lorentzkraft $\vec{F}_{\text{Lorentz}} = e \cdot \vec{v} \times \vec{B}$. Dadurch werden die Leitungselektronen im Leiter verschoben, es kommt also zu einer „Konzentration“ von Elektronen an einem Ende des Leiters und infolgedessen zu einem „Elektronenmangel“ am anderen Leiterende. Insgesamt entsteht ein elektrisches Feld und somit eine elektrische Spannung zwischen den beiden Leiterenden.



In diesem elektrischen Feld erfährt ein Leitungselektron (zusätzlich zur Lorentzkraft) die Kraft $\vec{F}_{\text{elektr.}} = e \cdot \vec{E}$, die der Lorentzkraft genau entgegengerichtet ist. Die oben beschriebene Verschiebung der Leitungselektronen und damit der Aufbau des \vec{E} -Feldes erfolgt so lange, bis die wachsende elektrische Kraft die Lorentzkraft gerade kompensiert, bis also $\vec{F}_{\text{elektr.}} = -\vec{F}_{\text{Lorentz}}$ gilt.

Mit $|\vec{F}_{\text{el}}| = e \cdot |\vec{E}|$, $|\vec{F}_{\text{Lorentz}}| = e \cdot |\vec{v} \times \vec{B}| = e \cdot v \cdot B \cdot \sin(\alpha)$ und $\vec{v} \perp \vec{B}$ folgt

$e \cdot E = e \cdot v \cdot B \cdot \sin(90^\circ) = e \cdot v \cdot B \cdot 1$ und mit $E = \frac{U_{\text{ind}}}{\ell}$ folgt nach Umformen und Vereinfachen die angegebene/gesuchte Beziehung $U_{\text{ind}} = \ell \cdot v \cdot B$.

Hinweise für die korrigierende Lehrkraft:

1. Akzeptiert wird auch jede gleichwertige alternative Lösung; so kann z. B. auch vom allgemeinen Induktionsgesetz ausgegangen werden.
2. Auch eine entsprechende nicht vektorielle Darstellung und auch eine Darstellung ohne Abbildung können gleichwertig sein.

b) Wird die Leiterschleife eines Generators (gemäß Abbildung 1) gleichförmig gedreht, so entsteht, wie bereits in Teilaufgabe 2a) gezeigt wurde, in den beiden geraden, zur Drehachse parallelen Leiterabschnitten jeweils eine Induktionsspannung $U_{\text{ind}} = \ell \cdot v \cdot B$.

Da die Stärke B des Magnetfeldes und die Leiterlängen ℓ konstant sind, hängt die Induktionsspannung nur von der Geschwindigkeit v ab, mit der sich der Leiter durch das Magnetfeld bewegt. Die hier relevante Geschwindigkeit v ist aber (nur/gerade) **die** Kom-

ponente der konstanten (Bahn-)Geschwindigkeit v_{Bahn} des Leiters, die genau senkrecht zum Magnetfeldvektor verläuft. Für diese Komponente v gilt: $v = v_{\text{Bahn}} \cdot \sin(\alpha)$, wobei α gerade der Winkel zwischen \vec{B} und \vec{v}_{Bahn} ist. Somit hat die Induktionsspannung $U_{\text{ind}} = \ell \cdot B \cdot v_{\text{Bahn}} \cdot \sin(\alpha(t))$ einen (zeitlich) sinusförmigen Verlauf, denn der Winkel α wächst (bei gleichförmiger Rotation der Leiterschleife) linear mit der Zeit an. Da durch den Kommutator nach jeder **halben** Umdrehung (also jeweils nach der Zeit $T/2$) die „Polung gewechselt“ wird, werden fortlaufend immer nur die sich stets wiederholenden „Halbwellen“ der sinusförmigen Spannung registriert.

Hinweis für die korrigierende Lehrkraft:

Akzeptiert wird auch jede gleichwertige alternative Lösung, so kann z. B. auch vom allgemeinen Induktionsgesetz ausgegangen werden, insbesondere können auch Teile des Lösungstextes durch eine (beschriftete Skizze) ersetzt werden.

Teilaufgabe 3: Ein technisch ausgereifter Gleichstrom-Generator (bzw. -Motor)

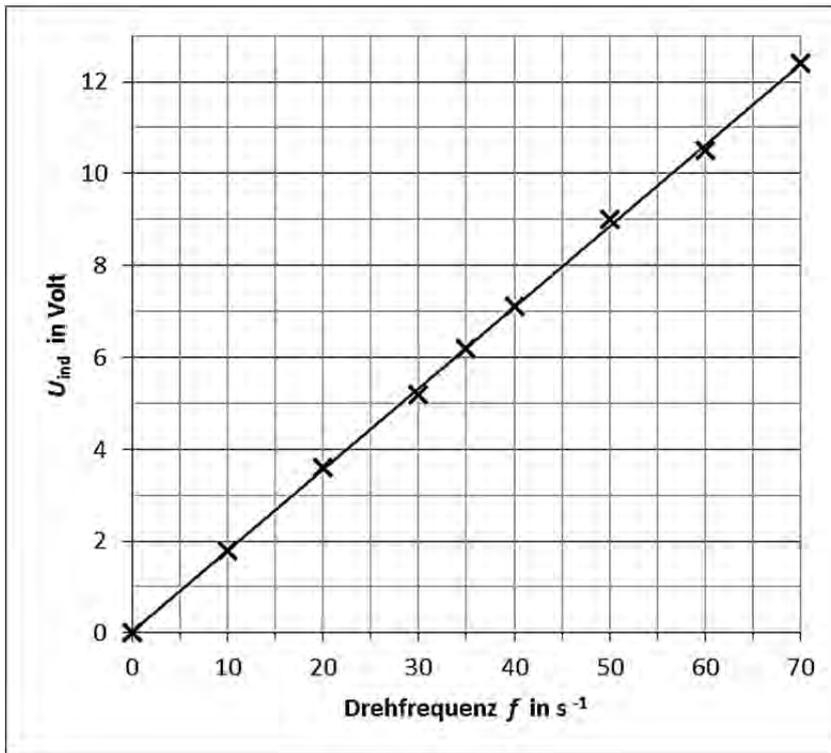
a) Aufgrund der in Abbildung 4 gezeigten Bauart des Generators/Motors bewegen sich alle (parallel zur Drehachse verlaufenden) Leiterstücke der Spule, welche sich gerade im Bereich einer der beiden „Luftspalte“ befinden, durch ein (räumlich scharf begrenztes) Magnetfeld mit betragsmäßig nahezu konstanter Stärke B . Zudem steht der Geschwindigkeitsvektor \vec{v} der Leiterstücke aufgrund der Form des Feldes stets senkrecht zu \vec{B} , es gilt also stets $\vec{v} \perp \vec{B}$. Somit kann die für bewegte Leiter im Magnetfeld gültige Beziehung $U_{\text{ind}} = \ell \cdot v \cdot B$ verwendet werden, um die Spannung zu ermitteln, die in einem (einzelnen) durch das B -Feld bewegten Leiterstück induziert wird. Da sich immer die gleiche Anzahl n von (in Reihe geschalteten) Leitern im Magnetfeld befindet (hier $n = 5$ im „oberen Luftspalt“ und $n = 5$ im „unteren Luftspalt“) und der Betrag von \vec{v} bei konstanter Drehfrequenz ebenfalls konstant ist, ergibt sich (gemäß

$U_{\text{ind}} = 2 \cdot n \cdot \ell \cdot v \cdot B$) eine konstante Induktionsspannung.

Hinweise für die korrigierende Lehrkraft:

1. Eine Lösung ohne explizite Nutzung des Vektorbegriffes und/oder ohne Angabe von Formeln kann durchaus gleichwertig sein.
2. Zu akzeptieren sind auch Skizzen oder Verweise auf (z. B.) Markierungen in Abbildung 4, um Teile des beschreibenden Textes zu „substituieren“.

b) Die Auftragung von U_{ind} gegen f ergibt:



Die Messwerte liegen (in sehr guter Näherung) alle auf einer Geraden, somit gilt:

$$U_{\text{ind}} \sim f.$$

Für den Proportionalitätsfaktor ergibt sich aus der grafischen Darstellung:

$$\frac{\Delta U_{\text{ind}}}{\Delta f} \approx \frac{12,4 \text{ V}}{70 \text{ s}^{-1}} \approx 0,177 \text{ V} \cdot \text{s}.$$

Somit liefert dieser als Generator betriebene Gleichstrom-Motor bei einer Drehfrequenz von $f = 1 \text{ s}^{-1}$ eine Induktionsspannung von $U_{\text{ind}} \approx 0,177 \text{ V}$.

