

## 1.13 Nachweis radioaktiver Strahlung

### Lernziele

Die Schüler ...

- wissen, dass radioaktive Strahlung unsichtbar und durchdringend ist;
- wissen, dass sie Atome ionisiert und photographische Platten schwärzt;
- verstehen, dass man das Ionisationsvermögen radioaktiver Strahlung zu ihrem Nachweis nutzt;
- wissen, dass radioaktive Strahlung auch ein natürliches Phänomen ist, das uns ständig umgibt.

### Didaktische Hinweise

Der Mensch hat keinen Wahrnehmungssinn für Radioaktivität, deshalb steht am Anfang der Unterrichtssequenz die experimentelle Untersuchung, wie man radioaktive Strahlung nachweisen kann. Der Einstieg in die Thematik mit der Schwärzung photographischer Platten hat neben der Einfachheit des Versuchsaufbaus auch geschichtlichen Charakter, da Henri Antoine Becquerel auf genau diese Weise im Jahre 1896 die Radioaktivität entdeckte.

Im Zentrum dieser Unterrichtsstunde steht das Experiment „Plattenkondensator als Ionisationskammer“, woran die Ionisationswirkung als Nachweisprinzip ausführlich besprochen wird.

Den Abschluss bildet das Geiger-Müller-Zählrohr (Betrieb im Auslösebereich!) als technische Weiterentwicklung der Ionisationskammer, womit auch der Nulleffekt gemessen werden kann. So soll gezeigt werden, dass radioaktive Strahlung auch ein natürliches Phänomen ist, das uns ständig umgibt.

### Hinweise zu Experimenten

Beim „Plattenkondensator als Ionisationskammer“ sollte ein Plattenabstand von ca. 5 cm gewählt werden, der Widerstand (z. B. 10 M $\Omega$ ) dient dem Schutz des Experimentators. Die Schaltung ist recht empfindlich in Bezug auf Influenzladungen und Kriechströme, weshalb keine Hochspannung verwendet werden sollte. Die gegenüber dem Fuß isolierte Platte des Kondensators ist mit dem Messverstärker zu verbinden, wobei sich die Verwendung eines abgeschirmten Kabels empfiehlt. Der gesamte Kondensator muss sorgfältig isoliert werden, insbesondere dürfen keine Netzkabel in der Nähe des Kondensators verlegt werden!

Auf Grund störender Aufladung an der Kleidung des Experimentators usw. sollte man zum Ablesen der Stärke des Messstromes immer erst einige Schritte zurücktreten. Ohne Präparat darf kein Strom fließen. Die Schüler erkennen an den Zeigerausschlägen beim Hantieren, wie ungeheuer empfindlich die Stromstärkemessung ist.

Als Präparat ist jeder  $\alpha$ -Strahler mit z. B. 10 kBq Aktivität geeignet. → Etwa 200  $\alpha$ -Teilchen werden je Sekunde nach vorne emittiert. Jedes  $\alpha$ -Teilchen produziert ca.  $10^5$  Ionenpaare in Luft, wonach der Ionisationsstrom einige  $10^{-12}$  A beträgt.

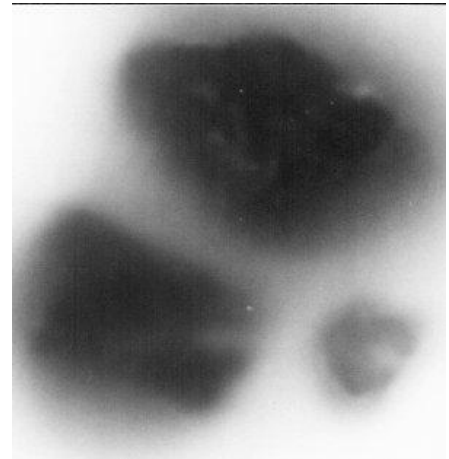
### Literatur und Medien

Eine kleine Animation zur Ionisation findet sich unter [[www\\_Ionisation/leifi](http://www.Ionisation/leifi)].

Zum Aspekt der Schwärzung photographischer Platten ist eine ausführliche Versuchsanleitung im Internet verfügbar [[www\\_Versuch\\_Photoplatte](http://www_Versuch_Photoplatte)].

## Unterrichtsinhalte

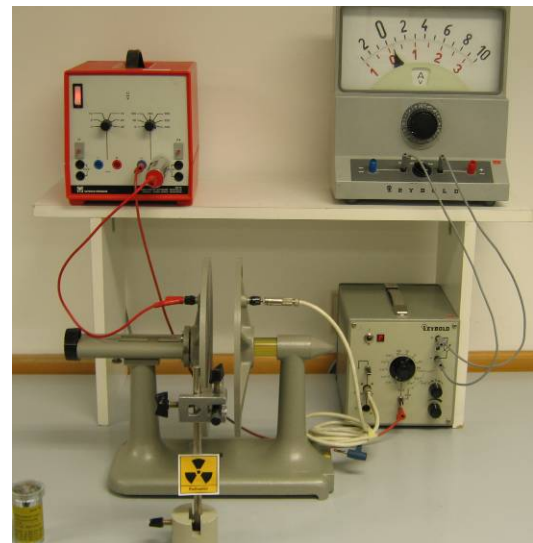
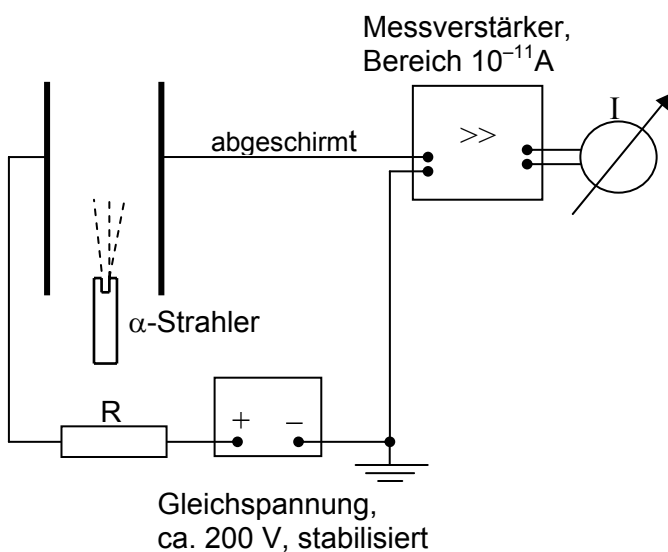
Nebenstehendes Bild zeigt einen entwickelten Film eines Sofortbild-Filmpacks, auf den mehrere Brocken Pechblende (Uranerz) für ca. 1 Tag gelegt wurden. Obwohl der Film während dieser Zeit lichtdicht verpackt war, sind deutlich die Umrisse der Gesteinsbrocken zu sehen.



Die nebenstehende Aufnahme findet sich unter weiteren Beispielphotos bei [www\_Beispiele\_Photoplatte].

- Radioaktive Strahlung ist unsichtbar und kann bestimmte Stoffe durchdringen.
- Radioaktive Strahlung belichtet Photofilme.

### Versuch 1: Plattenkondensator als Ionisationskammer



Die vom Präparat ausgehende Strahlung ionisiert die Luftmoleküle. Dabei entstehen freie Elektronen und positive Ionen. Die Elektronen werden von der positiven Kondensatorplatte angezogen, die Ionen von der negativen. Dieser Ladungstransport ist mit Hilfe des Messverstärkers als Strom messbar.

Radioaktive Strahlung ionisiert Luft, d. h. macht aus zunächst neutralen Luftmolekülen geladene Teilchen.

Obige Ionisationskammer lässt sich technisch weiterentwickeln zum Geiger-Müller-Zählrohr (GMZ): Durch einen geeigneten Aufbau wird dabei erreicht, dass man sogar einzelne radioaktive Teilchen registrieren kann.

Versuch 2: An einem GMZ wird über einen Verstärker ein Lautsprecher angeschlossen. Bringt man das radioaktive Präparat in die Nähe der Zählrohröffnung, so ist häufiges Knacken zu hören. Entfernt man das Präparat aus dem Raum, so hört das Knacken trotzdem nicht ganz auf.

Beim GMZ wird durch jedes ionisierende Teilchen ein Stromimpuls erzeugt, der am Lautsprecher ein Knackgeräusch verursacht.

Das Knacken ohne Präparat ist auf die natürliche Radioaktivität zurückzuführen, die uns permanent umgibt.

## 1.14 Grundlegende Eigenschaften von $\alpha$ -, $\beta$ - und $\gamma$ -Strahlung

### Lernziele

Die Schüler ...

- wissen, dass  $\alpha$ -Strahlung nur eine Reichweite von wenigen Zentimetern hat und bereits durch ein Blatt Papier vollständig absorbiert wird;
- wissen, dass  $\beta$ -Strahlung eine Reichweite von einigen Metern hat und durch ein mehrere Millimeter dickes Metallblech vollständig absorbiert wird;
- wissen, dass  $\gamma$ -Strahlung eine Reichweite von vielen Metern hat und erst durch dicke Schichten von Blei oder Beton gut abgeschirmt wird;
- wissen, dass man mit einem Magnetfeld die drei Strahlungsarten trennen kann.

### Didaktische Hinweise

Im Folgenden wird ein Versuchsablauf beschrieben, bei dem ein an den meisten Schulen vorhandenes Radium-Präparat verwendet wird, welches alle drei Strahlungsarten aussendet. Daher bietet sich in der Vorgehensweise eine Reihenfolge an, bei der nacheinander die  $\alpha$ - und die  $\beta$ -Strahlung ausgeblendet werden, bis am Schluss nur noch die  $\gamma$ -Strahlung übrig ist.

### Hinweise zu Experimenten

Es gibt GMZ, die für  $\alpha$ - und  $\beta$ -Strahlung getrennte Messmodi besitzen. Damit würden sich die Versuchsdurchführungen im Vergleich zur beschriebenen Variante wesentlich vereinfachen. Da aber viele Schulen nicht über ein derartiges Gerät verfügen, wird hier nicht weiter darauf eingegangen.

Das unterschiedliche Verhalten der drei radioaktiven Strahlungsarten in einem Magnetfeld lässt sich in einem einzigen Experiment darstellen: Dazu benötigt man einen Elektromagneten (2 Spulen mit Eisenkern und Polschuhen) und ein Radium-Präparat, das so ausgerichtet wird, dass seine Strahlungsrichtung senkrecht zur Magnetfeldrichtung steht (z. B. Strahlungsrichtung von hinten nach vorne, Magnetfeldrichtung von links nach rechts). Es werden Messungen mit und ohne Magnetfeld bei Positionierung des GMZ in Geradeausrichtung und nach oben/unten versetzt durchgeführt.

