



SACHSEN-ANHALT

Ministerium für Bildung

SCHRIFTLICHE ABITURPRÜFUNG 2025

PHYSIK (GRUNDLEGENDES ANFORDERUNGSNIVEAU)

Prüfungsaufgaben

Arbeitszeit einschließlich Auswahlzeit:

255 Minuten

Es sind drei Aufgaben zu bearbeiten.

Kreuzen Sie die drei Aufgaben an, die bewertet werden sollen.

Bestätigen Sie Ihre Auswahl mit Ihrer Unterschrift.

Aufgabe 1: Stromnetze (*Aufgabe mit fachpraktischem Anteil*) ☐

Aufgabe 2: Kondensatoren als Informationsspeicher ☐

Aufgabe 3: Massenbestimmung in der Schwerelosigkeit ☐

Aufgabe 4: Elektroneninterferenz am Doppelspalt ☐

Name, Vorname: _____

Unterschrift des Prüflings: _____

Aufgabe 1: Stromnetze

Das öffentliche Stromnetz ist in den letzten Jahren immer komplexer geworden. Neben klassischen Erzeugern elektrischer Energie, wie Großkraftwerken, gewinnen weitere Anlagen, beispielsweise Solar- oder Windparks, an Bedeutung. Eine Herausforderung besteht darin, dass die elektrische Energie von der Erzeugungsanlage zum Verbraucher übertragen und regional verteilt werden muss.

	BE
1 Material 1 zeigt den grundlegenden Aufbau eines Transformators.	
Erklären Sie ausgehend von der Abbildung die Funktionsweise eines Transformators unter Nutzung des allgemeinen Induktionsgesetzes.	4
2 Erklären Sie anhand zweier Aspekte unter Verwendung von Material 2 die Notwendigkeit, im öffentlichen Netz verschiedene Spannungsebenen zu nutzen.	4
3 Fachpraktischer Teil	
Um eine Spannung zu erhöhen oder auch wieder zu verringern, werden Transformatoren eingesetzt. Die Spannungsübersetzung soll experimentell untersucht werden.	
a Planen Sie ein Experiment zur Überprüfung des Gesetzes der Spannungsübersetzung an einem Transformator.	4
Die Überprüfung soll zunächst ohne Verbraucher im Sekundärkreis und dann mit einem Verbraucher im Sekundärkreis erfolgen. Es ist darauf zu achten, dass für die Windungszahlen $N_1 > N_2$ gilt. Die Windungszahlen sollen nicht verändert werden. Nutzen Sie mindestens zwei verschiedene Primärspannungen.	
Die Planung soll folgende Punkte enthalten:	
- Begründung, dass nur die Schaltpläne A (Abb. 2) für die Untersuchung geeignet sind (M 3)	
- Nennen der zu messenden Größen	
b Bauen Sie die Schaltung auf.	4
c Führen Sie das Experiment entsprechend Ihrer Planung durch. Nehmen Sie die notwendigen Werte auf.	4
<i>Hinweis: Sollten Sie keine verwertbaren Messergebnisse aufnehmen können, ist es möglich, dass Sie bei der Aufsicht führenden Lehrkraft Ersatzmesswerte anfordern. In diesem Fall werden 4 Bewertungseinheiten nicht erteilt.</i>	
d Prüfen Sie die Gültigkeit des Gesetzes der Spannungsübersetzung für Ihre Messungen mit und ohne Glühlampe.	4
4 Die Zahl der zugelassenen Elektroautos ist in den letzten Jahren deutlich gestiegen.	
a Begründen Sie auf Grundlage des Materials 4, dass dies zu Schwankungen der Netzspannung führen kann.	2
b Um Netzschwankungen gering zu halten, wäre eine mögliche Forderung, die Anzahl von Ladestationen für Elektroautos zu begrenzen. Beurteilen Sie diese mögliche Maßnahme. Beziehen Sie dabei auch Informationen aus Material 4 ein.	4

Material zur Aufgabe 1: Stromnetze

Aufgabe 1, M 1:

Schematischer Aufbau eines Transformators

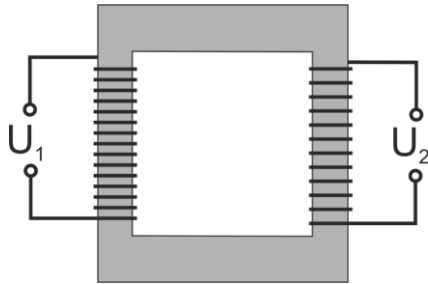


Abb. 1: Schematischer Aufbau eines Transformators

Quelle: Eigene Darstellung

Aufgabe 1, M 2:

Spannungsebenen im öffentlichen Stromnetz

Im öffentlichen Netz ist die Anzahl der Verbraucher wesentlich größer als die Anzahl der Erzeugungsanlagen. Jeder Erzeuger versorgt somit eine Großzahl an Verbrauchern. Die dabei pro Zeiteinheit im Leiter transportierte Energie steigt mit wachsender Spannung und wachsender Stromstärke. Daher wird die Energie in den verschiedenen Spannungsebenen des Netzes mit festgelegter Spannung transportiert. Transformatorstationen bilden die Schnittstellen der verschiedenen Spannungsebenen.

