

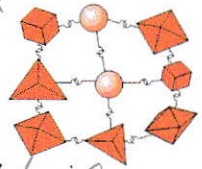
Bereits in der griechischen Antike hat Demokrit die Idee, dass man durch Zerreiben von Material zu einer kleinsten Teilchengröße findet. Er nennt solche Teilchen "atomos" = "das Unteilbare". Stoffe bestehen aus einem Gefüge solcher Teilchen. Welche Gemeinsamkeiten bestehen zum heutigen Modell?

## 5. Kernphysik

### 5.1 Bausteine der Materie

#### Das "atomos" bei Demokrit

- Materie ist aufgebaut aus kleinsten Teilchen
- es bestehen Bindungen zwischen diesen
- es gibt verschiedene Teilchensorten, das erklärt Unterschiede zwischen den Materialien

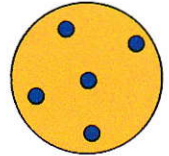


Abbn. aus Leifiphysik

Thomson identifizierte am Ende des 19. Jahrhunderts die Elektronen als Träger der negativen Ladung, diese mussten Bestandteile der Atome sein. Beschreibe sein Modell.

#### Das Rosinenkuchenmodell von Thomson

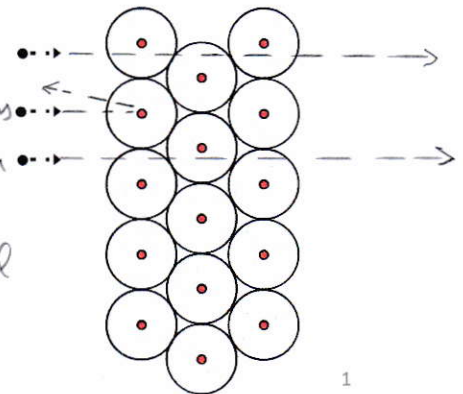
das Atom ist eine homogene (gleichmäßige) Kugel, in der die Elektronen eingebettet sind



Rutherford konnte zu Beginn des letzten Jahrhunderts nachweisen, dass kleine Teilchen, die auf eine Goldfolie geschossen werden, zum großen Teil ungehindert hindurchgehen. Beschreibe den Wandel, den das vorige Modell durch diese Beobachtung erfuhr.

#### Der Versuch von Rutherford

- der größte Teil des Atomvolumens ist leerer Raum, in dem sich die Elektronen aufhalten
- nur ein winziger Bruchteil ist gefüllt → Kern



10 Kernphysik - 5.1 Bausteine der Materie

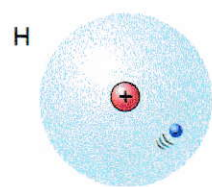
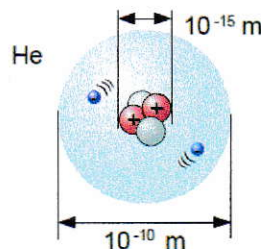
1

Die Beobachtung von Rutherford aber auch andere experimentelle Erkenntnisse (auch aus der Chemie) führten zu Beginn des letzten Jahrhunderts zu einem sehr anschaulichen Atommodell, das heute noch verwendet. Auch wenn die Quantenphysik seit der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts zahlreiche neue Erkenntnisse gebracht wird, ist dieses Modell für viele praktische Betrachtungen noch vollkommen ausreichend. Ergänze die Texte mit den korrekten Begriffen.

#### Ein einfaches Atommodell aus aktueller Sicht

Atome bestehen aus einem Kern und einer Hülle.  
Der Kern enthält fast die gesamte Masse des Atoms und ist positiv geladen. Sein Durchmesser liegt in der Größenordnung  $10^{-15} \text{ m} = 1 \text{ fm}$ .  
In der leeren Hülle halten sich die negativen Elektronen auf.  
Ihre Größenordnung beträgt etwa  $10^{-10} \text{ m} = 1 \text{ Å}$ .

Abbn. aus leifiphysik



#### Die Struktur des Kerns:

Atomkerne bestehen aus positiv geladenen Protonen und neutralen Neutronen. Der Sammelbegriff für diese beiden Kernbausteine lautet Nukleonen (lat. "nucleus" = "der Kern"). Ein neutrales Atom hat in seiner Hülle genauso viele Elektronen wie Protonen im Kern.

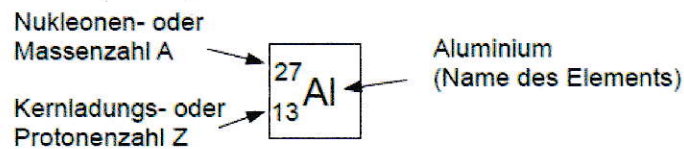
10 Kernphysik - 5.1 Bausteine der Materie

2

Da Protonen und Neutronen annähernd dieselbe Masse besitzen, ist ihre Gesamtzahl (also die Nukleonenzahl) ein Maß für die Masse des Atomkerns und damit auch des Atoms (die Masse der Elektronen fällt kaum ins Gewicht). Es hat sich weltweit etabliert, für Atomkerne diese Massenzahl und daneben die Protonenzahl anzugeben (diese gibt auch die Ladung des Kerns an und legt damit auch das zugehörige Element fest), aus diesen beiden Werten lässt sich dann leicht die Anzahl der Neutronen berechnen. **Ergänze in der Tabelle die fehlenden Stücke (die Zuordnung der Elemente kann z.B. mit einem Periodensystem aus der Chemie erfolgen).**

### Nuklidschreibweise:

Protonenzahl Z	Neutronenzahl N	Massenzahl A
Es gilt: $A = Z + N$ (A ist daher auch die Nukleonenzahl)		



Beispiele: Aluminium hat 13 Protonen und  $27 - 13 = 14$  Neutronen

Atome mit derselben Protonenzahl Z, aber unterschiedlicher Neutronenzahl N heißen Isotope.

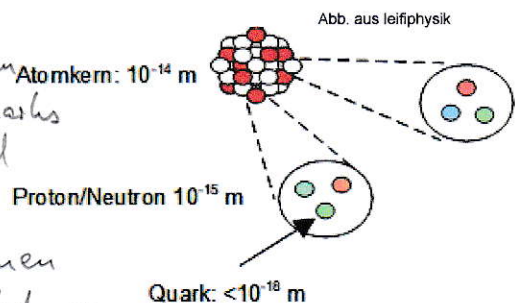
### Basic: Verwendung der Nuklidschreibweise

Nuklid	chem Element X	Protonenzahl Z	Neutronenzahl N
$^1_1\text{H}$	Wasserstoff	1	0
$^4_2\text{He}$	Helium	2	2
$^{12}_6\text{C}$	Kohlenstoff	6	6
$^{13}_6\text{C}$	Kohlenstoff	6	7
$^{235}_{92}\text{U}$	Uran	92	143
$^{238}_{92}\text{U}$	Uran	92	146

Der Physiker Gell-Mann stellte in der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts die Theorie auf, dass die Protonen und Neutronen (und auch weitere Elementarteilchen) ihrerseits wiederum aus kleineren Teilchen aufgebaut sind, die er Quarks nannte. Sein Quark-Modell war zunächst höchst umstritten, fand dann aber Einzug in die moderne Kernphysik und konnte später auch durch Hochenergie-Experimente in Teilchenbeschleunigern belegt werden. Unser Teilchenmodell basiert heute auf 6 verschiedenen Quarks (und deren zugehörigen Antiteilchen, die Antimaterie aufbauen). **Ergänze die Tabelle und finde heraus, aus welchen Quarks Protonen und Neutronen aufgebaut sind.**

### Quarks

Protonen und Neutronen sind aus jeweils 3 Quarks aufgebaut. Diese sind viel kleiner als die Protonen und Neutronen und haben Drittel-Ladungen.



