

Das Manhattan-Projekt und seine verheerenden Folgen

Wolfgang Vogg, Eurasburg



Abb.1 und 2: Donald Trump gegen den Diktator Kim Jong-un; Foto Trump: Mauritius Images/Richard Levine/Alamy; Foto Kim Jong-un: Foto: Mauritius Images/United Archives



Abb. 3: Das zerstörte Nagasaki – warum lernt die Menschheit nicht?

Quelle: <https://www.tagesschau.de/multimedia/bilder/hiroshima-nagasaki-101.html>

II/F

Die Entdeckung der Kernspaltung lag noch nicht einmal sieben Jahre zurück, als am 6. August 1945 von den Vereinigten Staaten von Amerika kurz vor Ende des Zweiten Weltkrieges die erste Uranbombe auf die japanische Stadt **Hiroshima** abgeworfen wurde. Nur drei Tage später, am 9. August, folgte die Plutoniumbombe, die **Nagasaki** traf und – wie in Hiroshima – in Sekundenbruchteilen in einer nicht nachvollziehbaren Katastrophe endete: nahezu 300 000 Tote und eine völlig zerstörte und radioaktiv verseuchte Umgebung. Erläutern Sie den Schülern mit Hilfe dieses Beitrags, dass technischer Fortschritt – z. B. die Entdeckung der Kernenergie, die in Kernkraftwerken auch friedlich genutzt wird – verheerende Auswirkungen haben kann, wie sie sich durch den Einsatz von Atombomben ergeben. Stellen Sie einen aktuellen Bezug zum Nordkorea-Konflikt her.

Eine Entdeckung, die in einer unvorstellbaren Katastrophe endete.

Der Beitrag im Überblick

Klasse: 12 (G 8)

Dauer: 4–5 Stunden

Ihr Plus:

- ✓ Den Blick schärfen für die Risiken und Gefahren der Kernenergie
- ✓ Fachübergreifendes Arbeiten (Geschichte)
- ✓ Aktueller Bezug: Nordkorea-Konflikt

Inhalt:

- Physikalische Grundlagen der Kernphysik
- Kernspaltung und Kernfusion
- Die Uran-Bombe
- Die Plutonium-Bombe
- Die Wasserstoff-Bombe

Fachliche und didaktisch-methodische Hinweise

Entdeckungen und Entwicklungen im historischen Ablauf

Es waren **Otto Hahn** (1879–1968) und seine Mitarbeiter **Lise Meitner** (1878–1968) und **Fritz Straßmann** (1902–1980), die herausfanden, dass beim Neutronenbeschuss von U-235 Barium, ein Element mittleren Atomgewichtes, entsteht. Man nannte den beobachteten Effekt „**Kernspaltung**“ und konnte sehr schnell aufgrund der **Einstein’schen Masse-Energie-Äquivalenz $E = m \cdot c^2$** errechnen, dass bei dem Prozess ein gewaltiger Energiebetrag freigesetzt werden muss. So benötigten die für den Beschuss von Uran eingesetzten thermischen Neutronen nur eine Energie von 0,03 eV mit dem Ergebnis, dass pro Spaltung eines Urankernes eine Energie von 200 MeV zur Verfügung stand, d. h., die Energie, die 1 kg reines Uran-235 liefern würde, entspräche derjenigen von rund 2500 t Steinkohle. Doch nicht nur die fast unglaubliche Energiebilanz sorgte für Aufsehen, sondern auch die bald feststehende Tatsache, dass bei der Spaltung des Urankernes mehr Neutronen freigesetzt werden, als ursprünglich aufgewandt wurden. Damit wurde auch sehr schnell die Möglichkeit einer **nuklearen Kettenreaktion** in Betracht gezogen.

