




Kernphysik


Agenda

1. Einführung
2. Aufbau des Atoms/Atomkerns
3. Natürliche Kernumwandlungen
4. Nachweisgeräte
5. Physikalische Größen
6. Wirkungen der Radioaktivität
7. Anwendungen der Kernstrahlung
8. Künstliche Kernumwandlungen
9. Kernkraftwerke
10. Kernkraft: Pro und Kontra
11. Quellen; Backups



© Doris Walkowiak

Einteilung der Atomphysik



```

    graph TD
      A[Atomphysik] --> B[Kernphysik]
      A --> C[Physik der Atomhülle]
      B --> D["• Aufbau und Eigenschaften von Atomkernen  
• Kernumwandlungen und Anwendungen"]
      C --> E["• Aufbau und Eigenschaften der Atomhülle  
• Vorgänge in der Atomhülle (Lichtstehungen, Spektren ...)"]
  
```

© Doris Walkowiak

Atommodelle

- **Antike (Leukipp, Demokrit):** Atom als unteilbares Teilchen
- **um 1800 (Dalton):**
 - Symbolschreibweise für Elemente
 - Atome haben "Haftstellen", mit denen sie sich zu Molekülen verbinden können
 - Jedes Element besteht aus gleichen und unteilbaren Atomen
 - Die Atome verschiedener Elemente unterscheiden sich nur durch ihre Masse
 - Atome sind Kugeln mit homogen verteilter Masse.
 - Der Zusammenstoß zweier Atome ist vollständig elastisch.
- **um 1900 (Thomson):**
 - "Rosinenkuchenmodell": Die negativen Elektronen sind im "Atomteig" eingebettet wie Rosinen im Kuchen
 - Unterscheidung von Atom, positivem Ion und Elektron
- Bis jetzt war man der Meinung, dass Atome homogene Teilchen sind, die vollständig mit Atommasse gefüllt sind.

[Folie](#)

Video: Auf der Suche nach den Atomen (42 55027)

© Doris Walkowiak

Atommodelle

- **1911 (Rutherford):** [Folie](#)
 - Streuversuch: Alpha-Teilchen werden durch eine dünne Metallfolie geschossen → einzelne (sehr wenige) Teilchen werden stark von ihrer Bahn abgelenkt. (teilweise mehr als 180°) → es muss einen Zusammenstoß mit anderen Teilchen größerer Masse gegeben haben (dem Atomkern)
 - Atome haben einen Durchmesser von 10^{-10} m, nahezu die gesamte Masse ist im Atomkern ($d = 10^{-14}$ m) konzentriert.
 - Die gesamte positive Ladung befindet sich im Kern.
 - Die negativen Ladungen befinden sich in Form von Elektronen in der Atomhülle. Sie bewegen sich auf Kreisbahnen um den Kern. Es gibt elektrostatische Kräfte zwischen dem positiven Kern und den negativen Elektronen.

© Doris Walkowiak

Programm Atomos: Rutherford.exe

Atommodelle

Grenzen:

- Warum bewegen sich die Elektronen nur auf bestimmten Bahnen und nicht mit beliebigem Radius?
- Elektron auf Kreisbahn = bewegter Ladungsträger → elektromagnetische Welle → Energieabgabe → Spiralbahn → Elektron müsste in Kern fallen
- Wie kommt es zu den elementspezifischen Spektrallinien?
- ...

[Folie](#)

© Doris Walkowiak

Atommodelle

1913 (Bohr):

Ergänzung des Rutherford'schen Atommodells durch zwei Postulate:

1. Quantenbedingung:

Die Elektronen bewegen sich auf strahlungsfreien Bahnen. Diese Bahn wird durch die Quantenzahl n bestimmt. Auf jeder dieser Bahnen besitzt das Elektron eine bestimmte Energie E_n mit

$$E_n = E_{\text{pot}} + E_{\text{kin}}$$

2. Frequenzbedingung:

Beim Übergang von einer energiereicheren zu einer energieärmeren Bahn wird die Energie in Form eines Photons abgestrahlt:

$$\Delta E = E_n - E_m = h \cdot f$$

Beim umgekehrten Vorgang wird dieses Energiequant aufgenommen (absorbiert).

Atommodelle - Geschichte

Grenzen:

- Welleneigenschaften wurden nicht berücksichtigt
- theoretische Beschreibung ist nicht bei allen Atomen möglich (vor allem außer 1. Hauptgruppe)
- Kugelform der Atome wurde nicht erkannt, Bohr legte Kreisbahnen in einer Ebene zu Grunde
- exakte Bahnberechnungen stehen im Widerspruch zur Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation

Kernmodelle

Tröpfchenmodell

- Die Nukleonen werden mit den Molekülen in einem Flüssigkeitstropfen verglichen
- sehr starke Kräfte zwischen den Kernteilchen (größer als elektrische Abstoßungskräfte), geringe Reichweite
- $R \sim A^{1/3}$ (R ... Kernradius, A ... Nukleonenzahl)
- Die Dichte aller Atomkerne ist etwa gleich.
- Die Bindungsenergie ist abhängig von der Nukleonenzahl
- Innere Schwingungen können zur Zerstörung des Kerns führen (Kernspaltung)
- Besonders geeignet für große Kerne.