### Literatur und Medien

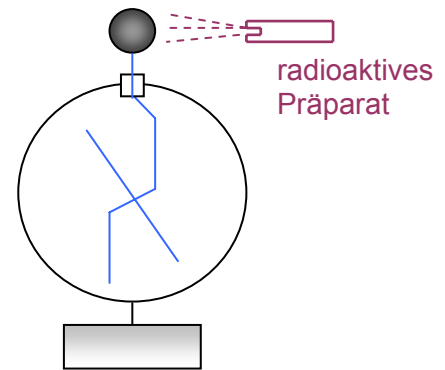
Einen umfangreichen tabellarischen Überblick über die verschiedenen Eigenschaften der drei Strahlungsarten findet man unter [[www\\_Strahlungsarten/leifi](http://www_Strahlungsarten/leifi)].

## Unterrichtsinhalte

**Versuch 1:** Bringt man das Radium-Präparat in die Nähe eines geladenen Elektroskops, so geht der Elektroskop-ausschlag schneller als ohne Präparat zurück. Wiederholt man den Versuch in einem Abstand von 10 cm zwischen Präparat und Elektroskop, so ist kein Unterschied zur Versuchsdurchführung ohne Präparat mehr festzustellen.

Das Gleiche beobachtet man, wenn das Präparat zwar nahe am Elektroskop ist, aber zwischen beide ein Blatt Papier gehalten wird.

Der analoge Versuchsausgang ergibt sich unter Verwendung eines GMZ mit angeschloss-nem Impulszählgerät: Bei einem Abstand Präparat – GMZ von wenigen Zentimetern erhält man ohne Papier eine sehr hohe Zählrate, während sie mit Papier deutlich zurückgeht, aber immer noch deutlich größer als der Nulleffekt ist.



Radioaktive Strahlung kann u. a. aus so genannten  $\alpha$ -Teilchen ( $\alpha$ -Strahlung) bestehen.  $\alpha$ -Teilchen werden von einem Blatt Papier bereits vollständig absorbiert, haben in Luft eine Reichweite von wenigen Zentimetern und werden auf Grund ihrer positiven Ladung in einem starken Magnetfeld abgelenkt.

**Versuch 2:** Ein GMZ wird wenige Dezimeter von einem Präparat entfernt aufgestellt, das durch ein Blatt Papier abgeschirmt ist. Die Zählrate wird anschließend gemessen. Verwendet man zusätzlich ein starkes Magnetfeld senkrecht zur Strahlungsrichtung, so nimmt die Zählrate ab.

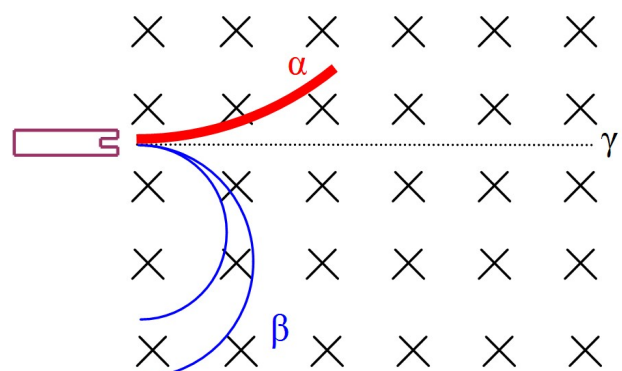
Schaltet man das Magnetfeld ab, bringt dafür aber eine wenige Millimeter dicke Aluminiumplatte ein, so geht die Zählrate nochmals deutlich zurück.

Eine zweite Art radioaktiver Strahlung besteht aus Elektronen. Sie heißt  $\beta$ -Strahlung, wird von einer wenige Millimeter starken Aluminiumplatte vollständig absorbiert und hat in Luft eine Reichweite von wenigen Metern. Auf Grund ihrer negativen Ladung wird  $\beta$ -Strahlung in einem Magnetfeld entgegengesetzt zur  $\alpha$ -Strahlung abgelenkt.

**Versuch 3:** Man bringt zwischen Radium-Präparat und GMZ (Abstand wenige Zentimeter) eine wenige Millimeter starke Aluminium-Platte: Die Zählrate ist geringer als mit Papier, aber immer noch deutlich größer als der Nulleffekt. Wirkt nun zusätzlich zwischen Aluminiumplatte und GMZ ein starkes Magnetfeld, so ändert sich die Zählrate nicht. Auch extra eingebrachte, 1 mm dicke Bleiplättchen schwächen die verbliebene Zählrate nicht mehr merklich.

Die dritte Art radioaktiver Strahlung ist eine ebenfalls unsichtbare und durchdringende elektromagnetische Strahlung wie die Röntgenstrahlung. Sie heißt  $\gamma$ -Strahlung und wird erst durch dicke Blei- oder Betonschichten gut absorbiert. Sie ist ungeladen und hat eine Reichweite von vielen Metern in Luft.

In einem starken Magnetfeld kann man die drei Strahlungsarten voneinander trennen:



## 1.15 Entstehung von $\alpha$ -, $\beta$ - und $\gamma$ -Strahlung – Kernzerfälle

### Lernziele

Die Schüler ...

- kennen zu jeder der drei Strahlungsarten eine grundlegende Reaktionsgleichung;
- wissen, dass beim  $\alpha$ -Zerfall schwere Kerne auf Grund der elektrostatischen Abstoßung der Protonen einige Nukleonen abgeben und dadurch stabiler werden;
- wissen, dass sich beim  $\beta$ -Zerfall ein Neutron eines Kerns mit relativ großer Neutronenzahl in ein Proton und ein Elektron verwandelt und der Kern dadurch stabiler wird.

### Didaktische Hinweise

Ausgehend von den experimentellen Ergebnissen der vergangenen Unterrichtsstunde soll nun eine genauere Beschreibung jener Vorgänge gegeben werden, die zur Aussendung der einzelnen Strahlungsarten führen. Da man hier selbstverständlich nicht mehr auf direkte Beobachtung im Experiment zurückgreifen kann, werden zur Veranschaulichung Computersimulationen benutzt. Um die jeweiligen Reaktionsgleichungen nachzuvollziehen bzw. zu finden, kann z. B. ein PSE zur Hilfe genommen werden. Als konkrete Beispiele für die einzelnen Zerfallsarten wurden gewählt:

- der  $\alpha$ -Zerfall von Ra 226, da im Unterricht häufig ein derartiges Präparat verwendet wird;
- der  $\beta$ -Zerfall von Cs 137, da dieses künstliche Spaltprodukt von Kernreaktionen vor allem durch die radioaktive Belastung nach dem Reaktorunglück von Tschernobyl bekannt wurde, wobei das beim  $\beta$ -Zerfall ebenfalls ausgesandte Antineutrino nur kurz erwähnt werden sollte;
- der  $\gamma$ -Zerfall von angeregtem Ba 137 als Folgezerfall des  $\beta$ -Zerfalls von Cs 137.

### Literatur und Medien

Eine kleine Animation zum  $\alpha$ - und  $\beta$ -Zerfall gibt es bei [www\_ $\alpha$ -und- $\beta$ -Zerfall/leifi].

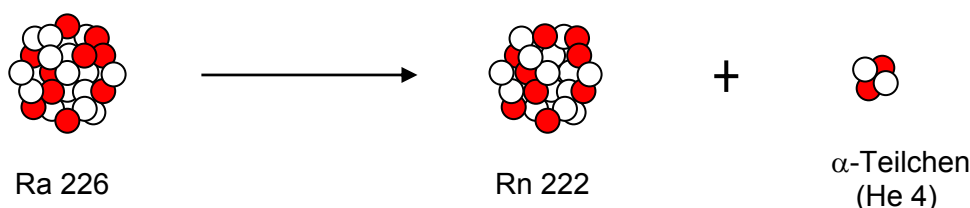
Bildliche Darstellungen zu  $\alpha$ -,  $\beta$ - und  $\gamma$ -Zerfällen sowie weiteres Bild- und Datenmaterial findet man in [Volkmer] .

### Unterrichtsinhalte

#### Die Entstehung der radioaktiven Strahlung – $\alpha$ -Strahlung

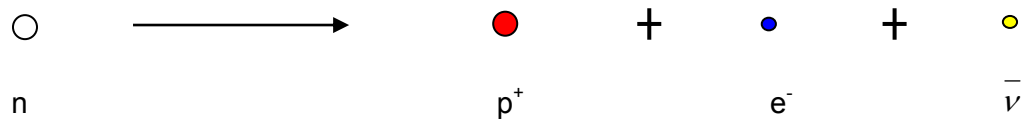
Da ein  $\alpha$ -Teilchen aus zwei Neutronen und zwei Protonen besteht, können diese nur aus dem Kern und nicht aus der Hülle eines Ausgangsatoms stammen. Da Kerne mit einer hohen Ordnungszahl durch die gegenseitige Abstoßung der zahlreichen Protonen relativ instabil sind, wird durch Abgabe eines  $\alpha$ -Teilchens die Stabilität erhöht. Da sich beim  $\alpha$ -Zerfall die Protonenzahl um zwei verringert, entsteht ein anderes chemisches Element.

Beispiel: Radium 226 geht durch  $\alpha$ -Zerfall in Radon 222 über:



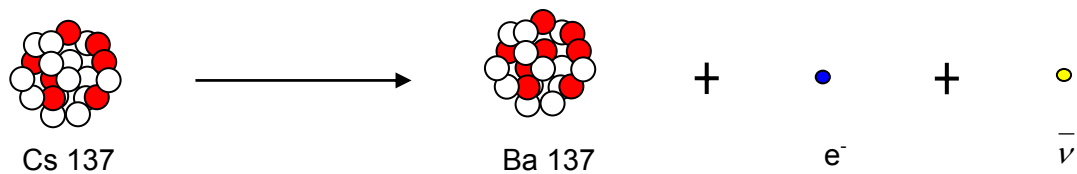
$\beta$ -Strahlung

Das ausgesandte Elektron wird erst kurz vor seiner Aussendung im Kern gebildet, und zwar durch Umwandlung eines Neutrons in ein Proton, ein Elektron und ein Antineutrino:



Hierdurch wächst beim  $\beta$ -Zerfall die Protonenzahl um eins; auch hier entsteht ein anderes chemisches Element.

Beispiel: Cäsium 137 geht durch  $\beta$ -Zerfall in Barium 137 über:



$\beta$ -Zerfall tritt v. a. bei Kernen mit einem deutlichen Neutronenüberschuss auf und sorgt dafür, dass sich Protonenzahl und Neutronenzahl einander annähern.

