

1 Atome

Ziel des Lehrplanabschnitts „Ph 9.2 Atome“ ist es, das Teilchenbild, das in der Jahrgangsstufe 5 angelegt und in den Jahrgangsstufen 7 und 8 fortgeführt wurde, zu festigen und zu präzisieren. Die Schüler erfahren dabei grundlegende, allgemeinbildende Zusammenhänge zum Aufbau der Atome.

Durch diesen Anspruch unterscheiden sich die Unterrichtskonzepte, die zur Anwendung kommen sollen, grundlegend von Konzepten zum gleichen Thema im Rahmen des bisherigen Kollegstufenunterrichts. So wird das Atom als System erfasst, das diskrete Energieniveaus besitzt – eine Tatsache, die sich über die Spektroskopie direkt aus dem Experiment erschließen lässt. An eine fundierte Deutung dieses Sachverhalts ist in dieser Jahrgangsstufe nicht gedacht, lediglich um eine phänomenologische Beschreibung. Dies bedeutet gleichzeitig, dass auf das Bohr'sche Atommodell bzw. Planetenbahnmodell verzichtet wird, was eine deutliche Reduktion der Mathematik nach sich zieht.

Nicht zu jedem Lehrplaninhalt lassen sich im Unterricht geeignete Experimente durchführen. Hier ist es sinnvoll, auf Analogieexperimente und Simulationen zurückzugreifen. Überall wo Experimente durch Schüler selbst durchgeführt werden können, sollte die Chance für die Selbsttätigkeit auch genutzt werden.

Am Beginn stehen grundlegende Experimente zur Abschätzung der Größe von Atomen und Atomkernen. Hierzu werden als bekannte Experimente der Ölfleckversuch sowie eine Simulation zum Rutherfordexperiment vorgeschlagen. Im Anschluss erfahren die Schüler, dass Protonen und Neutronen ihrerseits aus Quarks aufgebaut sind. So lernen sie ein einfaches aber aussagekräftiges Modell zum Aufbau der Materie kennen, nach dem unsere gesamte Materie aus drei verschiedenen Teilchen besteht, die nach momentanem Kenntnisstand keine innere Struktur besitzen.

Ein didaktisch anspruchsvoller Themenbereich ist die Aufnahme und Abgabe von Energie durch Atome. Hier wird ein Einstieg über die Beobachtung optischer Emissionsspektren empfohlen. Die Interpretation durch diskrete Energieänderungen in der Atomhülle folgt. Anschließend wird die Aufnahme von Energie in analoger Weise erklärt. Schließlich wird das Wissen um die Energieabgabe bzw. -aufnahme beim Übergang zwischen Energieniveaus auf die Röntgenstrahlung und ihr diskretes Spektrum übertragen und angewandt. Dabei kommt eine sinnvolle Darstellung der betreffenden Zusammenhänge nicht ohne das Konzept der Photonen aus.

In der Unterrichtssequenz über Atomkerne bekommen die Schüler zunächst einen Überblick über die grundlegenden Eigenschaften radioaktiver Strahlung. Auch einfache Modellvorstellungen zum radioaktiven Zerfall lernen sie kennen. Anhand einer Analogiebetrachtung – ein einfaches Würfelexperiment, das auch als Simulation durchgeführt werden kann – lernen sie, dass der radioaktive Zerfall ein Paradebeispiel für ein Zufallsexperiment ist und sich der Begriff der Halbwertszeit aus dieser Erkenntnis von selbst ergibt. Bei der quantitativen Erfassung ist eine Beschränkung auf den Umgang mit Diagrammen und ganzzahligen Vielfachen der Halbwertszeit sinnvoll und ausreichend, wobei die Schüler am Beispiel der C 14-Methode lernen, wie man den radioaktiven Zerfall zur Altersbestimmung nutzen kann.

Biologische Strahlenwirkung, Strahlenschutz und die Nutzung der Radioaktivität in der Technik sind Inhalt weiterer Unterrichtseinheiten. Schließlich lernen die Schüler im Rahmen von Kernumwandlungen die berühmte Einstein'sche Formel $E = m c^2$ kennen und schätzen mit ihrer Hilfe einige Energiebeträge ab, die bei den wichtigsten Kernumwandlungsprozessen wie der Verschmelzung von vier Wasserstoffatomen zu einem Heliumatom im Inneren der Sonne und der Spaltung eines Uran 235-Kerns in einem Kernreaktor frei werden.

1.1 Bestimmung des Atomdurchmessers – Ölfleckversuch

Lernziele

Die Schüler ...

- können den Ölfleckversuch und seine Auswertung beschreiben;
- kennen die Größenordnung des Atomdurchmessers.

Didaktische Hinweise

Der Ölfleckversuch erlaubt es, mit einfachen Mitteln und mit den mathematischen Kenntnissen, die ein Schüler der 9. Jahrgangsstufe besitzt, die Größenordnung des Atomdurchmessers abzuschätzen. Er kann als Schülerexperiment durchgeführt werden, wofür dann insgesamt zwei Unterrichtsstunden für dieses Thema vorgesehen werden müssen. Die rechnerische Auswertung kann dadurch erleichtert werden, dass eine vorangehende gemeinsame Besprechung im Lehrer-Schüler-Gespräch stattfindet, in der das Prinzip des Experiments und die Überlegungen und Näherungen zur Abschätzung von d_{Atom} besprochen werden. Im Zentrum der Besprechung steht der Begriff „monomolekulare Schicht“ (ggf. kann man mit einer Menge Kugeln ein makroskopisch-mechanisches Analogieexperiment vorführen) und die Abschätzung des Durchmessers eines Atoms als Baustein einer sehr dünnen Schicht.

Hinweise zum Experiment

Ölsäure bildet auf einer Wasseroberfläche eine sehr dünne Schicht. Sie breitet sich auf der Wasseroberfläche in alle Richtungen aus. Die Grenze dieser Ausbreitung – sofern keine Barriere im Weg steht – ist nur dadurch gegeben, dass der entstehende Ölsäurefilm nicht abreißt, sondern eine geschlossene Fläche bildet. Die Folge dieses Verhaltens ist, dass eine Schicht entsteht, die nur aus einer Lage an Molekülen besteht, eine so genannte monomolekulare Schicht.

Streut man auf die Wasseroberfläche vor dem Aufbringen eines Ölsäuretröpfchens ein wenig Pulver (z. B. Bärlappsporen, Schwefelpulver), so ist der Rand des sich ausbreitenden Ölsäurefilms gut erkennbar, da das Pulver vom Ölsäurefilm beiseite geschoben wird. Der Flächeninhalt kann nun entweder durch Abschätzen mittels eines darüber gehaltenen karierten Papiers geschehen oder durch Berechnung der Kreisfläche aus dem Durchmesser, sofern sich eine annähernd kreisförmige Fläche ausbildet (was meist der Fall ist).

Um eine Fläche zu erhalten, die gut erfassbar ist (typische Größe: 50 bis 100 cm²), muss die aufzubringende Ölsäuremenge sehr klein sein. Selbst ein kleines Ölsäuretröpfchen wäre hierfür bereits zu groß. Man verwendet daher im Experiment eine Mischung aus Ölsäure und einer leicht flüchtigen Flüssigkeit (Leichtbenzin) etwa im Verhältnis 1 : 1 000. Nach dem Aufbringen bleibt nach kurzer Zeit lediglich die Ölsäure zurück. Aus dem bekannten Mischungsverhältnis und der Bestimmung des Gesamtvolumens eines Tröpfchens der Mischung (aus der Anzahl der Tröpfchen, die in 1 cm³ passt) kann dann das aufgebrachte Ölsäurevolumen berechnet werden.

Der Zusammenhang zwischen dem Volumen V der aufgebrachten Ölsäure, dem Inhalt A der Fläche des Ölsäurefleckes und der Dicke h der monomolekularen Schicht lautet:

$$V = h \cdot A \quad \text{bzw.} \quad h = V : A.$$

Um den Durchmesser eines der Atome abzuschätzen, aus denen das Ölsäuremolekül aufgebaut ist, macht man die folgenden groben, aber plausiblen Näherungen: Die Atome der Moleküle in der monomolekularen Schicht sind dicht gepackt, gleich groß und kugelförmig. Bezieht man die Überlegung nun auf Ölsäuremoleküle mit je mit 54 Atomen, so bilden in et-

wa vier Atome die Kantenlänge eines Würfels, der diese Anzahl an Atomen enthält ($4^3 = 64$ bzw. $3,78^3 \approx 54$). Die Schichtdicke entspricht also etwa vier Atomdurchmessern.

Rechts sieht man das Material für eine Übung mit Schülern abgebildet: Verdünnte Ölsäure im Glasgefäß, Tropfer, Teller, Bärlappsporen in Streubehälter und Glas voll Holzperlen für die analoge Darstellung der monomolekularen Schicht.

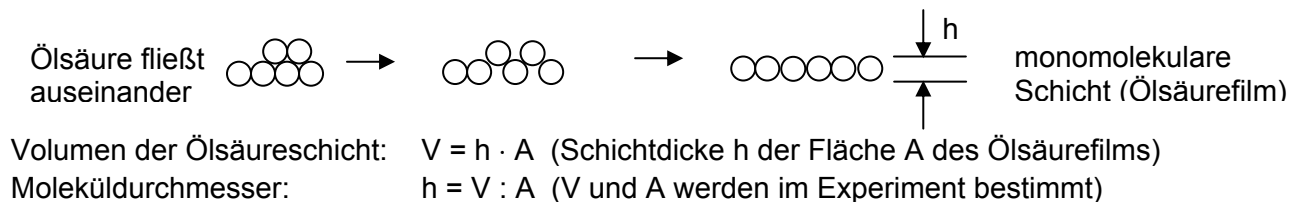


Literatur und Medien

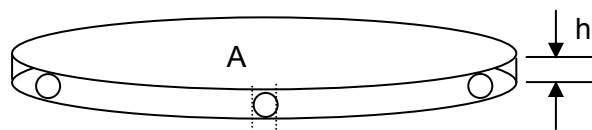
Eine ausführliche Beschreibung des Experiments findet man unter [www_Ölfleck/leifi].

