

Abiturprüfung 2019

PHYSIK

Arbeitszeit: 180 Minuten

Der Fachausschuss wählt

eine Aufgabe aus der Aufgabengruppe Ph 11
und **eine** aus der Aufgabengruppe Ph 12

oder

eine Aufgabe aus der Aufgabengruppe Ph 11
und **eine** aus der Aufgabengruppe Ph 12-Astrophysik

zur Bearbeitung aus.

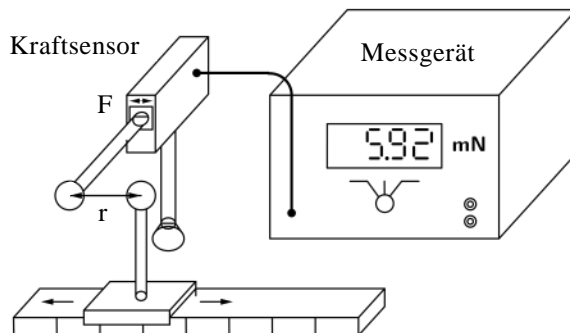
Die Angabe ist vom Prüfling mit dem Namen zu versehen und mit abzugeben.

Name: _____

1. Coulomb-Gesetz

Im Unterricht soll die Kraft zwischen zwei identischen geladenen Metallkugeln mit Durchmesser 2,0 cm untersucht werden. Dazu werden der Abstand r der Kugelmittelpunkte und die Spannung U , die zum Laden der beiden Kugeln verwendet wird, verändert und mit einem Kraftsensor die Kraft F auf eine der beiden Kugeln gemessen.

Es ergeben sich folgende Messwerte:

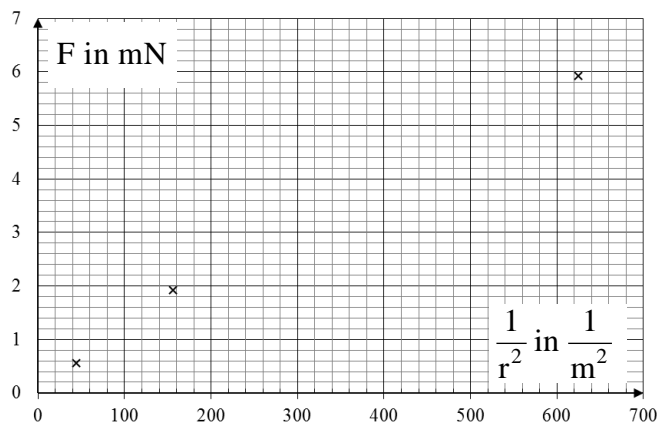


Messung	1	2	3	4	5	6	7
r in cm	4,0	6,0	8,0	10,0	15,0	15,0	15,0
U in kV	24	24	24	24	24	12	6,0
F in mN	5,92	3,30	1,91	1,23	0,55	0,14	0,03

Zunächst wird bei konstanter Spannung $U = 24$ kV der Zusammenhang zwischen der Kraft F und dem Abstand r untersucht.

3 a) Begründen Sie mithilfe der gegebenen Messwerte, dass F und r nicht indirekt proportional zueinander sind.

6 b) Um den Zusammenhang von F und r genauer zu untersuchen, ist nebenstehendes, noch unvollständiges Diagramm erstellt worden. Tragen Sie die beiden fehlenden Messpunkte in das Diagramm ein. Geben Sie unter Bezugnahme auf das Diagramm den Zusammenhang an, der zwischen F und r vermutet werden kann. Vernachlässigen Sie dabei zunächst Messung 1.



3 c) Erklären Sie für Messung 1 die Abweichung von dem in Teilaufgabe b) vermuteten Zusammenhang zwischen F und r .

6 d) Nun wird die Abhängigkeit der Kraft F von der Spannung U bei festem Abstand untersucht. Leiten Sie ausgehend vom Coulomb-Gesetz den Zusammenhang zwischen F und U her. Weisen Sie nach, dass das Ergebnis im Einklang mit den gemessenen Werten steht.

Mithilfe des Coulomb-Gesetzes kann aus den Messwerten ein Näherungswert $\epsilon_{0, \text{Exp}}$ für die elektrische Feldkonstante ermittelt werden. Beide Kugeln besitzen jeweils eine Kapazität von 1,67 pF.

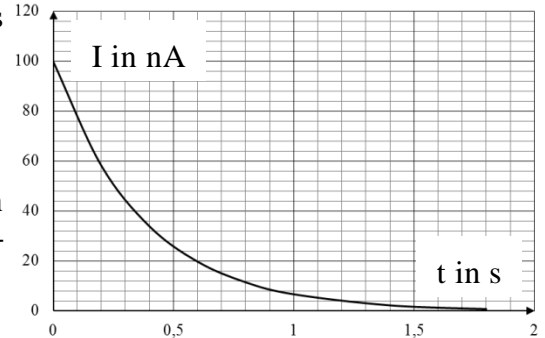
6 e) Berechnen Sie exemplarisch für $r = 8,0$ cm den Wert $\epsilon_{0, \text{Exp}}$ und ermitteln Sie die prozentuale Abweichung vom Literaturwert für ϵ_0 .

(Fortsetzung nächste Seite)

Ein Grund für die in Teilaufgabe e berechnete Abweichung ist die Luftfeuchtigkeit, die zu einer näherungsweise gleich großen Teilentladung der beiden Kugeln führt.

