

Grundlagen der Kernchemie
von Werner Schötschel

Inhaltsverzeichnis

| | <u>Seite</u> | |
|-------------|---|----|
| 1 | Natürliche Radioaktivität | 1 |
| 2 | Künstliche Kernumwandlungen | 3 |
| 3 | Kenngrößen der radioaktiven Strahlung und die Strahlenbelastung | 7 |
| 4 | Kernspaltung (Kernfission) | 9 |
| 5 | Kernverschmelzung (Kernfusion) | 14 |
| Anmerkung 1 | | 17 |
| Anmerkung 2 | | 17 |
| Anmerkung 3 | | 17 |
| Anmerkung 4 | | 18 |
| | | |
| Anhang 1 | Zerfallsreihe von $^{241}_{94}\text{Pu}$ | 19 |
| Anhang 2 | Schalenmodell des Atomkerns | 20 |
| Anhang 3 | Übersicht der Atomkraftwerke in Deutschland | 21 |
| Anhang 4 | Tokamak und Stellarator | 22 |
| Anhang 5 | Lawson-Diagramm | 23 |

Übungsaufgaben

Lernziele zum Kursthema „Grundlagen der Kernchemie“

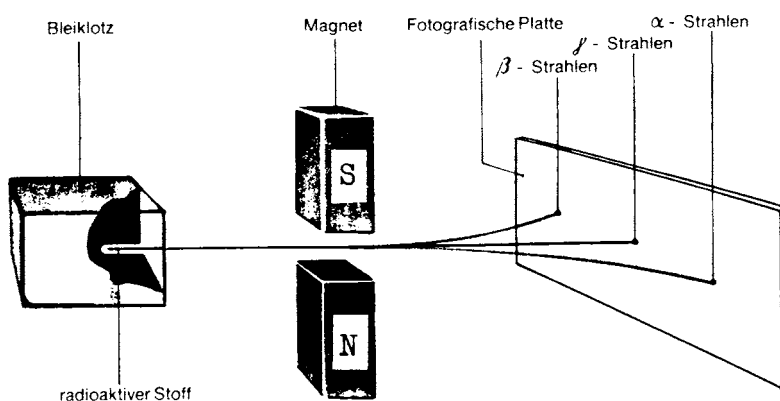
Grundlagen der Kernchemie von Werner Schötschel

1 Natürliche Radioaktivität

1896 Becquerel: Uranverbindungen ionisieren die Moleküle der Luft in ihrer Umgebung und schwärzen durch Papier und Aluminium hindurch eine photographische Platte.

1898 Pierre und Marie Curie: Entdeckung des Radiums; die von ihm ausgehende Strahlung wurde als „Radioaktivität“ bezeichnet.

Komponenten der Strahlung radioaktiver Substanzen:



(Anmerkung 1)

α-Strahlen: Heliumkerne
Geschwindigkeit bis $\frac{1}{15}$ der Lichtgeschwindigkeit ($1,4$ bis $2 \cdot 10^7$ m·s⁻¹)
Reichweite in Luft 3 bis 8 cm; zur Hälfte absorbiert durch eine Aluminiumfolie von 0,02 mm Dicke

β-Strahlen: Elektronen
Geschwindigkeit erreicht fast die Lichtgeschwindigkeit
Reichweite in Luft 1,5 bis 8,5 m; durchdringen dünne Glimmerblättchen; zur Hälfte absorbiert durch ein Aluminiumblech von 0,5 mm Dicke

γ-Strahlen: energiereiche Röntgenstrahlen ($\lambda < 10^{-11}$ m)
Lichtgeschwindigkeit
zur Hälfte absorbiert durch eine Aluminiumplatte von 80 mm Dicke

Anmerkung: Ein noch größeres Durchdringungsvermögen als γ-Quanten besitzen Neutronen. Während γ-Strahlen durch Absorber mit großer Atommasse stark geschwächt werden, ist die Abschwächung von Neutronenstrahlen bei Absorbieren mit kleiner Atommasse besser. (Bei Zusammenstößen mit Atomen großer Masse findet lediglich eine Streuung der Neutronen statt.) Wasserstoffhaltige Substanzen sind zum raschen Abbremsen schneller Neutronen - und damit zum Schutz gegen Neutronenstrahlen - besonders geeignet.

Wirkung der radioaktiven Strahlung:

physikalische Wirkungen:

- radioaktive Präparate leuchten im Dunklen schwach bläulich und sind stets wärmer als ihre Umgebung;
- Gase werden durch Ionisation stromleitend;
- manche Stoffe, z.B. synthetisches ZnS, werden zu gelbgrüner Fluoreszenz angeregt (Leuchtzifferblätter alter Uhren!).

chemische Wirkungen:

- Silberhalogenide werden geschwärzt;
- Wasserdampf, Chlorwasserstoffgas, Ammoniak und Kohlenstoffdioxid werden langsam in die Elemente gespalten;
- Luftsauerstoff wird ozonisiert;
- weißer Phosphor wird in roten Phosphor verwandelt;
- manche Mineralien werden verfärbt (z.B. Steinsalz verfärbt sich blau, Flussspat = CaF_2 wird zu dem schwarzen Stinkspat).

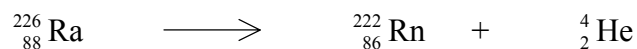
biologische Wirkungen:

- Gesundheitsschädigungen;
- Auslösung von Mutationen.

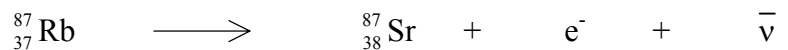
Die radioaktive Strahlung beruht auf einem Zerfall der Atomkerne von „Radionucliden“, wobei neue Elemente entstehen (Rutherford und Soddy).