Das Antineutrino ist ungeladen und hat, wie man aus Experimenten weiß, eine selbst gegenüber dem Elektron vernachlässigbar kleine Masse.

 $\gamma$ -Strahlung

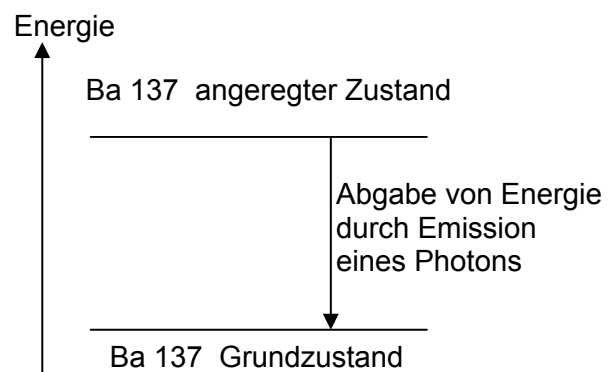
Bei der Entstehung der  $\gamma$ -Strahlung ändert sich weder die Protonenzahl noch die Neutronenzahl, weshalb hier keine Elementumwandlung stattfindet.

Beispiel: Der bei obigem  $\beta$ -Zerfall entstehende Ba 137-Kern ist angeregt (d. h. hat mehr Energie als ein Ba 137-Kern im Grundzustand) und geht unter Aussendung eines  $\gamma$ -Teilchens in den Grundzustand über.

$\gamma$ -Teilchen sind Photonen, die aus dem Kern eine große Portion Energie abtransportieren. Dass die Teilchen nicht aus der Atomhülle kommen können, zeigt ihre große Energie, doch kann man sich ihre Entstehung ganz analog zur Entstehung der Photonen in der äußeren Atomhülle vorstellen: Wie die

Atomhülle kann auch der Atomkern in verschiedenen Anregungszuständen vorliegen.

Beim Übergang von einem höheren in einen niedrigeren Energiezustand wird ein Photon ( $\gamma$ -Teilchen) emittiert, dessen Energie gleich der entsprechenden Energiedifferenz der beiden Energiezustände ist.



## 1.16 Radioaktiver Zerfall und Halbwertszeit

### Lernziele

Die Schüler ...

- wissen, dass der radioaktive Zerfall ein statistisches Phänomen ist und man daher für ein bestimmtes einzelnes Atom keinen Zerfallszeitpunkt vorhersagen kann;
- können die Messwerte eines Experiments oder einer Simulation graphisch auswerten;
- können den Begriff Halbwertszeit anhand eines t-N-Diagramms erklären.

### Didaktische Hinweise

Im Zentrum dieser Unterrichtsstunde steht die quantitative Beschreibung des radioaktiven Zerfalls, aber nicht im Sinne der Herleitung bzw. Behandlung der Formel  $N(t) = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{t/T}$ , sondern ausschließlich graphisch oder in Verbindung mit anschaulichen Überlegungen unter Beschränkung der betrachteten Zeiten auf ganzzahlige Vielfache der Halbwertszeit.

Ein denkbarer Einstieg wäre die Endlagerung von radioaktivem Müll oder die Umweltbelastung nach dem Reaktorunfall von Tschernobyl jeweils verbunden mit der Fragestellung: Wie schnell nimmt die Gefährlichkeit der radioaktiven Strahlung ab?

### Hinweise zu Experimenten

Im folgenden Stundenvorschlag wird auf das Experiment mit dem in eine Ionisationskammer gepumpten Radon (Rn 220) verzichtet und stattdessen eine Würfelcomputersimulation [sim\_Würfel-Simulation\_CD/Atome] in Analogie zum radioaktiven Zerfall verwendet. Dabei entspricht jeder Würfel einem radioaktiven Kern, jeder Wurf entspricht einem festgelegten Zeitintervall (z. B. 1,0 s). Zeigt ein Würfel die Augenzahl „Sechs“, so wird der zugehörige Kern als „zerfallen“ betrachtet. Die einzelnen Parameter der Würfel-Simulation werden im Text zum „Info“-Button des Programms erklärt.

Eine mögliche Durchführung der Simulation des radioaktiven Zerfalls geschieht im Computerraum. Dabei ist die Klasse so unterteilt ist, dass je ein Drittel der Klasse die Anfangswerte 4000 bzw. 6000 bzw. 8000 Würfel wählt, wobei die Schüler in Zweiergruppen arbeiten.

Versuche 1 und 2: Jede Zweiergruppe „misst“ ihre eigene Wertetabelle, wobei folgende gemeinsame Einstellungen gewählt werden:

Anfangswert 4000, 6000 oder 8000 (je nach Einteilung) – üblicher Laplace-Würfel – Zeit pro Schritt 1,0 s – zerfallene Würfel wegnehmen – Ablaufgeschwindigkeit maximal schnell – keine Bestätigungen.

Die Schüler lassen die Simulation ablaufen, klicken, nachdem der letzte Würfel „zerfallen“ ist, auf „Auswertung“ und drucken sich den t-N-Graphen sowie die Wertetabelle aus.

Dann führen die Schüler in Partnerarbeit folgenden Arbeitsauftrag aus: „Nach wie vielen Sekunden waren nur noch die Hälfte (ein Viertel, ein Achtel, ein Sechszehntel) der Würfel „unzerfallen“? Was fällt dir auf?“ Die graphische Lösung (Parallelen zur Zeitachse durch geeignete Anzahlen schneiden die t-N-Kurve, die t-Werte der Schnittpunkte sind die gesuchten Zeiten) führt bei dieser großen Würfelanzahl ziemlich stabil zu Zeitintervallen von 3,8 s.

Im Anschluss daran sollten im Unterrichtsgespräch vor allem zwei Aspekte herausgestellt werden:

Durch Vergleich der Ausdrücke mehrerer Schülergruppen mit der gleichen Anfangszahl ergibt sich, dass zwar jede Gruppe andere Zahlenwerte erhalten hat, aber der graphische Verlauf jeweils sehr ähnlich ist.

Durch Vergleich der Auswertung mehrerer Schülergruppen mit verschiedenen Anfangswerten



ten stellt sich heraus, dass die Zeit für eine Halbierung der Anzahl unabhängig von der Anfangszahl ist.

**Versuch 3:** Wieder arbeitet jede Zweiergruppe separat: Gemeinsame Einstellungen:

Anfangswert 50 Würfel, üblicher Laplace-Würfel, Zeit pro Schritt 1,0 s, schon zerfallene Würfel weiter mit darstellen, Ablaufgeschwindigkeit maximal schnell, jeden Schritt bestätigen. Jeder Schüler wählt einen der 50 Würfel und konzentriert sich während des gesamten Ablaufs auf diesen einen „Kern“: Bei welchem Schritt zerfällt er? Diese zweite Versuchsdurchführung liefert i. Allg. bei beiden Schülern einen völlig anderen Wert.

### Unterrichtsinhalte

Die Kurve zeigt die mit Hilfe einer Ionisationskammer gemessene Anzahl radioaktiver Radonkerne in Abhängigkeit von der Zeit. Es fällt auf, dass nach etwa einer Minute nur noch etwa die Hälfte der ursprünglich vorhandenen Kerne vorhanden ist, nach etwa zwei Minuten nur noch ein Viertel, nach etwa drei Minuten nur noch ein Achtel usw. – Wie kann man sich das Zustandekommen dieser Halbierung nach immer gleichen Zeitintervallen erklären?

Um den Zerfall radioaktiver Kerne zu verstehen, führt man ein analoges Experiment mit einer großen Anzahl gleichartiger Würfel aus. Dabei entspricht jeder Würfel einem radioaktiven Kern, jeder Wurf entspricht einem festgelegten Zeitintervall (z. B. 1,0 s). Zeigt ein Würfel die Augenzahl „Sechs“, so wird der zugehörige Kern als „zerfallen“ betrachtet, bei allen anderen Augenzahlen als „unzerfallen“.

**Versuch 1:** siehe Hinweise zu Experimenten

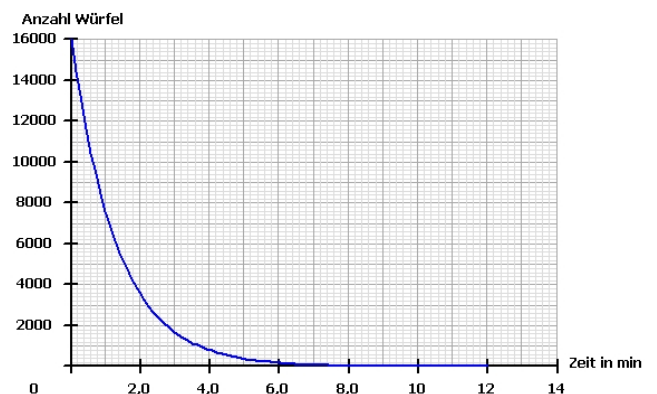
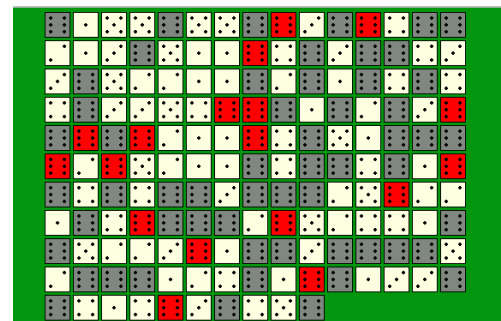
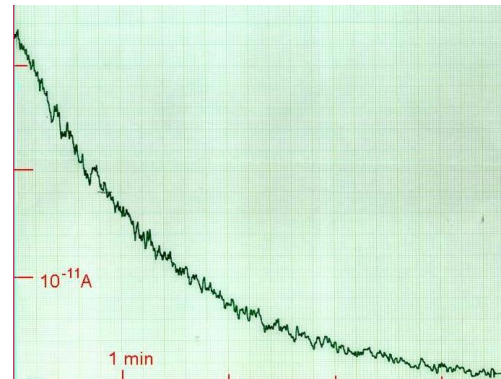
Wie beim radioaktiven Zerfall stellt man nach einem bestimmten Zeitintervall immer eine Halbierung der Anzahl der zu Beginn des Intervalls vorhandenen Kerne fest. Man nennt diese charakteristische Zeit daher Halbwertszeit. Sie ist unabhängig von der ursprünglichen Anzahl. Dies führt zu einer einfachen Beschreibung des Zerfalls von  $N_0$  Kernen: Von einer ursprünglichen Anzahl  $N_0$  von Kernen sind nach 1, 2, 3, .... Halbwertszeiten nur noch  $(1/2)^1 N_0$ ,  $(1/2)^2 N_0$ ,  $(1/2)^3 N_0$  ... unzerfallene Kerne vorhanden.