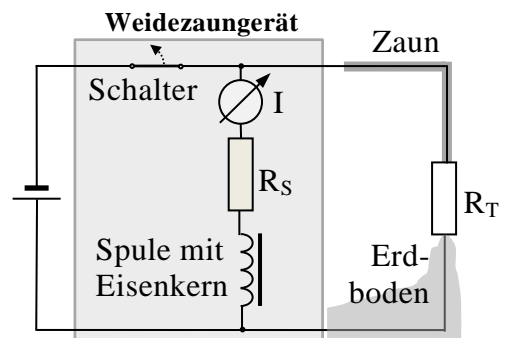
5 f) Berechnen Sie für $r = 8,0 \text{ cm}$ die Ladungsänderung ΔQ pro Kugel, die den gemessenen Wert von F erklärt. [zur Kontrolle: $\Delta Q = 3,2 \text{ nC}$]

5 g) Nun wird eine der Kugeln über ein empfindliches Stromstärkemessgerät entladen und der zeitliche Verlauf der Stromstärke gemessen. Beschreiben Sie ein Verfahren, um aus nebenstehendem Diagramm die Ladung der Kugel näherungsweise zu ermitteln. Beurteilen Sie, ob Sie dieses Verfahren genau genug durchführen können, um die in Teilaufgabe f berechnete Ladungsänderung nachweisen zu können.



2. Weidezaun

Im Unterricht wird mithilfe nebenstehender Schaltung ein elektrischer Weidezaun simuliert, indem der Lehrer den Schalter in regelmäßigen Abständen öffnet und schließt. $R_T = 1,0 \text{ k}\Omega$ stellt den ohmschen Widerstand eines Tieres dar. Die Spule der Länge 10 cm besitzt 1000 Windungen, hat einen kreisförmigen Querschnitt mit $2,3 \text{ cm}$ Radius und kann als langgestreckte Spule aufgefasst werden; ihr ohmscher Widerstand beträgt $R_S = 9,5 \text{ }\Omega$. In die Spule ist ein Eisenkern eingebracht, der die Induktivität um den Faktor $\mu_r = 300$ erhöht. Die Batteriespannung beträgt wie in der Realität 12 V .

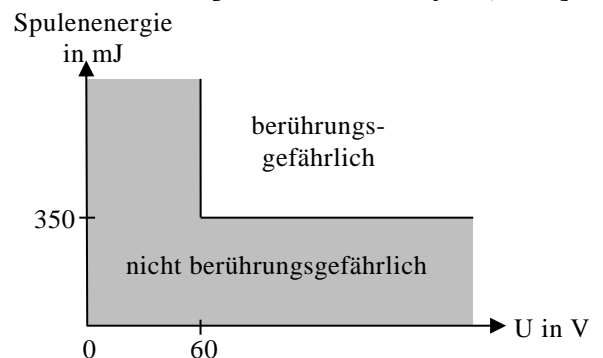


7 a) Beschreiben Sie die Vorgänge in der Spule beim Öffnen des Schalters. Begründen Sie, dass der Schalter bei einem realen Weidezaun wiederholt geöffnet und geschlossen werden muss.

3 b) Berechnen Sie die Induktivität L der Spule mit Eisenkern. [zur Kontrolle: $L = 6,3 \text{ H}$]

6 c) Die Stromstärke in der Spule nimmt beim Öffnen des Schalters innerhalb der ersten Millisekunde um 212 mA ab. Schätzen Sie die Induktionsspannung U_i , die beim Öffnen des Schalters entsteht, rechnerisch ab und begründen Sie, dass nahezu die gesamte Induktionsspannung am Widerstand R_T abfällt. [zur Kontrolle: $U_i = 1,3 \text{ kV}$]

6 d) Ein wagemutiger Schüler möchte die Wirkung des simulierten Weidezauns selbst spüren. Beurteilen Sie unter Berücksichtigung nebenstehender Abbildung, ob der Schüler nach Entfernen des Widerstandes R_T gefahrlos an die Leitungsenden fassen könnte. Der ohmsche Widerstand des Schülers sei vergleichbar mit R_T .



4 e) Erläutern Sie zwei Aspekte, in denen sich ein praxistauglicher Weidezaun von der Simulation unterscheiden muss.

1. Interferenz von Dipolstrahlung

Zwei identische gleichphasig schwingende und senkrecht zur Zeichenebene orientierte Sendedipole D_1 und D_2 strahlen elektromagnetische Wellen der Wellenlänge $\lambda = 3,0 \text{ cm}$ ab. Die Sendedipole haben zunächst den Abstand 2λ .

Abb. 1 zeigt eine Momentaufnahme der jeweils abgestrahlten Wellenfronten (Wellentäler gestrichelt, Wellenberge durchgezogen). Ein geeigneter Empfänger wird in der Zeichenebene auf dem Kreis k um die Dipole herum bewegt.

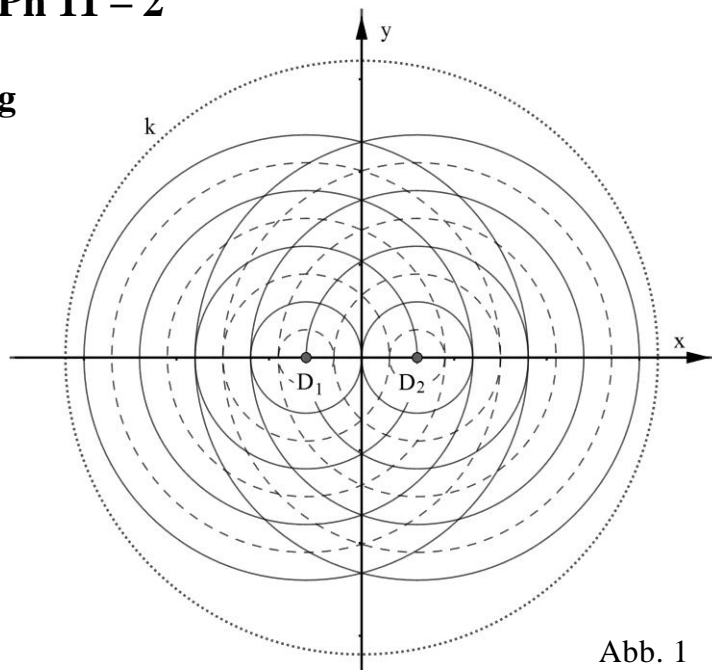


Abb. 1

- 4 a) Geben Sie die Länge der in der Grundschwingung schwingenden Dipole an und berechnen Sie die Frequenz der Dipolschwingung.
- 6 b) Kennzeichnen Sie in Abb. 1 die Orte in der Zeichenebene mit maximalem Empfang und geben Sie die Anzahl der Positionen an, an denen der Empfänger maximalen Empfang feststellt.

