48. Internationale PhysikOlympiade
Bali, Indonesien 2017

Wettbewerbsleitung
Dr. Stefan Petersen
Tel.: 0431 / 880 - 5120
email: petersen@ipho.info

Sekretariat
Lulu Hoffmeister
Tel.: 0431 / 880 - 5387
email: sekretariat@ipho.info

Anschrift: IPN an der Universität Kiel
Olshausenstraße 62
24098 Kiel

Fax: 0431 / 880 - 3148
Webseite: **www.ipho.info**

Aufgaben der 2. Runde im Auswahlwettbewerb zur 48. IPhO 2017

Hinweise zur Bearbeitung

- Teilnahmeberechtigt sind alle Schülerinnen und Schüler, die die 1. Runde erfolgreich abgeschlossen oder sich über einen anderen Wettbewerb für die 2. Runde qualifiziert haben und **nach dem 30. Juni 1997 geboren** sind.
- Die drei Aufgaben sind **ohne fremde Hilfe und in Einzelarbeit** zu lösen. Gemeinschaftslösungen sind nicht zulässig. **Beachten Sie hierzu auch die erste Seite des beigefügten Adressbogens und schicken Sie diesen ausgefüllt und unterschrieben mit!**
- Bitte bearbeiten Sie jede Aufgabe auf gesonderten Blättern und schreiben Sie auf jedes Blatt Ihren Namen und Ihren Schülercode.
- Die Lösungen können handschriftlich abgegeben werden. Die Darstellung sollte logisch vollständig und nicht unnötig breit sein. Wenn Sie Formeln oder Zwischenergebnisse, die nicht im Physiklehrbuch der Schule stehen, aus anderen Quellen entnehmen, geben Sie diese bitte an.
- **Das Lösen der Probleme mit dem Computer ist, wenn nicht anders angegeben, nicht zulässig**. Sie dürfen einen Computer unterstützend (zum Beispiel zum Tippen Ihrer Bearbeitung oder zum Zeichnen) verwenden. Die Lösung muss aber ohne Computer nachvollziehbar sein.
- Der **Abgabetermin ist der 09.11.2016** (Poststempel). Bis zu diesem Datum müssen Sie Ihre **Bearbeitung unkorrigiert zu Ihrem Landesbeauftragten schicken**. Die Mitteilung, ob Sie in die nächste Runde kommen, erhalten Sie kurz vor Weihnachten. Eingeladen werden die etwa 50 Bestplatzierten. **Die 3. Runde findet vom 21.-27.01.2017 am IPP in Greifswald statt**.
- Die eingereichten Arbeiten werden nicht zurückgeschickt. Es wird deshalb empfohlen, für eigene Zwecke eine Kopie anzufertigen. Eine Musterlösung geht Ihnen mit der Benachrichtigung über Ihr Abschneiden in der 2. Runde zu.
- In der Regel haben selbst die Bestplatzierten nicht alle Aufgaben richtig gelöst. **Verlieren Sie also nicht den Mut** und schicken Sie Ihre Bearbeitung auch dann ein, wenn Sie nicht alle Aufgabenteile bearbeiten konnten. Wir wünschen viel Erfolg!
- Bitte schauen Sie auch auf **www.ipho.info** für aktuelle Hinweise bzw. Korrekturen zu den Aufgaben.

Naturkonstanten und gebräuchliche Größen

Konstante	**gebräuchliche Formelzeichen**	**Wert**
Absoluter Nullpunkt	T_0	$0\,\mathrm{K} = -273{,}15\,°\mathrm{C}$
Atomare Masseneinheit	u	$1{,}660\,565\,5 \cdot 10^{-27}\,\mathrm{kg}$
Avogadro-Konstante	N_A	$6{,}022\,136\,7 \cdot 10^{23}\,\mathrm{mol}^{-1}$
Boltzmann-Konstante	k_B	$1{,}380\,658 \cdot 10^{-23}\,\mathrm{J\,K}^{-1}$
Elektrische Feldkonstante	ε_0	$8{,}854\,187\,817 \cdot 10^{-12}\,\mathrm{A\,s\,V^{-1}\,m^{-1}}$
Elementarladung	e	$1{,}602\,177\,33 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{A\,s}$
Fallbeschleunigung auf der Erde	g	$9{,}806\,65\,\mathrm{m\,s^{-2}}$
Gravitationskonstante	γ, G	$6{,}672\,59 \cdot 10^{-11}\,\mathrm{m^3\,kg^{-1}\,s^{-2}}$
Lichtgeschwindigkeit im Vakuum	c_0	$2{,}997\,924\,58 \cdot 10^{8}\,\mathrm{m\,s^{-1}}$
Magnetische Feldkonstante	μ_0	$1{,}256\,637\,061\,4 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{V\,s\,A^{-1}\,m^{-1}}$
Normdruck, Atmosphärendruck	p_n	$101\,325\,\mathrm{N\,m^{-2}}$
Planck'sches Wirkungsquantum	h	$6{,}626\,075\,5 \cdot 10^{-34}\,\mathrm{J\,s}$
Ruhemasse des Elektrons	m_e	$9{,}109\,389\,7 \cdot 10^{-31}\,\mathrm{kg}$
Ruhemasse des Neutrons	m_n	$1{,}674\,928\,6 \cdot 10^{-27}\,\mathrm{kg}$
Ruhemasse des Protons	m_p	$1{,}672\,623\,1 \cdot 10^{-27}\,\mathrm{kg}$
Rydberg-Konstante	R_∞	$1{,}097\,373\,153\,4 \cdot 10^{7}\,\mathrm{m^{-1}}$
Stefan-Boltzmann-Konstante	α, σ	$5{,}670\,32 \cdot 10^{-8}\,\mathrm{W\,m^{-2}\,K^{-4}}$
Universelle Gaskonstante	R	$8{,}314\,510\,\mathrm{J\,K^{-1}\,mol^{-1}}$
Elektronenvolt	eV	$1\,\mathrm{eV} = 1{,}602\,177\,33 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{J}$

