



## Schriftliche Abiturprüfung Schuljahr 2023/2024

### Physik auf erhöhtem Anforderungsniveau an allgemeinbildenden gymnasialen Oberstufen

Haupttermin  
Donnerstag, 2. Mai 2024, 9:00 Uhr

Unterlagen für die Prüflinge

#### Allgemeine Arbeitshinweise:

- Überprüfen Sie diese Unterlagen auf Vollständigkeit.
- Schreiben Sie auf alle Prüfungsunterlagen Ihren Namen und zusätzlich auf dieses Deckblatt Ihre Kursnummer.
- Kennzeichnen Sie Ihre Entwurfsblätter (Kladde) und Ihre Reinschrift.

#### Fachspezifische Arbeitshinweise<sup>1</sup>:

- Die Arbeitszeit beträgt **300 Minuten**.
- Eine Lese- und Auswahlzeit von **30 Minuten** ist der Arbeitszeit vorgeschaltet. In dieser Zeit darf noch nicht mit der Bearbeitung der Aufgaben begonnen werden.
- Hilfsmittel: Taschenrechner (nicht programmierbar, nicht grafikfähig), Zeichenhilfsmittel, zugelassene Formelsammlung, Rechtschreibwörterbuch

#### Aufgabenauswahl:

- Sie erhalten **drei** Aufgaben zu unterschiedlichen Schwerpunkten.
- Wählen Sie **zwei** Aufgaben aus und bearbeiten Sie diese.
- Vermerken Sie auf der Reinschrift, welche Aufgaben Sie bearbeitet haben.

Bearbeitet wurden die folgenden Aufgaben (bitte kreuzen Sie an):

I	Schwingungen und Wellen	
II	Quantenphysik	
III	Teilchen im elektromagnetischen Feld	

---

<sup>1</sup> Entsprechend der „Richtlinie über die Gewährung von Erleichterungen für neu zugewanderte Schülerinnen, Schüler und Prüflinge bei Sprachschwierigkeiten in der deutschen Sprache“ (MBISchul Nr. 08, 7. Oktober 2016, S. 60) werden für die betroffenen Prüflinge die folgenden Erleichterungen gewährt:

- Die Bearbeitungszeit wird um 30 Minuten auf **330 Minuten** erhöht.
- Ein nicht-elektronisches Wörterbuch Deutsch – Herkunftssprache / Herkunftssprache – Deutsch wird bereitgestellt.

### Bewertung:

Jeder Aufgabe sind 50 Bewertungseinheiten (BE) zugeordnet, insgesamt sind also 100 BE erreichbar. In allen Teilaufgaben werden nur ganze BE vergeben.

Bei der Festlegung von Notenpunkten gilt die folgende Tabelle.

Erbrachte Leistung	Notenpunkte
$\geq 95$ BE	15
$\geq 90$ BE	14
$\geq 85$ BE	13
$\geq 80$ BE	12
$\geq 75$ BE	11
$\geq 70$ BE	10
$\geq 65$ BE	9
$\geq 60$ BE	8

Erbrachte Leistung	Notenpunkte
$\geq 55$ BE	7
$\geq 50$ BE	6
$\geq 45$ BE	5
$\geq 40$ BE	4
$\geq 33$ BE	3
$\geq 27$ BE	2
$\geq 20$ BE	1
$< 20$ BE	0

**Die Note „ausreichend“ (5 Punkte) wird erteilt**, wenn annähernd die Hälfte (mindestens 45 % = mindestens 45 BE) der erwarteten Gesamtleistung erbracht worden ist. Dazu müssen auch Leistungen im Anforderungsbereich II erbracht worden sein.

**Die Note „gut“ (11 Punkte) wird erteilt**, wenn annähernd vier Fünftel (mindestens 75 % = mindestens 75 BE) der erwarteten Gesamtleistung erbracht worden sind. Dabei muss die Prüfungsleistung in ihrer Gliederung, in der Gedankenführung, in der Anwendung fachmethodischer Verfahren sowie in der fachsprachlichen Artikulation den Anforderungen voll entsprechen. Ein mit „gut“ beurteiltes Prüfungsergebnis setzt voraus, dass neben Leistungen in den Anforderungsbereichen I und II auch Leistungen im Anforderungsbereich III erbracht worden sind.

Die zwei voneinander unabhängigen Aufgaben der Prüfungsaufgabe werden jeweils mit 50 Bewertungseinheiten bewertet. Die erbrachte Gesamtleistung ergibt sich aus der Summe der Bewertungseinheiten in den beiden Aufgaben.

Bei erheblichen Mängeln in der sprachlichen Richtigkeit sind bei der Bewertung der schriftlichen Prüfungsleistung je nach Schwere und Häufigkeit der Verstöße bis zu zwei Notenpunkte abzuziehen. Dazu gehören auch Mängel in der Gliederung, Fehler in der Fachsprache, Ungenauigkeiten in Zeichnungen sowie falsche Bezüge zwischen Zeichnungen und Text.

## Aufgabe I: Das Trampolin

### Schwerpunktthema: Schwingungen und Wellen

(50 BE)

Die Artistinnen und Artisten in einem Zirkus vollbringen wahrlich faszinierende und beeindruckende Kunststücke, bei denen es auf die Präzision ihrer Bewegungen ankommt. Diese Aufgabe befasst sich mit den physikalischen Vorgängen, die bei Sprüngen aus schwindelerregenden Höhen auf ein riesiges Trampolin auftreten.

Das Bild wurde aus urheberrechtlichen Gründen entfernt.

Abb. 1: Trampolin im Cirque du soleil

Quelle: [www.travelzoo.com](http://www.travelzoo.com),  
letzter Zugriff: 01.02.2023

Das Trampolin besteht aus einem dehnbaren Sprungtuch, welches durch viele Spiralfedern an einem Rahmen aufgehängt ist (siehe Abb. 2). In dieser Aufgabe soll zunächst von einem idealisierten Trampolin ausgegangen werden, dessen Sprungtuch bei einer Auslenkung durch einen Artisten nach unten eine entgegengerichtete Spannkraft  $F_S$  nach oben bewirkt, für die das lineare Kraftgesetz gilt. Die Masse des Sprungtuchs kann vernachlässigt werden.

Wenn sich der Artist mit seiner Masse von  $m = 75 \text{ kg}$  in Ruhe auf das Sprungtuch stellt, sinkt er um den Betrag  $|s_{\text{Ruhe}}| = 80 \text{ cm}$  ein (siehe Position 2 in Abb. 3). Er fängt jetzt an, mit kleiner Amplitude zu wippen. Nehmen Sie im Folgenden an, dass der Artist bei seiner Schwingung um diese Ruhelage nicht vom Sprungtuch abhebt. Der Artist wird also nie weiter nach oben ausgelenkt, als es in Position 1 in Abb. 3 gezeigt ist.