$+\frac{2}{3}e$	u-Quark (up)	c-Quark (charm)	t-Quark (top)
$-\frac{1}{3}e$	d-Quark (down)	s-Quark (strange)	b-Quark (bottom)

Proton:  $\left( \begin{smallmatrix} u & u \\ d \end{smallmatrix} \right) \quad +\frac{2}{3}e + \frac{2}{3}e + (-\frac{1}{3}e) = +\frac{3}{3}e = e$

Neutron:  $\left( \begin{smallmatrix} u \\ d & d \end{smallmatrix} \right) \quad +\frac{2}{3}e + (-\frac{1}{3}e) + (-\frac{1}{3}e) = 0e = 0$

### Selbst-Check:

- Bausteine der Materie
- Atom, Kern und Hülle
- Nuklidschreibweise
- Quarks

### Übungsmöglichkeiten:

Auf Leifiphysik gibt's unter Teilgebiet Kern-/Teilchenphysik - Kernphysik-Grundlagen - Aufgaben die Aufgabe "Elementsymbolik" und das "Quiz zum Kernaufbau von Atomen", die perfekt zu dieser Stunde passen.



Lies die beiden Lexikon-Artikel im Buch auf S.110 und bearbeite folgende Aufträge.

- Erläutere den Begriff "natürliche Radioaktivität".
- Worin unterscheidet sich davon künstliche Radioaktivität?
- Welche Besonderheiten hat radioaktive Strahlung z.B. im Vergleich zu Licht?

## 5.2 Die Entdeckung der Radioaktivität

### natürliche Radioaktivität

Das ist die Eigenschaft bestimmter Atomkerne (Radionuklide), sich spontan ohne äußere Einwirkung in andere Kerne umzuwandeln. Dabei senden sie radioaktive Strahlung aus. Bsp: C-14, U-238  
In der Natur gibt es ungefähr 50 Radionuklide.

### künstliche Radioaktivität

Es gibt eine Vielzahl (ca. 2400) von künstlichen Radionukliden, die man durch Beschuss von stabilen Atomkernen mit Teilchen (Protonen, Neutronen, Elektronen) herstellen kann.

### radioaktive Strahlung

Die bei der Kernumwandlung abgegebene Strahlung ist unsichtbar, kann Material durchdringen und ist insbesondere für lebende Organismen gefährlich. Bedeutend sind insbesondere 3 Typen ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ )

10 Kernphysik - 5.2 Entdeckung der Radioaktivität

1

Die Entdeckung der Radioaktivität ist ein schönes Beispiel dafür, dass große Umwälzungen in der Naturwissenschaft häufig durch Zufälle zustande kommen. Auf S.112 oben findest Du eine kurze Zusammenfassung, im Internet noch weit mehr Informationen darüber, wie die französischen Physiker\*innen Henri Bequerel sowie Marie und Pierre Curie am Ende des 19. Jahrhunderts die radioaktive Strahlung entdeckten. **Recherchiere zum Thema "Entdeckung der Radioaktivität" und ergänze den Text.**

### Die Entdeckung der natürlichen Radioaktivität

Henri Bequerel entdeckte 1896 bei der Untersuchung von Uranerz eine neue Strahlung, die für das Auge unsichtbar war.

Eigentlich wollte er das Uranerz durch Bestrahlung mit Sonnenlicht zur

Fluoreszenz, also zur Abgabe von Strahlung anregen. Da einige Tage keine Sonne schien, blieb das Uranerz ungenutzt in einer Schublade. Es konnte dort

aber durch Abgabe einer Strahlung

auch ohne vorherige Anregung eine Fotoplatte durch ihre Verpackung hindurch "schwärzen", also eine chemische Reaktion hervorrufen.

Bei weiteren Experimenten konnte Bequerel zusammen mit Marie und

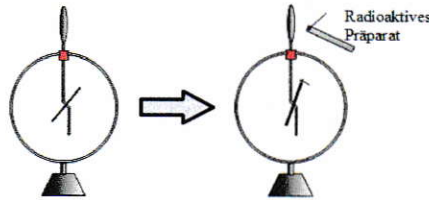
Pierre Curie auch an Radium sowie Polonium diese Strahlung nachweisen (bzw. die Elemente überhaupt erst entdecken).

Marie Curie führte für diese Strahlung den Begriff radioaktiv ein

(der Begriff greift die zur gleichen Zeit entdeckten Radiowellen von Sendeanlagen auf beschreibt den Umstand, dass im Gegensatz dazu die neue Strahlung von bestimmten Materialien selbstständig ganz ohne äußere Einwirkung abgegeben wird).

Die wesentliche Eigenschaft von radioaktiver Strahlung ist die Fähigkeit, Material in der Umgebung (feste Stoffe ebenso wie Gase) zu ionisieren. **Erläutere die Beobachtung im Experiment.**

### Die ionisierende Wirkung von radioaktiver Strahlung: Experiment:



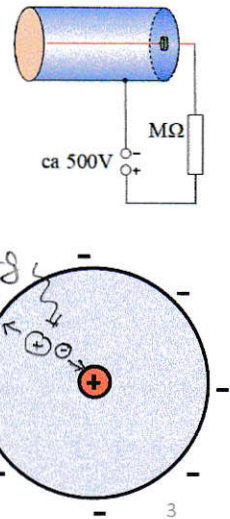
Bringt man ein radioaktives Präparat in die Nähe eines aufgeladenen Präparats, so entlädt dieses rasch, da die Luft ionisiert (leitfähig) wird.

Radioaktive Strahlung kann Materie (Gase, feste Körper) ionisieren.

Geiger und Müller haben ein Nachweisgerät für radioaktive Strahlung entwickelt, das sich die Ionisationswirkung der radioaktiven Strahlung zu Nutze macht, das Zählrohr. In Kombination mit der zugehörigen Auswertelektronik spricht man gemeinhin vom Geigerzähler. **Erläutere Aufbau und Funktionsweise des GMZ.**

### Nachweisgerät: Das Geiger - Müller - Zählrohr (Geigerzähler)

Ein Zählrohr ist mit verdünntem Gas gefüllt und hat in der Mitte einen dünnen Draht. Zwischen Draht und Gehäuse wird eine hohe Spannung angelegt. Gelangt radioaktive Strahlung durch das Eintrittsfenster ins Innere, so wird das Gas ionisiert und es kommt zu einer Entladung, die von einer Elektronik erfasst wird.



10 Kernphysik - 5.2 Entdeckung der Radioaktivität

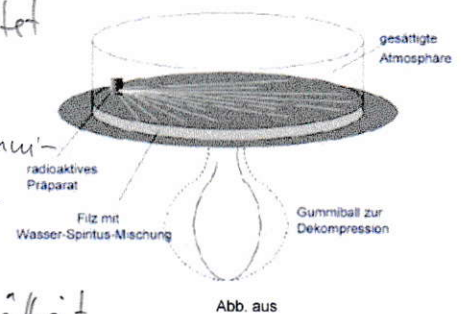
Kondensstreifen am Himmel zeigen uns die Flugbahnen von Flugzeugen an, da der Wasserdampf in der Atmosphäre an den Abgasteilchen der Triebwerke kondensiert. Das gleiche Prinzip nutzt man in der Nebelkammer. Der Trick dabei besteht darin, in der Kammer den Wasserdampf in einen Zustand zu bringen, in dem er sich kurz davor befindet, zu Wassertropfchen zu kondensieren. Wenn nun radioaktive Strahlung Ionen in der Kammer erzeugt, kondensiert an diesen der Dampf und bildet Kondensstreifen. **Im Netz findest Du Videos, die Nebelkammern im Betrieb zeigen (häufig ist gar kein radioaktives Material eingebracht, dann arbeitet die Kammer nur mit der natürlichen Radioaktivität in der Umgebung).**

### Strahlung "sichtbar" machen - die Nebelkammer

Eine Flüssigkeit verdunstet in der Nebelkammer.

