



Name: \_\_\_\_\_

## Abiturprüfung 2014

### Physik, Leistungskurs

---

#### Aufgabenstellung:

#### Aufgabe: Wirbelstrombremse bei einer Luftkissenfahrbahn

In einem Experiment soll die Funktionsweise einer Wirbelstrombremse modellhaft dargestellt werden. Im ersten Teil bewegt sich ein Gleiter reibungsfrei auf einer Luftkissenbahn mit leichtem Gefälle **nach rechts** (siehe Abbildung 1). Auf dem Gleiter ist ein geschlossener Ring aus Aluminium zusammen mit einem Stück schwarzer Pappe montiert.

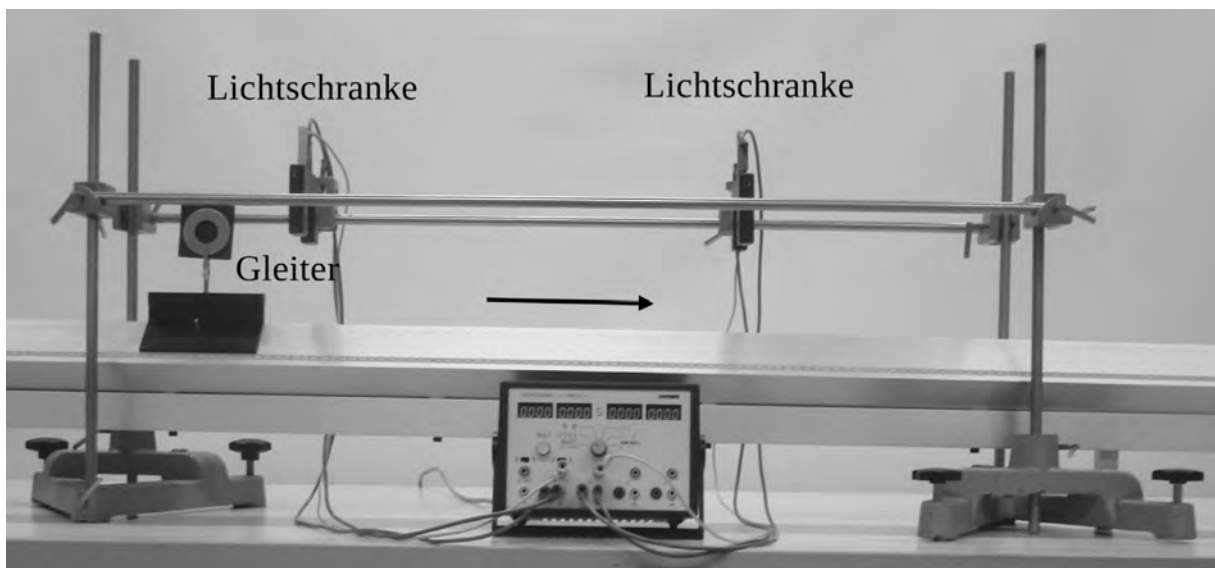


Abbildung 1: Gleiter mit aufgestecktem Ring auf der Luftkissenfahrbahn

Wenn der Gleiter nacheinander zunächst die linke und dann die rechte Lichtschranke passiert (siehe Abbildung 2), wird über ein angeschlossenes Zeitmessgerät jeweils die Zeit gemessen, in der die Pappe den Sensor der Lichtschranke verdunkelt. Diese Zeit wird im Folgenden als **Dunkelzeit** bezeichnet.



Name: \_\_\_\_\_

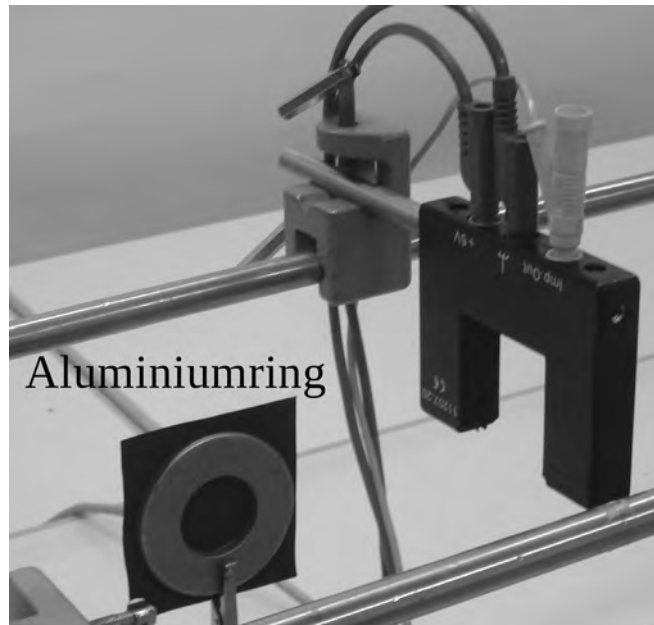


Abbildung 2: Aluminiumring mit Pappe auf dem Gleiter vor dem Passieren der linken Lichtschranke

Das Ergebnis der Zeitmessung ist in Abbildung 3 dargestellt. Die **erste** Dunkelzeit wurde mit der **linken**, die **zweite** Dunkelzeit mit der **rechten** Lichtschranke gemessen.

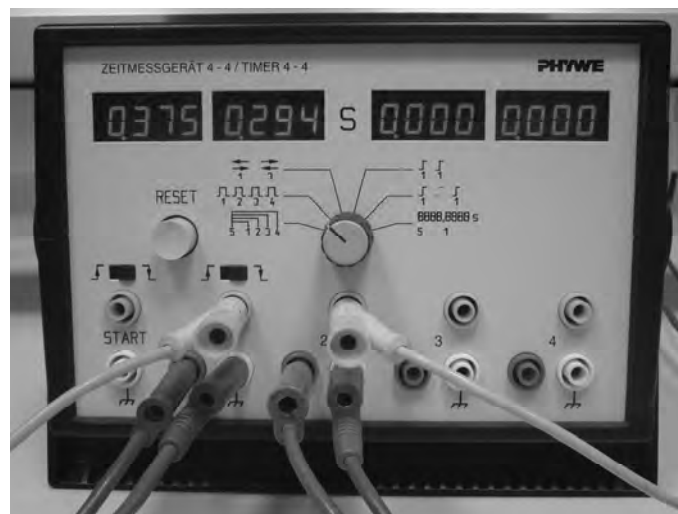


Abbildung 3: Dunkelzeiten



Name: \_\_\_\_\_

Im zweiten Teil des Experiments befinden sich zusätzlich zwei starke, zylinderförmige Magneten zwischen den beiden Lichtschranken, sodass der Ring nach der linken Lichtschranke zunächst den Spalt zwischen diesen Magneten und dann erst die rechte Lichtschranke passiert (siehe Abbildung 4).

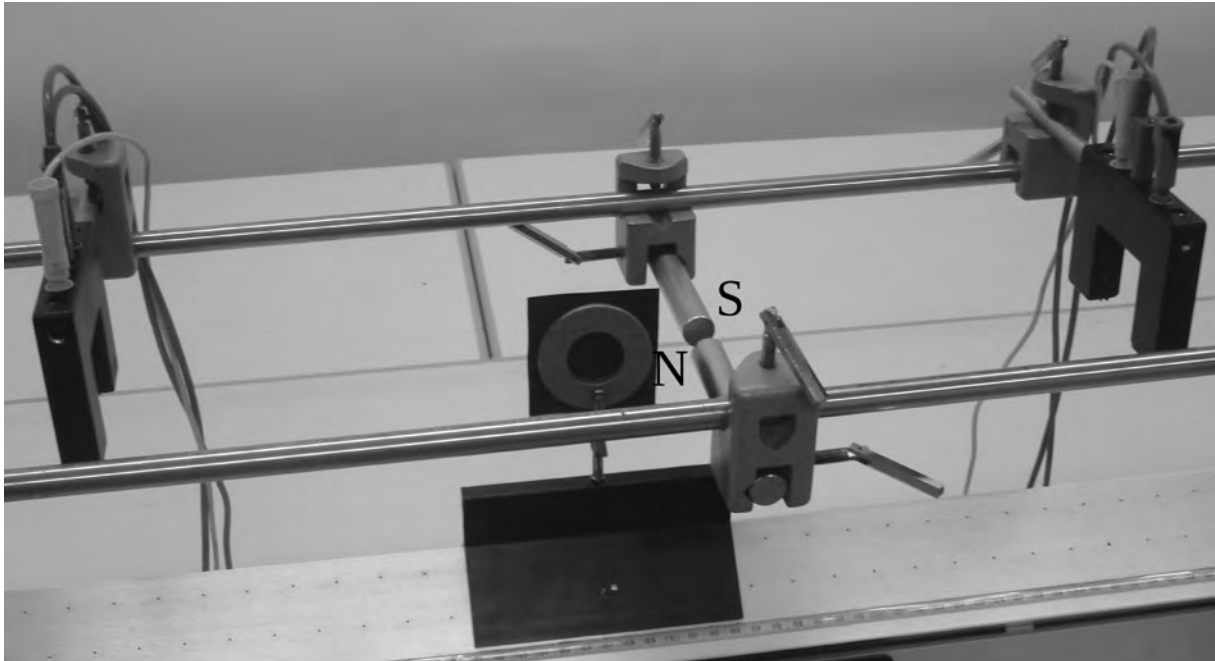


Abbildung 4: Gleiter vor dem Passieren des Spaltes mit Angabe der magnetischen Pole

Wiederum werden die beiden Dunkelzeiten gemessen. Das Ergebnis der zweiten Messung ist in Abbildung 5 dargestellt.

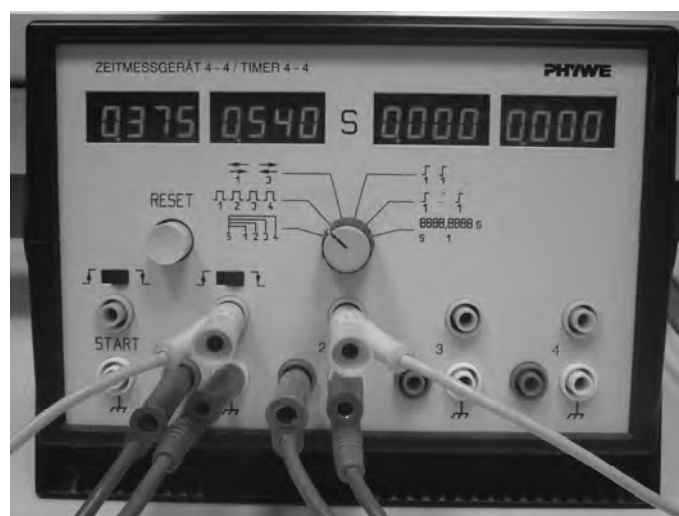


Abbildung 5: Dunkelzeiten der zweiten Messung



Name: \_\_\_\_\_

### Teilaufgabe 1

- a) *Erläutern Sie den qualitativen Unterschied zwischen den beiden Dunkelzeiten in Abbildung 3 bzw. den beiden Dunkelzeiten in Abbildung 5.*

Das Feld zwischen den beiden Magneten ist inhomogen und **nicht** nur auf den Bereich des kleinen Spaltes zwischen den Magneten beschränkt: In der Mitte des Spaltes ist es am stärksten und nimmt nach außen hin ab.

- b) *Begründen Sie mit Hilfe der Lorentzkraft in der linken und rechten Ringhälfte, dass sich entlang des gesamten Rings ein Elektronenstrom ausbildet, wenn sich der Gleiter an die Magnete annähert.*

*Ermitteln Sie mit Hilfe einer geeigneten Skizze die Stromrichtung bei Annäherung des Rings an die Magnete.*

**Hinweis:** In Abbildung 4 ist die Polung des Magnetfeldes vorgegeben.

- c) *Begründen Sie, dass es zu einer Umkehr der Stromrichtung kommt, wenn sich der Ring von den Magneten entfernt.*
- d) *Erläutern Sie anhand der Ringströme bei Annäherung und Entfernung und unter Berücksichtigung der beiden Ringhälften das in Abbildung 5 dargestellte Ergebnis.*

(24 Punkte)



Name: \_\_\_\_\_

## Teilaufgabe 2

Die Luftkissenfahrbahn wird **ohne Gefälle** justiert. Der geschlossene Ring wird durch einen **offenen** Ring ersetzt, an dessen Enden ein Spannungsmessgerät angeschlossen ist (siehe Abbildung 6).

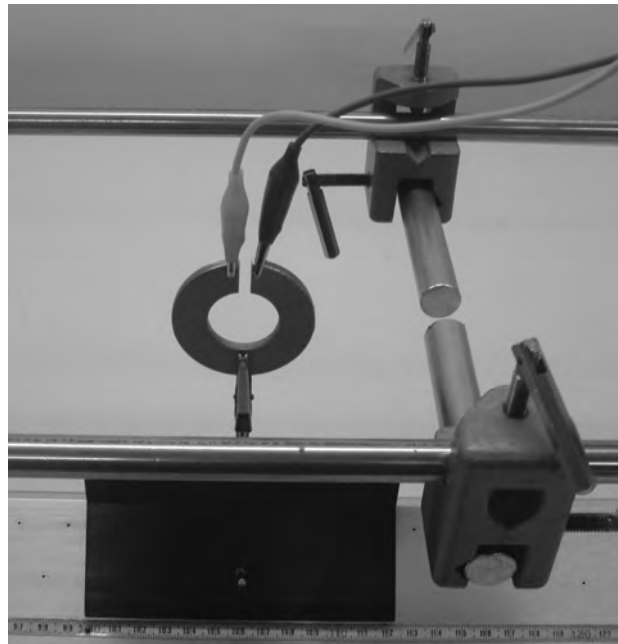


Abbildung 6: Gleiter mit offenem Ring und Anschlusskabeln für das Spannungsmessgerät

Der Gleiter wird angestoßen und passiert den Spalt. Beim Passieren ergibt sich der in Abbildung 7 dargestellte Verlauf der Induktionsspannung  $U$  in Abhängigkeit von der Zeit  $t$ .

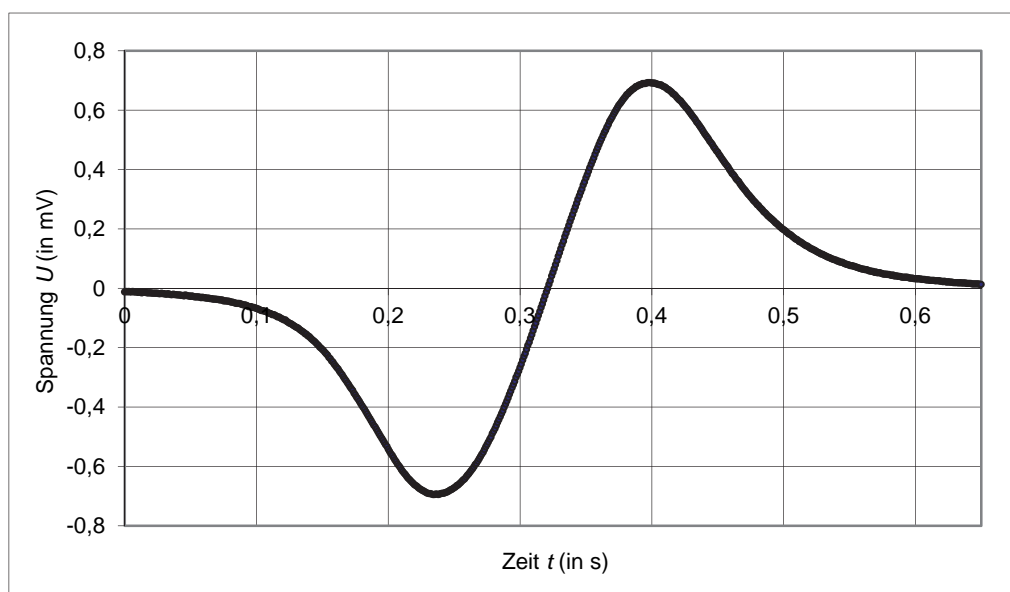


Abbildung 7: Spannung an den Enden des offenen Rings



Name: \_\_\_\_\_

- a) Erläutern Sie, warum eine Spannung an den Enden des offenen Rings gemessen werden kann.
- b) Begründen Sie, dass bei dem offenen Ring kein Bremsseffekt festzustellen ist.  
Erläutern Sie dies anhand von Abbildung 7.

(11 Punkte)

### Teilaufgabe 3

Der Einfachheit halber gelten in dieser Teilaufgabe folgende Annahmen:

Auf dem Gleiter ist eine quadratische, **offene** Leiterschleife der Breite bzw. Höhe  $b = h = 5 \text{ cm}$  montiert (siehe Abbildung 8). Der Gleiter bewegt sich entlang der dargestellten Messstrecke. Die Leiterschleife durchfährt dabei zwischen den in Abbildung 8 angegebenen Marken ein räumlich begrenztes, homogenes Magnetfeld senkrecht zur Bewegungsrichtung. Die magnetische Feldstärke ist  $B = 0,15 \text{ T}$ .

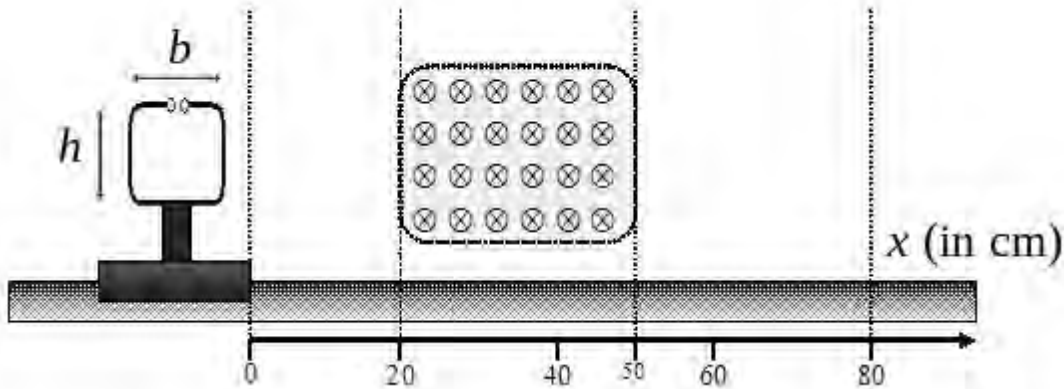


Abbildung 8: Skizze

Der Gleiter bewegt sich mit der konstanten Geschwindigkeit  $v = 10 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$  nach rechts. Die rechte Kante der Leiterschleife passiert zum Zeitpunkt  $t = 0 \text{ s}$  die Nullmarke der Messstrecke.

- a) Bestimmen Sie die Spannung  $U$  an den Enden der Leiterschleife für die gesamte Messstrecke.  
Zeichnen Sie die Spannung  $U$  in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  in ein Diagramm.