- a) • **Zeichnen** Sie in der Abb. 3 für einen Artisten in den Positionen 1, 2 und 3 jeweils die Kraftvektoren der Gewichtskraft, der Spannkraft des Trampolins sowie der sich daraus ergebenden rücktreibenden Kraft ein. Achten Sie dabei auf die richtigen relativen Längen der Vektorpfeile.
- **Berechnen** sie die Richtgröße (Federkonstante) des Trampolins.  
*Kontrollergebnis:*  $D \approx 920 \frac{\text{N}}{\text{m}}$
- **Berechnen** Sie die Periodendauer des mit einer harmonischen Schwingung auf dem Sprungtuch wippenden Artisten. (10 BE)

Für akrobatische Kunststücke lassen sich die Artistinnen und Artisten des Zirkus von einer Plattform hoch über dem Trampolin fallen. Die Plattform befindet sich in einer Höhe von  $h = 10 \text{ m}$  über dem unausgelenkten Sprungtuch. Gehen Sie zunächst vereinfachend von „punktförmigen“ Artisten aus, die keine zusätzliche Energie in das System bringen. Sie lassen sich ohne Anfangsgeschwindigkeit gerade nach unten auf die Mitte des Sprungtuchs fallen. Sämtliche Reibungseffekte sollen vorerst vernachlässigt werden, so dass die Artisten beim Springen immer wieder die volle Höhe von  $10 \text{ m}$  erreichen.

- b) • **Berechnen** Sie, wie viel Zeit ein Trampolinartist maximal zwischen zwei aufeinanderfolgenden Sprungtuchberührungen für Salti, Schrauben und sonstige Kunststücke in der Luft hat.
- **Begründen** Sie detailliert, ob in einem der in Abb. 4 dargestellten Diagramme der Geschwindigkeitsverlauf  $v(t)$  des Artisten vom Zeitpunkt des Fallenlassens vom Podest bis zum ersten Wiedererreichen seiner Ausgangshöhe korrekt dargestellt ist.

- **Ordnen** Sie die Positionen 1, 2 und 3 aus Abb. 3 allen zugehörigen Zeitpunkten in dem Graphen des von Ihnen ausgewählten Diagramms in Abb. 4 **zu**.
- **Diskutieren** Sie, um welchen Faktor sich die Auftreffgeschwindigkeit auf das ungedehnte Sprungtuch und die Periodendauer eines harmonisch wippenden Körpers ändern, wenn statt eines Artisten mit beliebiger Masse ein Kind, das die halbe Masse des Artisten hat, diese Bewegungen ausführt.

(16 BE)

Im Folgenden sollen die am Trampolin auftretenden Energien genauer untersucht werden.

- c) • **Nennen** Sie die jeweils auftretenden Energieformen an den Positionen A, B und C (siehe Abb. 5), wobei Sie den Nullpunkt (Bezugspunkt) der Höhenenergie auf die Position C legen.
- **Leiten** Sie die folgende Formel zur Berechnung der maximalen Einsinktiefe  $s_{\max}$  in das Sprungtuch bei einer Fallhöhe von  $h$ , gemessen von der Plattform bis zur Höhe des ungedehnten Sprungtuchs, **her** (siehe Abb. 5):

$$s_{\max} = \frac{mg}{D} \pm \sqrt{\left(\frac{mg}{D}\right)^2 + \frac{2mgh}{D}}$$

*Hinweis: Beachten Sie, dass zur Berechnung der im elastischen Sprungtuch gespeicherten Energie die gesamte Strecke herangezogen werden muss, um die das Sprungtuch aus dem ungedehnten Zustand heraus ausgelenkt wird.*

- **Berechnen** Sie mit den oben angegebenen Werten die maximale Einsinktiefe  $s_{\max}$  des Artisten in das Sprungtuch.

(11 BE)

Die Spannkraft eines realen Trampolins nimmt nur bei kleinen Dehnungen der Spiralfedern und des Sprungtuchs näherungsweise linear mit der Dehnung  $s$  zu. In Abb. 6 ist diese Näherung zusammen mit einem realistischeren Kraftprofil gezeigt: Bei großen Einsinktiefen wird das Trampolin „härter“ und die Spannkraft steigt schneller als in der linearen Näherung.

- d) • **Erläutern** Sie qualitativ, wie sich die reale maximale Einsinktiefe  $s_{\max}$  im Vergleich zur in Aufgabenteil c) berechneten Näherungslösung verhält.

(3 BE)

Im Folgenden soll wieder das idealisierte lineare Kraftgesetz vorausgesetzt, aber der Einfluss der verschiedenen Reibungseffekte untersucht werden. Bei jedem Sprung wird ein Teil der Energie in andere Energieformen umgewandelt und steht dem Artisten nicht mehr zur Verfügung. Die Bewegung des Artisten wird durch Luftreibung gebremst und durch die Verformung des Sprungtuchs wird dieses leicht erwärmt. Um das Podest in 10 m Höhe erreichen zu können, muss ein Artist mit einer Masse von 75 kg eine Einsinktiefe von  $s_{\max,0} = 4,96$  m in das Sprungtuch erreichen. Würde er sich dann wie ein starrer Stein nach oben katapultieren lassen und wieder herunterfallen, würde er bei der folgenden Sprungtuchberührung nur noch um  $s_{\max,1} = 4,81$  m in das Sprungtuch einsinken, bevor er wieder nach oben katapultiert wird. Um bei jedem Sprung wieder die ursprüngliche Podesthöhe von 10 m zu erreichen, muss der Artist auf dem Sprungtuch in die Hocke gehen und durch die Kraft in seinen Beinen die fehlende Energiedifferenz aufbringen.

- e) • **Bestimmen** Sie die Energie, die dieser Artist pro vollständigem Sprung aufbringen muss, um langfristig eine Sprunghöhe von 10 m aufrechtzuerhalten.  
*Hinweis: Betrachten Sie dabei neben der Spannenergie auch die veränderte potentielle Energie.*
- **Schätzen** Sie **ab**, wie viel Energie der Artist bei einem Sprung nur durch die Kraft seiner Beine aufbringen kann. **(7 BE)**

Ein besonderes Spielgerät ist ein Trampolin, das auf einem Badensee schwimmt. Ein engmaschiges Netz aus elastischen Nylonfäden ist auf einem straff aufgeblasenen Schwimmring angebracht (siehe Abb. 7). Das Springen darauf macht jedoch weniger Spaß als vielleicht vermutet, da sehr viel Energie aus dem Sprung in andere Energieformen umgewandelt wird. Gehen Sie im Folgenden davon aus, dass nur eine Person auf dem Wassertrampolin springt.