**Versuch 2:** Falls noch Zeit: nochmalige Durchführung wie bei Versuch 1, aber mit anderer Trefferwahrscheinlichkeit.

Arbeitsauftrag: Bestimme die Halbwertszeit bei der vorliegenden Zerfallskurve!

**Versuch 3:** Nochmalige Verwendung der Simulation: „Wann zerfällt ein ausgewählter Kern?“

Man kann zwar angeben, wie viele unzerfallene Kerne von anfangs  $N_0$  Kernen nach einer bestimmten Zeit noch zu erwarten sind, aber nicht, zu welchem Zeitpunkt ein einzelner Kern zerfällt.





## 1.17 Zerfallsgesetz und Altersbestimmung (Vertiefung 1)

### Lernziele

Die Schüler ...

- wissen, wie man mit Hilfe der Halbwertszeit eines Nuklids auf das Alter einer Probe schließen kann, die das Nuklid enthält;
- können die Radiocarbonmethode (C 14-Methode) zur Altersbestimmung erklären.

### Didaktische Hinweise

Die Schüler haben eine graphische Darstellung des Zerfallsgesetzes bereits kennengelernt und können aus einem typischen Zerfallsdiagramm den Zusammenhang zwischen der Anzahl der bereits zerfallenen Kerne und dem Alter der Probe herstellen. In dieser Stunde soll den Schülern die Relevanz dieser Möglichkeit für die Altersbestimmung von Materialien vermittelt werden. Als konkretes Anwendungsbeispiel bietet sich die Radiocarbonmethode (C 14-Methode) an, da der durch sie mit großer Genauigkeit abgedeckte Zeitraum (ca. die letzten 14 000 Jahre) zweifellos der für den kulturellen Teil der Menschheitsgeschichte wichtigste ist. Da die Schüler die mathematischen Methoden zur Auflösung des Zerfallsgesetzes nach der Zeit noch nicht besitzen, wird nur die graphische Lösung behandelt.

Zur C 14-Methode: Die kosmische Strahlung setzt bei Stößen mit Atomkernen in der Atmosphäre ständig Neutronen frei. Diese Neutronen wandeln den vorhandenen Stickstoff N 14 in das radioaktive Kohlenstoffisotop C 14 um, das dann mit Sauerstoff radioaktives  $^{14}\text{CO}_2$  bildet und von den Pflanzen wie das stabile  $^{12}\text{CO}_2$  aufgenommen wird. Durch die permanente neue Produktion von C 14 und den gleichzeitigen Zerfall zurück zu N 14, stellt sich in der Atmosphäre ein konstantes Verhältnis zwischen dem stabilen C 12 und C 14 ein:

$N_0(\text{C } 14) : N_0(\text{C } 12) = 1 : 8,3 \cdot 10^{11}$ . Die natürlichen Schwankungen dieses Verhältnisses über die letzten 14 000 Jahre hinweg sind bekannt. Auch die von Menschenhand durch oberirdische Atomwaffentests in den 1950er und 1960er Jahren ausgelöste, dramatische Abweichung kennt man und kann entsprechende Korrekturen in die Überlegungen einbringen.

So lange eine Pflanze lebt, setzt sie  $\text{CO}_2$  um, so dass sich in ihr das bekannte Verhältnis  $N_0(\text{C } 14) : N_0(\text{C } 12)$  nicht ändert. Erst mit ihrem Tod fällt der Stoffwechsel weg und die Anzahl der C 14-Kerne nimmt nach dem bekannten Zerfallsgesetz ab. Bei zu untersuchenden Proben muss dann das aktuelle Verhältnis  $N(\text{C } 14) : N_0(\text{C } 12)$  bestimmt werden (z. B. mittels Massenspektrometrie, siehe [Morgenroth]). Hieraus folgt letztendlich das Verhältnis  $N(\text{C } 14) : N_0(\text{C } 14)$ , mit dem aus dem Zerfallsgesetz die Dauer des betrachteten Zerfallszeitraums berechnet bzw. von den Schülern der 9. Jahrgangsstufe graphisch bestimmt werden kann.

Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit kann die ausführliche Schreibweise der Berechnung mit den verschiedenen Verhältnissen von  $N_0(\text{C } 14)$ ,  $N_0(\text{C } 12)$  etc. auch weggelassen werden und lediglich auf das zu bestimmende Verhältnis  $N(\text{C } 14) : N_0(\text{C } 14)$  eingegangen werden (siehe Kasten bei den folgenden Unterrichtsinhalten).

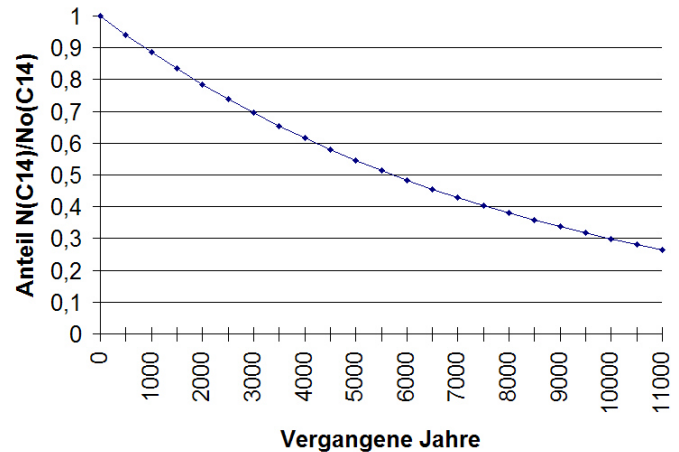
N 13 9,96 m $\beta^+ 1,2$ no $\gamma$	N 14 99,634 $\alpha 0,080$ $\sigma_n, p 1,8$	N 15 0,366 $\alpha 0,00004$
C 12 98,90 $\alpha 0,0035$	C 13 1,10 $\alpha 0,0014$	C 14 5730 a $\beta^- 0,2$ no $\gamma$

### Literatur und Medien

Einen Artikel zur C 14-Methode, der die Anwendung dieser Methode in einen spannenden Kontext um die Entlarvung einer gefälschten Mumie einbindet, findet man bei [Morgenroth]. Zusätzliche Informationen findet man bei [www\_Radiocarbon] und [PTB].

## Unterrichtsinhalte

Das Diagramm zeigt das Zerfallsgesetz in graphischer Form für das radioaktive Kohlenstoffisotop C 14. Das Verhältnis aus der nach einer bestimmten Zeit noch zu findenden Anzahl an C 14-Atomen,  $N(\text{C } 14)$ , zu der anfangs vorhandenen Zahl  $N_0(\text{C } 14)$  sinkt ausgehend von 1 = 100% ab. Man kann daran ungefähr die Halbwertszeit von C 14 ablesen:  $T_{1/2}(\text{C } 14) = 5730$  Jahre. Natürlich kann man mit dem Diagramm für jedes aufgeführte Verhältnis  $N(\text{C } 14)/N_0(\text{C } 14)$  angeben, wie lange es gedauert hat, bis es sich eingestellt hat: 0,9 → ca. 900 Jahre, 0,7 → ca. 3 000 Jahre, 0,3 → ca. 10 000 Jahre etc.



Der radioaktive Zerfall eines Nuklids mit bekannter Halbwertszeit kann als eine Art Uhr verwendet werden, mit der das Alter von archäologischen oder geologischen Fundstücken, die das Nuklid enthalten, bestimmt werden kann. Je nach Größenordnung der Halbwertszeiten der Nuklide können unterschiedlich lange, heute endende Zeiträume betrachtet werden.

### Die Altersbestimmung von organischem Material – C 14-Methode

Das Verhältnis  $N_0(\text{C } 14)/N_0(\text{C } 12)$  in der Atmosphäre ist in den letzten 14 000 Jahren einigmaßen konstant geblieben, da das radioaktive C 14 in der Atmosphäre ständig neu entsteht und auch wieder zerfällt (Gleichgewicht):  $N_0(\text{C } 14) : N_0(\text{C } 12) = 1 : 8,3 \cdot 10^{11}$ . C 14 wird mittels des radioaktiven  $^{14}\text{CO}_2$  von den Pflanzen aufgenommen und gelangt über die Nahrungskette auch in die Körper von Tieren und Menschen. Letztendlich besitzen alle Organismen zu Lebzeiten immer dasselbe Verhältnis aus C 14 und C 12 in sich. Stirbt ein Organismus, so endet sein Stoffwechsel. Das Verhältnis beginnt sich zu ändern, weil C 14 mit einer Halbwertszeit von 5730 Jahren zerfällt:  $N_0(\text{C } 14) \rightarrow N(\text{C } 14)$

$$\frac{N_0(\text{C}14)}{N_0(\text{C}12)} = \frac{1}{8,3 \cdot 10^{11}}$$

Baum lebt

$$\frac{N(\text{C}14)}{N_0(\text{C}12)}$$

Baum stirbt ab

$$\frac{N(\text{C}14)}{N_0(\text{C}12)} \cdot \frac{N_0(\text{C}14)}{N_0(\text{C}12)} = \frac{N(\text{C}14)}{N_0(\text{C}14)}$$

Holz wird nach langer Zeit untersucht

Um nach langer Zeit das Alter des toten Materials zu bestimmen, vergleicht man das aktuelle Verhältnis von C 14 zu C 12 mit dem bekannten Wert der Atmosphäre. Hieraus erhält man das Verhältnis  $N(\text{C } 14)/N_0(\text{C } 14)$ . Mit Hilfe des Zerfallsgesetzes kann man damit die seit dem Absterben des Organismus vergangene Zeit (das „Alter“) bestimmen.

### Beispiel „Die falsche Mumie“

Physiker sollten im Jahr 2001 das genaue Alter einer angeblich 2500 Jahre alten Mumie mit der C 14-Methode bestimmen. Bei einem Alter von 2500 Jahren müsste das Verhältnis  $N(\text{C } 14)/N_0(\text{C } 14)$  in etwa 0,74 betragen. Die Physiker stellten allerdings einen Wert sehr nahe bei 1 fest. Sie maßen noch einmal sehr genau nach und fanden heraus, dass die „Mumie“ frühestens im Jahre 1996 gestorben sein konnte! Sie war eine Fälschung.