Durch Loslassen des Gummiballs entsteht ein Unterdruck in der Kammer und der Dampf wird gesättigt (steht kurz vor der Kondensation).

Wenn nun einfallende radioaktive Strahlung Ionen in der Kammer erzeugt, so kondensiert an diesen der Wasserdampf und es entsteht ein Kondensstreifen (ähnlich wie hinter einem Flugzeug, dort sind Rußteilchen die Kondensationskerne).



### Selbst-Check:

- natürliche und künstliche Radioaktivität
- Entdeckung
- ionisierende Wirkung

### Übungsmöglichkeiten:

Besuche auf Leifiphysik unter Teilgebiet Kern-/Teilchenphysik - Radioaktivität Einführung das Kapitel **GEIGER-MÜLLER-Zählrohr**. Du findest hier eine ausführliche Beschreibung mit Animation. Die Aufgabe "Nachweis von ionisierender Strahlung mit dem Zählrohr" dort passt gut zur selbstständigen Wiederholung.

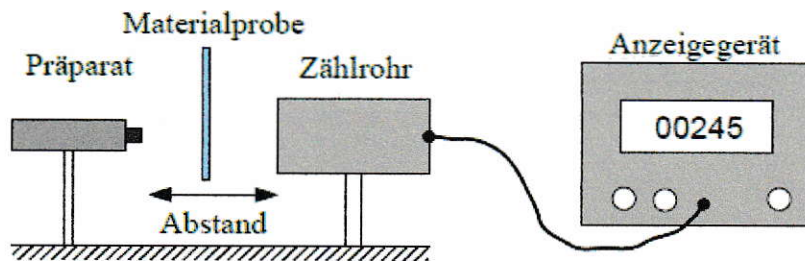


In diesem Kapitel untersuchen wir die Eigenschaften radioaktiver Strahlung an unterschiedlichen Präparaten. Die Intensität ist bei allen eingesetzten Präparaten so gering, dass davon keine gesundheitliche Gefahr für Zuschauer\*innen oder Experimentator\*in ausgeht.

- a) Beschreibe die Durchführung des ersten Experiments.  
b) Fasse die Ergebnisse aus dem Experiment zusammen.

### 5.3 Strahlungsarten

#### Untersuchung von Reichweite und Durchgang durch Material



#### Durchführung:

- Messung der Strahlung mit Geigerzähler (Zählrohr + Anzeige)
- Variation des Abstandes Präparat - Zählrohr
- verschiedene Materialproben zum Testen der Abschwächung

#### Ergebnisse:

- prinzipiell nimmt die Intensität bei großem Abstand ab, da sich die Strahlung auf größeren Bereich verteilt
- eine Strahlungsart reicht nur wenige cm weit, diese lässt sich auch leicht abschirmen (mit Papier)
- eine andere lässt sich mit dünnen Metallplatten abschirmen
- die dritte geht auch durch dicke Bleiplatten noch hindurch

10 Kernphysik - 5.3 Strahlungsarten

1

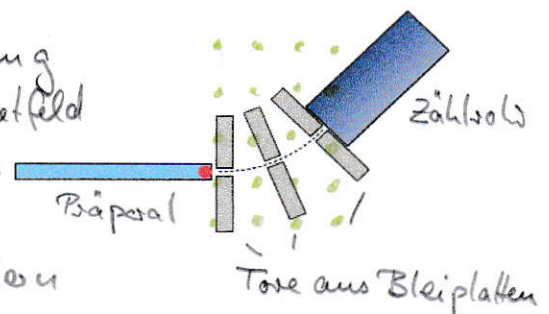
In diesem Experiment versuchen wir die Strahlung mit starken Magneten abzulenken, so wie wir das auch mit dem Elektronenstrahl im ersten Halbjahr gemacht haben (Lorenzkraft).

- a) Beschreibe die Durchführung des Experiments.  
b) Fasse die Ergebnisse aus dem Experiment zusammen.

#### Untersuchung der Ablenkbarkeit durch Magnetfelder

#### Durchführung:

Wir versuchen, die Strahlung durch ein senkrechtes Magnetfeld abzulenken. Der Nachweis erfolgt dann nicht in Einstrichrichtung, sondern seitlich versetzt.



#### Ergebnisse:

Die erste Strahlungsart lässt sich nur schwach ablenken, die zweite sehr gut. Deren Ablenkrichtung passt für negative Ladungen. Die dritte Strahlungsart lässt sich gar nicht ablenken.

Bei unseren Experimenten haben wir die drei wichtigsten Arten von radioaktiver Strahlung kennengelernt (es gibt noch weitere). Sie werden nach den Anfangsbuchstaben des griechischen Alphabets bezeichnet. Sie unterscheiden sich hinsichtlich Reichweite, Abschirmbarkeit und Ablenkbarkeit durch magnetische Felder. Auch ihr Ionisationsvermögen ist unterschiedlich. In unseren radioaktiven Präparaten finden sich oft mehrere dieser Strahlungsarten gleichzeitig. Schnelle Heliumkerne heißen auch  $\alpha$ -Teilchen, schnelle Elektronen  $\beta$ -Teilchen.

**Ergänze die Eigenschaften in den Merkkästchen.**

### Die wichtigsten Strahlungsarten und ihre Eigenschaften:

#### $\alpha$ -Strahlung:

Diese Strahlung besteht aus schnellen Heliumkernen,  
und lässt sich durch Magnetfelder schwach ablenken.  
Sie hat eine sehr kleine (cm-Bereich) Reichweite  
und lässt sich bereits durch Papier abschirmen.  
Sie besitzt ein hohes Ionisationsvermögen.

#### $\beta$ -Strahlung:

Diese Strahlung besteht aus schnellen Elektronen,  
und lässt sich durch Magnetfelder gut ablenken.  
Sie hat eine mittlere (m-Bereich) Reichweite  
und lässt sich durch Metallplatten (mm) abschirmen.  
Sie besitzt ein mittleres Ionisationsvermögen.

#### $\gamma$ -Strahlung:

Diese Strahlung besteht aus elektromagnetischen Wellen,  
und lässt sich durch Magnetfelder nicht ablenken.  
Sie hat eine sehr große (km-Bereich) Reichweite  
und lässt sich durch dicke Bleiplatten etwas abschirmen.  
Sie besitzt ein geringes Ionisationsvermögen.

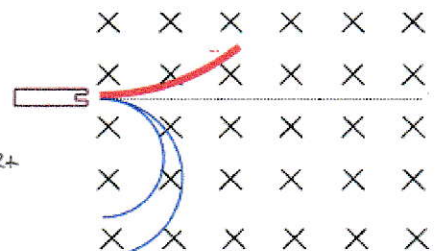
Die Abbildung zeigt schematisch unterschiedliche Spuren, die ein radioaktives Präparat in einer Nebelkammer erzeugt. Mit den Eigenschaften der unterschiedlichen Strahlungsarten gelingt Dir die Interpretation dieser Spuren. In großen Forschungszentren nehmen die Physiker die Spuren heute nicht mehr mit Nebelkammern, sondern mit Feldern von unterschiedlichen Detektoren elektronisch auf und werten diese in gigantischen Rechenzentren auf, das Prinzip bleibt aber das Gleiche.