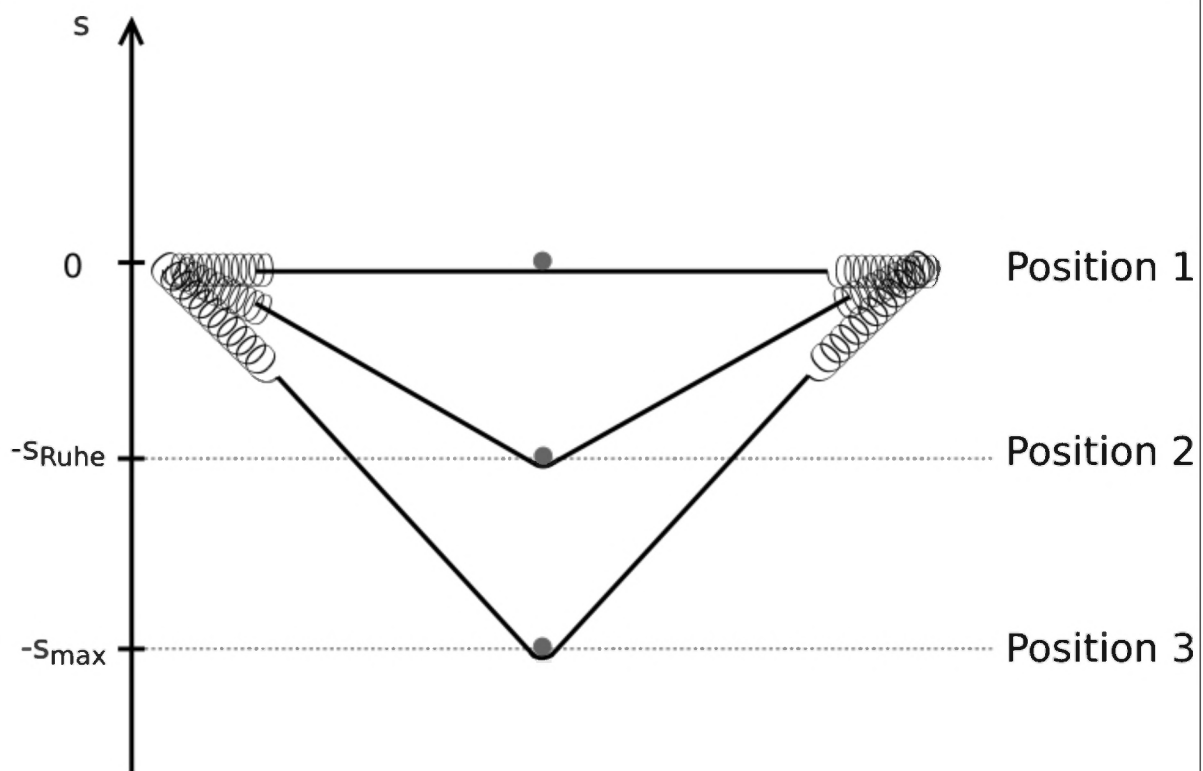
- f) • **Arbeiten** Sie drei verschiedene Ursachen für die Umwandlung von Energie aus diesem Sprungsystem in andere Energieformen **heraus**. **(3 BE)**

## Anlage zur Aufgabe „Das Trampolin“

Das Bild wurde aus urheberrechtlichen Gründen entfernt.

**Abb. 2:** Das elastische Sprungtuch (oben rechts) ist mit vielen Spiralfedern an einem Rahmen befestigt. Zusammen bewirken diese bei einer Auslenkung nach unten durch eine springende Person eine nach oben gerichtete Spannkraft.

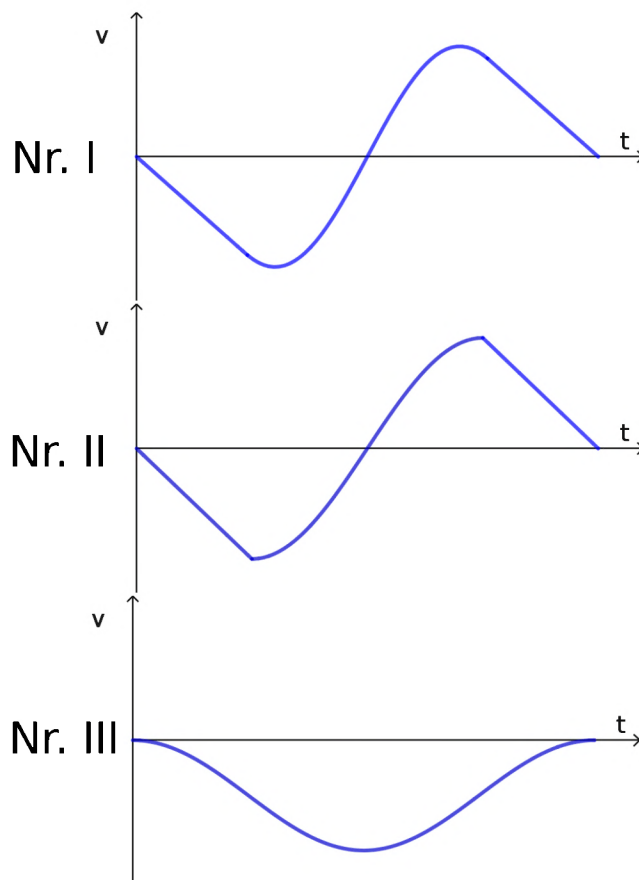
Quelle: [www.akrobat-trampoline.de](http://www.akrobat-trampoline.de), letzter Zugriff: 31.01.2023



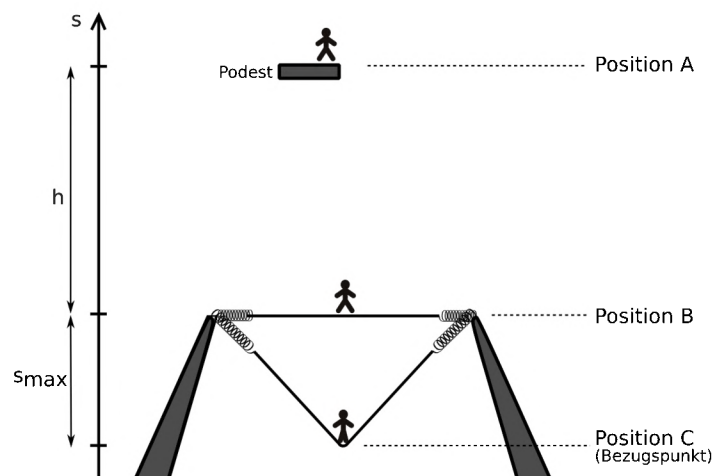
**Abb. 3:** In der Position 1 befindet sich der Artist (bzw. die Punktmasse) unmittelbar auf dem horizontal gespannten, noch nicht ausgelenkten Sprungtuch. Die Position 2 ist die Ruhelage, bis zu welcher der Artist einsinken würde, wenn er sich in Ruhe auf das Sprungtuch stellt. Die Position 3 ist die maximale Auslenkung des Sprungtuchs, also der untere Umkehrpunkt.

