

I.B.52

Mechanik

Bombenzyklon – Druck anhand von Wetterphänomenen

Kerstin Reinecke



© RAABE

© gguy44/iStock/Getty Images

Wichtige Inhalte der Physik mit Alltagsphänomenen zu knüpfen, motiviert Lernende und hilft, physikalisches Wissen und Kompetenzen langfristig zu verankern. Wetter und Klima sind dabei zwei Themen, die nicht nur alltägliche Erscheinungen, sondern auch hinsichtlich des anthropogen verursachten Klimawandels von wesentlicher gesellschaftlicher Relevanz sind. Ein wichtiger Baustein beim Verständnis von Wetter- und Klimaerscheinungen ist der Druck, hier Luftdruck. Als motivierender Einstieg in das Wetterphänomen des „Bombenzyklons“. Wie entsteht ein Bombenzyklon? Wie kommt es zu dem starken Druckabfall? Und was ist überhaupt Druck?

KOMPETENZBEIHEFT

Klassenstufe: 9–11

Dauer: 8 Unterrichtsstunden (Minimalplan: 6)

Intenzenz: Definitionen von Druck, Anwendung Druck, Messung mit Phyphox, Versuchsdaten auswerten und bewerten, Diagramme beschreiben können, Teilchenmodell anwenden, Berechnungen

Inhalt: Mechanik: Druck, Luftdruck, Wetterphänomene

Medien: Arbeitsblätter, Diagramme, Smartphone oder Tablet, Internet

Auf einen Blick

1.–2. Stunde

Thema: Der Bombenzyklon

M 1 Der Bombenzyklon bringt Schneestürme und Eiswind

Benötigt: Präsentationsmedium (Beamer, Board etc.)
 Digitales Endgerät (Tablet, Laptop etc.)

M 2 Was ist Druck überhaupt?

Benötigt: Digitales Endgerät (Tablet, Laptop etc.)
 Versuchsmaterialien: Luftpumpe, Luftballon, Schnur, Klebeband, Kuli-Hülse



3.–6. Stunde

Thema: Luftdruck und die Entstehung von Stürmen

M 3 Der Luftdruck

Benötigt: Digitales Endgerät (Tablet, Smartphone) mit Drucksensoren
 App „Phyphox“

M 4 Warum stürmt es besonders viel im Herbst?

M 5 Der Bombenzyklon im Erklärvideo

Benötigt: Digitales Endgerät (Tablet, Laptop etc.)
 Evtl. Internetzugang



7.–10. Stunde

Thema: Luftdruck und Stürme zur Klassenarbeit

M 6 Experimente: Tauchboot und Druckdose

Benötigt: Versuchsmaterial: 0,5-l-PET-Flasche, Einmal-Handschuhe, Haushalts-
 Klebebänder, Schüssel mit Wasser

M 7 Übungsaufgaben zur Klassenarbeit

M 8 Klassenarbeit zum Thema Druck



Minimalplan

Die Erarbeitungszeit für die physikalischen Fragestellungen aus den Berichten über den Bombenzyklon lässt sich stark verkürzen, wenn eine Präsentation oder ein kurzer Filmbericht eingesetzt wird. Die Erstellung des Erklärvideos kann durch ein Plenumsgespräch mit schriftlicher Sicherung ersetzt werden. **M 7** ist optional. Dadurch lässt sich die Einheit auf sechs Einzelstunden bzw. drei Doppelstunden verkürzen mit anschließender Klassenarbeit.

M 1



Der Bombenzyklon bringt Schneestürme und Eiswind

In den USA haben Temperaturen bis zu minus 46 Grad weite Teile des Landes erfasst (26.12.2022). Reisepläne zum Weihnachtsfest werden durchkreuzt. Für manche endet die extreme Kälte tödlich.



Foto: Willowpix/iStock/Getty Images Plus

Bis zu drei Meter hohe Schneewehen, enorme Staus, eisglatte Straßen: In weiten Teilen der USA ist der Verkehr zum Erliegen gekommen. Mehr als 200 Millionen US-Bürger stehen vor dem eisigsten Weihnachtsfest seit Jahrzehnten: Ein heftiges Sturmtief sorgt in weiten Teilen der USA für Chaos. In Buffalo hatte der extreme Sturm sogar Todesbedingungen hervorgerufen. Als „Whiteout“ wird ein meteorologisches Phänomen bezeichnet, bei dem durch Schnee und gedämpftes Sonnenlicht eine extreme Helligkeit entsteht, in der Konturen und Schatten verschwinden.

Wind mit bis zu 150 Stundenkilometern
Meteorologen sagten Schneestürme mit Windgeschwindigkeiten von bis zu 112 Kilometern pro Stunde voraus, insbesondere für die Gegend um die Großen Seen. Teils wurden aus einzelnen Regionen sogar noch höhere Windgeschwindigkeiten gemeldet. Auf dem Mount Washington etwa, dem höchsten Gipfel im Nordosten der USA, peitschte der Wind mit einer Geschwindigkeit von über 150 Stundenkilometern.

Reisende stranden im Chaos

Ähnliche Szenen spielten sich auch an den Flughäfen. Vor allem Passagiere im Norden, rund um die Großen Seen, mussten Reisen absagen. Die Flughäfen in Chicago und Detroit gehören zu den wichtigsten Drehkreuzen des Landes. Mehr als 5.700 Flüge wurden nach Angaben der Flugdaten-Webseite FlightAware am Freitag gestrichelt. Fast 9.000 waren verspätet.

Medienberichten zufolge starben mindestens 13 Menschen bei Verkehrsunfällen. Auf vielen Straßen kam der Verkehr komplett zum Erliegen. Das Bahnunternehmen Amtrak stellte seine Fahrten im Mittleren Westen auf mehr als 20 Verbindungen bis über Weihnachten ein.



© thomas-bethge/iStock/Getty Images Plus

Sturm verlagert sich in den Osten der USA

Betroffen waren zunächst vor allem der Norden und der Mittlere Westen des Landes. Doch auch in Bundesstaaten im Süden des Landes gab es Warnungen vor extremem Frost. In der Nacht zum Samstag sollte sich der Sturm mehr in den östlichen Teil der USA verlagern. In den östlichen zwei Dritteln des Landes werde zum Feiertagswochenende „gefährliche Kälte“ erwartet, warnte der US-Wetterdienst. Einige Bundesstaaten, darunter New York, riefen den Notstand aus.

Lebensgefahr für Obdachlose

Lebensgefahr besteht besonders für Menschen, die kein Zuhause haben. Überall versuchen Helfer Obdachlose vor der Kälte zu retten. So bereite sich beispielsweise eine Kirchenmission in Augusta, im US-Bundesstaat Georgia, laut „New York Times“ auf einen Ansturm vor. In einer normalen Nacht geht es vielleicht nicht um Leben und Tod. Aber jetzt schon. In Salt Lake City, im Bundesstaat Utah, sind Medienberichten zufolge bereits Anfang der Woche mindestens fünf Obdachlose erfroren.

Zehntausende ohne Strom

Extreme Kälte, heftige Schneefälle und Eiswind führten laut Behörden zu Stromausfällen in fast 1,5 Millionen US-Haushalten. Laut der Verbraucher-Webseite Power Outage war am Samstagmorgen sogar mehr als 1,7 Millionen Haus- und Geschäftsanschlüsse ohne Strom.

Der Stromnetzbetreiber PJM, der im Osten der USA 65 Millionen Menschen versorgt, teilte mit, die Kraftwerke hätten bei den eisigen Temperaturen Betriebsschwierigkeiten, während zugleich der Verbrauch steige.