Name: \_\_\_\_\_

b) *Vergleichen Sie den theoretischen Spannungsverlauf für die quadratische Leiterschleife in Teilaufgabe a) und den gemessenen Spannungsverlauf für den Ring in Abbildung 7 unter Berücksichtigung der Maxima, Minima und Nullstellen.*

c) Das Induktionsgesetz lautet  $U_{\text{ind}} = -\dot{\Phi}$ , wobei der magnetische Fluss  $\Phi$  die Größe ist, die den Einfluss des magnetischen Feldes in der gesamten Kreisfläche des Rings beschreibt. *Erläutern Sie den Spannungsverlauf in Abbildung 7 mit Hilfe des Induktionsgesetzes. Skizzieren Sie qualitativ den zeitlichen Verlauf des magnetischen Flusses  $\Phi(t)$  in der Spule.*

(21 Punkte)

#### **Teilaufgabe 4**

Schließt man die Leiterschleife aus Teilaufgabe 3, fließt in ihr ein Strom der Stärke  $I = \frac{U}{R}$ , wobei  $R$  der ohmsche Widerstand der Leiterschleife ist.

a) *Leiten Sie die Gleichung  $F = -\frac{B^2 \cdot h^2}{R} \cdot v$  für die auf die Leiterschleife wirkende geschwindigkeitsabhängige Bremskraft beim Eintritt in das bzw. beim Austritt aus dem Magnetfeld her.*

b) *Entscheiden Sie, ob die Bremskraft durch eine Verdoppelung der Windungszahl vergrößert werden kann.*

(9 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, Leistungskurs

### 1. Aufgabenart

Bearbeitung einer Aufgabe, die fachspezifisches Material enthält

### 2. Aufgabenstellung<sup>1</sup>

**Aufgabe: Wirbelstrombremse bei einer Luftkissenfahrbahn**

(65 Punkte)

**Hinweis:** Kombinierbar entweder mit 1NT 1, 1NT 3 oder 1NT 4

### 3. Materialgrundlage

- entfällt

### 4. Bezüge zu den Vorgaben 2014

#### 1. Inhaltliche Schwerpunkte

- Ladungen und Felder
  - Magnetisches Feld, magnetische Feldgröße  $B$ , Lorentzkraft
  - 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

<sup>1</sup> Die Aufgabenstellung deckt inhaltlich alle drei Anforderungsbereiche ab.



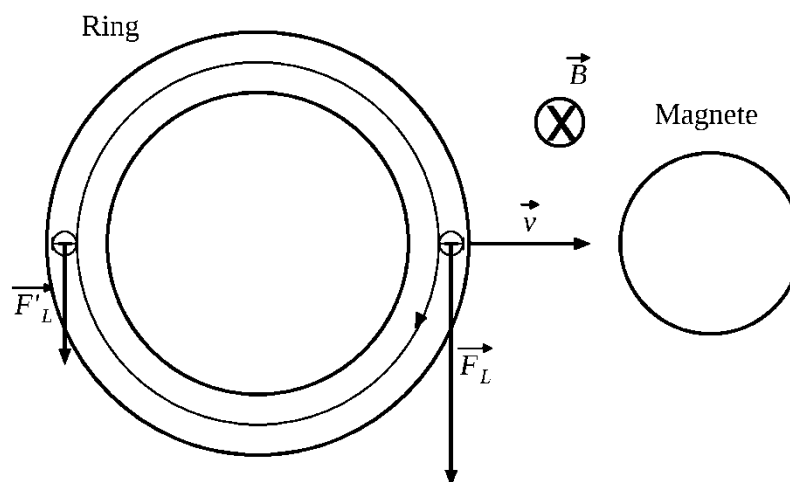
## 6. Modellösungen

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: 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) Über die Dunkelzeiten lassen sich die Geschwindigkeiten vergleichen. Eine kürzere Dunkelzeit bedeutet eine höhere Geschwindigkeit. Bei den gemessenen Zeiten in Abbildung 3 ist die Geschwindigkeit des Gleiters bei der zweiten Lichtschranke größer. Der Gleiter wurde auf der schiefen Bahn (ohne Reibung) gleichmäßig beschleunigt. In Abbildung 5 ist die zweite gemessene Zeit länger, die Geschwindigkeit also kleiner. Der Gleiter ist beim Passieren des Magneten abgebremst worden.
- b) Die Elektronen in beiden Ringhälften bewegen sich senkrecht zur Magnetfeldrichtung. Durch die Lorentzkraft werden sie abhängig von der Magnetfeldrichtung nach unten abgelenkt. Da sich die rechte Ringhälfte in einem Bereich höherer Feldstärke befindet als die linke Ringhälfte, überwiegt die Elektronenbewegung in der rechten Ringhälfte und führt zu einer entgegengesetzt gerichteten Elektronenbewegung in der linken Hälfte. So entsteht ein Strom entlang des gesamten Rings.



Wie man der Skizze entnehmen kann, ist der Elektronenfluss im Uhrzeigersinn.

**Hinweis für die korrigierende Lehrkraft:**

Es werden keine lokalen Wirbelströme in den Ringhälften betrachtet. Auch wird die Lorentzkraft  $\vec{F}'_L$  in der Skizze nicht erwartet.

- c) Bei der Entfernung des Rings von den Magneten weg behalten das Magnetfeld und die Geschwindigkeit ihre Richtung bei, sodass die Lorentzkraft weiter eine Elektronenablenkung nach unten bewirkt. Allerdings überwiegt diese jetzt in der linken Ringhälfte, sodass die Elektronen gegen den Uhrzeigersinn fließen.
- d) Bei Annäherung wirkt auf die Elektronen in der rechten Ringhälfte eine Lorentzkraft, die entgegen der Bewegungsrichtung des Gleiters wirkt, und auf die Elektronen in der linken Hälfte eine Lorentzkraft, die aufgrund der umgekehrten Stromrichtung in Bewegungsrichtung wirkt. Die bremsende Kraft überwiegt aufgrund der zum Spalt hin größer werdenden Feldstärke.

Bei Entfernung ändert sich die Stromrichtung. Die bremsende Kraft wirkt auf die linke Ringhälfte, die beschleunigende auf die rechte. Auch hier überwiegt die bremsende Kraft im inhomogenen Feld.

**Alternative Argumentation:**

Bei Annäherung erzeugt der Ringstrom ein Magnetfeld, dessen Nordpol bzgl. Abbildung 4 auf der Seite des vorderen Magneten liegt. Durch die Wechselwirkung mit dem Nordpol dieses Magneten wird der Ring abgestoßen, ebenso wie durch die entsprechenden Südpole auf der anderen Seite, sodass der Gleiter abgebremst wird.

Bei Entfernung ändert sich mit der Stromrichtung auch die Polung des Magnetfeldes, sodass der Ring durch die dann ungleichnamigen Pole auf beiden Seiten angezogen wird und der Gleiter wiederum abgebremst wird.

Der Gleiter wird also durch den Ringstrom bei Annäherung und Entfernung von den Magneten abgebremst, sodass er bei der zweiten Lichtschranke trotz der Beschleunigung auf der schiefen Bahn eine geringere Geschwindigkeit hat als bei der ersten.

**Teilaufgabe 2**

- a) Entsprechend Teilaufgabe 1 kann hier mit einer Elektronenverschiebung durch die Lorentzkraft argumentiert werden, sodass am linken Ende ein Elektronenüberschuss (–) bzw. Minuspol bei Annäherung des Rings an die Magneten entsteht, bei Entfernung am rechten Ende.

**Alternative Lösung:**

Bewegt sich der offene Ring durch das inhomogene Magnetfeld, ändert sich ständig der Teil des Magnetfeldes, der die Ringfläche durchsetzt. Damit ändert sich der magnetische Fluss  $\Phi$  zeitlich. Nach dem Induktionsgesetz  $U_{\text{ind}} = -\dot{\Phi}$  wird an den offenen Enden die Spannung  $U_{\text{ind}}$  induziert.

- b) Im offenen Ring kann kein Strom fließen, sodass auch keine bremsende Lorentzkraft wirken kann.

Im Abbildung 7 erkennt man den fehlenden Bremsseffekt an der Punktsymmetrie der Messkurve zum Zeitpunkt  $t \approx 0,32 \text{ s}$ , an dem sich der Ring genau in der Spaltmitte befindet.

**Alternative Lösung:**

Hier kann auch argumentiert werden, dass z. B. die Breiten der Spitzen gleich oder das Minimum und Maximum betragsgleich sind.

**Teilaufgabe 3**

- a) Eine Spannung wird nur dann induziert, wenn sich der Inhalt der vom Magnetfeld (senkrecht) durchsetzten Fläche zeitlich ändert. Dies ist für die folgende Eintritts- bzw. Austrittsphase der Leiterschleife erfüllt:

**Eintrittsphase:**  $2 \text{ s} \leq t \leq 2,5 \text{ s}$

Die rechte Kante befindet sich im Magnetfeld, die linke noch nicht. Die Elektronen der rechten Kante werden durch die Lorentzkraft nach unten verschoben. An der rechten Anschlussstelle entsteht ein Elektronenmangel (+), an der linken ein Elektronenüberschuss (–).

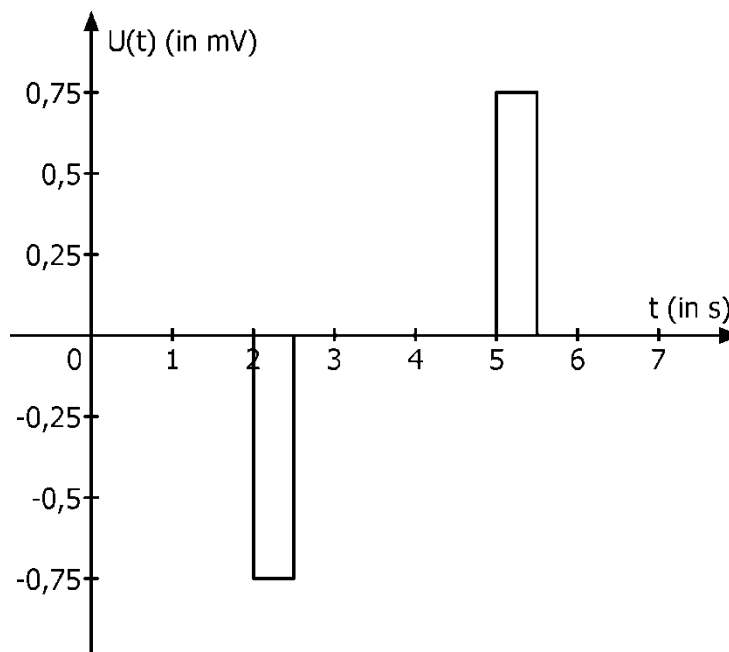
Wenn sich die Leiterschleife ganz im Magnetfeld befindet, wirkt auf die Elektronen der rechten und linken Kante dieselbe Lorentzkraft. Es findet keine Elektronenverschiebung zu den Anschlussstellen statt.

**Austrittsphase:**  $5 \text{ s} \leq t \leq 5,5 \text{ s}$

Nur die linke Kante befindet sich noch im Magnetfeld, die rechte nicht mehr. Die Elektronen der linken Kante werden durch die Lorentzkraft nach unten verschoben. An der linken Anschlussstelle entsteht ein Elektronenmangel (+), an der rechten ein Elektronenüberschuss (-).

Die Induktionsspannung ergibt sich aus  $U(t) = -B \cdot \dot{A}_S(t)$ , wobei  $\dot{A}_S(t) > 0$  in der Eintrittsphase und  $\dot{A}_S(t) < 0$  in der Austrittsphase gilt. Der Betrag der Induktionsspannung ist  $|U(t)| = B \cdot h \cdot v = 0,75 \text{ mV}$ .

Damit ergibt sich das folgende Diagramm:



**Hinweis für die korrigierende Lehrkraft:**

Das Vorzeichen der Spannung ist willkürlich und hier so gewählt, dass es mit dem Induktionsgesetz übereinstimmt. Es stimmt zudem mit dem Vorzeichen der Spannung in Abbildung 7 überein.

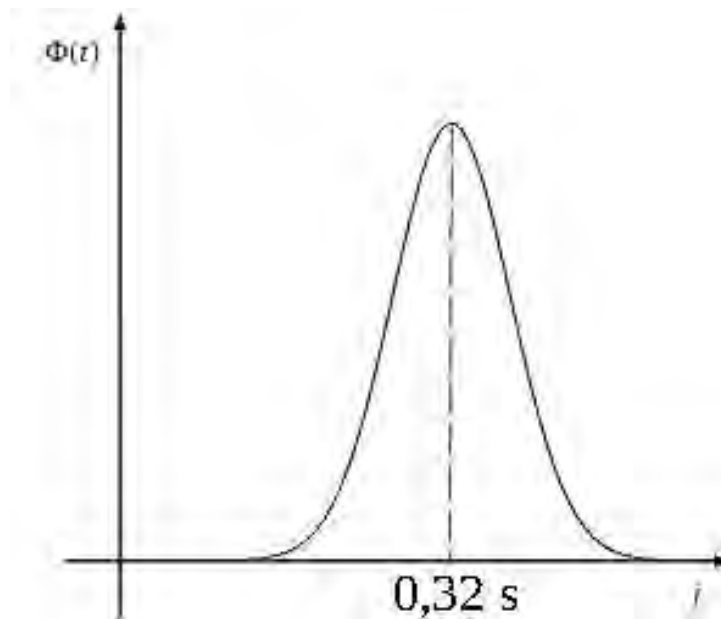
- b) Gemeinsam ist beiden Spannungsverläufen, dass sie ein Minimum und ein Maximum mit unterschiedlichen Vorzeichen besitzen. Das Minimum entsteht beim Eintritt in das Magnetfeld, das Maximum beim Austritt.

Der theoretische Spannungsverlauf ist stückweise konstant aufgrund der Annahme des homogenen, räumlich begrenzten Feldes. Im inhomogenen, räumlich nicht begrenzten Feld ergibt sich dagegen ein kontinuierlicher Verlauf. Insbesondere besitzt das gemessene Signal nur genau eine Nullstelle und kein Nullplateau.

c) Die Spitze nach unten entsteht dadurch, dass sich der Magnet auf die Spule zu bewegt, wobei der Fluss zunimmt ( $\dot{\Phi} > 0$ ), bis dass sich der Magnet genau in der Mitte über der Spulenfläche befindet ( $\dot{\Phi} = 0$ ) und die Spannung  $U$  den Nulldurchgang erreicht.

Die Spitze nach oben resultiert daraus, dass sich der Magnet wieder von der Spule entfernt. Dabei nimmt der Fluss ab ( $\dot{\Phi} < 0$ ).

Die Skizze des zeitlichen Verlaufs von  $\Phi(t)$  ergibt sich daraus, dass die negative Ableitung dieser Funktion dem zeitlichen Verlauf der Spannung  $U(t)$  entspricht.



**Teilaufgabe 4**

- a) Beim Eintritt wirkt die Lorentzkraft auf das rechte vertikale Leiterstück, beim Austritt auf das linke. Der Betrag der Lorentzkraft  $F$  auf ein Leiterstück der Länge  $h$ , das im Magnetfeld der Stärke  $B$  vom Strom der Stärke  $I$  durchflossen wird, ist

$$F = B \cdot h \cdot I = B \cdot h \cdot \frac{U}{R} = B \cdot h \cdot \frac{B \cdot h \cdot v}{R} = \frac{B^2 \cdot h^2}{R} \cdot v.$$

Da die Leiterschleife beim Ein- und Austritt mit der Kraft  $F$  entgegengesetzt gerichtet zu seiner Geschwindigkeit  $v$  abgebremst wird, folgt

$$F = -\frac{B^2 \cdot h^2}{R} \cdot v.$$

**Hinweis für die korrigierende Lehrkraft:**

Die Geschwindigkeit  $v$  ist hier nicht mehr zeitlich konstant. Für den Betrag der zeitabhängigen Induktionsspannung gilt aber auch  $U(t) = B \cdot h \cdot v(t)$ .

- b) Durch die Verdoppelung der Windungszahl wird der Widerstand verdoppelt, so dass sich die Kraft auf eine Windung halbiert. Auf die beiden Windungen wirkt die doppelte Kraft, also die gleiche Bremskraft wie in a).

**7. Teilleistungen – Kriterien / Bewertungsbogen zur Prüfungsarbeit**

Name des Prüflings: \_\_\_\_\_ Kursbezeichnung: \_\_\_\_\_

Schule: \_\_\_\_\_

**Teilaufgabe 1**

	Anforderungen	Lösungsqualität			
		maximal erreichbare Punktzahl	EK <sup>2</sup>	ZK	DK
	<b>Der Prüfling</b>				
a)	erläutert den qualitativen Unterschied zwischen den beiden Dunkelzeiten in Abbildung 3 bzw. den beiden Dunkelzeiten in Abbildung 5.	5			
b1)	begründet mit Hilfe der Lorentzkraft in der linken und rechten Ringhälfte, dass sich entlang des gesamten Rings ein Elektronenstrom ausbildet, wenn sich der Gleiter an die Magnete annähert.	6			
b2)	ermittelt mit Hilfe einer geeigneten Skizze die Stromrichtung bei Annäherung des Rings an die Magnete.	3			
c)	begründet, dass es zu einer Umkehr der Stromrichtung kommt, wenn sich der Ring von den Magneten entfernt.	4			
d)	erläutert anhand der Ringströme bei Annäherung und Entfernung und unter Berücksichtigung der beiden Ringhälften das in Abbildung 5 dargestellte Ergebnis.	6			
Sachlich richtige Lösungsalternative zur Modelllösung: (24) ..... .....					
<b>Summe Teilaufgabe 1</b>		<b>24</b>			

<sup>2</sup> EK = Erstkorrektur; ZK = Zweitkorrektur; DK = Drittkorrektur

**Teilaufgabe 2**

	Anforderungen	Lösungsqualität			
		maximal erreichbare Punktzahl	EK	ZK	DK
	<b>Der Prüfling</b>				
a)	erläutert, warum eine Spannung an den Enden des offenen Rings gemessen werden kann.	5			
b1)	begründet, dass bei dem offenen Ring kein Bremsseffekt festzustellen ist.	3			
b2)	erläutert dies anhand von Abbildung 7.	3			
Sachlich richtige Lösungsalternative zur Modelllösung: (11) ..... .....					
<b>Summe Teilaufgabe 2</b>		<b>11</b>			

**Teilaufgabe 3**

	Anforderungen	Lösungsqualität			
		maximal erreichbare Punktzahl	EK	ZK	DK
	<b>Der Prüfling</b>				
a1)	bestimmt die Spannung $U$ an den Enden der Leiterschleife für die gesamte Messstrecke.	8			
a2)	zeichnet die Spannung $U$ in Abhängigkeit von der Zeit $t$ in ein Diagramm.	3			
b)	vergleicht den theoretischen Spannungsverlauf für die quadratische Leiterschleife in Teilaufgabe a) und den gemessenen Spannungsverlauf für den Ring in Abbildung 7 unter Berücksichtigung der Maxima, Minima und Nullstellen.	4			
c1)	erläutert den Spannungsverlauf in Abbildung 7 mit Hilfe des Induktionsgesetzes.	3			
c2)	skizziert qualitativ den zeitlichen Verlauf des magnetischen Flusses $\Phi(t)$ in der Spule.	3			
Sachlich richtige Lösungsalternative zur Modelllösung: (21) ..... .....					
<b>Summe Teilaufgabe 3</b>		<b>21</b>			