Jede Spannungsebene bietet ihre jeweiligen Vor- und Nachteile. Während die Übertragungsverluste mit steigender Spannung sinken (je 100 km Leitungslänge: bis 6 % bei 50 kV, bis 1 % bei 380 kV), steigt die benötigte Dicke der Kabelisolation (1 mm bei 230 V, mehrere Zentimeter bei 380 kV). Die Strombelastbarkeit der Kabel wird durch die thermische Wirkung des Stroms begrenzt.

Quelle: In Anlehnung an *Übertragungsverlust* (Version: 2024, 25. Juni, 03.37 Uhr). Wikipedia. Abgerufen am 17. November 2024, von <https://de.wikipedia.org/wiki/Übertragungsverlust>

Tab. 1: Typische Kenndaten ausgewählter Spannungsebenen

Spannungsebene	Spannungsbereich	Verwendung	Kabeltyp; typische Ströme
Höchstspannung	220 - 380 kV	Bereitstellung und Verteilung der Energie auf Kraftwerksebene	Freileitungen; bis 3 kA
Hochspannung	110 kV	industrieller Einsatz	meist Freileitungen; bis 2 kA
Mittelspannung	1 - 50 kV	Umspannwerke, Verteilung der Energie auf regionaler Ebene, Bahnverkehr	Frei- und Erdleitungen; bis 1 kA
Niederspannung	230 - 400 V	Ortsnetz, Haushaltseinsatz	meist Erdleitungen; bis 500 A im Ortsnetz, bis 100 A beim Endkunden

Quelle: In Anlehnung an *Stromnetz* (Version: 2024, 17. Oktober, 19.29 Uhr). Wikipedia. Abgerufen am 17. November 2024, von <https://de.wikipedia.org/wiki/Stromnetz>

Aufgabe 1, M 3: Schaltpläne

Geräte und Materialien:

- Spule 1
- Spule 2
- eine Glühlampe
- eine Wechselspannungsquelle
- Kabelmaterial
- Eisenkern
- zwei Wechselspannungsmessgeräte

Kennzeichnung:

- Sp_1 Spule 1
 Sp_2 Spule 2
 G Glühlampe
 $U_{\sim}$ Wechselspannungsquelle
 U_1, U_2 Spannungen im Primärstromkreis bzw. Sekundärstromkreis