Der Abstand der Sendedipole wird nun auf den Wert 200λ vergrößert und die Sendedipole wechseln vom Dauer- zum Pulsbetrieb. Während eines Pulses senden beide Dipole gleichzeitig und phasengleich jeweils einen Wellenzug der Länge $5,4 \text{ m}$ aus. Der zeitliche Abstand zwischen zwei Pulsen ist nicht konstant, sondern variiert zufällig im Bereich einiger Millisekunden.

- 3 c) Berechnen Sie die Dauer eines Pulses.
- 6 d) Begründen Sie, dass bei der Überlagerung von Wellenzügen, die zu verschiedenen Pulsen gehören, kein stabiles Interferenzmuster auftritt. Untersuchen Sie dann den Empfang während des Pulsbetriebs an einem Punkt auf der y-Achse und an einem Punkt auf der x-Achse rechts von D_2 .

2. Betatron

Das Betatron ist ein sehr kompakter Beschleuniger für Elektronen. Diese kreisen innerhalb einer evakuierten Ringröhre in einem Magnetfeld, das durch zwei Elektromagneten erzeugt wird.

Abb. 2 zeigt den zur vertikalen Achse rotationssymmetrischen Aufbau im Querschnitt.

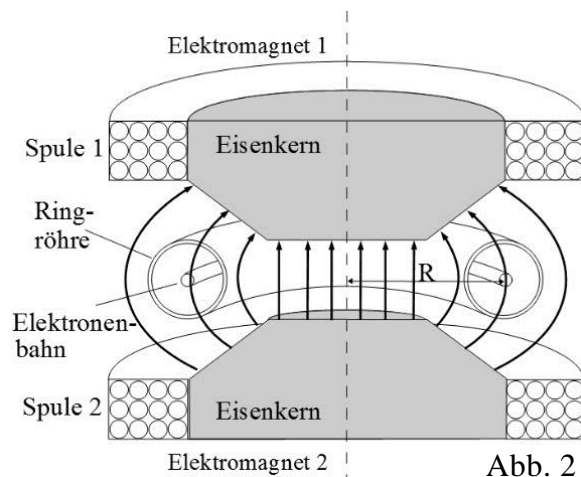


Abb. 2

- 4 a) Geben Sie für das eingezeichnete Magnetfeld die Bewegungsrichtung der Elektronen in den Spulen der Elektromagneten an und bestimmen Sie die Umlaufrichtung der Elektronen in der Ringröhre.

Die erste Funktion des Magnetfeldes ist es, Elektronen auf einer Kreisbahn mit Radius $R = 16 \text{ cm}$ zu halten. Die Elektronen treten mit der einheitlichen Geschwindigkeit $v_0 = 2,7 \cdot 10^7 \text{ m/s}$ tangential in die Ringröhre ein.

- 6 b) Erklären Sie Aufbau und Funktionsweise eines Filters, der es ermöglicht, einen Strahl von Elektronen einheitlicher Geschwindigkeit zu erhalten.

- 8 c) Zeigen Sie, dass die Flussdichte B_R des Magnetfelds am Ort der Elektronenbahn zum Zeitpunkt des Eintretens $0,96 \text{ mT}$ betragen muss. Beschreiben Sie anschließend die Auswirkungen einer zu kleinen bzw. zu großen magnetischen Flussdichte auf die Bewegung der Elektronen.

- 3 d) Erklären Sie, dass bei konstantem Magnetfeld keine Veränderung der Bahngeschwindigkeit stattfindet.

Die zweite Funktion des Magnetfelds ist die Erhöhung der Elektronengeschwindigkeit. Dazu wird an den Elektromagneten ein sinusförmiger Wechselstrom mit der Frequenz $f = \frac{1}{T} = 50 \text{ Hz}$ angelegt. Für $0 \leq t \leq \frac{T}{4}$ steigt das Magnetfeld von 0 ausgehend an, wobei durch Induktion ein elektrisches Wirbelfeld entsteht, das die Geschwindigkeit der Elektronen erhöht.

- 5 e) Geben Sie jeweils einen Grund dafür an, dass die Zeiträume $\frac{T}{4} < t \leq \frac{T}{2}$ und $\frac{T}{2} < t \leq T$ nicht für eine Erhöhung der Bahngeschwindigkeit genutzt werden können.

Im Betatron werden Elektronen auf die Endgeschwindigkeit $0,99c$ beschleunigt und danach wieder aus dem Beschleuniger geleitet.

- 7 f) Zeigen Sie, dass für die Beschleunigung der Elektronen auf 97 % der Lichtgeschwindigkeit in etwa die gleiche Energie benötigt wird wie zur weiteren Beschleunigung auf die Endgeschwindigkeit.

- 5 g) Schätzen Sie die Anzahl der Umläufe der Elektronen im Betatron nach oben ab, indem Sie davon ausgehen, dass sie sich für eine Zeitdauer von $\frac{1}{4}T$ im Betatron befinden und sich dabei stets mit 99 % der Lichtgeschwindigkeit bewegen.