Teilaufgabe 4: Der belastete Gleichstrom-Elektromotor

a) Ist der Motor blockiert, so fließt bei einer angelegten Spannung von $U = 12 \text{ V}$ ein Strom der Stärke $I_{\max} = 1,132 \text{ A}$ durch die Spule. Somit gilt:

$$R = \frac{12 \text{ V}}{1,132 \text{ A}} = 10,60 \Omega.$$

Um durch einen Widerstand von $R = 10,60 \Omega$ einen Strom der Stärke $I_0 = 0,017 \text{ A}$ fließen zu lassen, ist lediglich eine Spannung von $U_0 = R \cdot I_0 = 10,60 \Omega \cdot 0,017 \text{ A} = 0,180 \text{ V}$ erforderlich.

b) Aus der Aufgabenstellung zu Teilaufgabe 3 b) (bzw. aus den entsprechenden Darstellungen) folgt, dass bei einer Drehfrequenz von $f = 35 \text{ s}^{-1}$ in der Spule eine Spannung von $U_{\text{ind}} \approx 6,2 \text{ V}$ induziert wird.

c) Wenn der Motor mit einer Drehfrequenz von $f = 35 \text{ s}^{-1}$ läuft, wird in der drehbaren Spule eine Spannung von $U_{\text{ind}} = 0,177 \text{ V} \cdot \text{s} \cdot 35 \text{ s}^{-1} \approx 6,2 \text{ V}$ induziert. Da diese Induktionsspannung gemäß der Lenz'schen Regel der Betriebsspannung von $U = 12 \text{ V}$ entgegengerichtet ist, liegt am Widerstand $R = 10,60 \Omega$ nur noch eine Spannung von

$U_{\text{Rest}} \approx 12 \text{ V} - 6,2 \text{ V} = 5,8 \text{ V}$ an. Damit fließt ein Strom von

$$I_{\text{Teillast}} = \frac{U_{\text{Rest}}}{R} \approx \frac{5,8 \text{ V}}{10,60 \Omega} \approx 0,547 \text{ A}.$$

7. Teilleistungen – Kriterien / Bewertungsbogen zur Prüfungsarbeit

Name des Prüflings: _____ Kursbezeichnung: _____

Schule: _____

Teilaufgabe 1

| Anforderungen | | Lösungsqualität | | | |
|--|--|-------------------------------|-----------------|----|----|
| Der Prüfling | | maximal erreichbare Punktzahl | EK ² | ZK | DK |
| a) | ermittelt die Drehrichtung der Leiterschleife in der in Abbildung 1 dargestellten Situation und begründet sein Ergebnis. | 5 | | | |
| b) | erläutert die Funktion bzw. die Notwendigkeit eines Kommutators. | 4 | | | |
| Sachlich richtige Lösungsalternative zur Modelllösung: (9) | | | | | |
| Summe Teilaufgabe 1 | | 9 | | | |

Teilaufgabe 2

| Anforderungen | | Lösungsqualität | | | |
|---|---|-------------------------------|----|----|----|
| Der Prüfling | | maximal erreichbare Punktzahl | EK | ZK | DK |
| a1) | erläutert, wieso eine Spannung U_{ind} zwischen den Enden des Leiters auftritt. | 4 | | | |
| a2) | leitet (unter Bezug auf eine Skizze gemäß Abbildung 2) die hier gültige Beziehung $U_{ind} = \ell \cdot v \cdot B$ her. | 6 | | | |
| b) | begründet, warum sich gerade dieser zeitliche Verlauf der Induktionsspannung ergibt. | 5 | | | |
| Sachlich richtige Lösungsalternative zur Modelllösung: (15) | | | | | |
| Summe Teilaufgabe 2 | | 15 | | | |

² EK = Erstkorrektur; ZK = Zweitkorrektur; DK = Drittkorrektur

Teilaufgabe 3

| Anforderungen | | Lösungsqualität | | | |
|---|--|-------------------------------|----|----|----|
| Der Prüfling | | maximal erreichbare Punktzahl | EK | ZK | DK |
| a) | begründet, unter Bezugnahme auf die Skizze in Abbildung 4 (bzw. unter Bezug auf den dieser Abbildung vorangestellten Text), warum die in der Spule induzierte Spannung (bei konstanter Drehfrequenz des Generators) nahezu konstant ist. | 4 | | | |
| b1) | bestätigt durch grafische Auswertung der Messwerte, dass $U_{\text{ind}} \sim f$ gilt. | 6 | | | |
| b2) | zeigt, dass dieser als Generator betriebene Gleichstrom-Motor bei einer Drehfrequenz von $f = 1 \text{ s}^{-1}$ eine (Induktions-)Spannung von ca. 0,177 V liefert. | 4 | | | |
| Sachlich richtige Lösungsalternative zur Modelllösung: (14) | | | | | |
| Summe Teilaufgabe 3 | | 14 | | | |

Teilaufgabe 4

| Anforderungen | | Lösungsqualität | | | |
|---|---|-------------------------------|----|----|----|
| Der Prüfling | | maximal erreichbare Punktzahl | EK | ZK | DK |
| a1) | berechnet den Ohm'schen Widerstand R der Spule des Motors. | 3 | | | |
| a2) | ermittelt, welche Spannung U_0 erforderlich ist, um einen Strom der Stärke $I_0 = 0,017 \text{ A}$ durch den Widerstand R fließen zu lassen. | 2 | | | |
| b) | gibt die Induktionsspannung an, die der bereits in Teilaufgabe 3 betrachtete Generator (Motor) liefert, wenn er mit einer Drehfrequenz von $f = 35 \text{ s}^{-1}$ betrieben wird. | 2 | | | |
| c) | berechnet die Stärke I_{Teillast} des Stroms, der durch den Motor fließt, wenn dieser wieder mit $U = 12 \text{ V}$ und einer (belastungsbedingten) Drehfrequenz von $f = 35 \text{ s}^{-1}$ betrieben wird. | 5 | | | |
| Sachlich richtige Lösungsalternative zur Modelllösung: (12) | | | | | |
| Summe Teilaufgabe 4 | | 12 | | | |

| | | | | | |
|------------------------|--|-----------|--|--|--|
| Summe insgesamt | | 50 | | | |
|------------------------|--|-----------|--|--|--|

Festlegung der Gesamtnote (Bitte nur bei der letzten bearbeiteten Aufgabe ausfüllen.)

| | Lösungsqualität | | | |
|---|-------------------------------|----|----|----|
| | maximal erreichbare Punktzahl | EK | ZK | DK |
| Übertrag der Punktsumme aus der ersten bearbeiteten Aufgabe | 50 | | | |
| Übertrag der Punktsumme aus der zweiten bearbeiteten Aufgabe | 50 | | | |
| Punktzahl der gesamten Prüfungsleistung | 100 | | | |
| aus der Punktsumme resultierende Note | | | | |
| Note ggf. unter Absenkung um ein bis zwei Notenpunkte gemäß § 13 Abs. 2 APO-GOST | | | | |
| | | | | |
| Paraphe | | | | |

ggf. arithmetisches Mittel der Punktsummen aus EK und ZK: _____

ggf. arithmetisches Mittel der Notenurteile aus EK und ZK: _____

Die Klausur wird abschließend mit der Note: _____ (____ Punkte) bewertet.

Unterschrift, Datum:

Grundsätze für die Bewertung (Notenfindung)

Für die Zuordnung der Notenstufen zu den Punktzahlen ist folgende Tabelle zu verwenden:

| Note | Punkte | Erreichte Punktzahl |
|--------------------|---------------|----------------------------|
| sehr gut plus | 15 | 100 – 95 |
| sehr gut | 14 | 94 – 90 |
| sehr gut minus | 13 | 89 – 85 |
| gut plus | 12 | 84 – 80 |
| gut | 11 | 79 – 75 |
| gut minus | 10 | 74 – 70 |
| befriedigend plus | 9 | 69 – 65 |
| befriedigend | 8 | 64 – 60 |
| befriedigend minus | 7 | 59 – 55 |
| ausreichend plus | 6 | 54 – 50 |
| ausreichend | 5 | 49 – 45 |
| ausreichend minus | 4 | 44 – 39 |
| mangelhaft plus | 3 | 38 – 33 |
| mangelhaft | 2 | 32 – 27 |
| mangelhaft minus | 1 | 26 – 20 |
| ungenügend | 0 | 19 – 0 |



Name: _____

Abiturprüfung 2014

Physik, Grundkurs

Aufgabenstellung:

Aufgabe: Radioaktivität von Polonium-210

$^{210}_{84}\text{Po}$ ist ein α -Strahler mit einer Halbwertszeit von $T_{1/2} = 138,38 \text{ d}$. Es ist das am häufigsten von vielen in der Natur vorkommenden Isotopen des chemischen Elements Polonium.

