

# Ein Spaziergang durch die Kernphysik

Erwin Kunesch, Gmund

Illustrationen von Dr. Wolfgang Zettlmeier



© xenotar/iStock/Getty Images Plus

The Large Hadron Collider (LHC) ist der größte und leistungsstärkste Teilchenbeschleuniger der Welt. Er besteht aus einem 27 Kilometer langen Ring aus sehr guten Magneten und einer hohen Zahl von Beschleunigungsstrukturen, um die Teilchen auf Geschwindigkeiten nahe der Lichtgeschwindigkeit zu beschleunigen. In diesem Beitrag setzen sich Ihre Schüler mit Atommodellen, Zerfallsprozessen, Radioaktivität, Kernspaltung und Kernfusion auseinander und erwerben so die Grundlagen, um zu verstehen, welche Prozesse im Teilchenbeschleuniger ablaufen (die ggf. Teil eines weiteren Beitrags sind).

## Impressum

RAABE UNTERRICHTS-MATERIALIEN Physik

Das Werk, einschließlich seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt. Es ist gemäß § 60b UrhG hergestellt und ausschließlich zur Veranschaulichung des Unterrichts und der Lehre an Bildungseinrichtungen bestimmt. Die Dr. Josef Raabe Verlags-GmbH erteilt Ihnen für das Werk das einfache, nicht übertragbare Recht zur Nutzung für den persönlichen Gebrauch gemäß vorgenannter Zweckbestimmung. Die Einhaltung der Nutzungsbedingungen sind Sie berechtigt, das Werk zum persönlichen Gebrauch, als vorgenannter Zweckbestimmung in Klassensatzstärke zu vervielfältigen. Jede darüber hinausgehende Verwertung ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Hinweis zu §§ 60a, 60b UrhG: Das Werk oder Teile hiervon dürfen nicht ohne eine solche Einwilligung an Schulen oder in Unterrichts- und Lehrmedien (§ 60b Abs. 3 UrhG) vervielfältigt, insbesondere kopiert oder eingescannt, verbreitet oder in sonstiger Weise öffentlich zugänglich gemacht oder wiedergegeben werden. Dies gilt auch für Extranets von Schulen und sonstigen Bildungseinrichtungen. Die Aufführung abgedruckter musikalischer Werke ist gem. GEMA-meldepflichtig.

Für jedes Material wurden Fremdrechte recherchiert und ggf. angefragt.

In unseren Beiträgen sind wir bemüht, die für die Experimente nötigen Substanzen mit den entsprechenden Gefahrenhinweisen zu kennzeichnen. Dies ist ein zusätzlicher Service. Dennoch ist jeder Experimentator selbst angehalten, sich vor der Durchführung der Experimente genauestens über das Gefährdungspotenzial der verwendeten Stoffe zu informieren, die nötigen Vorsichtsmaßnahmen zu ergreifen sowie alles ordnungsgemäß zu entsorgen. Es gelten die Vorschriften der Gefahrstoffverordnung sowie die Dienstvorschriften der Schulbehörde.

Dr. Josef Raabe Verlag GmbH  
Ein Unternehmen der Kleinfachgruppe  
Rotebühlstraße 77  
70178 Stuttgart  
Telefon +49 711 62900-0  
Fax +49 711 62900-60  
meinRAABE@raabe.de  
www.raabe.de

Redaktion: Anna-Greta Wittnebel  
Satz: Röhr Media GmbH & Co. KG, Karlsruhe  
Bildnachweis Titel: © xenotari/iStock/Getty Images Plus  
Illustrationen: Dr. W. Zettlmeier, Barbing  
Korrektur: Mona Hitznauer, Regensburg; Johanna Stotz, Wyhl a. K.; Dr. Stefan Völker, Jena