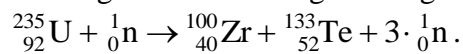
- 3 h) Häufig ist zu lesen, dass die Energie geladener Teilchen nicht durch Magnetfelder erhöht werden kann. Nehmen Sie zu dieser Aussage kritisch Stellung.

1. Brennstäbe

Die in Kernkraftwerken eingesetzten Brennstäbe sind dünnwandige Rohre, die kleine Uran-Pellets enthalten. Ein frisches Uran-Pellet der Masse 10 g besteht zu 3,5 % aus ^{235}U und zu 96,5 % aus ^{238}U . Durch kontrollierte Kernspaltung von ^{235}U und durch die Folgereaktionen wird Energie freigesetzt.

- 4 a) Begründen Sie, dass es unter den Gesichtspunkten des Strahlenschutzes vertretbar ist, ein frisches Uran-Pellet kurzzeitig in der mit einem Einweghandschuh geschützten Hand zu halten.

Die folgende Reaktionsgleichung beschreibt eine häufig bei ^{235}U auftretende Kernspaltung:



Gegebene Atommassen: $m({}^{100}\text{Zr}) = 99,917762 \text{ u}$; $m({}^{133}\text{Te}) = 132,910955 \text{ u}$

- 5 b) Zeigen Sie, dass bei der Spaltung eines ^{235}U -Kerns eine Energie von 184 MeV freigesetzt wird.
- 4 c) Beschreiben Sie allgemein die Bedingungen, unter denen bei einer Kernspaltung eine Kettenreaktion in Gang gesetzt und kontrolliert aufrechterhalten werden kann.
- 5 d) Berechnen Sie den Wert, um den die Masse des Pellets abnimmt, wenn während der Nutzungszeit des Pellets ausschließlich die oben angegebene Reaktion abläuft und 0,27 g des ^{235}U im Pellet gespalten werden.

Nach etwa fünf Jahren werden die Brennstäbe aus dem Reaktor entnommen und die Kettenreaktion stoppt.

- 5 e) In den Pellets befinden sich zu diesem Zeitpunkt weitere radioaktive Isotope, z. B. das Iod-Isotop ^{131}I mit der Halbwertszeit $T_{1/2} = 8,025 \text{ d}$. Bestimmen Sie die Zeitdauer, bis sich die zunächst vorhandene Anzahl der ^{131}I -Kerne auf 1,0 % verringert hat.
- 6 f) Drei Monate nach dem Ende der kontrollierten Kettenreaktion liegt die Leistung eines verbrauchten Pellets bei 0,1 W. Schätzen Sie die Äquivalentdosis ab, die durch eine Hand aufgenommen wird, wenn man ein solches Pellet für eine Minute in der geschlossenen und mit einem Einweghandschuh geschützten Hand hält. Begründen Sie die von Ihnen getroffenen Annahmen kurz. Interpretieren Sie Ihr Ergebnis im Vergleich zum durchschnittlichen Wert der in Deutschland auftretenden natürlichen Strahlenbelastung.

2. Bestimmung der Planck-Konstante

Am 20. Mai 2019 wird das Ur-Kilogramm „in Rente geschickt“. Die Neudefinition des Kilogramms wird dann auf die Planck-Konstante h zurückgeführt, deren exakten Bestimmung man sich in den vergangenen 100 Jahren immer wieder in verschiedenen Versuchen gewidmet hat. Der äußere Photoeffekt bei einer Vakuumphotozelle bietet eine Möglichkeit, diese Naturkonstante zu bestimmen.

- 7 a) Durch einen Versuch soll die maximale kinetische Energie der bei Bestrahlung mit Licht ausgelösten Photoelektronen in Abhängigkeit von der Frequenz des Lichts bestimmt werden. Fertigen Sie eine beschriftete Skizze eines geeigneten Versuchsaufbaus an und erläutern Sie das experimentelle Vorgehen.

(Fortsetzung nächste Seite)

9

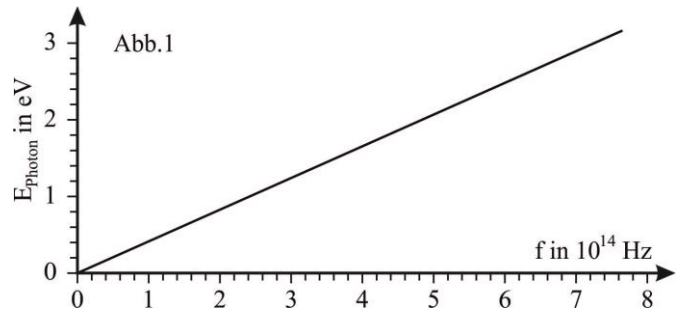
- b) Für die Spannung U_G zwischen Kathode und Anode einer Vakuumphotozelle, bei welcher der Photostrom zum Erliegen kommt, ergeben sich in Abhängigkeit von der Frequenz f des Lichts folgende Werte:

f in 10^{14} Hz	5,85	6,09	6,88	7,38
U_G in V	0,15	0,23	0,56	0,76

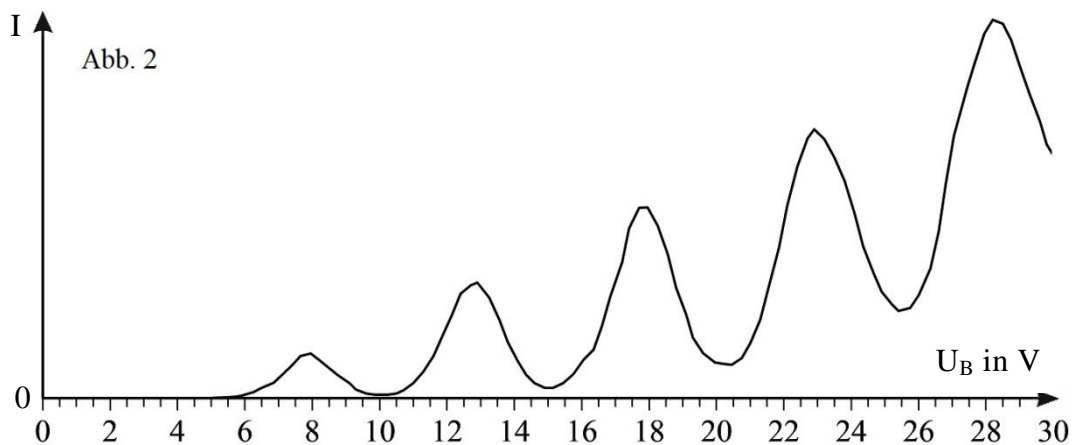
Erstellen Sie aus den Messwerten ein geeignetes Diagramm und bestimmen Sie daraus die Grenzfrequenz f_G und die Planck-Konstante h .

4

- c) Unter Verwendung des Literaturwerts für h lässt sich das Diagramm in Abb. 1 erstellen. Eine Abiturientin behauptet, dass sich daraus bei Kenntnis des Werts für die Austrittsarbeit des Kathodenmaterials die zugehörige Grenzfrequenz f_G ermitteln lässt. Nehmen Sie zu dieser Behauptung Stellung.



Eine weitere Möglichkeit, die Planck-Konstante zu ermitteln, bietet der Franck-Hertz-Versuch. Im Experiment ergibt sich für die Abhängigkeit der Stromstärke I von der Beschleunigungsspannung U_B das in Abb. 2 dargestellte Diagramm. Von der mit Quecksilberdampf gefüllten Röhre geht Strahlung der Wellenlänge 254 nm aus.



7

- d) Ermitteln Sie anhand des Diagramms einen Wert für die Naturkonstante h und erläutern Sie Ihr Vorgehen. Bestimmen Sie die prozentuale Abweichung des ermittelten Wertes vom Literaturwert.

Als dritte Variante lässt sich die Planck-Konstante h bei Kenntnis der Beschleunigungsspannung U_B der Elektronen aus der Auswertung des Spektrums einer Röntgenröhre ermitteln.

4

- e) Stellen Sie eine Formel zur Bestimmung von h auf und geben Sie an, wie Sie die Werte für die in der Formel vorkommenden Größen erhalten.

60

1. Kernfusionsreaktor ITER

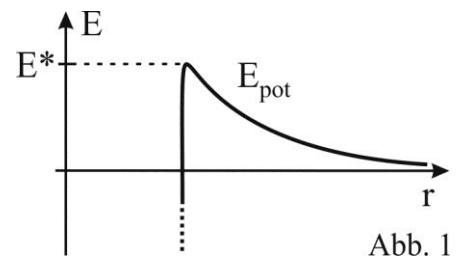
In Südfrankreich wird seit 2007 der Kernfusionsreaktor ITER gebaut. Eine Reaktion, die dort stattfinden soll, ist die Fusion eines Deuteriumkerns ${}^2\text{H}^+$ ($m_d = 2,013553 \text{ u}$) mit einem Tritiumkern ${}^3\text{H}^+$ ($m_t = 3,015501 \text{ u}$). Hierbei entsteht neben einem neuen Atomkern noch ein freies Neutron.

- 4 a) Bei einer Temperatur von 100 Mio. °C beträgt im Mittel die kinetische Energie eines Deuterium- bzw. Tritiumkerns etwa 13 keV. Geben Sie die Ionisierungsenergie eines Wasserstoffatoms an und begründen Sie, dass es bei Temperaturen im Reaktor von ca. 100 Mio. °C nur vollständig ionisierte Deuterium- und Tritiumatome gibt.
- 6 b) Geben Sie die Reaktionsgleichung für die Fusion von einem Deuterium- mit einem Tritiumkern an und bestimmen Sie den Q-Wert der Reaktion. [zur Kontrolle: $Q = 17,6 \text{ MeV}$]
- 4 c) Schätzen Sie die Masse des jährlich für einen zukünftigen Kernfusionsreaktor benötigten Tritiums ab, wenn dieser eine Leistung von 3,0 GW haben soll.

Da Tritium in der Natur sehr selten ist, soll ein zukünftiger Fusionsreaktor die in Teilaufgabe c berechnete Menge an Tritium vollständig selbst „erbrüten“. Dazu bringt man in die Reaktorwände das Lithiumisotop ${}^6\text{Li}$ ein. Wird dieses Lithium von einem Neutron getroffen, entstehen Tritium und Helium ${}^4\text{He}$; dabei wird pro Reaktion die Energie 4,78 MeV frei.

- 2 d) Bestimmen Sie den Faktor, um den sich hierdurch die Leistung des Reaktors im Idealfall erhöhen würde.
- 4 e) Begründen Sie, dass sowohl bei Inbetriebnahme als auch im laufenden Betrieb des Reaktors Neutronen von außen zugeführt werden müssen, obwohl bei der Fusion Neutronen frei werden.

- 8 f) Die nebenstehende Abbildung zeigt qualitativ einen Ausschnitt des Verlaufs der potentiellen Energie eines Deuteriumkerns im Abstand r zu einem Tritiumkern. Erklären Sie den Verlauf der potentiellen Energie und begründen Sie, dass es zur Fusionsreaktion kommen kann, obwohl die kinetische Energie der beiden Reaktionspartner deutlich unterhalb der Energie E^* liegt.



- 6 g) Bewerten Sie den Einsatz eines Fusionsreaktors zur Energieversorgung, indem Sie jeweils zwei Argumente für und gegen diese Technologie abwägen.