Teilaufgabe 1: Das Isotop $^{210}_{84}\text{Po}$

a) Geben Sie die Kernumwandlungsgleichung des radioaktiven $^{210}_{84}\text{Po}$ an.

b) $^{210}_{84}\text{Po}$ kann beim radioaktiven Zerfall anderer Isotope entstehen.

Bestimmen Sie mit Hilfe des gegebenen Auszugs aus einer Nuklidkarte (siehe Abbildung 1) die drei (!) möglichen Nuklide und deren Zerfallsart, aus denen $^{210}_{84}\text{Po}$ durch radioaktiven α - oder β -Zerfall entstehen kann, und geben Sie die zugehörigen Kernumwandlungsgleichungen an.

| | | | | | |
|----|-------------------|-------------------------------|--------------------|-------------------|-----------------------------|
| 86 | Rn 210 2,4 h | Rn 211 14,6 h | Rn 212 24 m | Rn 213 25 ms | Rn 214 0,27 |
| 85 | At 209 5,4 h | At 210 8,3 h | At 211 7,22 h | At 212 314 ms | At 213 0,11 |
| 84 | Po 208 2,898 a | Po 209 102 a | Po 210 138,38 d | Po 211 0,516 s | Po 212 0,3 μs |
| 83 | Bi 207 31,55 a | Bi 208 3,68 $\cdot 10^6$ a | Bi 209 100 | Bi 210 5,013 d | Bi 211 2,17 m |
| 82 | Pb 206 24,1 | Pb 207 22,1 | Pb 208 52,4 | Pb 209 3,253 h | Pb 210 22,3 a |

Abbildung 1: Auszug aus einer Nuklidkarte (stabile Isotope sind schwarz unterlegt)



Name: _____

- c) ${}^{210}_{84}\text{Po}$ kann heute – auf künstlichem Wege in Kernreaktoren – durch Neutronenbeschuss des stabilen Isotops des chemischen Elements Wismut (Bi) hergestellt werden. Dabei entsteht zunächst ein radioaktives Wismut-Isotop, das dann durch β^- -Zerfall in ${}^{210}_{84}\text{Po}$ übergeht.

Geben Sie die Gleichung für diejenige Kernumwandlung an, bei der aus dem stabilen Bi-Isotop das radioaktive Bi-Isotop entsteht, das durch den β^- -Zerfall in ${}^{210}_{84}\text{Po}$ übergeht.

(13 Punkte)

Teilaufgabe 2: Die Energie der α -Teilchen des ${}^{210}_{84}\text{Po}$

Gegeben sind:

$$u = 1,66054 \cdot 10^{-27} \text{ kg}; m_{{}^{210}\text{Po}} = 209,982857 \text{ u}; m_{{}^{206}\text{Pb}} = 205,974449 \text{ u}; m_{\alpha} = 4,002603 \text{ u}.$$

- a) Bei Kernumwandlungen stellt man einen sogenannten Massendefekt (Massenverlust) Δm fest, der (nach der Einstein'schen Relativitätstheorie) gemäß der Gleichung $E = \Delta m \cdot c^2$ in Energie umgewandelt wird (c ist dabei die Lichtgeschwindigkeit).
Berechnen Sie die gesamte beim α -Zerfall eines ${}^{210}_{84}\text{Po}$ -Atoms frei werdende Energie in der Einheit J sowie in der Einheit MeV.

[Zur Kontrolle: $W_{\text{ges}} = 5,41 \text{ MeV}$.]

- b) In der Literatur wird für die kinetische Energie W_{α} der von ${}^{210}_{84}\text{Po}$ emittierten α -Teilchen der Wert $W_{\alpha} = 5,31 \text{ MeV}$ angegeben.

Begründen Sie qualitativ, warum der Energiewert der α -Teilchen $W_{\alpha} = 5,31 \text{ MeV}$ (etwas) kleiner ist als der in Teilaufgabe 2a) berechnete Gesamtenergiewert $W_{\text{ges}} = 5,41 \text{ MeV}$.

Hinweis: Gehen Sie davon aus, dass der Po-Kern vor dem Aussenden des α -Teilchens in Ruhe ist.

(9 Punkte)



Name: _____

Teilaufgabe 3: Polonium im menschlichen Körper

$^{210}_{84}\text{Po}$ ist eine stark radioaktiv-toxisch wirkende Substanz mit einer für den Menschen letalen, also zum Tode führenden Menge von $m_{\text{Po letal}} = 10^{-7} \text{ g}$.

a) Berechnen Sie die Anzahl N_{letal} der $^{210}_{84}\text{Po}$ -Atome in $m_{\text{Po letal}} = 10^{-7} \text{ g}$.

[Zur Kontrolle: $N_{\text{letal}} = 2,87 \cdot 10^{14}$]

b) Leiten Sie aus dem Zerfallsgesetz die allgemeine Beziehung $A(t) = \frac{\ln(2)}{T_{1/2}} \cdot N(t)$ zwischen der Aktivität $A(t)$ und der Teilchenzahl $N(t)$ her.

Berechnen Sie die Aktivität A_{letal} der tödlichen Menge $^{210}_{84}\text{Po}$.

[Zur Kontrolle: $A_{\text{letal}} \approx 1,66 \cdot 10^7 \text{ Bq}$]

c) In jedem Menschen kann $^{210}_{84}\text{Po}$ mit einer durchschnittlichen Aktivität $A_{^{210}_{84}\text{Po}} \approx 60 \text{ Bq}$ nachgewiesen werden.

Bestimmen Sie die durchschnittliche Anzahl der $^{210}_{84}\text{Po}$ -Atome im Menschen.

(15 Punkte)



Name: _____

Teilaufgabe 4: Die zweistufige Wismut-Polonium-Zerfallskette

Im Folgenden sei angenommen, dass für die Herstellung von $^{210}_{84}\text{Po}$ auf künstlichem Wege (siehe Teilaufgabe 1c)) anfangs 100 % der Atome ausschließlich des radioaktiven Bi-Mutternuklids vorliegen ($T_{1/2}(\text{Bi}) = 5,013 \text{ d}$). Abbildung 2 zeigt den zeitlichen Verlauf des prozentualen Anteils der daraus entstandenen Atome des Tochternuklids $^{210}_{84}\text{Po}$.

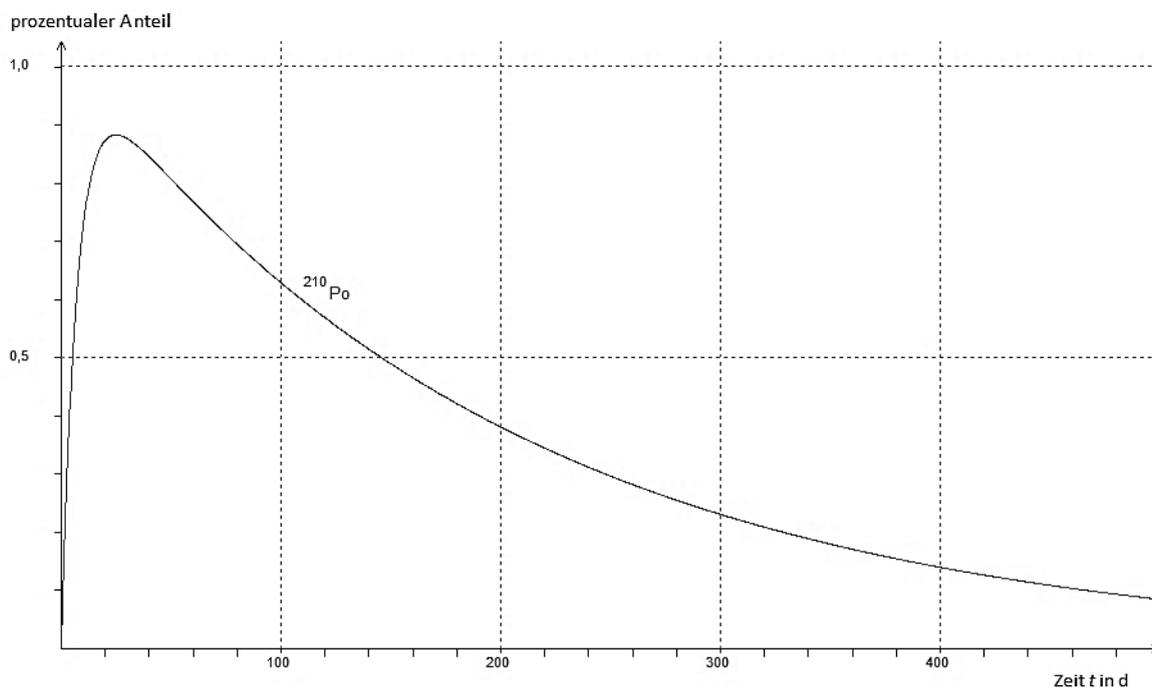


Abbildung 2: Zeitlicher Verlauf der Stoffmenge $^{210}_{84}\text{Po}$ (1,0 entspricht 100 %)

- Beschreiben und erläutern Sie das Diagramm unter Berücksichtigung der Halbwertszeiten $T_{1/2}(\text{Bi})$ und $T_{1/2}(\text{Po})$ von Mutter- bzw. Tochternuklid.
- Skizzieren Sie in Abbildung 2 den zeitlichen Verlauf des prozentualen Anteils an Atomen des Bi-Mutternuklids.
- Skizzieren Sie in Abbildung 2 den zeitlichen Verlauf des prozentualen Anteils an Atomen des stabilen Endprodukts, in welches das Polonium zerfällt.