Kernmodelle

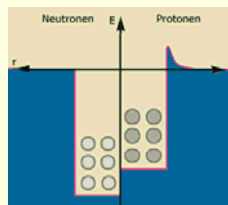
Schalenmodell

- Die Nukleonen befinden sich auf verschiedenen Energieniveaus (ähnlich Elektronenhülle)
- Atomkern mit voll besetzten Schalen sind besonders stabil (2, 8, 20, 28, 50, 82 oder 126 Nukleonen – magische Zahlen)

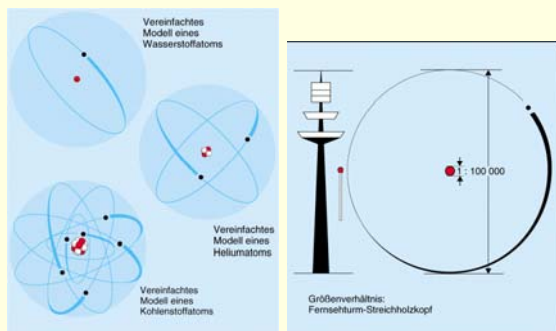
Kernmodelle

Potentialtopfmodell

- Beim Bilden eines Atomkerns geben die Nukleonen Energie ab (Bindungsenergie) → negative potentielle Energie (vergleichbar: Das Nukleon fällt in einen Topf.)
- Um Nukleonen aus einem Atomkern wieder herauszulösen, muss man ihnen Energie zuführen (Das Nukleon wird aus einem Topf "herausgehoben...")
- Protonen sind gleich geladen → weniger Energie zum Herausheben notwendig (Potentialtopf ist nicht so tief wie für Neutronen), dafür mehr für's hineinbringen (Potentialwall muss überwunden werden)
- In schweren Atomkernen sind immer mehr Neutronen als Protonen zu finden, denn beide Töpfe sind ungefähr bis zum selben Energieniveau gefüllt.



Aufbau des Atoms



Elementarteilchen

	Proton	Neutron	Elektron	Positron
Kurzzeichen	${}^1_1\text{p}$	${}^1_0\text{n}$	${}^0_{-1}\text{e}$	${}^0_{+1}\text{e}$
Ladung	+ e	0	- e	+ e
Masse in 10^{-27} kg	1,6726	1,6750	0,0009	0,0009

e ... Elementarladung $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C

weiterer Elementarteilchen: z. B. Baryonen, Mesonen, Bosonen, Tachyonen

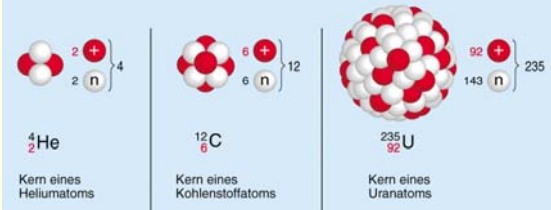
<http://www.quantenwelt.de/>



© Doris Walkowiak

Der Atomkern

Aufbau der Atomkerne im Modell



Bildquelle: W. Koelzer: Atomaufbau, Strahlung, Dosis, Abschirmung



© Doris Walkowiak

Der Atomkern

- Nukleonen = Kernteilchen (Protonen, Neutronen)
- Periodensystem → Symbolschreibweise
- A ... Massenzahl
- Z ... Kernladungszahl (Ordnungszahl) = Anzahl der Protonen
- N ... Anzahl der Neutronen $A = Z + N$
- Nuklid = Atomkernart, die durch A und Z eindeutig bestimmt ist



© Doris Walkowiak

Kräfte im Atomkern

- Coulombkraft** zwischen Protonen (Abstoßungskraft)
- Kernkraft** zwischen Nukleonen (Anziehungskraft, starke Wechselwirkung, viel stärker als Coulombkraft, aber geringe Reichweite)



© Doris Walkowiak

Kernbindungsenergie und Massendefekt

Massendefekt:

Die Masse des Atomkerns ist kleiner als die Gesamtmasse seiner Nukleonen. Die Differenz ergibt den Massendefekt.

$$\Delta m = Z \cdot m_p + N \cdot m_n - m_K$$

m_p ... Masse eines Protons Z ... Anzahl der Protonen
 m_n ... Masse eines Neutrons N ... Anzahl der Neutronen
 m_{Kern} Masse des zusammengesetzten Kerns



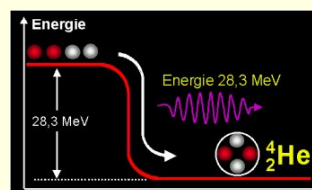
© Doris Walkowiak

Kernbindungsenergie und Massendefekt

Ursache:

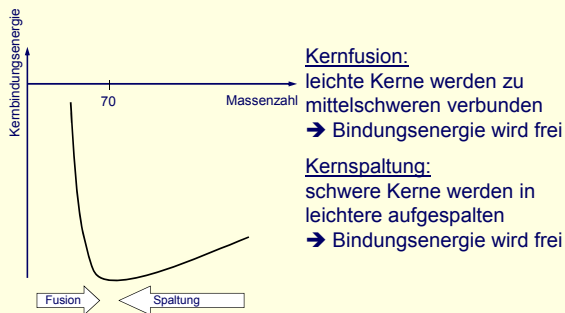
Beim Zusammenfügen der Nukleonen wird Bindungsenergie frei. (Nukleonen fallen in den Potentialtopf)

Diese entspricht der Massenänderung. $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$



© Doris Walkowiak

Kernbindungsenergie und Massendefekt



19 © Doris Walkowiak

Kernbindungsenergie und Massendefekt

Bsp.: He-4 $m_{\text{Kern}} = 4,0022 \text{ u}$
 u ... atomare Masseinheit
 (1/12 der Masse des Kohlenstoffatoms C-12)
 $u = 1,660277 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \rightarrow m_{\text{Kern}} = 6,6448 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

$$\Delta m = Z \cdot m_p + N \cdot m_n - m_K$$

$$\Delta m = 2 \cdot 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ kg} + 2 \cdot 1,6749 \cdot 10^{-27} \text{ kg} - 6,6448 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\Delta m = 5,02 \cdot 10^{-29} \text{ kg}$$

20 © Doris Walkowiak

Kernbindungsenergie und Massendefekt

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

$$\Delta E = 5,02 \cdot 10^{-29} \cdot (2,9979 \cdot 10^8)^2$$

$$\Delta E = 4,51 \cdot 10^{-12} \text{ J}$$

$$\Delta E = 28 \text{ MeV}$$

Wie viel Energie wird bei der Fusion von 10 g Helium frei?
 0,01 kg : 4,00 u (Atommasse) → $1,506 \cdot 10^{24}$ Atome
 $1,506 \cdot 10^{24} \cdot 4,51 \cdot 10^{-12} \text{ J} = 6,8 \text{ GJ}$

21 © Doris Walkowiak

Isotope

- Atomkerne mit gleicher Kernladungszahl Z, aber unterschiedlicher Massenzahl A
- Beispiele:



- Übungen: [Folie](#); [Lösung](#); [Online](#);

Bildquelle: W. Koelzer: Atomaufbau, Strahlung, Dosis, Abschirmung

22 © Doris Walkowiak

Natürliche Radioaktivität

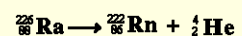
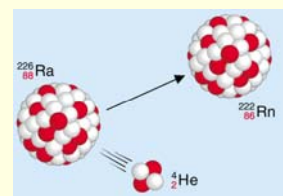
- [Geschichte](#); [Folie1](#); [Folie2](#); Video)
- Bestimmte Nuklide emittieren von selbst Kernstrahlung → **Spontanzfall**
- Diese Kerne heißen **instabil** (die meisten mit $Z > 82$, da hier die Coulombkraft zu groß wird)
- Arten von Kernstrahlung:
 - α -Strahlung
 - β -Strahlung
 - γ -Strahlung
 - [Flash-Animation](#)

23 © Doris Walkowiak

α -Strahlung

- Beim Kernzerfall können **Heliumkerne** (2 Protonen, 2 Neutronen) abgespalten werden
- Kernladungszahl verringert sich um 2, Massenzahl um 4
- Positiv geladen → Ablenkbar im elektrischen Feld
- Ablenkung bei Bewegung im Magnetfeld (Lorentzkraft)
- Sehr geringes Durchdringungsvermögen

Beispiel:



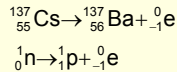
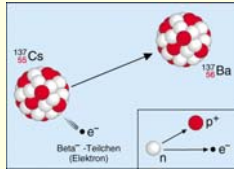
Bildquelle: W. Koelzer: Atomaufbau, Strahlung, Dosis, Abschirmung

24 © Doris Walkowiak

β^- -Strahlung

- Neutron wandelt sich in ein **Elektron** und ein Proton um
- das Elektron (β^- -Teilchen) wird herausgeschleudert
- Kernladungszahl erhöht sich um 1, Massenzahl bleibt unverändert
- negativ geladen \rightarrow Ablenkbar im elektrischen Feld
- Ablenkung bei Bewegung im Magnetfeld (Lorentzkraft)
- Größeres Durchdringungsvermögen

Beispiel:



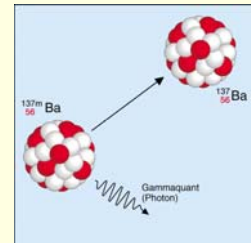
Bildquelle: W. Koelzer: Atombau, Strahlung, Dosis, Abschirmung



γ -Strahlung

- energiereiche Strahlung, die als elektromagnetische Welle ausgesandt wird
- tritt meist im Zusammenhang mit α - bzw. β -Zerfall auf
- Kernladungs- und Massenzahl bleiben unverändert
- Keine Ablenkung im elektrischen oder magnetischen Feld
- Sehr hohes Durchdringungsvermögen

Beispiel:



keine Zerfallsgleichung, da keine Teilchenumwandlung

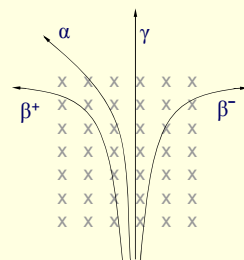
Bildquelle: W. Koelzer: Atombau, Strahlung, Dosis, Abschirmung



Zusammenfassung und Vergleich

- [Folie Strahlungsarten; Lösung](#)
- [Folie Eigenschaften; Lösung](#)
- [interaktive Übung zum radioaktiven Zerfall](#)
- [Zerfallsreihe](#)

Ablenkung im M-Feld



Bildquelle: Berr, Atommodelle, S. 90



Nachweisgeräte

- DEX: Ionisation (Plattenkondensator)
- Fotoplatte/Film
- [Geiger-Müller-Zählrohr](#)
 - trotz angelegter Spannung fließt zunächst kein Strom
 - bei Annäherung eines radioaktiven Strahlers wird das Füllgas ionisiert
 - durch Stoßionisation kommt es zu einem lawinenartigen Ansteigen der Ladungsträgeranzahl \rightarrow Stromstoß \rightarrow Spannungsabfall am Widerstand, welcher verstärkt wird \rightarrow Knackern im Lautsprecher
 - es kann nur die Zählrate, aber nicht die Energie der einfallenden Strahlung bestimmt werden
- [Nebelkammer](#)
 - besteht aus einem mit Luft gefüllten Zylinder, welcher mit einer Glasplatte bedeckt ist
 - die Luft ist mit einem Wasser-Alkohol-Gemische gesättigt
 - durch Kolbenbewegung Vergrößerung des Zylindervolumens \rightarrow Druckverminderung \rightarrow Abkühlung \rightarrow Übersättigung
 - Dampf kondensiert an den an den durch die Strahlung erzeugten Ionen \rightarrow Nebelspur



Halbwertszeit

- Zeit, in der sich jeweils die Hälfte aller ursprünglich vorhandenen Atomkerne eines Nuklids in Kerne eines anderen Nuklids umwandelt.

- Zerfallsgesetz: $N = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$

- Halbwertszeit $N = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}}$

λ ... Zerfallskonstante (Anteil der pro Sekunde zerfallenen Atomkerne)

t ... Zeit

$T_{1/2}$... Halbwertszeit ($T_{1/2} = \ln 2 / \lambda$)

$$\frac{1}{2}N_0 = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot T_{1/2}} \Rightarrow \ln \frac{1}{2} = -\lambda \cdot T_{1/2} \Rightarrow -\ln 2 = -\lambda \cdot T_{1/2} \Rightarrow \ln 2 = \lambda \cdot T_{1/2}$$

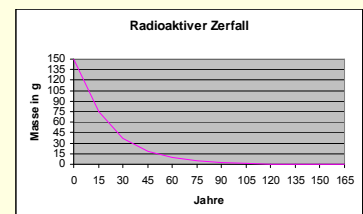


Halbwertszeit

Jahre Masse in g

0	150,00
15	75,00
30	37,50
45	18,75
60	9,38
75	4,69
90	2,34
105	1,17
120	0,59
135	0,29
150	0,15
165	0,07

Beispiel: Anfangsmasse: 150 g
Halbwertszeit: 15 Jahre



Welche Masse ist nach 20 Jahren noch vorhanden? $m = 150 \text{ g} \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{20}{15}} = 59,5 \text{ g}$



Halbwertszeit

- Anwendung:**
 - Altersbestimmung von Gesteinen anhand des Verhältnisses der Anteile des radioaktiven Ausgangsmaterials und seines Zerfallsproduktes
 - Altersuntersuchungen in der Natur mit der C14-Methode: Solange der Organismus lebt, besteht ein konstanter C-14-Gehalt (Gleichgewicht zwischen Aufnahme und Zerfall). Nach dem Tod gibt es nur noch den Zerfall und das Alter kann anhand der Halbwertszeit ermittelt werden.