Kunden in 13 US-Staaten sollten daher nicht unnötig Strom verbrauchen, Heizungen niedriger einstellen, größere Geräte wie Geschirrspüler nicht einschalten und sich auf zeitweise Stromabschaltungen vorbereiten.

In den Bundesstaaten Montana, South Dakota und Wyoming seien bereits Werte um minus

45 Grad Celsius gemessen worden.

In Montana meldete der Gebirgspass Elk Park minus 50 Grad Celsius.

Der örtliche Wetterdienst

in Minnesota rief zu Reisen.

Quelle: ZDF heute



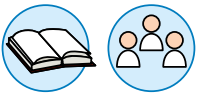
Aufgaben

1. **Formuliere** in eigenen Worten die Aussagen zur Physik.
2. **Formuliere** aus den Schlüsselwörtern physikalische Fragestellungen, die im Unterricht bearbeitet werden können.



M 4

Warum stürmt es besonders viel im Herbst?



Die Entstehung von Herbststürmen

Herbststürme entstehen, wenn warme und kalte Luftmassen besonders stark aufeinander treffen. Diese Begegnung geschieht häufiger im Herbst, da die Temperaturen auf der Nordhalbkugel stark sinken und die Unterschiede zwischen warmen und kalten Luftmassen größer werden.

Temperaturunterschiede als Ursache

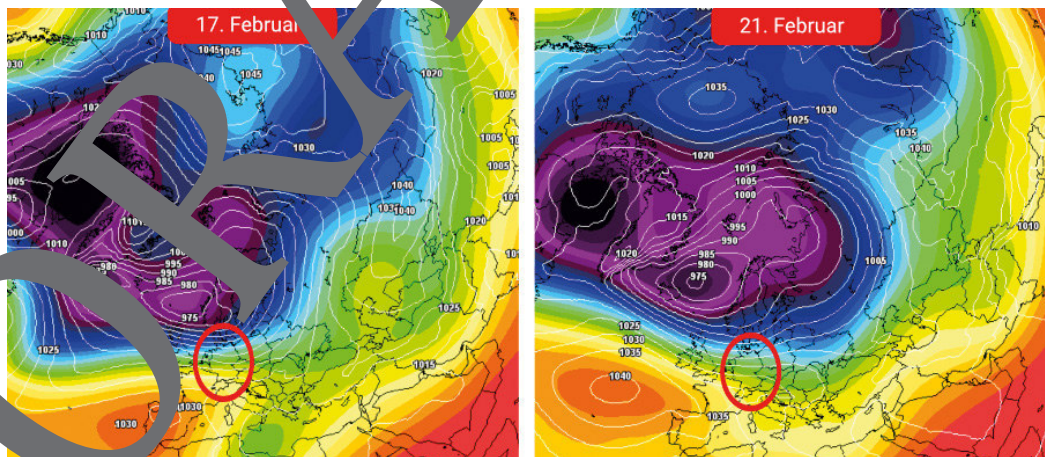
Im Herbst kühlt das Festland schnell ab, während die Ozeane die Wärme des Sommers länger speichern. Dadurch entsteht ein starker Temperaturunterschied zwischen Land- und Meeresregionen. Wenn warme, feuchte Luftmassen über den Meeren auf kältere, trockenerere Luftmassen aus dem Norden treffen, bildet sich eine sogenannte „Front“, an der sich das Wetter rasch verändert. Diese Temperaturunterschiede setzen große Energiemengen in der Atmosphäre frei und erzeugen starke Winde.

Tiefdruckgebiete und Luftdruckunterschiede

Bei der Konfrontation von warmer und kalter Luft entstehen häufig Tiefdruckgebiete. Diese bilden sich, weil warme Luft über die dichtere kalte Luft aufsteigt, was einen Druckabfall am Boden zur Folge hat. In einem solchen Tiefdruckgebiet herrscht ein niedriger Luftdruck als in der Umgebung, und Luft strömt aus benachbarten Hochdruckgebieten dorthin. Je größer die Druckunterschiede, desto schneller bewegt sich die Luft. Der Wind wird stärker und kann bis zu stürmischen Geschwindigkeiten anwachsen.

Wetterkarten lesen lernen

Um die Entstehung von Stürmen besser verstehen zu können, nutzen wir eine Wetterkarte. Wetterkarten zeigen Gebiete mit hohem und niedrigem Luftdruck und helfen uns zu verstehen, wo sich Wind und Stürme entwickeln könnten. Unten sind Wetterkarten vom 17. Februar und 21. Februar 2022 abgebildet.



Quelle: <https://www.wetterprognose-wettervorhersage.de/wetter-jahreszeiten/winter/wetter-winter-2021-2022/10196-wettervorhersage-wie-wahrscheinlich-ist-ein-sturm-oder-orkan-ueber-deutschland.html>

I.D.48

Elektrizitätslehre und Magnetismus

Stromherstellung mit „Balkonkraftwerken“ – ein Lernpfad-Portfolio

Natalie Zimmermann



© RAABE

© Artur Debat/Moment

„Balkonkraftwerke“ sind in der letzten Zeit aufgrund steigender Strompreise und drohender „Black-outs“ ein großes Thema geworden. Können wir mit unserem eigenen „Solar-Kraftwerk“ die Energiewende so einen kleinen Schritt weiterbringen? Für welche Geräte eines Haushaltes reicht die Leistung solcher Minikraftwerke? Wie viel Strom erzeugen die Solarpanels? Und welche Faktoren beeinflussen die Stromerzeugung?

KOMPETENZPROFIL

Klassenstufe: 9/10

Dauer: 12 Unterrichtsstunden (Minimalplan: 7)

Kompetenzen: Sachtexte sinnentnehmend lesen, Überprüfung und Untersuchung der elektrischen Leistung von elektrischen Geräten, Daten zur individuellen Nutzung der Energie auswerten und erklären

Inhalt: Energie, Leistung, Wirkungsgrad, elektrische Energieversorgung, Solarenergie

Medien: Texte, Bilder, Experimente, digitale Medien, Internet

Auf einen Blick

1. Stunde

Thema:	Einführung: Lernpfadportfolio und Übersicht zur Einheit
M 1	Einführung in das Lernpfadportfolio
M 2	Lernlandkarte/Lernpfad

2. Stunde

Thema:	Strom produzieren mit „Balkonkraftwerken“
M 3	Selbst Strom produzieren?! – Einstiegswinkel
M 4	Wiederholung der Begriffe: Energie, Leistung und Co.

3.–4. Stunde

Thema:	Die elektrische Leistung
M 5	Die elektrische Leistung berechnen – Aufgaben und Versuche
Benötigt:	<input type="checkbox"/> Spannungsquelle <input type="checkbox"/> Amperemeter <input type="checkbox"/> Voltmeter <input type="checkbox"/> 6 Kabel <input type="checkbox"/> 1 bis 7 verschiedene Lampen mit Fassung <input type="checkbox"/> Tauchsieder <input type="checkbox"/> Wasserkocher <input type="checkbox"/> Becherglas <input type="checkbox"/> 100-ml-Wasser <input type="checkbox"/> 500-ml-Messzylinder <input type="checkbox"/> Stoppuhr <input type="checkbox"/> eventuell Stativmaterial zur Befestigung des Tauchsieders
M 6	Die elektrische Leistung berechnen

5.–6. Stunde

Thema:	Balkonkraftwerke – Funktionsweise und Leistung
M 7	Funktionsweise von „Balkonkraftwerken“
M 8	Leistung von „Balkonkraftwerken“

7. Stunde

Thema: **Energierrechnung**

M 9 **Die Energierrechnung**

8.–9. Stunde

Thema: **Energie und Leistung im Haushalt**

M 10 **Energie und Leistung – Stromfresser im Haushalt?**

Benötigt: verschiedene Elektrogeräte
 Stoppuhr
 Energiemessgerät

10.–12. Stunde

Thema: **Zusammenfassung und Rückblick**

M 11 **Ergebnisse unseres Lernpfades – in Plakat**

M 12 **Ich-kann-Liste**

Minimalplan

Die Unterrichtseinheit kann auf 7 Stunden gekürzt werden. Die Schülerexperimente können in diesem Fall in Form von Schülerdemo- oder Lehrerexperimenten durchgeführt werden. In der Mediathek befinden sich zudem geeignete Videos als Ersatz für einen Teil der Versuche. Außerdem kann bei Zeitmangel auf die Arbeit mit dem Lernpfadportfolio (M 1 und M 2) und die Plakaterstellung (M 11) verzichtet werden.