[Kennzeichnen Sie die beiden von Ihnen in den Teilaufgaben 4b) und 4c) skizzierten Kurven eindeutig.]

(13 Punkte)



Name: _____

Zugelassene Hilfsmittel:

- Physikalische Formelsammlung
- Wissenschaftlicher Taschenrechner (ohne oder mit Grafikfähigkeit, auch mit CAS-Funktionalität)
- Wörterbuch zur deutschen Rechtschreibung

Unterlagen für die Lehrkraft

Abiturprüfung 2014

Physik, Grundkurs

1. Aufgabenart

Bearbeitung einer Aufgabe, die fachspezifisches Material enthält

2. Aufgabenstellung¹

Aufgabe: Radioaktivität von Polonium-210

(50 Punkte)

Hinweis: Kombinierbar entweder mit HT 1, HT 2 oder HT 4

3. Materialgrundlage

- entfällt

4. Bezüge zu den Vorgaben 2014

1. *Inhaltliche Schwerpunkte*

- Atom- und Kernphysik
 - Radioaktiver Zerfall
 - Bindungsenergie, Massendefekt

2. *Medien/Materialien*

- entfällt

5. Zugelassene Hilfsmittel

- Physikalische Formelsammlung
- Wissenschaftlicher Taschenrechner (ohne oder mit Grafikfähigkeit, auch mit CAS-Funktionalität)
- Wörterbuch zur deutschen Rechtschreibung

¹ Die Aufgabenstellung deckt inhaltlich alle drei Anforderungsbereiche ab.

6. Modelllösungen

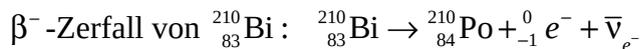
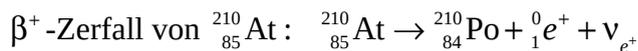
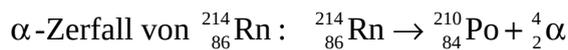
Die jeweilige Modelllösung stellt eine mögliche Lösung bzw. Lösungsskizze dar. Der gewählte Lösungsansatz und -weg der Schülerinnen und Schüler muss nicht identisch mit dem der Modelllösung sein. Sachlich richtige Alternativen werden mit entsprechender Punktzahl bewertet (Bewertungsbogen: Zeile „Sachlich richtige Lösungsalternative zur Modelllösung“).

Sollte die Auswertung der Messdaten mit Hilfe eines grafikfähigen TR oder CAS erfolgen, so muss der Prüfling die entstandenen Graphen für die korrigierende Lehrkraft skizzenhaft in seiner Reinschrift dokumentieren.

Teilaufgabe 1: Das Isotop ^{210}Po

a) Die Kernumwandlungsgleichung des radioaktiven $^{210}_{84}\text{Po}$ lautet: $^{210}_{84}\text{Po} \rightarrow ^{206}_{82}\text{Pb} + ^4_2\alpha$.

b) Die drei möglichen Nuklide sind:



Hinweis für die korrigierende Lehrkraft:

Die Neutrinos brauchen vom Prüfling nicht genannt zu werden. Im Unterricht verwendete abweichende Notationen sind selbstverständlich zugelassen.

c) $^{209}_{83}\text{Bi} + ^1_0n \rightarrow ^{210}_{83}\text{Bi}$.

Hinweis für die korrigierende Lehrkraft:

Wenn bei einer ansonsten falschen Umwandlungsgleichung eindeutig erkennbar ist, dass der Prüfling $^{210}_{83}\text{Bi}$ als Muttersubstanz zum $^{210}_{84}\text{Po}$ erkannt hat (Interpretation des β^- -Zerfalls), kann dies mit 1 Punkt bewertet werden.

Teilaufgabe 2: Die Energie der α -Teilchen des ${}^{210}_{84}\text{Po}$

- a) Für die gesamte frei werdende Energie W_{ges} gilt $W_{\text{ges}} = \Delta m \cdot c^2$, wobei Δm die Differenz zwischen den vor und nach der Umwandlung vorliegenden Massen bedeutet, also

$$\Delta m = (m_{210\text{Po}} - m_{206\text{Pb}} - m_{\alpha}).$$

Damit ergibt sich mit den Zahlenwerten:

$$W_{\text{ges}} = \Delta m \cdot c^2 = (m_{210\text{Po}} - m_{206\text{Pb}} - m_{\alpha}) \cdot c^2 =$$

$$(209,982857 - 205,974449 - 4,002603) \cdot 1,66054 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot (2,9979 \cdot 10^8)^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} =$$

$$0,005805 \cdot 1,66054 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot (2,9979 \cdot 10^8)^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} =$$

$$8,66335 \cdot 10^{-13} \text{ J} = 5,40783 \cdot 10^6 \text{ MeV}, \text{ also } W_{\text{ges}} \approx 8,66 \cdot 10^{-13} \text{ J bzw. } W_{\text{ges}} \approx 5,41 \cdot 10^6 \text{ MeV}.$$

- b) Es kann angenommen werden, dass der Po-Kern vor seinem Zerfall in Ruhe sei. Durch den Zerfall erhält er einen Rückstoß, sodass er dadurch dann eine nicht vollständig vernachlässigbare kinetische Energie besitzt, die dem Alpha-Teilchen folglich fehlt.

Teilaufgabe 3: Polonium im menschlichen Körper

- a) Berechnung der Anzahl der Atome N_{letal} in $m_{\text{Po letal}} = 10^{-7} \text{ g}$:

Mit den Angaben in Teilaufgabe 2a) ergibt sich für die Masse eines ${}^{210}_{84}\text{Po}$ -Atoms

$$m_{210\text{Po}} = 209,982857 \text{ u} = 209,982857 \cdot 1,66054 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \approx 3,49 \cdot 10^{-25} \text{ kg}.$$

$$\text{Es ist } m_{\text{Po letal}} = N_{\text{letal}} \cdot m_{210\text{Po}}, \text{ also } N_{\text{letal}} = \frac{m_{\text{Po letal}}}{m_{210\text{Po}}}.$$

Damit befinden sich in $m_{\text{Po letal}} = 10^{-7} \text{ g}$ insgesamt

$$N_{\text{letal}} = \frac{m_{\text{Po letal}}}{m_{210\text{Po}}} = \frac{10^{-7} \text{ g}}{3,49 \cdot 10^{-25} \text{ kg}} = \frac{10^{-10} \text{ kg}}{3,49 \cdot 10^{-25} \text{ kg}} = 2,87 \cdot 10^{14} \text{ Atome}.$$

Hinweis für die korrigierende Lehrkraft:

Ein Lösungsweg über Molgewicht (210 g) und Avogadrokonstante ist auch möglich.

b) Aktivitätsberechnung:

Herleitung des Zusammenhangs zwischen Aktivität, Anzahl der Atome und Halbwertszeit:

Allgemein ist $A(t) = -\dot{N}(t) = \lambda \cdot N_0 \cdot e^{-\lambda t} = \lambda \cdot N(t)$ mit $N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$.

Da $\lambda = \frac{\ln(2)}{T_{1/2}}$ ist, ergibt sich: $A(t) = \lambda \cdot N(t) = \frac{\ln(2)}{T_{1/2}} \cdot N(t)$.