**Teilaufgabe 4**

Anforderungen		Lösungsqualität			
		maximal erreichbare Punktzahl	EK	ZK	DK
<b>Der Prüfling</b>					
a)	leitet die Gleichung $F = -(B^2 \cdot h^2) / R \cdot v$ für die auf die Leiterschleife wirkende geschwindigkeitsabhängige Bremskraft beim Eintritt in das bzw. beim Austritt aus dem Magnetfeld her.	6			
b)	entscheidet, ob die Bremskraft durch eine Verdoppelung der Windungszahl vergrößert werden kann.	3			
Sachlich richtige Lösungsalternative zur Modelllösung: (9) ..... .....					
<b>Summe Teilaufgabe 4</b>		<b>9</b>			

<b>Summe insgesamt</b>	<b>65</b>			
------------------------	-----------	--	--	--

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

	Lösungsqualität			
	maximal erreichbare Punktzahl	EK	ZK	DK
<b>Übertrag der Punktzahl aus der ersten bearbeiteten Aufgabe</b>	<b>65</b>			
<b>Übertrag der Punktzahl aus der zweiten bearbeiteten Aufgabe</b>	<b>65</b>			
<b>Punktzahl der gesamten Prüfungsleistung</b>	<b>130</b>			
<b>aus der Punktzahl resultierende Note</b>				
<b>Note ggf. unter Absenkung um ein bis zwei Notenpunkte gemäß § 13 Abs. 2 APO-GOST</b>				
<b>Paraphe</b>				

ggf. arithmetisches Mittel der Punktzahlen 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:

<b>Note</b>	<b>Punkte</b>	<b>Erreichte Punktzahl</b>
sehr gut plus	15	130 – 124
sehr gut	14	123 – 117
sehr gut minus	13	116 – 111
gut plus	12	110 – 104
gut	11	103 – 98
gut minus	10	97 – 91
befriedigend plus	9	90 – 85
befriedigend	8	84 – 78
befriedigend minus	7	77 – 72
ausreichend plus	6	71 – 65
ausreichend	5	64 – 59
ausreichend minus	4	58 – 51
mangelhaft plus	3	50 – 43
mangelhaft	2	42 – 34
mangelhaft minus	1	33 – 26
ungenügend	0	25 – 0



Name: \_\_\_\_\_

## Abiturprüfung 2014

### Physik, Leistungskurs

---

#### Aufgabenstellung:

#### Aufgabe: Interferenzerscheinungen

In den Strahlengang eines He-Ne-Lasers mit der Wellenlänge  $\lambda = 632,8 \text{ nm}$  werden unterschiedliche Beugungsobjekte jeweils senkrecht zur Strahlrichtung gestellt (siehe Abbildung 1).



Abbildung 1: Versuchsaufbau

Hinter dem jeweiligen Beugungsobjekt registriert man auf einem Schirm im Abstand  $a = 5,23 \text{ m}$  die Beugungsbilder.

#### Teilaufgabe 1

- Erläutern Sie ausgehend vom Huygens'schen Prinzip die Entstehung von Hauptmaxima der Intensität im Beugungsbild eines **Mehrfachspaltes**.
- Leiten Sie mit Hilfe einer geeigneten Skizze die Beziehung  $k \cdot \lambda = g \cdot \sin \alpha_k$  für die Winkel  $\alpha_k$  her, unter denen beim Mehrfachspalt Hauptmaxima auftreten.

(8 Punkte)



Name: \_\_\_\_\_

In den folgenden Teilaufgaben sind Fotos von Beugungsbildern auf Millimeterpapier dargestellt. Zur besseren Ablesbarkeit sind die Fotonegative abgebildet.

### Teilaufgabe 2

In den Strahlengang des He-Ne-Lasers werden jeweils ein **Einzelspalt** sowie ein **Doppel-**, ein **Dreifach-** und ein **Vierfachspalt** mit jeweils **gleichem** Spaltabstand  $g$  gestellt. Dabei ergeben sich die Beugungsbilder in den Abbildungen 2a – 2d.

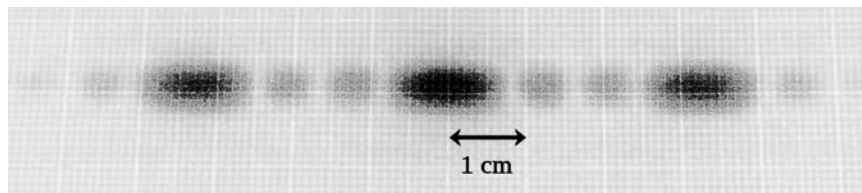


Abbildung 2a: Beugungsbild

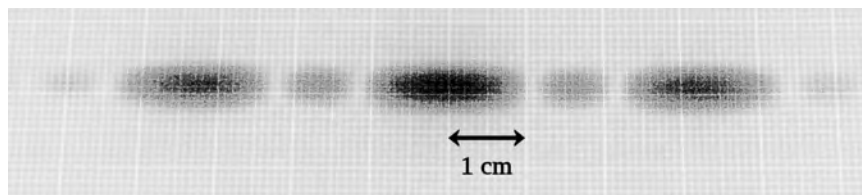


Abbildung 2b: Beugungsbild

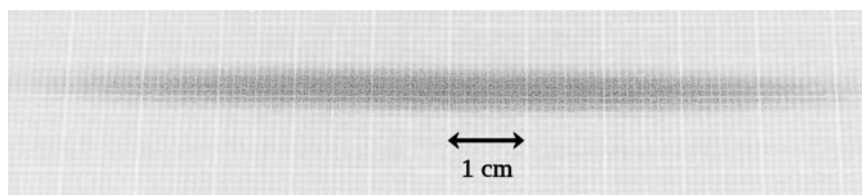


Abbildung 2c: Beugungsbild

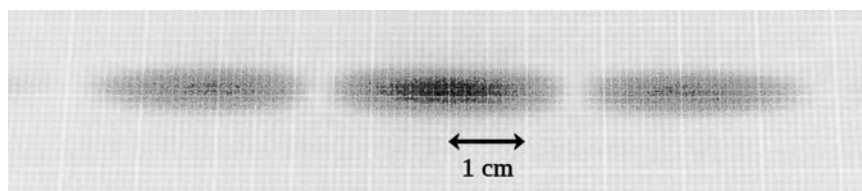


Abbildung 2d: Beugungsbild



Name: \_\_\_\_\_

- Ordnen Sie die Abbildungen den vier Beugungsobjekten zu und begründen Sie die Zuordnung.
- Bestimmen Sie anhand einer der drei entsprechenden Abbildungen den Spaltabstand  $g$  der Mehrfachspalte. Begründen Sie die verwendeten Gleichungen.
- Leiten Sie mit Hilfe einer geeigneten Skizze die Gleichung  $\lambda = b \cdot \sin \alpha_1$  für den Winkel  $\alpha_1$  her, unter dem bei dem Einzelspalt der Breite  $b$  das erste Minimum der Intensität auftritt.
- Erläutern Sie, wie sich eine Vergrößerung bzw. Verkleinerung der Spaltbreite  $b$  auf das Beugungsbild des Einzespalters auswirkt.

(23 Punkte)

### Teilaufgabe 3

In den Strahlengang des He-Ne-Lasers wird ein **anderer Doppelspalt** gebracht. Auf Millimeterpapier ist das in Abbildung 3 dargestellte Beugungsbild zu erkennen.

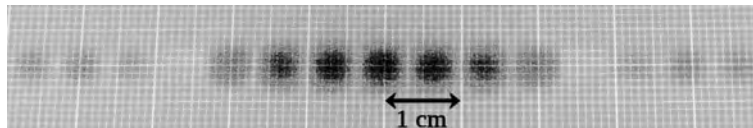


Abbildung 3: Beugungsbild des Doppelspaltes

Zur Verdeutlichung ist in Abbildung 4 ein zugehöriges Diagramm der Intensität in Abhängigkeit vom Beugungswinkel  $\alpha$  dargestellt.



Name: \_\_\_\_\_

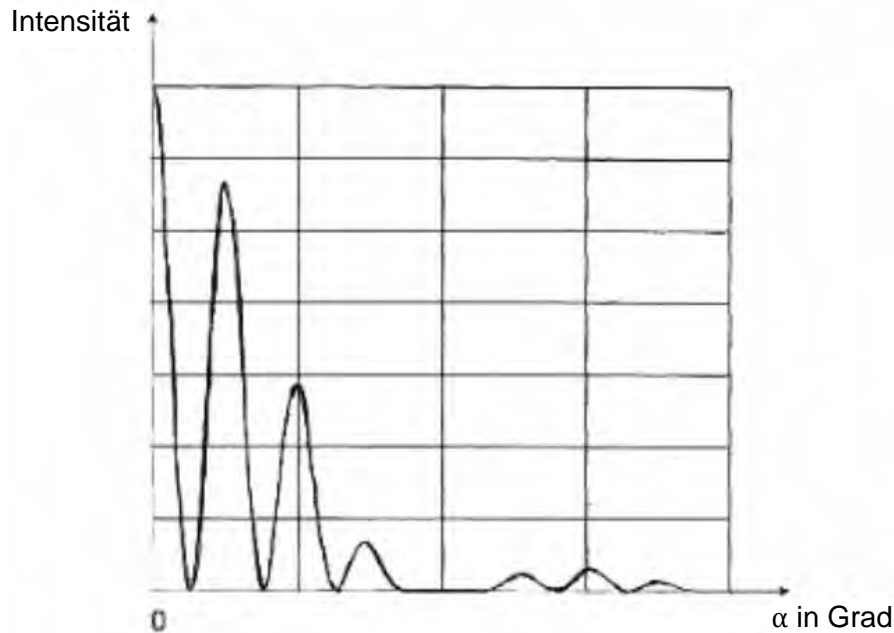


Abbildung 4: Intensitätsverlauf

- a) Begründen Sie mit Hilfe des Beugungsbildes am Einzelspalt, warum die Maxima nicht alle gleich hell und bestimmte Maxima sogar ausgelöscht sind.
- b) In Tabelle 1 sind die Spaltbreite  $b$  und der Spaltabstand  $g$  von vier unterschiedlichen Doppelspalten aufgeführt.

Spaltbreite $b$ (in mm)	Spaltabstand $g$ (in mm)
0,2	0,25
0,1	0,25
0,1	0,4
0,1	1,0

Tabelle 1

Entscheiden Sie anhand einer Rechnung, welcher der vier Doppelspalte für das Beugungsbild in Abbildung 3 verwendet wurde.

(8 Punkte)



Name: \_\_\_\_\_

#### Teilaufgabe 4

Der Strahl des He-Ne-Lasers trifft senkrecht auf ein sog. **Kreuzgitter**. In Abbildung 5 ist die Gitterstruktur lichtmikroskopisch vergrößert dargestellt.

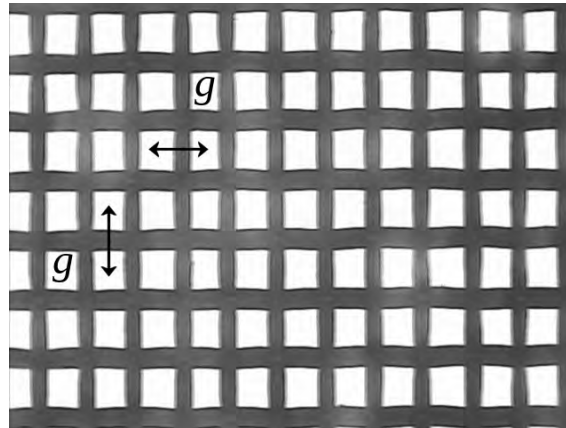


Abbildung 5: Kreuzgitter

Die Gitteröffnungen sind nahezu quadratisch und haben in horizontaler und vertikaler Richtung den gleichen Abstand  $g$ . Das Kreuzgitter erzeugt das in Abbildung 6 dargestellte Punktmuster auf Millimeterpapier.



Name: \_\_\_\_\_

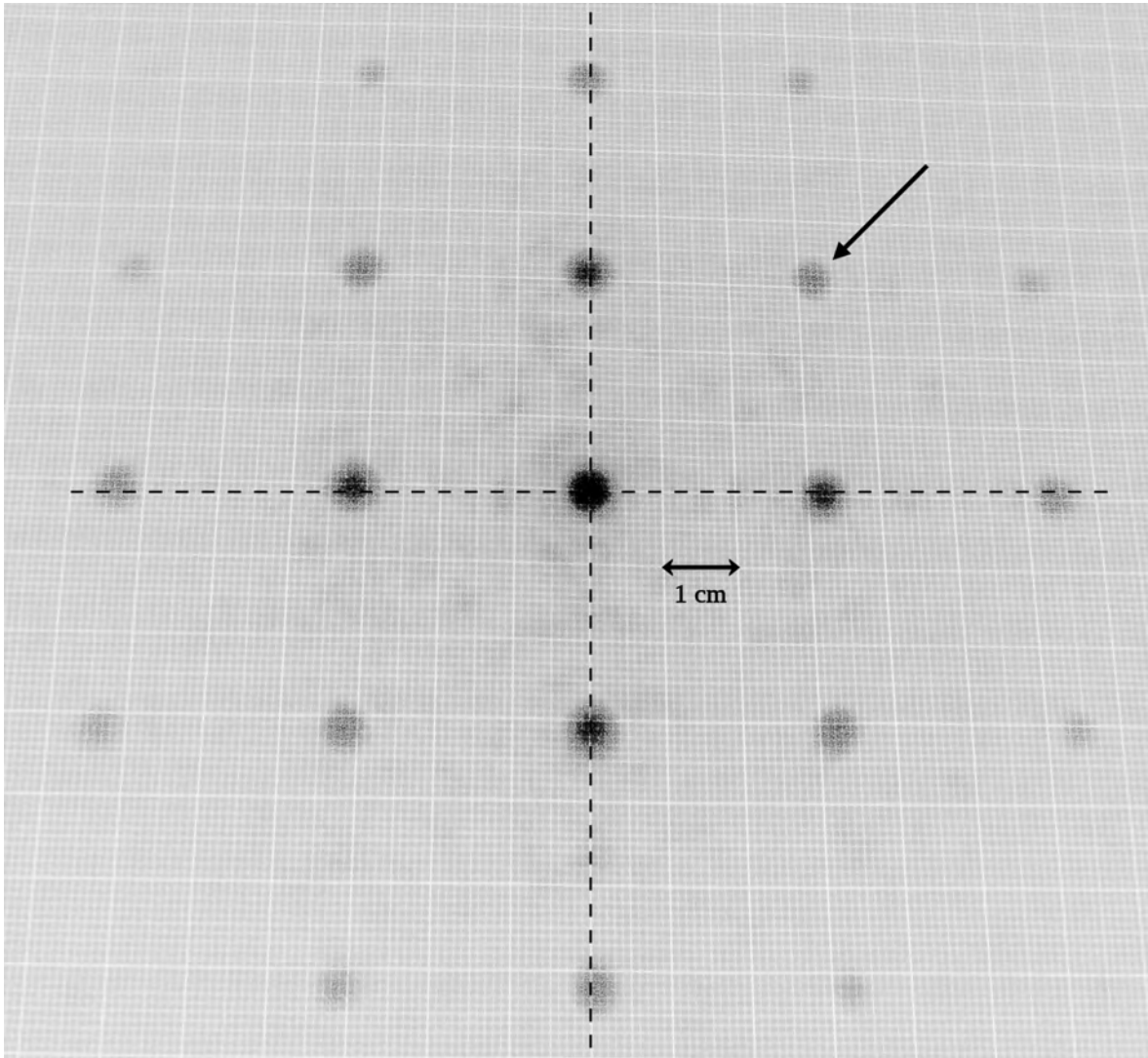


Abbildung 6: Beugungsbild des Kreuzgitters

Das Muster überdeckt eine wesentlich größere Fläche, als es dem Querschnitt des Laserstrahls entspricht.

a) Erläutern Sie die Entstehung der horizontalen und der vertikalen Reihe von Helligkeitsmaxima, die in Abbildung 6 durch die gestrichelten Linien markiert sind.

b) Das Kreuzgitter trägt die Aufschrift „ $n = 100$ “.

Ermitteln Sie durch eine rechnerische Auswertung der Maxima 2. Ordnung die Bedeutung der Aufschrift.





Name: \_\_\_\_\_

c) In Abbildung 6 ist ein Helligkeitsmaximum mit einem Pfeil markiert.

*Erläutern Sie, welche Elementarwellen nach dem Huygens'schen Prinzip für dieses Helligkeitsmaximum konstruktiv interferieren.*

d) In Abbildung 7 ist die Gitterkonstante  $g'$  für das mit dem Pfeil markierte Helligkeitsmaximum aus Abbildung 6 dargestellt.

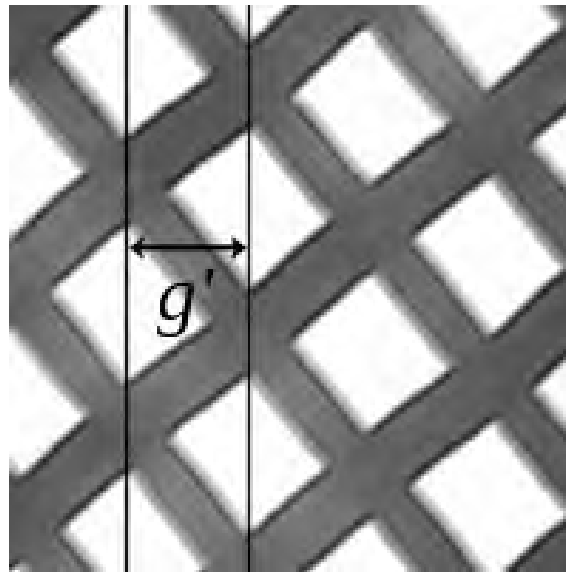


Abbildung 7: Kreuzgitter, um 45° gedreht

*Zeigen Sie, dass  $g' = \frac{g}{\sqrt{2}}$  ist und dass der Gangunterschied benachbarter Elementarwellen  $d = \lambda$  ist.*

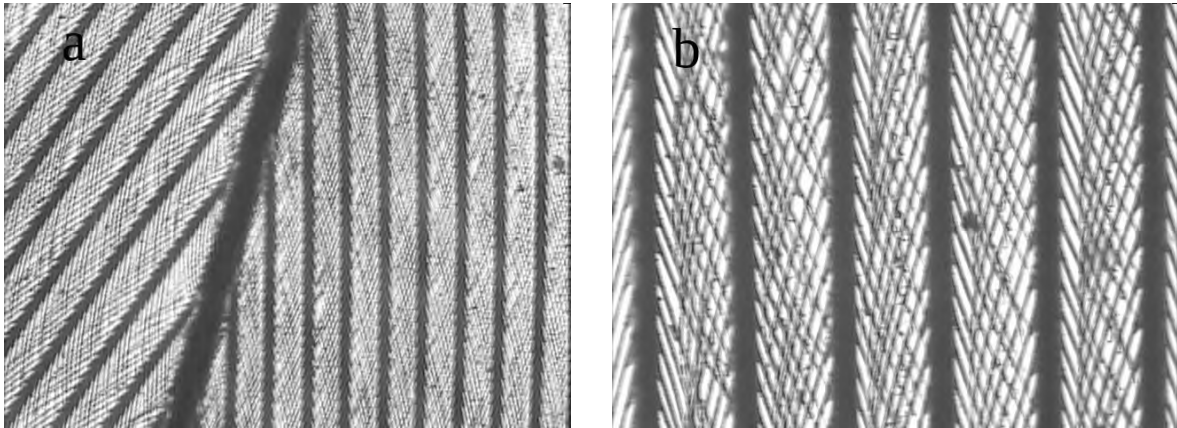
(18 Punkte)



Name: \_\_\_\_\_

### Teilaufgabe 5

Betrachtet man eine Vogelfeder im Lichtmikroskop, so erhält man die in den Abbildungen 8a und 8b dargestellte Struktur, wobei in b der rechte Teil von a stärker vergrößert ist.