Leistung von „Balkonkraftwerken“

M 8



Die Frage, ob sich die Anschaffung eines „Balkonkraftwerkes“ wirklich lohnt, stellt sich wie bei jeder anderen Anschaffung von selbst. Ob die Anschaffung sich bezahlt macht, hängt unter anderem von dem Standort und dem Nutzungsverhalten ab.

Um dies zu beurteilen, werden verschiedene Leistungsangaben benötigt. Schau dir im folgenden Abschnitt zunächst die Produktionsseite an:

Das typische „Balkonkraftwerk“ hat eine Größe von 1 x 1,70 Meter und eine Leistung von ca. 300 Watt. Das bedeutet eine maximale Stromproduktion von 200 bis 300 kWh pro Jahr bei einem Modul. Dieser Wert bezieht sich auf eine optimale Ausrichtung der Anlage. Um den höchsten Ertrag der Anlage zu erzielen, sollte das Sonnenlicht möglichst viele Stunden im rechten Winkel auf die Solarzellen treffen.

Aktuell kann eine maximale Leistung von 600 Watt in Form eines „Balkonkraftwerkes“ erzielt werden. Die Geräte können häufig mindestens 20 Jahre genutzt werden.

Da der Strom nicht gespeichert werden kann, muss er direkt genutzt werden. Dies ist sehr wichtig bei der Fragestellung, ob sich ein Balkonkraftwerk rentiert oder nicht. Eine Speicherung des Stroms ist aktuell noch nicht vorgesehen.



Foto links: amriphoto/E+, Foto rechts: Die Zimmermann

Aufgaben

1. Nenne Punkte, die bei der optimalen Ausrichtung eines Solarmoduls zu beachten sind.
2. Beschreibe die Dinge bei der Entscheidung, ob ein „Balkonkraftwerk“ sich für eine Person lohnt, beachten werden sollte.
3. Beurteile, ob sich bei den aktuellen Strompreisen die Anschaffung eines Balkonkraftwerkes für den folgenden Musterhaushalt lohnen würde. Berechne, wie lange es circa dauern wird, bis die Kosten für solches Kraftwerk eingespart wären. Sollte es eine Förderung für die Anschaffung geben, kann diese in deiner Rechnung berücksichtigen.

Musterhaushalt:

- Jährlicher Stromverbrauch von 3500 kWh
- In der Wohnung werden durchschnittlich 5,5 kWh verbraucht
- Anschaffungskosten für „Balkonkraftwerk“ mit 600 W Nennleistung = 500 Euro
- Optimale Ausrichtung der Anlage ist möglich, wodurch ein durchschnittlicher Ertrag von 80 kWh pro 100 Watt Nennleistung erreicht werden kann.



Ergebnis:

Deine Messwerte kannst du nun nutzen, um die Energiekosten der Geräte mithilfe der folgenden Formel zu berechnen.

$$\text{Stromkosten} = \text{Energiebedarf} \cdot \text{Energiepreis pro kWh}$$

Da nicht immer und jederzeit ein Energiemessgerät zur Verfügung steht, gibt es einen weiteren Weg, die Kosten für den Energiebedarf E eines Gerätes zu berechnen. Hierfür benötigst du die Leistung P des Gerätes und die Betriebsdauer t . Dabei kannst du den Energiebedarf über die folgende Gleichung berechnen:

$$E = P \cdot t$$

Beispiel: Für das Trocknen deiner Haare benötigst du 10 min mit einem Föhn, der 800 W Leistung hat. Daraus folgt zunächst:

$$P = 800 \text{ W} = 0,8 \text{ kW}$$

$$t = 10 \text{ min} = 10 \cdot 1/60 \text{ h} = 10/60 \text{ h} = 0,17 \text{ h}$$

Nun kann die Energie in kWh berechnet werden:

$$E = P \cdot t = 0,8 \text{ kW} \cdot 0,17 \text{ h} = 0,14 \text{ kWh}$$

Aufgaben

- Berechne die Stromkosten für folgende Tätigkeiten am Tag und pro Jahr. Der Strompreis pro kWh soll bei 45 Cent liegen.
 - Akku laden: 4 Stunden mit 10 Watt
 - Kaffee kochen: 20 min mit 500 Watt
 - Staub saugen: 15 min mit 600 Watt
- Recherchiere, welche Aussagen mithilfe des Energielabels über eine Waschmaschine und einen Kühlschrank getroffen werden können.

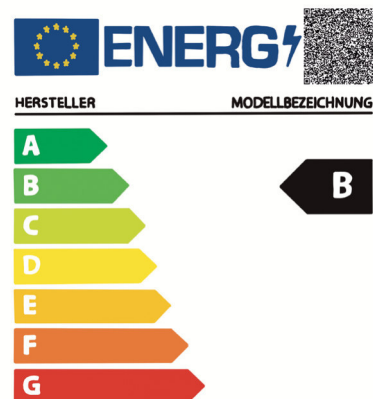


Foto links: C. Cantón/Moment, Abbildung rechts: Natalie Zimmermann



II.F.15

Atom- und Kernphysik

Aufbau und Funktionsweise einer Röntgenanlage

Prof. Dr. Axel Donges



© RAABE

© ER Productions Limited/DigitalVision

Am 8. November 1895 entdeckte der Physiker Wilhelm Conrad Röntgen in Würzburg durch Zufall die unsichtbaren X-Strahlen, wie er sie nannte. Er erhielt für seine Entdeckung den 1901 erstmals verliehenen Nobelpreis für Physik. Die später als Röntgenstrahlen bezeichneten Strahlen revolutionierten die medizinische Diagnostik und Therapie.

KOMPETENZPROFIL

Klassenstufe: II

Dauer: 18 Unterrichtsstunden (Minimalplan: 10)

Kompetenzen: Sachtext mit physikalischem Bezug sinnentnehmend lesen; Aufbau und Funktionsweise einer Röntgenröhre und eines Röntgenröhrenbeschleunigers beschreiben; Röntgenspektrum mithilfe geeigneter Modellvorstellungen erklären; Wechselwirkungsprozesse der Röntgenstrahlung mit Materie kennen; Röntgenbild als Schattenbild verstehen; Funktionsprinzip einer Speicherplatte beschreiben; Recherchieren zu physikalischen Sachverhalten. Beschleunigung von Elektronen, Atom- und Quantenphysik, ionisierende Strahlung, optisch stimulierte Lumineszenz

Medien: Texte, Bilder, digitale Medien, Internet

Auf einen Blick

1.–8. Stunde

Thema: Röntgenröhre und Röntgenaufnahme – physikalische Grundlagen zum Verständnis

- M 1 Erzeugung und Beschleunigung von Elektronen
- M 2 Erzeugung von Röntgenstrahlung
- M 3 Röntgenbild = Schattenbild
- M 4 Wechselwirkung zwischen Röntgenstrahlung und Materie

9.–12. Stunde

Thema: Die Röntgenröhre und ihr Betrieb

- M 5 Praktischer Aufbau und Betrieb einer Röntgenröhre
- M 6 Das Strom-Zeit-Produkt

13./14. Stunde

Thema: Sichtbarmachung und Speicherung einer Röntgenaufnahme

- M 7 Speicherfolie – Aufbau und Funktionsweise

15./16. Stunde

Thema: Linearbeschleuniger

- M 8 Erzeugung ultraharter Röntgenstrahlung

17./18. Stunde

Thema: Lernerfolgskontrolle

- M 9 Testen Sie Ihr Wissen!