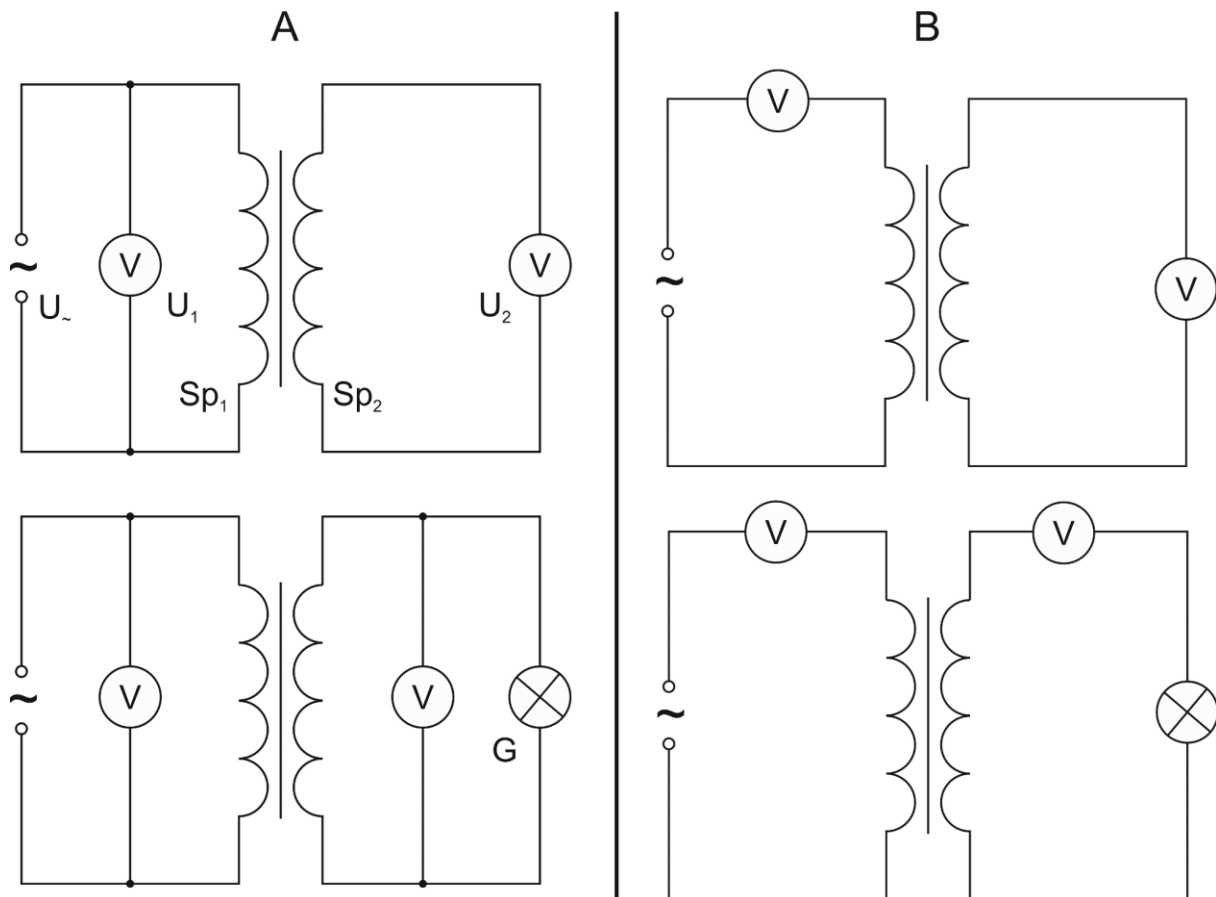


Abb. 2: Schaltpläne für die Untersuchung der Spannungsübersetzung (A: geeignet, B: ungeeignet)

Quelle: Eigene Darstellung

Aufgabe 1, M 4:

Spannungsschwankungen im Stromnetz

Die Gewährleistung einer möglichst gleichbleibenden Netzspannung ist eine wichtige Aufgabe der Netzbetreiber. In Deutschland darf die Spannung nur um maximal 10 % vom Nennwert (230 V) abweichen. Elektrogeräte müssen also so gebaut sein, dass sie eine gewisse Toleranz gegenüber Schwankungen der Netzspannung haben. Insbesondere Gewerbe und Industrie sind von einer besonders guten Netzqualität (also geringen Schwankungen der Netzspannung) abhängig. Zu große Schwankungen können dazu führen, dass Geräte ausfallen und es so zu Produktionsausfällen und kostenintensiven Reparaturen kommt.

Die Ursachen für Spannungsschwankungen sind unter anderem Schwankungen der Netzlast (also der Anzahl und Art der gleichzeitig betriebenen elektrischen Geräte im Netz) und Schwankungen in der Einspeisung, z.B. durch Photovoltaik- oder Windkraftanlagen. Ein klassisches Beispiel ist ein Winterabend: Das Licht ist eingeschaltet, es wird gekocht, der Fernseher und die Waschmaschine laufen – und zusätzlich wird das Elektroauto nach dem Fahren zum Laden an die Wallbox angeschlossen.

Durch die hohe Leistung dieser Wallboxen können größere Schwankungen in der Netzspannung entstehen und die Netztransformatoren in den Grenzbereich kommen. Durch die zunehmende Elektromobilität könnten demnach Probleme mit der Spannungsstabilität auftreten.

Die Netzbetreiber sind aber verpflichtet, die Spannung im Stromnetz konstant zu halten. Es ist daher notwendig, Maßnahmen zu ergreifen, die sicherstellen, dass die festgelegten Grenzen nicht überschritten werden.

Quellen:

Autorentext nach:

Schindler, L. (2022, 25. November). *Sind die Netze fit für die Mobilitätswende?* Tagesschau. <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/energie/netzsstabilitaet-e-mobilitaet-101.html>

Paschotta, R. (Version: 2024, 11. Februar). *Netzspannung*. RP-Energie-Lexikon. Abgerufen am 13.08.2024, von <https://www.energie-lexikon.info/netzspannung.html>

Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (2021). *Bericht zur Spannungsqualität 2020*. https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/Spannungsqualitaet/BerichtSpannungsqualitaet.pdf

Aufgabe 2: Kondensatoren als Informationsspeicher

DRAM (Dynamic Random Access Memory) bezeichnet eine Technologie für einen elektronischen Speicherbaustein, der hauptsächlich in Computern eingesetzt wird. Das speichernde Element ist dabei ein Kondensator, der entweder geladen oder entladen ist.

Hinweis: Die in den DRAMs enthaltenen Kondensatoren sollen in dieser Aufgabe als Plattenkondensatoren betrachtet werden.