Abbildungen 8a und 8b: Vogelfeder

Die Vogelfeder lässt vertikale, breitere Linien und ein Muster aus gekreuzten, feineren Linien dazwischen erkennen. Die Abstände zwischen den vertikalen Linien sind größer als die Abstände zwischen den feineren Linien. Man kann annehmen, dass die Vogelfeder aus einem gröberen Strichgitter und einem vergleichsweise feineren Kreuzgitter besteht.



Name: \_\_\_\_\_

Durchleuchtet man die Vogelfeder mit dem Laser, so erhält man das in Abbildung 9 dargestellte Beugungsbild.

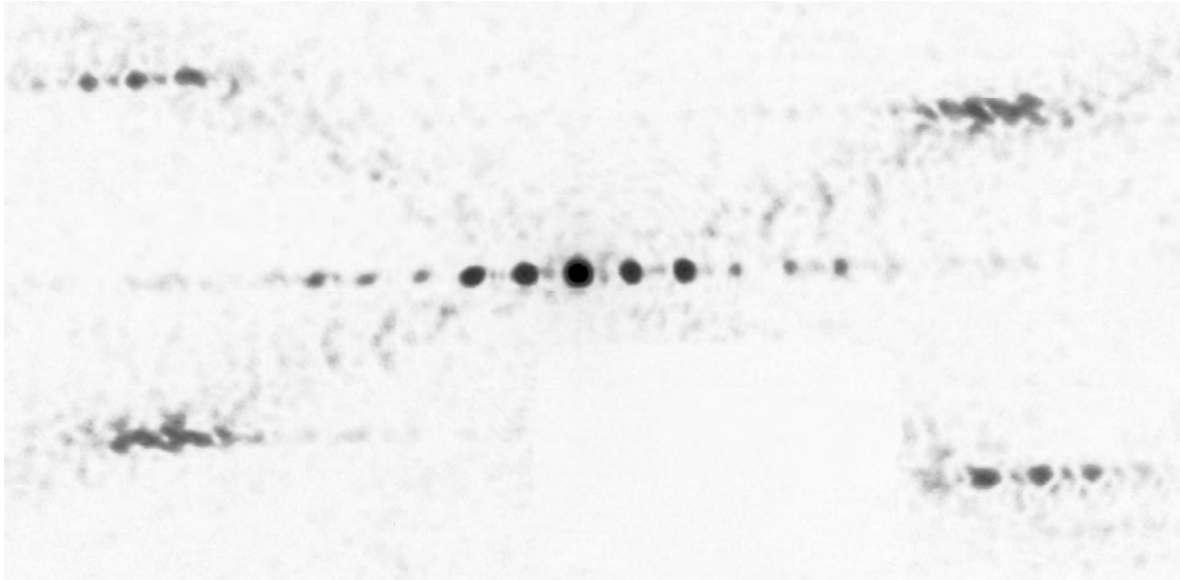


Abbildung 9: Beugungsbild der Vogelfeder

- a) *Erklären Sie allgemein, welchen Einfluss die Größe der Gitterkonstante auf das Beugungsbild hat.*
- b) *Erläutern Sie den Zusammenhang zwischen der Struktur der Vogelfeder und ihrem Beugungsbild.*

(8 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, Leistungskurs

---

### 1. Aufgabenart

Bearbeitung einer Aufgabe, die fachspezifisches Material enthält

### 2. Aufgabenstellung<sup>1</sup>

**Aufgabe: Interferenzerscheinungen**

(65 Punkte)

**Hinweis:** Kombinierbar entweder mit 1NT 1, 1NT 3 oder 1NT 4

### 3. Materialgrundlage

- entfällt

### 4. Bezüge zu den Vorgaben 2014

1. *Inhaltliche Schwerpunkte*

- Elektromagnetische Schwingungen und Wellen
  - Interferenz (Lichtbeugung am Spalt, Doppelspalt und Gitter)

2. *Medien/Materialien*

- entfällt

### 5. Zugelassene Hilfsmittel

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

---

<sup>1</sup> Die Aufgabenstellung deckt inhaltlich alle drei Anforderungsbereiche ab.

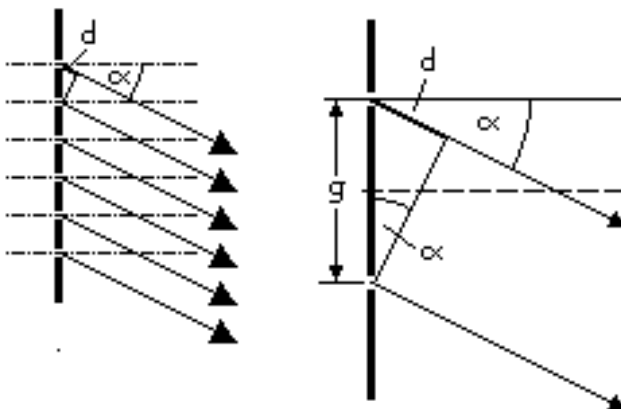
## 6. Modellösungen

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

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) Nach dem Huygens'schen Prinzip entsteht in jeder Spaltöffnung eine Elementarwelle. Diese überlagern sich im Raum dahinter, insbesondere auch in jedem Punkt auf dem Schirm. Dabei kommt es im jeweiligen Schirmpunkt zu einem Hauptmaximum der Intensität, wenn sich die Elementarwellen dort verstärken. Dies ist der Fall, wenn der Gangunterschied  $d$  benachbarter Elementarwellen ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge  $\lambda$  ist.
- b) Die Bedingung für ein Hauptmaximum ist unabhängig von der Anzahl der Spalte und lautet  $d = k \cdot \lambda$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots$



Anhand der Skizze erkennt man, dass  $\sin \alpha = \frac{d}{g}$  gilt, wobei  $g$  der Spaltabstand ist.

Durch Einsetzen erhält man diskrete Werte  $\alpha_k$  für die Maxima durch die Gleichung

$$k \cdot \lambda = g \cdot \sin \alpha_k.$$

**Teilaufgabe 2**

a) Die Zuordnung ergibt sich aus der folgenden Tabelle:

Abbildung	Art des Beugungsobjektes
2a	Vierfachspalt
2b	Dreifachspalt
2c	Einzelspalt
2d	Doppelspalt

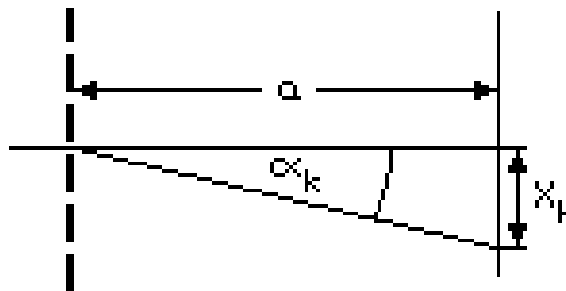
Bei Mehrfachspalten mit  $n \geq 3$  Öffnungen gibt es zwischen den Hauptmaxima  $n-2$  Nebenmaxima. In Abbildung 2a sind zwischen den deutlich helleren Hauptmaxima zwei dunklere Nebenmaxima zu erkennen, also handelt es sich hierbei um Interferenz am Vierfachspalt. In Abbildung 2b befindet sich ein Nebenmaximum zwischen den Hauptmaxima, dementsprechend wurde ein Dreifachspalt verwendet.

Aufgrund des Hinweises, dass alle Mehrfachspalte den gleichen Spaltabstand aufweisen, muss in Abbildung 2d der Doppelspalt verwendet worden sein, da hier die Hauptmaxima an denselben Stellen wie in Abbildung 2a und 2b liegen. Schließlich ist in Abbildung 2c das Beugungsbild des Einfachspaltes dargestellt.

**Alternative Lösung:**

Die Mehrfachspalte lassen sich auch durch die mit wachsender Spaltanzahl steigende Schärfe der Hauptmaxima identifizieren. Vom Doppel- zum Vierfachspalt nimmt die Größe der Leuchtflecken erkennbar ab.

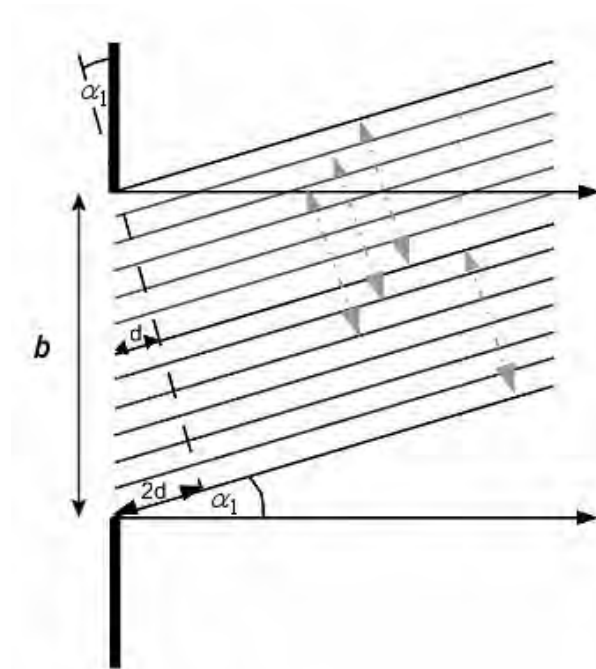
b) Anhand der Skizze lässt sich allgemein die Gleichung  $\tan \alpha_k = \frac{x_k}{a}$  herleiten.



Mit Hilfe der Abbildungen 2a, b oder d lässt sich der Abstand der beiden Hauptmaxima 1. Ordnung zu  $2 \cdot x_1 = 6,5 \text{ cm}$  ermitteln. Wegen des großen Abstands zum Schirm darf die Kleinwinkelnäherung  $\tan \alpha_1 \approx \sin \alpha_1$  verwendet werden. Umgeformt erhält man

$$g \approx \lambda \cdot \frac{a}{x_1} \approx 0,10 \text{ mm}.$$

- c) Das Zustandekommen des ersten Minimums geht aus einer geeigneten Zerlegung des Gesamtstrahlbündels hervor. Dazu wird das Bündel in zwei Teilbündel zerlegt. Der Gangunterschied  $d$  zwischen den entsprechenden Randstrahlen muss gleich der halben Wellenlänge  $\lambda$  sein.



In den zwei Teilbündeln löschen sich alle Wellenzüge aus, sodass sich ein Minimum ergibt. Im rechtwinklig angenommenen Dreieck erhält man  $\sin \alpha_1 = \frac{\lambda}{b}$  und damit die gegebene Gleichung.

**Alternative Lösung:**

Ordnet man jeder von einem Punkt der Spaltöffnung ausgehenden Elementarwelle am Ort des Minimums auf dem Schirm einen Zeiger zu, so bilden all diese Zeiger eine geschlossene Zeigerkette. Die Resultierende ist gleich Null. Die Zeiger der am Rand entstehenden Elementarwellen zeigen in die gleiche Richtung; der Gangunterschied dieser beiden Wellen ist gleich  $\lambda$ .

- d) Eine Vergrößerung der Spaltbreite  $b$  führt dazu, dass das erste Minimum näher an das zentrale Maximum heranrückt. Gleiches gilt auch für die weiteren Minima. Im Beugungsbild konzentriert sich die Helligkeit stärker auf die Mitte. Eine Verkleinerung der Spaltbreite  $b$  führt im Gegensatz dazu zu einer breiteren und gleichmäßigeren Verteilung der Helligkeit auf dem Schirm.

**Teilaufgabe 3**

a) Hinter dem Doppelspalt überlagern sich die Beugungsbilder der beiden Einzelspalte.

Diese sind kaum merklich gegeneinander verschoben, die Summe der Einzelspaltintensitäten stellt die Einhüllende des Intensitätsverlaufs für den Doppelspalt dar. Zusätzlich kommt es zur Doppelspaltinterferenz, d. h. zur Interferenz der Lichtbündel beider Einzelspalte.

Die Helligkeit der Maxima ist also unterschiedlich, wenn die Spaltöffnungen nicht punktförmig sind und das Beugungsbild des Einzelspaltes keinen gleich verteilten Intensitätsverlauf zeigt. Insbesondere sind in den Abbildungen 3 und 4 die beiden Maxima 4. Ordnung ausgelöscht, da sie mit dem 1. Minimum der Einzelspaltinterferenz zusammenfallen.

b) Für den Winkel  $\alpha$ , unter dem das 1. Minimum der Einzelspaltinterferenz bzw. das Maximum 4. Ordnung der Doppelspaltinterferenz zu erkennen ist, gilt die Beziehung

$$\sin \alpha = \frac{\lambda}{b} = \frac{4 \cdot \lambda}{g}. \text{ Daraus folgt } \frac{b}{g} = 0,25. \text{ Diese Bedingung ist nur für die Werte } b = 0,1$$

und  $g = 0,4$  in der dritten Zeile von Tabelle 1 erfüllt.

**Teilaufgabe 4**

a) Das Kreuzgitter ist eine Kombination aus zwei Strichgittern. Bei dem einen verlaufen die Striche vertikal, bei dem anderen horizontal. Beide erzeugen in der Mitte das Maximum 0. Ordnung mit der größten Intensität. Das vertikale Strichgitter erzeugt die horizontale Reihe von Helligkeitsmaxima, das horizontale die vertikale Reihe.

b) Die Aufschrift gibt die Anzahl der Striche pro Längeneinheit an, die sich aus dem Kehrwert der Gitterkonstante  $g$  des horizontalen bzw. vertikalen Strichgitters ergibt. Anhand von Abbildung 6 lässt sich der Abstand der beiden Maxima 2. Ordnung ermitteln:

$$2 \cdot x_2 = 12,8 \text{ cm}. \text{ Damit ist die Gitterkonstante } g \approx 2 \cdot \lambda \cdot \frac{a}{x_2} \approx 0,01 \text{ cm und } \frac{1}{g} \approx \frac{100}{\text{cm}},$$

d. h., das Kreuzgitter hat in horizontaler und in vertikaler Richtung jeweils etwa 100 Striche pro Zentimeter.



c) Am Beugungsbild erkennt man, dass das markierte Helligkeitsmaximum eines der Maxima ist, die auf der  $45^\circ$ -Diagonalen liegen. Dementsprechend liegen die Gitteröffnungen, aus denen die am Schirmort konstruktiv interferierenden Elementarwellen austreten, jeweils auf den  $45^\circ$ -Diagonalen des Kreuzgitters.

d) Die Gitterkonstante  $g'$  ist der halbe Abstand zwischen zwei diagonal benachbarten Gitteröffnungen und ergibt sich aufgrund der quadratischen Anordnung mit Hilfe des

Satzes von Pythagoras zu  $g' = \frac{\sqrt{2} \cdot g}{2} = \frac{g}{\sqrt{2}}$ .

Zur Bestimmung des Gangunterschiedes  $d$  wendet man die Gleichung  $\frac{d}{g'} = \frac{x'}{a}$  an,

wobei  $x'$  der Abstand des betrachteten Maximums vom Maximum 0. Ordnung ist.

Letzterer ist  $x' = \sqrt{2} \cdot x_1$ , wobei  $x_1$  der Abstand des Maximums 1. Ordnung (in horizontaler bzw. vertikaler Richtung) vom Maximum 0. Ordnung ist. Durch Einsetzen erhält

man  $d = \frac{x'}{a} \cdot g' = \frac{x_1}{a} \cdot g = \lambda$ .

### Teilaufgabe 5

a) Die Abstände der Maxima im Beugungsbild verhalten sich umgekehrt zur Gitterkonstanten. Eine kleine Gitterkonstante erzeugt große Abstände und umgekehrt.

b) Das Beugungsbild besteht im Zentrum aus einer Reihe von Maxima, die durch ein Gitter mit vertikalen Strichen erzeugt worden sind. Dieses Gitter lässt aufgrund der vergleichsweise kleinen Abstände zwischen den Maxima auf eine größere Gitterkonstante schließen. Dieses Muster wiederholt sich (schwächer) in den vier Ecken von Abbildung 9. Es ist auf Interferenzmaxima des Kreuzgitters in 1. Ordnung zurückzuführen. Die kleinere Gitterkonstante des Kreuzgitters führt zu größeren Abständen zum Maximum 0. Ordnung im Zentrum.