Unterrichtsinhalte

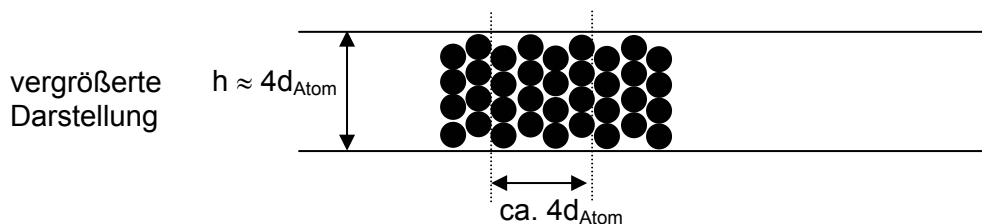
Ein kleines Ölsäurevolumen bildet auf einer Wasseroberfläche einen dünnen Film, der nur aus einer Lage an Molekülen besteht, eine so genannte monomolekulare Schicht. Die Schichtdicke ist gleich dem Moleküldurchmesser.



Ölsäureschicht:
Volumen $V = h \cdot A$



Vereinfachende Annahmen: Das Ölsäuremolekül bestehe aus 54 gleich großen, dicht gepackten, kugelförmigen Atomen. Eine grobe, aber plausible Abschätzung ist, dass der Moleküldurchmesser bei 54 Atomen pro Molekül etwa aus 4 Atomdurchmessern zusammengesetzt ist ($4^3 = 64$ bzw. $3,78^3 \approx 54$).



Auswertung

Ölsäureanteil in einem Tropfen des Gemischs:

$$V_{\text{Öls}} = 1/1000 \cdot V_{\text{Tropfen}}$$

Dicke der monomolekularen Schicht:

$$h = V_{\text{Öls}} : A$$

Abschätzung Atomdurchmesser:

$$d_{\text{Atom}} \approx h : 4$$

Diese einfache Abschätzung liefert die richtige Größenordnung des Atomdurchmessers: einige $10^{-10} \text{ m} = 0,000\,000\,000\,1 \text{ m} = 1 \text{ Zehnmilliardstel meter}$.

Würde man 10 Millionen Atome nebeneinander aufreihen, so ergäbe sich eine Kette der Länge von nur 1 mm!

1.2 Das Rutherfordsche Streuexperiment

Lernziele

Die Schüler ...

- wissen, dass Streuung z. B. makroskopisch-mechanisch oder mikroskopisch-elektrostatisch stattfinden kann;
- wissen, dass die Elektronenhülle auf die Streuung von α -Teilchen auf Grund deren Masse und Energie keinen nennenswerten Einfluss hat;
- können den Aufbau des Rutherfordschen Streuexperiments beschreiben;
- wissen, dass die meisten α -Teilchen fast ungehindert durch die Goldfolie treten und nur sehr wenige nennenswert abgelenkt oder gar zurückgeschleudert werden;
- wissen, dass die Abstände zwischen den Atomkernen der Goldfolie einige 10000-mal größer als der Kerndurchmesser sind und sich die Masse der Atome im Wesentlichen auf deren Kern beschränkt.

Didaktische Hinweise

Für das Rutherfordsche Streuexperiment und die Folgerungen daraus, die zum Kern-Hülle-Modell führen, werden hier zwei Unterrichtsstunden vorgeschlagen (1.2 und 1.3). In dieser ersten Stunde wird das Experiment von Rutherford vorgestellt und seine Ergebnisse werden besprochen. Da es üblicherweise hierzu kaum Experimente für den Physikunterricht gibt, sollte zum einen mit Analogiemodellen gearbeitet werden und zum anderen verfügbare Computersimulationen zur Rutherford-Streuung eingesetzt werden.

Für die Streuung sind folgende Aspekte hervorzuheben:

- Die Streuteilchen stören sich nicht untereinander.
- Die Ausdehnung des Streukörpers in Flugrichtung der Streuteilchen ist klein gegen die seitliche Ausdehnung (Streuung an Folie), damit Mehrfachstreuung vernachlässigt werden kann.

Je nach Umfang der Auseinandersetzung mit dem Rutherfordschen Streuexperiment und den zur Verfügung stehenden Experimenten, Simulationen und anderen Veranschaulichungsmöglichkeiten, können einzelne Lernziele und zugehörige Unterrichtsinhalte auch in die zweite Stunde (1.3) verschoben werden.

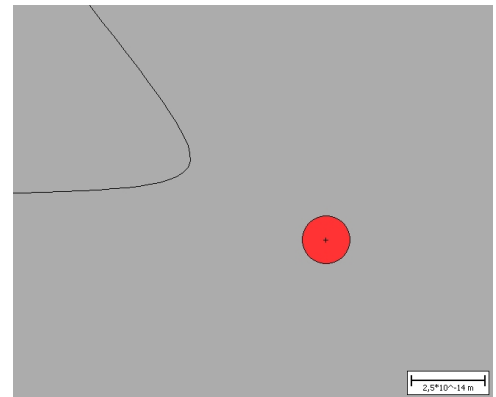
Hinweise zu Experimenten

Experiment 1: Streuexperimente kann man in Analogie zur Coulomb-Streuung mechanisch veranschaulichen: Eine Vielzahl kleiner Kugeln rollt in der Ebene auf einen Streukörper (Target) zu und wird daran mechanisch reflektiert. Die Anzahl der in ein Winkelsegment gestreuten Kugeln kann gezählt werden. So können (einfachste) Rückschlüsse auf Form und Größe des Targets gezogen werden.

Experiment 2: Ein α -Präparat wird sehr dicht vor einem Zählrohr positioniert und die Zählrate bestimmt. Anschließend wird eine sehr dünne Aluminiumfolie (z. B. Schokoladenverpackung oder Kondensatorfolie) zwischen Präparat und Zählrohr eingebracht: Es kommen offenbar nach wie vor praktisch alle Teilchen durch.

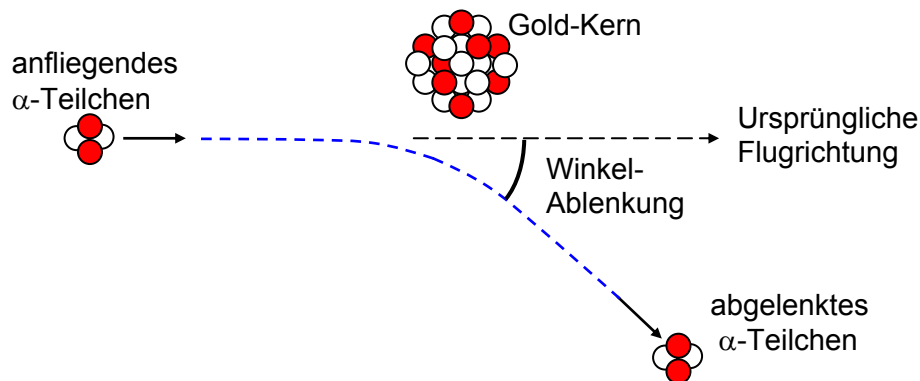
Literatur und Medien

Mit den Programmen „Rutherford-zoom.exe“ [sim_Rutherford-Zoom_CD/Atome] oder auch „rutherford.exe“ aus dem Programmpaket atomos.zip [sim_atomos_CD/Atome] kann die Streuung, die auf der elektromagnetischen Wechselwirkung basiert, aus unterschiedlichen Blickwinkeln demonstriert bzw. erforscht werden (Flugbahn, Szintillationsschirm, Streuwinkel-Zählrate-Diagramm). Rechts ist ein Teil eines screen-shots aus dem Programm „Rutherford-Zoom“ abgebildet. Gezeigt wird hier der simulierte Bahnverlauf eines α -Teilchens in der Nähe eines Goldatomkerns.



Unterrichtsinhalte

Rutherford beschoss eine Goldfolie mit so genannten α -Teilchen (Heliumkerne, doppelt positiv geladen) und beobachtete, ob und unter welchen Winkeln sie abgelenkt werden.



Er erhielt die folgenden, überraschenden Ergebnisse:

- Die meisten α -Teilchen gehen trotz der Elektronenhülle der Atome und trotz positiv geladener Atomkerne ungehindert durch die Folie hindurch.
- Einige werden abgelenkt, sehr wenige werden sogar zurückgestreut.

Interpretation der Ergebnisse:

Die Elektronenhüllen haben keine nennenswerte Auswirkung auf die schweren, energiereichen α -Teilchen. Anschaulicher Vergleich: Eine Pistolenkugel lässt sich auch nicht durch einen großen Wattebausch ablenken.

Die positiv geladenen Kerne sind so massereich (fast die gesamte Atommasse ist im Atomkern vereinigt!), dass die α -Teilchen, die in ihre Nähe kommen, stark abgelenkt werden, während die Atomkerne ihre Position im Vergleich dazu kaum verändern. Allerdings sind die Kerne sehr klein im Verhältnis zum Durchmesser der Atome (ca. 1 : 10 000), so dass nur sehr selten ein α -Teilchen in die Nähe eines Kerns kommt und merklich gestreut wird.

Rutherford sagte sinngemäß zu seiner überraschenden Beobachtung: „Es ist, als ob man eine 15-Zoll-Granate auf Seidenpapier schießt, sie zurückgeschleudert wird und einen selbst trifft!“

1.3 Das Kern-Hülle-Modell

Lernziele

Die Schüler ...

- wissen, dass Atomkerne aus Protonen und Neutronen aufgebaut sind und dass der Kern positiv geladen ist;
- wissen, dass die Stabilität der Atomkerne nur durch eine weitere Kraft (starke Wechselwirkung, interpretiert als „Kernkraft“) gewährleistet ist, die im Atomkern die abstoßende Coulombkraft um ein Vielfaches übertrifft;
- wissen, dass die Anzahl der Protonen im Atomkern (Kernladungszahl) die Art des chemischen Elements bestimmt.

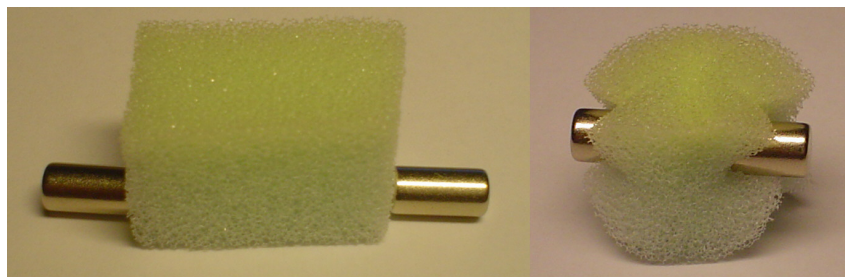
Didaktische Hinweise

In der Anschlussstunde an das Rutherfordsche Streuexperiment (1.2) sollen dessen Ergebnisse z. B. halbquantitativ anhand von Streuwinkel-Zählrate-Diagrammen, die man aus den Simulationen erhalten kann, aufgegriffen und die Folgerungen daraus ausführlich thematisiert werden. Ein besonders hervorzuhebender Aspekt ist dabei, dass die positiven Ladungen von Atomkernen und α -Teilchen einerseits zur gerade in der Simulation gut erkennbaren, teils sehr deutlichen Streuung der α -Teilchen führen, andererseits aber die Abstoßung der Protonen untereinander in den Atomkernen offenbar nicht ausreicht, um die (stabilen) Atomkerne „platzen“ zu lassen. Dieser scheinbare Widerspruch ist nur durch die Einführung einer zusätzlichen, gegenüber der Coulomb-Kraft auf sehr kurzen Distanzen wesentlich stärkeren Kraft, der sogenannten starken Kraft, zu erklären.