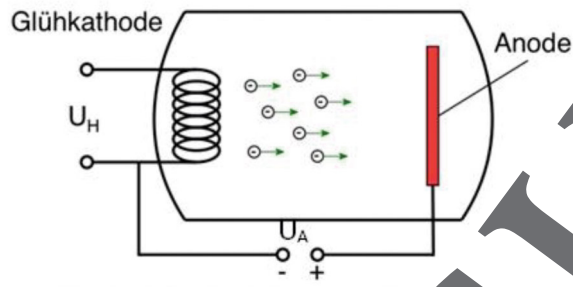
Minimalplan

Die Unterrichtseinheit ist für insgesamt 18 Stunden ausgelegt. Bei Zeitmangel können die Materialien **M 6** (Das Strom-Zeit-Produkt), **M 7** (Speicherfolie), **M 8** (Erzeugung ultraharter Röntgenstrahlung) und **M 9** (Testen Sie Ihr Wissen!) ausgelassen werden.

Erzeugung und Beschleunigung von Elektronen

M 1

Die nebenstehende Abbildung zeigt das Grundprinzip der **Erzeugung** und **Beschleunigung** von Elektronen:



© 2021 Physikunterricht-Online.de

- Eine wendelförmige Kathode wird dank der anliegenden **Heizspannung** U_H (typischerweise 10 bis 20 V) und des daraus resultierenden **Heizstroms** I_H so stark erhitzt (teilweise bis 2000 °C), dass Elektronen aus der (negativ geladenen) Kathode austreten (**Glühemission**). Die Kathode wird daher auch **Glühkathode** genannt. Eine Glühkathode sollte eine hohe Schmelztemperatur und eine geringe Austrittsarbeit (für Elektronen) besitzen. Bewährt haben sich Wolfram-Kathoden, die teilweise mit einer Bariumoxid-Schicht überzogen sind.
 - Die freigesetzten Elektronen werden wegen des elektrischen Feldes zwischen der negativen Kathode und der positiven Anode in Richtung der Anode beschleunigt. Unter den Annahmen,
 - dass die Elektronen mit einer vernachlässigbar kleinen Geschwindigkeit aus der Glühkathode austreten und
 - dass die Elektronen sich zwischen Kathode und Anode ungestört bewegen können (Vakuum)
 hat ein Elektron beim Erreichen der Anode die **kinetische Energie** $E_{\text{kin}} = eU_A$ (1)
- U_A ist die **Beschleunigungsspannung** und e die **Elementarladung**.

Beispiel

Durchläuft ein Elektron mit einer Startgeschwindigkeit $v_0 = 0$ eine Spannung von $U_A = 40 \text{ kV}$, so hat es eine kinetische Energie von $E_{\text{kin}} = eU_A = e \cdot 40 \text{ kV} = 40 \text{ keV}$.

Frage

Welche Geschwindigkeit erreicht ein Elektron mit einer Startgeschwindigkeit $v_0 = 0$, das eine Beschleunigungsspannung $U_A = 2,0 \text{ kV}$ durchlaufen hat?

Lösung

Mit der Formel $E_{\text{kin}} = \frac{mv^2}{2}$ (2)

folgt mit (1) $\frac{1}{2} eU_A$ und damit $v = \sqrt{\frac{2eU_A}{m}}$. (3)

Mit der Elementarladung $e = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ und der Elektronenmasse $m = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ ergibt

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 2000 \text{ V}}{9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}}} = 2,7 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Speicherfolie – Aufbau und Funktionsweise

M 7

Das mithilfe von Röntgenstrahlung erzeugte Schattenbild (siehe Material M 3) wurde früher mithilfe silberhalogenid-basierter **fotografischen Platten** sichtbar gemacht und gespeichert. Das Schattenbild ruft in den Platten eine **latentes** (verborgenes) **Bild** hervor, das durch einen **Entwicklungsprozess** sichtbar und durch **Fixierung** haltbar gemacht wird. Die entwickelte Platte heißt **Negativ**, da Schattenbereiche hell und die bestrahlten Bereiche dunkel erscheinen. Diese Technik wird heute kaum mehr angewendet. Heute haben sich Speicherfolien durchgesetzt, die auf dem Prinzip der **optisch stimulierten Lumineszenz** basieren.

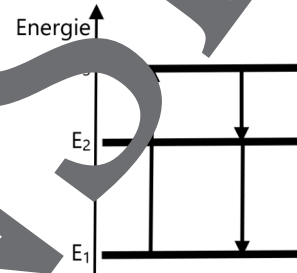


© ER Productions Limited/DigitalVision

Lumineszenz

Bei der **Lumineszenz** kommt es zur Umwandlung von energie-reicheren Photonen (z. B. UV-Licht) in energieärmere Photonen (z. B. sichtbares Licht). Dieses Phänomen wird an dem nebenstehend skizzierten (stark vereinfachten) Termschema erläutert:

- Ein Photon mit der Energie $E_3 - E_1$ wird von einem Festkörper absorbiert. Der Festkörper geht dabei vom Grundzustand mit der Energie E_1 in den angeregten Zustand mit der Energie E_3 über.
 - Dann geht der Festkörper unmittelbar strahlungslos (d.h. ohne Emission eines Photons) in den Zwischenzustand mit der Energie E_2 über.
 - Schließlich geht der Festkörper vom Zwischenzustand E_2 in den Grundzustand E_1 über. Dabei wird ein Photon mit der Energie $E_2 - E_1$ abgestrahlt. Diese Photonen bilden das **Lumineszenzlicht**.
- Findet die Lumineszenz sehr rasch nach der Energieaufnahme statt ($\leq 10^{-8}$ s), so spricht man auch von **Fluoreszenz**. Ist die Dauer zwischen Energieaufnahme und Abstrahlung des Lichts länger ($> 10^{-8}$ s), so wird die Lumineszenz auch als **Phosphoreszenz** bezeichnet.



Skizze: Axel Donges

Optisch stimulierte Lumineszenz (OSL)