**7. Teilleistungen – Kriterien / Bewertungsbogen zur Prüfungsarbeit**

Name des Prüflings: \_\_\_\_\_ Kursbezeichnung: \_\_\_\_\_

Schule: \_\_\_\_\_

**Teilaufgabe 1**

	Anforderungen	Lösungsqualität			
		maximal erreichbare Punktzahl	EK <sup>2</sup>	ZK	DK
	<b>Der Prüfling</b>				
a)	erläutert ausgehend vom Huygens'schen Prinzip die Entstehung von Hauptmaxima der Intensität im Beugungsbild eines Mehrfachspaltes.	4			
b)	leitet mit Hilfe einer geeigneten Skizze die Beziehung $k \cdot \lambda = g \cdot \sin \alpha_k$ für die Winkel $\alpha_k$ her, unter denen beim Mehrfachspalt Hauptmaxima auftreten.	4			
Sachlich richtige Lösungsalternative zur Modelllösung: (8) ..... .....					
	<b>Summe Teilaufgabe 1</b>	<b>8</b>			

<sup>2</sup> EK = Erstkorrektur; ZK = Zweitkorrektur; DK = Drittkorrektur

**Teilaufgabe 2**

Anforderungen		Lösungsqualität			
Der Prüfling		maximal erreichbare Punktzahl	EK	ZK	DK
a1)	ordnet die Abbildungen den vier Beugungsobjekten zu.	3			
a2)	begründet die Zuordnung.	4			
b1)	bestimmt anhand einer der drei entsprechenden Abbildungen den Spaltabstand $g$ der Mehrfachspalte.	4			
b2)	begründet die verwendeten Gleichungen.	3			
c)	leitet mit Hilfe einer geeigneten Skizze die Gleichung $\lambda = b \cdot \sin \alpha_1$ für den Winkel $\alpha_1$ her, unter dem bei dem Einzelspalt der Breite $b$ das erste Minimum der Intensität auftritt.	6			
d)	erläutert, wie sich eine Vergrößerung bzw. Verkleinerung der Spaltbreite $b$ auf das Beugungsbild des Einzelspalt auswirkt.	3			
Sachlich richtige Lösungsalternative zur Modelllösung: (23) ..... .....					
<b>Summe Teilaufgabe 2</b>		<b>23</b>			

**Teilaufgabe 3**

Anforderungen		Lösungsqualität			
Der Prüfling		maximal erreichbare Punktzahl	EK	ZK	DK
a)	begründet mit Hilfe des Beugungsbildes am Einzelspalt, warum die Maxima nicht alle gleich hell und bestimmte Maxima sogar ausgelöscht sind.	5			
b)	entscheidet anhand einer Rechnung, welcher der vier Doppelspalte für das Beugungsbild in Abbildung 3 verwendet wurde.	3			
Sachlich richtige Lösungsalternative zur Modelllösung: (8) ..... .....					
<b>Summe Teilaufgabe 3</b>		<b>8</b>			

**Teilaufgabe 4**

Anforderungen		Lösungsqualität			
Der Prüfling		maximal erreichbare Punktzahl	EK	ZK	DK
a)	erläutert die Entstehung der horizontalen und der vertikalen Reihe von Helligkeitsmaxima, die in Abbildung 6 durch die gestrichelten Linien markiert sind.	3			
b)	ermittelt durch eine rechnerische Auswertung der Maxima 2. Ordnung die Bedeutung der Aufschrift.	5			
c)	erläutert, welche Elementarwellen nach dem Huygens'schen Prinzip für dieses Helligkeitsmaximum konstruktiv interferieren.	3			
d1)	zeigt, dass $g' = g / \sqrt{2}$ ist.	3			
d2)	zeigt, dass der Gangunterschied benachbarter Elementarwellen $d = \lambda$ ist.	4			
Sachlich richtige Lösungsalternative zur Modelllösung: (18) ..... .....					
<b>Summe Teilaufgabe 4</b>		<b>18</b>			

**Teilaufgabe 5**

Anforderungen		Lösungsqualität			
Der Prüfling		maximal erreichbare Punktzahl	EK	ZK	DK
a)	erklärt allgemein, welchen Einfluss die Größe der Gitterkonstante auf das Beugungsbild hat.	3			
b)	erläutert den Zusammenhang zwischen der Struktur der Vogelfeder und ihrem Beugungsbild.	5			
Sachlich richtige Lösungsalternative zur Modelllösung: (8) ..... .....					
<b>Summe Teilaufgabe 5</b>		<b>8</b>			

<b>Summe insgesamt</b>		<b>65</b>			
------------------------	--	-----------	--	--	--

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

	Lösungsqualität			
	maximal erreichbare Punktzahl	EK	ZK	DK
<b>Übertrag der Punktsumme aus der ersten bearbeiteten Aufgabe</b>	<b>65</b>			
<b>Übertrag der Punktsumme aus der zweiten bearbeiteten Aufgabe</b>	<b>65</b>			
<b>Punktzahl der gesamten Prüfungsleistung</b>	<b>130</b>			
<b>aus der Punktsumme resultierende Note</b>				
<b>Note ggf. unter Absenkung um ein bis zwei Notenpunkte gemäß § 13 Abs. 2 APO-GOST</b>				
<b>Paraphe</b>				

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:

<b>Note</b>	<b>Punkte</b>	<b>Erreichte Punktzahl</b>
sehr gut plus	15	130 – 124
sehr gut	14	123 – 117
sehr gut minus	13	116 – 111
gut plus	12	110 – 104
gut	11	103 – 98
gut minus	10	97 – 91
befriedigend plus	9	90 – 85
befriedigend	8	84 – 78
befriedigend minus	7	77 – 72
ausreichend plus	6	71 – 65
ausreichend	5	64 – 59
ausreichend minus	4	58 – 51
mangelhaft plus	3	50 – 43
mangelhaft	2	42 – 34
mangelhaft minus	1	33 – 26
ungenügend	0	25 – 0



Name: \_\_\_\_\_

# Abiturprüfung 2014

## Physik, Leistungskurs

---

### Aufgabenstellung:

#### Aufgabe: **Atommodelle – Bohr'sches Atommodell und Modell des linearen Potenzialtopfes**

##### Teilaufgabe 1: Bohr'sches Atommodell

Bei den Untersuchungen der Naturgesetze spielt das chemische Element Wasserstoff seit vielen Jahren eine Schlüsselrolle. Sein Atomkern besteht aus einem einzigen Proton, um den ein Elektron der Ruhemasse  $m_e = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$  kreist. Für die Energieniveaus in diesem denkbar einfachen Atom liefert die Quantentheorie sehr genaue Vorhersagen.

Das Bohr'sche Atommodell ist das erste Atommodell, das Elemente der Quantenmechanik enthält, es wurde 1913 von Niels Bohr entwickelt. Anders als ältere Atommodelle zeigt das Bohr'sche Atommodell viele der am Wasserstoffatom beobachteten Eigenschaften.

Für die Rechnungen in dieser Aufgabe sind folgende Größenwerte zu verwenden:

$$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{J} \cdot \text{m}}$$

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

$$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$m_e = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

- a) Für das Wasserstoffatom können nach der Bohr'schen Theorie die Radien der  $n$ -ten Bahnen gemäß

$$r_n = \frac{\epsilon_0 \cdot h^2}{e^2 \cdot m_e \cdot \pi} \cdot n^2 \quad \text{mit } n = 1; 2; 3; \dots \text{ berechnet werden.}$$

Zeigen Sie, wie sich daraus  $r_n = 5,29 \cdot 10^{-11} \text{ m} \cdot n^2$  ergibt, und bestätigen Sie durch Rückführung auf die SI-Basiseinheiten (kg, m, s, A), dass die rechte Seite der Gleichung die Dimension einer Länge hat.



Name: \_\_\_\_\_

b) Dem Elektron ist auf den Bohr'schen Bahnen des Wasserstoffatoms die Energie

$$E_n = -13,6 \text{ eV} \cdot \frac{1}{n^2} \text{ mit } n = 1; 2; 3; \dots \text{ zugeordnet.}$$

*Erläutern Sie die Bedeutung des Energiewertes 13,6 eV für das Wasserstoffatom.*

*Beschreiben Sie einen experimentellen Beleg für die Existenz diskreter Energiezustände in der Atomhülle.*

c) Aus Spektren kann man vielfältige Informationen über den Aufbau eines Atoms gewinnen, grundsätzlich unterscheidet man zwei Typen von Spektren: Emissionsspektren und Absorptionsspektren.

*Erläutern Sie den wesentlichen Unterschied und stellen Sie jeweils ein konkretes Experiment dar, bei dem das Absorptions- bzw. das Emissionsspektrum von Atomen untersucht wird.*

d) Wie jedes Modell spiegelt das Bohr'sche Atommodell die objektive Realität nur teilweise wider.

*Erläutern Sie zwei Sachverhalte für die Grenzen dieses Modells.*

(20 Punkte)

## **Teilaufgabe 2: Exotische Atome**

Bereits 1935 wurde von dem japanischen Physiker Yukawa ein Teilchen vorausgesagt, das in allen seinen Eigenschaften dem Elektron gleicht, nur sollte seine Ruhemasse wesentlich größer sein.

Bei der experimentellen Suche nach diesem Teilchen wurde 1937 zunächst das Myon entdeckt, für seine Ruhemasse gilt:  $m_\mu = 207 \cdot m_e$ .

Dringen Myonen in Materie ein, werden sie schnell abgebremst und können, wenn sie hinreichend energiearm sind, z. B. von Protonen eingefangen werden. Ein Proton und ein Myon bilden dann ein Zweiteilchensystem, ein sogenanntes Myon-Wasserstoff-Atom, auf das die Bohr'sche Theorie angewendet werden kann.





Name: \_\_\_\_\_

Für die Gesamtenergie des Myons in einem Myon-Wasserstoff-Atom auf der  $n$ -ten Quantenbahn gilt

$$E_n = -\frac{e^4 \cdot m_\mu}{8 \cdot \epsilon_0^2 \cdot h^2} \cdot \frac{1}{n^2}$$

a) Bestimmen Sie einen vereinfachten Term, indem Sie die Ionisationsenergie  $13,6 \text{ eV}$  des Wasserstoffatoms einführen.

Geben Sie die Ionisationsenergie eines Myon-Wasserstoff-Atoms an.

b) Berechnen sie die Energien für die drei niedrigsten Energieniveaus des Myons und stellen Sie diese in einem Energieniveauschema maßstäblich grafisch dar.

c) Berechnen Sie die Wellenlängen des Übergangs von  $n = 3$  auf  $n = 2$  für das Wasserstoffatom und das Myon-Wasserstoff-Atom und geben Sie für die Übergänge den Spektralbereich an.

d) Überprüfen Sie für das Myon-Wasserstoff-Atom, ob im Bereich  $1 \leq n \leq 4$  überhaupt sichtbares Licht emittiert werden kann.

e) Geben Sie eine Formel für die Radien  $r_{n,\mu}$  der  $n$ -ten Bahnen des Myons in einem Myon-Wasserstoff-Atom gemäß der Bohr'schen Theorie an.

Bestimmen Sie den Radius  $r_{1,\mu}$  für die kernnächste Bahn.

[Zur Kontrolle:  $r_{1,\mu} \approx 2,56 \cdot 10^{-13} \text{ m}$  ]

f) Zeigen Sie, dass sich im Grundzustand die Volumina eines Myon-Wasserstoff-Atoms und eines Wasserstoffatoms etwa wie  $1:10^7$  verhalten.

(30 Punkte)



Name: \_\_\_\_\_

### Teilaufgabe 3

Mit dem Bohr'schen Atommodell konnten viele experimentelle Beobachtungen an Wasserstoff oder wasserstoffähnlichen Atomen erklärt werden, es weist aber deutliche Grenzen auf. 1925 entwickelte Schrödinger ein quantenmechanisches Atommodell. Eine sehr einfache Veranschaulichung von Schrödingers Vorstellung stellt das Modell des linearen Potenzialtopfes dar. In diesem Modell wird ein Elektron, das in einem linearen Potenzialtopf vom Durchmesser  $L$  mit unendlich hohen Wänden eingeschlossen ist, durch eine Wellenfunktion  $\psi$  beschrieben.

a) Nennen Sie die Eigenschaften dieses Modells im Hinblick auf den Aufenthaltsort und die Energie des Elektrons.

b) Im linearen Potenzialtopf kann eine solche Wellenfunktion  $\psi$  nur als stehende Welle existieren.

*Zeichnen Sie zwei mögliche Wellenfunktionen im linearen Potenzialtopf mit Durchmesser  $L$ .*

c) Für die möglichen Gesamtenergien des Elektrons im linearen Potenzialtopf mit Durchmesser  $L$  gilt die Beziehung

$$E_n = \frac{n^2 \cdot h^2}{8 \cdot m_e \cdot L^2} \quad \text{mit } n = 1; 2; 3; \dots$$

*Leiten Sie diese Beziehung für die möglichen Gesamtenergien des Elektrons im linearen Potenzialtopf ausgehend von den Eigenschaften stehender Wellen her.*

d) Vergleichen Sie die oben angegebene Energieformel für die möglichen Gesamtenergien des Elektrons im linearen Potenzialtopf mit der Energieformel von Bohr aus Teilaufgabe 1 und gehen Sie dabei auf die wesentlichste Gemeinsamkeit und den wesentlichsten Unterschied ein.

(15 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, Leistungskurs

### 1. Aufgabenart

Bearbeitung einer Aufgabe, die fachspezifisches Material enthält

### 2. Aufgabenstellung<sup>1</sup>

**Aufgabe: Atommodelle – Bohr'sches Atommodell und Modell des linearen Potenzialtopfes**

(65 Punkte)

**Hinweis:** Kombinierbar entweder mit 1NT 1, 1NT 2 oder 1NT 4

### 3. Materialgrundlage

- entfällt

### 4. Bezüge zu den Vorgaben 2014

#### 1. Inhaltliche Schwerpunkte

- Atom- und Kernphysik
  - Energiequantelung des Atoms
  - Atommodelle (Bohr'sches Atommodell)
  - Potenzialtopfmodell (eindimensional)
- Quanteneffekte
  - Wellenaspekt des Elektrons: De-Broglie-Theorie des Elektrons

#### 2. Medien/Materialien

- entfällt

### 5. Zugelassene Hilfsmittel

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

<sup>1</sup> 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) Mit

$$\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{J} \cdot \text{m}}$$

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

$$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$m_e = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

folgt:

$$r_n = \frac{8,854 \cdot 10^{-12} \cdot (6,626 \cdot 10^{-34})^2}{(1,602 \cdot 10^{-19})^2 \cdot 9,109 \cdot 10^{-31} \cdot \pi} \cdot n^2 \cdot \frac{\text{C}^2 \cdot \text{J}^2 \cdot \text{s}^2}{\text{J} \cdot \text{m} \cdot \text{C}^2 \cdot \text{kg}} = 5,293 \cdot 10^{-11} \text{ m} \cdot n^2$$

b) (1) Der Energiewert von 13,6 eV entspricht der Ionisationsenergie des Wasserstoffatoms, also der Energie, die dem Elektron auf der innersten Bahn ( $n = 1$ ) zugefügt werden muss, um es vollständig aus dem Atom zu entfernen ( $n = \infty$ ).

- (2) – Emissionsspektren von Gasen sind Linienspektren, z. B. bei der Balmer-Serie.  
– Resonanzabsorption, z. B. Franck-Hertz-Experiment

c) Unter dem Emissionsspektrum versteht man das elektromagnetische Spektrum, das z. B. von Atomen nach geeigneter Anregung (Erhitzung, Stoß durch Elektronen usw.) ausgesandt wird.

Ein Absorptions- oder Absorptionslinienspektrum ist ein elektromagnetisches Spektrum, das entsteht, wenn breitbandiges (weißes) Licht Materie durchstrahlt und Lichtquanten (Photonen) bestimmter Wellenlängen oder Wellenlängenbereiche dabei absorbiert werden (Resonanzabsorption). Die absorbierten Photonen fehlen im hindurchtretenden Licht. Deshalb ist das Spektrum bei den betreffenden Wellenlängen dunkel oder im Extremfall schwarz.

Zum Beispiel emittiert eine Natriumdampflampe im sichtbaren Bereich nur wenige im gelben Teilbereich liegende Linien (Emissionsspektrum). Schickt man aber weißes Licht durch Natriumdampf und analysiert das durchgesandte Licht mit einem Spektrometer, so stellt man fest, dass im kontinuierlichen Spektrum des weißen Lichts nun genau die Linien fehlen, die im ersten Versuch als Emissionslinien auftraten: Absorptionslinien, Absorptionsspektrum.

d) Mögliche Sachverhalte: Das Bohr'sche Atommodell ...

- gibt keine Gründe dafür an, dass sich ein Elektron strahlungsfrei und nur auf bestimmten erlaubten Kreisbahnen bewegt,
- ermöglicht keine genaue theoretische Herleitung der Spektren von Atomen und Ionen mit mehr als einem Elektron in der Hülle,
- steht im Widerspruch zur Heisenberg'schen Unschärferelation, nach der Radius und Geschwindigkeit des Elektrons nicht gleichzeitig scharf bestimmt werden können,
- berücksichtigt nicht die Wellennatur der Elektronen.

## Teilaufgabe 2

$$a) E_n = -\frac{e^4 \cdot m_\mu}{8 \cdot \epsilon_0^2 \cdot h^2} \cdot \frac{1}{n^2} = -\frac{e^4 \cdot m_e}{8 \cdot \epsilon_0^2 \cdot h^2} \cdot \frac{m_\mu}{m_e} \cdot \frac{1}{n^2} = -13,6 \text{ eV} \cdot \frac{m_\mu}{m_e} \cdot \frac{1}{n^2}$$

Für die Ionisationsenergie des Myon-Wasserstoff-Atoms gilt damit:

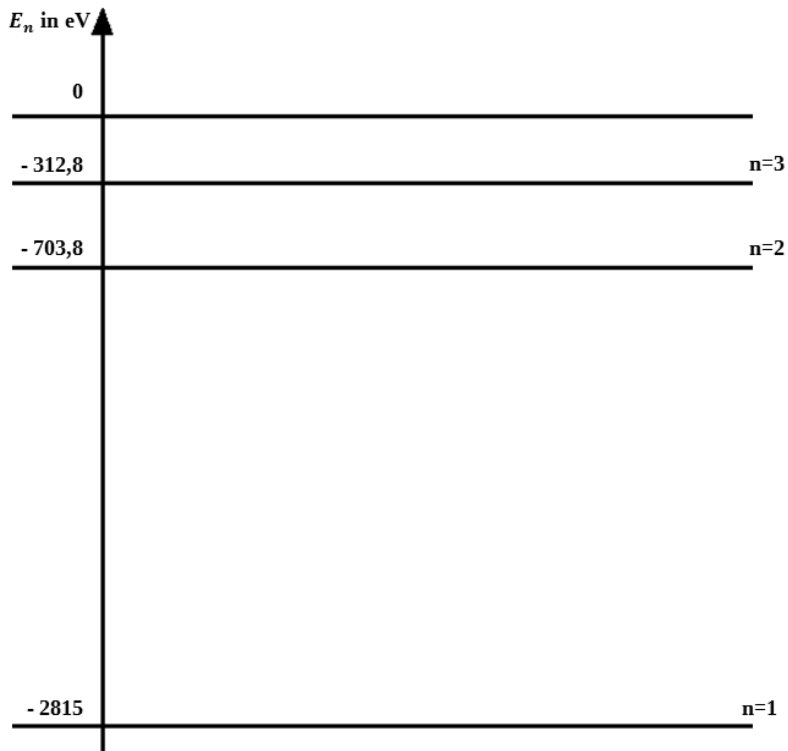
$$E_\infty - E_1 = 0 - \left(-13,6 \text{ eV} \cdot \frac{m_\mu}{m_e} \cdot \frac{1}{1^2}\right) = 13,6 \text{ eV} \cdot 207 = 2815 \text{ eV}.$$

$$b) E_n = -13,6 \text{ eV} \cdot \frac{m_\mu}{m_e} \cdot \frac{1}{n^2} = -13,6 \text{ eV} \cdot 207 \cdot \frac{1}{n^2} = -2815 \text{ eV} \cdot \frac{1}{n^2}, \text{ also}$$

$$E_1 = -2815 \text{ eV}$$

$$E_2 = -703,8 \text{ eV}$$

$$E_3 = -312,8 \text{ eV}$$



c) Für beide Atome gilt:  $\Delta E = E_3 - E_2 = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda}$ , also  $f = \frac{h \cdot c}{\Delta E}$ .