Hinweise zu Experimenten

Ein Analogiemodell, das das Übertreffen der Wirkung einer Kraft gegenüber einer anderen bei kurzen Abständen veranschaulicht, kann mit starken Magneten aufgebaut werden. Zwei starke Magnete, die sich unterschiedlichen Polen zuwenden, werden durch ein Stück Schaumgummi so auf Abstand gehalten, dass, wenn sie ein wenig in den Schaumgummi „eintauchen“, sie auf Grund der mechanischen Federkraft wieder auseinandergedrückt werden. Dies geschieht, obwohl sie sich magnetisch immer anziehen. Bei diesem „großen“ Abstand übertrifft also die mechanische Kraft die magnetische. Drückt man sie hingegen weiter zusammen, so halten sie zusammen, obwohl der Schaumgummi hierbei zwischen ihnen völlig platt gedrückt wird. Bei diesem kurzen Abstand ist es nun offenbar andersherum: die magnetische Kraft übertrifft die mechanische.

Das folgende Bild zeigt eine einfache Möglichkeit der Umsetzung. Verwendet wurden zwei ca. 1 cm lange zylindrische „Supermagnete“ und ein etwa 2 cm langes Stück Schaumgummi.

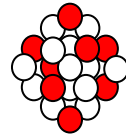


Literatur und Medien

(siehe 1.2)

Unterrichtsinhalte

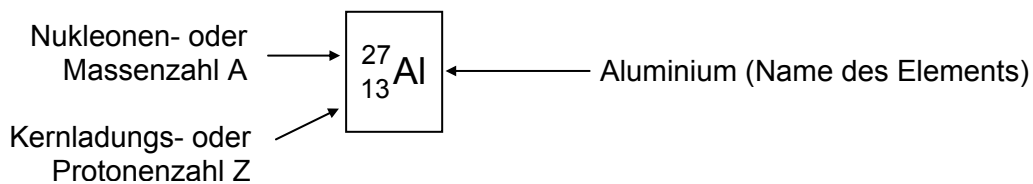
Der Atomkern ist aus Protonen (●, p) und Neutronen (○, n) aufgebaut. Die Masse eines Atoms konzentriert sich weitgehend auf den kleinen Atomkern.



Atomkern aus p und n

Obwohl sich die Protonen im Kern gegenseitig elektrisch abstoßen, werden sie zusammen mit den Neutronen von der so genannten starken Kraft zusammengehalten. Die starke Kraft übertrifft die Wirkung der elektrischen Abstoßung bei den kleinen Abständen innerhalb des Atomkerns deutlich. Atomkerne können nur auf Grund der Wirkung der starken Kraft stabil sein. Aus historischen Gründen spricht man heute noch oft von der Kernkraft statt von der starken Kraft.

Schreibweise für Atomsorten (Nuklide) am Beispiel von Aluminium-27:



Eine Auswahl weiterer Nuklide zeigt folgende Tabelle:

Nuklid	chem. Element	Protonenzahl	Neutronenzahl
^1_1H	Wasserstoff	1	0
^4_2He	Helium	2	2
$^{12}_6\text{C}$	Kohlenstoff	6	6
$^{13}_6\text{C}$	Kohlenstoff	6	7
$^{56}_{26}\text{Fe}$	Eisen	26	30
$^{235}_{92}\text{U}$	Uran	92	143
$^{238}_{92}\text{U}$	Uran	92	146

Die Zahl der Protonen im Kern bestimmt, wie viele Elektronen der Atomkern an sich binden kann, und damit die Art des chemischen Elements. So ist ein Atom, das sechs Protonen im Kern hat, immer ein Kohlenstoffatom.

Bei vielen chemischen Elementen gibt es Atomsorten, die sich in der Neutronenzahl unterscheiden. So bestehen die meisten Kohlenstoffatome aus einer Sorte mit sechs Neutronen, ein Teil der Kohlenstoffatome enthält jedoch sieben Neutronen im Kern. Die verschiedenen Atomsorten, die zu einem chemischen Element gehören, nennt man Isotope.

1.4 Vom Kristall zum Quark

Lernziele

Die Schüler ...

- wissen, dass Protonen und Neutronen eine Substruktur aus Quarks besitzen;
- kennen die wesentlichen Größenordnungen „vom Kristall zum Quark“ (sichtbare Salzkristalle: 10^{-3} m, Molekül: 10^{-9} m, Atom: 10^{-10} m, Atomkern: 10^{-14} m, Proton: 10^{-15} m, Elektron und Quark: $<10^{-18}$ m);
- wissen, dass zum Aufbau der uns umgebenden Materie nur zwei Quarks (u, d) und das Elektron benötigt werden.

Didaktische Hinweise

Bisher haben die Schüler das Kern-Hülle-Atommodell und seine Bausteine kennengelernt und gesehen, wie man mit Streuexperimenten Aussagen über eine mögliche Substruktur eines bisher als elementar geltenden Teilchen aufgebauten Körpers ziehen kann. Dieser Gedanke wird weitergeführt, wobei über entsprechende Experimente zur Untersuchung von Protonen und Neutronen berichtet wird, die zu den Bausteinen der Nukleonen, den Quarks führen. Das bisher Gelernte wird zusammengefasst und ein Überblick über die Größenordnungen „vom Kristall zum Quark“ gegeben.

Literatur und Medien

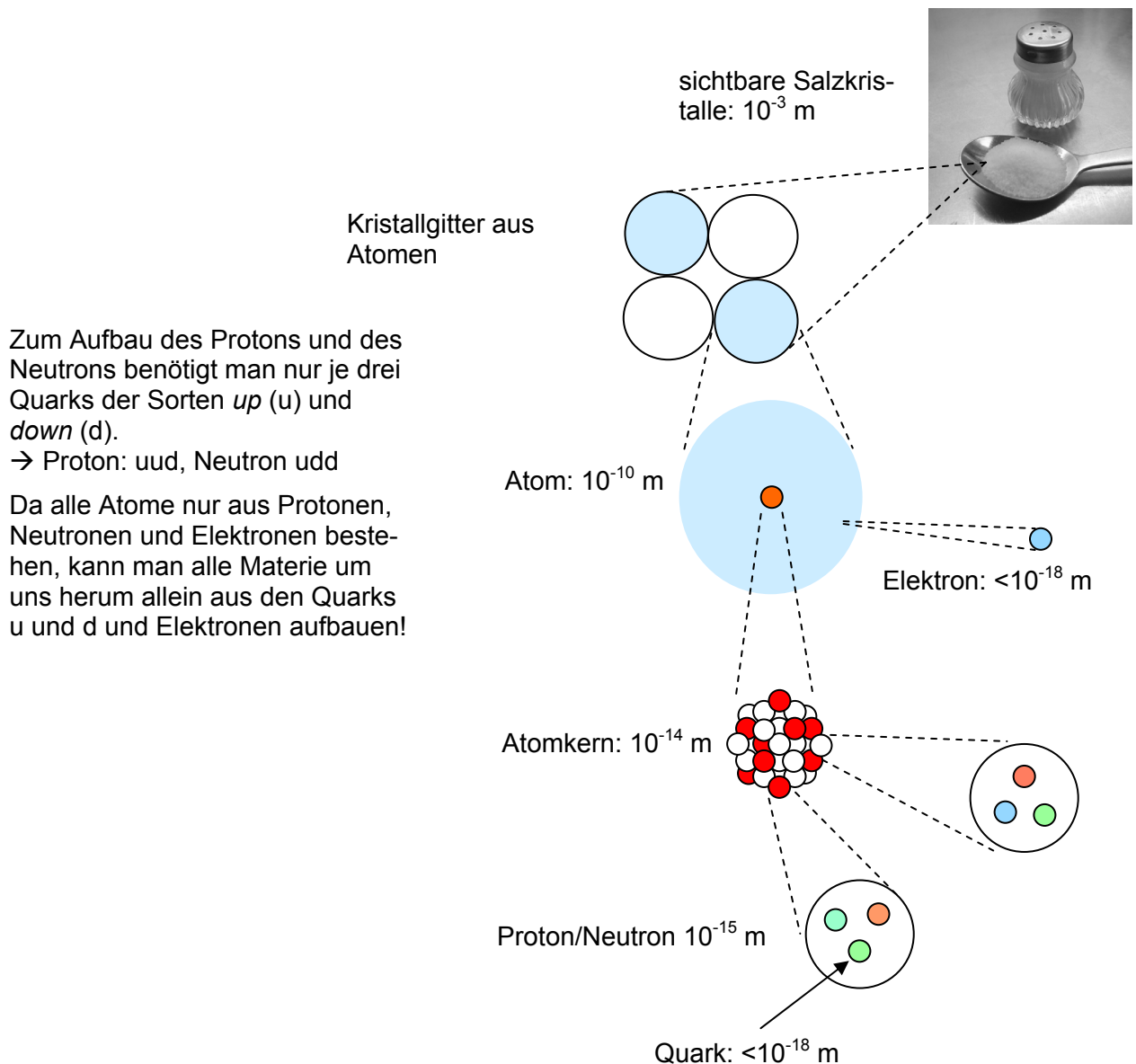
Auf der Internetweite des DESY gibt es ein umfangreiches Materialangebot für Lehrer unter [www_desyinfo]. Eine Selbstlernumgebung im Internet ist bei [www_gdt/Uni-Erlangen] verfügbar.

Unterrichtsinhalte

Tabellarischer Vergleich:

Vom Kristall zum Quark: Größenordnungen des Mikrokosmos		Zum Vergleich: Größenordnungen im Makrokosmos
sichtbare Salzkristalle:	10^{-3} m	10^{11} m (Entfernung Erde-Sonne)
Molekül/Kristallgitterabstand:	10^{-9} m	10^5 m (Entfernung Nürnberg-München)
Atom:	10^{-10} m	10^4 m (= 10 km; Länge kurzer Radtour)
Atomkern:	10^{-14} m	10^0 m (= 1 m; Tischbreite)
Proton/Neutron:	10^{-15} m	10^{-1} m (= 10 cm; CD-Durchmesser, ca.)
Quark:	$< 10^{-18}$ m	10^{-4} m (= 1/10 mm ; Haardicke ca.)