	BE
1 a Skizzieren Sie das Feldlinienbild des elektrischen Feldes zwischen den Platten und im Randbereich des Kondensators in Material 1 Abbildung 1. Geben Sie zwei Regeln an, die bei der Veranschaulichung elektrischer Felder mithilfe von Feldlinien zu beachten sind.	4
b Ein Plattenkondensator wird von der Spannungsquelle abgetrennt und nachfolgend der Plattenabstand halbiert. Erklären Sie, dass eine Messsonde bei beiden Abständen nahezu die gleichen Werte für die elektrische Feldstärke zwischen den Platten misst. Erläutern Sie, weshalb die Messwerte nicht identisch sind.	4
2 In einem Modellversuch zu DRAMs wird der Zusammenhang zwischen Ladungsmenge und angelegter Spannung bei zwei Plattenkondensatoren ermittelt.	
a Vergleichen Sie qualitativ mithilfe der Abbildung 2 in Material 2 den Wert der Kapazität des Kondensators A mit dem des Kondensators B. Begründen Sie Ihre Aussage.	3
b In einem weiteren Versuch wird die Kapazität C in Abhängigkeit vom Plattenabstand d untersucht. Begründen Sie unter Einbeziehung aller Messdaten des Materials 3, dass der Zusammenhang zwischen diesen beiden Größen in guter Näherung durch die Gleichung $C = \frac{7,6 \text{ nF} \cdot \text{mm}}{d}$ angegeben werden kann.	3
3 In einem Internetforum über Computertechnik wird über die besonders kleinen Dimensionen von Kondensatoren in DRAMs zur Speicherung von digitalen Informationen diskutiert (M 4).	
Schreiben Sie den nächsten Beitrag in diesem Forum, in dem Sie die Frage von <i>Detlef7</i> mit einer nachvollziehbaren Begründung beantworten. Gehen Sie davon aus, dass die Angaben im Forum-Beitrag von <i>Community4</i> richtig sind.	6

Fortsetzung auf Seite 7

- | | |
|--|---|
| 4 Die in den DRAMs enthaltenen Kondensatoren müssen regelmäßig aufgeladen werden. | 4 |
| a Skizzieren Sie den zeitlichen Verlauf der Stromstärke für einen Aufladevorgang eines vollständig entladenen Kondensators.
Erklären Sie ohne Verwendung der Gleichungen für Auf- und Entladen eines Kondensators über einen Ohm'schen Widerstand, dass die Stromstärke beim Aufladevorgang nicht konstant ist. | 4 |
| b Der Aufladevorgang wird durch den Leitungswiderstand und die Kapazität beeinflusst. Beschreiben Sie den Einfluss dieser Parameter auf die Aufladezeit. | 2 |
| 5 Bei digitalen Anwendungen werden unterschiedliche Speichertechnologien für Daten verwendet. In Material 5 sind einige Eigenschaften und technische Angaben von zwei verschiedenen Speicherarten in Laptops dargestellt. | 4 |
| Beurteilen Sie auf der Grundlage von Material 5 für DRAM- und HDD-Speicher je ein Risiko, welches eine sichere Datenspeicherung auf einem Laptop gefährdet. | 4 |

Material zur Aufgabe 2: Kondensatoren als Informationsspeicher

Aufgabe 2, M 1: Plattenkondensator

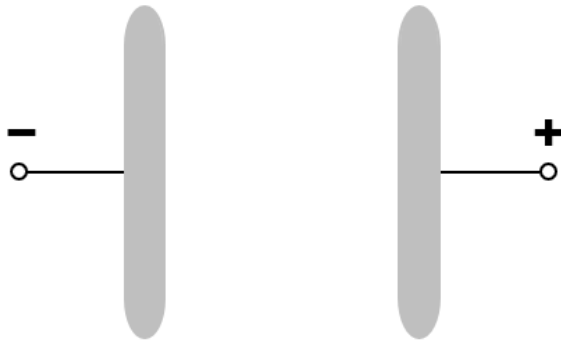


Abb. 1: Schematische Darstellung eines Plattenkondensators

Quelle: Eigene Darstellung

Aufgabe 2, M 2: Zusammenhang zwischen Ladung und angelegter Spannung

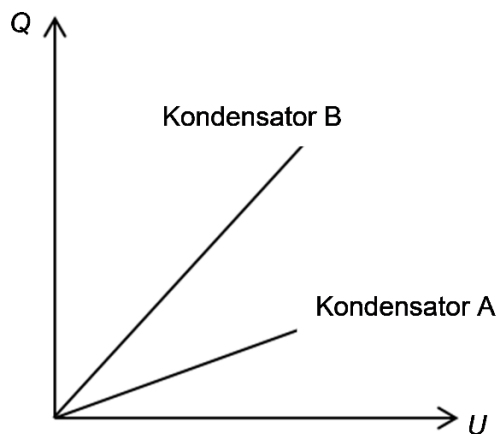


Abb. 2: Qualitativer Zusammenhang zwischen Ladung und Spannung bei zwei unterschiedlichen Kondensatoren

Quelle: Eigene Darstellung

Aufgabe 2, M 3: Zusammenhang zwischen Kapazität und Plattenabstand

Tab. 1: Experimentell ermittelte Kapazitäten eines Plattenkondensators bei verschiedenen Abständen

d in mm	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
C in nF	15,2	7,7	5,0	3,8	3,0	2,6

Quelle: Eigene Werte

Aufgabe 2, M 4:

Forenauszug zum Thema Kondensatoren in Computern

Post Reply    Search this topic...  