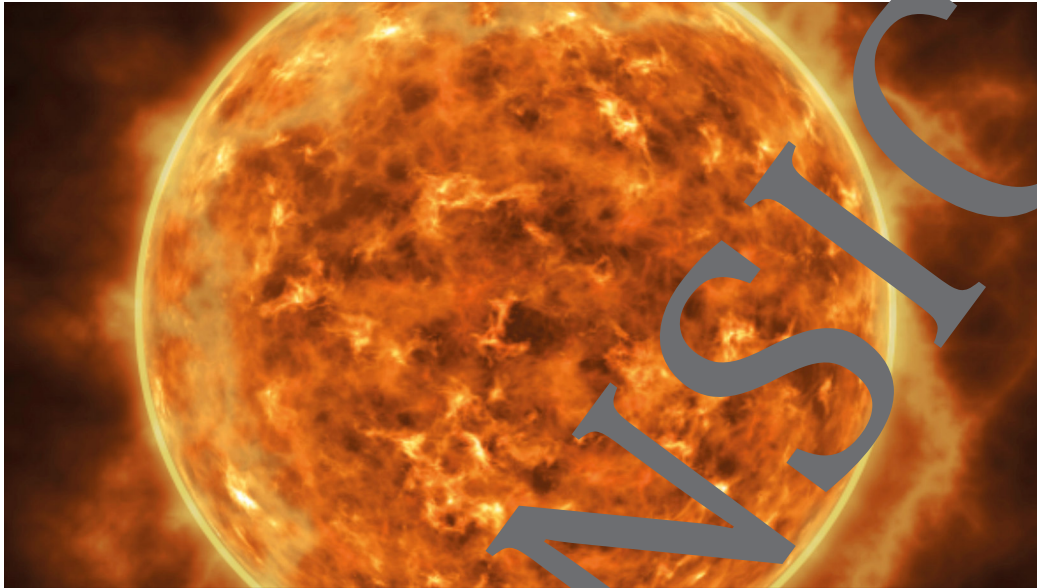
- Wir betrachten den Fall, dass Röntgenstrahlung auf einen Festkörper fällt. Dadurch geht der Festkörper vom Grundzustand E_1 über den angeregten Zustand E_3 in den Zwischenzustand E_2 . Dieser Zustand hat nur eine sehr große Lebensdauer, so dass der Festkörper im Zustand E_2 verharren kann.
- Man bezeichnet den Zustand E_2 als **Falle**, da der Festkörper diesen Zustand „aus eigener Kraft“ nicht mehr verlassen kann.
- Wird dem Festkörper allerdings Energie in Form von Wärme oder Licht zugeführt, so kann er den Zustand E_2 verlassen und in den Grundzustand E_1 zurückkehren. Dabei wird **Lumineszenzlicht** emittiert. Man spricht von **optisch stimulierter Lumineszenz (OSL)**, wenn der Übergang von E_2 nach E_1 mit Licht ausgelöst wird. Anderenfalls liegt **Thermolumineszenz** vor.

II.H.8

Astronomie

Die Rotation der Sonne und anderer Sterne

Matthias Borchardt



© RAABE

© amynapaloha/iStock/Getty Images Plus

Ihre Schülerinnen und Schüler bestimmen die Rotationsgeschwindigkeit der Sonne mithilfe der Rot- und Blauverschiebung von Spektrallinien des rechten und linken Sonnenrandes, wobei auch die differenzielle Rotation der Sonne thematisiert wird. Sirius ist der schnellste Stern am Nachthimmel. Seine Spektrallinien zeigen eine deutliche Verbreiterung, die vor allem durch seine Rotation bedingt wird, was eine interessante Möglichkeit eröffnet, die Drehgeschwindigkeit des Sterns abzuschätzen. Im Weiteren wird das Rotationsverhalten zweier spektroskopischer Doppelsternsysteme näher untersucht. Eine Lernerfolgskontrolle rundet das Thema ab.

KOMPETENZ

Klassenstufe: Sek. II

Dauer: 5 Unterrichtsstunden (Minimalplan: 4–5 Unterrichtsstunden)

Kompetenz: Auswertung von Spektren, Herleitung, Umformung und Anwendung von Formeln, Interpretation und fachliche Einordnung von Ergebnissen

Inhalt: Optischer Dopplereffekt, Bestimmung astronomischer Geschwindigkeiten über Blau- und Rotverschiebung von Spektrallinien, Linienverbreiterung durch Temperatur und Rotation, Eigenschaften von Doppelsternsystemen, spektroskopische Doppelsterne

Medien: Diagramme, Grafiken, Taschenrechner, Internet

Auf einen Blick

1.–4. Stunde

Thema:	Die Rotation der Sonne
M 1	Rot- und Blauverschiebung von Spektrallinien
M 2	Die Rotationsgeschwindigkeit der Sonne
M 3	Die differenzielle Rotation der Sonne
M 4	Die Dopplerverbreiterung der Spektrallinien

5. Stunde

Thema:	Die Rotation von Sirius
M 5	Die Rotationsgeschwindigkeit des Sterns Sirius

6.–9. Stunde

Thema:	Spektroskopische Doppelsterne
M 6	Die Umarmung des Doppelsternsystems β -Aurigae
M 7	Weitere Parameter des Doppelsternsystems β -Aurigae
M 8	Testen Sie Ihr Wissen – Lernerfolgskontrolle

Minimalplan

Für einen Minimalplan sind die Materialien **M 1**, **M 2**, **M 5** und **M 6** geeignet.

Rot- und Blauverschiebung von Spektrallinien

M 1

Betrachtet man das Spektrum des Sonnenlichts genauer, fallen sehr feine dunkle Linien auf, die das Spektrum senkrecht durchsetzen. Diese Linien wurden erstmals von dem Optiker und Fernrohr-Konstrukteur *Joseph Fraunhofer* (1787–1826) entdeckt und werden daher *Fraunhoferlinien* genannt. Es handelt sich dabei um Absorptionslinien, die beim Durchgang des Sonnenlichts durch die Atmosphären der Sonne und der Erde entstehen.



Originalzeichnung von Fraunhofer 1815, © Wikimedia Commons

Aufgabe 1

Recherchieren Sie mithilfe Ihres Physikbuchs oder des Internets, woher die Absorptionslinien im Spektrum der Sonne und in den Spektren anderer Sterne entstehen.

Aufgabe 2

Mithilfe dieser Linien lässt sich die Rotationsgeschwindigkeit der Sonnenoberfläche (Photosphäre) bestimmen. Dazu nutzt man den **Dopplereffekt**. Klären Sie, was man unter dem Dopplereffekt bei Licht sowie der Rot- und Blauverschiebung von Spektrallinien versteht.

Um die Rotationsgeschwindigkeit der Sonnenoberfläche mithilfe des Dopplereffekts zu bestimmen, nimmt man ein Spektrum des Sonnenlichts vom linken und eines vom rechten Rand der Sonne auf, wobei der Beleuchtungswinkel des Spektrographen entsprechend der unteren Abbildungen positioniert wird.



© Abbildung: Matthias Borchardt

M 3

Die differenzielle Rotation der Sonne

Wie lange benötigt die Sonne im Bereich ihres Äquators für eine Umdrehung?



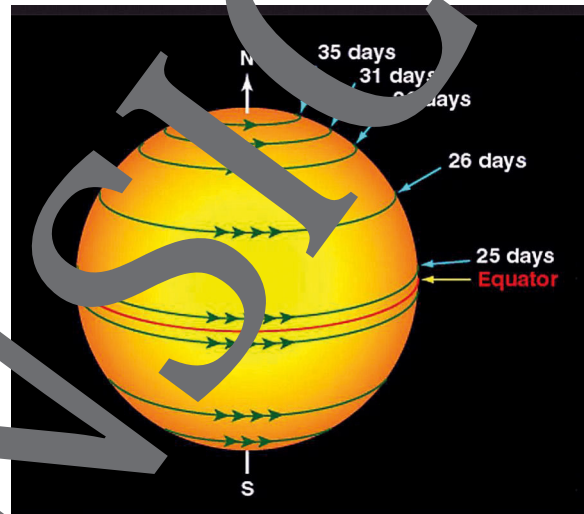
Aufgabe 1

a) Die Umlaufdauer T ergibt sich aus der Formel $T = \frac{2\pi \cdot R_{\text{Sonne}}}{v_{\text{Rotation}}}$. Begründen Sie diese Formel.

b) Der Radius der Sonne am Äquator beträgt $R_{\text{Sonne}} = 696.342 \text{ km}$. Berechnen Sie die Umlaufdauer T und geben Sie das Ergebnis in Tagen an.