Mit dem Ergebnis aus a) ergibt sich:

$$A_{\text{letal}} = \frac{\ln(2)}{T_{1/2}} \cdot N_{\text{letal}} = \frac{\ln(2)}{138,38 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 \text{ s}} \cdot 2,87 \cdot 10^{14} = 1,66 \cdot 10^7 \text{ Bq}.$$

c) Berechnung der im menschlichen Körper vorhandenen Anzahl von ${}^{210}_{84}\text{Po}$ -Atomen:

Mit den (Kontroll-)Ergebnissen aus a) und b) ergibt sich:

$$\frac{N_{\text{Mensch}}}{N_{\text{letal}}} = \frac{A_{\text{Mensch}}}{A_{\text{letal}}}, \text{ also } N_{\text{Mensch}} = \frac{A_{\text{Mensch}}}{A_{\text{letal}}} \cdot N_{\text{letal}}.$$

$$\text{Mit Zahlen: } N_{\text{Mensch}} = \frac{60 \text{ Bq}}{1,66 \cdot 10^7 \text{ Bq}} \cdot 2,87 \cdot 10^{14} = 1,04 \cdot 10^9 \approx 10^9.$$

Teilaufgabe 4: Die zweistufige Wismut-Polonium-Zerfallskette

a) Beschreibung:

Bei $t = 0$ liegt reines ${}^{210}\text{Bi}$ vor, es gibt noch keine Tochterkerne ${}^{210}\text{Po}$.

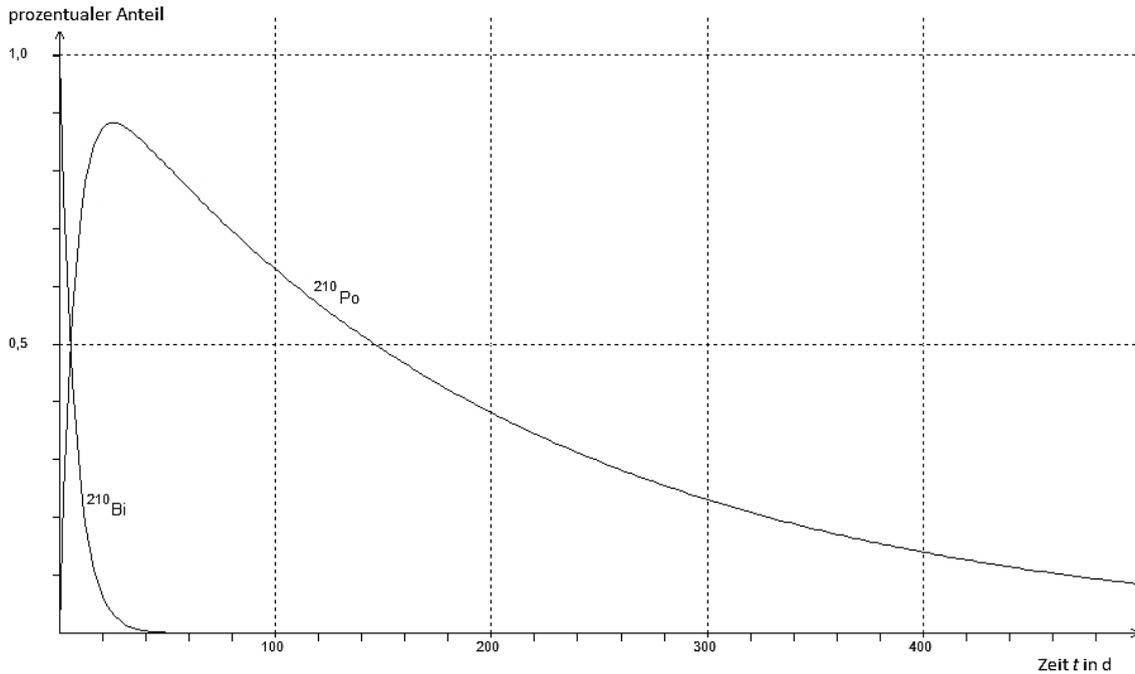
Für zunehmendes t nimmt ${}^{210}\text{Po}$ deutlich zu und erreicht zu einem bestimmten Zeitpunkt ein Maximum.

Für $t \rightarrow \infty$ sind alle ${}^{210}\text{Po}$ -Atome zerfallen.

Erläuterung:

Die Halbwertszeit von ${}^{210}\text{Bi}$ ist deutlich kleiner als die Halbwertszeit von ${}^{210}\text{Po}$. Daher entstehen zunächst deutlich schneller ${}^{210}\text{Po}$ -Atome, als diese wieder zerfallen. Wenn wegen der kurzen Halbwertszeit von ${}^{210}\text{Bi}$ sich praktisch alle ${}^{210}\text{Bi}$ -Kerne in ${}^{210}\text{Po}$ umgewandelt haben, nimmt die dann gebildete Menge an ${}^{210}\text{Po}$ -Atomen exponentiell ab.

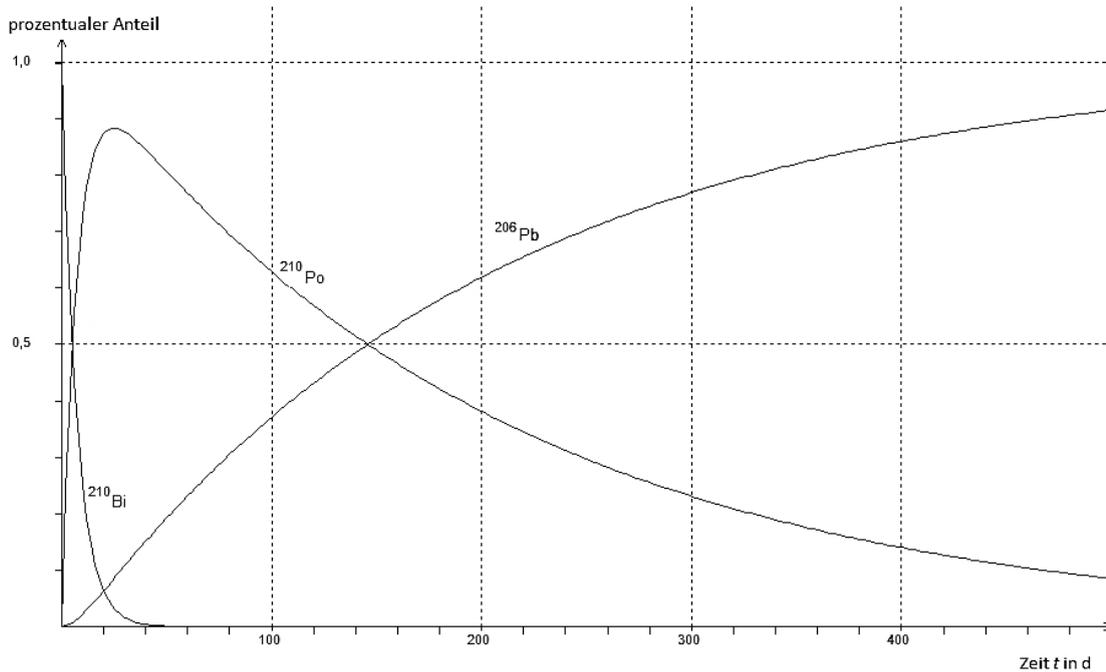
b) Skizze des Mutternuklids ^{210}Bi (nachfolgend exakt berechnet und in Abbildung 2 eingetragen):



Hinweis für die korrigierende Lehrkraft:

Es sollte erkennbar sein, dass die Bi-Kurve bei 1,0 beginnt und im Wesentlichen dann Null erreicht, wenn die Po-Kurve beginnt, einen exponentiellen Abfall zu zeigen, also etwa ab $t \approx 40$ d.

c) Skizze des stabilen Endprodukts ${}^{206}_{82}\text{Pb}$ (nachfolgend exakt berechnet und zusätzlich in Abbildung 2 eingetragen):



Hinweis für die korrigierende Lehrkraft:

Es sollte erkennbar sein, dass die Pb-Kurve bei 0 beginnt, monoton zunehmend verläuft und asymptotisch sich dem Grenzwert 1 nähert. Ferner sollte erkennbar sein, dass sich in der Summe aller drei Kurven 1 ergibt, und auch, dass für $t \gg T_{1/2}(\text{Bi})$ die Pb- und die Po-Kurven nahezu spiegelsymmetrisch zur 50 %-Linie verlaufen. Der in der Pb-Kurve vorhandene Wendepunkt wird (selbstverständlich) nicht erwartet.