Kondensatoren in Computern

 by **Detlef7** >> Mon Jan 20, 2025 2:48 pm

Im Physikunterricht habe ich heute gelernt, dass in Computern sehr viele DRAMS mit extrem kleinen Kondensatoren verbaut sind. Demnach müssen diese Kondensatoren eine sehr kleine Kapazität haben. Weiß jemand, welche Kapazität die Kondensatoren von DRAMs haben?

Re: Kondensatoren in Computern

 by **Community4** >> Mon Jan 20, 2025 2:51 pm

Es stimmt, die DRAMs müssen von ihrer Bauweise so klein wie möglich sein, d.h. die DRAM-Kondensatoren besitzen sicher eine kleine Kapazität. In dem Bericht einer Technikzeitung habe ich gelesen, dass wenn 1 Bit in dem Speicherbaustein DRAM gespeichert wird, eine Spannung von 1,5 V am Kondensator anliegt und der Kondensator die Ladung von 350000 Elektronen besitzt.

Post Reply       

Abb. 3: Forenauszug zum Thema Kondensatoren in Computern

Quelle: Eigene Darstellung

Aufgabe 2, M 5:

Vergleich der zwei Speicherarten DRAM und HDD

DRAM und HDD sind Speicherarten, welche auch in Laptops eingesetzt werden. DRAM (Dynamic Random Access Memory) ist ein Speicher, in dem ein Computer seine Rechendaten vorübergehend zwischenspeichert. Die Informationsspeicherung erfolgt über den Ladungszustand des Kondensators. Das Dielektrikum im Kondensator lässt in geringem Maße elektrischen Strom zu, dadurch kommt es zu einer Selbstentladung des aufgeladenen Kondensators. Der Ladungszustand der DRAM-Kondensatoren muss also regelmäßig aufgefrischt, d. h. erneuert werden.

HDD (Hard Disk Drive) ist ein Speicher, welcher als interner und externer Festplattenspeicher eingesetzt wird, um System- und Nutzerdaten langfristig zu speichern. Die wesentlichen Bauelemente einer HDD sind magnetisierbare rotierende Scheiben und ein beweglicher Schreib-Lese-Arm (Abb. 4). Beim Schreiben und Lesen der Daten muss dieser Arm in sehr geringem Abstand präzise über die Oberfläche der schnell rotierenden Scheibe bewegt werden. Entsprechend der zu speichernden Daten werden auf den Scheiben bestimmte Bereiche der Metalloberfläche magnetisiert.

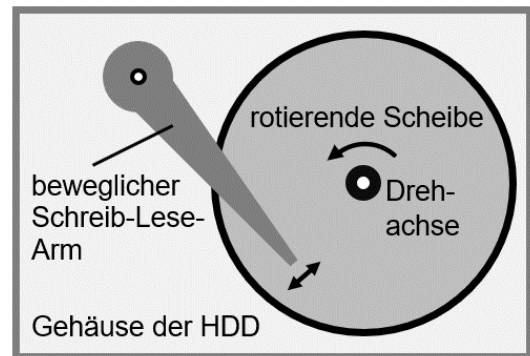


Abb. 4: Schematischer Aufbau einer HDD

Quelle: Eigene Darstellung

Tab. 2: Vergleich DRAM und HDD

	DRAM	HDD
Lese- und Schreibzeit in ns	5 - 50	$3,5 \cdot 10^6$ - $8 \cdot 10^6$
Datenerhalt ohne Spannungsversorgung	Millisekunde bis Sekunde	Jahre bis Jahrzehnte

Quelle: In Anlehnung an Oelgeschläger, S. (2019). *SRAM und DRAM - Eine Übersicht* (Proseminararbeit, Universität Hamburg). wr.informatik.uni-hamburg.de. https://wr.informatik.uni-hamburg.de/_media/teaching/wintersemester_2018_2019/sds-1819-sram_dram-ausarbeitung.pdf

Aufgabe 3: Massenbestimmung in der Schwerelosigkeit

Auf Raumstationen ist die Bestimmung der eigenen Körpermasse eine Herausforderung, da eine normale Personenwaage nicht eingesetzt werden kann. Stattdessen wird ein Gerät mit dem Namen BMMD (Body Mass Measurement Device) verwendet.