# Ein Spaziergang durch die Kernphysik

## Oberstufe (Niveau)

Erwin Kunesch, Gmund

Illustrationen von Dr. Wolfgang Zettlmeier

<b>Hinweise</b>	<b>1</b>
<b>M 1 Ausschnitt aus der Nuklidkarte (Teil 1 und 2)</b>	<b>4</b>
<b>M 2 Atommodelle und Kernreaktionen</b>	<b>6</b>
<b>M 3 Atommodelle und Kernreaktionen</b>	<b>7</b>
<b>M 4 Atommodelle und Kernreaktionen</b>	<b>8</b>
<b>M 5 Sind Sie fit? – Testen Sie Ihr Wissen!</b>	<b>9</b>

## Die Schüler lernen:

In diesem Beitrag setzen sich Ihre Schüler mit Atommodellen, Zerfallsprozessen, Radioaktivität, Kernspaltung und Kernfusion auseinander und erwerben so die Grundlagen, um zu verstehen, welche Prozesse in einem Teilchenbeschleuniger ablaufen.

## Überblick:

Legende der Abkürzungen:

**Ab** = Arbeitsblatt

**Fo** = Folie

**LEK** = Lernerfolgskontrolle

Thema	Material	Methode
Ausschnitt aus der Nuklidkarte (Teil 1 und 2)	M1	Fo / Ab
Atommodelle und Kernreaktionen	M2	Ab
Atommodelle und Kernreaktionen	M3	Ab
Atommodelle und Kernreaktionen	M4	Ab
Sind Sie fit? – Testen Sie Ihr Wissen!	M5	LEK

## Minimalplan

Die Zeit ist knapp? Dann geben Sie die Lernerfolgskontrolle aus Hausaufgabe und verzichten ggf. auf deren Bewertung.

## Erklärung der Differenzierungssymbole

	Aufgaben, in denen eine vollständige Differenzierung möglich ist (Lernersymbol)		Die mittleren Aufgabenvarianten
	Die anspruchsvollsten Aufgabenvarianten		Die leichtesten Aufgabenvarianten

# Ein Spaziergang durch die Kernphysik

## Fachliche Hinweise von Dr. Stefan Völker (Jena)

1896 entdeckte **Henri Becquerel** (1852–1908) eine seltsame Strahlung, die aus dem Inneren von Uransalzen zu kommen schien. Dieses Experiment gilt als die Entdeckung der Radioaktivität und markiert den Start einer Forschungsgeschichte voll atemberaubender Entdeckungen, aber auch gesellschaftlicher und politischer Wirrungen und Wendungen. Zwei Beispiele:

Vor etwas mehr als 120 Jahren wurde das radioaktive Element **Radium** entdeckt. Anfang des 20. Jahrhunderts setzte man es als Wundermittel gegen alles ein. Dann wurden die Gefahren mehr und mehr deutlich und viele Leute starben (tragisch die „Radium Girls“). Seit Mitte des 20. Jahrhunderts werden radioaktive Stoffe erfolgreich in der Nuklearmedizin für Diagnostik und Therapie eingesetzt – zum Beispiel  $^{225}\text{Ra}$  bei der Behandlung von Prostatakrebs.

Genauso ereignisreich ist die Geschichte der **Kernspaltung**: Entdeckt wurde sie im Jahre 1938 durch Otto Hahn. Sie war ein Mittel zur Atombombe) und friedlich genutzt (CO<sub>2</sub>-neutral? vs. Endlagerproblematik). Katastrophen wie Tschernobyl (26. April 1986) und Fukushima (11. März 2011) forcierten den Ausstieg der BRD im Jahr 2011.

Die Basis zum Verständnis der Geschichte, der aktuellen und der zukünftigen Nutzung der Radioaktivität ist ein grundlegendes Wissen zum **Aufbau des Atoms**, der **Kernumwandlung** und der daraus resultierenden **ionisierenden Strahlung**.

## Lernvoraussetzungen

Für diesen Beitrag ist ein Kenntnis des **Rutherford'schen Atommodells** ausreichend: ein kompakter Atomkern, der fast die gesamte Masse des Atoms ausmacht, und eine ausgedehnte Elektronenhülle.