*Hinweis: Die Abstände zwischen den drei Positionen sind nicht maßstabsgetreu.*

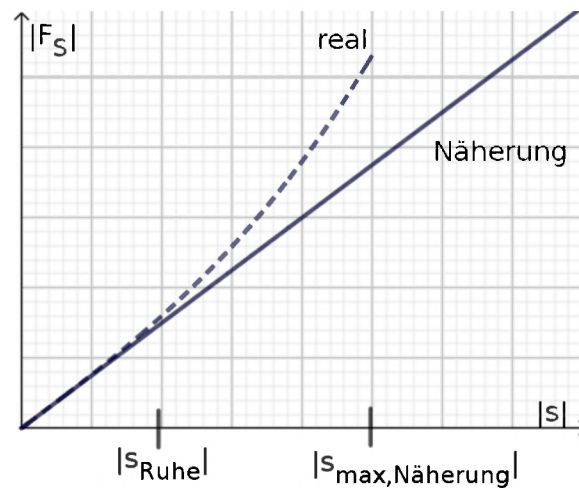
Quelle: BSB



**Abb. 4:** Drei mögliche Diagramme, die den zeitlichen Geschwindigkeitsverlauf eines Artisten beschreiben, welcher sich von dem Podest auf das Trampolin fallen lässt und wieder auf seine Ausgangshöhe zurückkatapultiert wird.  
Quelle: BSB



**Abb. 5:** In Position A steht der Artist in Ruhe auf dem Podest. In Position B befindet sich der Artist unmittelbar auf dem noch unausgelenkten Sprungtuch. In Position C ist das Sprungtuch maximal gedehnt. Als Nullpunkt (Bezugspunkt) der Höhenenergie soll hier Position C gewählt werden.  
Quelle: BSB



**Abb. 6:** Spannkraft  $F_S$  bei einem Trampolin in Abhängigkeit der Einsinktiefe  $s$ . Die lineare Näherung ist nur für kleine Dehnungen zulässig.

*Hinweis: Hier sind Beträge ohne Berücksichtigung der Richtung dargestellt.*

Quelle: BSB

Das Bild wurde aus urheberrechtlichen Gründen entfernt.

**Abb. 7:** Aufblasbares Wassertrampolin. Das elastische Sprungtuch ist auf der Oberseite eines schwimmenden Reifens befestigt.

Quelle: <https://german.alibaba.com>, letzter Zugriff: 01.02.2023



## Aufgabe II: Photomultiplier und ihre Einsatzgebiete

### Schwerpunktthema: Quantenphysik

(50 BE)

Photoelektronenvervielfacher (engl. *photomultiplier tubes*, kurz: PMT) sind hochempfindliche Detektoren, die zur Messung von sehr schwachen Lichtsignalen bis hin zum Nachweis einzelner Photonen eingesetzt werden (siehe Abb. 1). Sie kommen in der optischen Spektroskopie, der Teilchenphysik und der Astronomie zum Einsatz.

Das Bild wurde aus urheberrechtlichen Gründen entfernt.

Abb. 1: Verschiedene Photomultiplier.

Quelle: <https://www.stantron.com.au>, letzter Zugriff: 09.09.2023

Das Funktionsprinzip eines Photomultipliers ist im Material M1 im Anhang beschrieben.

- a) • **Beschreiben** Sie die Modellvorstellung Einsteins, nach der durch elektromagnetische Strahlung Primärelektronen aus dem Kathodenmaterial des PMTs ausgelöst werden können, und welche Voraussetzung dafür erfüllt sein muss.
- **Berechnen** Sie die größtmögliche Wellenlänge  $\lambda_G$ , welche die elektromagnetische Strahlung höchstens haben darf, um noch Elektronen aus der Photokathode herauslösen zu können. (7 BE)

Es treffe monochromatisches Licht der Wellenlänge  $\lambda_{Ph} = 532 \text{ nm}$  auf die Photokathode. Hierdurch werden Primärelektronen freigesetzt, deren maximale Bewegungsenergie an der Oberfläche der Photokathode rund  $E_{kin,0} \approx 0,83 \text{ eV}$  beträgt. Die Beschleunigungsspannung zwischen der Photokathode und der ersten Dynode (bzw. zwischen zwei aufeinanderfolgenden Dynoden) betrage  $U_B = 200 \text{ V}$ . Bei einer Bewegungsenergie von  $E_{kin} \approx 200 \text{ eV}$  werden, abhängig vom Winkel, mit dem das Elektron auf die Dynode trifft, 5 – 10 Sekundärelektronen aus dieser herausgelöst.

- b) • **Berechnen** Sie die Geschwindigkeit eines Elektrons, welches aus der Photokathode gelöst wird und über eine Bewegungsenergie von  $E_{kin,0} = 0,83 \text{ eV}$  verfügt.
- **Begründen** Sie, dass die ursprüngliche Bewegungsenergie der freigesetzten Photoelektronen keinen nennenswerten Einfluss auf die Anzahl der Elektronen hat, die aus der ersten Dynode herausgeschlagen werden. (7 BE)

Oftmals ist es für Berechnungen oder Abschätzungen von Vorteil, wenn die Energie  $E_{Ph}$  eines Photons in der Einheit Elektronvolt anstatt in der Einheit Joule vorliegt. Die Energie eines Photons ist umgekehrt proportional zu seiner Wellenlänge  $\lambda$ . Der zugehörige Proportionalitätsfaktor sei  $\alpha$ :

$$E_{Ph}(\lambda) = \alpha \cdot \frac{1}{\lambda}.$$

- c) • **Bestimmen** Sie den Wert und die Einheit des Proportionalitätsfaktors  $\alpha$ , sodass mit obiger Formel die Energie eines Photons in Elektronvolt *direkt* aus der Wellenlänge in Nanometer berechnet werden kann.

*Hinweis: Der Proportionalitätsfaktor lässt sich beispielsweise durch ein selbstgewähltes Beispiel ermitteln.* (4 BE)

Damit ein Photon ein Elektron aus der Photokathode lösen kann, muss es zunächst durch das aus Borosilikatglas bestehende Eintrittsfenster des PMTs gelangen, welches nur einen Teil des Lichts hindurchlässt. Dieser Anteil wird als Transmission bezeichnet und ist vom Material und der Dicke des Eintrittsfensters und von der Wellenlänge der einfallenden elektromagnetischen Strahlung abhängig (siehe Abb. 3).