	BE
1 Erläutern Sie die Bestimmung der Masse mit einem BMMD. Nutzen Sie hierzu insbesondere die Informationen aus Material 1.	4
2 Für ein BMMD wurden die in Material 2 dokumentierten Messdaten ermittelt.	
a Stellen Sie die Messreihe in einem Diagramm dar.	4
b Bestimmen Sie anschließend mithilfe Ihres Diagramms die Masse eines Astronauten für den Fall, dass das BMMD eine Periodendauer von $T = 1,35 \text{ s}$ misst.	2
3 Im Folgenden wird das BMMD modellhaft als Federpendel betrachtet. Wie bei jedem Federpendel treten auch bei einem BMMD Beschleunigungen auf. Um zu beurteilen, ob diese eine Gefahr für den Benutzer darstellen, werden die in Material 3 gegebenen Diagramme betrachtet.	
a Berechnen Sie unter Nutzung der Daten aus Material 2 die Federkonstante für das BMMD. [Kontrollwert: $D = 2,0 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$]	2
b Beschriften und skalieren Sie für die in Material 3 genannte Astronautenmasse die Koordinatenachsen der Diagramme in Material 3.	6
c Bestimmen Sie den Betrag der maximalen Beschleunigung, die der Astronaut erfährt. Beurteilen Sie, ob hierdurch eine Gefahr für einen durchtrainierten Astronauten besteht.	5
4 Ein BMMD ist aufgrund einer defekten Elektronik nicht mehr für den Einsatz im Weltall geeignet und wird daher einem Schullabor gespendet.	
a Begründen Sie mithilfe der Daten in Material 4, dass das BMMD nicht ordnungsgemäß funktioniert. Da das Schullabor das Gerät ohne die defekte Elektronik nutzen möchte, muss zur Bestimmung der Masse insbesondere der Hocker manuell ausgelenkt und auch die Periodendauer manuell ermittelt werden.	3
b Formulieren Sie für diesen Fall Anweisungen an die Schulgemeinschaft so, dass bei der Benutzung Messunsicherheiten möglichst geringgehalten werden und eine zuverlässige Massebestimmung gewährleistet wird. Gehen Sie dazu in einem zusammenhängenden Text auf drei relevante Aspekte ein.	4

Material zur Aufgabe 3: Massenbestimmung in der Schwerelosigkeit

Aufgabe 3, M 1:

Das Body Mass Measurement Device (BMMD)

Das BMMD besteht aus einer Art Hocker (mit bekannter Masse m_H), auf den sich der Astronaut begibt und festhält. Der Hocker ist über eine Feder (mit bekannter Federkonstante D) mit der Raumstation fest verbunden.

Wird das Gerät eingeschaltet, so wird der Astronaut zusammen mit dem Hocker in Schwingungen versetzt. Die Elektronik des Geräts misst die Periodendauer, mit der Astronaut und Hocker als gemeinsame schwingende Masse frei auf und ab schwingen. Aus dieser Periodendauer können dann die schwingende Masse und die Masse des Astronauten errechnet werden.



Abb. 1: Das Body Mass Measurement Device (BMMD) mit Astronaut

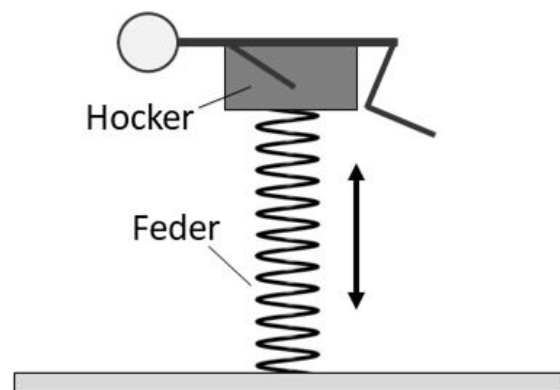


Abb. 2: Das Body Mass Measurement Device (BMMD) schematisch

Quelle: NASA (2012, 26. Juni). *European Space Agency astronaut Andre Kuipers, Expedition 31 flight engineer, uses a body mass measurement device (BMMD) in the Zvezda Service Module of the International Space Station.* NASA Image and Video Library. images-assets.nasa.gov/image/iss031e157943/iss031e157943-orig.jpg (links); in Anlehnung an ebd. eigene Darstellung (rechts)

Aufgabe 3, M 2:

Messdaten BMMD

Bevor ein solches Gerät zum Einsatz kommt, wurden Testmessungen durchgeführt und dabei nachfolgende Messwerte ermittelt.

Gehen Sie in den Teilaufgaben von einer Masse des Hockers von $m_H = 15 \text{ kg}$ aus. Vernachlässigen Sie die Luftreibung sowie die Masse der Feder.