Enrico Fermi (1901–1954), ein bedeutender Kernphysiker des 20. Jahrhunderts, wies im Frühjahr 1939 als einer der Ersten auf die Möglichkeit des **Baus von Atombomben** hin. Anfang 1942 wurde der amerikanische Physiker **Robert Oppenheimer** (1904–1967) mit der Aufgabe betraut, in einem speziell dafür eingerichteten Labor die Bombe zu bauen. Staat und Militär waren mittlerweile höchst interessiert an diesem Vorhaben und gaben ihm den Decknamen „**Manhattan-Projekt**“. Oppenheimer gelang es, einen Kreis hervorragender Physiker um sich zu sammeln, unter ihnen den aus Ungarn stammenden **Edward Teller** (1908–2003). Im Frühjahr 1943 entstand schließlich unter strengster Geheimhaltung in der Wüste von New Mexico bei Los Alamos ein Laboratorium, das alle Arbeiten in Hinblick auf die Entwicklung einer Atombombe koordinieren sollte.

Es war kein geringerer als **Albert Einstein** (1879–1955), der Fermi in seinen Überlegungen bezüglich der Möglichkeit des Baus einer Atombombe unterstützte. Neben der Herstellung des Uran-Isotopes U-235 wurde noch ein zweiter Weg von Fermi verfolgt, nämlich die Herstellung eines **Transuranes mit der Massenzahl 239 (Plutonium genannt)**, bei dem man theoretisch bereits gefolgert hatte, dass es ebenso gut spaltbar sein müsste wie U-235. Beide Vermutungen erwiesen sich als richtig – nun galt es noch, das Spaltmaterial in großen Mengen herzustellen, was letztendlich gelang und zum Bau der Uranbombe „**Little Boy**“ und der Plutoniumbombe „**Fat Man**“ und zu deren Abwürfen im Jahr 1945 führte.

Es war einmal mehr Edward Teller, der bereits im Sommer 1942 eine heftige Diskussion über die Frage auslöste, ob die Zündung einer Spaltungsenergie freisetzenden Bombe möglicherweise zu einer weit größeren Explosion durch Fusion des in der Atmosphäre vorkommenden Wasserstoffs führen könne. Schon 1938 hatten die deutschen Physiker **Bethe** (1906–2005) und **Weizsäcker** (1912–2007) die Theorie aufgestellt, dass die Sonnenenergie aus der Verschmelzung von je vier Protonen zu einem Heliumkern herrührt. Die dazu nötigen Temperaturen hielt Teller für erreichbar, seine Forschungen sollten in einigen Jahren zur Entwicklung der **Wasserstoffbombe** führen.

Seit 1945 kam es bis heute weltweit zu über **2000 Atomwaffentests**, wobei neben den USA und der Sowjetunion auch Frankreich, Großbritannien, China und Indien zu den Atommächten zählen. Die Versuche fanden unter unterschiedlichsten Umgebungsbedingungen statt: oberirdisch, unterirdisch und unter Wasser. Man schätzt, dass alle in der Atmosphäre durchgeführten Atomwaffentests zusammen eine Sprengkraft von etwa 450 Megatonnen TNT erreichten, was etwa 25 000 Bomben des Hiroshima-Typs entspricht. Von allen unterirdischen Atomwaffentests blieben etwa 3800 kg Plutonium im Boden zurück, während durch oberirdische Tests etwa 4200 kg Plutonium in die Atmosphäre geschleudert wurden; als Folge der oberirdischen wie unterirdischen Tests sind bis heute **ganze Landstriche unbewohnbar**.