2. Metallhydrid-Speicher

In Lanthan-Nickel-Pulver kann Wasserstoff unter hohem Druck eingelagert werden. Dabei dringen die Wasserstoffatome in das Gitter ein, das von Lanthan- und Nickelatomen gebildet wird, und sind auf Zwischengitterplätzen gebunden. Das Atomgitter wird dadurch aufgeweitet, d. h. der Abstand d der Gitterebenen vergrößert sich auf d^* (vgl. Abb. 2). Die Veränderung dieses Abstands kann mit Röntgenstrahlung untersucht werden.

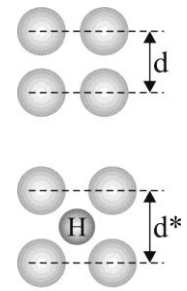


Abb. 2

- 5 a) Fertigen Sie eine beschriftete Skizze einer Röntgenröhre inklusive der elektrischen Schaltung an.
- 7 b) Skizzieren Sie das Spektrum einer Röntgenröhre und erläutern Sie, inwiefern es als Beleg für das quantenphysikalische Atommodell aufgefasst werden kann.

Die Röntgenröhre liefert Strahlung der Wellenlänge $\lambda = 0,179 \text{ nm}$, die an den Gitterebenen im Abstand d des Metallpulvers reflektiert wird. Unter bestimmten Einfallswinkeln α der Röntgenstrahlung tritt konstruktive Interferenz auf (vgl. Abb. 3).

Für das Intensitätsmaximum 1. Ordnung gilt der Zusammenhang $\lambda = 2d \sin(\alpha)$.

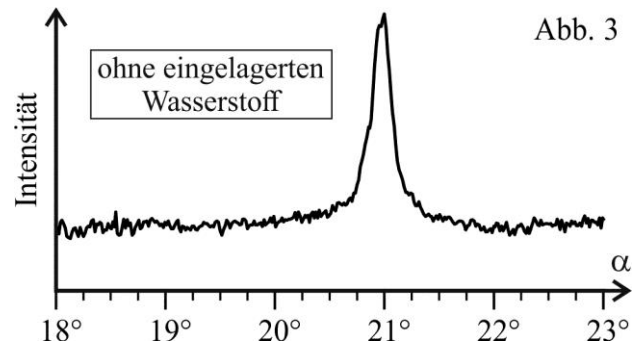


Abb. 3

- 3 c) Zeigen Sie, dass der Abstand d der Ebenen des wasserstofffreien Gitters $0,25 \text{ nm}$ beträgt.
- 5 d) Beim Einleiten von Wasserstoff in das Metallpulver werden Wasserstoffatome von der Außenfläche des Speichers beginnend auf Zwischengitterplätze eingebaut. Mit dem Einbau vergrößert sich der Gitterebenenabstand in diesen Bereichen um $6,8 \%$. Berechnen Sie den Winkel α , unter dem nun das Intensitätsmaximum 1. Ordnung auftritt, und skizzieren Sie den erwarteten Kurvenverlauf zwischen 18° und 23° , wenn ein Teil der Zwischengitterplätze mit Wasserstoffatomen besetzt ist.
- 6 e) Pro Metallatom kann im Durchschnitt ein Wasserstoffatom im Gitter eingelagert werden. Zur Energieversorgung eines Kraftfahrzeugs wird ca. 1 kg Wasserstoff pro 100 km benötigt. Schätzen Sie die Masse eines Metallhydrid-Speichers ab, der für Kraftfahrzeuge nötig wäre, und beurteilen Sie damit die Einsetzbarkeit dieses Speichers.

Ph 12 – Astrophysik 1

1. Die Internationale Raumstation

Die Internationale Raumstation (ISS) umläuft die Erde auf einer näherungsweise kreisförmigen Bahn von West nach Ost in einer mittleren Höhe von 400 km.



- 7 a) Zeigen Sie, dass die ISS innerhalb von 92 Minuten die Erde einmal umläuft, und bestimmen Sie, wie oft für die Astronauten an Bord der ISS während eines Erdtages die Sonne aufgeht. Erklären Sie ferner, dass die ISS nach 92 Minuten nicht an derselben Stelle am Himmel beobachtet werden kann.
- 6 b) Berechnen Sie die Umlaufgeschwindigkeit v_{ISS} der Raumstation auf ihrer Bahn um die Erde und begründen Sie, dass bei Beobachtung im Zenit die Bewegung der ISS mit der Bewegung eines Verkehrsflugzeuges vergleichbar ist, das in etwa 10 km Höhe mit einer Geschwindigkeit von 800 km/h fliegt. Vergleichen Sie dazu zum Beispiel die Winkel, welche die Flugobjekte in einer bestimmten Zeit in Bezug auf den Beobachter überstreichen.
- [zur Kontrolle: $v_{ISS} = 2,8 \cdot 10^4$ km/h]
- 4 c) Im Gegensatz zu einem Flugzeug verschwindet die ISS unvermittelt am Nachthimmel, bevor sie den Horizont erreicht hat. Erklären Sie dieses Phänomen. Nennen Sie eine weitere Möglichkeit zur Unterscheidung beider Objekte.
- Die ISS verliert täglich etwa 100 m an Höhe. Die deshalb immer wieder notwendige Bahnkorrektur geschieht auf einer halben Ellipsenbahn.
- 2 d) Geben Sie einen Grund für den Höhenverlust an.
- 4 e) Fertigen Sie eine Skizze der Flugbahn vor, während und nach der Bahnanhebung an und erläutern Sie qualitativ die hierzu notwendigen Geschwindigkeitsänderungen der ISS.
- Bei optimalen Bedingungen erreicht die ISS eine scheinbare Helligkeit, bei der die Bestrahlungsstärke etwa 25-mal so groß ist wie die von Sirius, dem hellsten Stern am nächtlichen Nordhimmel. Sirius hat die scheinbare Helligkeit $-1,44$.
- 4 f) Geben Sie an, bis zu welcher scheinbaren Helligkeit Himmelsobjekte bei günstigen Bedingungen mit bloßem Auge beobachtet werden können. Bestimmen Sie die scheinbare Helligkeit der ISS bei optimalen Bedingungen.
- 5 g) Der ISS muss permanent eine elektrische Leistung P_{perm} von 120 kW zur Verfügung stehen. Dafür ist die Raumstation mit vier Solarmodulen ausgestattet, deren Solarzellen eine Fläche von 4500 m^2 haben und deren Wirkungsgrad 14 % beträgt. Berechnen Sie die maximale Leistung P_{max} der Module. Erläutern Sie anhand zweier Aspekte, warum sich P_{max} deutlich von P_{perm} unterscheiden muss.