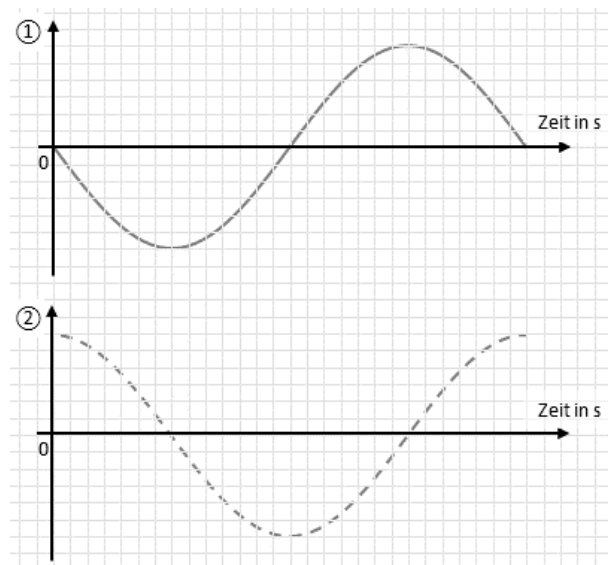
Tab. 1: Messdaten zum BMMD

schwingende Masse m in kg	20	40	60	80	100	120	140
Periodendauer T in s	0,63	0,89	1,09	1,26	1,40	1,54	1,66

Quelle: Eigene Werte

Aufgabe 3, M 3: Diagramme

Die folgenden beiden Diagramme veranschaulichen die idealisierte Bewegung jeweils für eine Periode für eine Astronautenmasse von 85 kg. Eines der Diagramme ① bzw. ② stellt die Geschwindigkeit der schwingenden Masse in Abhängigkeit von der Zeit und eines die momentane Auslenkung für die gleiche Zeitspanne dar. Zur Erstellung der Diagramme wurde angenommen, dass das BMMD zum Zeitpunkt $t=0$ s bei einer maximalen Auslenkung von 30,0 cm zu schwingen beginnt.



Bewegungsgleichungen der ungedämpften harmonischen Schwingung

$$s(t) = s_{\max} \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

Bei Vorliegen eines Nullphasenwinkels gilt:

$$s(t) = s_{\max} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0)$$

$$v(t) = s_{\max} \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_0)$$

$$a(t) = -s_{\max} \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0)$$

s Auslenkung, Elongation

$s_{\max}$ Amplitude

ω Kreisfrequenz

t Zeit

φ_0 Nullphasenwinkel

v Geschwindigkeit

a Beschleunigung

Abb. 3: Diagramme der idealisierten Bewegung für eine Periode

Quelle: Eigene Darstellung

Aufgabe 3, M 4: Messdaten bei defektem BMMD

Bei einem harmonischen Federpendel ist das Quadrat der Periodendauer proportional zur schwingenden Masse ($T^2 \sim m$). Da das BMMD modellhaft als Federpendel betrachtet werden kann, ist davon auszugehen, dass dies auch für ein BMMD gilt.

Bei dem BMMD mit defekter Elektronik werden die folgenden Messdaten ausgegeben:

Tab. 2: Daten einer Testmessung

schwingende Masse m in kg	15	25	35
Periodendauer T in s	0,60	0,70	0,80

Quelle: Eigene Werte

Aufgabe 4: Elektroneninterferenz am Doppelspalt

Im Jahr 1923 postulierte Louis de Broglie, dass Materieteilchen auch Welleneigenschaften zugeordnet werden können. Im Jahr 1961 wurde von Claus Jönsson eine experimentelle Arbeit zur Beugung von Elektronen am Doppelspalt veröffentlicht.

	BE
1 Material 1 zeigt einen Ausschnitt aus der Originalveröffentlichung von C. Jönsson zur Beugung von Elektronen an einem Doppelspalt. In Material 2 ist eines der Messergebnisse abgebildet.	
a Erklären Sie, dass die Elektronenbeugungsaufnahme in Material 2 als Nachweis für die Welleneigenschaften von Elektronen gedeutet werden kann.	6
b Berechnen Sie den Beugungswinkel α_1 des Maximums 1. Ordnung, welcher unter den von C. Jönsson in Material 1 beschriebenen Versuchsbedingungen zu erwarten ist. [Kontrollwert: $\alpha_1 = 0,00014^\circ$]	6
2 C. Jönsson nennt in der Veröffentlichung einen Wert für die Beschleunigungsspannung, mit der die Elektronen auf eine einheitliche Geschwindigkeit gebracht werden.	
a Begründen Sie schrittweise und kausal korrekt strukturiert, in welcher Weise sich das Interferenzmuster aus Material 2 verändert, wenn die Beschleunigungsspannung vergrößert wird.	6
b Begründen Sie, dass das Interferenzmuster auf dem Leuchtschirm im Beugungsexperiment von C. Jönsson unschärfer wird, wenn es mit einem Elektronenstrahl durchgeführt wird, in dem die Elektronen viele unterschiedliche Geschwindigkeiten haben.	4
3 Das in Material 3 beschriebene Experiment von A. Tonomura ist eine Weiterentwicklung des Doppelspaltexperimentes mit Elektronen.	
a Interpretieren Sie die in Material 3 gezeigten Messergebnisse hinsichtlich der Fragestellung, inwiefern diese die Wellen- bzw. Teilcheneigenschaften der Elektronen zeigen.	4
b Erläutern Sie Feynmans Aussage zur Quantentheorie, dass es unmöglich ist, Ereignisse genau vorherzusagen, am Beispiel des Experimentes von Tonomura (M 3 und 4).	4