Für den Aufbau des Atomkerns können Sie das **Tröpfchenmodell** nutzen: Hier vergleicht man einen Atomkern mit einem Wassertropfen. So wie sich ein großer Wassertropfen aus vielen kleineren Wassertröpfchen zusammensetzen lässt, kann auch der Atomkern aus vielen kleinen Nucleonen (Neutronen und Protonen) zusammengesetzt werden.

Dabei haben ein kleiner und ein großer Wassertropfen die **gleiche Dichte**, genauso wie ein kleiner und ein großer Atomkern ( $\approx 2 \cdot 10^{17} \text{ kg/m}^3$ ). Zusammengehalten wird der Wassertropfen durch **Kohäsionskräfte** und der Atomkern durch die **starke Wechselwirkung**, die eine nur sehr kurze Reichweite hat.

Unter **Radioaktivität** versteht man, dass sich Atomkerne unter Ausstrahlung von radioaktiver Strahlung ineinander umwandeln. Dies kann spontan ohne äußere Einwirkung geschehen (natürliche Radioaktivität) oder angeregt durch Beschuss mit z. B. Neutronen (künstliche Radioaktivität).

Die radioaktive Strahlung unterteilt man in  $\alpha$ -,  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlung und die  $\beta$ -Strahlung weiter in  $\beta^-$ - und  $\beta^+$ -Strahlung. Die Kernumwandlungen lassen sich durch Fallsgleichungen und Zerfallsreihen darstellen, wobei die Aufstellung dieser Reaktionsgleichungen von **Erhaltungssätzen** geleitet wird.

Bei allen Kernumwandlungen bleiben

- Energie und Impuls,
- die Nukleonenzahl,
- die Ladung und
- die Leptonenzahl

erhalten.

Für den  **$\alpha$ -Zerfall** gilt demnach das Allgemeine  ${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z-2}^{A-4}Y + {}_2^4\text{He}$ .

Ein Nuklid X mit A Nukleonen und davon Z Protonen wandelt sich in ein Nuklid Y um, das insgesamt vier Nukleonen (A – 4) und davon zwei Protonen (Z – 2) weniger hat als das Ausgangsnuklid. Ausgesandt wird ein Heliumkern, der auch als  $\alpha$ -Teilchen bezeichnet wird.

Beim  **$\beta$ -Zerfall** unterscheidet man in  $\beta^-$ - und  $\beta^+$ -Zerfall mit den allgemeinen Zerfallsgleichungen  ${}_Z^AX \rightarrow {}_Z^AY + e^- + \nu_e$  ( $\beta^-$ ) und  ${}_Z^AX \rightarrow {}_Z^AY + e^+ + \nu_e$  ( $\beta^+$ ).

Bei beiden Zerfallsarten bleibt die Massenzahl gleich, aber die Ordnungszahl steigt um +1 ( $\beta^-$ ) bzw. sinkt um –1 ( $\beta^+$ ). Wichtig ist, dass das ausgesandte Elektron keineswegs aus der Elektronenhülle stammt, sondern beim  $\beta^-$ -Zerfall **im Kern** ein Neutron in ein Proton, ein Elektron und ein Antielektronenneutrino umgewandelt wird. Beim  $\beta^+$ -Zerfall wandelt sich im Kern ein Proton in ein Neutron, ein Positron und ein Elektronenneutrino um. In diesem Beitrag wird die Leptonenzahlerhaltung nicht weiter thematisiert. Aus diesem Grund wird, wie in Schulbüchern üblich, auf die Neutrinos in den Gleichungen verzichtet.