[zur Kontrolle: $P_{max} = 861$ kW]

(Fortsetzung nächste Seite)

2. Tau Ceti f – ein belebter Exoplanet?

Tau Ceti ist ein sonnenähnlicher Hauptreihenstern im Sternbild Walfisch. Seine scheinbare Helligkeit beträgt 3,50, seine Parallaxe 0,274''.

- 8 a) Berechnen Sie die relative Leuchtkraft L^* des Sterns und zeigen Sie, dass seine Masse etwas kleiner als die Sonnenmasse ist. [zur Kontrolle: $L^* = 0,453$]

Man geht davon aus, dass zu Tau Ceti mehrere Exoplaneten gehören, darunter Tau Ceti f. Dieser ist im Teleskop nicht sichtbar, macht sich aber durch eine periodische Bewegung des Sterns um den gemeinsamen Schwerpunkt bemerkbar. Das Zentrum des Sterns umläuft dabei den gemeinsamen Schwerpunkt in einem Zeitraum von 641 Tagen mit einer Bahngeschwindigkeit von 0,6 m/s. Vereinfachend sollen kreisförmige Bahnen von Stern und Exoplanet angenommen werden. Zudem soll der Einfluss der anderen Exoplaneten auf die Bewegung von Tau Ceti und von Tau Ceti f im Folgenden unberücksichtigt bleiben.

- 5 b) Erläutern Sie anhand einer geeigneten Skizze, wie man die Bahngeschwindigkeit des Sterns um den gemeinsamen Schwerpunkt ermitteln kann.

- 7 c) Genauere Messungen haben ergeben, dass die Masse von Tau Ceti 76,8 % der Sonnenmasse beträgt. Zeigen Sie, dass der mittlere Bahnradius des Exoplaneten ungefähr so groß ist wie die Entfernung der Erde von der Sonne. Erläutern Sie die Annahme, die Sie hierbei gemacht haben. Berechnen Sie ferner den Bahnradius r_S von Tau Ceti. [zur Kontrolle: $r_S = 5 \cdot 10^6$ m]

- 3 d) Bestimmen Sie die Masse des Exoplaneten in Vielfachen der Erdmasse.

- 5 e) Berechnen Sie die Bestrahlungsstärke auf Tau Ceti f und vergleichen Sie diese mit der Solarkonstante. Beurteilen Sie auf Grundlage Ihres Ergebnisses die Möglichkeit, dass auf dem Exoplaneten Leben in einer Form, wie wir es auf der Erde kennen, existieren könnte.

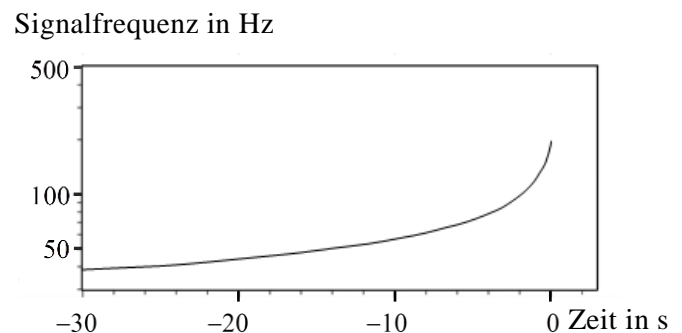
Ph 12 – Astrophysik 2

1. Kilonova im Sternbild Wasserschlange

Am 17. August 2017 gelang es, Gravitationswellen nachzuweisen, die ausgesandt wurden, als in der Galaxie NGC 4993 im Sternbild Wasserschlange zwei Neutronensterne verschmolzen. Diese bildeten vorher ein rotierendes Doppelsternsystem mit etwa 2,8 Sonnenmassen. Bei der Verschmelzung der beiden Neutronensterne wurde ein Teil der Sternmaterie als heiße interstellare Wolke in die Umgebung ausgestoßen. Das Nachleuchten dieser interstellaren Wolke bezeichnet man als Kilonova.

- 4 a) Die Kilonova erschien bei $23^\circ 23'$ südlich des Himmelsäquators. Die geographische Breite der Zugspitze beträgt $47,5^\circ$. Entscheiden Sie begründet, ob der Ort der Kilonova von der Zugspitze aus sichtbar ist.
- 2 b) Nennen Sie zwei charakteristische Merkmale eines Neutronensterns.

Nebenstehende Abbildung zeigt die vom Gravitationswellendetektor LIGO gemessene Signalfrequenz als Funktion der Zeit. Die Signalfrequenz ist doppelt so groß wie die Rotationsfrequenz des Doppelsternsystems. Zum Zeitpunkt $t = 0$ erfolgte die Verschmelzung der Neutronensterne.



- 4 c) Interpretieren Sie die Messdaten des LIGO-Detektors in Bezug auf die zeitliche Entwicklung der Rotationsbewegung und auf die Form der Bahnen, auf denen sich die Neutronensterne innerhalb der letzten 30 Sekunden vor ihrer Verschmelzung bewegten.
- 5 d) Bestimmen Sie den Abstand der Mittelpunkte der beiden Neutronensterne 12 Sekunden vor ihrer Verschmelzung. Der mit der Aussendung der Gravitationswellen verbundene Energieverlust soll dabei unberücksichtigt bleiben.