Aufgabe 1 Weiße Zwerge (6+9+7+8 Pkt.)

1.1 Die Entdeckung von Sirius B

Der von der Erde etwa 8,6 Lichtjahre entfernte Stern Sirius A besitzt bei einer Masse von etwa $4{,}2 \cdot 10^{30}$ kg eine etwa 25 Mal so große Leuchtkraft wie die Sonne. Der Stern emittiert also etwa das 25-fache der Strahlungsleistung der Sonne, deren Strahlungsleistung bei $3{,}8 \cdot 10^{26}$ W liegt. Aufgrund der relativ geringen Entfernung zum Sonnensystem ist Sirius A mit einer scheinbaren Helligkeit[1] von $-1{,}46$ mag der hellste Stern am Nachthimmel und daher seit langer Zeit Gegenstand astronomischer Untersuchungen. Gegen Mitte des 19. Jahrhunderts wurde aufgrund von Unregelmäßigkeiten der Bewegung von Sirius auf einen Begleiter dieses Sterns geschlossen.

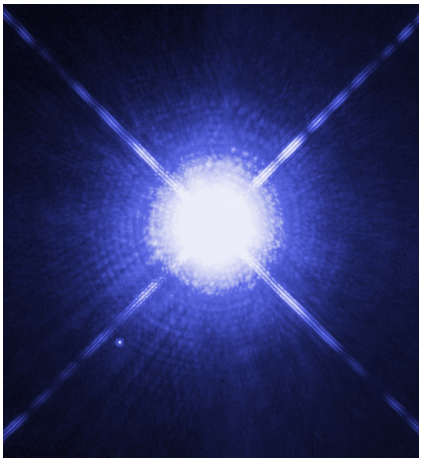

Abbildung 1: *Sirius A und Sirius B vom Hubble-Weltraumteleskop aufgenommen (NASA, ESA, H. Bond (STScI), und M. Barstow (U. of Leicester), liz. CC BY 3.0).*

In den folgenden Jahrzehnten konnte bestätigt werden, dass Sirius ein Doppelsternsystem ist. Der zweite Stern, Sirius B, besitzt etwa die Hälfte der Masse von Sirius A und eine Oberflächentemperatur von ungefähr $2{,}5 \cdot 10^4$ K. Dies sorgte für großes Aufsehen, da der Stern mit einer scheinbaren Helligkeit von 8,44 mag sehr viel schwächer leuchtet, als man es aufgrund dieser Daten erwartet hätte. Damit musste Sirius B sehr klein und sehr dicht sein.

Der englische Astronom Arthur Stanley Eddington fasste dies folgendermaßen zusammen:

> We learn about the stars by receiving and interpreting the messages which their light brings to us. The message of the Companion of Sirius when it was decoded ran: "I am composed of material 3,000 times denser than anything you have ever come across; a ton of my material would be a little nugget that you could put in a matchbox." What reply can one make to such a message? The reply which most of us made in 1914 was "Shut up. Don't talk nonsense." (Eddington, A.S. (1927). *Stars and Atoms*. Clarendon Press, p.50.)