Die Zerfallsprodukte entstehen zunächst als Ionen. Sie gehen aber durch Abstoßen bzw. Einfangen von Hüllenelektronen sehr schnell in neutrale Atome über. Man schreibt daher kernchemische Gleichungen ohne Ladungsangaben:



β -Zerfall: Ein Neutron des Kerns verwandelt sich in ein Proton, wobei ein Elektron frei wird (ferner ein masseloses und ladungsfreies Antineutrino).



Verschiebungsgesetze von Fajans (1913):

- 1.) Bei der Ausstrahlung eines α -Teilchens vermindert sich die Protonenzahl um 2 Einheiten und die Nucleonenzahl um 4 Einheiten.
- 2.) Bei der Ausstrahlung eines β -Teilchens erhöht sich die Protonenzahl um 1 Einheit, die Nucleonenzahl bleibt unverändert.

γ -Strahlung wird immer dann ausgesandt, wenn ein angeregter Kern von einem Zustand höherer in einen Zustand niedrigerer Energie übergeht. Angeregte Kerne entstehen durch α - oder β -Zerfall oder durch Kernreaktionen.

Merke:

Die Halbwertszeit eines Radionuclids ist die Zeit, nach der von den zur Zeit t_0 vorhandenen Atomen dieses Radionuclids die Hälfte zerfallen ist.

Die Halbwertszeit der verschiedenen Radionuclide liegt zwischen 10^{10} Jahren und 10^{-11} Sekunden. Die Halbwertszeit lässt sich - von einer später zu erwähnenden Ausnahme abgesehen - weder durch physikalische noch durch chemische Methoden beeinflussen. Als Faustregel gilt, dass nach der zehnfachen Halbwertszeit keine Radioaktivität mehr nachweisbar ist. - Heute nimmt man an, dass auch die als stabil geltenden Nuclide zerfallen können, allerdings mit extrem großer Halbwertszeit.

Die beim radioaktiven Zerfall entstehenden Nuclide sind meist wieder radioaktiv, sodass eine ganze Zerfallsreihe zustande kommt. Es gibt 3 „natürliche“ Zerfallsreihen:

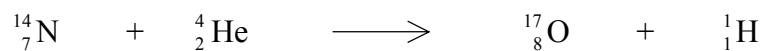
| <u>Anfangsglied</u> | <u>Endglied</u> |
|--------------------------|--------------------------|
| ${}_{92}^{238}\text{U}$ | ${}_{82}^{206}\text{Pb}$ |
| ${}_{92}^{235}\text{U}$ | ${}_{82}^{207}\text{Pb}$ |
| ${}_{90}^{232}\text{Th}$ | ${}_{82}^{208}\text{Pb}$ |

Ferner gibt es eine Zerfallsreihe, die von dem künstlich hergestellten ${}_{94}^{241}\text{Pu}$ ausgeht und zu dem Endglied ${}_{83}^{209}\text{Bi}$ führt (siehe Anhang 1).

Beachte: Blei besitzt die „magische Protonenzahl“ 82 und ${}_{82}^{209}\text{Bi}$ die „magische Neutronenzahl“ 126 (siehe Anhang 2).

2 Künstliche Kernumwandlungen

Rutherford schickte im Jahre 1919 in einer Nebelkammer durch reinen Stickstoff α -Teilchen und entdeckte hierbei eine Spur, die sich in eine dünne, lange und in eine dicke, kurze Spur gabelte:



In den folgenden Jahren wurden noch zahlreiche andere Kernumwandlungen durchgeführt. Als Geschosse dienten:

α -Teilchen }
Protonen } erhalten die notwendige Energie durch Beschleunigung im Cyclotron
Deuteronen }

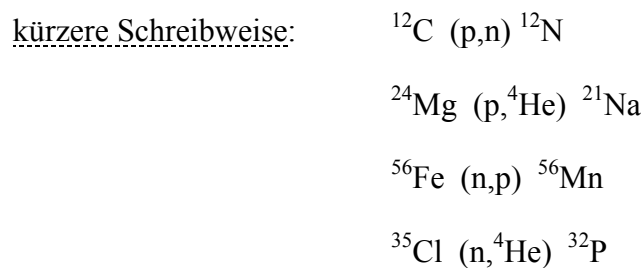
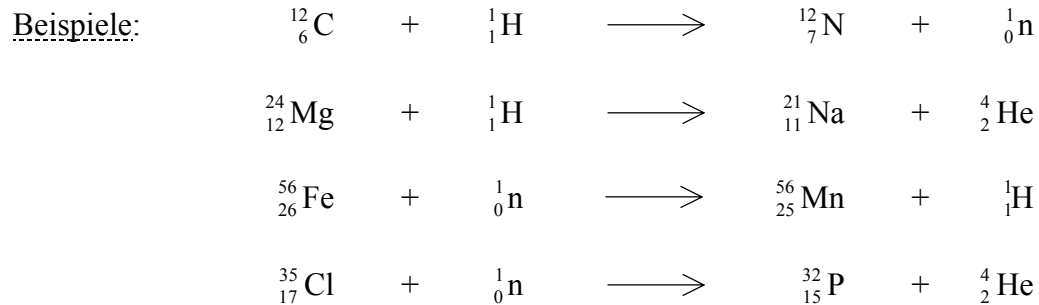
Neutronen } günstige Kerngeschosse, da sie elektrisch neutral sind und daher von den Kernen nicht abgestoßen werden
Als Neutronenquelle dient ein Glasröhrchen, in das Beryllimpulver und α -strahlendes Radon eingeschlossen sind:



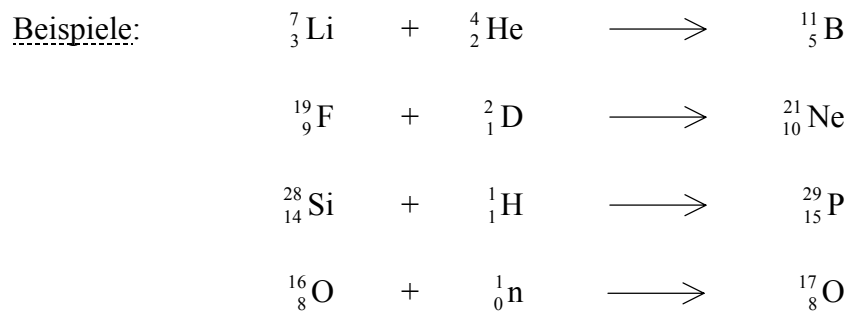
γ -Quanten } entstehen durch Abbremsung sehr schneller Elektronen, die im Betatron oder Synchrotron beschleunigt worden sind

Wir unterscheiden 2 Typen von Kernreaktionen:

- 1.) **Austauschreaktionen:** Das eingeschossene Teilchen bleibt im Kern stecken. Dafür wird aber ein anderes Teilchen (Proton, Neutron oder α -Teilchen) ausgesandt.



- 2.) **Einfangreaktionen:** Das eingeschossene Teilchen bleibt im Kern stecken. Es wird kein anderes Teilchen ausgesandt, sondern unter γ -Strahlung der energetische Grundzustand wiederhergestellt.



Durch künstliche Kernumwandlungen wurden bisher rund 1350 verschiedene Nuclide zusätzlich zu den 334 in der Natur vorkommenden Nucliden hergestellt. Auf diese Weise erhielt man auch die lange Zeit im Periodensystem fehlenden Elemente Technetium (${}_{43}\text{Tc}$) und Promethium (${}_{61}\text{Pm}$) sowie die auch als Glieder natürlicher Zerfallsreihen mit kurzer Halbwertszeit vorkommenden Elemente Astat (${}_{85}\text{At}$) und Francium (${}_{87}\text{Fr}$).

Die durch Austausch- und Einfangreaktionen künstlich hergestellten Nuclide sind radioaktiv und zerfallen mit verhältnismäßig kurzer Halbwertszeit. Radionuclide aller Elemente können heute in größeren Mengen und verhältnismäßig billig in den Kernreaktoren hergestellt werden. Sie finden Verwendung z.B. in der Pflanzenzüchtung zur Auslösung von Mutationen, in der Technik zur Dickenmessung von Blechen und Folien, zur Lecksuche (z.B. bei Pipelines), zur Prüfung von Schweißnähten sowie als Energiequelle (z.B. Weltraumforschung, Herzschrittmacher). In einigen europäischen Ländern - nicht aber in der Bundesrepublik Deutschland - ist die Bestrahlung von Kartoffeln mit γ -Strahlen zur Verhinderung der Keimung zugelassen, in den Niederlanden auch die

Bestrahlung von Pilzen (verhindert das Öffnen des Hutes). In der Medizin findet z.B. Radiocobalt (^{60}Co) als billiger Radiumersatz bei der Krebsbekämpfung Verwendung. Von besonderer Bedeutung für die Forschung in Biologie, Chemie und Medizin ist die Markierung einzelner Moleküle durch Radionuclide, z.B. in der Nuclearmedizin:

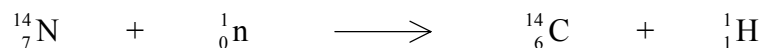
| <u>untersuchtes Organ</u> | <u>angewandte Radionuclide</u> |
|---------------------------|--|
| Bauchspeicheldrüse | ^{75}Se |
| Niere | ^{51}Cr , ^{203}Hg |
| Schilddrüse | ^{123}I , ^{125}I , ^{131}I |
| Skelett | ^{85}Sr |

(Anmerkung 2)

Beispiele für die Verwendung von Radionucliden:

- Untersuchung des Schlammtransports in Flüssen
- Untersuchung der Durchmischung von Sandsorten bei der Glasherstellung
- Lecksuche in Rohrleitungen
- Untersuchung des Transports von Insektenvernichtungsmitteln in Pflanzen (Autoradiographie)
- Ausstoß von fehlerhaft gepackten Tablettenschachteln
- Überprüfung der Dicke des Gummis bei der Autoreifenproduktion
- Kontrolle des Flüssigkeitsstands in CO_2 -Flaschen
- Radiographie zum Auffinden von Haarrissen in Gussstücken
- Sterilisation von Insekten
- Bestrahlung von Lebensmitteln
- Bestrahlung von Kunststoffen zur Erhöhung der Temperaturstabilität

Zur Altersbestimmung organischer Substanzen mit einem Alter zwischen 500 und 50.000 Jahren verwendet man heute vielfach die Radiocarbonmethode (Libby, Nobelpreis 1960). Aus dem Luftstickstoff entsteht nämlich unter der Einwirkung von Neutronen, die beim Auftreffen kosmischer Strahlung auf die oberen Schichten der Atmosphäre gebildet werden, ständig in geringer Menge Radiokohlenstoff $^{14}_6\text{C}$, ein β -Strahler mit einer Halbwertszeit von 5730 Jahren:



^{14}C tritt als Kohlenstoffdioxid in den Kohlenstoffkreislauf der Natur ein (dieser Oxidationsprozess ist allerdings noch nicht in allen Einzelheiten aufgeklärt!) und wird von den Pflanzen bei der Assimilation aufgenommen. Der Massenanteil des ^{14}C an dem in der Biosphäre gebundenen Kohlenstoff beträgt $1,5 \cdot 10^{-10} \%$: Neubildung und radioaktiver Zerfall des ^{14}C halten sich dabei die Waage. In abgestorbenen Organismen, die keinen Kohlenstoff mehr aus der Umwelt aufnehmen, sinkt der ^{14}C -Gehalt nach 5730 Jahren auf die Hälfte. Durch Messung der spezifischen Radioaktivität des Kohlenstoffs kann also das Alter organischer Substanzen ermittelt werden.