Selbst wenn ein Photon die Photokathode erreicht und seine Energie groß genug ist, um ein Elektron herauszulösen, geschieht dies dennoch nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit, der sogenannten Quanteneffizienz  $QE$ . Sie ist von den Materialeigenschaften der Photokathode abhängig und durch die Anzahl der ausgelösten Elektronen  $N_e$  im Verhältnis zur Anzahl der auf die Photokathode treffenden Photonen  $N_{ph}$  gegeben:

$$QE(\lambda) = \frac{N_e}{N_{ph}(\lambda)}.$$

In dem Diagramm in Abb. 4 ist die Quanteneffizienz für eine  $K_2CsSb$ -Photokathode gegen die Wellenlänge der elektromagnetischen Strahlung aufgetragen.

- d) • **Schätzen** Sie mithilfe von Abb. 3 und Abb. 4 **ab**, welcher Anteil von Photonen der Wellenlänge  $\lambda = 532 \text{ nm}$ , die auf das Eintrittsfenster des PMTs treffen, ein Elektron aus der Photokathode löst.
- **Beurteilen** Sie, ob sich Photomultiplier im Allgemeinen eignen, um
    - die Wellenlänge oder Wellenlängenbereiche des detektierten Lichts oder
    - bei monochromatischem Licht bekannter Wellenlänge dessen Intensität zu bestimmen.

(7 BE)

PMTs kommen auch in Kombination mit Spektrometern zum Einsatz, um Spektrallinien mit sehr geringer Intensität nachzuweisen. Im Folgenden sollen mit einem solchen Aufbau die Spektrallinien der Balmer-Serie des Wasserstoffatoms genauer untersucht werden. Zur Balmer-Serie gehören alle Übergänge, bei denen der niedrigere Energiezustand durch  $n = 2$  gegeben ist.

- e) • **Untersuchen** Sie rechnerisch und unter Zuhilfenahme von Abb. 3 sowie Abb. 4, ob der oben beschriebene Photomultiplier zur Messung aller Spektrallinien der Balmer-Serie ein, wenn auch kleines, Signal liefert.

(5 BE)

Die wundersame Natur von Photonen lässt sich unter anderem bei Doppelspaltexperimenten beobachten, die bei so geringen Lichtintensitäten durchgeführt werden, dass die Photonen den Doppelspalt einzeln passieren. PMTs stellen hierbei eine Möglichkeit dar, die Photonen zu detektieren. Zu diesem Zweck wird eine Vielzahl von ortsauflösenden PMTs lückenlos in Reihen und Spalten in der Schirmebene, welche parallel zur Doppelspaltebene ausgerichtet ist, installiert. Als Lichtquelle des im Folgenden betrachteten Experiments diene ein Laser, welcher Licht der Wellenlänge  $\lambda_{ph} = 532 \text{ nm}$  aussendet. Die eigentliche Strahlungsleistung des Lasers ist mit  $P = 1 \text{ mW}$  für Einzelphotonenexperimente allerdings deutlich zu hoch und wird aus diesem Grund mithilfe eines sogenannten Neutraldichtefilters, welchen der Laserstrahl durchlaufen muss, um viele Größenordnungen vermindert (siehe Abb. 5).

- f) • **Geben** Sie qualitativ, sowohl unter Verwendung des Wellenmodells als auch mithilfe des Teilchenmodells, die Wirkung eines Neutraldichtefilters auf das eintreffende Licht **an**.

- **Prüfen** Sie, ob sich zu jeder Zeit höchstwahrscheinlich nur ein einziges Photon zwischen dem Filter und einem 10 m entfernten Schirm befindet, wenn diese mit einer Rate von 1 000 000 Photonen pro Sekunde den Filter passieren.

*Hinweis: Ermitteln Sie hierfür den mittleren Abstand, den aufeinanderfolgende Photonen im Laserstrahl voneinander haben.*

**(6 BE)**

In einem ersten Doppelspaltexperiment (mit dem bereits beschriebenen Aufbau) wurden 96 Photonen in der Schirmebene detektiert. Die Verteilung der Auftrefforte ergibt das in Abb. 6 gezeigte Bild. Ein weiteres Experiment wurde von der Auswerteelektronik bereits nach 25 detektierten Photonen (vgl. Abb. 7) automatisch abgebrochen, weil ein Abgleich der Photonenverteilung mit simulierten Ergebnissen auf eine Störung bei der Messung hinwies. Weitere Nachforschungen ergaben, dass tatsächlich eine schwache Streulichtquelle für die abweichenden Ergebnisse verantwortlich war: Ungewollt wurde die Schirmebene zusätzlich gleichmäßig mit Streulicht beleuchtet.

- g) • **Erläutern** Sie, dass sowohl der Wellen- als auch der Teilchencharakter von *einzelnen* Photonen aus Abb. 6 ersichtlich wird.

- **Beurteilen** Sie ausschließlich unter Zuhilfenahme von Abb. 6 und Abb. 7, ob der automatische Abbruch des zweiten Experiments durch die Auswerteelektronik gerechtfertigt war.
- **Zeichnen** Sie in Abb. 8 die Häufigkeitsverteilung der Photonen ein, die sich nach einer Messzeit von 50 min ergibt, wenn das Streulicht im Hauptmaximum zu einer neunfach höheren Häufigkeit von detektierten Photonen führt, als dies ohne Streulicht der Fall wäre.

*Hinweis: Beachten Sie auch die veränderte Messzeit in Abb. 8.*

- **Entwickeln** Sie ein Verfahren, mit dem sich trotz einer nicht vermeidbaren Streulichtquelle die Häufigkeitsverteilung, welche ohne Streulicht zu erwarten wäre, aus den gewonnenen Daten extrahieren lässt.

**(14 BE)**

## Anlage zur Aufgabe „Photomultiplier und ihre Einsatzgebiete“

### Material M1: Funktionsweise eines Photomultipliers (PMT)

Gelangt elektromagnetische Strahlung mit ausreichend hoher Frequenz durch das Eintrittsfenster des PMTs auf die Photokathode, werden von ihrer Oberfläche Elektronen emittiert (siehe Abb. 2). Diese Primärelektronen werden anschließend in einem elektrischen Feld beschleunigt und treffen auf weitere Elektroden, die als Dynoden bezeichnet werden. An jeder Dynode werden durch das Übertragen der Bewegungsenergie des eintreffenden Elektrons auf das Dynodenmaterial mehrere sogenannte Sekundärelektronen freigesetzt, wodurch die Anzahl der Elektronen von Dynode zu Dynode lawinenartig zunimmt. Schließlich treffen die Elektronen auf eine Anode, wo das ursprüngliche Signal um das Milliardenfache verstärkt ankommt und in eine elektrische Spannung umgewandelt wird. Im Folgenden wird ein Photomultiplier betrachtet, dessen Photokathode aus dem Material Kalium-Cäsium-Antimonid ( $K_2CsSb$ ) mit der Austrittsarbeit von  $W_A = 1,5 \text{ eV}$  besteht.