Für das Wasserstoffatom gilt:

$$\Delta E = E_3 - E_2 = -13,6 \text{ eV} \cdot \left( \frac{1}{3^2} - \frac{1}{2^2} \right) = 1,89 \text{ eV}$$

$$\lambda = 656,5 \text{ nm} \quad \left( f = \frac{1,89 \text{ eV}}{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}} = 4,57 \cdot 10^{14} \text{ Hz} \right)$$

sichtbarer Bereich, rot.

Für das Myon-Wasserstoff-Atom gilt:

$$\Delta E = E_3 - E_2 = -2815,2 \text{ eV} \cdot \left( \frac{1}{3^2} - \frac{1}{2^2} \right) = 391,0 \text{ eV}$$

$$\lambda = 3,175 \text{ nm} \quad \left( f = \frac{391,0 \text{ eV}}{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}} = 9,45 \cdot 10^{16} \text{ Hz} \right)$$

Übergangsbereich von der starken UV-Strahlung in die Röntgenstrahlung

- d) Sichtbares Licht bedeutet kleinere Frequenzen als bei c) berechnet, die kleinste Frequenz kann beim Übergang von  $n = 4$  auf  $n = 3$  erreicht werden, für diesen Übergang gilt:

$$\Delta E = E_4 - E_3 = -2815,2 \text{ eV} \cdot \left( \frac{1}{4^2} - \frac{1}{3^2} \right) = 136,85 \text{ eV} .$$

$$f = \frac{136,85 \text{ eV}}{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}} = 3,31 \cdot 10^{16} \text{ Hz} , \text{ diese Frequenz liegt nicht im sichtbaren Bereich.}$$

- e) Nach der Bohr'schen Theorie gilt für die Bahnen des Elektrons im „natürlichen“ Wasserstoffatom:

$$r_{n,e} = \frac{\epsilon_0 \cdot h^2}{e^2 \cdot m_e \cdot \pi} \cdot n^2 \text{ und damit für die Radien im Myon-Wasserstoff-Atom entsprechend:}$$

$$r_{n,\mu} = \frac{\epsilon_0 \cdot h^2}{e^2 \cdot m_\mu \cdot \pi} \cdot n^2 , \text{ also } r_{n,\mu} = \frac{1}{207} \cdot r_{n,e} , \text{ und damit gilt für den Radius der kernnächsten}$$

$$\text{Bahn des Myons im Myon-Wasserstoff-Atom: } r_{1,\mu} \approx 2,56 \cdot 10^{-13} \text{ m} .$$

- f) Beschreibt man die räumliche Ausdehnung von Atomen gemäß der Bohr'schen Vorstellung durch Kugeln, so folgt für das Volumen der Atome in nicht angeregtem Zustand:

$$\frac{V_\mu}{V_e} = \frac{\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_\mu^3}{\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_e^3} = \frac{r_\mu^3}{r_e^3} = \frac{1}{207^3} \approx 1 : 10^7$$

### Teilaufgabe 3

- a) Innerhalb des Potenzialtopfes wirken keine Kräfte auf das Elektron, d. h., für die potenzielle Energie des Elektrons gilt:  $E_{\text{pot}} = 0$  .

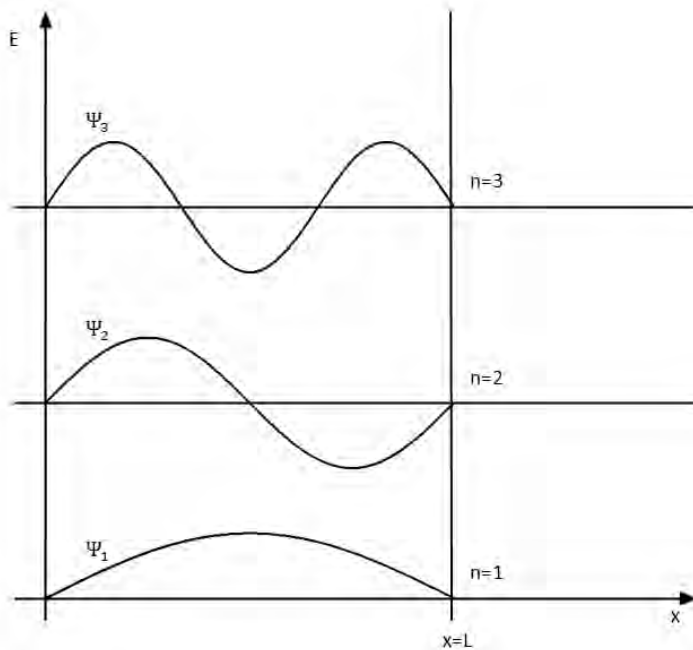
Außerhalb des Topfes ist die potenzielle Energie unendlich groß, das Elektron wird an der Begrenzung, die als Wand wirkt, abgestoßen, es kann nicht in die Wand eindringen, die Aufenthaltswahrscheinlichkeit im Bereich der Wände ist null.

Nicht alle Orte innerhalb des Potenzialtopfes haben die gleiche Aufenthaltswahrscheinlichkeit, das Elektron ist kein klassisches Teilchen mehr, seine Antreffwahrscheinlichkeit wird durch eine Wellenfunktion  $\psi$  beschrieben.

Wenn das Elektron im Bereich des Potenzialtopfes bleibt, muss die Wellenfunktion  $\psi$  eine stehende Welle beschreiben.

- b) Für die Wellenlänge der stehenden Welle gilt die Bedingung:  $\frac{\lambda}{2} \cdot n = L$ , mit  $n = 1; 2; 3; \dots$

Die Abbildung zeigt die ersten drei Wellenfunktionen eines Teilchens im linearen Potenzialtopf der Länge  $L$ .



- c) Mit der Voraussetzung  $E_{\text{pot}} = 0$  ist:  $E = E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m_e \cdot v^2 = \frac{p^2}{2 \cdot m_e}$ .

Nach de Broglie ist:  $\lambda = \frac{h}{p}$ .

Für die Wellenlänge gilt:  $\frac{\lambda}{2} \cdot n = L$ .

Damit folgt  $p = \frac{h}{2 \cdot L} \cdot n$  und für die Energie  $E_n = \frac{h^2}{8 \cdot m_e \cdot L^2} \cdot n^2$  mit  $n = 1; 2; 3; \dots$

- d) Die wesentlichste Gemeinsamkeit ist in der Quantelung der möglichen Gesamtenergien zu sehen, der wesentliche Unterschied besteht in der Abhängigkeit von  $n^2$  bzw.  $\frac{1}{n^2}$ .

Während beim Bohr'schen Atommodell den experimentellen Ergebnissen entsprechend die Energieniveaus mit größer werdendem  $n$  immer dichter beieinanderliegen, beschreibt das Modell des linearen Potenzialtopfes genau das Gegenteil.



**7. Teilleistungen – Kriterien / Bewertungsbogen zur Prüfungsarbeit**

Name des Prüflings: \_\_\_\_\_ Kursbezeichnung: \_\_\_\_\_

Schule: \_\_\_\_\_

**Teilaufgabe 1**

Anforderungen		Lösungsqualität			
		maximal erreichbare Punktzahl	EK <sup>2</sup>	ZK	DK
	<b>Der Prüfling</b>				
a1)	zeigt durch Einsetzen der angegebenen Werte den gesuchten Zusammenhang.	3			
a2)	bestätigt, dass die rechte Seite der Gleichung die Dimension einer Länge hat.	2			
b1)	erläutert die Bedeutung des Energiewertes als Ionisationsenergie des Wasserstoffatoms.	2			
b2)	beschreibt einen experimentellen Beleg für die Existenz diskreter Energiezustände in der Atomhülle.	3			
c1)	erläutert den wesentlichen Unterschied.	2			
c2)	stellt jeweils ein konkretes Experiment dar, bei dem das Absorptions- bzw. das Emissionsspektrum von Atomen untersucht wird.	4			
d)	erläutert zwei Sachverhalte für die Grenzen des Bohr'schen Atommodells.	4			
Sachlich richtige Lösungsalternative zur Modellösung: (20) ..... .....					
<b>Summe Teilaufgabe 1</b>		<b>20</b>			

<sup>2</sup> EK = Erstkorrektur; ZK = Zweitkorrektur; DK = Drittkorrektur

**Teilaufgabe 2**

	Anforderungen	Lösungsqualität			
		maximal erreichbare Punktzahl	EK	ZK	DK
	<b>Der Prüfling</b>				
a1)	bestimmt einen vereinfachten Term, indem er die Ionisationsenergie des Wasserstoffatoms einführt.	4			
a2)	gibt die Ionisationsenergie des Myon-Wasserstoff-Atoms an.	2			
b1)	berechnet die Energien für die drei niedrigsten Energieniveaus des Myons.	3			
b2)	stellt die Energieniveaus in einem Energieniveauschema maßstäblich grafisch dar.	4			
c1)	berechnet jeweils die Wellenlänge des Übergangs.	3			
c2)	gibt jeweils den Spektralbereich an.	2			
d)	überprüft, ob im Bereich $1 \leq n \leq 4$ sichtbares Licht emittiert werden kann.	3			
e1)	gibt eine Formel an.	3			
e2)	bestimmt den Radius.	3			
f)	zeigt, dass sich im Grundzustand die Volumina eines Myon-Wasserstoff-Atoms und eines Wasserstoffatoms etwa wie $1 : 10^7$ verhalten.	3			
Sachlich richtige Lösungsalternative zur Modelllösung: (30)					
.....					
.....					
	<b>Summe Teilaufgabe 2</b>	<b>30</b>			

**Teilaufgabe 3**

	Anforderungen	Lösungsqualität			
		maximal erreichbare Punktzahl	EK	ZK	DK
	<b>Der Prüfling</b>				
a)	nennt die Eigenschaften dieses Modells im Hinblick auf den Aufenthaltsort und die Energie des Elektrons im Atom.	4			
b)	zeichnet zwei mögliche Wellenfunktionen.	2			
c)	leitet die Beziehung für die möglichen Gesamtenergien des Elektrons im linearen Potenzialtopf ausgehend von den Eigenschaften stehender Wellen her.	5			
d)	vergleicht die beiden Energieformeln und nennt die wesentlichste Gemeinsamkeit und den wesentlichsten Unterschied.	4			
Sachlich richtige Lösungsalternative zur Modelllösung: (15) ..... .....					
<b>Summe Teilaufgabe 3</b>		<b>15</b>			

<b>Summe insgesamt</b>	<b>65</b>			
------------------------	-----------	--	--	--

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

	Lösungsqualität			
	maximal erreichbare Punktzahl	EK	ZK	DK
<b>Übertrag der Punktzahl aus der ersten bearbeiteten Aufgabe</b>	<b>65</b>			
<b>Übertrag der Punktzahl aus der zweiten bearbeiteten Aufgabe</b>	<b>65</b>			
<b>Punktzahl der gesamten Prüfungsleistung</b>	<b>130</b>			
<b>aus der Punktzahl resultierende Note</b>				
<b>Note ggf. unter Absenkung um ein bis zwei Notenpunkte gemäß § 13 Abs. 2 APO-GOST</b>				
<b>Paraphe</b>				

ggf. arithmetisches Mittel der Punktzahlen 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:

<b>Note</b>	<b>Punkte</b>	<b>Erreichte Punktzahl</b>
sehr gut plus	15	130 – 124
sehr gut	14	123 – 117
sehr gut minus	13	116 – 111
gut plus	12	110 – 104
gut	11	103 – 98
gut minus	10	97 – 91
befriedigend plus	9	90 – 85
befriedigend	8	84 – 78
befriedigend minus	7	77 – 72
ausreichend plus	6	71 – 65
ausreichend	5	64 – 59
ausreichend minus	4	58 – 51
mangelhaft plus	3	50 – 43
mangelhaft	2	42 – 34
mangelhaft minus	1	33 – 26
ungenügend	0	25 – 0



Name: \_\_\_\_\_

# Abiturprüfung 2014

## Physik, Leistungskurs

---

### Aufgabenstellung:

#### **Aufgabe: Grundlegende Überlegungen zur Energiegewinnung mit Hilfe von Kernspaltung und Kernfusion**

In Kernkraftwerken wird zur Gewinnung elektrischer Energie ganz überwiegend die sogenannte induzierte Kernspaltung des Uran-Isotops U 235 genutzt. Unter induzierter Kernspaltung versteht man die Spaltung eines schweren Atomkerns in zwei leichtere Kerne durch Beschuss mit Neutronen. Im Zusammenhang mit der Kernspaltung ergeben sich einige noch kaum gelöste sicherheitstechnische Probleme.

Eine andere sehr interessante Möglichkeit der Energiegewinnung durch nukleare Prozesse ist die Kernfusion, bei der zwei leichte Atomkerne zu einem schwereren „verschmolzen“ werden. Dabei sind einige Sicherheitsaspekte deutlich weniger bedenklich als bei der Spaltung von schweren Kernen, allerdings ist die Nutzung der Kernfusion zur Energieversorgung technisch nur sehr schwer realisierbar.

#### **Teilaufgabe 1**

- a) Wird ein Uran-235-Atomkern von einem („langsamen“) Neutron getroffen, so zerfällt er in Bruchteilen einer Sekunde z. B. in Krypton 90 (Kr 90) und einen weiteren mittelschweren Kern. Zugleich werden bei diesem Spaltungsprozess (z. B.) drei Neutronen sowie eine Energie von ca. 190 MeV frei.

*Stellen Sie mit Hilfe der in Abbildung 1 gezeigten Nuklidkartenausschnitte die zugehörige Reaktionsgleichung auf und ermitteln Sie, welches weitere Nuklid bei dieser Kernreaktion entsteht.*

- b) Das Spaltprodukt Kr 90 zerfällt über diverse weitere Zerfallsprodukte bis hin zum stabilen Endprodukt Zirkonium 90 (Zr 90).

*Geben Sie die jeweiligen Zerfälle vom Kr 90 bis zum Zr 90 an und begründen Sie, warum nur Beta-Zerfälle in dieser Zerfallsreihe vorkommen können. (9 Punkte)*