Praktischen Gebrauch vom Neutroneneinfang macht man bei der Neutronenaktivierungsanalyse (NAA), der wichtigsten radiochemischen Analyseverfahren (von Hevesy, Nobelpreis 1943). Die zu analysierende Substanz wird mit thermischen Neutronen bestrahlt, d.h. mit Neutronen verhältnismäßig geringer Energie. Durch Neutroneneinfang entstehen dabei von den meisten der zu bestimmenden Elemente Radioisotope. Diese kann man durch Messung der Halbwertszeiten und zusätzlich durch Messung der Energie und Intensität ihrer ausgesandten Strahlung identifizieren. Die Vorteile dieser Analyseverfahren sind:

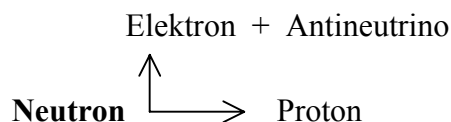
- 1.) Die Probe wird chemisch nicht zerstört.
- 2.) Das Verfahren kann automatisiert werden.

Die NAA findet als hochempfindliches Verfahren zur qualitativen und quantitativen Spurenbestimmung Anwendung (Feststellung von Luftverunreinigungen, Ermittlung von kleinsten Mengen bestimmter Elemente in Gesteinen und Legierungen, Untersuchung der Entstehungszeit und Herkunft von Gemälden). Die Nachweisgrenze liegt bei 10^{-13} g. Als Neutronenquellen kommen neben Kernreaktoren auch Radionuclide (z.B. das Nuclid ^{252}Cf) in Betracht.

(Anmerkung 3)

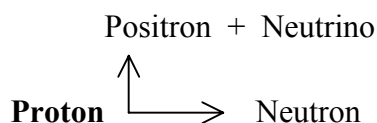
Die künstliche Radioaktivität beruht darauf, dass die bei Kernreaktionen entstehenden Nuclide mehr Protonen oder Neutronen enthalten als die stabilen Nuclide. Durch die Strahlung stellt sich wieder ein stabiles Verhältnis der Nucleonen ein. Bei der künstlichen Radioaktivität treten neben dem α - und dem β -Zerfall noch weitere Zerfallsarten auf. So kann es z.B. analog zur Abstrahlung eines Elektrons (β^- -Zerfall) zu einem β^+ -Zerfall kommen, d.h. zur Ausstrahlung eines positiv geladenen Elektrons (Positron e^+).

Neutronenüberschuss: β^- -Zerfall



Protonenüberschuss:

entweder: β^+ -Zerfall



(Das Positron tritt nicht frei auf, da es bei einem Zusammenstoß mit einem Elektron sofort „zerstrahlt“: Auftreten von γ -Strahlung.)

oder: Umwandlung eines Protons in ein Neutron

Einfang eines Elektrons, im Allgemeinen aus der K-Schale. An dessen Stelle tritt ein Elektron aus einer der äußeren Schalen, wobei Röntgenstrahlung ausgesandt wird:



(Anmerkung 4)

3 Kenngrößen der radioaktiven Strahlung und die Strahlenbelastung

Unter der radiologischen Aktivität eines Radionuclids versteht man den Quotienten aus der Anzahl der Zerfallsakte und der Zeit, in der diese Zerfallsakte erfolgen.

$$\text{radiologische Aktivität} = \frac{\text{Anzahl der Zerfallsakte}}{\text{Zeit}}$$

Einheit: 1 s^{-1} (auch angegeben als Einheit Becquerel = 1 Bq)
(Nicht mehr zugelassen ist die früher übliche Einheit Curie = 1 Ci.)

Eine Aktivitätsangabe sagt nur etwas über die Zerfallsrate des radioaktiven Stoffes aus. Zur Beurteilung der radiologischen Gefährdung sind zusätzlich die Kenntnis der Strahlenart, ihrer Energie und der Einwirkungsart auf den Organismus erforderlich. Man unterscheidet zwischen einer Ganzkörper- und einer Teilkörperbestrahlung. Wirken ionisierende Strahlen von außen auf den Körper ein, so liegt eine äußere Strahlenbelastung vor. Werden mit der Atemluft oder mit den Nahrungsmitteln radioaktive Stoffe „inkorporiert“, so kommt es zu einer inneren Strahlenbelastung.

Unter der Energiedosis einer ionisierenden Strahlung versteht man den Quotienten aus der von dem durchstrahlten Stoff absorbierten Energie und der Masse des durchstrahlten Stoffes.

$$\text{Energiedosis} = \frac{\text{absorbierte Energie}}{\text{absorbierende Masse}}$$

Einheit: $1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (auch angegeben als Einheit Gray = 1 Gy)
(Nicht mehr zugelassen ist die früher übliche Einheit 1 rad.)
Grenzwert der für den Menschen tödlichen Energiedosis: $7 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$

Unter der Energiedosisleistung oder Energiedosisrate versteht man den Quotienten aus der Energiedosis und der zugehörigen Zeit.

$$\text{Energiedosisleistung} = \frac{\text{Energiedosis}}{\text{Zeit}}$$

Einheit: $1 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ (denn $1 \text{ J} \cdot \text{s}^{-1} = 1 \text{ W}$) (auch angegeben in $\text{Gy} \cdot \text{s}^{-1}$)

Bei vielen biologischen Strahlenwirkungen ist der erreichte Effekt nicht nur von der Energiedosis abhängig, sondern auch von der Energiedosisleistung. So ist eine über lange Zeit einwirkende geringe Strahlenbelastung im Allgemeinen weniger wirksam als die Verabfolgung der gleichen Energiedosis innerhalb kurzer Zeit.