Nach einer Kernumwandlung ist es wahrscheinlich, dass der entstandene Kern sich im nächst noch in einem **angeregten Zustand** befindet. Dann findet ein  **$\gamma$ -Zerfall** statt, d. h., der angeregte Kern geht unter Aussendung energiereicher  $\gamma$ -Strahlung in seinen Grundzustand über. Dabei verändern sich Ordnungszahl und Massenzahl des Nuklids nicht, wie man an der allgemeinen Gleichung  ${}^A_Z X^* \rightarrow {}^A_Z X + \gamma$  sieht. Das Sternchen symbolisiert den angeregten Zustand.

Bei der Kernspaltung unterscheidet man zwischen **Spontanspaltung** und **neutronen-induzierter Spaltung**. In beiden Fällen entstehen zwei oder mehr kleinere Atomkerne, wobei in jedem Fall wieder die Erhaltungssätze gelten müssen.

Die Atombombe und die Verwendung radioaktiver Brennstoffe in Kernkraftwerken zeigt sehr eindrucksvoll, dass Kernumwandlungen auch stets von **Energieumwandlung** begleitet werden. Vergleicht man die Masse eines Atomkerns mit der Summe der Massen seiner Bestandteile, so stellt man fest, dass ein Kern immer leichter ist:

$$\Delta m_K = Z \cdot m_p + N \cdot m_n - m_K > 0.$$

Diese Differenz bezeichnet man als **Massendefizit** eines Kerns. Sie ist nach Einsteins berühmter Formel  $E = m \cdot c^2$  äquivalent zur **Bindungsenergie** des Kerns. Die mittlere Bindungsenergie pro Nukleon ist aber nicht konstant, sondern hängt von der Anzahl der Nukleonen im Kern ab. Sie steigt zunächst (unregelmäßig) bis etwa zum  ${}^{56}\text{Fe}$  und nimmt dann wieder ab.

Aus diesem Grund wird bei der Fusion leichter Kerne Energie frei, genauso wie bei der Spaltung schwerer Kerne (leicht und schwer bezieht sich auf den Vergleich mit  ${}^{56}\text{Fe}$ ).

Um den Betrag der frei werdenden Energie zu ermitteln, berechnet man die Massendifferenz zwischen Edukten und Produkten und multipliziert diese mit  $c^2$ . Im Falle von

$$m_{\text{Edukte}} - m_{\text{Produkte}} > 0$$

wird Energie frei, man nennt diese Reaktion **exotherm**.