Name: \_\_\_\_\_

		<b>Pu 237</b> 45,2 d st h: 5,334... γ: 62, 2300	<b>Pu 238</b> 87,74 a st h: 5,499; 5,456... st: S; Mg γ: 483; 100... α: 510; η: 17	<b>Pu 239</b> 2,411 · 10 <sup>4</sup> a st h: 5,157; 5,144... st: γ (52...) α: 276; η: 752	<b>Pu 240</b> 6563 a st h: 5,168; 5,124... st: γ (45...) α: 296; η: 0,044	<b>Pu 241</b> 14,35 a st h: 5,002; g α: 4,856... γ: 1169; 1010 α: 373; η: 1010	<b>Pu 242</b> 3,750 · 10 <sup>5</sup> a st h: 4,801; 4,856... st: γ (45...) α: 18; η: 0,2		
		<b>Np 236</b> 22,5 h st h: 4,65... γ: 842; γ: 180; 688; γ: 194... α: 279; η: 2000	<b>Np 237</b> 2,144 · 10 <sup>6</sup> a st h: 4,790; 4,774... α: 29; 87... α: 189; η: 5,020	<b>Np 238</b> 2,117 d st β <sup>-</sup> : 1,2... γ: 984; 1029; 1026; 924... g: η: 2100	<b>Np 239</b> 2,355 d st β <sup>-</sup> : 0,4; 0,7... γ: 106; 278; 226... α: 32... η: < 1	<b>Np 240</b> 7,22 m 65 m st h: 2,2... α: 505; γ: 566; 587; 974; 601; h: 488; g	<b>Np 241</b> 13,9 m st β <sup>-</sup> : 1,3... γ: 175; (133...) g		
		<b>U 235</b> 0,7200 25 m 7,038 · 10 <sup>8</sup> a st h: 4,398... Nα: γ: 196... α: 35; η: 5,4	<b>U 236</b> 120 ns 2,342 · 10 <sup>7</sup> a st h: 4,494... α: 4,445... st: γ (49...) α: 113; γ: 5,1	<b>U 237</b> 6,75 d st β <sup>-</sup> : 0,2... γ: 60; 208... α: 100; η: < 0,35	<b>U 238</b> 99,2745 270 ns 4,468 · 10 <sup>9</sup> a st h: 4,796... α: 27; η: 1,4	<b>U 239</b> 23,5 m st β <sup>-</sup> : 1,2; 1,3... γ: 75; 44... α: 22; η: 15	<b>U 240</b> 14,1 h st β <sup>-</sup> : 0,4... γ: 44; (190...) α: m		
		<b>La 140</b> 40,272 h st β <sup>-</sup> : 1,4; 2,2... γ: 1596; 4577; 816; 329... α: 2,7	<b>La 141</b> 3,93 h st β <sup>-</sup> : 2,4... γ: 1355...	<b>La 142</b> 92,5 m st β <sup>-</sup> : 2,1; 4,5... γ: 641; 2398; 2543...	<b>La 143</b> 14,23 m st β <sup>-</sup> : 3,3... γ: 621; 644...	<b>La 144</b> 40,9 s st β <sup>-</sup> : 4,1; 4,4... γ: 397; 541; 645...	<b>La 145</b> 24,8 s st β <sup>-</sup> : 4,0; 4,1... γ: 70; 356; 118; 170; 447; 1819...		
		<b>Ba 139</b> 83,06 m st β <sup>-</sup> : 2,4... γ: 166; (1421...) α: 1,6	<b>Ba 140</b> 12,75 d st β <sup>-</sup> : 1,0... γ: 537; 30; 163; 305... α: 1,6	<b>Ba 141</b> 18,3 m st β <sup>-</sup> : 2,8; 3,0... γ: 190; 304; 277; 344...	<b>Ba 142</b> 10,7 m st β <sup>-</sup> : 1,0; 1,7... γ: 255; 1204; 895...	<b>Ba 143</b> 14,5 s st β <sup>-</sup> : 4,2... γ: 211; 799; 980; 1011...	<b>Ba 144</b> 11,5 s st β <sup>-</sup> : 2,4; 2,9... γ: 104; 430; 173; 157; 988...		
		<b>Cs 138</b> 2,90 m 32,2 m st h: 80; α: β <sup>-</sup> : 2,8... β <sup>-</sup> : 3,0... γ: 1438... 463; 463; 192...	<b>Cs 139</b> 9,3 m st β <sup>-</sup> : 4,2... γ: 1283; 627; 1421...	<b>Cs 140</b> 63,7 s st β <sup>-</sup> : 5,6; 6,2... γ: 602; 909; 1201...	<b>Cs 141</b> 24,94 s st β <sup>-</sup> : 4,8; 5,62; 1194; 589... βn	<b>Cs 142</b> 1,70 s st β <sup>-</sup> : 5,2... γ: 360; 1326; 967... βn	<b>Cs 143</b> 1,78 s st β <sup>-</sup> : 5,9... γ: 196; 232; 306... βn		
		<b>Xe 137</b> 3,83 m st β <sup>-</sup> : 4,1... γ: 456; (649...)	<b>Xe 138</b> 14,1 m st β <sup>-</sup> : 0,8; 2,8... γ: 259; 434; 1768; 2016... g	<b>Xe 139</b> 39,7 s st β <sup>-</sup> : 5,0... γ: 219; 297; 175...	<b>Xe 140</b> 13,6 s st β <sup>-</sup> : 2,6... γ: 806; 1414; 1315; 622...	<b>Xe 141</b> 1,72 s st β <sup>-</sup> : 6,2... γ: 909; 119; 106... βn	<b>Xe 142</b> 1,24 s st β <sup>-</sup> : 5,72; 657; 538; 613... βn		
		<b>Nb 90</b> 18,8 s 14,6 h st h: 122... β <sup>-</sup> : 1,5... γ: 1129; 2319... α: 141...	<b>Nb 91</b> 60,9 d 680 a st h: (109) β <sup>-</sup> : 1... α: 1202	<b>Nb 92</b> 10,15 d 3,6 107 a st h: 581... γ: 534... α: 0,1... 1,0	<b>Nb 93</b> 16,13 a 100 st h: (41) β <sup>-</sup> : 0,5... γ: 871; 703... α: 0,5... 1,4	<b>Nb 94</b> 6,26 m 2 · 10 <sup>4</sup> a st h: 236... β <sup>-</sup> : 0,2... γ: 766... α: 7	<b>Nb 95</b> 86,6 h 34,97 d st β <sup>-</sup> : 0,7... γ: 778; 569; 1091...	<b>Nb 96</b> 23,4 h st β <sup>-</sup> : 0,7... γ: 778; 569; 1091...	<b>Nb 97</b> 53 s 74 m st β <sup>-</sup> : 1,3... γ: 558...
		<b>Zr 89</b> 4,16 m 78,4 h st h: 588... β <sup>-</sup> : 0,9... γ: 24... α: 1507; g	<b>Zr 90</b> 51,45 st α: -0,014	<b>Zr 91</b> 11,22 st α: 1,2	<b>Zr 92</b> 17,15 st α: 0,2	<b>Zr 93</b> 1,5 · 10 <sup>6</sup> a st β <sup>-</sup> : 0,06... m α: -2	<b>Zr 94</b> 17,38 st α: 0,049	<b>Zr 95</b> 64,0 d st β <sup>-</sup> : 0,4; 1,1... γ: 757; 724... g	<b>Zr 96</b> 2,80 3,9 · 10 <sup>10</sup> a st β <sup>-</sup> : 2... α: 0,020
		<b>Y 88</b> 106,6 d st h: 203... β <sup>-</sup> : 1... γ: 1836; 898...	<b>Y 89</b> 16,0 s 100 st h: 909... α: 0,001... 1,25	<b>Y 90</b> 3,19 h 64,1 h st h: 480... β <sup>-</sup> : 2,3... γ: (2319); (2386...) h: 556	<b>Y 91</b> 49,7 m 58,5 d st β <sup>-</sup> : 1,5... γ: (1205) α: 1,4	<b>Y 92</b> 3,54 h st β <sup>-</sup> : 3,6... γ: 934; 1405; 561; 449...	<b>Y 93</b> 10,1 h st β <sup>-</sup> : 2,9... γ: 267; 947; 1918...	<b>Y 94</b> 18,7 m st β <sup>-</sup> : 4,9... γ: 819; 1139; 551...	<b>Y 95</b> 10,3 m st β <sup>-</sup> : 4,4... γ: 954; 2176; 3577; 1324; 2633...
		<b>Sr 87</b> 2,81 h 7,00 st h: 388... α: 16	<b>Sr 88</b> 82,58 st α: 0,0059	<b>Sr 89</b> 50,5 d st β <sup>-</sup> : 1,5... γ: (909) g α: 0,42	<b>Sr 90</b> 28,64 a st β <sup>-</sup> : 0,5... no γ g α: 0,014	<b>Sr 91</b> 9,5 h st β <sup>-</sup> : 1,1; 2,7... γ: 1024; 750; 653... m; g	<b>Sr 92</b> 2,71 h st β <sup>-</sup> : 0,6; 1,9... γ: 1384...	<b>Sr 93</b> 7,45 m st β <sup>-</sup> : 2,5; 3,4... γ: 590; 876; 888; 710; 169...	<b>Sr 94</b> 74 s st β <sup>-</sup> : 2,1; 3,5... γ: 1428...
		<b>Rb 86</b> 1,02 m 18,7 d st β <sup>-</sup> : 1,8... h: 556... α: 1,077	<b>Rb 87</b> 27,835 4,8 · 10 <sup>10</sup> a st β <sup>-</sup> : 0,3... no γ; g α: 0,10	<b>Rb 88</b> 17,8 m st β <sup>-</sup> : 5,3... γ: 1836; 898... α: 1,2	<b>Rb 89</b> 15,2 m st β <sup>-</sup> : 1,3; 4,5... γ: 1032; 1248; 2196...	<b>Rb 90</b> 4,3 m 2,6 m st β <sup>-</sup> : 5,9... γ: 832; 1375; 3317... h: 107... α: 436	<b>Rb 91</b> 58 s st β <sup>-</sup> : 5,8... γ: 94; 2564; 3600; 346...	<b>Rb 92</b> 4,5 s st β <sup>-</sup> : 8,1... γ: 815; 2821; 570... βn	<b>Rb 93</b> 5,8 s st β <sup>-</sup> : 7,5... γ: 433; 986; 213; 1385... βn
		<b>Kr 85</b> 4,48 h 10,76 a st β <sup>-</sup> : 0,8... γ: 151... h: 303... α: 1,56	<b>Kr 86</b> 17,3 st α: 0,003	<b>Kr 87</b> 76,3 m st β <sup>-</sup> : 3,5; 3,9... γ: 403; 2555; 645... α: < 600	<b>Kr 88</b> 2,84 h st β <sup>-</sup> : 0,5; 2,9... γ: 2392; 196; 2196; 835; 1530...	<b>Kr 89</b> 3,18 m st β <sup>-</sup> : 3,5; 4,9... γ: 221; 586; 540... h: 1473; 904...	<b>Kr 90</b> 32,3 s st β <sup>-</sup> : 2,6; 4,4... γ: 1119; 122; 540... g, m	<b>Kr 91</b> 8,6 s st β <sup>-</sup> : 6,3; 6,4... γ: 102; 507; 613; 1109...	<b>Kr 92</b> 1,84 s st β <sup>-</sup> : 4,6; 5,2... γ: 142; 1219; 815; 548... βn
		<b>Br 84</b> 6,0 m 31,8 m st β <sup>-</sup> : 2,2... γ: 404; 882; 1463... α: 4,6... γ: 882; 1898	<b>Br 85</b> 2,87 m st β <sup>-</sup> : 2,5... γ: 802; 925... m	<b>Br 86</b> 55,1 s st β <sup>-</sup> : 3,3; 7,6... γ: 1565; 2751...	<b>Br 87</b> 55,7 s st β <sup>-</sup> : 6,8... γ: 1420; 1476; 1576; 532; 2006... α: 0,02; 0,05...	<b>Br 88</b> 16,3 s st β <sup>-</sup> : 4,4; 6,9... γ: 775; 802; 1441... βn	<b>Br 89</b> 4,40 s st β <sup>-</sup> : 8,1... γ: 1096; 775... βn	<b>Br 90</b> 1,9 s st β <sup>-</sup> : 8,3; 9,7... γ: 707; 1362... βn	<b>Br 91</b> 0,64 s st β <sup>-</sup> : 263; 803... βn

Abbildung1: Drei Ausschnitte aus der Nuklidkarte



Name: \_\_\_\_\_

## Teilaufgabe 2

Bei der Spaltung von Uran-235-Kernen werden im Mittel knapp 190 MeV Energie pro gespaltenem Kern freigesetzt (oberer Teil der Tabelle 1). Dazu kommen weitere Energiebeträge, die nach der eigentlichen Kernspaltung auftreten (zweiter Teil der Tabelle 1).

Bewegungsenergie der (schweren) Spaltprodukte	175 MeV
Bewegungsenergie der freigesetzten Neutronen	5 MeV
Energie der bei der Kernspaltung auftretenden Gammastrahlung	7 MeV
Energie aus den Betazerfällen der Spaltprodukte	7 MeV
Energie aus der Gammastrahlung der Spaltprodukte	6 MeV
Energie der Neutrinos	10 MeV
Summe	210 MeV

Tabelle 1: Energiefreisetzung bei der Kernspaltung

Da diese Energiebeträge nicht „aus dem Nichts heraus erzeugt“, sondern nur durch Umwandlung aus einer anderen Form von Energie „gewonnen“ werden können, stellt sich die Frage nach dem Ursprung dieser „Energiegewinnung“.

- a) *Erläutern Sie in diesem Zusammenhang rein umgangssprachlich die Begriffe Massendefekt und Bindungsenergie. Geben Sie dazu ein geeignetes einfaches Beispiel und den Zusammenhang zwischen dem Massendefekt und der Bindungsenergie an.*

**Hinweis:** Sie brauchen keine konkreten Zahlenwerte anzugeben.



Name: \_\_\_\_\_

- b) In der folgenden Abbildung 2 ist der Betrag der mittleren Bindungsenergie  $E_B$  je Nukleon gegen die Massenzahl  $A$  aufgetragen.

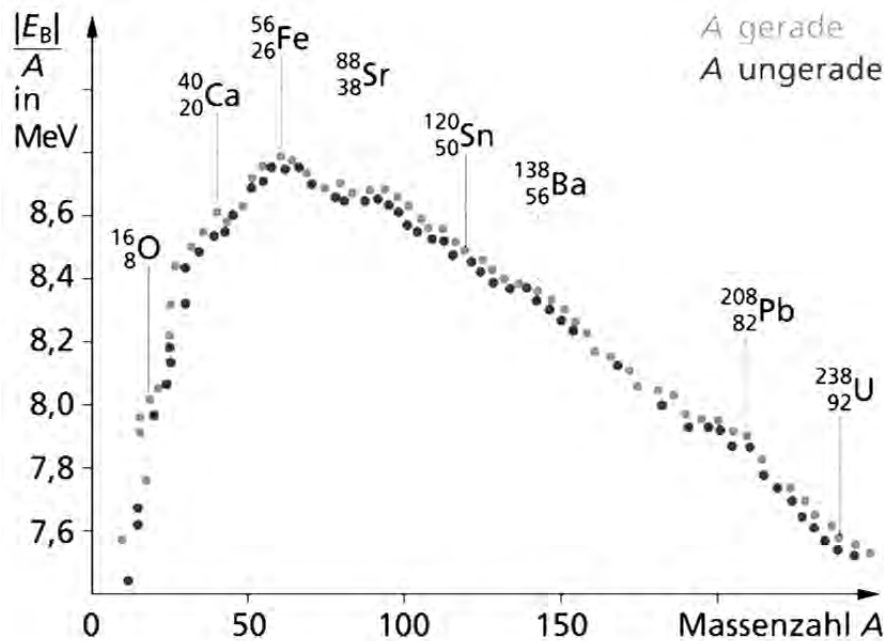


Abbildung 2: Betrag der mittleren Bindungsenergie *pro Nukleon*  
(Quelle: Physik Oberstufe, Cornelsen Verlag, 2010)

Beschreiben Sie den Verlauf des Diagramms qualitativ und begründen Sie mit Hilfe des Diagramms, weshalb die oben beschriebene induzierte Kernspaltung exotherm ist (also Energie freigesetzt wird).

- c) Bestimmen Sie unter Verwendung des Diagramms (Abbildung 2) die bei der Spaltung eines Uran-235-Kerns freigesetzte Energie und vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit den in Tabelle 1 angegebenen (hier relevanten) Werten.

**Hinweis:** Beachten Sie die Skalierung der „Hoch-“Achse.

(24 Punkte)





Name: \_\_\_\_\_

### Teilaufgabe 3

Beim Betrieb von Kernspaltungsreaktoren entsteht unter anderem das Element Plutonium. Plutonium ist insbesondere aufgrund seiner Alphastrahlung biologisch sehr gefährlich. Es entsteht, wenn das ebenfalls in erheblichen Mengen in den Brennstäben enthaltene Uran 238 von schnellen Neutronen getroffen wird, dabei kommt es nämlich nicht zu einer Kernspaltung, sondern zur Aufnahme eines Neutrons in den Uran-238-Kern. Unter den Folgeprodukten dieser Kernreaktion entsteht dann das Element Plutonium.

- a) *Geben Sie, ausgehend von der Aufnahme eines Neutrons in den Uran-238-Kern und mit Hilfe eines der in Abbildung 1 gezeigten Nuklidkartenausschnitte, die Reaktionsgleichungen bis zum Plutonium an.*
- b) Die Erzeugung des gefährlichen Plutoniums muss wegen der Länge seiner Halbwertszeit besonders kritisch gesehen werden. Wegen ihrer Länge kann diese Halbwertszeit nicht direkt gemessen werden, sie lässt sich aber z. B. aus der gemessenen Aktivität einer Probe berechnen. Eine Masse von 1 g reinem Plutonium 239 hat eine Aktivität von  $A_0 = 2,3 \cdot 10^9$  Bq.

*Leiten Sie, ausgehend vom Zerfallsgesetz, zunächst die allgemein gültige Beziehung  $\lambda \cdot T_{1/2} = \ln 2$  her, welche dann in Teilaufgabe d) zur Bestimmung der Halbwertszeit  $T_{1/2}$  verwendet werden soll.*

**Hinweis:**  $\lambda$  bezeichne die nuklidspezifische Zerfallskonstante.  
 $T_{1/2}$  sei die Halbwertszeit des entsprechenden Nuklids.

- c) Sind in einer radioaktiven Probe zum Zeitpunkt  $t$  genau  $N(t)$  Plutonium-239-Atome vorhanden, so gilt für die Aktivität  $A(t)$ , die sich nur aus den Primärzerfällen der Plutonium-239-Atome ergibt,  $A(t) = \lambda \cdot N(t)$ .

*Leiten Sie diese Beziehung her.*

**Hinweis:** Zu den Primärzerfällen der Plutonium-239-Atome zählen ausschließlich die Zerfälle der Plutonium-239-Atome, nicht die Zerfälle der evtl. ebenfalls radioaktiven Zerfallsprodukte des Plutonium 239.



Name: \_\_\_\_\_

d) Berechnen Sie unter Verwendung der Beziehungen aus den Teilaufgaben b) und c) die Halbwertszeit  $T_{1/2}$  von Plutonium 239.

**Hinweis:** Bei Plutonium 239 entspricht eine Masse von 239 Gramm der Stoffmenge **1 mol**, damit bestehen 239 Gramm Plutonium 239 aus genau  $N_L = 6,022 \cdot 10^{23}$  Plutonium-239-Atomen.

(16 Punkte)

#### Teilaufgabe 4

Neben der Kernspaltung bietet auch die sogenannte Kernfusion die Möglichkeit, aus der Bindungsenergie von Atomkernen Energie freizusetzen.

Die derzeitigen Forschungsarbeiten konzentrieren sich darauf, die beiden Wasserstoffisotope  ${}^2_1\text{H}$  (Deuterium) und  ${}^3_1\text{H}$  (Tritium) zu Helium  ${}^4_2\text{He}$  zu verschmelzen. Die entsprechende Reaktionsgleichung lautet:  ${}^2_1\text{H}^+ + {}^3_1\text{H}^+ \rightarrow {}^4_2\text{He}^{++} + {}^1_0\text{n} + E$

a) Berechnen Sie mit Hilfe der in Tabelle 2 angegebenen Nuklidmassen die Energie  $E$ , die bei der angegebenen Kernfusion freigesetzt wird.

Vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit der Energie, die bei der Spaltung eines Uran-235-Kerns gewonnen wird (siehe Tabelle 1 in Teilaufgabe 2).

Nuklid	relative Atommasse (in atomaren Masseneinheiten u)
${}^1_1\text{p}$ (Proton)	1,007276 u
${}^1_0\text{n}$ (Neutron)	1,008665 u
${}^1_1\text{H}$ (Wasserstoffatom)	1,007825 u
${}^2_1\text{H}$ (Deuteriumatom, schwerer Wasserstoff)	2,014102 u
${}^3_1\text{H}$ (Tritiumatom, überschwerer Wasserstoff)	3,016049 u
${}^4_2\text{He}$ (Heliumatom)	4,002603 u
atomare Masseneinheit: $1 \text{ u} = 1,660539 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$	

Tabelle 2: Relative Atommassen einiger Nuklide



Name: \_\_\_\_\_

b) Berechnen Sie den Energiebetrag, der freigesetzt würde, wenn eine Masse von **2 g Deuterium** mit einer Masse von **3 g Tritium** vollständig zu Helium fusionieren würde, und zeigen Sie, dass dieser Energiebetrag ca. 4,5-mal so groß ist wie die Energie, die bei vollständiger Spaltung von **5 g Uran 235** freigesetzt würde.

**Hinweise:**

- 1) 2 g Deuterium ( ${}^2_1\text{H}$ ) bestehen aus  $N_L = 6,022 \cdot 10^{23}$  Deuteriumatomen,  
3 g Tritium ( ${}^3_1\text{H}$ ) bestehen aus  $N_L = 6,022 \cdot 10^{23}$  Tritiumatomen,  
235 g Uran ( ${}^{235}_{92}\text{U}$ ) bestehen aus  $N_L = 6,022 \cdot 10^{23}$  Uranatomen.
- 2) Wenn Sie Teilaufgabe 4 a) nicht gelöst haben, gehen Sie davon aus, dass bei der Fusion von einem Deuterium- mit einem Tritiumkern eine Energie von  $E = 2,822036 \cdot 10^{-12} \text{ J}$  freigesetzt wird.

(16 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, Leistungskurs

### 1. Aufgabenart

Bearbeitung einer Aufgabe, die fachspezifisches Material enthält

### 2. Aufgabenstellung<sup>1</sup>

**Aufgabe:** Grundlegende Überlegungen zur Energiegewinnung mit Hilfe von Kernspaltung und Kernfusion

(65 Punkte)

**Hinweis:** Kombinierbar entweder mit 1NT 1, 1NT 2 oder 1NT 3

### 3. Materialgrundlage

- entfällt

### 4. Bezüge zu den Vorgaben 2014

#### 1. Inhaltliche Schwerpunkte

- Atom- und Kernphysik
  - Radioaktiver Zerfall (Halbwertszeitmessung)
  - Bindungsenergie, Massendefekt (Interpretation des Diagramms „Nukleonenzahl – Bindungsenergie“)
  - Kernspaltung und Kernfusion, Kettenreaktion

#### 2. Medien/Materialien

- entfällt

### 5. Zugelassene Hilfsmittel

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

<sup>1</sup> Die Aufgabenstellung deckt inhaltlich alle drei Anforderungsbereiche ab.