Weitere Kenngrößen der radioaktiven Strahlung sind die Ionendosis (Einheit: $1 \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$) und die Äquivalentdosis (Einheit: $1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, auch angegeben in der Einheit Sievert = 1 Sv; nicht mehr zugelassen ist die früher übliche Einheit 1 rem). Durch Angabe der Äquivalentdosis kann die unterschiedliche biologische Wirksamkeit verschiedener Strahlen berücksichtigt werden. Zur Ermittlung der Äquivalentdosis wird die Energiedosis mit einem empirisch gewonnenen „Strahlenwichtungsfaktor“ multipliziert:

| | |
|---|----------------------------|
| für Röntgen-, Gamma- und Betastrahlung: | 1 |
| für Neutronenstrahlung: | 5 bis 20 (je nach Energie) |
| für Alphastrahlung: | 20 |

Bei den Strahlenschädigungen sind zu unterscheiden:

deterministische Schäden: treten oberhalb einer bestimmten Dosis („Schwellenwert“) sofort oder innerhalb weniger Wochen immer auf

stochastische Schäden: treten nach den Prinzipien der Wahrscheinlichkeit auf, oft erst nach Jahren oder Jahrzehnten; die Schwere des Schadens ist unabhängig von der Dosis; mit höherer Dosis steigt nur die Wahrscheinlichkeit des Auftretens; es gibt keine untere Schwelle!

Die Wahrscheinlichkeit für eine stochastische Strahlenschädigung wird durch das „Schadensrisiko“ zum Ausdruck gebracht.

Strahlenbelastung des Menschen:

- a) kosmische Strahlung (Intensität nimmt mit steigender Höhe über dem Meeresspiegel zu)
Mittelwert für Deutschland: $0,3 \text{ mSv}\cdot\text{a}^{-1}$
- b) terrestrische Strahlung (hervorgerufen durch die in den Böden und Gesteinen der Erdkruste vorhandenen natürlichen Radionuclide und deren Zerfallsprodukte; gering im Flachland Norddeutschlands, hoch in Gebirgsregionen mit Granitgestein)
Mittelwert für Deutschland: $0,4 \text{ mSv}\cdot\text{a}^{-1}$
(Maximum in den alten Bundesländern: Menzenschwand im Schwarzwald: $18 \text{ mSv}\cdot\text{a}^{-1}$)
- c) Eigenstrahlung des Körpers (hervorgerufen durch die beim Stoffwechsel aufgenommenen Radionuclide, vor allem durch das radioaktive ^{40}K)
(Das radioaktive ^{40}K ist zu 0,012 % im natürlich vorkommenden Element Kalium enthalten. Die in einem Menschen von 70 kg Körpergewicht enthaltenen 140 g Kalium entsprechen einem Radioaktivitätsinventar an ^{40}K von ca. 4400 Bq.)
Mittelwert: $0,3 \text{ mSv}\cdot\text{a}^{-1}$
- d) Inhalation von Radon und seinen Zerfallsprodukten
Mittelwert für Deutschland $1,4 \text{ mSv}\cdot\text{a}^{-1}$ (davon $1,2 \text{ mSv}\cdot\text{a}^{-1}$ durch den Aufenthalt in Häusern und $0,2 \text{ mSv}\cdot\text{a}^{-1}$ durch den Aufenthalt im Freien)

Die durch alle Komponenten natürlicher Strahlenquellen bedingte Strahlenbelastung des Menschen beträgt also in Deutschland durchschnittlich rund $2,4 \text{ mSv}\cdot\text{a}^{-1}$. Vereinzelt treten Spitzenwerte von $10 \text{ mSv}\cdot\text{a}^{-1}$ und mehr auf.

Zu der natürlichen Strahlenbelastung kommt die zivilisatorisch bedingte Strahleneinwirkung. Diese wird im Wesentlichen durch die medizinische Anwendung der ionisierenden Strahlen bei der Röntgendiagnostik und in der Strahlentherapie bewirkt und beträgt in Deutschland im Durchschnitt etwa $1,5 \text{ mSv}\cdot\text{a}^{-1}$. [Vor einer Mammographie (in der Regel nicht vor dem 35. Lebensjahr!) sollte man den Arzt nach der Organdosis des Gerätes fragen: Sie sollte 2 mSv (= 200 mrem) nicht überschreiten!] Die Strahleneinwirkung aus anderen künstlichen Strahlenquellen (Anwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlung in Forschung und Technik, Emission radioaktiver Stoffe aus Kern- und Kohlekraftwerken, Fallout sowohl durch die oberirdischen Kernwaffenversuche vergangener Jahrzehnte als auch durch den Reaktorunfall in Tschernobyl im April 1986) beträgt im langzeitigen Mittel $0,06 \text{ mSv}\cdot\text{a}^{-1}$.