Zum Vergleich: Das Größenverhältnis eines Salzkorns zu seinem heute bekannten kleinsten Bestandteil entspricht in etwa dem Verhältnis des Abstandes Erde-Sonne (150 Millionen km) zur Dicke eines Haares (1/10 mm).



Teilchen, die einmal als elementar, also als nicht zusammengesetzt galten, haben sich im Lauf der Zeit als aus noch kleineren Bausteinen zusammengesetzt erwiesen. Der experimentelle Schlüssel zur Entdeckung solcher Substrukturen beruht auf dem Prinzip des Rutherford'schen Streuexperimentes: ein Untersuchungsobjekt wird mit möglichst kleinen und energiereichen Teilchen beschossen. Aus den Ergebnissen erhält man Aussagen über eine mögliche Zusammensetzung aus noch kleineren Teilchen. Auf diese Weise entdeckte man zuerst den Aufbau des Atoms aus einem Kern und einer Elektronenhülle (Rutherford, 1911), dann den Aufbau des Atomkerns aus Protonen und Neutronen (um 1932) und schließlich den Aufbau der Protonen und Neutronen aus Quarks (seit den 60er Jahren des letzten Jahrhunderts).

Heute versuchen Physiker herauszufinden, ob Proton und Neutron nicht nur jeweils aus drei Quarks aufgebaut sind, sondern noch weitere Teilchen enthalten und ob vielleicht auch Quarks noch eine feinere Struktur besitzen. Quarks und Elektronen werden bis heute als punktförmig angesehen.

1.5 Spektren von Lichtquellen

Lernziele

Die Schüler ...

- kennen den Aufbau eines Versuchs, mit dem sich Licht in seine Spektralfarben zerlegen lässt;
- kennen Beispiele für Lichtquellen mit kontinuierlichem und diskretem Spektrum;
- wissen, dass die diskreten Spektren charakteristisch für die jeweils in der Lichtquelle vorhandenen Atome sind;
- können die Spektralbereiche Infrarot (IR) und Ultraviolett (UV) dem sichtbaren Spektrum zuordnen.

Didaktische Hinweise

Die Schüler sollen mit dieser Unterrichtsstunde in das Thema „Emission von Energie mittels Licht“ eingeführt werden, und so letztendlich zu den diskreten Energiestufen bei Atomen geführt werden. Ausgehend von der spektralen Zerlegung von Licht, die die Schüler im Natur- und Technik-Unterricht beim Thema Farben kennengelernt haben, wird der experimentelle Aufbau mit Spalt, Linse und Prisma (Spektralapparat) aufgegriffen und ein Spektrum erzeugt. Geschieht die Erzeugung mit Hilfe eines optischen Gitters (auch Reflexionsgitter wie z. B. die CD), so muss dieses wie das Prisma als „black box“ behandelt werden.

Auf die Einführung des Begriffes „Wellenlänge“ zur Beschreibung von Spektren wird bewusst verzichtet, da in der 9. Jahrgangsstufe der Teilchencharakter des Lichtes im Vordergrund steht.

Zur Vorbereitung auf den Natrium-Schattenversuch (siehe 1.10) ist es empfehlenswert, unter anderem auch das Spektrum einer Natrium-Dampflampe zu untersuchen.

Hinweise zu Experimenten

Das Farbspektrum von Lichtquellen lässt sich mit verschiedenen Methoden realisieren. Ein gewöhnliches Dreikantprisma liefert ein recht helles Bild, die Linien sind aber nicht leicht ganz scharf darstellbar. Ein mit Geradsichtprisma erzeugtes Spektrum ist scharf, aber recht lichtschwach. Ein Beugungsgitter hat den Nachteil, dass Spektren mehrerer Ordnungen auftreten. In jedem Fall sind auswechselbare (!) Lichtquellen mit hoher Leuchtdichte, ein Kondensorsystem, ein Spalt und eine Projektionslinse nötig.

Mit einer fluoreszierenden Oberfläche (z. B. ZnS-Schirm, Textmarker, Leuchtetiketten oder Leuchtsterne aus dem Spielwarenhandel) lässt sich leicht UV-Strahlung nachweisen. Viele Solarzellen können als IR-Nachweisgerät dienen.

Ein ergänzendes Experiment zur Veranschaulichung des nahen Infrarot-Bereiches bieten CCD-Chips, die in Digitalkameras und digitalen Videokameras eingebaut sind. Sie können den IR-Bereich einer IR-LED einer Fernbedienung „sehen“ und stellen diesen für das menschliche Auge unsichtbaren Teil dann bläulich-weiß am Monitor dar (siehe Abb. rechts).

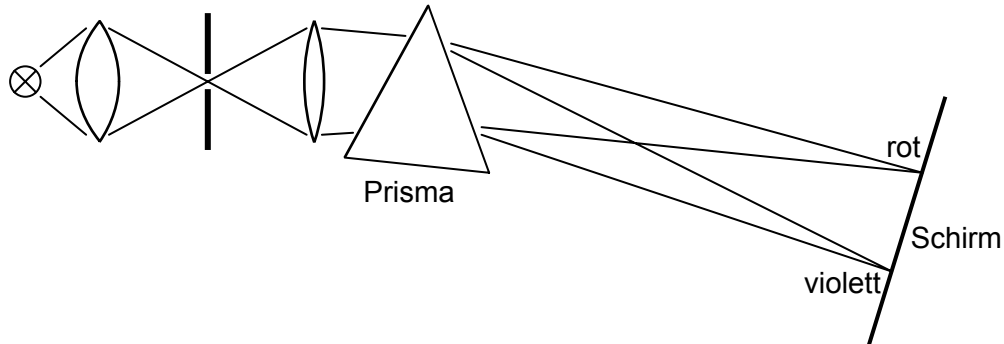


Unterrichtsinhalte

Bei der Brechung von Licht an Glasoberflächen hängt der Brechungswinkel ein wenig von der Farbe des Lichtes ab. Auch bei der Streuung von Licht an bestimmten Folien oder Oberflächen (z. B. CDs) treten winkelabhängige Farbgebungen auf. Beide Effekte bieten die Möglichkeit, das Licht verschiedener Lichtquellen genauer zu untersuchen.

Versuch:

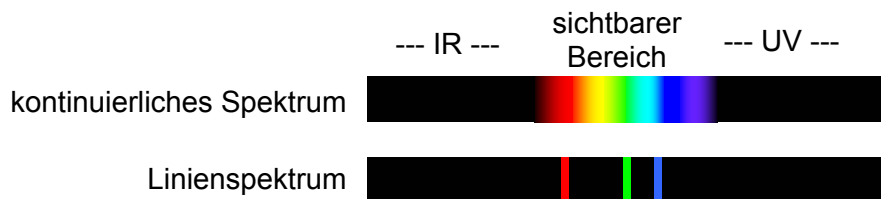
Mit Hilfe eines Prismenspektrographen stellt man das Farbspektrum verschiedener Lampen dar.



Beobachtung:

- Eine Glühlampe erzeugt alle Teile des Spektrums gleichmäßig. Man sagt: Eine Glühlampe emittiert ein kontinuierliches Spektrum.
- Eine Gasentladungslampe erzeugt ein Linienspektrum, d. h. ein Spektrum mit einzelnen, diskreten Linien. In einer solchen Lampe werden Gasatome eines bestimmten chemischen Elementes (z. B. Quecksilber) durch Stromfluss (Stöße mit Elektronen) zum Leuchten angeregt. Offensichtlich emittieren die Gasatome nur Licht mit jeweils genau definierter Lage im Farbspektrum.
- Verwendet man eine Gasentladungslampe mit einer anderen Gasart (z. B. Helium oder Natrium), so entsteht wiederum ein diskretes Spektrum, aber mit anderen Linien. Das emittierte Spektrum ist also charakteristisch für das betreffende chemische Element.

Bei vielen Lichtquellen tritt Strahlung auf, die außerhalb des sichtbaren Spektrums auf den Schirm trifft. Dies kann man mit geeigneten Detektoren (z. B. Fluoreszenzschirm oder Solarzelle) nachweisen. Diese Strahlung heißt ultraviolett (UV), wenn sie im Spektrum jenseits des violetten Endes liegt und infrarot (IR), wenn sie jenseits des roten Endes liegt.



Atome können auf viele Arten zur Lichtemission angeregt werden, z. B. durch chemische Reaktionen. Bei einem Feuerwerk entstehen die verschiedenen Leuchtfarben durch Metallsalze, die durch Verbrennungsvorgänge zum Leuchten gebracht werden. Wenn Kochsalz (Natriumchlorid) in eine Flamme gehalten wird, kann das charakteristische Leuchten von Natrium beobachtet werden. Anhand der Flammenfärbung oder genauer anhand des emittierten Spektrums lassen sich chemische Elemente eindeutig identifizieren.

1.6 Bau und Anwendung eines Spektralapparats (Schülerexperiment)

Lernziele

Die Schüler ...

- entwickeln Neugier auf der Suche nach immer anderen Spektren bei Lichtquellen;
- haben Freude am Experimentieren und können die verschiedenen Farbspektren beschreiben.

Didaktische Hinweise

Im Anschluss an die Stunde, in der die Schüler verschiedene Emissionsspektren im Lehrer-demonstrationsexperiment kennengelernt haben, soll diese Unterrichtsstunde zum Bau eines einfachen Gitter-Spektralapparats genutzt werden, der dann auch sofort noch im Unterricht verwendet werden kann. Alternativ kann der Zusammenbau bzw. können Teile des Zusammenbaus bereits vorher in Heimarbeit durch die Schüler geschehen. In beiden Fällen sollten in dieser Unterrichtsstunde am Ende erste einfache Beobachtungen mit dem selbstgebauten Apparat stehen. Zu Hause können die Schüler dann weitere Lichtquellen, insbesondere das Licht von verschiedenen Straßenlaternen untersuchen und zahlreiche Hinweise und Abbildungen zu solchen Experimenten im Internet sammeln.

Es ist nicht Ziel der Unterrichtsstunde, das Zustandekommen des Interferenzbildes zu erklären. Das Gitter wird als „black box“ behandelt. Es kann darauf hingewiesen werden, dass man die unterschiedlichen physikalischen Prinzipien daran erkennt, dass beim Prismen-Spektralapparat Blau stärker gebrochen (abgelenkt) wird als Rot, beim Gitter/CD umgekehrt die Ablenkung bei Rot stärker ist als bei Blau.

Der Selbstbau des Spektrometers stellt auch eine Anwendung und Festigung des in der Vorstunde erworbenen Wissens dar. Die Bedeutung des Spaltes bei einer solchen Anordnung kann jeder Schüler unmittelbar selbst erfahren.