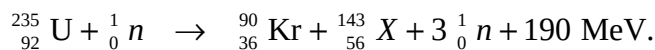
## 6. Modellösungen

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: Zeile „Sachlich richtige Lösungsalternative zur Modelllösung“).

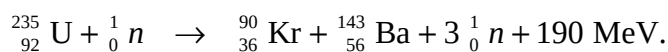
Sollte die Auswertung der Messdaten mit Hilfe eines grafikfähigen TR oder CAS erfolgen, so muss der Prüfling die entstandenen Graphen für die korrigierende Lehrkraft skizzenhaft in seiner Reinschrift dokumentieren.

### Teilaufgabe 1

a) Die Reaktionsgleichung lautet:



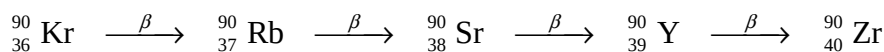
Dem in Abbildung 1 wiedergegebenen Nuklidkartenausschnitt entnimmt man, dass es sich bei dem Element mit der Ordnungszahl 56 um Barium handelt. Somit folgt:



#### Hinweis für die korrigierende Lehrkraft:

Da bei dieser Teilaufgabe der Fokus auf dem Umgang mit der Nuklidkarte liegt, ist auch eine Lösung ohne Nennung des Energiebetrages von 190 MeV zu akzeptieren.

b) Zerfallsreihe und Art der Zerfälle:



Würden Alpha-Zerfälle vorkommen, so müsste (pro Alpha-Zerfall) die Massenzahl um „vier“ geringer werden.

#### Hinweis für die korrigierende Lehrkraft:

Es reicht auch, wenn darauf hingewiesen wird, dass sich die Massenzahl nicht ändert.

### Teilaufgabe 2

a) Die Masse eines Atomkerns ( ${}^N_Z\text{X}$ ), der aus Z Protonen und (N – Z) Neutronen besteht, ist stets kleiner als die Summe der Massen von Z einzelnen Protonen und von (N – Z) einzelnen Neutronen. So ist zum Beispiel die Masse eines Heliumkerns  ${}^4_2\text{He}$  kleiner als die Summe der Massen von zwei einzelnen Protonen plus der beiden Massen von zwei einzelnen Neutronen. Diesen Unterschied zwischen der Masse eines Kerns und der Summe der Massen der einzelnen Kernbauteilchen wird als Massendefekt bezeichnet.

Die scheinbar „verschwundene“ Masse liegt gemäß  $E = m \cdot c^2$  als Bindungsenergie vor. Um die Kernbauteilchen wieder aus dem Kern „herauszulösen“, muss dem Kern die Bindungsenergie wieder zugeführt werden.

- b) Mit zunehmender Massenzahl steigt der Betrag der mittleren Bindungsenergie pro Nukleon zunächst schnell an. Etwa bei der Massenzahl 56 (die zugehörigen Elemente sind z. B. Eisen, Kobalt oder Nickel) hat der Betrag der Bindungsenergie pro Nukleon ein Maximum erreicht, er nimmt mit weiter wachsender Massenzahl dann aber langsam und kontinuierlich ab.

Bei den schwersten Atomkernen, wie z. B. Uran, ist der Betrag der Bindungsenergie pro Kernbaustein dann auch deutlich kleiner als bei Atomkernen mit mittleren Massenzahlen (von ca. 60 bis 150). Bei der Spaltung eines Uranatomkerns in zwei Atomkerne mit jeweils mittlerer Massenzahl ist daher für jeden der beiden „neuen“ Kerne der Betrag der Bindungsenergie pro Nukleon größer als (z. B.) beim Uranatomkern. Dies hat zur Folge, dass die Summe der Bindungsenergien der beiden („Spaltprodukt“-)Kerne betragsmäßig auch größer ist als der Betrag der Bindungsenergie des Ausgangskerns. Diese „überschüssige“ Energie wird dann nach außen abgegeben.

**Hinweis für die korrigierende Lehrkraft:**

Eine Argumentation ohne expliziten Hinweis, dass hier stets die Beträge der Bindungsenergien pro Nukleon betrachtet werden, ist als gleichwertig zu akzeptieren.

- c) Das Diagramm in Abbildung 2 zeigt, dass die mittlere Bindungsenergie pro Nukleon für Uran 235 etwa 7,6 MeV beträgt. Nimmt man z. B. die in Teilaufgabe 1 a) betrachtete mögliche Kernreaktion  ${}_{92}^{235}\text{U} + {}_0^1n \rightarrow {}_{36}^{90}\text{Kr} + {}_{56}^{143}\text{Ba} + 3{}_0^1n + 190\text{ MeV}$ , so können dafür folgende Bindungsenergien pro Nukleon ermittelt werden:

für Uran 235                      etwa 7,6 MeV,

für Krypton 90                      etwa 8,7 MeV,

für Barium 143                      etwa 8,3 MeV.

Multipliziert mit der jeweiligen Nukleonenzahl ergeben sich folgende Bindungsenergien:

für Uran 235                      etwa  $7,6\text{ MeV} \cdot 235 = 1786\text{ MeV}$ ,

für Krypton 90                      etwa  $8,7\text{ MeV} \cdot 90 = 783\text{ MeV}$ ,

für Barium 143                      etwa  $8,3\text{ MeV} \cdot 143 = 1187\text{ MeV}$ .

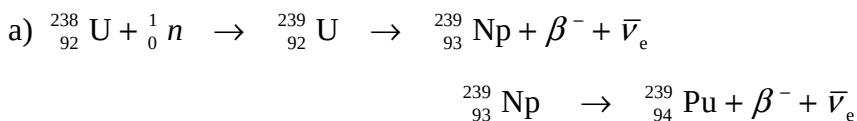
Also wird bei einer solchen Kernspaltung insgesamt eine Energie von etwa  $1187\text{ MeV} + 783\text{ MeV} - 1786\text{ MeV} = 184\text{ MeV}$  freigesetzt.

Der für dieses Beispiel ermittelte Wert weicht *kaum* (evtl.: *etwas*) von dem Durchschnittswert von  $(175 \text{ MeV} + 5 \text{ MeV} + 7 \text{ MeV} =) 187 \text{ MeV}$  ab, was *allerdings* (evtl.: *auch nicht*) verwunderlich ist, da bei der Kernspaltung von Uran sehr viele verschiedene Kernreaktionen mit unterschiedlich schweren Spaltprodukten und somit auch mit sehr unterschiedlichen Bindungsenergien auftreten können; nur im Durchschnitt wird dabei ein Energiebetrag von  $187 \text{ MeV}$  freigesetzt. Zudem ist die Ablesegenauigkeit bei der Arbeit mit dem Diagramm in Abbildung 2 nicht sehr hoch.

**Hinweise für die korrigierende Lehrkraft:**

1. Es ist nicht erforderlich, diese Aufgabe auf der Basis des in Teilaufgabe 1 a) angesprochenen Beispiels zu lösen. Auch andere mögliche Kernspaltungsreaktionen (für Uran 235) sind möglich, berücksichtigt werden muss aber die „Freisetzung“ von 2 bis 3 Neutronen und die Gesamtzahl der Nukleonen.
2. Abweichungen der ermittelten Energiebeträge sind, unabhängig von der gewählten Kernspaltungsreaktion, wegen der begrenzten Ablesegenauigkeit natürlich möglich.
3. Bei dem Vergleich des Ergebnisses mit den Angaben der Tabelle 1 muss sich der Prüfling auf die Angaben in der oberen Tabellenzeile beziehen.

**Teilaufgabe 3**



**Hinweis für die korrigierende Lehrkraft:**

Auch ohne Angabe der Antineutrinos ist die Lösung als richtig zu akzeptieren.

b) Aus dem Zerfallsgesetz  $N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$  folgt mit  $t = T_{1/2}$ :

$$N(T_{1/2}) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot T_{1/2}} = \frac{N_0}{2} \text{ und damit } \ln(e^{-\lambda \cdot T_{1/2}}) = \ln\left(\frac{1}{2}\right)$$

bzw.  $-\lambda \cdot T_{1/2} = 0 - \ln 2$  und damit die gesuchte Beziehung.

c) Aus der Definition der Aktivität und aus dem Zerfallsgesetz folgt:

$$A(t) = -\frac{dN(t)}{dt} = -\frac{d}{dt}(N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}) = -N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \cdot (-\lambda) = \lambda \cdot N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} = \lambda \cdot N(t).$$

Also gilt:  $A(t) = \lambda \cdot N(t)$ .

d) Aus  $\lambda \cdot T_{1/2} = \ln 2$  folgt:  $T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$  und

aus  $A(t) = \lambda \cdot N(t)$  folgt:  $\lambda = \frac{A(t)}{N(t)}$ .

Somit kann  $T_{1/2}$  gemäß  $T_{1/2} = \frac{\ln 2}{A(t)} \cdot N(t)$  ermittelt werden.

Dabei ist  $A(t)$  die Aktivität, die eine Probe aus  $N(t)$  Plutoniumatomen hat, wenn nur die Aktivität der primären Zerfälle berücksichtigt wird. Laut Aufgabenstellung hat eine Masse von 1 g reinem Plutonium 239 eine Aktivität von  $A_0 = 2,3 \cdot 10^9$  Bq.

In einer Plutoniumprobe der Masse 1 g (Plutonium 239) sind

$$N_0 = \frac{1}{239} \cdot N_L = \frac{1}{239} \cdot 6,022 \cdot 10^{23} \approx 2,52 \cdot 10^{21} \text{ Plutoniumatome enthalten.}$$

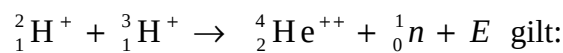
Somit ergibt sich eine Halbwertszeit von

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{2,3 \cdot 10^9 \text{ s}^{-1}} \cdot 2,52 \cdot 10^{21} \approx 7,59 \cdot 10^{11} \text{ s} \approx 24 \text{ 000 a.}$$

#### Teilaufgabe 4

a) Bei der Fusion tritt wieder ein Massendefekt  $\Delta m$  auf.

Gemäß der gegebenen Reaktionsgleichung



$$\Delta m = m_{\text{Deuterium}} + m_{\text{Tritium}} - m_{\text{Helium}} - m_{\text{Neutron}} > 0$$

$$\Delta m = 2,014102 \text{ u} + 3,016049 \text{ u} - 4,002603 \text{ u} - 1,008665 \text{ u}$$

$$\Delta m = 0,018883 \text{ u} = 0,018883 \cdot 1,660539 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\Delta m = 3,135596 \cdot 10^{-29} \text{ kg}$$

Dieser Massendefekt entspricht gemäß  $E = \Delta m \cdot c^2$  einer Energie von

$$E = 3,135596 \cdot 10^{-29} \text{ kg} \cdot \left( 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 = 2,822036 \cdot 10^{-12} \text{ J.}$$

Dieser Energiebetrag entspricht etwa 17,6 MeV, während bei der Spaltung eines Uran-235-Kerns (gemäß Tabelle 1) ein Energiebetrag von etwa 190 MeV freigesetzt wird.

Damit liefert die genannte Kernspaltung einen mehr als 10-fach höheren Energiebetrag



als die hier betrachtete Fusion. Allerdings hat das Uranatom auch etwa die 47-fache Masse gegenüber der Gesamtmasse der beiden Fusionspartner Deuterium und Tritium.

**Hinweise für die korrigierende Lehrkraft:**

1. Es wird nicht erwartet, dass statt mit den in Tabelle 2 angegebenen relativen Atommassen mit den entsprechenden Kernmassen gerechnet wird.  
Auch wird nicht erwartet, dass begründet wird, warum man in sehr guter Näherung mit den Atommassen rechnen kann (z. B. vergleichsweise kleine Bindungsenergien der Elektronen in den jeweiligen Atomen).
2. Es ist akzeptabel, wenn bei den numerischen Berechnungen sinnvoll gerundet wird (z. B. nach der 4. oder sogar nach der 3. Nachkommastelle).
3. Die in der Musterlösung wiedergegebenen Berechnungen wurden (ohne Überlegungen zur Fehlerfortpflanzung) durchgängig mit 6 Nachkommastellen durchgeführt.

b) Da insgesamt  $N_L = 6,022 \cdot 10^{23}$  Deuteriumkerne mit ebenso vielen Tritiumkernen fusionieren, wird ein Energiebetrag von

$$E_{D+T} = 6,022 \cdot 10^{23} \cdot 2,822036 \cdot 10^{-12} \text{ J} = 1,6994301 \cdot 10^{12} \text{ J freigesetzt.}$$

5 g Uran 235 bestehen aus  $\frac{5}{235} \cdot 6,022 \cdot 10^{23}$  Uran-235-Atomen. Bei vollständiger Spaltung

wird also ein Energiebetrag von

$$E_U = \frac{5}{235} \cdot 6,022 \cdot 10^{23} \cdot 190 \text{ MeV} = 2,4344 \cdot 10^{24} \text{ MeV} = 3,89995 \cdot 10^{11} \text{ J freigesetzt.}$$

Für das Verhältnis der beiden Energiebeträge folgt:

$$\frac{E_{D+T}}{E_U} = \frac{1,6994301 \cdot 10^{12} \text{ J}}{3,89995 \cdot 10^{11} \text{ J}} = 4,36 \approx 4,4 .$$

**7. Teilleistungen – Kriterien / Bewertungsbogen zur Prüfungsarbeit**

Name des Prüflings: \_\_\_\_\_ Kursbezeichnung: \_\_\_\_\_

Schule: \_\_\_\_\_

**Teilaufgabe 1**

	Anforderungen	Lösungsqualität			
		maximal erreichbare Punktzahl	EK <sup>2</sup>	ZK	DK
	<b>Der Prüfling</b>				
a1)	stellt die zugehörige Reaktionsgleichung auf.	3			
a2)	ermittelt mit Hilfe des in Abbildung 1 gezeigten Nuklidkartenausschnitts, welches weitere Nuklid bei dieser Kernreaktion entsteht.	2			
b1)	gibt die jeweiligen Zerfälle vom Kr 90 bis zum Zr 90 an.	2			
b2)	begründet, warum nur Beta-Zerfälle in dieser Zerfallsreihe vorkommen können.	2			
Sachlich richtige Lösungsalternative zur Modelllösung: (9) ..... .....					
<b>Summe Teilaufgabe 1</b>		<b>9</b>			

<sup>2</sup> EK = Erstkorrektur; ZK = Zweitkorrektur; DK = Drittkorrektur

**Teilaufgabe 2**

Anforderungen		Lösungsqualität			
Der Prüfling		maximal erreichbare Punktzahl	EK	ZK	DK
a1)	erläutert rein umgangssprachlich die Begriffe Massendefekt und Bindungsenergie.	3			
a2)	gibt dazu ein einfaches Beispiel an.	2			
a3)	gibt den Zusammenhang zwischen Massendefekt und Bindungsenergie an.	2			
b1)	beschreibt den Verlauf des Diagramms qualitativ.	3			
b2)	begründet mit Hilfe des Diagramms, weshalb die oben beschriebene induzierte Kernspaltung exotherm ist.	4			
c1)	bestimmt unter Verwendung des Diagramms in Abbildung 2 die bei dem Spaltprozess freigesetzte Energie.	7			
c2)	vergleicht sein Ergebnis mit den in Tabelle 1 angegebenen (relevanten) Werten.	3			
Sachlich richtige Lösungsalternative zur Modelllösung: (24) ..... .....					
<b>Summe Teilaufgabe 2</b>		<b>24</b>			

**Teilaufgabe 3**

Anforderungen		Lösungsqualität			
Der Prüfling		maximal erreichbare Punktzahl	EK	ZK	DK
a)	gibt, ausgehend von der Aufnahme eines Neutrons in den Uran-238-Kern, die Reaktionsgleichungen bis zum Plutonium an.	3			
b)	leitet zur Bestimmung der Halbwertszeit, ausgehend vom Zerfallsgesetz, die Beziehung $\lambda \cdot T_{1/2} = \ln 2$ her.	4			
c)	leitet die Beziehung $A(t) = \lambda \cdot N(t)$ her.	3			
d)	berechnet unter Verwendung der Beziehungen aus den Teilaufgaben b) und c) die Halbwertszeit $T_{1/2}$ von Plutonium 239.	6			
Sachlich richtige Lösungsalternative zur Modelllösung: (16) ..... .....					
<b>Summe Teilaufgabe 3</b>		<b>16</b>			

**Teilaufgabe 4**

Anforderungen		Lösungsqualität			
		maximal erreichbare Punktzahl	EK	ZK	DK
	<b>Der Prüfling</b>				
a1)	berechnet mit Hilfe der in Tabelle 2 angegebenen Nuklidmassen die Energie $E$ , die bei der angegebenen Kernfusion freigesetzt wird.	6			
a2)	vergleicht sein Ergebnis mit der Energie, die bei der Spaltung eines Uran-235-Kerns gewonnen wird.	3			
b1)	berechnet den Energiebetrag, der freigesetzt würde, wenn eine Masse von 2 g Deuterium mit einer Masse von 3 g Tritium vollständig zu Helium fusionieren würde.	3			
b2)	zeigt, dass dieser Energiebetrag ca. 4,5-mal so groß ist, wie die Energie, die bei vollständiger Spaltung von 5 g Uran 235 freigesetzt würde.	4			
Sachlich richtige Lösungsalternative zur Modelllösung: (16) ..... .....					
<b>Summe Teilaufgabe 4</b>		<b>16</b>			

<b>Summe insgesamt</b>	<b>65</b>			
------------------------	-----------	--	--	--

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

	Lösungsqualität			
	maximal erreichbare Punktzahl	EK	ZK	DK
<b>Übertrag der Punktsumme aus der ersten bearbeiteten Aufgabe</b>	<b>65</b>			
<b>Übertrag der Punktsumme aus der zweiten bearbeiteten Aufgabe</b>	<b>65</b>			
<b>Punktzahl der gesamten Prüfungsleistung</b>	<b>130</b>			
<b>aus der Punktsumme resultierende Note</b>				
<b>Note ggf. unter Absenkung um ein bis zwei Notenpunkte gemäß § 13 Abs. 2 APO-GOST</b>				
<b>Paraphe</b>				

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	130 – 124
sehr gut	14	123 – 117
sehr gut minus	13	116 – 111
gut plus	12	110 – 104
gut	11	103 – 98
gut minus	10	97 – 91
befriedigend plus	9	90 – 85
befriedigend	8	84 – 78
befriedigend minus	7	77 – 72
ausreichend plus	6	71 – 65
ausreichend	5	64 – 59
ausreichend minus	4	58 – 51
mangelhaft plus	3	50 – 43
mangelhaft	2	42 – 34
mangelhaft minus	1	33 – 26
ungenügend	0	25 – 0