Das Bild wurde aus urheberrechtlichen Gründen entfernt.

**Abb. 2:** Schematische Darstellung der Funktionsweise eines Photomultipliers.  
Quelle: <https://www-zeuthen.desy.de/exps/>, letzter Zugriff: 09.09.2023

Das Bild wurde aus urheberrechtlichen Gründen entfernt.

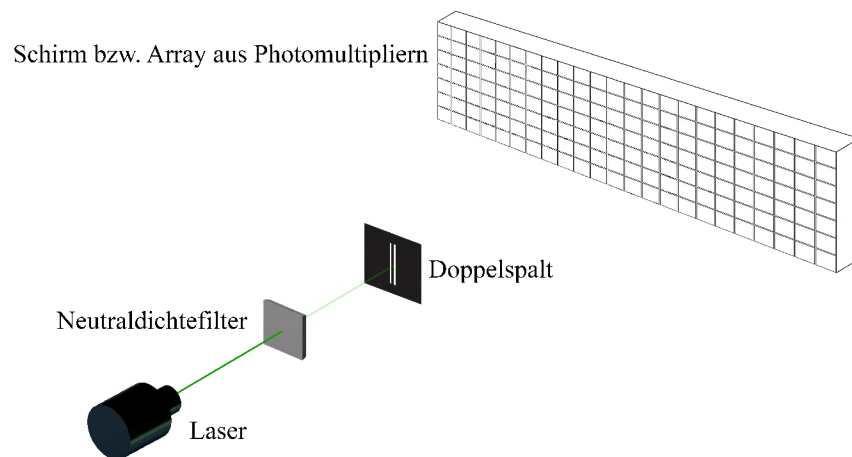
**Abb. 3:** Transmissionsvermögen des Eintrittsfensters des verwendeten PMTs in Abhängigkeit von der Wellenlänge. Das Fenster besteht aus Borosilikatglas.

Quelle: <http://www.physik.tu-berlin.de/institute/IFFP/glastw/zielinski/daten.html>, letzter Zugriff: 09.09.2023

Das Bild wurde aus urheberrechtlichen Gründen entfernt.

**Abb. 4:** Quanteneffizienz einer  $K_2CsSb$ -Photokathode in Abhängigkeit von der Wellenlänge. Da sich die Quanteneffizienz in dem betrachteten Wellenlängenbereich über mehrere Größenordnungen erstreckt, wurde für die  $y$ -Achse eine logarithmische Darstellung gewählt.

Quelle: [http://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99\\_](http://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_), letzter Zugriff: 09.09.2023, bearbeitet durch BSB



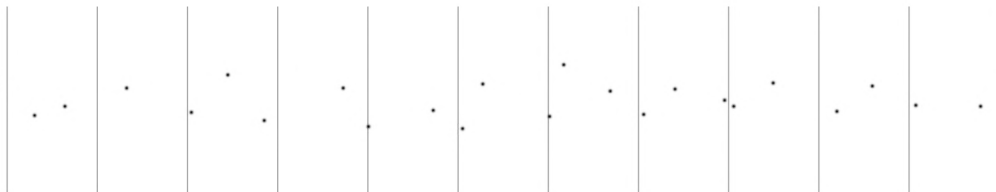
**Abb. 5:** Schematische Skizze des Versuchsaufbaus für das Doppelspaltexperiment mit Einzelphotonen. Die Intensität des Laserlichts wird durch einen Neutralsichtfilter zunächst um mehrere Größenordnungen verringert, bevor es auf den Doppelspalt trifft. Hinter dem Doppelspalt dient ein Array aus  $23 \times 7$  ortsauflösenden Photomultipliern als Schirm. Die einzelnen Rechtecke des Schirms stellen jeweils das Eintrittsfenster eines Photomultipliers dar. Nicht maßstabsgetreu.

Quelle: BSB



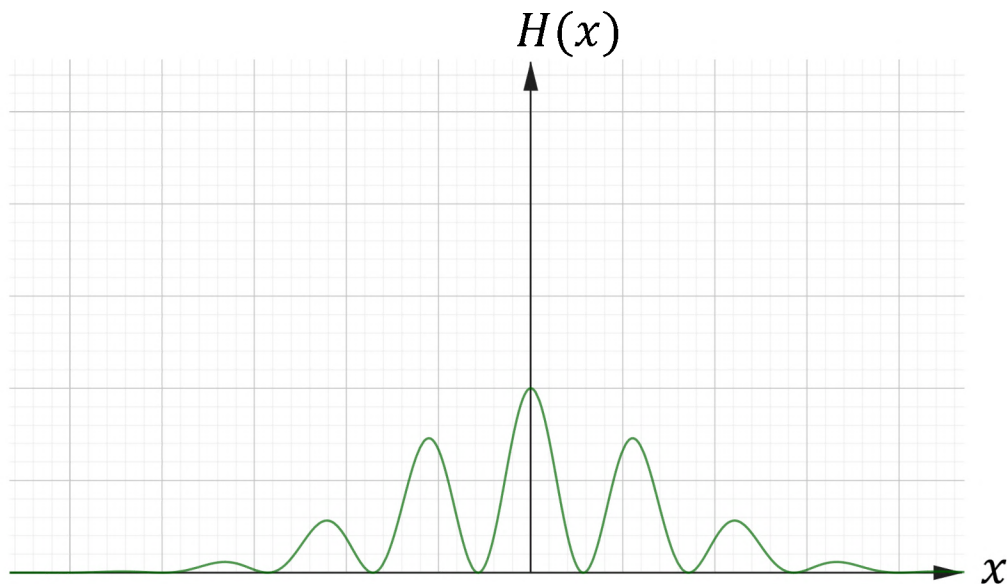
**Abb. 6:** Auftrefforte der Photonen in der Detektorebene bei einem Doppelspaltexperiment. Die vertikalen Linien zeigen die Stellen an, an denen aufgrund destruktiver Interferenz keine Photonen zu erwarten sind.

Quelle: BSB



**Abb. 7:** Auftrefforte der Photonen in der Detektorebene bei einem Doppelspaltexperiment. Nach wenigen detektierten Photonen wurde der Messvorgang automatisch abgebrochen. Die vertikalen Linien zeigen die Stellen an, an denen aufgrund destruktiver Interferenz keine Photonen zu erwarten sind.