Hinweise zu Experimenten

Der Bau eines einfachen Gitter-Spektralapparates ist nicht schwierig. Da das Spektrum nicht projiziert, sondern direkt mit dem Auge betrachtet wird, ist keine Abbildungslinse nötig. Es wird lediglich ein aus einer CD herausgeschnittenes Kreissegment benötigt, auf dem die Gitterlinien näherungsweise gerade bzw. parallel verlaufen.

Vor dem Bau können die Schüler bereits einfache Beobachtungen direkt an der Unterseite einer CD machen, wenn sie darin z. B. Lichtquellen in Reflexion betrachten. Sie erkennen dabei sehr bald, dass es nötig ist, einerseits einen ausgeleuchteten Spalt zu verwenden und andererseits, um nicht von Umgebungslicht gestört zu werden, den Aufbau so zu gestalten, dass außer dem Licht, das vom Spalt ausgeht, möglichst kein Licht ins Auge fällt.

Die einfachste Lösung ist, dass der Aufbau mit/in einem Schuhkarton oder einer anderen kleinen, verschließbaren Pappschachtel geschieht. Wie beim Prismenspektralapparat wird mit dem zu untersuchenden Licht ein schmaler Spalt ausgeleuchtet, der einfach mit einem Teppichmesser in die Seite der Schachtel geschnitten wird. Mit einem selbstklebenden Stück dicken Papiers oder Klebeband kann der Spalt auch noch nachträglich schmaler gemacht werden, um die Auswirkung der Breite des Spaltes auf das Spektrum beobachten zu können.

Hinter dem Spalt, auf der gegenüberliegenden Innenseite der Pappschachtel, wird das CD-Segment in der richtigen Orientierung (Linien parallel zum Spalt), z. B. am Rand mit zwei Klebestreifen, befestigt. Unter einem Winkel, der ca. 25° größer ist als der Winkel der Reflexionsrichtung, wird – nun wieder auf der Seite des Spaltes – ein „Guckloch“ in die Papp-

schachtel geschnitten. Gegebenenfalls muss die Position des CD-Segments nun noch einmal etwas korrigiert werden, damit man auch das komplette Spektrum erkennen kann.

Verbessert bzw. ergänzt werden kann der Apparat durch folgende Veränderungen:

- Verwendung des Segments einer DVD anstelle einer CD
- Aufnahme des Spektrums mit einer Digitalkamera (ohne Blitz, ggf. Stativ) oder Webcam durch das Guckloch; die Bilder können so einfach gesammelt und anschließend präsentiert werden.

Literatur und Medien

Hinweise, Bauanleitungen und Photos von Spektren findet man im Internet unter den Stichwörtern CD, Spektrometer etc. und unter [www_cd_spektrometerbau].

Unterrichtsinhalte

Selbstbau eines Spektralapparates aus einer Pappschachtel mit Deckel und einer nicht mehr benutzten CD:

Wie in den Skizzen rechts zu sehen ist, wird auf die Innenseite der Schachtel ein aus der CD ausgeschnittenes Kreissegment aufgeklebt (ca. 2 cm breit, siehe Photo unten). Zusätzlich schneidet man einen schmalen Spalt und ein Guckloch in die Schachtelwand (siehe Photo unten).

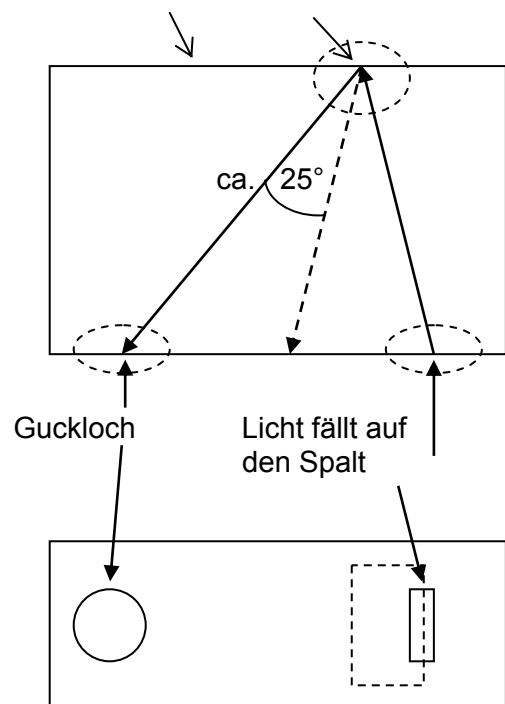


Ausschneiden eines CD-Segementes mit einer stabilen und scharfen Schere



Der fertige Spektralapparat

Ansicht von oben in die offene Schachtel;
Rückwand CD-Segment



Ansicht auf die Seite von
Spalt und Guckloch

Die Beobachtungsrichtung (vom Guckloch in Richtung CD-Segment), unter der man das farbige Spektrum des auf den Spalt einfallenden Lichts sieht, liegt ca. 25° neben der Richtung, unter der man die Reflexion des ausgeleuchteten Spaltes sieht (siehe Skizze rechts oben). Der Spalt kann mit einem selbstklebenden Stück Papier nachträglich noch schmaler eingestellt werden. Farbige Linien werden schmaler und können so ggf. besser voneinander getrennt betrachtet werden.

1.7 Licht transportiert Energie

Lernziele

Die Schüler ...

- wissen, dass bei der Ausbreitung von Licht stets Energie transportiert wird;
- vollziehen nach, dass z. B. bei der Absorption von Licht Phänomene auftreten, die sich mit einem portionsweisen Energietransport erklären lassen;
- erkennen, dass Photonen gewöhnlich in so hoher Zahl auftreten, dass sie nicht einzeln wahrgenommen werden können.

Didaktische Hinweise

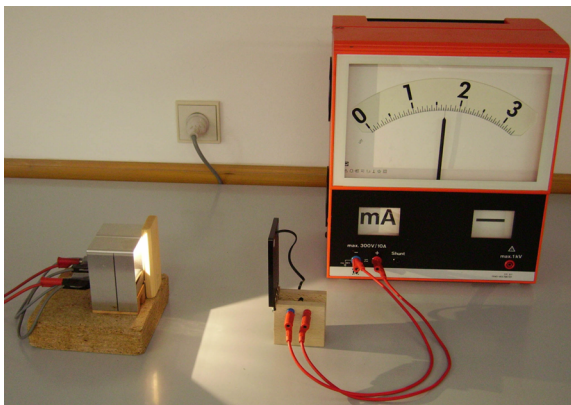
In diesem Abschnitt geht es um die Einführung des Photonenkonzepts. In einem einfachen Versuch wird gezeigt, dass die von einer Solarzelle erzeugte Kurzschluss-Stromstärke proportional zur Intensität der Beleuchtung ist (gilt nicht für die Leerlauf-Spannung!). Die Schüler wissen, dass die elektrische Stromstärke ein Maß für die Anzahl der pro Sekunde transportierten Elektronen ist. Deshalb lässt sich das Versuchsergebnis so interpretieren, dass das Licht in Portionen auf die Solarzelle trifft, und jede Portion ein einzelnes Elektron in Bewegung setzt. Die Körnung einer schwach belichteten Photoplatte oder die Schwellenspannung bei einer Leuchtdiode sind weitere Phänomene, die sich mit Photonen erklären lassen.

Man kann die Photonen auch als (Licht-)Teilchen bezeichnen, wenn man darauf hinweist, dass sie im Gegensatz zu den sonstigen den Schülern bekannten Teilchen (z. B. Elektronen, Protonen, Atome) leicht erzeugt oder vernichtet werden können.

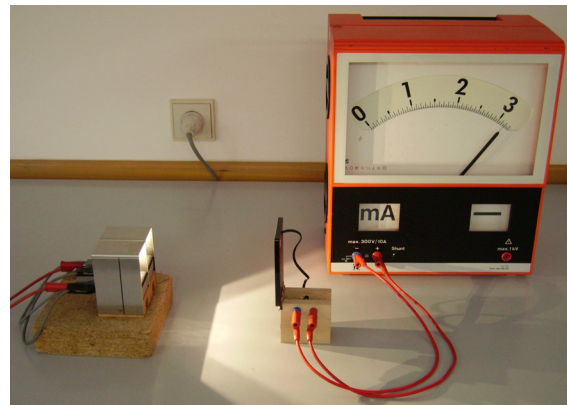
In diesem Abschnitt wird implizit das Konzept „Elementarprozess“ (ein Photon setzt ein Elektron in Bewegung) eingeführt. Auch die Beobachtungen in den folgenden Abschnitten bestätigen dieses Konzept, das in dieser Jahrgangsstufe aber nicht weiter thematisiert werden sollte.

Hinweise zum Experiment

Es sind zwei identische Glühlampen nötig, deren Glühfäden parallel ausgerichtet sein sollten, um die Solarzelle möglichst gleich hell zu beleuchten. Die Verwendung heller Lampen (z. B. 12 V/20 W Halogen) aus nicht zu großem Abstand (z. B. 20 cm) ermöglicht das Experimentieren bei eingeschaltetem Raumlicht.



Beleuchtung durch eine Lampe

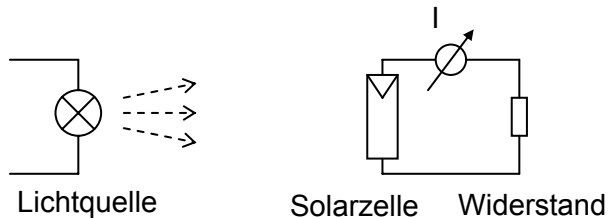


Beleuchtung durch zwei Lampen

Unterrichtsinhalte

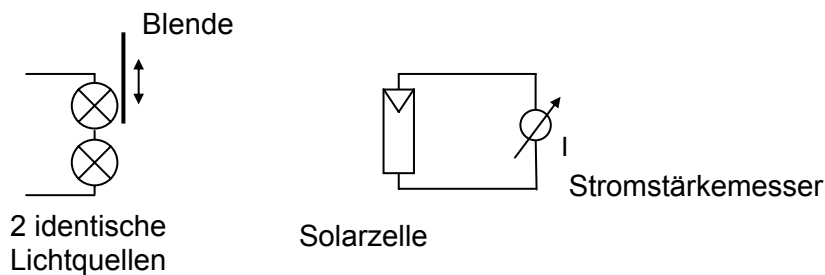
Das Licht der Sonne transportiert gewaltige Energiemengen zur Erdoberfläche. Dadurch wird z. B. die Erdoberfläche erwärmt und die Photosynthese in den Pflanzen ermöglicht. In einer Solarzelle kann Licht einen elektrischen Stromfluss hervorrufen. Mit Hilfe dieses Effektes kann man den Energietransport durch Licht genauer untersuchen.