Materialübersicht

⌚ V = Vorbereitungszeit SV = Schülerversuch Ab = Arbeitsblatt/Informationsblatt
 ⌚ D = Durchführungszeit LV = Lehrerversuch Fo = Folie LEK=Lernerfolgskontrolle

M 1	Ab	Physikalische Grundlagen – frischen Sie Ihr Wissen auf! Atommasse; atomare Masseneinheit; Bindungsenergie
M 2	Ab	Kernspaltung von Uran 235 Ablauf des Spaltvorgangs; Bedeutung der Neutronen; Unkontrollierte Kettenreaktion; Neutronenvermehrungsfaktor; kritische Masse
M 3	Ab	Die Uranbombe Grundlagen und Entwicklung Bau und Funktion
M 4	Ab	Die Plutoniumbombe Besonderheiten Bau und Funktion
M 5	Ab	Sprengwirkung der Uranbombe Vergleich mit TNT Energiefreisetzung Wie schnell wird Energie frei?
M 6	Ab	Die Wasserstoffbombe Kernfusion statt Kernspaltung Reaktionsgleichung Energiefreisetzung

Minimalplan

Ihre Schüler wiederholen die physikalischen Grundlagen (**M 1**) als Hausaufgabe. Sie besprechen im Unterricht, wie die Kernspaltung von Uran-235 funktioniert (**M 2**). Anschließend bilden Sie Gruppen:

Gruppe A: Die Uranbombe (**M 3**)

Gruppe B: Die Plutoniumbombe (**M 4**)

Gruppe C: Die Wasserstoffbombe (**M 6**)

Jeweils zwei Schüler unterrichten ihre Klassenkameraden über Bau und Funktionsweise der jeweiligen Bombe. Dies sollte aber in einer Stunde abgehandelt sein.

Zentraler Bestandteil der Unterrichtseinheit ist weiterhin das **Interview mit dem Physiker Carl Friedrich von Weizsäcker** über die Möglichkeiten und Grenzen der Forschung sowie ein Bezug zum **aktuellen Nordkorea-Konflikt (siehe Mediathek)**.

Versäumen Sie es nicht, mit Ihren Schülern das **Deutsche Museum** in München (www.deutsches-museum.de) zu besuchen (Technik-Abteilung).



Abb 4: 1963 wurde C.-F. von Weizsäcker mit dem Friedenspreis des Deutschen Buchhandels ausgezeichnet, da er sich nach dem Krieg mit Fragen der Verantwortung und Ethik in den Naturwissenschaften beschäftigt hat.

Foto: Bundesarchiv B422 Bild-0174

M 1 Physikalische Grundlagen – frischen Sie Ihr Wissen auf!

Die **Atommasse** eines einzelnen Atoms ist gleich der Summe der Einzelmassen seiner Bestandteile *Protonen*, *Neutronen* und *Elektronen*. So hat das leichteste Atom (Wasserstoff) in der Basiseinheit „1 kg“ eine Masse von $1,6735 \cdot 10^{-27}$ kg. Man bezeichnet diese Masse als seine **absolute Masse**. Der Umgang mit solchen Zahlen ist aufwendig – deshalb hat man die relativen Atommassen eingeführt, die einfacher zu handhaben sind. Zur Festlegung der relativen Atommasse musste ein einheitlicher Bezugspunkt gefunden werden. Dieser hat sich im Laufe der Geschichte mehrmals verändert; bis 1940 wurde das Wasserstoffatom, ab 1950 das Sauerstoffatom verwendet.

Seit 1961 bezieht man weltweit die Atommasse auf das Kohlenstoffisotop ^{12}C mit einer absoluten Masse von $19,9236 \cdot 10^{-27}$ kg. Davon nimmt man $1/12$ und setzt dies gleich der **atomaren Masseneinheit 1 u**.

Somit gilt: $1 \text{ u} = 1,660539 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

Daraus folgt, dass die relative Atommasse des ^{12}C -Atoms 12 u beträgt.