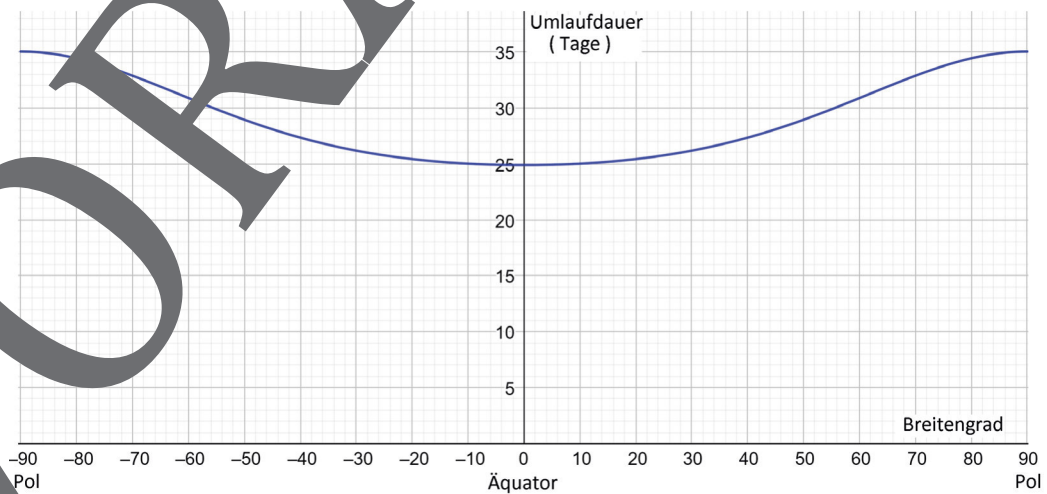
Hinweis: Sie können den Radius in km und die Rotationsgeschwindigkeit in km/s einsetzen. Dann erhalten Sie die Umlaufzeit in Sekunden, was Sie dann noch in Tage umrechnen müssen.

Sie müssten bei Aufgabe 1 als Ergebnis etwa 25 Tage für die Umlaufzeit der Sonne am Äquator erhalten haben. Dieser Wert gilt erstaunlicherweise aber nicht für andere Regionen der Sonnenoberfläche. Die folgenden beiden Abbildungen zeigen, dass die Umlaufzeit steigt, je näher man den Polen der Sonne kommt. Dieses Phänomen wird in der Astronomie auch „Differenzielle Rotation“ genannt und erklärt sich durch die Beschaffenheit der Sonnenkugel. Diese ist nämlich kein fester starrer Körper, sondern besteht aus einem sehr heißen Plasma – einer Art Flüssigkeit unter extremsten Bedingungen: Im Inneren der Sonne herrschen Temperaturen von mehreren Millionen Grad, während es auf der Sonnenoberfläche „nur“ 6000 Grad sind. Durch diesen enormen Temperaturunterschied kommt es zu starken Verwirbelungen und zu bremsenden Effekten innerhalb der Sonnenkugel.



© Abbildung: NASA

© RAABE



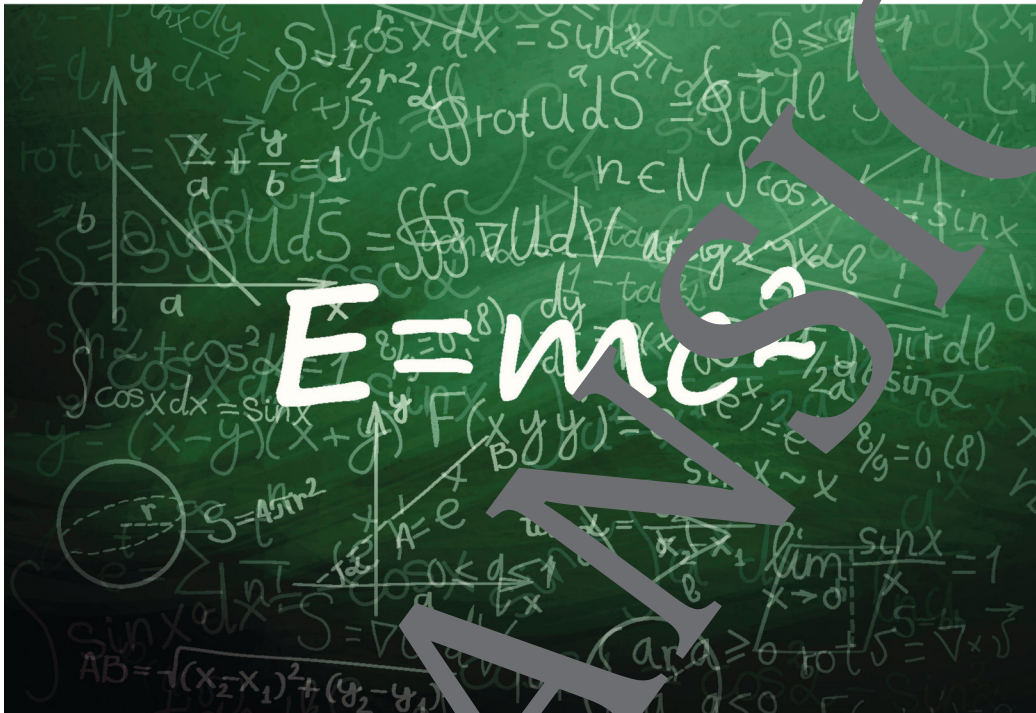
© Abbildung: Matthias Borchardt

II.G.4

Relativitätstheorie

Einstein auf dem Prüfstand – Experimente zur Relativitätstheorie

Matthias Borchardt



Zeitdilatation, Massenzunahme und die Äquivalenz von Energie und Masse – die Vorhersagen der Relativitätstheorie scheinen absurd und dem gesunden Menschenverstand zu widersprechen. In den letzten Jahrzehnten wurden daher zahlreiche Experimente durchgeführt, um diese theoretischen Aussagen zu beweisen. Ihre Schülern und Schüler bearbeiten in dieser Einheit einige der Experimente, die sich im Unterricht als didaktisch besonders geeignet erwiesen haben.

KOMPETENZPROFIL

Klassenstufe: 9. bis 11. Klasse

Dauer: ca. 8 Unterrichtsstunden

Kompetenzen: Auswertung und Interpretation von Versuchsdaten, Anwendung von bekanntem Wissen, Umgang mit Formeln, Beurteilung und Einordnung von experimentellen Ergebnissen bezüglich theoretischer Vorhersagen

Inhalt: Effekte der Relativitätstheorie: Eigenschaften der Lichtgeschwindigkeit, Zeitdilatation, Massenzunahme, Zusammenhang von Energie und Impuls in der Relativitätstheorie

Medien: Arbeitsblätter, Diagramme, Taschenrechner, Internet, Computersimulation

Auf einen Blick

Hinweis: Die einzelnen Materialien sind für etwa eine Unterrichtsstunde (45 Minuten) konzipiert, die Reihenfolge kann variiert werden.