Quelle: BSB



**Abb. 8:** Häufigkeitsverteilung  $H(x)$  der detektierten Photonen, welche sich nach einer **Messzeit von 200 min ohne Streulicht** und einer sehr großen Anzahl von Photonen in horizontaler Richtung in der Detektorebene ergibt. Dabei bezeichnet  $x$  den Abstand vom Hauptmaximum.

Quelle: BSB

### Aufgabe III: Medizinphysik

#### Schwerpunktthema: Teilchen im elektromagnetischen Feld

(50 BE)

Sowohl in der medizinischen Diagnostik als auch zur Behandlung von Erkrankungen werden Geräte verwendet, in denen starke elektrische und magnetische Felder von großer Bedeutung sind. Als bildgebende Verfahren zum Einsatz kommen unter anderem die klassische Durchleuchtung mit Röntgenstrahlung und die Computertomographie (CT), bei der aus einer Vielzahl von Röntgenabsorptionsmessungen digitale Schnittbilder errechnet werden.

Das Bild wurde aus urheberrechtlichen Gründen entfernt.

**Abb. 1:** Kniegelenk auf einem Röntgenbild (links) und auf einer Magnetresonanztomographie (rechts).

Quelle: <https://de.wikipedia.org/wiki/Kniegelenk>, letzter Zugriff: 19.05.2023

Zur Erzeugung von Röntgenstrahlen werden zunächst Elektronen von einer Kathode emittiert und im elektrischen Feld einer angelegten Hochspannung beschleunigt. Beim Auftreffen der Elektronen auf eine Anode geeigneten Materials entsteht Röntgenstrahlung. In der medizinischen Diagnostik kommen meist Beschleunigungsspannungen zwischen 50 und 150 kV zur Erzeugung sogenannter mittelharter Röntgenstrahlung zum Einsatz.

- a) • **Berechnen** Sie unter Vernachlässigung relativistischer Effekte die Geschwindigkeit eines Elektrons vor dem Auftreffen auf die Anode, das mit einer Spannung von 50 kV beschleunigt wurde.
- **Geben** Sie **an**, wieviel Prozent der Lichtgeschwindigkeit diese Elektronengeschwindigkeit entspräche. (5 BE)

Die Magnetresonanztomographie (MRT), die auch Kernspintomographie genannt wird, kommt im Unterschied zur Röntgendiagnostik ohne ionisierende Strahlung aus. Für das MRT-Verfahren wird ein sehr starkes und homogenes Magnetfeld benötigt. Dieses wird in der Regel durch eine stromdurchflossene Spule erzeugt. Die zu untersuchende Person liegt in dieser zylindrischen Spule wie in Abb. 2 gezeigt. Dem starken, konstanten Magnetfeld der großen Spule wird ein hochfrequentes Wechselfeld einer kleineren Spule überlagert. Die innere Spule und ihr Wechselfeld sollen in dieser Aufgabe nicht weiter berücksichtigt werden. Es wird ein Gerät betrachtet, in dem die äußere Spule eine Länge von 2,0 m und einen Durchmesser von 1,0 m hat und aus einem sehr dünnen Kupferdraht mit einer Gesamtlänge von 10 km gewickelt wurde.

- b) • **Berechnen** Sie die elektrische Stromstärke, die im Kupferdraht benötigt wird, um im Inneren dieser Spule eine magnetische Flussdichte von 1,5 T zu erzeugen.

*Hinweis: Sie dürfen vereinfachend annehmen, dass der Spulendurchmesser hinreichend klein gegenüber der Länge der Spule ist.*

- **Skizzieren** Sie den Verlauf der magnetischen Feldlinien innerhalb und außerhalb der langen Spule in Abb. 3 unter Angabe der Richtung, in die der elektrische Strom die Spule durchfließt. (9 BE)

Zur Vermessung von Magnetfeldern in MRT-Geräten werden unter anderem Hall-Sonden eingesetzt. In Abb. 4 ist ein würfelförmiger Sensor gezeigt, der Magnetfeldmessungen in allen drei Raumrichtungen gleichzeitig ermöglicht. In dem Würfel sind drei flache Sensorplatten orthogonal zueinander montiert, deren gleichzeitige Messvorgänge in je einer Raumrichtung sich gegenseitig nicht beeinflussen. Die Hall-Konstante des Sensormaterials aus dem Halbleiterwerkstoff Galliumarsenid ist  $R_H = 0,3 \text{ m}^3/\text{C}$ . Die zur Messung verwendete Stromstärke beträgt in allen drei Sensorplatten jeweils konstant 2 mA. Obwohl

aufgrund einer komplizierteren Bauweise die drei Sensorplatten in Wirklichkeit noch deutlich dünner sind, soll in dieser Aufgabe davon ausgegangen werden, dass es sich um drei klassische Hall-Sonden mit einer Dicke von jeweils 3 mm handelt. Das restliche Volumen des Würfels besteht aus nichtleitendem Keramikwerkstoff.

- c) • **Erläutern** Sie, wie es in einer der Sensorplatten zum Auftreten einer konstanten Hall-Spannung in  $y$ -Richtung kommt, wenn ein Strom in  $x$ -Richtung fließt und das Magnetfeld in  $z$ -Richtung zeigt.
- **Zeigen** Sie rechnerisch, dass die magnetische Flussdichte insgesamt 1,0 T beträgt, wenn mit dem würfelförmigen Sensor in zwei der Raumrichtungen Hall-Spannungen von  $U_{H,1} = 160 \text{ mV}$  und  $U_{H,2} = 120 \text{ mV}$  gemessen werden und in der dritten Raumrichtung keine signifikante Hall-Spannung feststellbar ist ( $U_{H,3} = 0$ ). **(9 BE)**

Bei einer Strahlentherapie werden unter anderem Strahlen geladener Teilchen wie Elektronen, Protonen oder auch schwerere Ionen verwendet. Der Teilchenstrahl muss nach seiner Erzeugung in der Regel umgelenkt werden, bevor er auf die zu behandelnde Person gerichtet wird. Da nicht alle Teilchen die gleiche Richtung und nicht exakt die gewünschte Energie haben, kommen außerdem verschiedene Filter sowie Bauteile zur Parallelisierung oder Fokussierung der Strahlen zum Einsatz.

In Abb. 5 ist ein Umlenkmagnet dargestellt. Man sieht dort, dass der Durchmesser des Elektronenstrahls nach dem Umlenkmagneten deutlich größer als davor ist. Die Abstoßung der Elektronen untereinander ist dabei vernachlässigbar.