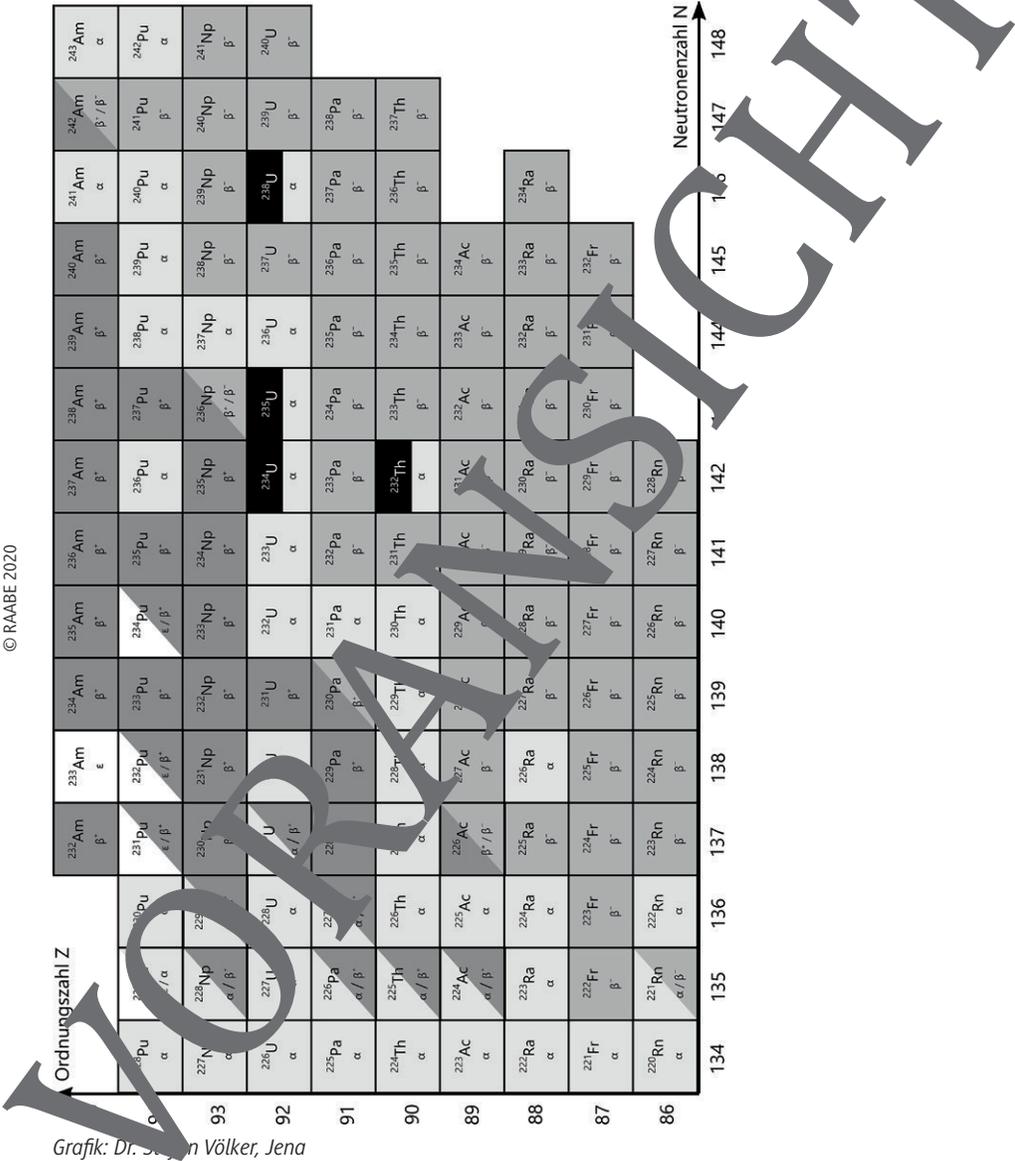
Umgekehrt wird eine Reaktion als **endotherm** bezeichnet, wenn

$$m_{\text{Edukte}} - m_{\text{Produkte}} < 0$$

ist.