Versuch 1:



Der Lichteinfall auf die Solarzelle ruft einen Stromfluss durch den Widerstand hervor. Die Absorption von Licht in der Solarzelle führt auf Grund des inneren Aufbaus der Solarzelle zu einer Elektronenbewegung im Stromkreis. Wie hängt die Elektronenbewegung mit der Lichtintensität zusammen?

Versuch 2:



Wenn die Intensität der Beleuchtung durch Wegziehen der Blende verdoppelt wird, steigt die von der Solarzelle erzeugte Stromstärke auf den doppelten Wert. Die Intensität der Beleuchtung bestimmt also die Anzahl der pro Sekunde in Bewegung gesetzten Elektronen. Dieses Verhalten kann durch folgende Modellvorstellung erklärt werden:

Die Lichtquelle sendet „Portionen“ von Licht aus, die bei Absorption in der Solarzelle jeweils ein Elektron in Bewegung setzen können. Eine höhere Lichtintensität bedeutet, dass mehr solcher Portionen pro Zeiteinheit auftreten und deshalb eine höhere Stromstärke hervorgerufen wird. Die Lichtportionen bezeichnet man als Photonen.

Dass man Photonen nicht einzeln wahrnehmen kann, liegt an ihrer ungeheuren Zahl: Im prallen Sonnenschein treffen pro Sekunde auf jeden Quadratzentimeter etwa $2,5 \cdot 10^{17} = 250$ Billionen Photonen! Andererseits ist unser Auge ein recht empfindlicher Photonenempfänger: Wenn in einer klaren Nacht ein lichtschwacher Stern betrachtet wird, fallen pro Sekunde nur ein paar Dutzend Photonen dieses Sterns ins Auge.

1.8 Energie der Photonen

Lernziele

Die Schüler ...

- erkennen anhand eines einfachen Experiments, dass die Fähigkeit von Licht, bestimmte Prozesse auszulösen, von seiner Lage im Farbspektrum abhängt;
- vollziehen nach, dass die Energie der Photonen umso größer ist, je weiter das betreffende Licht in Richtung des violetten Endes des Farbspektrums liegt;
- kennen die Maßeinheit eV als sinnvolle Energieeinheit im atomaren Bereich.

Didaktische Hinweise

In diesem Abschnitt soll gezeigt werden, dass die Energie der einzelnen Photonen durch ihre Lage im Farbspektrum bestimmt ist. Hier wird ein Versuch vorgeschlagen, bei dem Phosphoreszenz in Abhängigkeit von der Farbe des Anregungslichts untersucht wird. Es lässt sich dabei ohne weitere Hilfsmittel beobachten, dass jeweils nur Licht, das hinreichend nahe am violetten Ende des Spektrums liegt, ein Nachleuchten auslösen kann und dass diese „Farb-grenze“ unabhängig von der Intensität der Beleuchtung ist. Damit ergibt sich der Zusammenhang von Farbe und Photonenenergie. Viele weitere Vorgänge im Alltag können als zusätzliche Beispiele herangezogen werden: Sonnenbrand durch UV-Licht, Wirkung optischer Aufheller in Waschmittel und Papier usw.

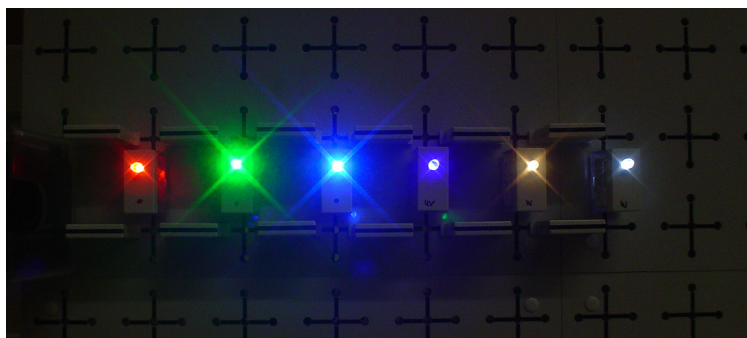
Hinweise zu Experimenten

Ein helles, kontinuierliches Spektrum erzeugt man am besten mit einer Halogenlampe, einem Spalt, einer abbildenden Linse und einem Prisma (siehe 1.5). Auch ein Diaprojektor ist gut geeignet, wenn man in einen Diarahmen einen etwa 0,5 mm breiten Spalt (z. B. aus Alufolie) einfügt. Auch der Overheadprojektor kann verwendet werden, wenn man die ausgeleuchtete Fläche zu einem schmalen Spalt abblendet (Pappe) und ein großes Prisma nach der Linse-Spiegel-Kombination passend in den Strahlengang einbringt.

Als phosphoreszierende Oberfläche sind ein ZnS-Schirm, ein nachleuchtendes Absperrband oder nachleuchtende Dekorationen bzw. Spielzeug verwendbar. Bei [www_AkkuLux] kann eine selbstleuchtende Folie im A4-Format für etwa 10 € bestellt werden.

Mit farbigen Leuchtdioden (rot, grün, blau, am besten jeweils „superhell“) kann man viele Freihand- bzw. Schülerversuche zur Phosphoreszenz und Fluoreszenz durchführen: Auf Phosphoreszenzschirm schreiben, fluoreszierende Farbstoffe (Textmarker, optische Aufheller, Markierungen auf Briefkuverts) untersuchen o. Ä.

Die Abbildung rechts zeigt eine Reihe von sechs Leuchtdioden in den Farben (von links nach rechts) rot, grün, blau, violett (UV-Anteil), „sonnenweiß“, weiß:



Unterrichtsinhalte

Wenn Photonen von Materie absorbiert werden, können viele verschiedene Effekte auftreten: Stromfluss in einer Solarzelle, Photosynthese in einer grünen Pflanze u. a. Manche Stoffe lassen sich durch die Absorption von Licht dazu anregen, anschließend selber Licht auszusenden (z. B. Leuchtziffern einer Uhr). Mit diesem Effekt kann untersucht werden, wovon die Energie der Photonen abhängt.

Versuch:

Beleuchtet man einen phosphoreszierenden Streifen (Leuchtband) mit dem kontinuierlichen Spektrum einer Glühlampe, beobachtet man nach dem Ausschalten der Lampe ein deutliches Nachleuchten. Dieses tritt als Folge der Beleuchtung mit blauem oder ultraviolettem Licht auf. Rotes oder grünes Licht ist dazu offensichtlich nicht in der Lage. Die Fähigkeit von Photonen, Atome im Leuchtband



zum Nachleuchten anzuregen, hängt also von ihrer Lage im Farbspektrum ab. Je weiter das Licht in Richtung der violetten Seite des Spektrums liegt, desto mehr Energie haben die Photonen. Photonen mit einer zu geringen Energie (z. B. im roten Bereich) erzeugen auch bei hoher Intensität oder langer Beleuchtungszeit kein Nachleuchten.

Genaue Messungen ergeben, dass ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Lage im Farbspektrum und der Photonenenergie besteht. Je weiter eine Farbe auf der violetten Seite des Spektrums liegt, desto größer ist die Energie der zugehörigen Photonen.

Man kann die Energie der Photonen genau messen. Jedes Photon des grünen Lichtes hat in etwa eine Energie von $0,000\,000\,000\,000\,000\,4\,\text{J} = 4 \cdot 10^{-19}\,\text{J}$. Für so kleine Energiebeiträge, wie sie in der Atomphysik häufig vorkommen, hat man eine passende Maßeinheit eingeführt:

1 eV (Elektronenvolt) ist die Energie, die ein Elektron in Form von kinetischer Energie besitzt, wenn es durch eine elektrische Spannung von einem Volt beschleunigt wurde. Es gilt:

$$1\,\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}\,\text{J}$$

Die Photonen des grünen Lichtes besitzen also eine Energie von etwa 2,5 eV. Der sichtbare Bereich erstreckt sich in etwa von 1,7 eV (rot) bis 3,1 eV (violett).

1.9 Energiestufen der Atome

Lernziele

Die Schüler ...

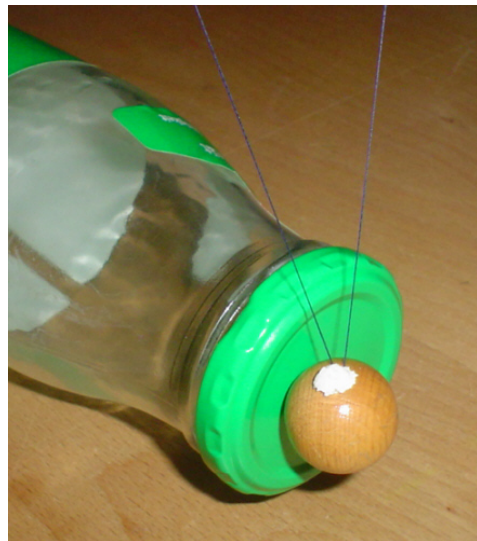
- erkennen, dass sich Emissions-Linienspektren auf Grund der stufenartigen Abgabe von Energie durch Atome erklären lassen;
- können die Begriffe Anregung, angeregter Zustand, Energiestufen und Photonenemission unter dem Gesichtspunkt der Energieerhaltung richtig verwenden;
- können die Aufnahme und Abgabe von Energie mit Hilfe eines Energiestufenschemas darstellen und beschreiben.

Didaktische Hinweise

Dass Energiezufuhr nicht wie gewohnt kontinuierlich, sondern bei atomarer Anregung (ohne Ionisation) nur stufenartig möglich ist, ist der zentrale Inhalt dieses Lehrplanabschnittes. Um diese – für die Schüler auf den ersten Blick recht ungewöhnliche – Eigenschaft der Atome anschaulich zu machen, wird ein mechanischer Modellversuch verwendet, bei dem ebenfalls Energiestufen auftreten. Auf die Darstellung der Vorgänge in einem Schalenmodell oder gar in einem Modell mit kreisenden Elektronen sollte auf jeden Fall verzichtet werden. Die Anregung eines Atoms wird stattdessen als Strukturänderung in der Elektronenhülle beschrieben.

Hinweise zum Experiment

Ein Milchflaschen- oder Marmeladenglasdeckel, der beim ersten Öffnen „Plopp“ macht, kann modellhaft als System mit zwei festen Energiezuständen („eingedrückt“ und „herausgeploppt“) betrachtet werden. Durch den Stoß mit einer Holzkugel kann der „herausgeploppte“ Deckel wieder eingedrückt werden. Der Modellversuch klappt am besten, wenn man den Milchflaschen- oder Marmeladenglasdeckel ein wenig biegt, so dass er in beiden Zuständen stabil ist, und ihn auf die Flasche bzw. das Glas schraubt oder aber in eine Stativklemme einspannt. Die Holzkugel mit etwa 2 cm Durchmesser sollte man bifilar an etwa 30 cm langen Fäden so aufhängen, dass sie genau auf die Mitte des Deckels prallt und den Deckel gerade berührt, wenn sie lose herabhängt.