**Ordne den unterschiedlichen Bahnen die zugehörigen Strahlungsarten zu und ergänze die Richtung des Magnetfelds. Gehe dabei auch auf die Reichweite und Spurbreite ein.**

### Training: Nebelkammer-Aufnahmen interpretieren

$\alpha$ -Strahlung: rot

- schwache Ablenkung gemäß UVW-Regel für positive Ladung  $He^{2+}$
- kurze Reichweite
- starke Ionisationswirkung (breite Spur)



$\beta$ -Strahlung: blau

- starke Ablenkung gemäß UVW-Regel für neg. Lad.  $e^-$
- unterschiedliche Radien für unterschiedliche Geschw.  
 $v$  groß  $\rightarrow r$  groß
- mittlere Reichweite und Ionisationswirkung (dünne Spur)

$\gamma$ -Strahlung: gestrichelt

- keine Ablenkung, da keine geladenen Teilchen
- große Reichweite, geringe Ionisationswirkung (schwache Spur)

### Übungsmöglichkeiten:

Besuche auf Leifiphysik unter Teilgebiet Kern-/Teilchenphysik - Radioaktivität Einführung das Kapitel Überblick über die Strahlungsarten. Sehr gut geeignet ist das "Quiz zu ionisierender Strahlung" (Aufgaben 4 - 6 erst im nächsten Kapitel).

### Selbst-Check:

- Strahlungsarten
- Reichweite
- Abschirmbarkeit
- Ablenkung in Magnetfeldern
- Ionisationsvermögen



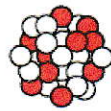
Natürliche radioaktive Strahlung entsteht, wenn instabile Kerne spontan Teilchen aussenden (zerbrechen). In diesem Kapitel lernst Du die Mechanismen kennen, die hinter den wichtigsten Strahlenarten stecken.

a) Ergänze den Text.

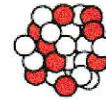
b) Schreibe eine Zerfallsgleichung unter Verwendung der Nuklid-schreibweise für den dargestellten Zerfall von Radium 226 (88 Protonen).

## 5.4 Kernzerfälle

### $\alpha$ - Zerfall:



Ra 226



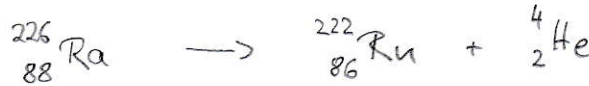
Rn 222



$\alpha$ -Teilchen  
(He 4)

Hier sendet ein (schwerer) Kern spontan ein  $\alpha$  - Teilchen aus. Der neue Kern ist jetzt kleiner und befindet sich in einem angeregten Zustand.

Die Massenzahl sinkt um 4, die Kernladungszahl um 2.

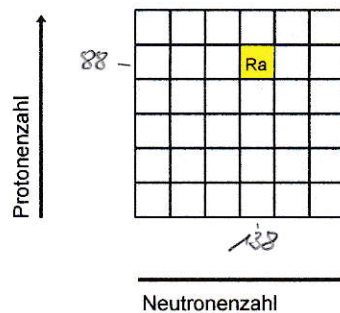


Zur übersichtlichen Darstellung von Nukliden stellt man die kleinen Quadrate, die wir schon kennengelernt haben, in einer zweidimensionalen Matrix dar (Neutronenzahl nach rechts, Protonenzahl nach oben).

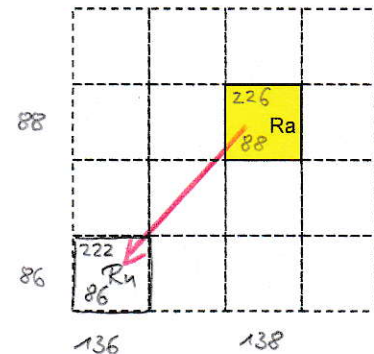
a) Schreibe in die linke Darstellung die Werte für das betrachtete Radium.

b) Stelle im rechten Bild (vergrößert) den betrachteten Kernzerfall dar. Wo liegt der Folgekern nach dem  $\alpha$  - Zerfall?

### Nuklidkarte:



10 Kernphysik - 5.4 Kernzerfälle



„zwei nach links, zwei nach unten“

$$N = A - Z$$

$$= 226 - 88 = 138$$

Da  $\beta$  - Strahlung aus schnellen Elektronen besteht, müssen diese beim Zerfall abgegeben werden. Diese stammen aber nicht aus der Elektronenhülle, sondern aus dem Kern, und müssen dort erst gebildet werden.

a) Ergänze den Text.

b) Schreibe eine Zerfallsgleichung unter Verwendung der Nuklid-schreibweise für den dargestellten Zerfall von Cäsium 137 (55 Protonen).

c) Stelle auch eine Gleichung für die Umwandlung des Neutrons in ein Proton auf.

d) Stelle schließlich den betrachteten Kernzerfall in der Nuklidkarte dar. Wo liegt der Folgekern?

(die Position des Folgekerns erscheint zunächst merkwürdig, wird aber verständlicher mit der Information, das Protonen weniger Masse als Neutronen haben, zudem sinkt die Kernbindungsenergie)

### $\beta$ - Zerfall:



Cs 137



Ba 137

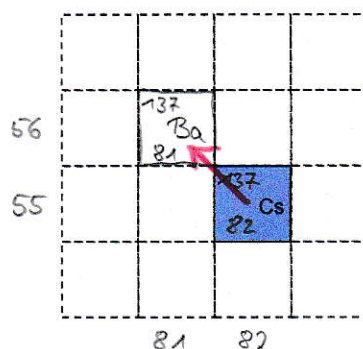
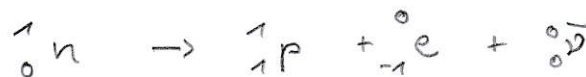
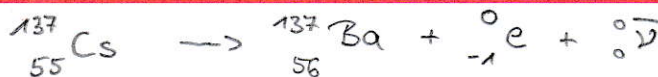


$e^-$



Hier wandelt sich ein Neutron im Kern des Cäsium spontan in ein Proton und ein Elektron um, das Elektron verlässt den Kern (zusammen mit einem Neutrino). Der Kern ist danach angeregt.

Die Massenzahl bleibt unverändert, die Kernladungszahl nimmt um 1 zu.



„eins nach links, eins nach oben“

(der Kern wird aber ein bisschen leichter dabei)

$$N_{\text{Cs}} = 137 - 55 = 82$$

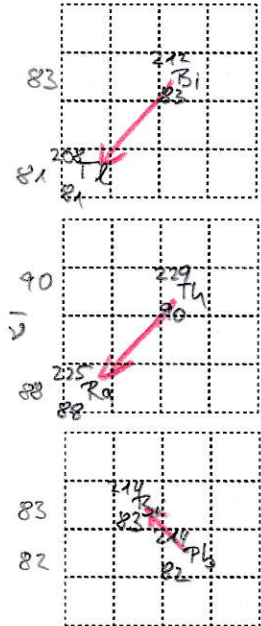
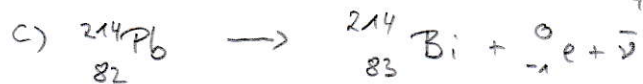
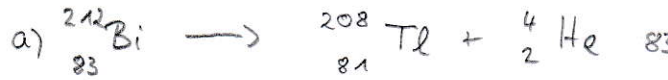
$$N_{\text{Ba}} = 137 - 56 = 81$$

Jetzt fehlt noch die  $\gamma$ -Strahlung.  
Die ergibt sich aber nicht aus einem eigenständigen Zerfall, sondern sie tritt immer in Folge von den bereits behandelten Zerfällen auf.  
**Ergänze die Leerstellen im Merkkästchen.**

### $\gamma$ -Strahlung:

Es gibt keine  $\gamma$ -Zerfälle, da  $\gamma$ -Strahlung nicht aus Teilchen besteht.  
Stattdessen gehen die angeregten Kerne aus den zuvor behandelten Zerfällen in ihren Grundzustand über und geben dabei Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung in kleinen Portionen ( $\gamma$ -Quanten, sehr energiereich) ab.

### Training: Zerfallsgleichungen aufstellen



Das Aufstellen von Zerfallsgleichungen will jetzt erst mal geübt werden.