### M 1 Ausschnitt aus der Nuklidkarte (Teil 2)



Grafik: Dr. Stefan Völker, Jena

## M 2 Atommodelle und Kernreaktionen

- Welche Atommodelle aus der klassischen Physik kennen Sie?
- Beschreiben Sie den Versuch, mit dem Rutherford das Modell eines Vorkurslers widerlegte.
- Vervollständigen Sie
  - ${}_{9}^{18}\text{F} \rightarrow {}_{7}^{17}\text{O} + {}_{+}^{0}?$  (Ausendung eines Positrons)
  - ${}_{4}^{8}\text{Be} \rightarrow {}_{2}^{4}\text{He} + {}_{2}^{4}\text{He}$  (zerfällt in 2  $\alpha$ -Teilchen)
  - ${}_{6}^{14}\text{C} \rightarrow {}_{7}^{14}\text{N} + {}_{-}^{0}?$  (Ausendung eines Elektrons)
  - ${}_{2}^{5}\text{He} \rightarrow {}_{2}^{4}\text{He} + {}_{+}^{1}?$  (Ausendung eines Neutrons)
  - ${}_{15}^{32}\text{P} \rightarrow {}_{15}^{31}\text{S} + {}_{-}^{0}?$  (Ausendung eines Elektrons)
- Vervollständigen Sie die Zerfallsgleichungen mithilfe der Nuklidkarte (M 1, Teil 2):
  - ${}_{90}^{232}?\xrightarrow{\alpha}{}_{88}^{228}?\xrightarrow{\beta^{-}}{}_{89}^{228}?\xrightarrow{\beta^{-}}{}_{90}^{228}?$
  - ${}_{90}^{234}\text{Th}\xrightarrow{\alpha}{}_{88}^{230}\text{Th}\xrightarrow{\alpha}{}_{86}^{226}\text{Ra}\xrightarrow{\alpha}{}_{82}^{222}\text{Rn}$
  - ${}_{94}^{241}\text{Pu}\xrightarrow{\beta^{-}}{}_{95}^{241}\text{Am}\xrightarrow{\alpha}{}_{93}^{237}\text{Np}\xrightarrow{\alpha}{}_{89}^{233}\text{Ac}$
- Wie viele  $\alpha$ - und wie viele  $\beta$ -Zerfälle führen dazu, dass aus  ${}_{90}^{232}\text{Th}$  das Element  ${}_{86}^{220}\text{Rn}$  entsteht?
- Aus welchem Element entsteht radioaktives Technetium  ${}_{43}^{99}\text{Tc}$  durch  $\beta$ -Zerfall?
- In Angaben bezüglich des Strahlenschutzes treten die Einheiten 1 Gray (1 Gy) sowie 1 Sievert (Sv) auf.
  - Welche physikalischen Größen werden in diesen Einheiten gemessen?
  - Welcher physikalische Unterschied besteht zwischen beiden Größen, obwohl beide Einheiten durch  $\frac{\text{J}}{\text{kg}}$  ersetzt werden können?
  - Beschreiben Sie diesen Unterschied in Worten.

### M 3 Atommodelle und Kernreaktionen

- Im Gegensatz zu früher weiß man, dass Protonen und Neutronen nicht die kleinsten Teilchen sind, sondern diese sich aus Quarks zusammensetzen.
  - Welche zwei für die Zusammensetzung von Neutronen und Protonen relevanten Arten von Quarks gibt es?
  - Welche Ladungen tragen diese Quarks?
  - Aus welchen Quarks setzen sich Neutronen und Protonen jeweils zusammen?
- Die Messung des Zerfalls einer radioaktiven Masse ergab folgendes Messresultat:

<b>m in kg</b>	3,917	3,410	2,969	2,585	2,250	1,918	1,705	1,514	1,292
<b>t in a</b>	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5

<b>m in kg</b>	1,125	0,979	0,853	0,742	0,646	0,562	0,490	0,426	0,371
<b>t in a</b>	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0

- Erstellen Sie ein Diagramm.
  - Ermitteln Sie die Halbwertszeit.
  - Wie groß war die Masse bei Beginn der Messung?
  - Formulieren Sie das Zerfallsgesetz.
  - Welche Masse ist nach 10 Jahren zerfallen?
  - Wie lange dauert es, bis die Masse auf 10 g abgesunken ist?
- Gegeben seien Platten aus Aluminium und Eisen mit unterschiedlichen Halbwertsdicken. Dabei ist die Halbwertsdicke von Aluminium größer als die von Eisen.
    - Welche der beiden Platten ist bei der Abschirmung von  $\beta$ -Strahlen effektiver? Begründen Sie.
    - Die Halbwertsdicke von Aluminium beträgt 0,41 mm. Wie viele Prozent beträgt die Energie nach Abschirmung durch eine Aluminiumplatte der Dicke 1,0 mm?
    - Nach Abschirmung durch eine Eisenplatte der Dicke 0,50 mm beträgt die Energie noch ca. 8,4 % der ursprünglichen Energie. Berechnen Sie die Halbwertsdicke.

## M 4 Atommodelle und Kernreaktionen

- Zwei Teilchen, die jeweils eine Elementarladung tragen, werden durch die Spannung 100 V beschleunigt und treten in ein homogenes Magnetfeld der Flussdichte 0,68 mT ein, deren Richtung in die Zeichenebene hineingerichtet ist. Jede der beiden Kreisbögen hat einen Radius von 5,0 cm.  
Untersuchen Sie durch Rechnung, um welche Teilchen es sich handelte.