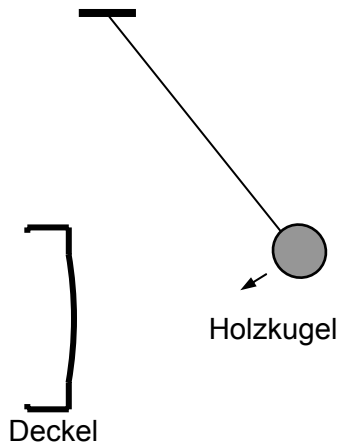


Unterrichtsinhalte

Es soll erklärt werden, wie das Linienspektrum einer Gasentladungslampe zustande kommt. Weil im ausgesandten Licht nur Photonen ganz bestimmter Energiewerte auftreten, kann geschlossen werden, dass die Gasatome auch nur ganz bestimmte Energiebeträge abgeben können. Dieses Verhalten soll mit Hilfe eines Modellversuchs veranschaulicht werden.

Versuch:

Führt man den Blechdeckel einer Milchflasche (mit „Ploppverschluss“) durch Stöße mit einer Holzkugel Energie zu, macht man die folgende Beobachtung:



Wenn die Kugel aus geringer Höhe auf den Deckel im entspannten Zustand trifft, prallt sie elastisch zurück und erreicht fast wieder die ursprüngliche Höhe.

Bei einer ganz bestimmten Ausgangshöhe gibt die Kugel beim Aufprall ihre gesamte kinetische Energie an den Deckel ab, der dabei verformt wird und in den gespannten Zustand „springt“. In diesem Zustand speichert der Deckel Energie.

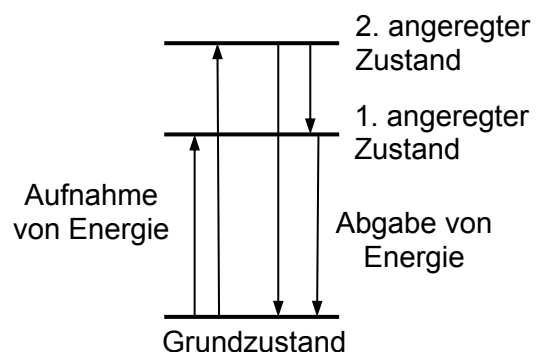
Wenn der Deckel von Hand dazu gebracht wird, wieder in den entspannten Zustand überzugehen, gibt er die gespeicherte Energie wieder an die Holzkugel ab.

Die Aufnahme und Abgabe von Energie durch Atome erfolgt in vielfacher Hinsicht ähnlich wie beim Blechdeckel:

Normalerweise befinden sich Atome im Grundzustand (Deckel: entspannter Zustand). Durch Stöße oder die Absorption bestimmter Photonen kann ein Atom in einen angeregten Zustand (Deckel im gespannten Zustand) übergehen. Bei der Anregung ändert die Elektronenhülle des Atoms ihre Struktur. Dazu ist ein genau definierter Energiebetrag nötig. Das Atom speichert diese Energie und geht dann nach kurzer Zeit wieder in den Grundzustand über. Die gespeicherte Energie wird i. d. R. in Form eines Photons abgegeben.

Atome haben aber – anders als der Blechdeckel – mehrere angeregte Zustände, die sich in ihrer Energie unterscheiden. Die Verhältnisse lassen sich übersichtlich in einem so genannten Energiestufenschema darstellen:

Ein Atom kann Energie nur stufenartig aufnehmen. Dabei geht es von einem energetisch niedrigeren in einen höheren Zustand über (Anregung). Beim anschließenden Übergang von einem energetisch höheren zu einem niedrigeren Zustand wird ein Photon emittiert, dessen Energie gleich der Differenz der Energiewerte der beiden beteiligten Zustände ist. Jeder Linie im Spektrum einer Gasentladungslampe entspricht ein bestimmter Übergang von einem höheren zu einem tieferen Zustand.



1.10 Absorption von Photonen

Lernziele

Die Schüler ...

- erkennen, dass Atome Photonen emittieren und als Umkehrprozess auch absorbieren können;
- können die verschiedenen Versuchssituationen beim Natrium-Schattenexperiment beschreiben;
- können die Beobachtungen mit einfachen Modellvorstellungen und Energiestufenschemata erklären.

Didaktische Hinweise

Am Beispiel des Natrium-Schattenexperimentes lernen die Schüler, dass viele atomare Vorgänge (im Gegensatz zu den meisten makroskopischen Vorgängen) umkehrbar sind. So wie bei der Emission Photonen diskreter Energie auftreten, muss ein Photon umgekehrt genau die passende Energie besitzen, um ein Gasatom anregen zu können. Die Erklärung der zunächst verblüffenden Beobachtungen beim Natrium-Schattenexperiment ermöglicht zudem eine vertiefende Zusammenschau der bisherigen Ergebnisse. Die Rolle der Energieerhaltung wird nochmals herausgestellt.

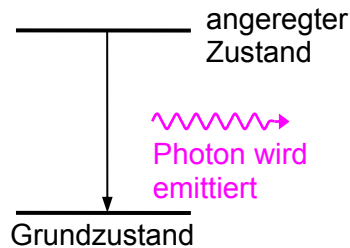
Hinweis zum Experiment

Beim Natrium-Schattenexperiment werden die Natriumatome in der Flamme durch das eingestrahlte Licht aus der Natriumdampflampe angeregt, wodurch Photonen einer ganz bestimmten Energie absorbiert werden. Die Atome fallen nach typischerweise 10^{-8} s wieder in den Grundzustand zurück, wobei wiederum Photonen genau der gleichen Energie emittiert werden. Während jedoch beim Einstrahlen des Natriumlichts ohne zwischenzeitliche Absorption sämtliche Photonen an der Stelle der Flammenprojektion auf den Schirm getroffen wären, werden die von den angeregten Natriumatomen abgegebenen Photonen in alle Raumrichtungen gleichmäßig abgestrahlt. An der Stelle der Flammenprojektion treffen demnach viel weniger Photonen auf, was sich als deutlicher Schatten zeigt.

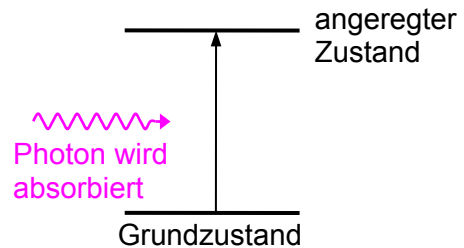
Unterrichtsinhalte

Die Anregung eines Atoms kann auf verschiedene Arten erfolgen. In einer Gasentladungslampe wird die Energie vorwiegend durch einen Elektronenstoß auf das Atom übertragen. Die Energieaufnahme kann aber auch durch die Absorption eines Photons erfolgen. Dieser Vorgang ist nichts anderes als die Umkehrung des Emissionsprozesses.

Emission eines Photons



Absorption eines Photons



Im folgenden Versuch können sowohl die Emission wie auch die Absorption von Photonen beobachtet werden:

In die Flamme eines Bunsenbrenners hält man ein Stäbchen mit etwas Kochsalz. Dabei leuchtet die Flamme gelb-orange auf, weil das Natrium des Salzes durch die Flamme zur Lichtemission angeregt wird (Flammenfärbung).

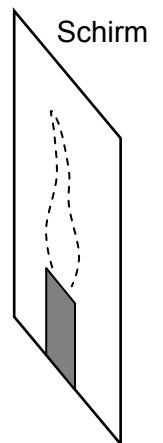
Bei Beleuchtung der Gasflamme mit einer hellen Lampe kann der Schatten der Flamme auf einem Schirm untersucht werden.

Glühlampe bzw.
Natriumdampflampe



Stäbchen mit
Kochsalz

Bunsen-
brenner



Beobachtung:

- Im Licht einer Glühlampe wird kein Schatten der Flamme auf dem Schirm erzeugt, auch wenn man die Flamme mit Hilfe des Kochsalzstäbchens aufleuchten lässt.
- Verwendet man eine Natriumdampflampe als Lichtquelle, so tritt ein deutlicher Schatten auf, sobald Kochsalz in die Flamme gegeben wird.

Erklärung:

Zunächst wird das zweite Ergebnis erklärt: In der Natriumdampflampe werden Natriumatome zur Lichtemission angeregt. Die Energie der dabei erzeugten Photonen stimmt genau mit der Anregungsenergie der Natriumatome überein. Die ausgesandten Photonen haben anschließend gerade die richtige Energie, um die Natriumatome in der Flamme anzuregen. Deshalb werden sie dort besonders wirksam absorbiert und treffen nicht mehr auf den Schirm.

Dass im Licht einer Glühlampe kein Schatten entsteht, liegt daran, dass im kontinuierlichen Spektrum dieser Lichtquelle nur ein verschwindend kleiner Anteil der Photonen die passende Energie hat, um die Natriumatome in der Flamme anzuregen. Die meisten Photonen werden daher in der Flamme kaum absorbiert und gelangen ungehindert zum Schirm.

1.11 Entstehung von Röntgenstrahlung

Lernziele

Die Schüler ...

- wissen, dass als Folge der Anregung eines inneren Elektrons bei einem Atom höherer Ordnungszahl ein Photon im Energiebereich von 1 keV bis 100 keV emittiert wird;
- wissen, dass Photonen in diesem Energiebereich ein hohes Durchdringungsvermögen besitzen, Photoplatten belichten können und die Röntgenstrahlung bilden;
- erkennen, dass im Röntgenspektrum diskrete Linien auftreten, die für das betreffende chemische Element charakteristisch sind.