## 1.18 Grundzüge der biologischen Strahlenwirkung

### Lernziele

Die Schüler ...

- wissen, dass radioaktive Strahlung durch Ionisation Körperzellen schädigen kann;
- kennen die Faktoren, die das Ausmaß der Schädigung beeinflussen;
- kennen Grundregeln des Strahlenschutzes;
- sind für einen verantwortungsbewussten Umgang mit radioaktiven Stoffen sensibilisiert.

### Didaktische Hinweise

Die unterschiedlichen Mechanismen der Zellschädigung durch radioaktive Strahlung sind sehr vielfältig. Die Schüler sollen in der Unterrichtsstunde hierzu lediglich einen Einblick erhalten. Im Profilbereich am NTG kann z. B. auf nuklearmedizinische Diagnostik oder Strahlentherapie näher eingegangen werden.

Überdies bietet die Unterrichtsstunde eine gute Möglichkeit, mit dem Fach Biologie im Rahmen der Themenbereiche „Grundlagen der Genetik“ und „Immunsystem“ zusammenzuarbeiten.

Am Beispiel des Lebens von Madame Curie können Nutzen und Gefahren der radioaktiven Strahlung motivierend erläutert werden. Die Schüler sollen über die Gefahren der radioaktiven Strahlung aufgeklärt werden, gleichzeitig aber erfahren, dass Radioaktivität ein natürliches Phänomen ist, an welches sich unser Körper im Lauf der Evolution innerhalb gewisser Grenzen anpassen konnte. Durch den Vergleich der radioaktiven Belastung durch unterschiedliche Expositionen in bestimmten Situationen, lernen die Schüler verantwortungsbewusst-kritisch aber keineswegs hysterisch mit den Gefahren umzugehen, die die radioaktive Strahlung mit sich bringt. Insbesondere darf die Auseinandersetzung mit diesem Thema keine Ängste schüren, die zur Ablehnung von medizinisch gerechtfertigter und notwendiger Strahlenexpositionen führt (vgl. dazu [Umweltministerium\_1, S. 71]). Die Einheit Sievert kann dabei als nicht näher erläutertes „Maß für die radioaktive Belastung eines Menschen“ eingeführt werden. Die unterschiedlichen Belastungen können aber auch in relativen Bezug zur durchschnittlichen, jährlichen Belastung eines Mitteleuropäers gesetzt werden

### Literatur und Medien

Weitere Informationen zur biologischen Strahlenwirkung findet man z. B. in den Schriften: [Umweltministerium\_1], [Umweltministerium\_2] und [Volkmer].

## Unterrichtsinhalte

Marie Curie versuchte als Erste, hoch radioaktive Materialien herzustellen. Obwohl ihr Ehemann Pierre bereits 1903 öffentlich auf mögliche gesundheitliche Gefahren durch die radioaktive Bestrahlung hingewiesen hatte, arbeitete sie über Jahrzehnte hinweg in direktem Kontakt damit. 1934 starb sie an Leukämie, die durch die radioaktive Strahlung ausgelöst wurde.



Radioaktive Strahlung kann beim Auftreffen auf Materie Atome anregen oder ionisieren. Im menschlichen Körper kann dies zur Veränderung einer Zelle führen, z. B. zur Beschädigung von Erbgut im Zellkern.

Das Ausmaß der Schädigung wird durch folgende Faktoren bestimmt:

Art der Strahlung:  $\alpha$ -Strahlung verursacht besonders starke Schädigungen, da die Energie der  $\alpha$ -Teilchen sehr hoch ist und diese außerdem in sehr kleinen Raumbereichen abgegeben wird (das zeigt auch die leichte Abschirmbarkeit durch Papier). Dies führt dazu, dass innerhalb einer Zelle vergleichsweise viele Ionisationen erfolgen, wodurch die betreffende Zelle mit hoher Wahrscheinlichkeit einen irreparablen Schaden erleidet.

Dauer: Je länger eine Strahlung auf den Körper einwirkt, desto größer ist die Schädigung.

Art der Zelle: Je häufiger sich eine Zelle teilt, desto gefährdeter ist sie. Dazu gehören vor allem Zellen Blut bildender Organe wie Knochenmark, Lymphknoten, Darm, Lunge, die weibliche Brust oder der Embryo im Mutterleib in den ersten vier Wochen [Lehrplan → B 9.3].

Die Schädigung einzelner Zellen muss nicht zwangsläufig negative Folgen haben, da Zellen über einen Mechanismus zur Selbstreparatur verfügen. Gelingt die Reparatur nicht, erkennt das Immunsystem unseres Körpers die beschädigten Zellen in der Regel, zerstört sie, scheidet sie aus und ersetzt sie durch neue Zellen [Lehrplan → B 9.4]. Insbesondere bei starker oder lang andauernder Bestrahlung kann das Immunsystem allerdings mit seiner Aufgabe überfordert sein und Fehler machen, so dass veränderte Zellen nicht erkannt oder nicht wirksam vernichtet werden. Dann treten unmittelbar nach einer Strahlenbelastung oder auch erst viele Jahre später verschiedene so genannte „Strahlenschäden“ auf.

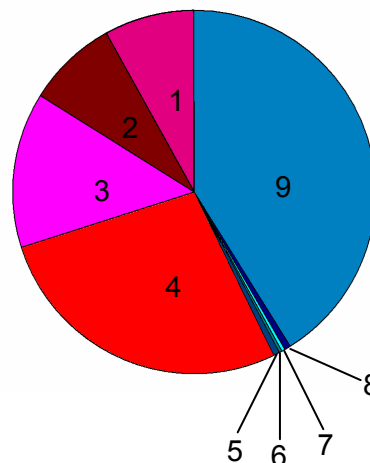


Zum Schutz gegen schädliche Folgen radioaktiver Strahlung ist die Regel der Fünf **A**'s zu beachten: **A**bstand erhöhen, **A**bschirmung verstärken, **A**ufenthaltsdauer verkürzen, **A**ktivität verkleinern, **A**ufnahme (in den Körper) vermeiden.

Wie groß die Gefahr durch eine künstliche Strahlenexposition ist, lässt sich nur im Vergleich mit der natürlichen radioaktiven Strahlung einschätzen (ausführlich unter [Tabelle\_Strahlenbelastung\_CD/Atome]). Die durchschnittliche Strahlenbelastung in Deutschland beträgt ca. 3,7 mSv pro Jahr.

Abb. rechts:

Natürliche Strahlenbelastung (rottöne)  
Künstliche Strahlenbelastung (blautöne)



1	Kosmische Strahlung	8,0 %
2	Sonstige innere nat. Strahlenbelastung	8,0 %
3	Sonstige äußere nat. Strahlenbelastung	14,0 %
4	Einatmen von Radon	27,1 %
5	Folgen des Tschernobylunfalls	0,6 %
6	Kernkraftwerke (Normalbetrieb)	0,3 %
7	Atomwaffentests	0,3 %
8	Sonstige künstliche Strahlenbelastung	0,6 %
9	Medizinische Anwendungen	41,1 %

## 1.19 Radioaktive Strahlung in Medizin und Technik

### Lernziele

Die Schüler...

- wissen und verstehen, dass Radioaktivität für den Menschen nutzbar gemacht werden kann;
- kennen einzelne Beispiele von Einsatzmöglichkeiten radioaktiver Strahlung in Medizin, Wissenschaft und Technik.

### Didaktische Hinweise

Im Vorschlag für den Unterrichtsverlauf sind zwei typische Möglichkeiten zur technischen Nutzung radioaktiver Strahlung ausgeführt, die in Form von zu Hause vorbereiteten Schülerreferaten behandelt werden können. Es ist auch denkbar, die Schüler selbst Beispiele der Nutzung radioaktiver Strahlung finden und in Form eines Posters darstellen zu lassen. Wenn die Schüler bereits mehr Erfahrung mit einer Internetrecherche haben, kann ein Arbeitsauftrag ohne Empfehlung einer Internetseite gegeben werden. Falls die Erfahrungen gering sind, kann ein Hinweis auf eine spezielle Internetseite gegeben werden. Das Thema eignet sich sehr für eine Unterrichtsform, bei der die Schüler selbst die Informationen einbringen.

### Hinweise zum Experiment

Zur Veranschaulichung kann mit Hilfe eines geeigneten, radioaktiven Präparats (i. d. R.  $\beta$ -Strahler) ein Demonstrationsversuch zur Schichtdickenmessung aufgebaut werden. Dazu muss in einer separaten Messreihe ein Diagramm aufgenommen werden, aus welchem der Zusammenhang zwischen der durchdrungenen Schichtdicke eines Materials und der zugehörigen Zählrate bei Verwendung eines bestimmten Präparats hervorgeht. Wird bei einer Materialprobe unbekannter Dicke eine bestimmte Zählrate registriert, kann über das vorliegende Diagramm oder die Messwerttabelle die Schichtdicke ermittelt werden.

Als Versuchsmaterial eignet sich Aluminium.

### Literatur und Medien

Eine ausführliche Zusammenstellung verschiedener Anwendungen der Radioaktivität findet man unter [[www\\_Anwendungen\\_Radioakt/leifi](http://www_Anwendungen_Radioakt/leifi)].

## Unterrichtsinhalte

Die Eigenschaften radioaktiver Strahlung werden in unterschiedlichen Fachbereichen ausgenutzt:

Medizin:	Diagnostik (Szintigramm, PET), Abtötung von Tumoren u. a.
Biologie:	Untersuchung von Stoffwechselvorgängen
Technik:	Radionuklidbatterien (z. B. für Weltraummissionen), berührungslose Dickemessung, Untersuchung von Schweißnähten
Chemie:	Materialanalyse

### Beispiele:

#### Die „Madonna del Roseto“

Die chemische Zusammensetzung der „Madonna del Roseto“ (von Luca Della Robbia, 15. Jahrhundert, Florenz) wird mit Hilfe eines tragbaren Röntgenmessinstruments bestimmt. Im Instrument befindet sich ein radioaktives Präparat, das  $\alpha$ -Teilchen emittiert, welche auf die Oberfläche der Statue treffen. Dadurch werden die Atome an der Oberfläche zur Emission von Röntgenstrahlen angeregt, denn Röntgenstrahlung kann nicht nur mit Hilfe schneller Elektronen, sondern auch durch andere, hoch energetische Teilchen erzeugt werden. Da die inneren Elektronen eines Atoms bei der chemischen Bindung praktisch keine Rolle spielen, sieht das Röntgenspektrum, das eine bestimmte Atomsorte aussendet, stets gleich aus, unabhängig davon, ob das betreffende Atom an andere Atome gebunden ist oder nicht. Die Röntgenspektren vieler Atomsorten sind gut bekannt. Durch Vergleich der Messdaten mit den bekannten Spektren kann so genau ermittelt werden, welche Atomsorten sich in welcher Konzentration in der Oberflächenschicht der Madonna befinden.