Einen halben Tag nach der Verschmelzung der Neutronensterne war die interstellare Wolke rund 8000 K heiß und hatte eine Leuchtkraft von 100 Millionen Sonnenleuchtkräften. Die scheinbare Helligkeit der interstellaren Wolke hatte zu diesem Zeitpunkt den Wert 17,9.

- 6 e) Berechnen Sie die absolute Helligkeit M der interstellaren Wolke einen halben Tag nach der Verschmelzung der Neutronensterne und die Entfernung von der Erde, in der sich die Kilonova ereignete. [zur Kontrolle: $M = -15,2$]
- 9 f) Zeichnen Sie ein Hertzsprung-Russell-Diagramm (HRD), auf dessen Hochwertachse die absolute Helligkeit bis $M = -17$ aufgetragen wird. Kennzeichnen Sie die für die Sternentwicklung charakteristischen Bereiche und tragen Sie die heutige Position der Sonne sowie ihren voraussichtlichen Entwicklungspfad in das Diagramm ein. Markieren Sie unter Verwendung der bisherigen Ergebnisse im HRD die Position, an der sich die Kilonova 0,5 Tage nach der Verschmelzung der Neutronensterne befand.

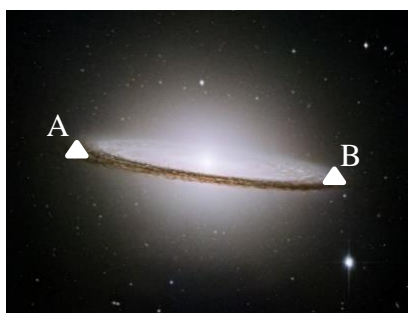
(Fortsetzung nächste Seite)

4

- g) Unmittelbar nach der Verschmelzung zweier Neutronensterne ist die Neutronendichte in der interstellaren Wolke sehr hoch. Dadurch wird die Anlagerung zusätzlicher Neutronen an Atomkerne (Neutroneneinfang) begünstigt. Es entstehen schwere Isotope mit hohem Neutronenüberschuss; solche Isotope sind β^- -Strahler. Bei einem radioaktiven β^- -Zerfall wandelt sich ein Neutron unter Aussendung eines Elektrons und eines Elektron-Antineutrinos in ein Proton um: $n \rightarrow p + e + \bar{\nu}_e$.
Beschreiben Sie prinzipiell, wie in einer Kilonova aus Eisen Gold entstehen kann.

2. Die Sombrero-Galaxie

In der 31 Millionen Lichtjahre entfernten Galaxie M104 im Sternbild Jungfrau wird für einen δ -Cephei-Stern die in Abb. 2 dargestellte Helligkeitskurve beobachtet. Die Oberflächen-temperatur des Sterns beträgt bei mittlerer scheinbarer Helligkeit $6,4 \cdot 10^3$ K.



Galaxie M104 Abb. 1

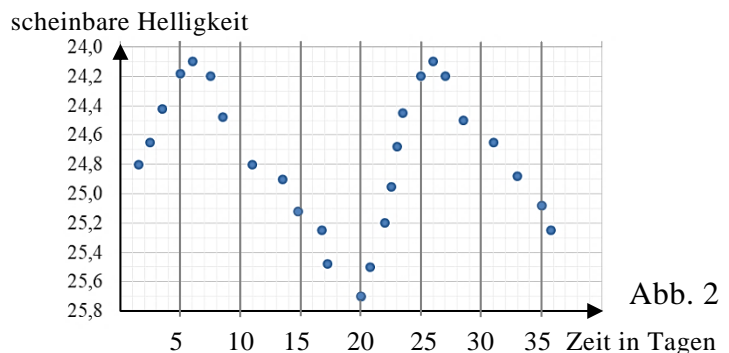


Abb. 2

9

- a) Die mittlere Leuchtkraft des Sterns beträgt das $8,4 \cdot 10^3$ -fache der Sonnenleuchtkraft. Zeigen Sie, dass dies mit der angegebenen Helligkeitskurve im Einklang steht, und bestimmen Sie den relativen Radius, den der Stern bei mittlerer Leuchtkraft besitzt.

3

- b) Geben Sie das Entwicklungsstadium an, in dem sich der Stern befindet. Begründen Sie Ihre Antwort.

Bei spektroskopischen Untersuchungen wird die H_α -Linie des Wasserstoffs im äußersten Randbereich der Galaxie M104 (vgl. Abb. 1) im Bereich A bei der Wellenlänge 657,35 nm und im Bereich B bei der Wellenlänge 659,69 nm beobachtet. Die Laborwellenlänge der H_α -Linie beträgt 656,28 nm.

6

- c) Entscheiden Sie begründet, aber ohne Rechnung, ob sich die Galaxie M104 von der Erde weg oder auf die Erde zu bewegt. Berechnen Sie den Betrag der Relativgeschwindigkeit von M104 zur Erde.

Mithilfe der Hubble-Beziehung kann man die Fluchtgeschwindigkeit weit entfernter Galaxien allein aus ihrer Entfernung abschätzen.

4

- d) Berechnen Sie den sich aus der Hubble-Beziehung ergebenden Wert der Fluchtgeschwindigkeit für die Galaxie M104 und geben Sie einen möglichen Grund dafür an, dass dieser von dem in Teilaufgabe c berechneten Wert abweicht.

4

- e) Beschreiben Sie Grundaussagen des Urknallmodells und deuten Sie in diesem Zusammenhang die Hubble-Beziehung.