**Erstelle jeweils die Zerfallsgleichung und stelle den Vorgang auch in der Nuklidkarte dar für**

a)  $\alpha$ -Zerfall von Bi 212

b)  $\alpha$ -Zerfall von Th 229

c)  $\beta$ -Zerfall von Pb 214

Die Folgekerne bei radioaktiven Zerfällen sind oft nicht stabil und zerfallen ihrerseits weiter. So entstehen ganze Ketten von Zerfällen, die erst enden, wenn ein stabiler Kern erreicht ist.

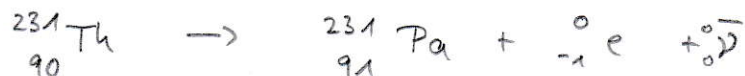
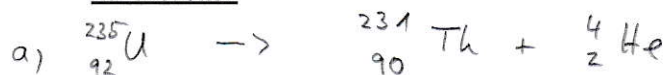
**Uran 235 (92 Protonen) ist der Ausgangspunkt einer Zerfallsreihe, die erst beim stabilen Blei Pb 207 (82 Protonen) endet.**

**Uran 235 strahlt  $\alpha$ , der Folgekern Thorium  $\beta$  ab.**

a) Stelle die ersten beiden Zerfallsgleichungen der Zerfallsreihe auf.

b) Berechne zuerst die Anzahl der  $\alpha$ -Zerfälle und dann die Anzahl der  $\beta$ -Zerfälle, die auf dem Weg von U 235 bis Pb 207 erfolgen (die Abfolge wird hier nicht berücksichtigt).

### Zerfallsketten



b) • Massenzahl ändert sich insgesamt von 235 auf 207:  $235 - 207 = 28$

• bei  $\alpha$ -Zerfall verringert sich Massenzahl um 4, bei  $\beta$ -Zerfall gar nicht:

$$28 : 4 = 7 \quad \alpha\text{-Zerfälle}$$

• bei 7  $\alpha$ -Zerfällen verringert sich Kernladungszahl um  $7 \cdot 2 = 14$ , von  ${}_{92}\text{Uran}$  auf  ${}_{82}\text{Blei}$  ist aber nur 10 Unterschied

$\rightarrow$  es gibt noch 4  $\beta$ -Zerfälle, die Kernladungszahl um  $4 \cdot 1 = 4$  anheben

### Übungsmöglichkeiten:

Besuche auf Leifiphysik unter Teilgebiet Kern-/Teilchenphysik - Radioaktivität Einführung - Nuklidkarte - Aufgaben. Mit der Aufgabe "Zerfallsreihe in der Nuklidkarte" übst Du fast alle Aspekte dieses Kapitels.

### Selbst-Check:

- Zerfallsarten
- Zerfallsgleichung
- Nuklidkarte
- Zerfallsreihe



Dieses Kapitel dreht sich um die wohl berühmteste Formel, die in der Physik jemals gefunden wurde. Dabei wird gerade diese häufig falsch interpretiert. Auch wenn ein Quadrat in der Formel auftaucht, beschreibt sie keinen quadratischen, sondern einen linearen Zusammenhang.  $c^2$  ist der Proportionalitätsfaktor.

#### Aufgaben:

- a) Berechne die Energie, die freigesetzt würde, wenn man eine Person mit 50 kg Masse komplett in Energie auflösen könnte. Vergleiche diese mit dem Jahresenergieverbrauch eines Europäers (30 MWh).
- b) Tatsächlich beobachtbar ist dagegen die sogenannte "Paarvernichtung". Trifft ein Elektron ( $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$  kg) auf ein Positron (gleiche Masse, positiv geladen), so lösen sich beide vollständig in Energie auf. Berechne sie.

$$c = 3,0 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Bevor wir kernphysikalische Berechnungen anstellen können, müssen wir erst eine neue Einheit für die Masse einführen, die für die Angabe der sehr kleinen Massen gebräuchlich ist.

Damit Kernreaktionen von selbst ablaufen können, muss dabei genauso wie bei chemischen Reaktionen Energie freigesetzt werden. Diese ergibt sich hier daraus, dass sich die Masse bei der Reaktion verringert.

#### Aufgabe:

Im letzten Kapitel haben wir den Zerfall von Ra 226 in Rn 222 betrachtet. Die Massen betragen hier:

Ra 226: 226,025410 u

Rn 222: 222,017578 u

He 4: 4,002603 u

Berechne den Massendefekt und die freiwerdende Energie.

(wir rechnen hier nicht mit Nuklidsondern Atommassen, wobei sich die Elektronenanzahl nicht ändert).

## 5.5 Energie bei Kernreaktionen

### Energie - Masse - Relation:

Das bloße Vorhandensein von Masse (in Form von Materie) stellt

bereits eine Energieform dar. Um Masse zu "erschaffen"

muss man also Energie einsetzen, bei der Vernichtung von

Masse wird dagegen Energie freigesetzt. Dabei sind Masse und

Energie direkt proportional zueinander. In Formel:

$$E = m \cdot c^2$$

$$\text{eigentlich: } E = h \cdot m \text{ mit } h = c^2$$

Dabei ist der Proportionalitätsfaktor  $c^2$  das Quadrat der Lichtgeschwindigkeit.

#### Aufgaben:

$$\begin{aligned} a) E &= m \cdot c^2 = 50 \text{ kg} \cdot (3,0 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 = 4,5 \cdot 10^{18} \text{ J} \\ &= 4,5 \cdot 10^{18} \text{ Ws} = 1,25 \cdot 10^{15} \text{ Wh} = 1,25 \cdot 10^9 \text{ MWh} \\ &\quad : 3600 \quad \hat{=} \text{Energieverbrauch von 42 Mio Menschen} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b) E &= m \cdot c^2 = 2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot (3,0 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 = 1,64 \cdot 10^{-13} \text{ J} \\ &= 1,64 \cdot 10^{-13} \text{ Ws} = 1,0 \cdot 10^6 \text{ eV} = 1,0 \text{ MeV} \\ &\quad : 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As} \leftarrow \text{Ladung } e \text{ eines Elektrons} \\ [ \text{Ws} : \text{As} &= \text{VAs} : \text{As} = \text{V} ] \end{aligned}$$

### Die atomare Masseneinheit u:

Zur Angabe von kleinen Massen dient die Masseneinheit 1u. Sie entspricht ungefähr der Masse eines Nukleons.

$$1 \text{ u} = 1,66054 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

### Der Massendefekt bei Kernreaktionen:

Bei Kernreaktionen ist die gesamte Masse der Folgekerne kleiner als die Masse des Ausgangskerns. Es tritt ein sogenannter

Massendefekt  $\Delta m$  auf.

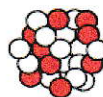
Diesem entspricht nach der Einstein - Formel eine Energie, die bei der

Reaktion freigesetzt wird.

### Massendefekt und freiwerdende Energie beim $\alpha$ - Zerfall



Ra 226



Rn 222



$\alpha$ -Teilchen  
(He 4)

$$\Delta m = m_{\text{Ra}} - m_{\text{Rn}} - m_{\text{He}}$$

$$= 226,025410 \text{ u} - 222,017578 \text{ u} - 4,002603 \text{ u} = 5,229 \cdot 10^{-3} \text{ u}$$

$$E = \Delta m \cdot c^2 = 5,229 \cdot 10^{-3} \cdot 1,66054 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot (3,0 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2$$

$$= 7,8147 \cdot 10^{-13} \text{ J} = 4,88 \text{ MeV}$$

:  $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}$



Über viele Jahrzehnte haben wir die freiwerdende Energie bei Kernreaktionen in Kernkraftwerken zur Stromerzeugung genutzt. Hierbei wird zumeist U 235 durch Zugabe von Neutronen gezielt zum Zerfall gebracht.