Mit freundlicher Genehmigung des INFN

### Lecksuche

Bei einer unterirdischen Wasser- oder Ölleitung kann zwar leicht herausgefunden werden, dass ein Leck vorhanden ist, aber nicht unbedingt wo. Um dies festzustellen, wird ein relativ kurzlebiges  $\gamma$ -Präparat dem Wasser bzw. Öl beigemischt. An der Stelle des Lecks tritt Flüssigkeit und damit auch radioaktives Material aus – dort sammelt es sich also. Mit einer geeigneten Messanordnung, z. B. einem empfindlichen GMZ, kann überirdisch eine erhöhte Radioaktivität festgestellt werden, sofern das Präparat  $\gamma$ -Strahlung aussendet.  $\alpha$ - und  $\beta$ -Strahler sind in diesem Zusammenhang nicht geeignet, da sie vollständig in der Erde absorbiert werden. Mit dieser Methode kann das Leck schnell gefunden und repariert werden. Beim Präparat ist aber darauf zu achten, dass keine langlebigen Isotope verwendet werden, da sonst das Öl bzw. das Wasser längerfristig radioaktiv belastet würde. Sind die verwendeten Präparate und ihre Folgeprodukte entsprechend kurzlebig, weisen Wasser bzw. Öl nach kurzer Zeit keine überhöhten Strahlungswerte mehr auf.





## 1.20 Kernspaltung und Kernfusion – grundlegende Reaktionen

### Lernziele

Die Schüler ...

- kennen und verstehen je eine grundlegende Reaktionsgleichung für die Kernspaltung und für die Kernfusion;
- wissen, dass sowohl bei der Spaltung sehr schwerer Kerne als auch bei der Fusion sehr leichter Kerne Energie freigesetzt wird.

### Didaktische Hinweise

In Anknüpfung an die vorangegangenen Unterrichtsstunden, in denen die Entstehung neuer Elemente beim  $\alpha$ - und  $\beta$ -Zerfall behandelt wurden, sind nun die Vorgänge der Spaltung und der Fusion Lerninhalt, die z. B. anhand von Simulationen vorgestellt werden können. Anschließend werden die Reaktionsgleichungen und bildlichen Darstellungen besprochen und fixiert. Dabei wird den Schülern mitgeteilt, dass bei beiden Prozessen Energie frei wird. Der exakte graphische Verlauf der Bindungsenergie pro Nukleon in Abhängigkeit von der Nukleonenzahl soll an dieser Stelle aber nicht diskutiert werden.

Der häufigste Fusionsprozess in der Sonne ist die so genannte p-p-Kette.

Die Sonne besteht hauptsächlich aus Wasserstoff. Im Sonneninneren herrscht wegen der hohen Dichte und des großen Drucks eine Temperatur von etwa 15 Millionen Kelvin. Bei derartig hohen Temperaturen sind alle Atome vollständig ionisiert (d.h. sie haben alle Elektronen abgegeben und bilden ein Plasma), alle Teilchen haben sehr große Geschwindigkeiten.

Im Detail laufen dabei drei Fusionen hinter- bzw. nebeneinander ab: Die Fusion zweier Protonen zu Deuterium, die Fusion von Deuterium und einem Proton zu Helium 3 und die Fusion zweier Helium-3-Kerne zu Helium 4 und zwei Protonen, wobei bei der letzten Reaktion der Großteil der Energie freigesetzt wird. Die angegebene Simulation zeigt alle Teilschritte einzeln und thematisiert auch die Zerstrahlung der beiden entstehenden Positronen mit zwei Elektronen. Es ist aber nicht nötig, diese beiden Aspekte im Unterricht zu vertiefen. Es sollte lediglich festgehalten werden, dass sich im Zentralbereich der Sonnen in der Bilanz vier Wasserstoffatome zu einem Heliumatom vereinigen. Die beiden Neutrinos, deren Masse deutlich unter der Elektronenmasse liegt, können dabei vernachlässigt werden. Auf diese Weise muss das Positron als weiteres Teilchen nicht eingeführt werden, doch selbstverständlich ist es auch möglich, die Fusionsreaktion genauer zu besprechen und das Positron zu thematisieren.

Der zweite wichtige Fusionsprozess ist die d-t-Fusion (Deuterium + Tritium  $\rightarrow$  Helium 4 + Neutron), die beim Betrieb von Fusionsreaktoren eine entscheidende Rolle spielt. Auch hierzu ist eine Simulation verfügbar, doch geht die etwas einfachere didaktische Struktur leider mit einem deutlich geringeren Anwendungsbezug einher.

### Literatur und Medien

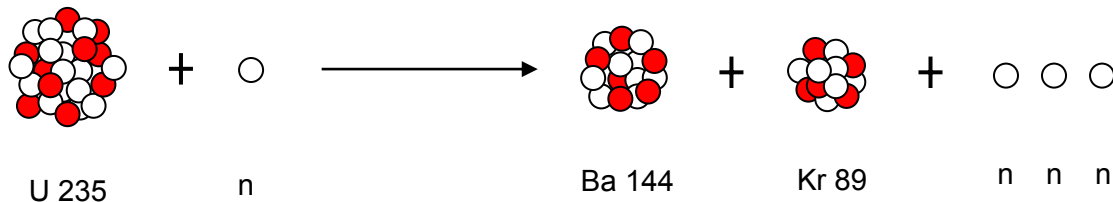
Die oben genannte Simulation zur Kernspaltung ist unter [[www\\_Kernspaltung/leifi](http://www_Kernspaltung/leifi)], die zur d-t-Fusion unter [[www\\_DT-Fusion/leifi](http://www_DT-Fusion/leifi)] und die zur p-p-Kette unter [[www\\_PP-Fusion/leifi](http://www_PP-Fusion/leifi)] zu finden. Weitere Informationen zum Fusionsexperiment ITER findet man unter [[www\\_ITER](http://www_ITER)].



## Unterrichtsinhalte

Die Kernspaltung wurde 1938 von Otto Hahn und Fritz Straßmann entdeckt. Sie beschossen Uran-235-Kerne mit Neutronen mit dem Ziel, größere Kerne zu erhalten. Tatsächlich ergaben sich aber Kerne mittlerer Nukleonenzahlen als Produkte. Darüber hinaus entstanden pro Spaltreaktion mehrere neue Neutronen.

Beispiel: Bei der Spaltung können z. B. ein Barium- und ein Kryptonkern (Ba, Kr) sowie drei Neutronen entstehen:

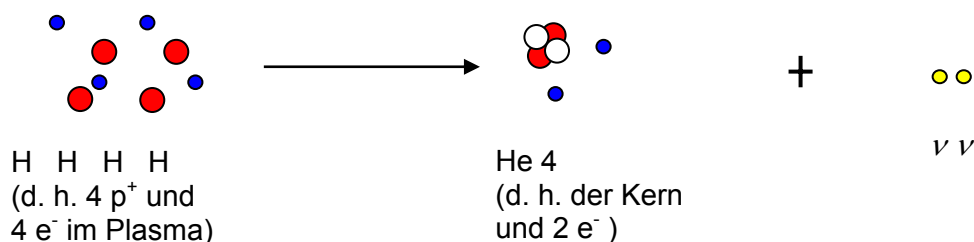


Ein Urankern spaltet sich i. d. R. nicht spontan, sondern benötigt dafür die Zufuhr einer gewissen Energiemenge. Als besonders geeignet für die Übertragung dieser Energiemenge haben sich langsame Neutronen erwiesen, weil sie nicht durch die Coulombkraft der Kernprotonen abgestoßen werden und sich dem Kern deshalb leicht nähern können.

Bei jedem Spaltvorgang wird nach oben stehender Reaktion insgesamt eine Energiemenge von etwa 170 MeV frei, wobei die neu entstandenen Barium und Krypton Kerne radioaktiv sind und nach einer gewissen Zeit ihrerseits hochenergetische Teilchen aussenden. Die Energie liegt weitgehend in Form von Bewegungsenergie der Spaltprodukte vor, die ihre Bewegungsenergie letztendlich an das umgebende Wasser abgeben, wodurch sich dieses stark erhitzt.

Die Kernfusion spielt bei der Energieerzeugung in der Sonne die entscheidende Rolle: Dabei nähern sich Protonen im Plasma der Sonne trotz ihrer Coulombabstoßung so weit an, dass die Kernkräfte wirksam werden und es in der Bilanz zu folgender Reaktion kommt, die man als Proton-Proton-Kette bezeichnet:

Vier Wasserstoffatome verschmelzen in der Bilanz zu einem Helium 4-Atom und zwei Neutrinos.



Bei jedem Fusionsvorgang wird bei oben stehender Reaktion insgesamt eine Energiemenge von etwa 28 MeV frei.

Die technische Entwicklung der Kernfusion als Energiequelle befindet sich trotz langjähriger intensiver Forschung in einem Stadium, in dem noch kein Zeitpunkt für die Verfügbarkeit kommerziell nutzbarer Kraftwerke angegeben werden kann. Deshalb stellt die Kernfusion nur eine von mehreren möglichen Optionen für die Energieversorgung in der 2. Hälfte des 21. Jahrhunderts dar.

## 1.21 Kernspaltung und Kernfusion – Energiebetrachtungen

### Lernziele

Die Schüler ...

- wissen, dass die Summe der Massen der Kernbausteine einzeln betrachtet größer ist, als die Masse des aus ihnen zusammengesetzten Atomkerns;
- wissen, dass eine Energiefreisetzung immer mit einer Verringerung der Gesamtmasse der beteiligten Atome verbunden ist;
- kennen die Masse-Energie-Beziehung und ihre Bedeutung und können sie auf einfache Beispiele anwenden.

### Didaktische Hinweise

Wurden in der vorangegangenen Stunde die Vorgänge von Kernspaltung und -fusion anschaulich beschrieben und die Energiefreisetzung erwähnt, ist das Thema dieser Stunde der Zusammenhang zwischen der Energieabgabe und der damit verbundenen Verringerung der Gesamtmasse.

Es werden einige einfache Beispiele berechnet, wobei die beiden Kernprozesse der vorangehenden Stunde wieder aufgegriffen werden. Darüber hinaus werden noch Beispiele makroskopischer Objekte betrachtet. Dabei ist es wichtig, herauszuarbeiten, dass Materie nicht „einfach so“ in Energie umgewandelt werden kann und nicht etwa die Energie von 90 000 GJ aus einem Wassertropfen gewonnen werden kann.