7. Teilleistungen – Kriterien / Bewertungsbogen zur Prüfungsarbeit

Name des Prüflings: _____ Kursbezeichnung: _____

Schule: _____

Teilaufgabe 1

| | Anforderungen | Lösungsqualität | | | |
|---|---|-------------------------------|-----------------|----|----|
| | | maximal erreichbare Punktzahl | EK ² | ZK | DK |
| | Der Prüfling | | | | |
| a) | gibt die Kernumwandlungsgleichung des radioaktiven $^{210}_{84}\text{Po}$ an. | 1 | | | |
| b1) | bestimmt die drei möglichen Nuklide. | 3 | | | |
| b2) | bestimmt die zugehörige Zerfallsart. | 3 | | | |
| b3) | gibt die Kernumwandlungsgleichungen an. | 3 | | | |
| c) | gibt die Kernumwandlungsgleichung für das entstehende radioaktive Bi-Isotop an. | 3 | | | |
| Sachlich richtige Lösungsalternative zur Modelllösung: (13) | | | | | |
| | Summe Teilaufgabe 1 | 13 | | | |

Teilaufgabe 2

| | Anforderungen | Lösungsqualität | | | |
|--|---|-------------------------------|----|----|----|
| | | maximal erreichbare Punktzahl | EK | ZK | DK |
| | Der Prüfling | | | | |
| a) | berechnet die gesamte beim Zerfall eines Po-Atoms frei werdende Energie in J und in MeV. | 6 | | | |
| b) | begründet qualitativ, warum der Energiewert der α -Teilchen kleiner ist als der Gesamtenergiewert. | 3 | | | |
| Sachlich richtige Lösungsalternative zur Modelllösung: (9) | | | | | |
| | Summe Teilaufgabe 2 | 9 | | | |

² EK = Erstkorrektur; ZK = Zweitkorrektur; DK = Drittkorrektur

Teilaufgabe 3

| Anforderungen | | Lösungsqualität | | | |
|---|---|-------------------------------|----|----|----|
| Der Prüfling | | maximal erreichbare Punktzahl | EK | ZK | DK |
| a) | berechnet die Anzahl der Po-Atome. | 5 | | | |
| b1) | leitet die allgemeine Beziehung zwischen $A(t)$ und $N(t)$ her. | 4 | | | |
| b2) | berechnet die Aktivität der tödlichen Menge. | 2 | | | |
| c) | bestimmt die durchschnittliche Anzahl der Po-Atome im Menschen. | 4 | | | |
| Sachlich richtige Lösungsalternative zur Modelllösung: (15) | | | | | |
| Summe Teilaufgabe 3 | | 15 | | | |

Teilaufgabe 4

| Anforderungen | | Lösungsqualität | | | |
|---|---|-------------------------------|----|----|----|
| Der Prüfling | | maximal erreichbare Punktzahl | EK | ZK | DK |
| a1) | beschreibt das Diagramm. | 3 | | | |
| a2) | erläutert das Diagramm. | 4 | | | |
| b) | skizziert den zeitlichen Verlauf des prozentualen Anteils an Atomen des Bi-Mutternuklids. | 3 | | | |
| c) | skizziert den zeitlichen Verlauf des prozentualen Anteils an Atomen des stabilen Endprodukts. | 3 | | | |
| Sachlich richtige Lösungsalternative zur Modelllösung: (13) | | | | | |
| Summe Teilaufgabe 4 | | 13 | | | |

| | | | | | |
|------------------------|--|-----------|--|--|--|
| Summe insgesamt | | 50 | | | |
|------------------------|--|-----------|--|--|--|

Festlegung der Gesamtnote (Bitte nur bei der letzten bearbeiteten Aufgabe ausfüllen.)

| | Lösungsqualität | | | |
|---|-------------------------------|----|----|----|
| | maximal erreichbare Punktzahl | EK | ZK | DK |
| Übertrag der Punktsumme aus der ersten bearbeiteten Aufgabe | 50 | | | |
| Übertrag der Punktsumme aus der zweiten bearbeiteten Aufgabe | 50 | | | |
| Punktzahl der gesamten Prüfungsleistung | 100 | | | |
| aus der Punktsumme resultierende Note | | | | |
| Note ggf. unter Absenkung um ein bis zwei Notenpunkte gemäß § 13 Abs. 2 APO-GOST | | | | |
| | | | | |
| Paraphe | | | | |

ggf. arithmetisches Mittel der Punktsummen aus EK und ZK: _____

ggf. arithmetisches Mittel der Notenurteile aus EK und ZK: _____

Die Klausur wird abschließend mit der Note: _____ (____ Punkte) bewertet.

Unterschrift, Datum:

Grundsätze für die Bewertung (Notenfindung)

Für die Zuordnung der Notenstufen zu den Punktzahlen ist folgende Tabelle zu verwenden:

| Note | Punkte | Erreichte Punktzahl |
|--------------------|---------------|----------------------------|
| sehr gut plus | 15 | 100 – 95 |
| sehr gut | 14 | 94 – 90 |
| sehr gut minus | 13 | 89 – 85 |
| gut plus | 12 | 84 – 80 |
| gut | 11 | 79 – 75 |
| gut minus | 10 | 74 – 70 |
| befriedigend plus | 9 | 69 – 65 |
| befriedigend | 8 | 64 – 60 |
| befriedigend minus | 7 | 59 – 55 |
| ausreichend plus | 6 | 54 – 50 |
| ausreichend | 5 | 49 – 45 |
| ausreichend minus | 4 | 44 – 39 |
| mangelhaft plus | 3 | 38 – 33 |
| mangelhaft | 2 | 32 – 27 |
| mangelhaft minus | 1 | 26 – 20 |
| ungenügend | 0 | 19 – 0 |



Name: _____

Abiturprüfung 2014

Physik, Grundkurs

Aufgabenstellung:

Aufgabe: Experimente am Doppelspalt – Eigenschaften von Quantenobjekten

Das Doppelspaltexperiment gilt in der Quantenphysik als zentrales Experiment, um typische Eigenschaften der Quantenphysik zu verstehen und zu erarbeiten.

Teilaufgabe 1: Heliumatome am Doppelspalt

1991 wurden an der Universität Konstanz in einem Experiment Heliumatome auf einen Doppelspalt geschossen. Die Herstellung zweier ausreichend kleiner Spalte gelang mit Techniken aus der Halbleiterherstellung. Aus einer dünnen Goldfolie wurde ein Doppelspalt mit zwei Spalten im Abstand von $d = 8\mu\text{m}$ gefertigt, die Heliumatome hatten eine De-Broglie-Wellenlänge von $\lambda_{\text{He}} = 103\text{ pm}$, der Abstand e zwischen Doppelspalt und Schirm betrug $e = 0,64\text{ m}$. In der folgenden Übersicht sind die Daten noch einmal zusammengefasst:

| | |
|---|---------------------------------------|
| Spaltabstand: | $d = 8\mu\text{m}$ |
| Abstand Doppelspalt – Schirm: | $e = 0,64\text{ m}$ |
| De-Broglie-Wellenlänge der Heliumatome: | $\lambda_{\text{He}} = 103\text{ pm}$ |



Name: _____

- a) Die kinetische Energie der im Konstanzer Doppelspaltexperiment verwendeten Heliumatome ist genau so groß wie die kinetische Energie einfach positiv geladener Heliumionen He^+ , die eine Beschleunigungsspannung von $U_B = 19 \text{ mV}$ durchlaufen haben. Zeigen Sie (in nichtrelativistischer Rechnung), dass für die De-Broglie-Wellenlänge dieser einfach positiv geladenen Heliumionen He^+ gilt:

$$\lambda_{\text{He}^+} = \frac{h}{\sqrt{2 \cdot e \cdot m_{\text{He}^+} \cdot U_B}}$$

Die Masse der He^+ -Ionen beträgt $m_{\text{He}^+} = 6,7 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$.

Bestimmen Sie die De-Broglie-Wellenlänge der Heliumionen.

- b) Bei der Beugung von Quantenobjekten der Wellenlänge λ am Doppelspalt gilt für den Winkel α_n , unter dem man das Interferenzmaximum n -ter Ordnung beobachten kann:

$$d \cdot \sin(\alpha_n) = n \cdot \lambda$$

Begründen Sie diese Beziehung mit Hilfe des Huygens'schen Prinzips und einer geeigneten Skizze.

- c) Im Konstanzer Doppelspaltexperiment mit Heliumatomen lagen die Interferenzmaxima 1. Ordnung in einem Abstand von $8,4 \mu\text{m}$ vom Hauptmaximum auf dem Schirm. Berechnen Sie anhand der angegebenen Positionen der Interferenzmaxima 1. Ordnung die Wellenlänge der Heliumatome. Beurteilen Sie, inwieweit das Experiment die De-Broglie-Theorie für Heliumatome quantitativ bestätigt.