Beispiele zur Berechnung:

- Von 100 g eines radioaktiven Nuklids sind nach 10 Jahren nur noch 25 g vorhanden. Wie groß ist die Halbwertszeit?

$$\ln \frac{N}{N_0} = \ln \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{T_{1/2}}} \Rightarrow \ln \frac{N}{N_0} = \frac{t}{T_{1/2}} \cdot \ln \left(\frac{1}{2} \right) \Rightarrow T_{1/2} = t \cdot \frac{\ln \left(\frac{1}{2} \right)}{\ln \left(\frac{N}{N_0} \right)} \Rightarrow T_{1/2} = 10 \cdot \frac{\ln 2}{\ln \frac{100}{25}} = 5 \text{ Jahre}$$

- Das radioaktive Nuklid Jod hat eine HWZ von 8 Tagen. Auf welchen Bruchteil vermindert sich das Nuklid innerhalb von 24 Tagen? (1/8)



© Doris Walkowiak

Weitere Einheiten

Folie

Aktivität A

Anzahl der Kernumwandlungen pro s

[A] = Bq 1 Bq = 1 Kernumwandlung pro s

Energiedosis D

ist die pro kg aufgenommene (absorbierte) Energie

[D] = Gy (Gray) 1 Gy = 1 J/kg frühere Einheit: Rad

Äquivalentdosis H

entspricht der biologischen Wirkung auf 1 kg Material

[H] = Sv (Sievert) 1 Sv = 1 J * WF/kg frühere Einheit: Rem

WF = Wertungsfaktor:

= 1 für Gamma- und Beta-Strahlen

= 2,3 für langsame Neutronen

= 10 für schnelle Neutronen

= 20 für Alphastrahlen



© Doris Walkowiak

Strahlungswerte

Folie

Strahleneinwirkungen in Deutschland	in mSv
natürliche Strahlung (Mittelwert pro Jahr)	2,1
zivilisatorische Strahlung (Mittelwert pro Jahr)	2,0
Beispiele:	
•Zahnrontgen	0,01
•Computertomografie Bauchraum	30
•Flug Frankfurt - New York – Frankfurt	0,1
Umgebung Kernkraftwerk	0,001
Fossile Energieträger	0,002
Tschernobyl	
•1986	0,05 - 1,1
•1988	0,04
•2004	0,01

Quelle: Martin Volkmer - Basiswissen zum Thema Kernenergie



© Doris Walkowiak

Wirkungen der Kernstrahlung

- Ionisierung von Gasen
- Freisetzen zusätzlicher Ladungsträger in Halbleitern
- Schwärzung von lichtempfindlichen Materialien (fotografische Schichten) durch chemische Prozesse infolge von Anregungsprozessen
- Anregung von fluoreszierenden Materialien zum Leuchten
- Zerstörung von lebenden Zellen durch Ionisierungsprozesse
- [Strahlenschäden](#)
- [Strahlenbelastung bei Wikipedia](#)



© Doris Walkowiak

Anwendungen der Kernstrahlung

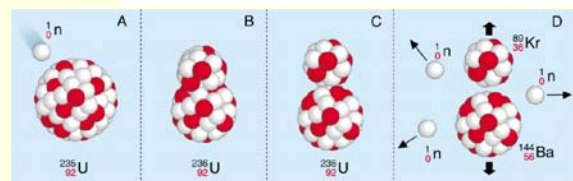
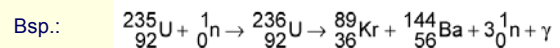
- Bestrahlung von Nahrungsmitteln zur Vermeidung von Keimlingen, Fäulnis, Krankheiten ...
- Durchstrahlung zur Materialprüfung
- Strahlentherapie in der Krebsbehandlung
- Diagnostik von Schilddrüsenerkrankungen mit radioaktivem Jod



© Doris Walkowiak

Kernspaltung

- künstliche Kernumwandlung, bei der große Atomkerne in mittelschwere Kerne gespalten werden
- 1938: Nachweis der Kernspaltung durch Hahn, Strassmann und Meitner



Bildquelle: W. Koelzer: Atomaufbau, Strahlung, Dosis, Abschirmung



© Doris Walkowiak

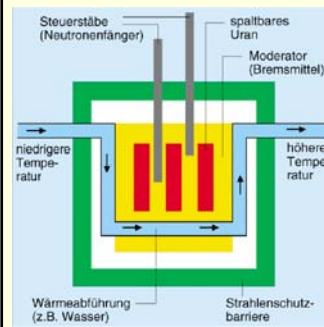
Kernspaltung

[Animation](#)

- Trifft ein langsames Neutron auf einen U-235-Kern, wird es vom Kern aufgenommen → hoch angeregter Zwischenkern U-236
- In den meisten Fällen teilt sich der Kern nach kurzer Zeit (10-14 s) und zerfällt in 2 Teile (z. B. Kr-89 und Ba-144), wobei 2-3 schnelle Neutronen ausgesandt werden
- Außerdem wird Energie frei. [Folie](#)
- Unter geeigneten Bedingungen (Abbremsen) können die freigesetzten Neutronen weitere Uranatome spalten → Kettenreaktion [Folie](#)
- Für eine Kettenreaktion ist es wichtig, dass möglichst wenige Neutronen entweichen. Ohne absorbierende Fremdatome ist dafür eine Mindestmasse (kritische Masse) erforderlich.
- Kontrollierte Kettenreaktion: Kernkraftwerk
- unkontrollierte Kettenreaktion: [Atombombe](#)