1. Stunde

Thema: Eine kleine Formelsammlung

M 1 Der Werkzeugkasten – Formeln der speziellen Relativitätstheorie

2. Stunde

Thema: Unabhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit

M 2 Das zweite Postulat der speziellen Relativitätstheorie

3. Stunde

Thema: Schneller als Licht geht nicht

M 3 Die Lichtgeschwindigkeit als Grenzggeschwindigkeit

4. Stunde

Thema: Die Zeitdilatation bei Teilchen der kosmischen Strahlung

M 4 Schnelle Teilchen leben länger – Myonen der kosmischen Strahlung

5. Stunde

Thema: Die Zeitdilatation im Teilchenbeschleuniger

M 5 Schnelle Teilchen leben länger – Myonen im Speicherring

Benötigt: Internet

6. Stunde

Thema: Die relativistische Massenzunahme

M 6 Je schneller, desto träger

7. Stunde

Thema: Die relativistische Energie-Impuls-Beziehung

M 7 Energie und Impuls in der Relativitätstheorie

8. Stunde

Thema: Effekte der Relativitätstheorie in der Nähe eines Schwarzen Lochs

M 8 Rasante Kurvenfahrt ums Schwarze Loch

M 8a Raumkrümmung durch Gravitation und Schwarzes Loch

Benötigt: Computersimulation (Internet)

Das zweite Postulat der speziellen Relativitätstheorie

M 2

Albert Einstein ist gerade mal 26 Jahre alt, als er 1905 drei Arbeiten veröffentlicht, die sich als absolut bahnbrechend für die moderne Physik erweisen sollen. Eine dieser Veröffentlichungen trägt den etwas unscheinbaren Titel „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ und bildet das Fundament der speziellen Relativitätstheorie (SRT). Interessanterweise beginnt Einstein seine Ausführungen mit zwei Setzungen (Postulaten), auf die sich alle weiteren seiner theoretischen Herleitungen strikt beziehen. **Die erste Annahme** lautet: „Alle Inertialsysteme sind bezüglich aller physikalischen Gesetze gleichberechtigt.“



Das zweite Postulat formuliert Einstein 1905 selbst wie folgt:

„Wir wollen außerdem die Voraussetzung einführen, dass sich das Licht im leeren Raume stets mit einer bestimmten, vom Bewegungszustande des emittierenden Körpers unabhängigen Geschwindigkeit V fortpflanzt.“

Das bedeutet: Egal wie schnell sich der Lichtsender selbst bewegt – die Geschwindigkeit des von ihm ausgesendeten Lichts weist im luftleeren Raum stets den Wert V auf.

Diese Aussage steht im krassen Widerspruch zur klassischen Physik, die eine direkte Addition der beiden Geschwindigkeiten vorhersagt. Erst viele Jahrzehnte nach der Veröffentlichung der neuen Theorie waren die technischen Voraussetzungen gegeben, Experimente zur Bestätigung dieser scheinbar kuriosen Behauptung durchzuführen.

Das Experiment

Eines dieser Experimente wurde 1964 von einem Team um den schwedischen Physiker Torsten Alväger am CERN-Protonen-Synchrotron durchgeführt^{1,2}. Die Versuchsanordnung ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt. Aufgrund des Funktionsprinzips eines Synchrotrons kann dieser Teilchenbeschleuniger keinen kontinuierlichen Teilchenstrahl erzeugen. Vielmehr werden die Protonen in konstanten zeitlichen Abständen bündelweise („Bunches“) beschleunigt. Diese hochenergetischen Protonen-Bunches treffen auf ein dünnes Beryllium-Ziel und erzeugen dort kurzlebige neutrale Pionen (π^0 -Mesonen), die sich mit einer Geschwindigkeit von 99,975 % der Lichtgeschwindigkeit tangential zum Synchrotron fortbewegen. Diese fast lichtschnellen Pionen zerfallen nach einer sehr kurzen Strecke in Gammaquanten – hochenergetische Photonen mit einer Energie von etwa 6 GeV (Gigaelektronenvolt). Die Geschwindigkeit dieser Photonenbündel lässt sich dann mithilfe zweier Detektoren, die sich in einem festen Abstand zueinander befinden, bestimmen.

Die erzeugten Pionen sind also bei diesem Experiment die Lichtsender, die sich selbst nahezu mit Lichtgeschwindigkeit bewegen. Sollte das zweite Postulat Einsteins Gültigkeit haben, dann müssten sich die Photonen mit der einfachen Lichtgeschwindigkeit bewegen, während die klassische Physik ihnen fast doppelt so großen Wert vorhersagt.

1 Einstein verwendete damals für die Lichtgeschwindigkeit den großen Buchstaben V .

2 T. Alväger, F.J.M. Farley, J. Kjellman, L. Wallin, *Test of the second postulate of special relativity in the GeV region*, Physics Letters, 12(3), S.260–262 (1964).

Versuchsdurchführung:

Die Messungen wurden zunächst in der Bergstation eines der höchsten Berge Schottlands durchgeführt, dem „Cairn Gorm Mountain“. Die Station liegt 1021 Meter höher als das Labor in der Universität zu Edinburgh, wo die zweite Messung vorgenommen wurde. Für den Nachweis der Teilchen wurde ein empfindlicher Szintillator-Detektor mit nachgeschaltetem Photomultiplier und moderner Auswerteelektronik verwendet. Bevor die Myonen das Szintillatormaterial erreichen konnten, mussten sie eine Schicht aus Stahlplatten (fast 50 cm) durchlaufen. So konnte die Geschwindigkeit der Myonen bei Eintritt in den Detektor zu $v/c = 0,985$ geschätzt werden.

**Die Versuchsergebnisse:**

Mittlere Zählrate in der Bergstation von Cairn Gorm:

81 Myonen pro Stunde.

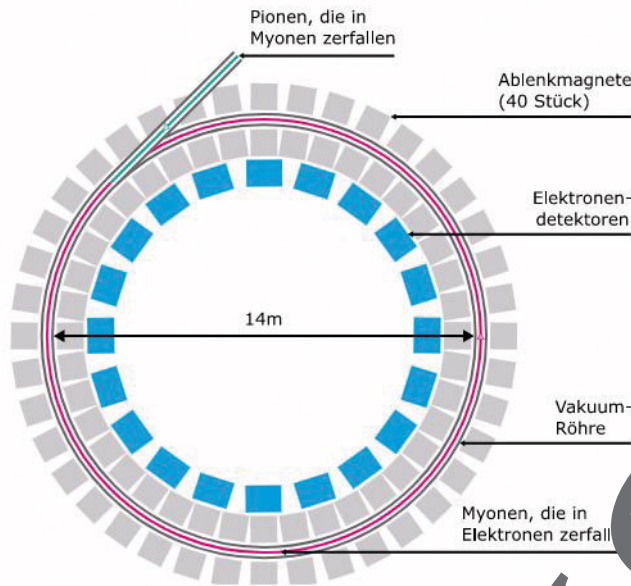
Mittlere Zählrate im Labor der Universität Edinburgh:

51 Myonen pro Stunde.

Aufgaben

- Berechnen Sie die Zeit, welche die Myonen benötigen, um die 1021 m Strecke zurückzulegen. Verwenden Sie $v/c = 0,985$.
- Berechnen Sie, welche Zählrate sich im tiefer gelegenen Labor erwarten lassen, wenn man von einer Zählrate von 81/h auf dem Cairn Gorm ausgeht. Die Halbwertszeit von $T_H = 1,52 \mu\text{s}$ ausginge. Verwenden Sie das bekannte Zerfallsgesetz $N(t) = N_0 \cdot e^{-\frac{\ln 2}{T_H} t}$.
- Nehmen Sie an, die Lebensdauer der Myonen hätte sich aufgrund der relativistischen Zeitdilatation verlängert. Berechnen Sie die (neue) Halbwertszeit der relativistischen Myonen mithilfe der Formel für die Zeitdilatation.
- Berechnen Sie mit der gedehnten Halbwertszeit und dem Zerfallsgesetz, welche Zählrate für die relativistischen Myonen in Edinburgh theoretisch (also nach der Vorhersage der Relativitätstheorie) zu erwarten ist.
- Bewerten Sie die Ergebnisse in Bezug auf die Hypothese, dass sich die Lebensdauer der Myonen aufgrund ihrer Geschwindigkeit verlängert haben könnte.
Hinweis: Bei Ihren Überlegungen, dass die Zählraten vermutlich durch „unerwünschte Myonen“ verfälscht wurden. Wahrscheinlich hängt dies mit einer ungünstigen Dimensionierung der Stahlplatten, welche die Myonen abbremsen sollten, zusammen. Die Details sollen hier nicht weiter ausgeführt werden, aber Sie können davon ausgehen, dass auf dem Berg mehr „unerwünschte Myonen“ registriert wurden, als im Tal, oben die Zählrate also etwas höher ausgefallen ist.