1.a) Schätzen Sie mit den im Text gegebenen Informationen die Leuchtkraft des Begleitsterns Sirius B und dessen Radius ab. Beachten Sie dabei, dass das Spektrum von Sirius B aufgrund der höheren Oberflächentemperatur gegenüber dem von Sirius A verändert und, in der Folge, die aus der scheinbaren Helligkeit bestimmte Leuchtkraft etwa um einen Faktor 10 zu niedrig ist. *(4 Pkt.)*

1.b) Berechnen Sie damit, wie viel ein Kubikzentimeter Materie von Sirius B im Mittel etwa wiegt und wie groß die Schwerebeschleunigung an dessen Oberfläche ungefähr ist. *(2 Pkt.)*

Die Ergebnisse der obigen Aufgaben zeigen, dass es sich bei Sirius B um einen sehr speziellen Stern handeln muss. Tatsächlich gehört er zu einer Klasse Sterne, die weiße Zwerge genannt werden. Weiße Zwerge sind sehr kompakte Überreste von Sternen, in denen die Fusionsprozesse bereits zum Erliegen gekommen sind. Was aber hindert diese Sterne daran, weiter in sich zusammenzufallen? Dieser Frage sollen Sie sich in den folgenden Aufgaben widmen.

[1] Die scheinbare Helligkeit m eines Objektes ist ein Maß dafür, wie hell es einem Beobachter auf der Erde erscheint. Sie ist definiert über die von dem Objekt in einem bestimmten Wellenlängenbereich auf der Erde pro Fläche eintreffende Strahlungsleistung S. Für die scheinbare Helligkeit gilt $m = -2,5\ \log_{10} \frac{S}{S_0}$, wobei S_0 ein fester Referenzwert für die Strahlungsleistung in dem betrachteten Wellenlängenbereich ist. Die scheinbare Helligkeit wird als Zahl angegeben und trägt den Zusatz mag für „Magnitudo".

1.2 Phasenraumbetrachtung und entartetes Fermigas

In der klassischen Mechanik, wird der Zustand eines Punktteilchens durch dessen Ort $\vec{r}$ und dessen Geschwindigkeit $\vec{v}$ beschrieben. Alternativ kann statt der Geschwindigkeit auch der Impuls $\vec{p}$ des Teilchens verwendet werden. Ort und Impuls des Teilchens lassen sich als Koordinaten in dem so genannten Phasenraum auffassen. Jeder mögliche Zustand des Teilchens entspricht dabei einer Position im Phasenraum. Da es jeweils drei Dimensionen für den Ort und den Impuls gibt, besitzt der Phasenraum in diesem Fall sechs Dimensionen.

Die Heisenbergsche Unschärferelation der Quantenmechanik sagt nun aus, dass Ort und Impuls eines Teilchens nicht gleichzeitig beliebig genau bestimmbar sind. Für die Unbestimmtheiten Δr_x und Δp_x in eine beliebige Raumrichtung x gilt in der Formulierung von Heisenberg

$$\Delta r_x \cdot \Delta p_x \geq h\,.$$

Dabei bezeichnet $h \approx 6{,}626 \cdot 10^{-34}\,\mathrm{J\,s}$ das Plancksche Wirkungsquantum. Damit entspricht ein Teilchenzustand weniger einem Punkt im Phasenraum sondern einem Volumen der Größe h^3. Für so genannte Fermionen[2], zu denen sowohl Elektronen als auch Protonen und Neutronen gehören, gilt darüber hinaus das Pauli-Prinzip, nach dem zwei Teilchen gleicher Art nicht gleichzeitig in dem selben Zustand existieren können. Daher überlappen die gerade beschriebenen Phasenraumvolumina für diese Teilchen nicht. Aufgrund der beiden möglichen Spinorientierungen von Fermionen kann aber jedes Phasenraumvolumenelement zwei Teilchen aufnehmen.

Betrachten Sie ein Gas einer Sorte fermionischer Teilchen der Masse m. Das Gas sei auf ein Kugelvolumen mit Radius R verteilt und besitze eine Teilchendichte n. Nehmen Sie an, dass die Anzahl der Teilchen sehr groß ist. Im Grundzustand, also am Temperaturnullpunkt, nehmen die Fermionen einen energetisch möglichst tiefen Zustand ein und besitzen damit auch einen möglichst geringen Impuls. Aufgrund der obigen Betrachtungen können die Teilchen allerdings nicht alle einen sehr kleinen Impuls und damit eine niedrige kinetische Energie besitzen.

1.c) Bestimmen Sie mit Hilfe der obigen Betrachtungen den maximalen Impulsbetrag p_F eines Teilchens in dem Fermigas am Temperaturnullpunkt. Berücksichtigen Sie dabei nur die beschriebenen quantenmechanischen Effekte und vernachlässigen Sie alle anderen Wechselwirkungen. Zeigen Sie, dass die entsprechende kinetische Energie E_F, die so genannte Fermienergie, eines Teilchens gegeben ist durch *(3 Pkt.)*

$$E_\mathrm{F} = \frac{h^2}{8\,m}\left(\frac{3}{\pi}\right)^{2/3} n^{2/3}\,.$$

Wenn die thermische Energie der Teilchen deutlich kleiner als die Fermienergie ist, bestimmt letztere auch oberhalb des Temperaturnullpunktes das Verhalten eines Fermigases. Das Gas kann dann näherungsweise so behandelt werden als wäre es am Temperaturnullpunkt. Man spricht in diesem Fall von einem entarteten Fermigas.