Anmerkung zur Strahlenbelastung in Wohnungen:

Die jährliche „Keimdrüsendosis“ (genauer: genetisch signifikante Äquivalentdosis) im Freien (gemessen in unmittelbarer Nähe der Häuser) ist - jeweils nach Abzug der kosmischen Strahlung - in den alten Bundesländern am geringsten in Bremen mit $0,26 \text{ mSv}\cdot\text{a}^{-1}$ und am größten im Saarland mit $0,5 \text{ mSv}\cdot\text{a}^{-1}$. Das gleiche gilt für die jährliche Keimdrüsendosis in Wohnungen (Bremen: $0,33 \text{ mSv}\cdot\text{a}^{-1}$; Saarland: $0,76 \text{ mSv}\cdot\text{a}^{-1}$). Die hohe durchschnittliche Strahlenbelastung innerhalb von Wohnungen im Saarland wird auf die im Saarland früher weit verbreitete Verwendung von Baumaterial aus Hochofenschlacke zurückgeführt.

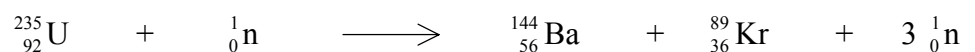
Zitat aus dem Infoblatt des Bundesamts für Strahlenschutz 03/02 (20.03.2002): „Freisetzungsraten von Radon, die höhere Konzentrationen im Raum zur Folge haben können, wurden vereinzelt an Natursteinen mit erhöhten Radium-Konzentrationen gemessen. In einigen Ländern wurden solche Verhältnisse bei Chemiegipsen (Rückstände der Phosphatindustrie) und auch bei Leichtbetonen festgestellt, die unter Verwendung von Alaunschiefer hergestellt wurden. Vereinzelt findet man auch überdurchschnittliche Radonkonzentrationen in den traditionellen Gebieten des Bergbaus, wenn Abraum oder Reststoffe der Erzverarbeitung mit erhöhter Radiumkonzentration als Baumaterial, als Beton- oder Mörtelzuschlagstoff sowie zur Fundamentierung bzw. Hinterfüllung beim Hausbau verwendet wurden.“

Änderung der Strahlenexposition in Wohnungen im Vergleich zu der im Freien (in Abhängigkeit vom verwendeten Baustoff):

| | |
|-----------------------|--------|
| Bimsstein | + 50 % |
| Schlackenstein | + 47 % |
| Klinker | + 36 % |
| Ziegel und Naturstein | + 35 % |
| Lehm | + 35 % |
| Kalksandstein | + 24 % |
| Beton | + 24 % |
| Blähton | + 18 % |
| Holz | - 4 % |

4 Kernspaltung (Kernfission)

Hahn und Straßmann beschossen im Jahre 1938 Uran mit langsamen Neutronen. Anstatt der erwarteten Kernumwandlungen erhielten sie Ba und Kr, d.h. der Urankern war in zwei Bruchstücke zerplatzt. Die genauere Nachprüfung ergab, dass nicht ^{238}U , sondern das viel seltenere ^{235}U mit den langsamen Neutronen reagiert und dass bei der Spaltung durch 1 Neutron 3 neue Neutronen frei werden:



Das Auseinanderbrechen des Urankerns erfolgt nicht immer so, dass Ba und Kr entstehen, sondern man findet auch die Paare Br - La, Sr - Xe und Y - I.

Die Spaltung aller Kerne, die in 1 kg ^{235}U enthalten sind, liefert eine Energie von $7,56 \cdot 10^{13}$ J (= $21 \cdot 10^6$ kW·h). Das entspricht der Energie, die beim Verbrennen von 3 Millionen kg = 3000 t Steinkohle frei wird! Über die Gleichung $W = m \cdot c^2$ lässt sich berechnen, dass dieser Energie ein Massenverlust von etwa 1 g entspricht.

m = Masse in Kilogramm

W = Energie in Joule (1 J = $1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)

c = Lichtgeschwindigkeit in $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ($3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

$$m = \frac{W}{c^2} = \frac{7,56 \cdot 10^{13} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}}{9 \cdot 10^{16} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}} = 0,84 \cdot 10^{-3} \text{ kg} = \underline{\underline{0,84 \text{ g}}}$$

Ebenso wie der Kern des Nuclids ^{235}U können praktisch alle Atomkerne gespalten werden, wenn geeignete Geschosse zur Verfügung stehen. Wie ^{235}U ist auch ^{239}Pu durch langsame Neutronen spaltbar. Dagegen erfordert die Spaltung von ^{238}U und ^{232}Th sehr schnelle Neutronen, und die Spaltung der leichten Kerne ist nur mit äußerst energiereichen Neutronen, α -Teilchen oder Deutronen möglich.

Im natürlichen Uran sind 3 Isotope mit folgenden Atomanteilen enthalten:

| | |
|-----------------------|----------|
| $^{238}_{92}\text{U}$ | 99,275 % |
| $^{235}_{92}\text{U}$ | 0,720 % |
| $^{234}_{92}\text{U}$ | 0,005 % |

Sowohl für die Verwendung in Atombomben als auch zum Betreiben des heute vorherrschenden Typs von Kernreaktoren muss das Uran „angereichert“ werden, d.h. der Anteil an ^{235}U muss erhöht werden. Für die Herstellung von Sprengsätzen ist eine Anreicherung des Urans auf einen Atomanteil an ^{235}U von mindestens 20 % erforderlich, zur Verwendung in Kernreaktoren genügt eine Anreicherung auf 2 bis 4 %. Vor dem Einsatz in den Anreicherungsanlagen wird aus dem Uran die Verbindung UF_6 hergestellt, eine farblose, kristalline Substanz, die beim Normdruck von 1,013 bar bereits bei 56 °C sublimiert.