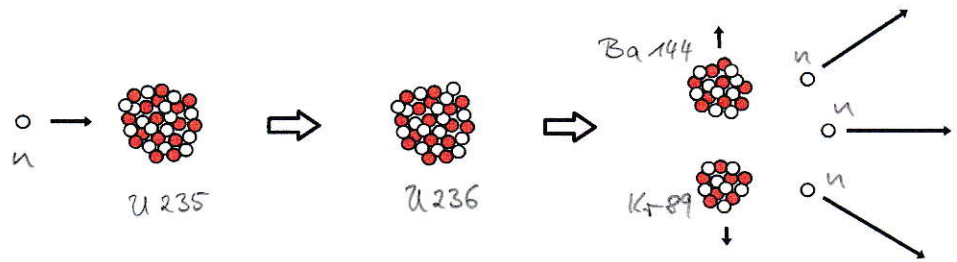
### Die Kernspaltung von Uran:

Bei der Nutzung von Kernenergie in Kraftwerken wartet man nicht darauf, dass die U 235 - Kerne von selbst zerfallen, sondern führt den Zerfall durch Zugabe

von Neutronen gezielt herbei (künstliche Radioaktivität).

Beim Zerfall des künstlich erzeugten Zwischenkerns U 236 werden zudem

3 Neutronen frei, die für weitere Kernspaltungen zur Verfügung stehen.



### Massendefekt und freiwerdende Energie bei der Spaltung von Uran

$$\begin{aligned}\Delta m &= m_{U235} + m_n - m_{Ba} - m_{Kr} - 3 \cdot m_n \\ &= 235,04392996 \text{ u} + 1,0086649 \text{ u} - 143,92295281 \text{ u} \\ &\quad - 88,9176306 \text{ u} - 3 \cdot 1,0086649 \text{ u} = 0,186 \text{ u} \\ E &= \Delta m \cdot c^2 = 0,186 \cdot 1,66054 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot (3,0 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 \\ &= 2,78 \cdot 10^{-11} \text{ J} = \underline{\underline{174 \text{ MeV}}} \\ &\quad : 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}\end{aligned}$$

Während in Deutschland 2023 die letzten Kernkraftwerke abgeschaltet wurden, werden in anderen (auch europäischen) Ländern immer noch Kernkraftwerke zur Stromproduktion gebaut. In der nebenstehenden Grafik ist der prinzipielle Aufbau und die Funktionsweise von Kernkraftwerken dargestellt.

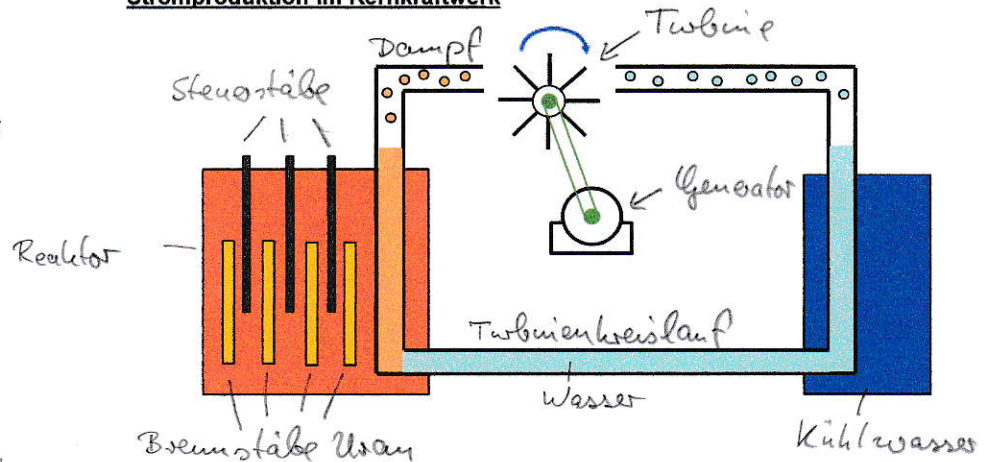
**Beschrifte die einzelnen Bauteile und beschreibe die Funktion von der Kernspaltung bis zum Strom. Gehe dabei auf die Steuerung der thermischen Leistung mit sogenannten Moderatorstäben ein.** Eine ausführliche Darstellung findest Du auf leifiphysik.de unter Kern-/Teilchenphysik - Kernspaltung und Kernfusion - Ausblick - Druckwasserreaktor.

Mit den Steuerstäben werden  $\frac{2}{3}$  der Neutronen eingefangen, so dass nach jeder Spaltung genau eine weitere erfolgt.

#### Selbst-Check:

- Masse und Energie
- Masseneinheit u
- Massendefekt und freiwerdende Energie
- Kernkraftwerk

### Stromproduktion im Kernkraftwerk



Die Brennstäbe aus Uran erhitzen sich durch die Kernspaltung und geben die Wärme an das umgebende Wasser im Reaktor ab. Das Wasser im Turbinenkreislauf wird dadurch erhitzt und verdampft. Der heiße Wasserdampf treibt die Schaufeln der Turbine an, Diese dreht den Generator, der Strom erzeugt. Der Wasserdampf kondensiert und bleibt als Wasser im Turbinenkreislauf.

#### Übungsmöglichkeiten:

Passende Aufgaben gibt's auf Leifiphysik unter Teilgebiet Kern-/Teilchenphysik - Kernspaltung und Kernfusion - Aufgaben. Mit der Aufgabe "Spaltung von Plutonium" kannst Du die Energieberechnung an einer Kernreaktion üben (hier werden 2 Neutronen frei).



In diesem Kapitel geht es darum, wie die Kerne in einer radioaktiven Probe nach und nach zerfallen und dabei immer weniger werden. Eine wesentliche Rolle bei der Beschreibung dieser Abnahme spielt dabei der Begriff Halbwertszeit, der Dir auf der ersten Folie gleich erklärt wird. Wir verwenden den Begriff im Weiteren zur Berechnung und graphischen Darstellung des beschriebenen Vorgangs.

## 5.6 Halbwertszeit

### Zerfall als zufälliger Vorgang:

Bei der natürlichen Radioaktivität tritt der Zerfall eines Kerns

vollkommen zufällig auf. Dabei gibt es auch keinerlei Alterung, d.h. die Wahrscheinlichkeit, in der

nächsten Minute zu zerfallen, ist z.B. bei einem 10 Jahre alten Kern

genauso groß, wie bei einem Kern, der eben entstanden ist.

Die Zerfallswahrscheinlichkeit für ein radioaktives Isotop wird

typischerweise mit der Halbwertszeit  $t_H$  beschrieben.

Diese gibt an, nach welcher Zeit noch die Hälfte der ursprünglich vorhandenen Kerne übrig ist.

#### Aufgabe:

Erläutere für eine bestimmte Sorte von Nukliden den Zusammenhang zwischen ihrer Halbwertszeit und der Wahrscheinlichkeit, dass bei diesen Nukliden in der nächsten Minute ein Zerfall auftritt.

#### Aufgabe:

Je geringer die Zerfallswahrscheinlichkeit ist, desto länger dauert es, bis die Hälfte der Kerne zerfallen ist, desto größer ist folglich die Halbwertszeit (und umgekehrt).

Im Bereich der natürlichen Radioaktivität sind wir vor allem der Belastung durch das gasförmige Radon ausgesetzt, das in der Erdkruste freigesetzt wird und sich in alten Kellern findet.

#### Aufgabe:

Beim Öffnen der Kellertüre tritt eine (kleinste) Menge von 8000 Atomen des radioaktiven Isotops Rn 220 in einen Wohnraum über. Dieses hat eine Halbwertszeit von ca. 1 min. Stelle die Anzahl in Abhängigkeit von der Zeit in den nächsten 8 min dar.