1.d) Bestimmen Sie die gesamte kinetische Energie des entarteten Fermigases als Funktion der Teilchenmasse, des Radius und der Teilchendichte. *(3 Pkt.)*

Wenn der Radius des Gasvolumens verringert wird, erhöht sich entlang der obigen Betrachtung dessen kinetische Energie. Es muss also Arbeit gegen einen Druck aufgewandt werden, um das Gasvolumen zu komprimieren. Dieser Druck wird Entartungsdruck genannt.

[2] Die vollständige Beschreibung eines Fermigases erfolgt eigentlich im Rahmen der Quantenstatistik. Die vorgestellte semiklassische Untersuchung reproduziert aber die auftretenden Abhängigkeiten korrekt.

1.e) Bestimmen Sie die aus dem Entartungsdruck resultierende nach außen gerichtete Kraft des nichtrelativistischen Fermigases. Vergleichen Sie die Größe dieser Kraft für ein Elektronen- und ein Protonengas. Begründen Sie damit, warum der Entartungsdruck in einem Stern nahezu ausschließlich durch die Elektronen hervorgerufen wird. *(3 Pkt.)*

1.3 Sternentwicklung

Nun aber zurück zu den Sternen: In einem Stern wie unserer Sonne wirkt der durch die Fusionsprozesse im Inneren entstehende Strahlungsdruck der Kontraktion des Sternes aufgrund der Gravitation entgegen.

1.f) Leiten Sie einen Ausdruck für die potentielle Energie, die ein Stern mit Radius R, konstanter Dichte und Masse M aufgrund seines Gravitationsfeldes besitzt, her. *(3 Pkt.)*

Kommen die Fusionsprozesse zum Erliegen, so kühlt der Stern ab und zieht sich zusammen. Wenn der Stern weit genug abgekühlt ist, spielt der Strahlungsdruck keine dominante Rolle mehr und die Fermionengase im Stern entarten vollständig. Nehmen Sie an, dass der erloschene Stern komplett aus Helium, also zu gleichen Teilen aus Elektronen, Protonen und Neutronen, besteht.

1.g) Bestimmen Sie, auf welchen Radius sich der Stern nach dem Abkühlen zusammenziehen wird und schätzen sie den numerischen Wert dieses Radius für die Sonne, die eine Masse von etwa $M_\odot \approx 2{,}0 \cdot 10^{30}$ kg besitzt, ab. Begründen Sie, warum der Endzustand stabil ist. *(4 Pkt.)*

1.4 Chandrasekhar-Grenze

Die bisherige nichtrelativistische Betrachtung funktioniert bei sehr dichten Fermigasen nicht mehr, da die Teilchen dann sehr hohe Geschwindigkeiten besitzen und relativistisch betrachtet werden müssen. Nehmen Sie an, dass Sie auch im relativistischen Fall eine analoge Analyse zu der in den vorherigen Aufgabenteilen anstellen können.

1.h) Wiederholen Sie die Betrachtung zu der kinetischen Energie eines entarteten Fermigases für den Fall eines ultrarelativistischen Fermigases in dem die Fermionen alle eine kinetische Energie besitzen, die sehr viel größer als ihre Ruheenergie ist. *(3 Pkt.)*

1.i) Betrachten Sie einen Stern, in dem die Elektronen als ultrarelativistisch betrachtet werden können. Zeigen Sie, dass der Entartungsdruck der Elektronen oberhalb einer kritischen Masse nicht mehr ausreicht, um den Stern vor dem Kollabieren zu bewahren. Bestimmen Sie diese kritische Masse, die so genannte Chandrasekhar-Masse, und geben Sie diese als Vielfaches der Sonnenmasse an. *(3 Pkt.)*

Ein kollabierender weißer Zwerg kann zu einem Neutronenstern werden. In diesem vereinen sich Elektronen und Protonen zu Neutronen.

1.j) Schätzen Sie mit einer zu der obigen analogen Überlegung den Radius eines Neutronensterns ab, der eine Masse knapp oberhalb der Chandrasekhar-Masse besitzt, und vergleichen Sie diesen Radius mit dem eines weißen Zwerges einer Masse knapp unterhalb der kritischen Masse. *(2 Pkt.)*

Sie können für diese grobe Abschätzung die Neutronen als nichtrelativistisch annehmen und auch den weißen Zwerg nichtrelativistisch betrachten.