Verfahren zur Uran-Anreicherung:

- Diffusionsverfahren: UF_6 wird durch dünne Membranen gedrückt. (1500 bis 2500 Trennschritte bis zur Anreicherung des ^{235}U auf 3 %)
USA: Oak Ridge
England: Capenhurst (für militärische Zwecke)
Frankreich: Pierrelatte (für militärische Zwecke)
- Zentrifugenverfahren: Jülich: Zentrifugen 3,5 m hoch, 18 cm Durchmesser, bis zu 100.000 Umdrehungen in der Minute (jeder Punkt des Zentrifugenmantels bewegt sich also mit Überschallgeschwindigkeit!); jeweils 10 bis 20 Zentrifugen müssen hintereinandergeschaltet werden, um den Massenanteil an ^{235}U auf 3 % zu erhöhen; verhältnismäßig geringer Energieverbrauch
3 Trennanlagen: eine in Capenhurst (England)
zwei - eine holländische und eine deutsche - in Almelo (Holland)
- Trenndüsenverfahren: Karlsruhe: Trenneffekt bei der Umlenkung eines expandierenden Gasstromes von UF_6 mit einem Trägergas; Nachteil: hoher Energieverbrauch

Ungesteuerte Kettenreaktion in der Atombombe

Bei der Kernspaltung von ^{235}U und ^{239}Pu entstehen durch 1 langsames Neutron 3 schnelle Neutronen. Übersteigt die Masse des Urans bzw. Plutoniums eine „kritische Masse“, so werden die schnellen Neutronen durch Zusammenstöße mit Atomkernen gebremst und können 3 weitere Kerne spalten, wodurch $3 \cdot 3 = 9$ Neutronen frei werden. Es kommt so zu einer Kettenreaktion, die sich lawinenartig fortpflanzt. Die Kettenreaktion verläuft innerhalb einer Zeit von etwa 10^{-6} s und erzeugt Temperaturen bis zu etwa 10^8 K.

(Statt von „kritischer Masse“ spricht man besser von „kritischer Konfiguration“, weil neben der Masse auch die geometrische Anordnung von Bedeutung ist. Man könnte z.B. aus reinem ^{235}U eine beliebig lange, dünne Stange herstellen, ohne jeweils eine Kettenreaktion zu erzielen. Bei einer Ku-

gel würde sie schon bei einem Durchmesser von etwa 17 cm einsetzen, was einer Masse von rund 50 kg entspricht:

$$m = \rho \cdot V = 18,7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \frac{4}{3} \cdot (8,5)^3 \cdot \pi \text{ cm}^3 \approx 48105 \text{ g} \approx \underline{\underline{48 \text{ kg}}}$$

^{239}Pu hat eine „kritische Masse“ von 5,6 kg. Dies entspricht einer Kugel mit einem Durchmesser von rund 8 cm.)

In der Atombombe bewahrt man das spaltbare Material in Form von zwei oder mehreren Blöcken unterkritischer Masse auf und schießt sie erst im gewünschten Augenblick durch Sprengkapseln zu einem Block überkritischer Masse zusammen. Bei Verwendung eines Neutronenreflektors und eines Tampers (d.h. eines Mantels aus Stahl oder anderen Stoffen mit hoher Atommasse, der den Spaltstoff nach der Zündung noch möglichst lange zusammenhalten soll) beträgt die kritische Masse bei ^{235}U etwa 15 bis 20 kg und bei ^{239}Pu etwa 5 bis 10 kg.

16.7.1945 Wüste von Neu-Mexiko: Erprobung der ersten Kernwaffe, einer Plutoniumbombe (Pu-Ga-Legierung)

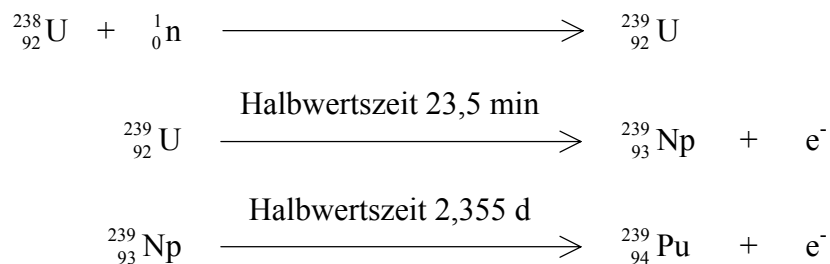
6.8.1945 Abwurf einer Uranbombe auf Hiroshima; Bombe wog mit Tamper 4050 kg

9.8.1945 Abwurf einer Plutoniumbombe auf Nagasaki

Unter der Annahme, dass von den rund 15 kg des Spaltstoffs ^{235}U etwa 1 kg gespalten wurde, entsprach die Sprengkraft der Hiroshima-Bombe rund 20 kt TNT. Die heute stärksten Wasserstoffbomben haben eine Sprengkraft von 60 Mt TNT. Um das Jahr 1990 existierten ca. 70.000 nukleare Sprengköpfe: auf jeden Bewohner der Erde kamen 6 t TNT! (Die Reichweite der Raketen beträgt heute bis 15.000 km, die Zielabweichung 150 m.) Bei der Plutoniumgewinnung in Brutreaktoren entsteht neben dem Nuclid ^{239}Pu in kleinen Mengen auch das Nuclid ^{241}Pu . Dieses hat eine kleinere kritische Masse als ^{239}Pu und findet deshalb zur Herstellung leichter taktischer Kernwaffen Verwendung. Seine Halbwertszeit beträgt 14,4 Jahre. Die mit solchen Sprengsätzen versehenen Waffen müssen etwa alle 2 Jahre aufbereitet werden, um sie von den inzwischen entstandenen und störenden Zerfallsprodukten zu befreien.