37
© Doris Walkowiak

Aufbau Kernreaktor



- spaltbares Uran (z. B. U-235)
 - in natürlichem Uran zu etwa 0,7 % enthalten
 - muss auf 2 – 4 % angereichert werden
- Steuerstäbe (z. B. aus Bor, Cadmium oder Legierungen)
 - absorbieren Neutronen
 - je nach Eintauchtiefe kann Neutronenmenge reguliert werden
 - im Störfall: vollständiges Einfahren innerhalb weniger Sekunden → Kernreaktion kommt zum Erliegen

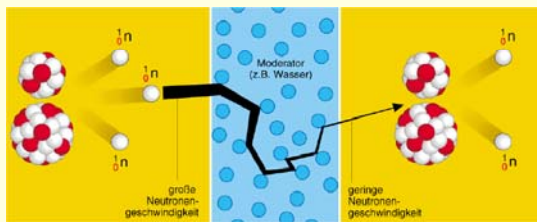
Bildquelle: W. Koelzer: Atomaufbau, Strahlung, Dosis, Abschirmung

38
© Doris Walkowiak

Aufbau Kernreaktor

[Folie](#)

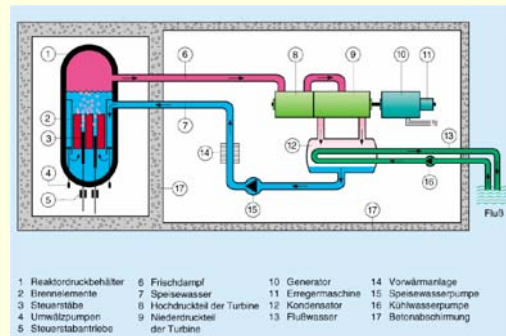
- Moderator (z. B. Wasser, Graphit)
 - bremst Neutronen ab
 - langsame Neutronen führen mit viel größerer Wahrscheinlichkeit zur Kernspaltung



Bildquelle: W. Koelzer: Atomaufbau, Strahlung, Dosis, Abschirmung

39
© Doris Walkowiak

Siedewasserreaktor



Bildquelle: W. Koelzer: Atomaufbau, Strahlung, Dosis, Abschirmung

40
© Doris Walkowiak

Siedewasserreaktor

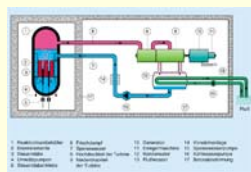
- Wasser wird verdampft
- Wasserdampf treibt Turbine an
- Turbine treibt Generator an
- Abkühlen und Kondensieren

Vorteil:

- relativ einfacher Aufbau

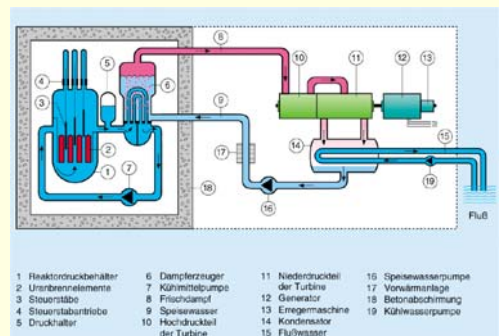
Nachteil:

- höhere Sicherheitsmaßnahmen erforderlich, da Wasserdampf radioaktiv ist



41
© Doris Walkowiak

Druckwasserreaktor

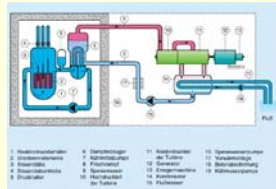


Bildquelle: W. Koelzer: Atomaufbau, Strahlung, Dosis, Abschirmung

42
© Doris Walkowiak

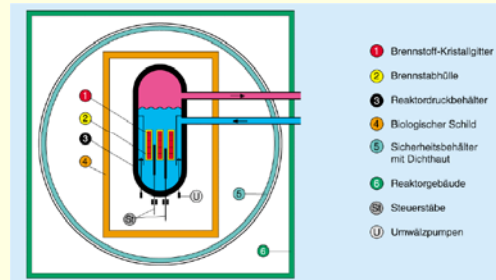
Druckwasserreaktor

- hoher Druck im Primärkreis → Sieden wird verhindert
 - erhitztes Wasser gibt Wärme an Sekundärkreis ab → verdampft
 - Wasserdampf im Sekundärkreis treibt Turbine an
- Vorteil:
- höhere Sicherheit, da kein radioaktives Material im Maschinenhaus
- Nachteil:
- aufwändiger