Hinweis: Die in der nebenstehenden Tabelle angegebenen Atommassen sind für alle Aufgaben des Beitrages zu verwenden. Atommassen in u; Quelle: Physical Measurement Laboratory;

(https://physics.nist.gov/cgi-bin/Compositions/stand_alone.pl?ele=&all=all&ascii=html&isotype=all)

Atomkerne setzen sich aus Protonen und Neutronen zusammen. Allerdings stellt man bei sehr genauen Messungen fest, dass sich die Masse der Atomkerne von der erwarteten Summe aus Protonen und Neutronen unterscheidet. Diese **Massendifferenz (Massendefekt)** kommt dadurch zustande, dass beim Zusammenbau der Nukleonen aufgrund ihrer anziehenden Kernkräfte das System Energie verliert. Entsprechend der Einstein'schen Masse-Energie-Beziehung $E = m \cdot c^2$ wird daher die Masse des Kerns kleiner sein als die Summe seiner Einzelbausteine. Will man einen Kern wieder in seine Bestandteile zerlegen, muss genau diese Energie aufgewendet werden. Man spricht daher von der **Kernbindungsenergie** – der Massendefekt entspricht folglich genau der Bindungsenergie eines Kernes. Die Abbildung zeigt den Verlauf der Bindungsenergie je Nukleon von den leichten zu den schweren Kernen.

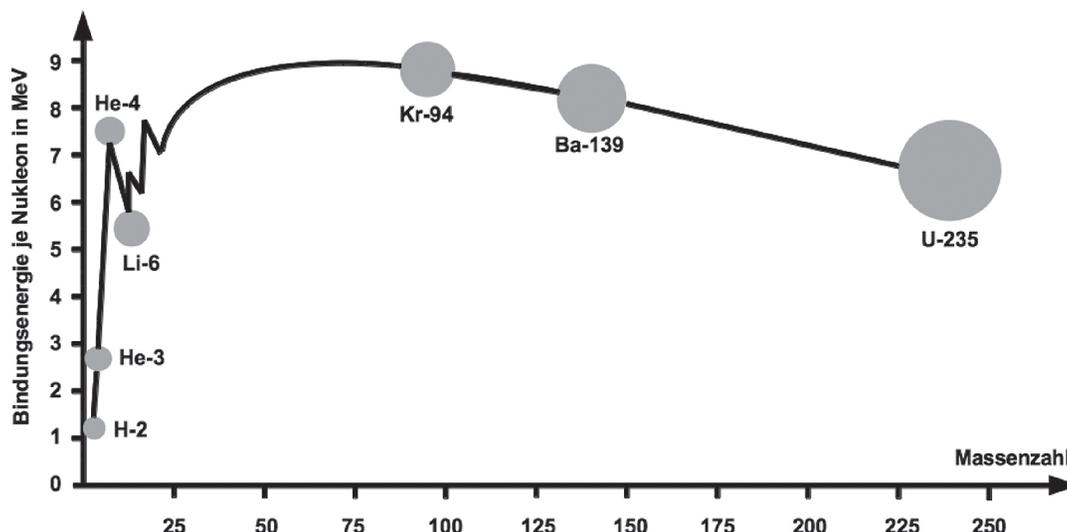


Abb. 5: Abhängigkeit der Bindungsenergie von der Massenzahl

^1_0n	1,008665	$^{94}_{37}\text{Rb}$	93,926395
^1_1H	1,007825	$^{94}_{38}\text{Sr}$	93,915356
^2_1H	2,014102	$^{140}_{55}\text{Cs}$	139,917283
^3_1H	3,016049	$^{144}_{56}\text{Ba}$	143,922955
^4_2He	4,002603	$^{235}_{92}\text{U}$	235,043930
^6_3Li	6,015123	$^{239}_{94}\text{Pu}$	239,052164

II/F

M 2 Kernspaltung von Uran 235

Unter **Kernspaltung** versteht man die Zerlegung eines schweren Atomkernes in zwei mittelschwere Atomkerne. Die Spaltung eines schweren Atomkernes kann **spontan ohne äußeres Zutun** erfolgen oder durch den **Beschuss mit Neutronen** ausgelöst werden. Die durch die Spaltung neu entstandenen Atome nennt man **Spaltprodukte**.