Didaktische Hinweise

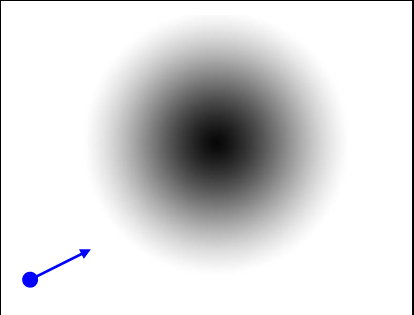
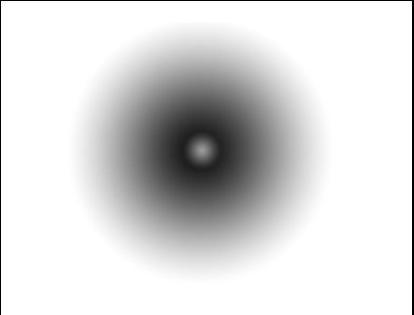
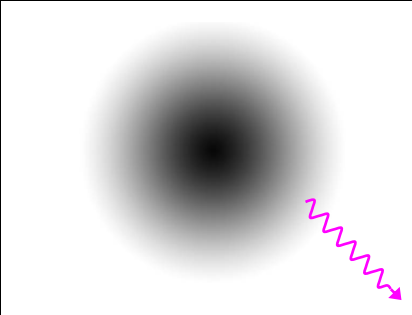
Zur Erklärung der Entstehung von Röntgenstrahlung ist es angebracht ist, von „inneren“ und „äußeren“ Elektronen zu sprechen, was die Erwähnung eines schalenartigen Aufbaus der Elektronenhülle nahelegt, doch sollte man auch an dieser Stelle die Vorstellung von Kreisbahnen vermeiden. Entscheidend für die Entstehung von Röntgenstrahlen ist die Tatsache, dass das betreffende Atom bzw. Ion, nachdem ein energiereiches Elektron ein „inneres Elektron“ herausgeschlagen hat, in einem hoch angeregten Zustand vorliegt. Durch Abgabe eines Photons im keV-Bereich wird wieder der Grundzustand eingenommen. Der Emissionsprozess des diskreten Anteils von Röntgenstrahlen verläuft also völlig analog zur Emission von Licht.

Die Entstehung des kontinuierlichen Bremsspektrums soll in dieser Stunde nicht erörtert werden.

Zum Röntgenspektrum kann natürlich auch ein Energiestufenschema gezeichnet werden. Weil die zugehörige Darstellung aber recht ungewöhnlich ist, wird hier darauf verzichtet.

Unterrichtsinhalte

Grundsätzlich erfolgt die Anregung von Atomen und die anschließende Photonenemission nach folgendem Schema:

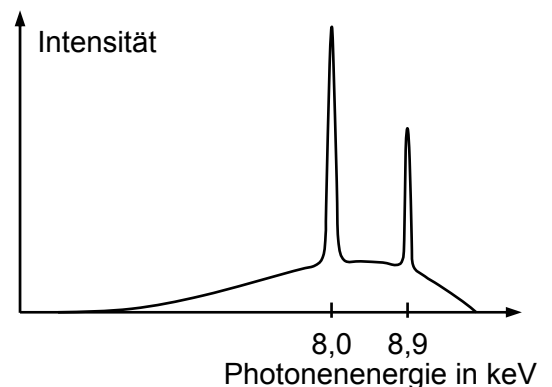
1. Durch den Stoß, z. B. mit einem Elektron, wird Energie auf das Atom übertragen.	2. Die Atomhülle befindet sich für kurze Zeit in einem angeregten Zustand.	3. Durch Emission eines Photons kehrt das Atom in den Grundzustand zurück.
		

Die Hülle eines Atoms enthält – entsprechend der Ordnungszahl des betreffenden chemischen Elements – etwa bis zu 100 Elektronen. Bei einem Atom mit z. B. 29 Elektronen (Kupfer) halten sich einige dieser Elektronen nahe am positiv geladenen Atomkern auf; sie sind besonders fest gebunden und heißen innere Elektronen. Andere befinden sich in Bereichen mit einem größeren Abstand vom Atomkern. Diese äußeren Elektronen sind vergleichsweise schwach gebunden. Wenn ein Atom mit vielen Hüllenelektronen durch einen Stoß angeregt wird, können je nach Stoßenergie verschiedene Fälle eintreten:

Werden schwach gebundene, äußere Elektronen angeregt, so haben die anschließend ausgesandten Photonen Energiewerte von einigen eV und liegen somit im sichtbaren oder im UV-Bereich. Solche Prozesse finden z. B. in einer Gasentladungslampe statt.

Wird ein stark gebundenes inneres Elektron durch ein anderes hochenergetisches Teilchen aus der Hülle geschlagen, befindet sich die Elektronenhülle in einem sehr stark angeregten Zustand. Das anschließend ausgesandte Photon hat dementsprechend sehr viel Energie (z. B. im Bereich von 1 keV bis 100 keV). Solche Photonen sind für unsere Augen unsichtbar, können aber Photoplatten belichten. Sie besitzen ein sehr großes Durchdringungsvermögen und bilden die Röntgenstrahlung. Das Spektrum der Röntgenstrahlung ist wie das Spektrum einer Gasentladungslampe diskret, weil die inneren wie die äußeren Elektronen nur bestimmte, für das jeweilige chemische Element charakteristische Anregungsenergien aufnehmen können.

Im Diagramm rechts ist das Röntgenspektrum von Kupfer vereinfacht dargestellt. Es sind zwei scharfe Linien erkennbar, die durch verschiedene Übergänge hervorgerufen werden. Die breite Verteilung mit geringer Intensität wird durch einen zusätzlichen Erzeugungsmechanismus für Röntgenstrahlung hervorgerufen.



1.12 Erzeugung und Anwendung von Röntgenstrahlung

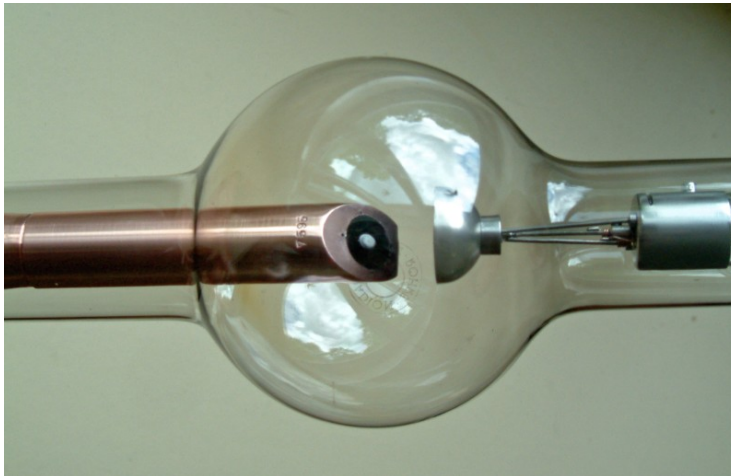
Lernziele

Die Schüler ...

- können das Funktionsprinzip und den Aufbau einer Röntgenröhre beschreiben;
- können erklären, wie eine gewöhnliche medizinische Röntgenaufnahme entsteht;
- wissen, dass in der modernen Medizin weitere Aufnahmetechniken verwendet werden und dass Röntgenstrahlung auch in vielen Bereichen von Forschung und Technik eine wichtige Rolle spielt.

Hinweise zu Experimenten

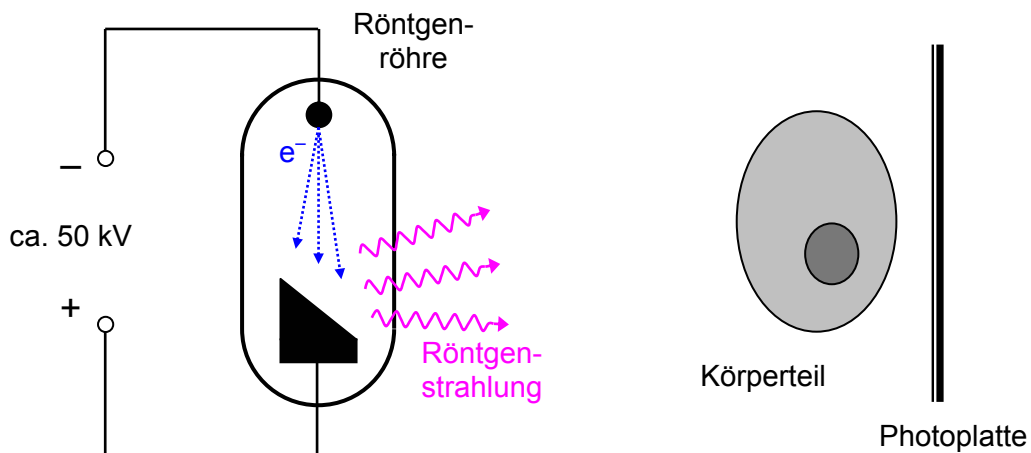
Zur Veranschaulichung ist eine ausgemusterte Röntgenröhre, die einen Einblick in ihr „Innenleben“ gewährt, hilfreich. Die Durchführung von Experimenten mit einer vorhandenen Röntgenvorrichtung ist aus Gründen des Strahlenschutzes äußerst problematisch.



Die typischen „Röntgenbilder“, die aus der medizinischen Diagnostik bekannt sind, entstehen gemäß dem Lichtstrahlmodell der geometrischen Optik. Auf den Röntgenbildern ist also stets ein Schattenriss von Gewebe (typischerweise Knochen) zu erkennen, das die Photonen im Röntgenbereich stärker absorbiert als das Nachbargewebe. Für eine akzeptable Bildqualität sind demnach annähernd punktförmige (Röntgen-)Lichtquellen sowie ein möglichst geringer Abstand zwischen Absorbermaterial und Photoplatte nötig.

Unterrichtsinhalte

Zur Erzeugung von Röntgenstrahlung kann man z. B. stark beschleunigte Elektronen im Vakuum auf eine Metalloberfläche schießen. Durch die Stöße mit den Elektronen werden dann die Metallatome zur Emission von Röntgenphotonen angeregt. Dies geschieht in einer Röntgenröhre. Röntgenstrahlen werden von Körpergewebe nur schwach absorbiert, von Knochen stärker und von Metallteilen sehr stark. Eine medizinische Röntgenaufnahme entsteht durch Schattenprojektion eines Körperteils auf eine Photoplatte.



Im Bild rechts ist ein Sprunggelenk zu sehen, das nach einer Fraktur durch eine Schraube, einen Nagel und ein Drahtstück zusammengehalten wird. Das Bild ist ein Negativ: Je mehr Röntgenphotonen auf eine Stelle der Photoplatte treffen, umso stärker wird sie dort geschwärzt.

Röntgenbilder lassen sich außer mit Photoplatten auch mit elektronischen Detektoren erfassen. Wenn man viele solcher Bilder aus verschiedenen Winkeln mit Hilfe eines Computers auswertet, kann man ein räumliches Abbild des betreffenden Körperteils erstellen. Diese so genannte Computer-Tomographie ist ein wichtiges Diagnoseverfahren in der modernen Medizin.

Auch in der Materialforschung wird Röntgenstrahlung eingesetzt, um z. B. die Qualität von Schweißnähten zu untersuchen.