Abb. 1 Grafik:  
Dr. W. Kettlmeier

- Berechnen Sie die Kernbindungsenergie<sup>1</sup> eines Heliumkerns in J und MeV.
- Was versteht man unter Urananreicherung? Recherchieren Sie im Internet.
- Bei der Kernspaltung wird z. B. Uran-235 mit Neutronen beschossen. Dabei zerplatzt der Urankern in Barium-144, Krypton-89 sowie 3 Neutronen.
  - Stellen Sie die Reaktionsgleichung auf.
  - Berechnen Sie den Massendefizit.
  - Geben Sie die frei werdende Energie in Joule und in MeV an.
  - Wie viel Gesamtenergie wird bei einer Masse von 2,0 kg Uran-235 frei?
  - Setzt man diese Kernspaltung in Gang und lässt sie unkontrolliert weiterlaufen, führt das zu extremen Konsequenzen (Atombombe). Begründen Sie die Gefährlichkeit dieser Kettenreaktion.
  - Die Kernreaktion, die in Kernkraftwerken Anwendung findet, wird der Vorgang durch Einführen von Borstäben gesteuert. Weshalb verwendet man hier Bor und nicht Blei?
  - Wie lässt sich ein Kernkraftwerk abschalten?



<sup>1</sup> Die Massen der Atome/Atomkerne können im Internet, z. B. unter <http://www.periodensystem-online.de/> bei den jeweiligen Isotopen nachgelesen werden.

## M 5 Sind Sie fit? – Testen Sie Ihr Wissen!

Erlaubte Hilfsmittel: Taschenrechner, **M1** Nuklidkarte Teil 1.



- Kernfusion: Berechnen Sie die freigesetzte Energie, wenn
  - zwei Protonen und zwei Neutronen zu einem Heliumkern verschmelzen.
  - ein Deuteriumkern (Deuteron) und ein Tritiumkern (Triton) zu einem Heliumkern unter Aussendung eines Neutrons verschmelzen.
- Eine Reaktion heißt endotherm, wenn die Ausgangsstoffe weniger Energie besitzen als die Endstoffe, also

$$E_{\text{vorher}} < E_{\text{nachher}} \Rightarrow m_{\text{vorher}} \cdot c^2 - m_{\text{nachher}} \cdot c^2 < 0.$$

Analog heißt eine Reaktion exotherm, wenn die Ausgangsstoffe mehr Energie besitzen als die Endstoffe, also

$$E_{\text{vorher}} > E_{\text{nachher}} \Rightarrow m_{\text{vorher}} \cdot c^2 - m_{\text{nachher}} \cdot c^2 > 0.$$

Untersuchen Sie durch Rechnung, welche der folgenden Reaktionen endotherm, welche exotherm sind:

- ${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^7_4\text{Be} + {}^1_0\text{n}$
  - ${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \rightarrow 2 {}^4_2\text{He}$
  - ${}^{14}_7\text{N} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{17}_8\text{O} + {}^1_1\text{p}$
  - ${}^{19}_9\text{F} + {}^1_1\text{p} \rightarrow {}^{16}_8\text{O} + {}^4_2\text{He}$
- $\beta^-$ -Strahlen sind schnell bewegte Elektronen und kommen aus dem Atomkern, obwohl sich dort nur Protonen und Neutronen befinden.  
Erklären Sie, wie sich dieser scheinbare Widerspruch erklären lässt und weshalb sich die Protonenzahl beim  $\beta^-$ -Zerfall erhöht.

## Der RAABE Webshop: Schnell, übersichtlich, sicher!



### Wir bieten Ihnen:



Schnelle und intuitive Produktsuche



Übersichtliches Kundenkonto



Komfortable Nutzung über  
Computer, Tablet und Smartphone



Höhere Sicherheit durch  
SSL-Verschlüsselung

**Mehr unter: [www.raabe.de](http://www.raabe.de)**