Auf die Einführung der atomaren Masseneinheit  $u$  kann verzichtet werden, da sie an keiner weiteren Stelle im Unterricht der 9. Jahrgangsstufe benötigt wird. Andererseits kennen die Schüler der naturwissenschaftlich-technologischen Ausbildungsrichtung die atomare Masseneinheit  $u$  bereits, so dass es sinnvoll sein kann, die Masseneinheit  $u$  hier aufzugreifen. Ob die Einheit  $u$  eingeführt werden soll, ist im Einzelfall abzuwägen. Der hier angebotene Vorschlag kommt ohne sie aus.

### Unterrichtsinhalte

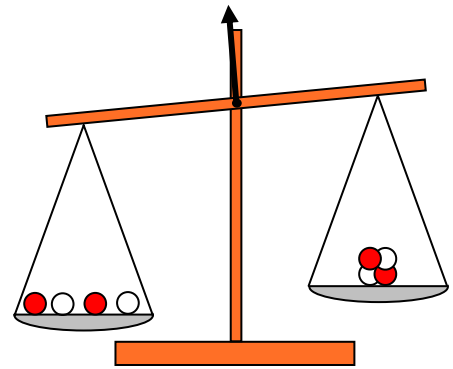
Bestimmt man die Masse von zwei Protonen und zwei Neutronen einzeln, stellt man fest, dass deren Summe etwas größer ist als die Masse eines Heliumkerns.

$$m_N = 1,67493 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

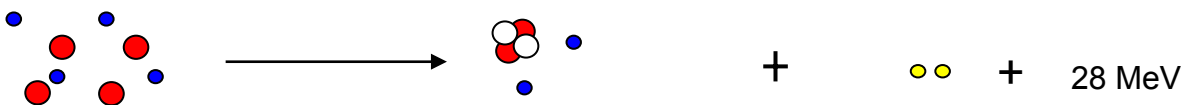
$$m_P = 1,67262 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$m_\alpha = 6,64466 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$(2 m_P + 2 m_N) - m_\alpha = 5,04 \cdot 10^{-29} \text{ kg}$$



Bei einer genaueren Untersuchung des Fusionsprozesses in der Sonne stellt sich ebenfalls heraus, dass sich die Masse der vier Wasserstoffatome durch den Fusionsprozess zu einem Helium 4-Atom um etwa  $5,0 \cdot 10^{-29} \text{ kg}$  verkleinert.



Ebenso verringert sich die Gesamtmasse von U 235 und einem Neutron zu der Gesamtmasse von Ba 144, Kr 89 und drei Neutronen – offenbar geht die Verringerung der Masse mit einer Abgabe von Energie einher.

Albert Einstein hat herausgefunden, dass Masse und Energie gleichwertige Größen sind, also Masse als bestimmte Form von Energie betrachtet werden kann. Dies findet seinen Niederschlag in der berühmten Formel:

$$E = m c^2$$

Demzufolge ist nach Einstein jede Freisetzung von Energie mit einer Massenverringern verbunden. Wird einem System hingegen Energie zugeführt, erhöht sich seine Masse.

Verbinden sich zwei Neutronen und zwei Protonen zu einem Heliumkern, werden dabei einerseits 28 MeV frei. Andererseits ist das auch der Energiebetrag, der einem Heliumkern zugeführt werden müsste, um ihn in seine vier Bestandteile zu zerlegen.

Auf Grund der enormen Größe der Lichtgeschwindigkeit tritt die Änderung der Masse praktisch nur bei kernphysikalischen Prozessen in Erscheinung.

#### Beispiele:

- Die bei jedem Fusionsprozess in der Sonne frei werdende Energie berechnet sich über:  
 $E = m c^2 \approx 5,0 \cdot 10^{-29} \text{ kg} \cdot c^2 = 28 \text{ MeV}$ .
- Verschmilzt 1 g Wasserstoff vollständig zu Helium, erhält man etwa 0,9925 g Helium, wobei eine Energie von  $6,7 \cdot 10^{11} \text{ J}$  frei wird. Das ist größenordnungsmäßig die Energie, mit der man das Empire State Building ( $m = 330\,000 \text{ t}$ ) 200 m hoch heben könnte.
- Die Sonne hat eine Strahlungsleistung von ca.  $3,6 \cdot 10^{26} \text{ W}$ . Dadurch verliert sie jede Sekunde eine Masse von ca. 4 Mio t.
- Könnte man die Masse eines Stecknadelkopfs ( $m \approx 0,1 \text{ g}$ ) vollständig in Energie umwandeln, hätte man eine Energie von 9 000 GJ zur Verfügung. Damit könnte man eine deutsche Kleinstadt ein Jahr lang mit Energie versorgen!
- Ein Kernkraftwerk gibt pro Jahr ca.  $5 \cdot 10^{16} \text{ J}$  elektrische Energie ab. Dafür wird ungefähr ein halbes kg Masse in Energie umgewandelt.

## 1.22 Energiegewinnung in Kernkraftwerken (Vertiefung 2)

### Lernziele

Die Schüler ...

- kennen den Ablauf der Kettenreaktion und die besondere Rolle der Neutronen bei der Kernspaltung;
- kennen die prinzipielle Funktionsweise eines Kernkraftwerks;
- wissen, welche Risiken und welcher Nutzen mit Kernkraftwerken verbunden sind.

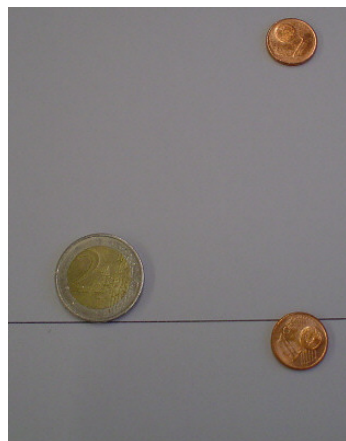
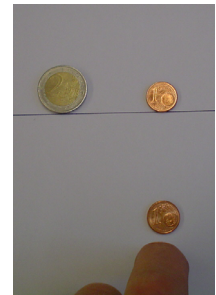
### Didaktische Hinweise

Die Schüler wissen, dass bei der Spaltung eines Atomkerns eine große Energiemenge frei wird. Hier soll die technische Nutzung dieser Energie aufgezeigt werden. Die wesentlichen Lerninhalte sind dabei das Entstehen einer kontrollierten Kettenreaktion durch das Freiwerden und Abbremsen von Neutronen sowie die sich der primären Energiefreisetzung anschließende Energie-Umwandlungskette bis hin zur Abgabe elektrischer Energie. Alle Überlegungen werden beispielhaft an der Kernspaltung von Uran 235 vollzogen. Ein Hinweis auf die Gefahren, die mit der Kernenergie verbunden sind, rundet die Inhalte ab.

Bei der Frage von Schülern, wie die unkontrollierte Kettenreaktion im Kernkraftwerk verhindert wird, kann auf die verzögerten Neutronen eingegangen werden.

### Hinweise zu Experimenten

In Analogieexperimenten können sowohl die Kettenreaktion als auch die Moderation der Neutronen veranschaulicht werden. Für die Kettenreaktion können Dominosteine einmal hintereinander (kontrollierte Kettenreaktion) und einmal hierarchisch ansteigend angeordnet werden (unkontrollierte Kettenreaktion). Dass die Moderation bzw. das Abbremsen der schnellen Neutronen am besten mit Teilchen ähnlicher Masse erfolgt, kann durch das „Schnippen“ von Münzen gezeigt werden (vgl. Abbn.). Die von unten kommende 1 ct-Münze verliert beim Stoß mit der 1 ct-Münze die meiste Energie (sie kommt sofort nach der Stoßlinie zum Liegen). Beim Stoß mit der 2 €-Münze prallt sie weit zurück, sie hatte also unmittelbar nach dem Stoß noch viel kinetische Energie.



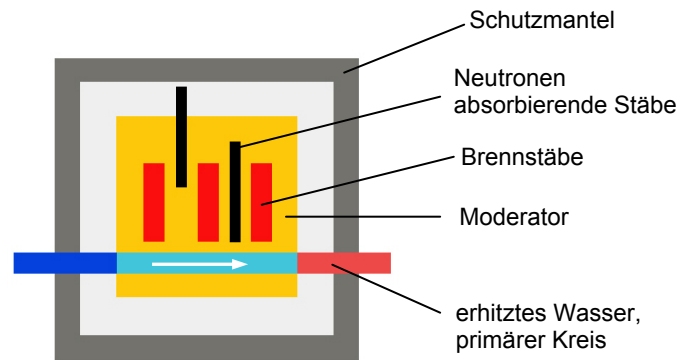
### Literatur und Medien

Zu den Themen Kernreaktionen und Kernenergie findet man nicht nur in der Fachliteratur, sondern auch in zahlreichen Broschüren bzw. Publikationen der Energiewirtschaft umfassendes Material für den Unterricht. Viele dieser Quellen, auch solche im Internet, stellen die Inhalte in einer für Schüler der 9. Jahrgangsstufe gut verständlichen Form dar. Siehe dazu [BA\_Strahlenschutz\_05], [BA\_Strahlenschutz\_06], und [www\_Info\_Kernenergie]. Simulationen zur Kettenreaktion findet man unter [www\_Kettenreaktion/leifi] und [www\_chain].

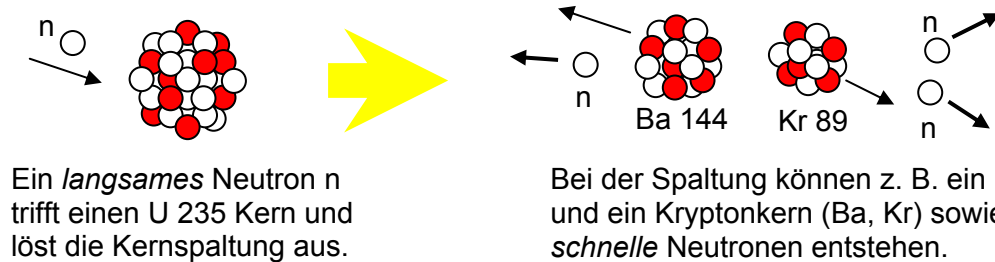
## Unterrichtsinhalte

In Kernkraftwerken wird die Kernspaltung zur Energiegewinnung technisch genutzt (vgl. Abb. rechts, Funktionsprinzip). Der Spaltungsprozess findet in den so genannten Brennstäben statt, die große Mengen Uran enthalten (z. B. 50000 Brennstäbe mit insgesamt ca. 100 t Uran).