43 © Doris Walkowiak

Sicherheit



44 © Doris Walkowiak

Sicherheit

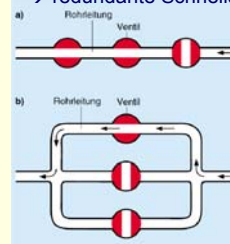
- Abschirmung der α - und β -Strahlung durch das Kühlwasser
- Reaktordruckgefäß vermindert γ -Strahlung auf den 1/100.000 Teil gegenüber Strahlung im Reaktorkern
- fast vollständige Abschirmung der verbleibenden Strahlung durch durch 2 m dicken Stahlbetonmantel
- weitere Barrieren: Sicherheitsbehälter, Reaktorgebäude (auch Schutz vor äußeren Einwirkungen)
- Unterdruckzonen, damit Luft von außen nach innen, nicht umgekehrt strömt
- Sicherheitsschleusen

45 © Doris Walkowiak

Sicherheit

- Schwerwiegender Störfall: Bruch einer Hauptkühlmittelleitung

→ redundante Schnellschlussventile



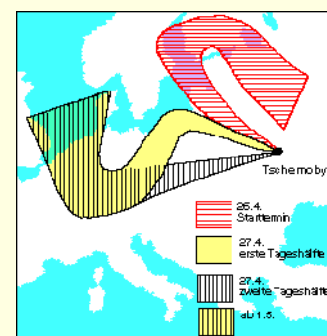
Sicherheit bei Kernkraftwerken

46 © Doris Walkowiak

Tschernobyl

- Reaktorunfall am 26. April 1986
- Reihe von Bedienungsfehlern im Zusammenhang mit einem technischen Experiment am Reaktor
- rapide Zunahme der Anzahl der Kernspaltungen, so dass die Brennstofftemperatur stark anstieg
- Zerplatzen von Brennstäben, Anstieg des Dampfdruckes, Bersten von etwa 30 % der Druckröhren
- Herausschleudern von radioaktiven Stoffen (laut Angabe ehemalige Sowjetunion: 1019 Bq)
- hohen Kontamination der Umwelt in einer 30 km-Zone um den Reaktor
- durch die Brände, die nach dem Zerbersten auftraten, wurden radioaktive Stoffe in Höhen von 1-2 km transportiert (Schornsteinwirkung) und z. T. über weite Gebiete verteilt.
- Windrichtung führte die radioaktive Wolke zunächst nach Finnland
- durch Änderung der Windrichtung am 27. April wurden auch Süddeutschland und Nordpolen betroffen

47 © Doris Walkowiak



48 © Doris Walkowiak

Wiederaufbereitung

- Abgebrannte Brennelemente zeichnen sich durch eine hohe spezifische Aktivität und damit auch hohe Wärmeproduktion aus. Damit der Transport zur Wiederaufbereitungsanlage nicht zu aufwendig wird, lagert man die Brennelemente zunächst in einem wassergefüllten Becken innerhalb des Kernkraftwerkes. Das Wasser schirmt die Strahlung fast vollständig ab und nimmt gleichzeitig die erzeugte Nachzerfallswärme auf. Bei einer Lagerzeit von 6 bis 12 Monaten gehen die Aktivität und damit auch die Wärmeproduktion auf etwa 0,1% der Anfangswerte zurück.
- In der Wiederaufbereitungsanlage werden die Brennstäbe aufgesägt, der Kernbrennstoff in heißer Säure aufgelöst und durch weitere chemische Verfahren eine Trennung in drei Komponenten vorgenommen: Uran, Plutonium, Spaltprodukte/Aktiniden.
- Abgetrenntes Plutonium kann direkt als neuer Spaltstoff eingesetzt werden (U-Pu-Mischoxidbrennstäbe).



© Doris Walkowiak

Lagerung

- Bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle muß sichergestellt sein, daß sie auf Dauer aus der Biosphäre ausgeschlossen sind. Man erreicht es durch Überführung des Abfalls in eine stabile Lagerform und durch Mehrfacheinschluss.
- Bei der Lagerung in tieferen Erdschichten bilden der Lagerbehälter, das umgebende Gesteinsmaterial und Deckgebirge bzw. Nebengestein die notwendigen Umschließungen.
- An die geologischen Formationen, die für die Endlagerung vorgesehen sind, werden eine Reihe von Anforderungen gestellt:
- Abwesenheit von Grundwasser Fehlen von Rissen und Klüften im Gestein Geringe seismische Aktivität. Unter diesen Gesichtspunkten sind in der Bundesrepublik Deutschland der Salzstock Gorleben und das ehemalige Eisenerzbergwerk Schacht Konrad bei Salzgitter ausgesucht worden. Der Salzstock in Gorleben wird z.Z. erforscht. Er ist in erster Linie für stark wärmeentwickelnde Abfälle vorgesehen. - Schacht Konrad soll für nicht oder nur schwach wärmeentwickelnde Abfälle und Materialien genutzt werden.
- Das Salzbergwerk Asse II bei Wolfenbüttel wird für Forschungszwecke und zur Erprobung von Lagerungstechniken verwendet.