Die folgende Abbildung zeigt schematisch eine der vielen möglichen, durch Neutronenbeschuss ausgelösten Spaltungen eines Uran-235-Kernes – in diesem Beispiel eine Spaltung in einen Cäsium-140-Kern und einen Rubidium-94-Kern.

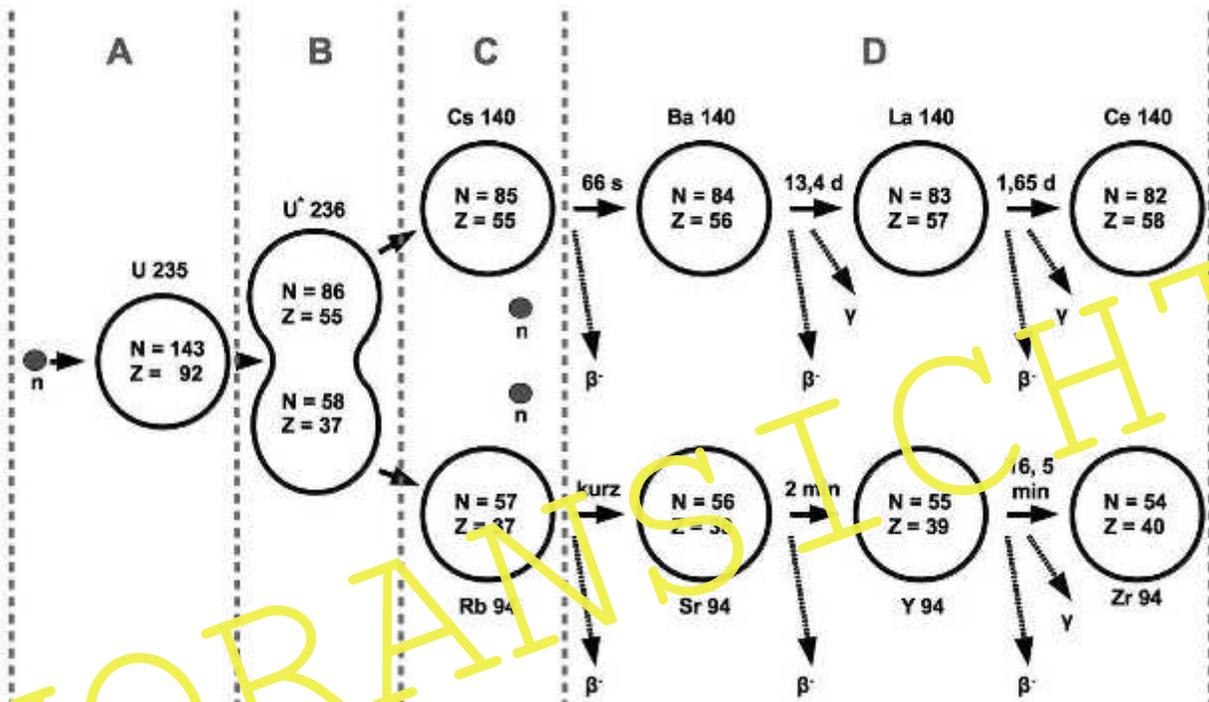


Abb. 6: Spaltung eines Uran-235-Kernes in einen Cäsium-140-Kern und einen Rubidium-94-Kern (3. Spalte). Beide entstehenden Produkte zerfallen dann noch weiter.

Aufgaben

- Beschreiben Sie anhand der Abbildung, was in den einzelnen Abschnitten **A bis D** beim Spaltvorgang sowie nach der Spaltung mit den Bruchstücken passiert.
- Erläutern Sie, welche Bedeutung
 - langsame und schnelle Neutronen,
 - die unkontrollierte Kettenreaktion,
 - der Neutronenvermehrungsfaktor k ,
 - die kritische Masse
 für den Ablauf einer U-235-Atombombenexplosion haben.
- Stellen Sie ausgehend von der Abbildung die Reaktionsgleichung für den Zerfall von U-235 auf und zeigen Sie durch Rechnung, dass bei der Spaltung von 1 kg U-235 dieselbe Energie frei werden würde wie bei der Spaltung von ca. 2500 t Steinkohle.