In den Brennstäben befinden sich 3 % spaltbares U 235 und 97 % U 238. Fängt ein U-235-Kern ein langsames Neutron ein, wird er gespalten. Bei der Spaltung des U-235-Kerns werden aber zwei bis drei schnelle Neutronen und eine nutzbare Energie von etwa 190 MeV frei.

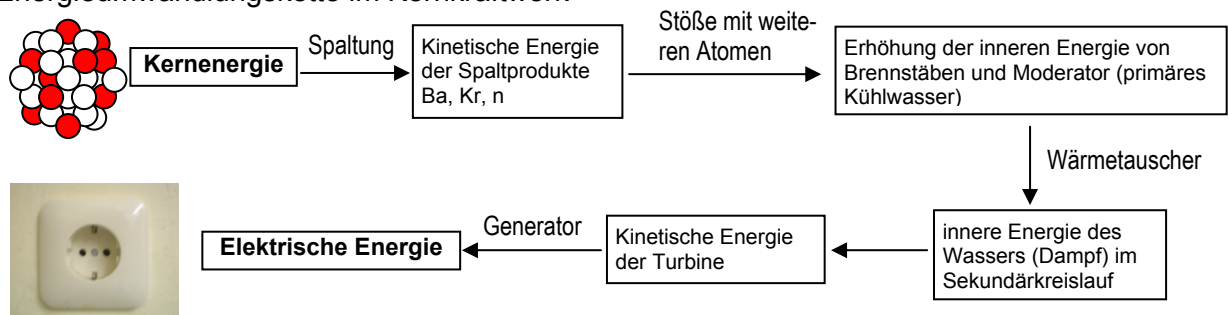


Jede Kernspaltung setzt Neutronen frei. Diese können wieder eine Spaltung auslösen, wodurch eine Kettenreaktion entstehen kann. Zum Auslösen einer Kernspaltung können aber nur langsame Neutronen genutzt werden. Die schnellen Neutronen aus der künstlichen Kernspaltung müssen erst abgebremst werden, bevor sie eine weitere Spaltung auslösen.



Die schnellen Neutronen werden in einem so genannten Moderator abgebremst. Am besten ist hierzu der fast gleich schwere Wasserstoff geeignet (vgl. „Experiment mit Münzen“). Die Regelung im Normalbetrieb geschieht so, dass eine Kernspaltung im Mittel wieder exakt eine weitere auslöst. Man nennt dies eine kontrollierte Kettenreaktion.

### Energieumwandlungskette im Kernkraftwerk



Die Umwandlung von thermischer Energie in elektrische Energie erfolgt, wie auch bei anderen Kraftwerken, nur mit einem Wirkungsgrad von ca. 34 %. Ein Kernkraftwerk gibt daher immer auch viel Wärme an die Umgebung (z. B. Flüsse) ab.

Die Kernenergie ist nach wie vor mit Problemen der Erzeugung, des Transports und der Endlagerung des radioaktiven Materials und der Gefahr der Kernschmelze verbunden.

## 1.23 Stromversorgung durch verschiedene Energieträger (Vertiefung 3)

### Lernziele

Die Schüler ...

- wissen, dass Umweltverträglichkeit, Versorgungssicherheit und Wirtschaftlichkeit die Grundlagen der Energiepolitik sind;
- wissen, dass man zur Erzeugung der gleichen Menge elektrischer Energie bei der Kernspaltung wesentlich weniger Rohmaterial verwenden muss als bei einem fossilen Energieträger.

### Didaktische Hinweise

Zeitungsberichte über knapp werdende Energievorräte, viel zu hohe CO<sub>2</sub>-Emissionen, steigende Energiepreise, Störfälle in Kernkraftwerken etc. verunsichern Jugendliche. Ausgehend von der Kernenergie werden in dieser vertiefenden Unterrichtsstunde drei verschiedene Energieträger nutzende Kraftwerkstypen bei gleicher elektrischer Leistung bezüglich ihrer wesentlichen Vor- und Nachteile verglichen (Kernenergie, Steinkohle, Windenergie). Die Schüler können ihr bisher erworbenes Wissen zur Kernenergie und physikalisches Vorwissen zu anderen Energieträgern anwenden und dabei erfahren, dass sie mit ihrem Wissen bereits fundierte Überlegungen zur Energieversorgung anstellen und die Diskussionen um die globale Energieversorgung somit fachkundig verfolgen und bewerten können.

Das hier gewählte Thema ist so umfassend, dass es ohne Schwierigkeiten auch für eine ganze Unterrichtssequenz erhalten könnte. Allein der Vergleich verschiedenster Energieträger böte Aspekte genug. Die hier gemachten Vorschläge sind daher ausdrücklich als nur eine von vielen Varianten zu verstehen. Auch bei der Wahl der Unterrichtsform gibt es mehrere Alternativen. So können z. B. Unterrichtsinhalte durch die Schüler in Kleingruppen im Vorfeld außerhalb der Unterrichtszeit selbst recherchiert und z. B. in Plakatform dokumentiert und präsentiert werden.

Da zurzeit nicht absehbar ist, wann die Kernfusion kommerziell zur Energieversorgung zur Verfügung steht, wird sie lediglich kurz als eine in ferner Zukunft liegende Alternative erwähnt.

Die Schüler erkennen, dass die Kernenergie zur Zeit in Deutschland eine bedeutende Rolle für die Energieversorgung spielt, diese Rolle wegen damit einhergehenden Risiken aber auch in Frage gestellt werden muss. Gleiches gilt, insbesondere vor dem Hintergrund des Treibhauseffekts und der damit verbundenen Erderwärmung, für Steinkohle als Energieträger in Bezug auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen. Die zusätzliche realistische Betrachtung der Windenergie mit der prinzipiellen Problematik der zeitlichen Schwankungen des Energieangebotes muss letztendlich zu dem Ergebnis führen, dass auch in Zukunft nur eine Mischung aus verschiedenen Energieträgern einhergehend mit einer erheblichen Steigerung der Energieeffizienz eine Lösung unserer Energieproblematik sein kann. Die technischen Probleme, insbesondere im Bereich der regenerativen Energieträger und der Energieeffizienz, können als ökonomische Chance begriffen werden, dass in einem Land wie Deutschland die passenden Techniken entwickelt werden, die diese Probleme zumindest teilweise lösen helfen.

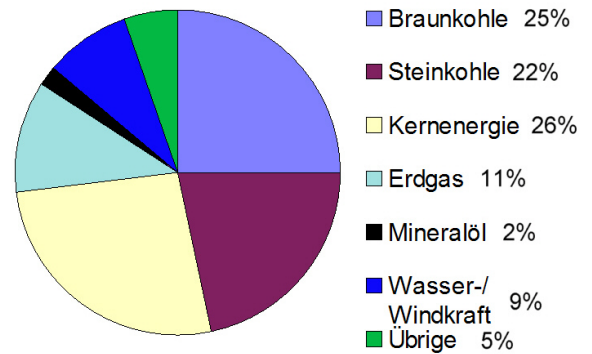
## Unterrichtsinhalte

Das Erreichen einer jeweils maximalen Umweltverträglichkeit, Versorgungssicherheit und Wirtschaftlichkeit ist das Ziel einer zukunftsfähigen Energiepolitik.

Elektrische Energie wird in Deutschland aus verschiedenen Energieträgern gewonnen. Der Bedarf an elektrischer Energie betrug im Jahr 2005 ca. 2,2 EJ (ca. 620 Mrd. kWh), siehe Diagramm rechts.

Betrachtet man jeden Energieträger einzeln, so stellt man fest, dass diese den drei genannten Randbedingungen (Umweltverträglichkeit, Versorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit) in teils sehr unterschiedlicher Weise versuchen gerecht zu werden.

### Vergleich von Kernenergie, Steinkohle und Windenergie



Bedarf an elektrischer Energie in Deutschland im Jahr 2005: ca. 620 Mrd. kWh

	Kernenergie	Steinkohle	Windenergie
Energie pro kg Reinformaterial in GJ	80 000 (z. B. U-235)	0,03	keine Umwandlung von Material; regenerativer Energieträger Wind
Elektrische Energie pro kg Rohmaterial in GJ	144 (nur ca. 0,1 bis 0,5 % des abgebauten Uranerzes sind Uranatome)	ca. 0,01	Durch die zeitabhängigen Windverhältnisse ist stets nur ein Teil der angegebenen max. Leistung einer Windkraftanlage zu erreichen. Dieser Anteil hängt stark vom Standort ab.
Kraftwerksgröße bei ca. 1,3 GW maximaler elektrischer Leistung	z. B. ein Block des KKW Gundremmingen, Bayern	z. B. zwei Kraftwerke des Typs in Gersteinwerk Werne (Nordrhein-Westf.)	z. B. offshore-Windpark aus ca. 300 modernen Windrädern (à 4,5 MW) (1,3 GW ist in etwa die max. Leistung aller im Jahr 2006 in Deutschland neu installierten Windkraftanlagen)
Umweltbelastungen, Probleme	Gefahren durch radioaktives Material bei Herstellung, Transport, Endlagerung des Kernbrennstoffs; grundsätzliche Gefahr der Kernschmelze, hohe Sicherheitsanforderungen; Endlagerung ungeklärt	Verstärkung des Treibhauseffekts durch CO <sub>2</sub> -Freisetzung aus fossilem Energieträger; aufwändiger Abbau des Energieträgers mit negativen Folgen in den Abbaubetrieben; energieintensiver Transport	Beeinträchtigungen des Landschaftsbildes; wahrnehmbare Geräusche im direkten Umfeld; nur in Grenzen planbares Orts- und tageszeitabhängiges Leistungsangebot

Da fossile Energieträger wie Steinkohle aber auch der Kernbrennstoff Uran nur begrenzt auf der Erde vorhanden sind und die Nutzung beider Energieträger erhebliche Umweltbelastungen zur Folge hat, wird verstärkt in regenerative Energiequellen wie die Windenergie investiert. Hier besteht noch großes, vor allem technisches Entwicklungspotential.

Man versucht auch die Kernfusion zur Energiegewinnung zu nutzen. Allerdings ist deren technische Entwicklung noch weit von einer kommerziellen Nutzbarkeit entfernt. Unter dem Namen ITER wurde gemeinsam von Russland, USA, China, Japan, Indien und der Europäischen Union das bisher größte Projekt für einen Test-Fusionsreaktor begonnen [www\_ITER].