Aufgabe 2 Diodenphysik (14+5+11 Pkt.)

(Halbleiter-)Dioden sind elektrische Bauelemente, die im Alltag vielfältige Verwendungen finden. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass sie Strom in eine Richtung, die so genannte Durchlassrichtung, ab einer bestimmten angelegten Spannung sehr gut leiten und in die andere Richtung, die Sperrrichtung, sehr gut isolierend wirken. Dadurch können sie zum Beispiel zur Gleichrichtung von Strom verwendet werden.

Leuchtdioden – kurz LEDs – können elektrischen Strom direkt in Licht umwandeln. Wegen ihrer hohen Effizienz und Robustheit sind sie als Lichtquellen in den letzten Jahren immer beliebter geworden. Die Bandlücke des verwendeten Halbleitermaterials bestimmt dabei die Wellenlänge und damit die Farbe des von einer LED emittierten Lichtes.

Die folgenden Aufgaben befassen sich mit einigen Aspekten von Leuchtdioden.

2.1 LED im Schaltkreis

Die nebenstehende Abbildung 2 zeigt die Strom-Spannungs-Kennlinie einer LED in Durchlassrichtung.

2.a) Schätzen Sie aus der Kennlinie grob die dominante Wellenlänge des von der LED emittierten Lichtes ab und geben Sie an, welche Farbe das Licht hat. *(3 Pkt.)*

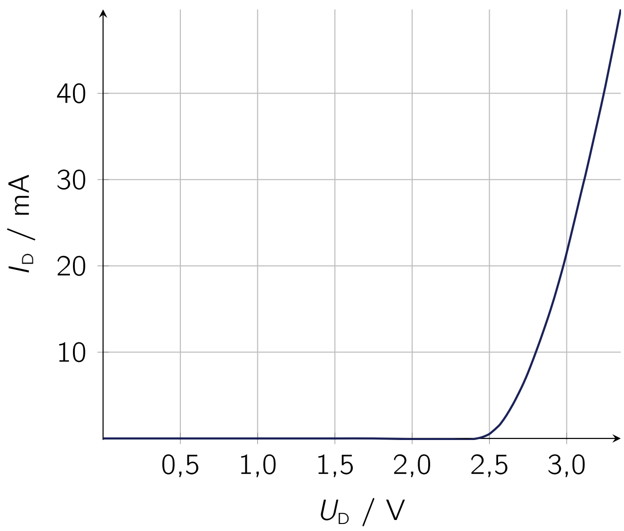

Abbildung 2: *Verlauf des Diodenstroms I_D als Funktion der Diodenspannung U_D in Durchlassrichtung.*

Die LED wird in dem in Abbildung 3 gezeigten Stromkreis verbaut. Der Stromkreis enthält neben der LED einen Schalter, eine Spannungsquelle, die eine Spannung $U = 4{,}0\,\mathrm{V}$ bereitstellt, einen Widerstand mit Widerstandswert $R = 100\,\Omega$ und einen Kondensator der Kapazität $C = 3{,}0\,\mu\mathrm{F}$. Der Schalter ist anfänglich offen und der Kondensator nicht geladen.

2.b) Bestimmen Sie mit Hilfe der Kennlinie die Größe des direkt nach dem Schließen des Schalters durch die LED fließenden Stromes und die über der LED abfallende Spannung. *(5 Pkt.)*

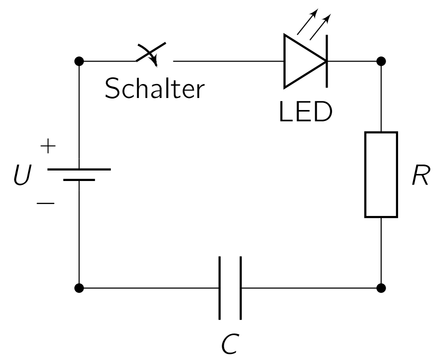

Abbildung 3: *Stromkreis mit LED.*

Der nichtlineare Verlauf der Diodenkennlinie erschwert eine weitergehende Betrachtung des Verhaltens der Schaltung. Näherungsweise kann man das elektrische Verhalten der LED aber durch eine Ersatzschaltung erfassen, in der eine Spannungsquelle und ein ohmscher Widerstand mit einer idealen Diode in Reihe geschaltet sind, die in Sperrichtung vollständig isolierend und in Durchlassrichtung perfekt leitend ist.