Tipp Der Heizwert für Steinkohle beträgt 30 MJ/kg.

M 3 Die Uranbombe

Bei der Herstellung einer Kernspaltungsbombe (Uran- und Plutoniumbombe) ist von entscheidender Bedeutung, dass man unterkritische Massen von Uran oder Plutonium auf technisch raffinierte Weise so zusammenbringt, dass sie den kritischen Wert deutlich überschreiten und damit die unkontrollierte Kettenreaktion und die Explosion auslösen. Da aber die Kernspaltung in Sekundenbruchteilen abläuft, müssen unterkritische Mengen des Spaltstoffes bei extremer Geschwindigkeit miteinander vereint werden, sonst würde die Bombe harmlos verpuffen. Die folgende Abbildung zeigt schematisch die erste im Krieg gegen Japan eingesetzte Atombombe mit dem Namen „**Little Boy**“. Sie zerstörte am 6. August 1945 die Stadt **Hiroshima**.



© Wikimedia (gemeinfrei)

Abb. 7: „Little Boy“ auf dem US-Stützpunkt Tinian vor der Verladung in den B-29-Bomber Enola Gay

Aufgabe 1

Beschreiben Sie in Ihrem Heft den Bau und die Funktionsweise von „**Little Boy**“ anhand der Abbildung unten.

Recherchieren Sie dazu im Internet und in entsprechenden Lehrbüchern.

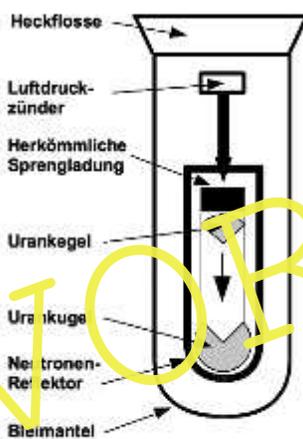
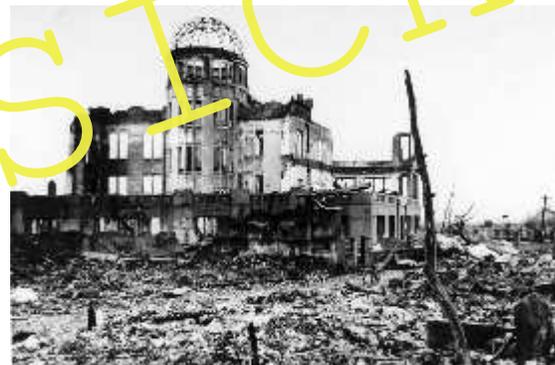


Abb. 8: „Little Boy“ Schematische Darstellung



© Popperfoto/Getty Images

Abb. 9: War and Conflict, World War Two, pic: 1945. The ruins of a cinema stand stark against the rubble after the Atom bomb attack on Hiroshima, which was dropped on 8th August

II/F

VORANSICHT



Aufgabe 2

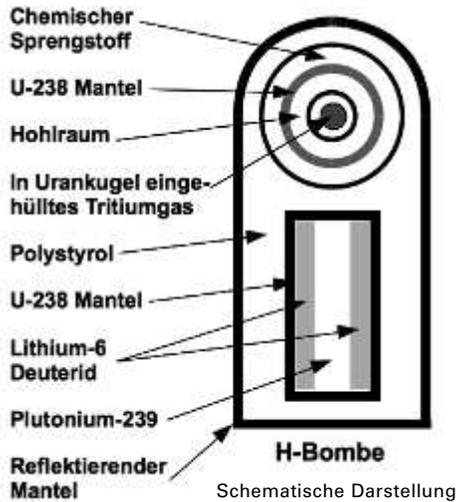
Informieren Sie sich im Internet zur Biografie der Physiker, die die Bomben gebaut haben.