Die Formel (es handelt sich um eine Exponentialfunktion) ist nur der formale Ausdruck der fortgesetzten Halbierung, die wir im Diagramm durchgeführt haben. Umfasst z.B. der Zeitraum  $t$  genau 5 Halbwertszeiten, so wird der Faktor  $1/2$  genau mit 5 potenziert, die Anzahl der Kerne wird also fünfmal halbiert. **Berechne für die Aufgabe oben die Anzahl der Kerne nach 10 min.**

#### Die Zerfallskurve einer Probe:



#### Das Zerfallsgesetz

Waren zu Beginn der Messung in einer Probe insgesamt  $N(0)$  Kerne des radioaktiven Isotops, dann sind es nach der Zeit  $t$  nur noch:

$$N(t) = N(0) \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{t/t_H}$$

Dabei ist  $t_H$  die Halbwertszeit des Isotops.

$$N(10 \text{ min}) = 8000 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{10 \text{ min} / 1 \text{ min}} = 8000 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{10} = 7,81 = \underline{\underline{8}} \text{ Stück}$$



In der Tabelle findest Du die Halbwertszeiten von wichtigen Isotopen. Es gibt im Vergleich zu diesen aber auch sehr kurzlebige (siehe Vorderseite).

a) Bei der Reaktorkatastrophe im ukrainischen Tschernobyl im Jahr 1986 wurde vor allem das Cäsium-Isotop Cs 137 freigesetzt und gelangte durch Wind auch nach Westeuropa. Berechne, wie viel Prozent des Cäsiums, das insbesondere in Waldböden gespeichert wurde, noch heute vorhanden ist.

b) Typische Schulpräparate sind Americium, Thallium und Cäsium. Beurteile deren Tauglichkeit im Hinblick auf deren langfristige Nutzung.

c) In Kernkraftwerken kommt U 235 zum Einsatz. Berechne den Anteil, der davon in der Erdkruste noch vorhanden ist.

(Alter der Erde 4,6 Mrd. a)

d) Identifiziere das Isotop, das zum abgebildeten Diagramm gehört und bestimme die Abklingzeit bis 10% Restmenge.

e) Zeichne eine Zerfallskurve für ein Isotop mit doppelter Halbwertszeit.

### Halbwertszeiten von typischen radioaktiven Isotopen

Nuklid	Tl 204	Cs 137	Am 241	Ra 226	U 235	U 238
$t_H$ in a	3,8	30	430	1600	$7,0 \cdot 10^8$	$4,5 \cdot 10^9$

#### Aufgaben:

a)  $N(t) = N(0) \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{t/t_H}$  ;  $2023 - 1986 = 37 \text{ a}$   
 $\frac{N(37 \text{ a})}{N(0)} = \left(\frac{1}{2}\right)^{37/30 \text{ a}} = \left(\frac{1}{2}\right)^{1,23} = 0,425 = \underline{\underline{42,5\%}}$

b) z.B.: 30 a Nutzung

Americium:  $\frac{N(30 \text{ a})}{N(0)} = \left(\frac{1}{2}\right)^{30 \text{ a}/430 \text{ a}} = \left(\frac{1}{2}\right)^{0,0697} = 0,95 = \underline{\underline{95\%}}$  ✓

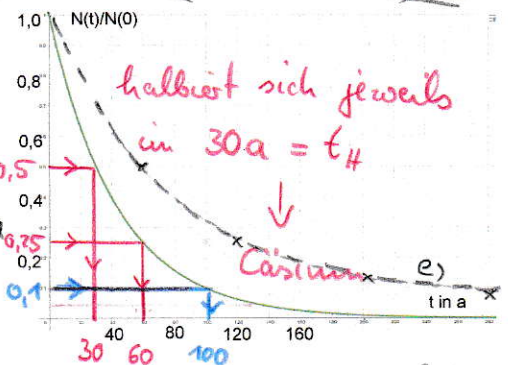
Thallium:  $\frac{N(30 \text{ a})}{N(0)} = \left(\frac{1}{2}\right)^{30 \text{ a}/3,8 \text{ a}} = \left(\frac{1}{2}\right)^{7,89} = 4,2 \cdot 10^{-3} = \underline{\underline{0,42\%}}$  ☹

Cäsium:  $\frac{N(30 \text{ a})}{N(0)} = \left(\frac{1}{2}\right)^{30 \text{ a}/30 \text{ a}} = \left(\frac{1}{2}\right)^1 = 0,5 = \underline{\underline{50\%}}$  ✓

→ Thallium nicht mehr zu gebrauchen

c) Uran 235:

$\frac{N(4,6 \cdot 10^9 \text{ a})}{N(0)} = \left(\frac{1}{2}\right)^{4,6 \cdot 10^9 \text{ a} / 7,0 \cdot 10^8 \text{ a}} = \left(\frac{1}{2}\right)^{6,57} = 0,01 = \underline{\underline{1\%}}$



10 Kernphysik - 5.6 Halbwertszeit

d) Sinkt in ungefähr 100 Jahren auf  $0,1 = 10\%$ .

Bei der Vermessung von radioaktiven Proben bestimmt man nicht die Menge an Kernen des Isotops, sondern misst mit dem Geigerzähler die Menge an Zerfällen. Die zugehörige Messgröße heißt Aktivität. Da diese proportional zur Menge der vorhandenen Kerne ist, gilt der gleiche Zusammenhang wie vorher.

Das wird deutlich bei der Animation auf [leifiphysik.de](http://leifiphysik.de) unter Kern-/Teilchenphysik - Radioaktivität Einführung - Halbwertszeit - Grundwissen.

Das Grabtuch von Turin zeigt angeblich das Gesicht Jesu als Schweißabdruck. Bei Analyse mit der Radio-Carbon-Methode ergab sich pro g Kohlenstoff eine Aktivität von 10/min. Berechne und nimm Stellung.

#### Selbst-Check:

- zufälliger Zerfall
- Halbwertszeit
- Zerfallskurve
- Zerfallsgesetz
- Aktivität
- Radio-Carbon-Methode

#### Aktivität

Die Anzahl der Zerfälle, die pro Sekunde in einer Probe stattfinden, heißt Aktivität A. Sie steht für die Intensität der Radioaktivität, die von dieser Probe ausgeht. Einheit:  $1/\text{s} = 1 \text{ Bq}$  (Bequerel)

Hatte die Probe zu Beginn eine Aktivität  $A(0)$ , dann beträgt diese nach der Zeit t nur noch:

$$A(t) = A(0) \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{t/t_H}$$

Dabei ist  $t_H$  die Halbwertszeit des Isotops.

#### Die Radio-Carbon-Methode zur Altersbestimmung

Im  $\text{CO}_2$  unserer Atmosphäre befindet sich radioaktiver Kohlenstoff C14 in einem Verhältnis von  $N_{\text{C14}} : N_{\text{C12}} = 1 : 10^{12}$ . Solange Pflanzen leben, bauen sie C14 im gleichen Verhältnis in ihre organische Struktur ein. Dies führt pro g Kohlenstoff zu einer festen Aktivität  $A(0) = 11/\text{min}$ . Nach dem Absterben nimmt diese gemäß dem Zerfallsgesetz ab. Die Halbwertszeit von C14 beträgt dabei  $t_H = 5370 \text{ a}$ .

$$A(2000 \text{ a}) = A(0) \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{2000 \text{ a} / 5370 \text{ a}} = 11/\text{min} \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{0,37} = 8,5/\text{min} \stackrel{160}{=} 0,14/\text{s} = 0,14 \text{ Bq}$$

Nach 2000 a sollte die Aktivität schon deutlich kleiner sein als gemessen → der Stoff des Tuches (Leinen aus der Flachspflanze) ist deutlich jünger (nur ca. 700 a).