(31 Punkte)



Name: _____

Teilaufgabe 2: Elektronen am Doppelspalt

Im Jahr 1959 gelang es Claus Jönsson in Tübingen erstmalig, Doppelspaltexperimente mit Elektronen durchzuführen. Dabei wurde mit folgenden Werten gearbeitet:

| | |
|-----------------------------|-------------------------------|
| Spaltabstand: | $d = 2 \mu\text{m}$ |
| Abstand Doppelspalt-Schirm: | $e = 35 \text{ cm}$ |
| De-Broglie-Wellenlänge: | $\lambda_B = 5,35 \text{ pm}$ |

a) *Zeigen Sie rechnerisch, warum bei den oben gegebenen Daten zur visuellen Beobachtung eine Vergrößerung des Interferenzbildes notwendig ist.*

In der Originalarbeit von Jönsson, veröffentlicht in „Zeitschrift für Physik 161, S. 454 – 474 (1961)“, heißt es:

„Deshalb ist hier bei der Herstellung der Spalte nicht die Vereinfachung möglich, dass man sie auf einen durchsichtigen Träger präpariert, wie es in der Lichtoptik z. B. bei dem auf Glas geritzten Beugungsgitter der Fall ist, sondern man muss ein Verfahren finden, das einem erlaubt, materiefreie Spalte in Metallfolien herzustellen, deren Dimensionen [...] [hinreichend] klein sind [...]“.

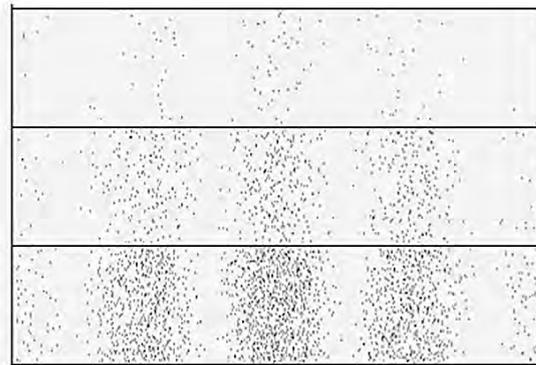
b) *Begründen Sie, warum bei der Durchführung des Doppelspaltexperiments mit Elektronen, anders als mit Photonen, materiefreie Spalte verwendet werden müssen.*

c) *Erläutern Sie, warum es für das Gelingen des Versuchs wichtig ist, dass die Elektronen eine möglichst einheitliche Energie besitzen.*



Name: _____

d) Die Abbildung zeigt die Ergebnisse einer Computersimulation des Durchgangs von Elektronen durch einen Doppelspalt zu solchen Zeitpunkten, zu denen 500, 3000 und 10000 Ereignisse auf dem Schirm registriert worden sind.



500 Treffer

3000 Treffer

10000 Treffer

Abbildung: Ergebnisse einer Computersimulation

Erläutern Sie mit Hilfe der Versuchsergebnisse in der Abbildung die folgende Aussage:

„Im Doppelspaltexperiment verhält sich das Elektron wie ein Teilchen und wie eine Welle.“

(19 Punkte)

Zugelassene Hilfsmittel:

- Physikalische Formelsammlung
- Wissenschaftlicher Taschenrechner (ohne oder mit Grafikfähigkeit, auch mit CAS-Funktionalität)
- Wörterbuch zur deutschen Rechtschreibung

Unterlagen für die Lehrkraft

Abiturprüfung 2014

Physik, Grundkurs

1. Aufgabenart

Bearbeitung einer Aufgabe, die fachspezifisches Material enthält

2. Aufgabenstellung¹

Aufgabe: Experimente am Doppelspalt – Eigenschaften von Quantenobjekten
(50 Punkte)

Hinweis: Kombinierbar entweder mit HT 1, HT 2 oder HT 3

3. Materialgrundlage

- entfällt

4. Bezüge zu den Vorgaben 2014

1. Inhaltliche Schwerpunkte

- Ladungen und Felder
 - Bewegung von Ladungsträgern in elektrischen und magnetischen Feldern
- Elektromagnetische Schwingungen und Wellen
 - Interferenz (Lichtbeugung am Doppelspalt, Wellenlängenmessung)
- Quanteneffekte
 - Wellenaspekt des Elektrons: De-Broglie-Theorie des Elektrons
 - Wellen- und Teilchenaspekt von Quantenobjekten: Grenzen der Anwendbarkeit klassischer Begriffe in der Quantenphysik (Doppelspaltversuch mit einzelnen Elektronen)

2. Medien/Materialien

- entfällt

5. Zugelassene Hilfsmittel

- Physikalische Formelsammlung
- Wissenschaftlicher Taschenrechner (ohne oder mit Grafikfähigkeit, auch mit CAS-Funktionalität)
- Wörterbuch zur deutschen Rechtschreibung

¹ Die Aufgabenstellung deckt inhaltlich alle drei Anforderungsbereiche ab.

6. Modellösungen

Die jeweilige Modelllösung stellt eine mögliche Lösung bzw. Lösungsskizze dar. Der gewählte Lösungsansatz und -weg der Schülerinnen und Schüler muss nicht identisch mit dem der Modelllösung sein. Sachlich richtige Alternativen werden mit entsprechender Punktzahl bewertet (Bewertungsbogen: Spalte „Sachlich richtige Lösungsalternative zur Modelllösung“).

Sollte die Auswertung der Messdaten mit Hilfe eines grafikfähigen TR oder CAS erfolgen, so muss der Prüfling die entstandenen Graphen für die korrigierende Lehrkraft skizzenhaft in seiner Reinschrift dokumentieren.

Teilaufgabe 1

Hinweis für die korrigierende Lehrkraft: Genauere Informationen zum Konstanzer Doppelspaltexperiment mit Heliumatomen in Phys. Bl. 47 (1991) Nr. 5.

a) Für die De-Broglie-Wellenlänge der Heliumionen gilt:

$$\lambda_{\text{He}^+} = \frac{h}{p_{\text{He}^+}} = \frac{h}{m_{\text{He}^+} \cdot v_{\text{He}^+}}.$$

Da die Heliumionen in einem elektrischen Feld beschleunigt werden, gilt für ihre kinetische Energie:

$$\frac{1}{2} \cdot m_{\text{He}^+} \cdot v_{\text{He}^+}^2 = e \cdot U_{\text{B}}$$

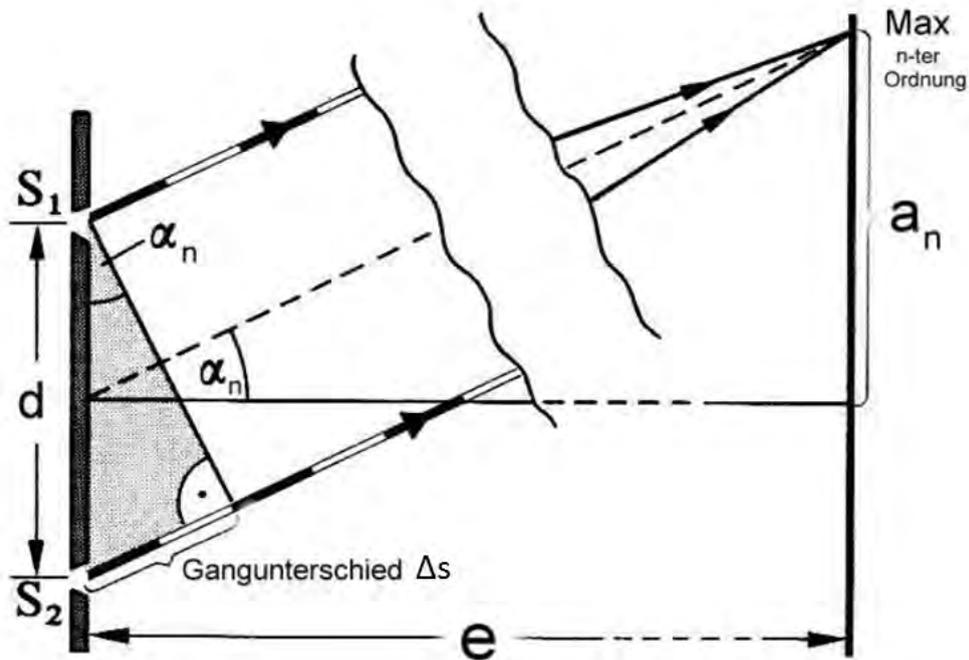
$$\text{also } v_{\text{He}^+} = \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot U_{\text{B}}}{m_{\text{He}^+}}}$$

$$\text{Einsetzen ergibt: } \lambda_{\text{He}^+} = \frac{h}{\sqrt{2 \cdot e \cdot m_{\text{He}^+} \cdot U_{\text{B}}}}.$$

Mit den konkret angegebenen Werten erhält man für die Wellenlänge

$$\lambda_{\text{He}^+} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}}{\sqrt{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 6,7 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot 0,019 \text{ V}}} = 103,8 \text{ pm}.$$

b) Nach dem Huygens'schen Prinzip ist jeder Punkt einer Wellenfront Ausgangspunkt einer Elementarwelle. Dies gilt auch an den Orten S_1 und S_2 der beiden Spalte, wo sich zwei Elementarwellen bilden. Beträgt der Gangunterschied Δs der Elementarwellen ein Vielfaches der Wellenlänge, so interferieren die Wellen konstruktiv und es entsteht ein Interferenzmaximum.