<p>Abb. 10: Enrico Fermi (1901–1954) Foto: Department of Energy. Office of Public Affairs</p>	<p>Abb. 11: Edward Teller (1908–2003); Foto: http://www.klimaskeptiker.info/</p>	<p>Abb. 12: Robert Oppenheimer (1904–1967) © Department of Energy, Office of Public Affairs</p>	<p>Abb. 13: Andrej Sacharow (1921–1989) © Wikimedia Commons / Anefo / Croes, R.C.; CC BY-SA 3.0 NL</p>

M 6 Die Wasserstoffbombe

Aufgabe 1

Beschreiben Sie in Ihrem Heft den Bau und die Funktionsweise der Wasserstoffbombe anhand der Abbildung. **Recherchieren** Sie dazu im Internet und in entsprechenden Lehrbüchern.



Warum sind Wasserstoffbomben so gefährlich?

Die Funktionsweise von Atombomben basiert auf der **Spaltung** von Atomkernen. Bei Wasserstoffbomben dagegen kommt es zur **Fusion von Atomkernen**, also ihrer Verschmelzung. Die dadurch freigesetzten Mengen an Energie sind um ein **Vielfaches höher** als bei der Kernspaltung. Sowohl bei Atom- als auch bei Wasserstoffbomben kommt **radioaktives Plutonium oder Uran** zum Einsatz. Wasserstoffbomben wurden noch nie in einem Krieg eingesetzt. Erstmals erfolgreich getestet wurde die Waffe in den 1950-er Jahren von den USA, die Sowjetunion zog wenig später nach. Seit den 1960-er Jahren finden die Tests der Bomben unterirdisch statt, um den radioaktiven Niederschlag, den sog. **Fallout**, zu begrenzen. Bei den fünf größten Atom-mächten (China, Frankreich, Großbritannien, Russland, USA) sind sie heute Standard.

Abb. 17:

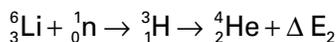
Aufgabe 2

Als Antwort auf die erste amerikanische Wasserstoffbombe „Ivy Mike“ zündete die UdSSR im Jahr 1961 die sog. „Zar-Bombe“ und verursachte damit die bisher stärkste Explosion der Menschheitsgeschichte. Ihre geschätzte Sprengkraft betrug ca. 60 Megatonnen TNT, was etwa dem 4000-Fachen der auf Hiroshima abgeworfenen Atombombe entspricht.

- Berechnen Sie die Kernbindungsenergie pro Nukleon für Tritium in MeV.
- Eine für den Bau einer Wasserstoffbombe wichtige Fusionsreaktion ergibt sich aus der Fusion von Deuterium und Tritium:



Das in der Natur nicht vorkommende Tritium wird mithilfe von Lithium-6 und den von der Spaltbombe freigesetzten Neutronen geliefert:



Berechnen Sie die insgesamt frei werdende Reaktionsenergie, indem Sie die beiden Reaktionsgleichungen zusammenfassen.

- Berechnen Sie die bei der Explosion der Zar-Bombe in Energie umgewandelte Gesamtmasse Δm_{ges} , wenn 1 kt-TNT eine Energie von $4,184 \cdot 10^{12} \text{ J}$ freisetzt.
- Berechnen Sie die Mengen an Deuterium und Lithium, die bei dieser Explosion verbraucht wurden, und überprüfen Sie das Ergebnis mit dem Ergebnis aus Teilaufgabe 3.
- Berechnen Sie, wie viele Haushalte man ein Jahr lang mit der von der Zar-Bombe freigesetzten Energie mit Strom versorgen könnte, wenn man einen Durchschnittshaushalt mit einem Jahresenergieverbrauch von 4000 kWh ansetzt.



Abb. 18: Pilzwolke des Ivy-Mike-Kernwaffentests 1952

© Wikimedia Commons (Public Domain)

Erläuterungen und Lösungen

M 1 Physikalische Grundlagen – frischen Sie Ihr Wissen auf!