2.c) Bestimmen Sie die Parameter einer solchen Ersatzschaltung für die verwendete LED. Berechnen Sie damit die während des Aufladens des Kondensators insgesamt in der LED umgesetzte Energie. *(6 Pkt.)*

2.2 Bauform einer LED

Eine LED in typischer Bauform besteht, wie nebenstehend skizziert, aus einer kleinen lichtemittierenden Fläche, dem Halbleiterkristall, der in einem transparenten Kunststoffgehäuse eingegossen ist. Dieses schützt die Diode und formt die räumliche Abstrahlcharakteristik der LED.

In vielen Fällen möchte man die LED als gerichteten Strahler einsetzen, der möglichst viel Licht in eine Richtung abstrahlt. Hierzu wird ein charakteristisches Kunststoffgehäuse verwendet, das aus einem zylindrischen Teil der Länge ℓ und einer halbkugelförmigen Kuppe mit Radius r besteht. Der Radius r sei dabei deutlich größer als die Abmessung des Halbleiterkristalls. Eine gute Fokussierung ergibt sich, wenn alle Strahlen, die nahe der Symmetrieachse des Zylinders austreten, das Gehäuse parallel verlassen.

2.d) Bestimmen Sie, wie lang hierzu die Zylinderlänge ℓ in Abhängigkeit von dem Radius r gewählt werden muss, wenn der Brechungsindex des Gehäusematerials $n = 1{,}6$ beträgt. *(5 Pkt.)*

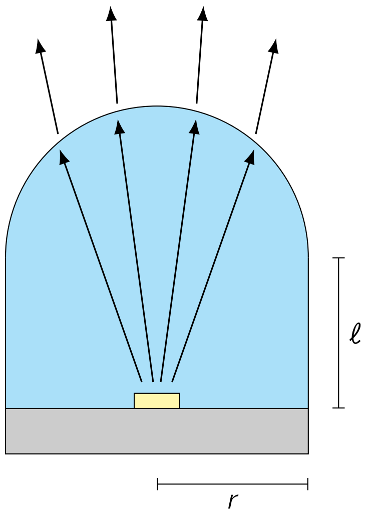

Abbildung 4: *Skizze zu Lichtstrahlen im LED-Gehäuse.*

2.3 Effizienz einer LED

Die hohe Effizienz von LEDs ist ein wesentlicher Grund für ihre zunehmende Verwendung als Lichtquellen. Verglichen mit Glühlampen, die einen großen Teil der aufgenommenen Leistung als Wärmestrahlung abgeben, können LEDs so konstruiert werden, dass sie nahezu ausschließlich Strahlung im sichtbaren Spektralbereich abgeben. Damit lassen sich unter bestimmten Voraussetzungen LEDs sogar mit einem elektrischen Wirkungsgrad größer als 100% betreiben. Sie geben dann also mehr Strahlungsleistung ab, als sie elektrische Leistung aufnehmen. Dies ist möglich, wenn die LED Wärme aus der Umgebung aufnimmt und diese in Strahlung umwandelt. Auch wenn der genaue Mechanismus dieses Vorganges kompliziert ist, lassen sich einige thermodynamische Überlegungen ohne genaue Kenntnis des Prozesses anstellen. Die LED kann dabei als Wärmepumpe betrachtet werden, die Wärme aus der Umgebung aufnimmt und Wärme in Form von Strahlung abgibt.

Das Strahlungsspektrum einer Glühlampe einer Temperatur T für Temperaturen weit oberhalb der Raumtemperatur T_0 kann durch das für einen Wärmestrahler typische Plancksche Strahlungsgesetz beschrieben werden. Demnach ist die von dem Strahler in einem engen Frequenzintervall $[\nu, \nu + \Delta\nu]$ mit $\Delta\nu \ll \nu$ pro Fläche abgestrahlte Leistung $I(\nu)\,\Delta\nu$ gegeben durch

$$I(\nu)\,\Delta\nu = \frac{2\,\pi\,h}{c^2}\,\frac{\nu^3}{e^{h\,\nu/k_\mathrm{B}\,T} - 1}\,\Delta\nu\,.$$

Dabei bezeichnen h das Plancksche Wirkungsquantum, c die Vakuumlichtgeschwindigkeit und k_B die Boltzmannkonstante. Die insgesamt pro Fläche emittierte Strahlungsleistung ergibt sich durch Integration des obigen Ausdruckes über alle möglichen Frequenzen.

Unter bestimmten Voraussetzungen lässt sich auch das Spektrum einer LED näherungsweise in ähnlicher Weise beschreiben. Um der Spektralverteilung der LED Rechnung zu tragen, werden bei der Integration allerdings nur Beiträge oberhalb einer bestimmten Frequenz ν_0 berücksichtigt, so dass sich die Strahlungsleistung P einer homogen leuchtenden Fläche der Größe A zu

$$P = A \int_{\nu_0}^{\infty} I(\nu)\,\mathrm{d}\nu\,.$$

ergibt. Dabei bezeichnet T allerdings nicht die Temperatur der LED sondern die effektive Temperatur des emittierten Lichts.