Myonen. Dennoch bleiben sie nicht auf der Kreisbahn, sondern verlassen den Ring rasch nach innen, wo zahlreiche Detektoren für deren Nachweis bereitstehen. Erklären Sie, warum die beim Zerfall der Myonen entstandenen Elektronen die Kreisbahn so schnell nach innen verlassen, obwohl sie die gleiche Ladung und Geschwindigkeit wie die Myonen besitzen.



4. Während die Myonen im Speicherring mit einer Geschwindigkeit von $v = 0,99942 \cdot c$ kreisen, wurde die Anzahl der Zerfälle gemessen, was sich in der oberen Kurve zeigt. Die untere Kurve zeigt die Ergebnisse. Bestimmen Sie mit Hilfe des Diagramms die „neue“ Halbwertszeit der Myonen.

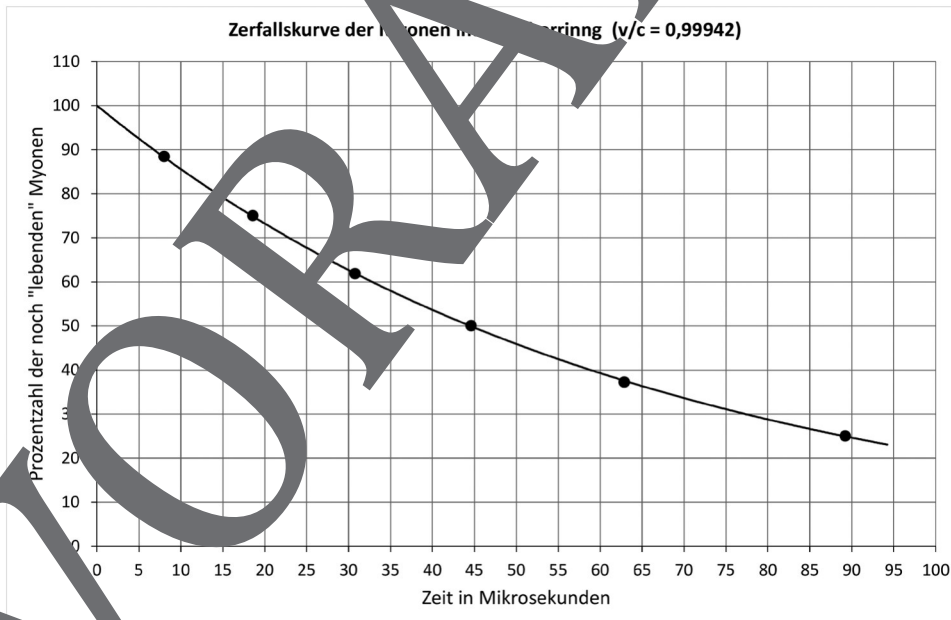
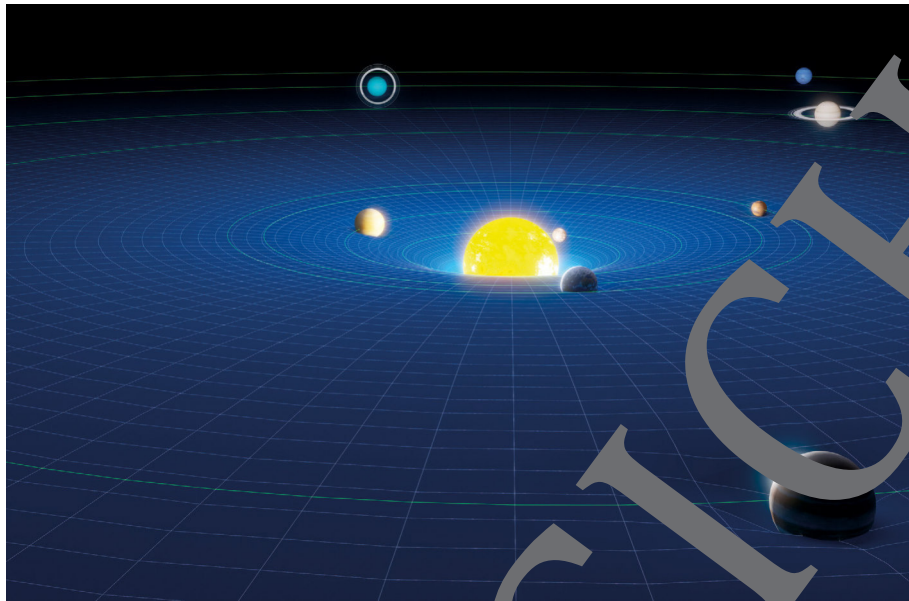


Abbildung 10.10 von J. Borchardt

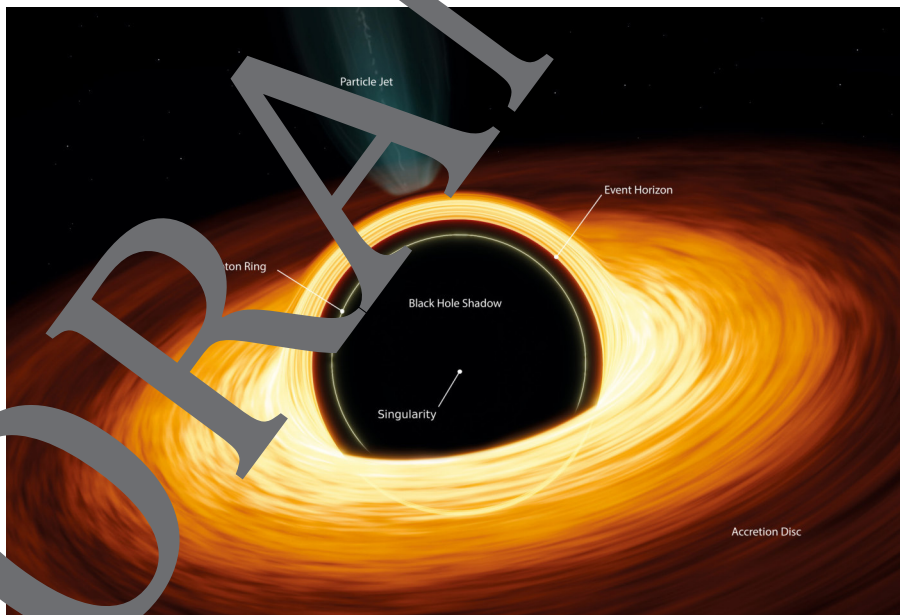
M 8a

Raumkrümmung durch Gravitation und Schwarzes Loch



© MARK GARLICK/SCIENCE PHOTO LIBRARY/Getty Images

Hier wird grafisch dargestellt, wie die Raumzeit durch das Sonnensystem nach der allgemeinen Relativitätstheorie gekrümmt wird. Die Masse der Planeten und der Sonne bewirkt eine Verformung der Raumzeit. In diesem Bild erzeugt die Sonne im Zentrum, die die größte Masse hat, eine Verformung der Raumzeit, die die Planeten umflusst.



© MARK GARLICK/SCIENCE PHOTO LIBRARY/Getty Images

Diese Illustration der Struktur eines Schwarzen Lochs mit einer Singularität im Zentrum zeigt Umgebungsmaterie, die angezogen wird und eine Akkretionsscheibe bildet. Der Ereignishorizont ist der Punkt, über den hinaus nicht einmal Licht entweichen kann. Ein Teil der überhitzten Materie wird in einem hochenergetischen Teilchenstrahl herausgeschleudert und Photonen werden in einer Umlaufbahn gefangen und bilden einen Photonring oder eine Photonenkugel.