Wiederholen Sie den in der Mittelstufe bereits behandelten Stoff zum Aufbau der Atome und erläutern Sie den Schülern, woraus sich die Atommassen der einzelnen Atome zusammensetzen. Besprechen Sie dann die Notwendigkeit der Einführung der atomaren Masseneinheit u anhand von Beispielen.

Die Atommassen (Tabelle) sind für alle Übungsaufgaben des Beitrages zu verwenden.

Zwei sehr wichtige Größen zum Verständnis des Kernspaltungs- und Kernfusionsprozesses sind der **Massendefekt** und die **Kernbindungsenergie**. Erläutern Sie den Schülern den Zusammenhang zwischen den beiden Größen und besprechen Sie anschließend anhand der Abbildung zur „Bindungsenergie je Nukleon in MeV“ die Gründe, warum zur Energiefreisetzung bei schweren Kernen wie Uran oder Plutonium eine Kernspaltung und bei leichten Kernen wie Wasserstoff oder Deuterium eine Kernfusion erfolgen muss.

Es empfiehlt sich, die Abbildung, die separat auf **CD-ROM 49** mitgeliefert wird, auf Folie auszudrucken – zur besseren Erklärung der Vorgänge.

M 2 Kernspaltung von Uran 235

1. A: Ein thermisches (langsames) Neutron wird von einem U-235 Kern eingefangen.
- B: Aus dem U-235-Kern bildet sich ein hochangeregter U-236 Zwischenkern, was zu einer Deformation seiner ursprünglichen Form führt. Dies hat zur Folge, dass sich die Protonen weiter voneinander entfernen, sodass die anziehende Kernkraft immer geringer wird.
- C: Durch die starke Zunahme der Coulombschen Abstoßungskräfte der Protonen wird der U-236-Zwischenkern auseinandergerissen – die entstehenden Bruchstücke fliegen mit hoher Energie auseinander. Bei den entstehenden Bruchstücken liegt ein Neutronenüberschuss im Vergleich zu den stabilen Isotopen dieser Elemente vor. In der Folge werden diese abgegeben – im Beispiel entstehen zwei Neutronen, die dann für weitere Spaltungen zur Verfügung stehen.
- D: Im weiteren Verlauf werden die entstehenden Bruchstücke meist durch Betazerfall $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ in stabile Kerne umgewandelt.

2.

- **Langsame oder thermische Neutronen** ($E \approx 0,03$ eV) können sich leicht einem Kern nähern und bleiben relativ lange in Kernnähe, was die Wahrscheinlichkeit deutlich erhöht, von einem Kern eingefangen zu werden. Bei U-235 und Pu-239 ist diese Wahrscheinlichkeit rund 1000 Mal größer als bei **schnellen Neutronen** ($E \approx 1$ MeV).

Allerdings gilt dies nur für Kerne mit ungeraden Neutronenzahlen – will man hingegen U-238-Kerne spalten, benötigt man immer schnelle Neutronen und hat trotzdem eine wesentlich geringere Spaltwahrscheinlichkeit als bei U-235.

- Stehen nach der auslösenden Spaltung eines U-235-Kernes weitere Neutronen für Kernspaltungen zur Verfügung (meist sind dies 2–3 Neutronen), so kann aus der anfänglichen Spaltung eines Kernes eine sehr schnell wachsende Zahl von Spaltungen werden – man spricht dann von einer **unkontrollierten Kettenreaktion**.
- Um den Ablauf einer Kettenreaktion zahlenmäßig zu erfassen, hat man einen „**Neutronen-Vermehrungsfaktor k**“ eingeführt. Darunter versteht man eine Zahl, die angibt, um welchen Faktor sich die Neutronen vermehren, die eine weitere Spaltung auslösen. Bei einer Atombombe hat man einen Vermehrungsfaktor $k > 1$ mit der Folge, dass

II/F