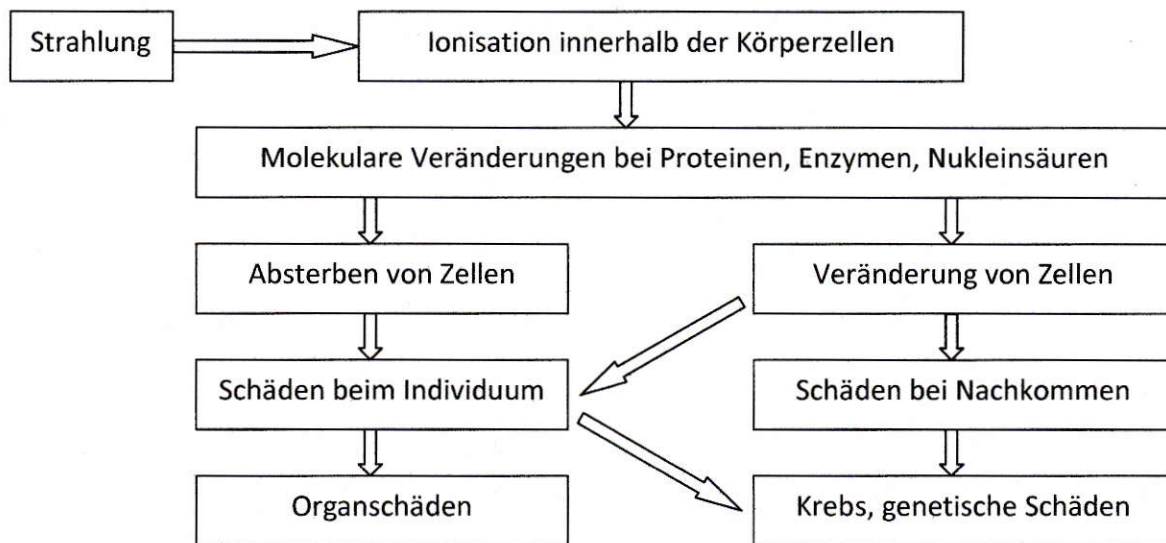
#### Übungsmöglichkeiten:

Passende Aufgaben gibt's auf Leifiphysik unter Teilgebiet Kern-/Teilchenphysik - Radioaktivität Einführung - Halbwertszeit - Aufgaben (die grünen reichen locker).



## 5.7. Biologische Strahlenwirkung - Dosimetrie

### Strahlenschäden



pos. Verwendung: gezielte Zerstörung von Zellen durch Bestrahlung von Tumoren

### Dosimetrie

In erster Linie entscheidend für die biologische Strahlenwirkung ist die aufgenommene Energiedosis. Diese ist ein Maß für die stattgefundenen Ionisationen. Zur Bewertung dieser Energiedosis wurde ein Formelsystem entwickelt.

$D = \frac{E}{m}$	<u>Energiedosis</u> (aufgenommene Energie pro kg Körpergewicht) Einheit: $1 \frac{J}{kg} = 1 Gy$ (Gray)
$H = q \cdot D$	<u>Äquivalentdosis</u> (die stark ionisierende Wirkung von $\alpha$ - Strahlung gegenüber $\beta$ und $\gamma$ wird durch ein Faktor bewertet, $\alpha$ : $q = 10$ , $\beta$ und $\gamma$ : $q = 1$ , $n$ : $q = 5$ ) Einheit: $1 \frac{J}{kg} = 1 Sv$ (Sievert)
$\dot{H} = \frac{H}{t}$	<u>Äquivalentdosisleistung</u> (entsprechend der Leistungsdefinition) Einheit: $1 \frac{J}{kg \cdot s} = 1 \frac{Sv}{s}$ (Sievert)

**Dosimeter:** kleines Messgerät, das ständig am Körper mitgeführt wird und die Äquivalentdosis aufsummiert, die vom Körper aufgenommen wurde.

### Strahlenquellen

natürliche Quellen	Belastung in $\frac{mSv}{a}$
Radon (Gas aus dem Erdboden, vor allem in Kellern)	1,1
terrestrische Strahlung (aus Zerfällen in der Erdkruste)	0,4
kosmische Strahlung (v.a. Protonen erzeugen radioakt. Nuklide)	0,3
Kalium 40 (im Körper sind 0,012% des Kaliums radioaktiv)	0,3

künstliche Quellen	Belastung in $\frac{mSv}{a}$
medizinische Untersuchungen und Behandlungen (Durchschnitt)	1,9
Fallout aus Kernwaffenexperimenten (vor allem überirdisch)	0,01
Kernkraftwerke (ohne Störfall)	0,01
Belastung durch Unfall in Tschernobyl	0,015

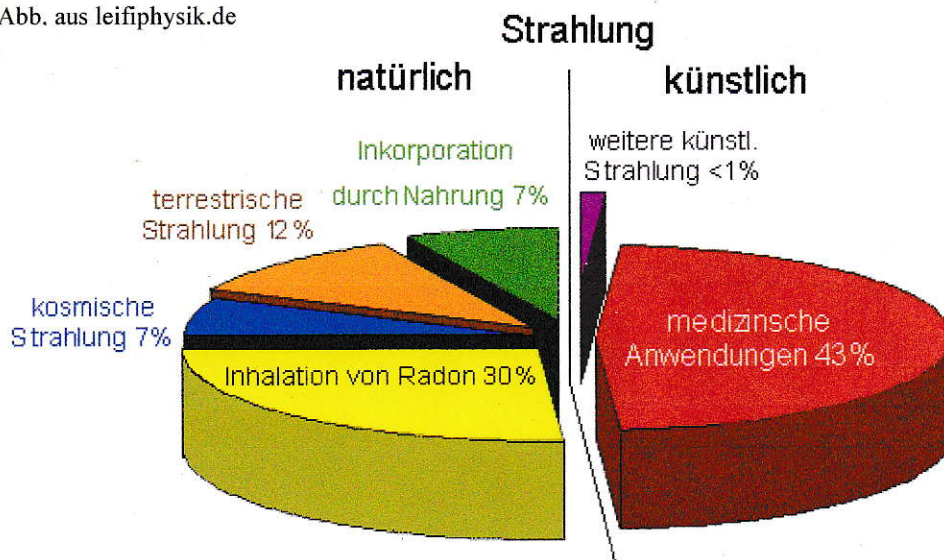
Grenzwert für zusätzliche Strahlenbelastung durch kerntechnische Anlagen

für Normalbürger: 0,3

für spez. Berufsgruppen: 50

vor allem gefährlich: **kurzfristige hohe Einzeldosen**

Abb. aus leifiphysik.de



### Dosis und physiologische Wirksamkeit

Dosis	Wirkung
über 0,15 Sv	erhöhte Sterilität
über 0,25 Sv	Veränderungen im Blutbild
über 1 Sv	vorübergehende Strahlenkrankheit: Durchfall, Haarausfall, Hautflecke
über 4 Sv	schwere Strahlenkrankheit: Erbrechen, Fieber, innere Blutungen, starke Anfälligkeit gegenüber allg. Krankheitserregern wegen Rückgang der weißen Blutkörperchen, Mortalität ca. 100%
über 7 Sv	tödliche Strahlenkrankheit: Erbrechen, Durchfall, Entzündungen, Fieber, Mortalität 50%

Diese Tabelle berücksichtigt nicht, ob diese Dosis in kurzer oder langer Zeit akkumuliert wurde. Kurze starke Einwirkungen führen bei gleicher Dosis zu stärkeren Schäden als lange geringe Einwirkungen.

### 8.5 Strahlenschutz

Abstand!	Abschirmung!	kurzzeitig!
$\frac{1}{r^2}$ – Abnahme	je nach Strahlungsart	