Material zur Aufgabe 4: Elektroneninterferenz am Doppelspalt

Aufgabe 4, M 1:

Ausschnitt aus „Elektroneninterferenzen an mehreren künstlich hergestellten Feinspalten“ von C. Jönsson

Hinweis: Die Rechtschreibung und die Verwendung von Fachbegriffen folgen dem Original.

Quelle: Jönsson, C. (1961). Elektroneninterferenz an mehreren künstlich hergestellten Feinspalten. *Z. Physik*, 161, 454-474. <https://doi.org/10.1007/BF01342460>

Aufgabe 4, M 2:

Elektronenbeugungsaufnahme am Doppelspalt von C. Jönsson

Abb. 1: Interferenzmuster auf einem Leuchtschirm hinter einem mit Elektronen beschossenen Doppelspalt. Je mehr Elektronen an einem Ort des Schirms auftreffen, desto heller leuchtet er dort. Diese Abbildung wurde stark vergrößert dargestellt und entspricht nicht den in der Aufgabe angegebenen Abmessungen.

Quelle: Jönsson, C. (1961). Elektroneninterferenz an mehreren künstlich hergestellten Feinspalten. *Z. Physik*, 161, 454-474. <https://doi.org/10.1007/BF01342460>

Aufgabe 4, M 3:

Elektronenbeugung am Doppelspalt von A. Tonomura

Im *American Journal of Physics* 57, 117 (1989) berichtet A. Tonomura von einem Experiment, bei dem Elektronen mit einer Beschleunigungsspannung von 50 kV beschleunigt und auf eine wie ein Doppelspalt wirkende Anordnung gesendet wurden. Es handelt sich um eine Weiterentwicklung des Experimentes von C. Jönsson, in der die Anzahl der Elektronen im Elektronenstrahl so weit reduziert wurde, dass sich zu jedem Zeitpunkt nur noch ein einziges Elektron zwischen Quelle und Schirm befindet.

Quelle: Tonomura, A. et al. (1989). Demonstration of single-electron buildup of an interference pattern. *Am. J. Phys.* 57 (2), 117-120. <https://doi.org/10.1119/1.16104>

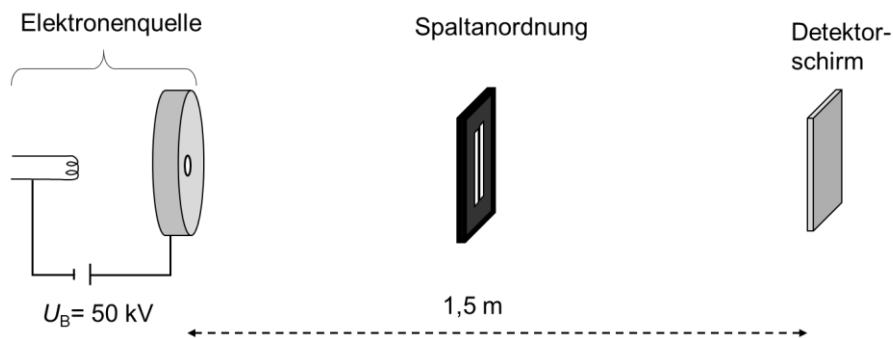


Abb. 2: Schematischer Versuchsaufbau von A. Tonomura

Quelle: Eigene Darstellung

Abb. 3 a bis e: Aufgenommene Schirmbilder mit a) 11 Elektronen, b) 200 Elektronen, c) 6000 Elektronen, d) 40000 Elektronen, e) 140000 Elektronen

Quelle: Tonomura, A. et al. (1989). Demonstration of single-electron buildup of an interference pattern. *Am. J. Phys.* 57 (2), 117-120. <https://doi.org/10.1119/1.16104>

Aufgabe 4, M 4:

Zitat von Richard Feynman zum Doppelspaltexperiment

Quelle: Feynman, R., Leighton, R. & Sands, M. (2007). *Feynman-Vorlesungen über Physik, Band 1*. 5. Auflage. Oldenbourg Verlag. Seite 532.