© Doris Walkowiak

Kernfusion

- Verschmelzung zweier leichter Kerne zu einem schwereren
- Bsp.: Deuterium + Tritium
 ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n} + \text{Energie}$
- mehrfach höhere Energiefreisetzung als bei Kernspaltung
- Voraussetzung: extrem hohe Temperaturen (wie in Sternen)
→ Materie befindet sich 4. Aggregatzustand (Plasma)
- technisch schwer beherrschbar

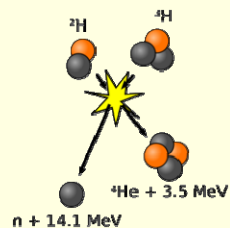


Bild: wikipedia

[Video](#)



© Doris Walkowiak

Kernfusion

Kernfusionsreaktor

- Tokamak oder Stellarator: heißes Plasma wird bei etwa 100 Mio. K durch ein Magnetfeld in Form gehalten, ohne dass es die Reaktorwände berührt
- [ITER](#): internationales Forschungsprojekt zur Kernfusion
- [Video](#) (Lesch): Brauchen wir Kernfusion?

Kalte Fusion

- verschiedene Konzepte und Experimente für Fusionen, die bei deutlich geringeren Temperaturen ablaufen
- z. B. von [Martin Fleischmann](#) (1989) → sehr umstritten
- [Fusion im Wasserglas](#) (BBC, 5 Teile)



© Doris Walkowiak

Kernfusion

Forschung

- Fusionsreaktionen ohne Kettenreaktionseffekt
- werden in Teilchenbeschleunigern realisiert
- z. B. Deuterium-Tritium-Reaktion zur Erzeugung schneller freier Neutronen

Wasserstoffbombe

- Sprengkräfte bis zu 100 Megatonnen TNT
- zur Zündung wird im Innern eine Kernspaltungsbombe platziert
- um die Uranbombe herum werden wasserstoffhaltige Legierungen platziert, in denen die Fusions-Kettenreaktion erfolgt.



© Doris Walkowiak

Schneller Brüter

- Kernreakortyp, der als Spaltstoff Plutonium verwendet, das mit schnellen Neutronen gespalten wird.
- Uran-238 als Brutstoff ([Folie](#))
- Durch Neutroneneinfang entsteht Plutonium 239 (Brutvorgang)
- bis zu 60-fach größere Brennstoffausnutzung
- Da Plutonium in der Natur nicht vorkommt, muss die Erstfüllung durch Wiederaufbereitung abgebrannter Brennelemente von Leichtwasserreaktoren gewonnen werden.
- kompliziertere Wiederaufbereitung, größere Störfallgefahr



© Doris Walkowiak

Quellen

- Physik Plus, Gymnasium Klasse 10, Volk und Wissen Verlag, Berlin 2002
- Martin Volkmer, Basiswissen Kernenergie, 2004, Herausgeber: [Informationskreis Kernenergie](#)
- Zentrale für Unterrichtsmedien: <http://www.zum.de/dwu/umapap.htm>
- Physik2000: <http://www.iap.uni-bonn.de/P2K/>
- <http://www.quantenwelt.de/kernphysik/>
- [Script Kernphysik von H. J. Wollersheim](#)
- [Kernfusion](#)
- [Schneller Brüter](#)
- [Programm Atomos](#)

1895	W. C. Röntgen entdeckt die X-Strahlen (hohe elektrische Spannung an eine lichtundurchlässige Vakuumröhre → Leuchtschirm wurde angeregt, Fotoplatte belichtet)
1896	H. Becquerel entdeckt die natürliche Radioaktivität (bestimmte fluoreszierende Stoffe schwärzen Fotoplatten, auch wenn sie vorher nicht mit Sonnenlicht bestrahlt wurden), Uran wurde als natürlich strahlendes Element erkannt
1898	M. und P. Curie entdecken nach aufwendigen Versuchen mit Uran enthaltender Pechblende die stärker strahlenden Elemente Polonium und Radium
1910	Rutherford entdeckt den Atomkern (Elektronenstreueversuch)
ca. 1900 - 1930	vielfältige theoretische und experimentelle Erkenntnisse zum Atomaufbau und der Quantenmechanik (de Broglie, Heisenberg, Schrödinger, Pauli ...)
1934	Entdeckung der künstlichen Radioaktivität durch I. und F. Joliot-Curie
1938/39	Entdeckung der Kernspaltung durch langsame Neutronen (Hahn, Meitner, Strassmann)
1945	Atombomben über Hiroshima und Nagasaki
1951	erster Versuchsreaktor in Idaho (USA)
1954	erstes Kernkraftwerk bei Moskau