Betrachten Sie eine LED mit einer Oberfläche von $A = 1{,}0\,\mathrm{mm}^2$ und einer Strahlungsleistung von $P = 1{,}0\,\mu\mathrm{W}$. Das von der LED emittierte Licht habe dabei Wellenlängen, die nicht größer als 700 nm sind und die Umgebungstemperatur betrage 20 °C.

2.e) Schätzen Sie den theoretisch maximal erreichbaren elektrischen Wirkungsgrad der LED ab. Der elektrische Wirkungsgrad ist dabei festgelegt als das Verhältnis der abgegebenen Strahlungsleistung der LED zu der von ihr aufgenommenen elektrischen Leistung. *(11 Pkt.)*

Aufgabe 3 Experimentelle Aufgabe - Schwingende Stäbchen (20+6+14 Pkt.)

Die in Asien weitverbreiteten Essstäbchen besitzen in der Regel einen quadratischen oder kreisförmigen Querschnitt, der sich vom oberen zum unteren Ende hin verjüngt. Mit diesen Stäbchen lässt sich allerdings nicht nur Essen greifen. In dieser Aufgabe sollen Sie einige physikalische Experimente mit Essstäbchen durchführen.

Neben Essstäbchen[3] können Sie die folgenden Materialien zum Experimentieren verwenden: Stoppuhr, Lineal, Faden, Klebeband und außerdem alle anderen haushaltstypischen Dinge.

Allgemeine Hinweise zur experimentellen Aufgabe

- Beschreiben und dokumentieren Sie Ihr Vorgehen so ausführlich, dass jeder Schritt gut nachvollziehbar ist. Skizzieren Sie insbesondere Ihre Versuchsaufbauten.
- Führen Sie alle Ihre Versuche so durch, dass die Ergebnisse so genau wie möglich sind.
- Schätzen Sie außerdem die Fehler aller Ergebnisse sinnvoll ab.

3.1 Ein Essstäbchen als Pendel

Hängen Sie ein Essstäbchen, wie nebenstehend in Abb. 5 skizziert, an zwei leicht gespannten Fäden so auf, dass es möglichst vertikal hängt. Es empfiehlt dich dabei, das Stäbchen mit einer festen Schlaufe oder einem Knoten zu befestigen, damit es nicht rutscht. Wenn Sie das Stäbchen ein klein wenig aus der vertikalen Ruhelage auslenken, vollführt es Schwingungen um den Aufhängepunkt.

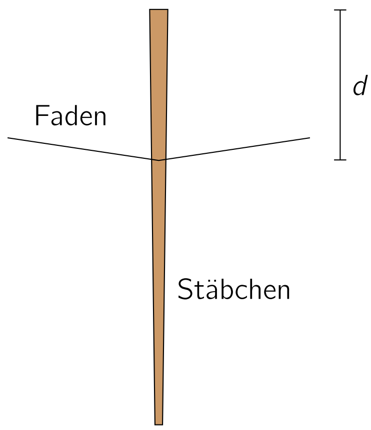

Abbildung 5: *Skizze zur Aufhängung des Stäbchens.*

3.a) Bestimmen Sie die Periodendauer der Schwingung des Stäbchens als Funktion des Abstandes d zwischen dem dickeren Ende des Stäbchens und dem Aufhängepunkt. Erstellen Sie einen Graphen, der diesen Zusammenhang darstellt. *(8 Pkt.)*

3.b) Bestimmen Sie mit Hilfe Ihrer Messergebnisse die Schwerebeschleunigung g auf der Erde. *(4 Pkt.)*

3.c) Bestimmen Sie mit Hilfe des Graphen den Abstand des Schwerpunktes des Esstäbchens zu seinem dickeren Ende. Hierfür sind verschiedene Herangehensweisen denkbar. Beschreiben Sie mindestens zwei verschiedene Auswertemethoden und vergleichen Sie die damit erzielten Ergebnisse hinsichtlich Ihrer Genauigkeit. *(7 Pkt.)*

Der Schwerpunkt lässt sich auf andere Art natürlich sehr viel einfacher bestimmen.

3.d) Bestimmen Sie die Schwerpunktsposition auch durch das Balancieren des Stäbchens auf einer schmalen Kante und vergleichen Sie das Ergebnis mit den vorherigen. *(1 Pkt.)*

[3] Die notwendige Anschaffung von Essstäbchen ist vielleicht auch eine gute Gelegenheit, asiatisch zu kochen oder ein asiatisches Restaurant zu besuchen und dabei seine Fähigkeiten im Essen mit Stäbchen zu trainieren.