(Quelle: Dorn-Bader Physik, Oberstufe 12/13, Schroedel-Verlag 1986, geändert)

Anhand der Skizze (kleines Dreieck) erkennt man, dass für den Winkel α_n Folgendes gilt:

$$\sin(\alpha_n) = \frac{\Delta s}{d} = \frac{n \cdot \lambda}{d} \quad \text{und damit} \quad d \cdot \sin(\alpha_n) = n \cdot \lambda.$$

c) Anhand der Skizze (großes Dreieck) erkennt man:

$$\tan(\alpha_n) = \frac{a_n}{e}.$$

α_1 ist hinreichend klein (Kleinwinkelnäherung), da $a_1 = 8,4 \mu\text{m}$ und $e = 0,64 \text{m}$ sind.

Also gilt: $\sin(\alpha_1) \approx \tan(\alpha_1)$.

Damit ergibt sich:

$$\frac{a_1}{e} = \frac{\lambda}{d} \quad \text{also} \quad \lambda = \frac{d}{e} \cdot a_1.$$

Einsetzen der Werte ergibt: $\lambda_{\text{He}} = \frac{8 \mu\text{m}}{0,64 \text{m}} \cdot 8,4 \mu\text{m} = 105 \text{pm}.$

Mit $\frac{\lambda_{\text{He,exp}}}{\lambda_{\text{He,theo}}} = \frac{105 \text{pm}}{103 \text{pm}} = 101,9 \%$ bestätigt das Experiment die De-Broglie-Theorie für

Heliumatome nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ.

Teilaufgabe 2

a) Für den Abstand a_1 des Maximums erster Ordnung vom Hauptmaximum gilt:

$$a_1 = \frac{\lambda_e \cdot e}{d} = \frac{5,35 \cdot 10^{-12} \text{ m} \cdot 0,35 \text{ m}}{2 \cdot 10^{-6} \text{ m}} = 0,936 \cdot 10^{-6} \text{ m} \approx 1 \mu\text{m}.$$

Mit den Daten des Jönsson-Experiments folgt $a_1 \approx 1 \mu\text{m}$. Strukturen dieser Größenordnung können nicht mit dem bloßen Auge beobachtet werden.

b) Da Elektronen im Gegensatz zu Photonen aufgrund ihrer elektrischen Ladung mit Materie deutlich wechselwirken, ist es notwendig, die Spalte materiefrei herzustellen.

c) Verwendet man Elektronen mit „stark“ unterschiedlichen Energien, so führt man den Versuch mit Elektronen verschiedener Wellenlänge („nicht monochromatischen“ Elektronen) durch. Diese erzeugen Interferenzmaxima an unterschiedlichen Stellen auf dem Schirm (siehe Teilaufgabe a)), was die Beobachtung erschwert.

d) Einzelne Treffer deuten darauf hin, dass Elektronen sich wie Teilchen verhalten, trotzdem entspricht die Verteilung der Treffer auf dem Schirm nicht dem Verhalten klassischer Teilchen.

Das entstehende Interferenzmuster auf dem Schirm deutet darauf hin, dass sich Elektronen wie Wellen verhalten.

7. Teilleistungen – Kriterien / Bewertungsbogen zur Prüfungsarbeit

Name des Prüflings: _____ Kursbezeichnung: _____

Schule: _____

Teilaufgabe 1

| | Anforderungen | Lösungsqualität | | | |
|---|--|-------------------------------|-----------------|----|----|
| | | maximal erreichbare Punktzahl | EK ² | ZK | DK |
| | Der Prüfling | | | | |
| a1) | zeigt mit Hilfe der Formel für die De-Broglie-Wellenlänge und dem Energieansatz die Gültigkeit der Formel für die De-Broglie-Wellenlänge der Heliumionen. | 6 | | | |
| a2) | bestimmt den Wert. | 3 | | | |
| b1) | zeichnet eine geeignete Skizze und trägt die wesentlichen Bezeichnungen ein. | 5 | | | |
| b2) | nennt die wesentlichen Aussagen des Huygens'schen Prinzips und gibt an, bei welchen Gangunterschieden konstruktive Interferenz auftritt. | 6 | | | |
| b3) | gibt die Beziehung zwischen Spaltabstand, Winkel und Gangunterschied mit Hilfe trigonometrischer Beziehungen im rechtwinkligen Dreieck an. | 3 | | | |
| c1) | gibt die Beziehung zwischen Winkel, Abstand des Maximums erster Ordnung vom Hauptmaximum und Abstand Schirm – Doppelspalt mit Hilfe trigonometrischer Beziehungen im rechtwinkligen Dreieck an und berechnet mit Hilfe der in b) hergeleiteten Formel die Wellenlänge. | 5 | | | |
| c2) | beurteilt, inwieweit das Experiment die De-Broglie-Theorie für Heliumionen quantitativ bestätigt. | 3 | | | |
| Sachlich richtige Lösungsalternative zur Modelllösung: (31) | | | | | |
| | Summe Teilaufgabe 1 | 31 | | | |

² EK = Erstkorrektur; ZK = Zweitkorrektur; DK = Drittkorrektur

Teilaufgabe 2

| | Anforderungen | Lösungsqualität | | | |
|---|--|-------------------------------|----|----|----|
| | | maximal erreichbare Punktzahl | EK | ZK | DK |
| | Der Prüfling | | | | |
| a) | zeigt rechnerisch, warum bei den gegebenen Daten zur visuellen Beobachtung eine Vergrößerung des Interferenzbildes notwendig ist. | 6 | | | |
| b) | begründet, warum bei der Durchführung des Doppelspaltexperiments mit Elektronen, anders als mit Photonen, materiefreie Spalte verwendet werden müssen. | 3 | | | |
| c) | erläutert, warum es für das Gelingen des Versuchs wichtig ist, dass die Elektronen eine möglichst einheitliche Energie besitzen. | 4 | | | |
| d) | erläutert mit Hilfe der Versuchsergebnisse die Aussage. | 6 | | | |
| Sachlich richtige Lösungsalternative zur Modelllösung: (19) | | | | | |
| | Summe Teilaufgabe 2 | 19 | | | |

| | | | | | |
|--|------------------------|-----------|--|--|--|
| | Summe insgesamt | 50 | | | |
|--|------------------------|-----------|--|--|--|

Festlegung der Gesamtnote (Bitte nur bei der letzten bearbeiteten Aufgabe ausfüllen.)

| | Lösungsqualität | | | |
|---|-------------------------------|----|----|----|
| | maximal erreichbare Punktzahl | EK | ZK | DK |
| Übertrag der Punktsumme aus der ersten bearbeiteten Aufgabe | 50 | | | |
| Übertrag der Punktsumme aus der zweiten bearbeiteten Aufgabe | 50 | | | |
| Punktzahl der gesamten Prüfungsleistung | 100 | | | |
| aus der Punktsumme resultierende Note | | | | |
| Note ggf. unter Absenkung um ein bis zwei Notenpunkte gemäß § 13 Abs. 2 APO-GOST | | | | |
| | | | | |
| Paraphe | | | | |

ggf. arithmetisches Mittel der Punktsommen aus EK und ZK: _____

ggf. arithmetisches Mittel der Notenurteile aus EK und ZK: _____

Die Klausur wird abschließend mit der Note: _____ (____ Punkte) bewertet.

Unterschrift, Datum:

Grundsätze für die Bewertung (Notenfindung)

Für die Zuordnung der Notenstufen zu den Punktzahlen ist folgende Tabelle zu verwenden:

| Note | Punkte | Erreichte Punktzahl |
|--------------------|--------|---------------------|
| sehr gut plus | 15 | 100 – 95 |
| sehr gut | 14 | 94 – 90 |
| sehr gut minus | 13 | 89 – 85 |
| gut plus | 12 | 84 – 80 |
| gut | 11 | 79 – 75 |
| gut minus | 10 | 74 – 70 |
| befriedigend plus | 9 | 69 – 65 |
| befriedigend | 8 | 64 – 60 |
| befriedigend minus | 7 | 59 – 55 |
| ausreichend plus | 6 | 54 – 50 |
| ausreichend | 5 | 49 – 45 |
| ausreichend minus | 4 | 44 – 39 |
| mangelhaft plus | 3 | 38 – 33 |
| mangelhaft | 2 | 32 – 27 |
| mangelhaft minus | 1 | 26 – 20 |
| ungenügend | 0 | 19 – 0 |