- d) • **Zeigen** Sie, dass der Radius der Elektronenbahnen im Magnetfeld proportional zur Wurzel der Energie der Elektronen ist.
- **Erläutern** Sie, weshalb ein Elektronenstrahl durch einen einfachen Umlenkmagneten wie in Abb. 5 aufgeweitet wird.
- **Analysieren** Sie, um wieviel Prozent sich der Radius der Elektronenbahnen im Magnetfeld ändert, wenn die Energie der Elektronen im Strahl vor dem Eintritt in das Magnetfeld um 10% erhöht wird, die anderen Parameter aber unverändert bleiben.
- **Entwickeln** Sie ausgehend von Abb. 5 eine Skizze, die den Verlauf der Randstrahlen im und nach dem Umlenkmagneten korrekt darstellt, und
- **erläutern** Sie die Unterschiede zwischen Ihrer Skizze und der vereinfachten, nicht korrekten Skizze in Abb. 5. **(18 BE)**

Ziel der Strahlentherapie ist es, das unkontrollierte Wachstum von Zellen zu unterbinden und dabei umliegende, gesunde Zellen möglichst wenig zu schädigen. Dazu muss der Strahl präzise auf das Zielvolumen gelenkt werden und der maximale Energieübertrag auf das Gewebe sollte nach dem Eindringen in den Körper erst in dem Tiefenbereich stattfinden, in dem die wuchernden Zellen liegen.

Abb. 6 zeigt den Energieübertrag von Protonen nach dem Eindringen in Wasser für vier verschiedene Protonengeschwindigkeiten vor dem Auftreffen auf das Wasser. Die Tiefe, bei der die maximale Energieabgabe erfolgt, wird als Eindringtiefe bezeichnet. In Tab. 1 ist die Eindringtiefe für Elektronen mit verschiedenen Auftreffgeschwindigkeiten aufgeführt. Im Folgenden soll davon ausgegangen werden, dass Elektronen und Protonen mit einer vernachlässigbaren Anfangsgeschwindigkeit durch das einmalige Durchlaufen einer geraden Strecke beschleunigt werden und dass die Energieabgabe von eingestrahlteten Elektronen und Protonen im menschlichen Körper hinreichend ähnlich zur Energieabgabe in Wasser erfolgt.

- e) • **Schätzen** Sie anhand von Abb. 6 und nicht-relativistischen Berechnungen **ab**, welche Beschleunigungsspannung für Protonen benötigt wird, um mit ihnen Zellen in einer Tiefe von 15 cm möglichst wirksam zu bestrahlen.



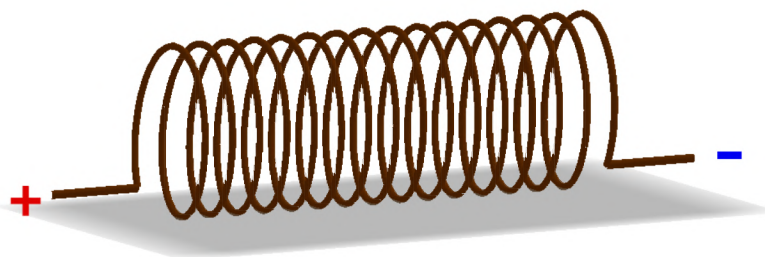
- **Arbeiten** Sie eine Gemeinsamkeit und einen Unterschied bezüglich der Eindringtiefe von Protonen und Elektronen **heraus**, indem Sie Informationen aus Abb. 6 und Tab. 1 entnehmen.  
*Hinweis: Berücksichtigen Sie dabei auch die Auftreffgeschwindigkeiten.*
- **Begründen** Sie ausgehend von Abb. 6, weshalb es zur Behandlung von Zellen, die sich nahe der Körpermitte befinden, in vielen Fällen schonender für die zu behandelnde Person ist, während der Bestrahlung die Strahlenquelle um das Zielvolumen rotieren zu lassen, als nur aus einer Richtung zu bestrahlen. **(9 BE)**

## Anlage zur Aufgabe „Medizinphysik“

Das Bild wurde aus urheberrechtlichen Gründen entfernt.

**Abb. 2:** Aufbau eines Kernspintomographen.

Quelle: <https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/magnetisches-feld-spule/ausblick/kernspintomographie>, letzter Zugriff: 18.02.2023



**Abb. 3:** Lange zylindrische Spule zum Einzeichnen der Feldlinien und der Stromrichtung.

Quelle: BSB

Das Bild wurde aus urheberrechtlichen Gründen entfernt.

**Abb. 4:** Dreidimensionaler, würfelförmiger Hall-Sensor (links), neben einem Streichholzkopf zum Größenvergleich, und eindimensionaler, quadratischer Hall-Sensor (rechts), von einer Pinzette gehalten. In dem Würfel sind drei der eindimensionalen Sensoren orthogonal zueinander montiert. Das restliche Volumen des Würfels besteht aus nichtleitendem Keramikwerkstoff.

Quelle: [https://www.asensor.eu/onewebmedia/Hall\\_sensor\\_overview\\_X.pdf](https://www.asensor.eu/onewebmedia/Hall_sensor_overview_X.pdf), letzter Zugriff: 10.08.2023

Das Bild wurde aus urheberrechtlichen Gründen entfernt.

**Abb. 5:** Vereinfachte Darstellung der Umlenkung eines Elektronenstrahls durch ein homogenes Magnetfeld, das in die Zeichenebene zeigt. Der Strahldurchmesser ist nach der Umlenkung deutlich größer als davor. Zur Verdeutlichung wurden die Randstrahlen hervorgehoben.

Quelle: <https://medizinphysik.wiki/teletherapie/linearbeschleuniger/>, letzter Zugriff: 18.02.2023, bearbeitet durch BSB

Das Bild wurde aus urheberrechtlichen Gründen entfernt.

**Abb. 6:** Energieabgabe von Protonen an Wasser bei vier verschiedenen Auftreffgeschwindigkeiten:

$1,09 \cdot 10^8$  m/s (Graph 1)

$1,17 \cdot 10^8$  m/s (Graph 2)

$1,22 \cdot 10^8$  m/s (Graph 3)

$1,32 \cdot 10^8$  m/s (Graph 4)

Quelle: [https://lehrerfortbildung-bw.de/u\\_matnatech/physik/gym/bp2016/fb6gt/1\\_diagnostik/6\\_tiefe/](https://lehrerfortbildung-bw.de/u_matnatech/physik/gym/bp2016/fb6gt/1_diagnostik/6_tiefe/), letzter Zugriff: 18.02.2023

Das Bild wurde aus urheberrechtlichen Gründen entfernt.

**Tab. 1:** Eindringtiefe von Elektronen in Wasser für verschiedene Auftreffgeschwindigkeiten.

Quelle: [https://lehrerfortbildung-bw.de/u\\_matnatech/physik/gym/bp2016/fb6gt/1\\_diagnostik/6\\_tiefe/](https://lehrerfortbildung-bw.de/u_matnatech/physik/gym/bp2016/fb6gt/1_diagnostik/6_tiefe/), letzter Zugriff: 18.02.2023