3.2 Anstoßen des Stäbchens

Legen Sie ein Essstäbchen auf eine glatte (Tisch-)oberfläche. Stoßen Sie es, zum Beispiel mit einem weiteren Stäbchen, wie in Abb. 6 skizziert, leicht von der Seite an. Der Stoß soll dabei senkrecht zur Hauptachse des Stäbchens erfolgen.

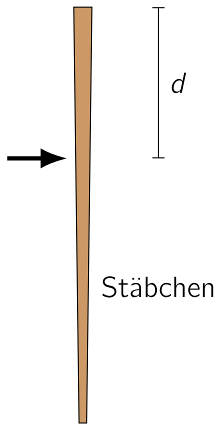

Abbildung 6: *Anstoßen des Stäbchens.*

3.e) Beobachten Sie die Bewegung des Stäbchens direkt nach dem Stoß. Bestimmen Sie experimentell den Abstand d zwischen Stoßpunkt und dickerem Ende des Stäbchens, bei dem sich das dünnere Ende des Stäbchens direkt nach dem Stoß nicht bewegt. Geben Sie das Verhältnis des gefundenen Wertes von d zur Gesamtlänge des Stäbchens an. *(3 Pkt.)*

3.f) Berechnen Sie, wie groß dieses Verhältnis für einen sehr dünnen Stab theoretisch ist. *(3 Pkt.)*

3.3 Gedämpfte Schwingung

Wenn ein Magnet über einer leitenden Oberfläche bewegt wird, induziert er in dieser Wirbelströme, die zu einer abbremsenden Kraft führen. Die Kraft hängt dabei insbesondere von den elektrischen Eigenschaften der Oberfläche ab. Dieser Effekt erlaubt die Untersuchung des spezifischen Widerstandes von Metallen[4].

Betrachten Sie einen Magneten, der an dem Ende eines, wie in dem ersten Aufgabenteil aufgehängten, Stäbchens befestigt ist. Lässt man das Stäbchen mit dem Magneten über einem geeigneten Metallstück schwingen, so wird die Schwingung aufgrund der Wirbelströme abgebremst. Es findet eine gedämpfte Schwingung statt. Für eine schwach gedämpfte Schwingung ist die Periodendauer gegenüber der ungedämpften Schwingung nicht wesentlich verändert. Allerdings nimmt die Amplitude A der Schwingung mit der Zeit t ab. Sie folgt dabei einem exponentiellen Gesetz der Form

$$A(t) = A_0 \, e^{-\frac{\kappa t}{\rho}} \, .$$

Dabei bezeichnet A_0 die anfängliche Amplitude zur Zeit $t = 0$, κ einen Faktor, der die Geometrie der Anordnung wiederspiegelt, und ρ den spezifischen Widerstand des Metalls.

3.g) Begründen Sie theoretisch, warum die Amplitude bei der schwach gedämpften Schwingung dem obigen exponentiellen Zusammenhang folgt. Sie können dabei von kleinen Auslenkungen ausgehen und annehmen, dass sich die Amplitude mit jeder Schwingung nur wenig ändert. *(3 Pkt.)*

Auf www.ipho.info finden Sie in der Rubrik „aufgaben“ einen Link zu drei Videos in denen ein entsprechender Pendelversuch dargestellt ist. In einem der Videos pendelt das Stäbchen mit dem Magneten weitestgehend frei. In den anderen beiden Videos befindet sich eine Metallplatte aus Aluminium bzw. Kupfer unter dem Magneten. Die beiden Platten besitzen die gleichen Abmessungen und befinden sich an der gleichen Position. Der spezifische Widerstand von Kupfer beträgt etwa $\rho_{\mathrm{Cu}} = 1{,}7 \cdot 10^{-8}\,\Omega\,\mathrm{m}$.

3.h) Verwenden Sie die Videos[5], um zu rechtfertigen, dass es sich bei den Pendelbewegungen über den Metallplatten um schwach gedämpfte Schwingungen handelt. *(3 Pkt.)*

3.i) Bestimmen Sie mit Hilfe der Videos einen Wert für den spezifischen Widerstand von Aluminium und vergleichen Sie diesen mit dem Literaturwert. *(8 Pkt.)*

[4] Dies funktioniert jedoch nur bei dia- oder paramagnetischen Materialien. Wenn das Metall, wie z.B. bei ferromagnetischen Materialien, ein permanentes magnetisches Moment besitzt, wird der Magnet dauerhaft angezogen oder abgestoßen. Das würde den zu untersuchenden Effekt überlagern.

[5] Die Analyse der Videos ist vermutlich einfacher, wenn Sie sich diese herunterladen und mit einem Medienabspielprogramm wie dem VLC media player oder dem QuickTime Player anschauen.