Gesteuerte Kettenreaktion im Kernreaktor

Im natürlichen Uran leiten die überall vorhandenen Neutronen die Kernspaltung von ^{235}U ein. Die dabei entstehenden schnellen Neutronen (Energie $> 10^5$ eV) werden durch Zusammenstöße mit anderen Urankernen abgebremst und als mittelschnelle Neutronen (Energie 10 bis 1000 eV) von den ^{238}U -Kernen eingefangen:



Damit eine Kettenreaktion ablaufen kann, müssen die bei der Spaltung von ^{235}U -Kernen entstehenden schnellen Neutronen abgebremst werden auf eine Energie unter 0,1 eV („thermische Neutronen“), ohne dass sie während der Abbremsung von ^{238}U -Kernen weggefangen werden können. Außerdem muss im Kernreaktor die Geschwindigkeit der Kettenreaktion reguliert werden können. Man baut daher den Reaktor so, dass man mit dem Kernbrennstoff gefüllte Röhren in eine Bremsmasse, den Moderator, einbettet. Die aus den „Brennstäben“ austretenden schnellen Neutronen werden im Moderator abgebremst, stoßen also während des Abbremsvorgangs meist nicht mit ^{238}U -Kernen zusammen. Erst als langsame Neutronen dringen sie dann wieder in einen Brennstab ein, wo sie neue Spaltungen auslösen können.

Kernbrennstoff:

- Natururan
- angereichertes Uran (höherer Anteil an ^{235}U)
- reines ^{235}U oder ^{233}U (entsteht durch Neutronenbestrahlung aus ^{232}Th oder ^{239}Pu)

Meist setzt man die Kernbrennstoffe in Form der Verbindungen UO_2 bzw. PuO_2 ein.

Im Reaktorkern befinden sich zahlreiche Brennstoffstäbe, die mit Tabletten aus dem gesinterten Kernbrennstoff gefüllt und zu Brennelementen gebündelt sind (z.B. Biblis-A: im Reaktorkern 193 Brennelemente mit je 236 Brennstoffstäben; insgesamt 101,8 t Uran in Form der Verbindung UO_2). Das Umhüllungsmaterial der Brennstäbe besteht aus Zircaloy, einer Zirkoniumlegierung mit einem Massenanteil an Zinn von etwa 1,5 % und geringen Anteilen an Eisen und Chrom.

Moderator:

Ein guter Moderator muss eine geringe Atommasse haben, um Neutronen durch wenige elastische Zusammenstöße abzubremesen, und er darf selbst keine oder nur sehr wenige Neutronen einfangen.

- Schweres Wasser (teuer!)
- Leichtes Wasser (Protonen sind zwar ein gutes Bremsmittel, fangen aber viele Neutronen ein unter Bildung von Deuterium. Daher wird leichtes Wasser nur dann als Moderator verwendet, wenn die Neutronenbilanz dies zulässt, z.B. bei Verwendung von angereichertem Uran als Kernbrennstoff.)
- Graphit
- Berylliumoxid (BeO)

Regulierung der Neutronenproduktion:

Von außen werden Regelstäbe aus Cd oder borhaltigem Stahl in den Reaktor eingeschoben: Cd und B absorbieren langsame Neutronen.

Kühlmittel:

Um die bei der gesteuerten Kettenreaktion frei werdende Energie ausnutzen zu können, wird die entstandene Wärme auf ein Kühlmittel übertragen, das in einem geschlossenen Kreislauf den Reaktor durchströmt.

Geeignete Kühlmittel sind:

- Flüssigkeiten (Leichtes Wasser; Schweres Wasser; organische Flüssigkeiten, wie z.B. Diphenyl; flüssige Metalle, wie z.B. Natrium)
- Gase (Kohlenstoffdioxid, Helium)

Beispiele für Reaktortypen:

(Übersicht der Atomkraftwerke in Deutschland: siehe Anhang 3)

Leichtwasserreaktoren:

„leichtes“ Wasser als Moderator und Kühlmittel
als Kernbrennstoff ist angereichertes Uran erforderlich (Atomanteil an ^{235}U : 2 bis 4 %)

a) Siedewasserreaktoren (1999 in Deutschland 6 Anlagen in Betrieb)

Das Kühlmittel kann in Dampfform (ca. 70 bar Druck) direkt zur Turbine geleitet werden.
z.B. Gundremmingen B und C in der Nähe von Ulm (2 x 1284 MW; Inbetriebnahme 1984)

b) Druckwasserreaktoren (1999 in Deutschland 14 Anlagen in Betrieb)

Das Kühlmittel wird zu einem Dampferzeuger geleitet, in dem ein zweiter Wasserkreislauf erhitzt wird, der mit dem so erzeugten Dampf die Turbine antreibt.

z.B. Biblis A und B bei Worms am Rhein

(A: 1167 MW; Inbetriebnahme 1974; B: 1240 MW; Inbetriebnahme 1976)

Biblis A: Kühlmitteldruck 155 bar, mittlere Kühlmitteltemperatur 300,5 °C; Wasser ist unter diesen Bedingungen noch flüssig.

Schwerwasserreaktoren:

schweres Wasser als Moderator und Kühlmittel

Natururan als Brennstoff

z.B. Mehrzweckforschungsreaktor Karlsruhe (im Mai 1984 stillgelegt)

in Kanada mehrere CANDU-Reaktoren (Canadian Deuterium Uranium) vom Typ der Druckwasserreaktoren

(Bei einem Reaktor mit einer Leistung von 500 MW sind ca. 500 t D₂O erforderlich; der Preis beträgt rund 150 Millionen DM!)

Schnelle Brutreaktoren: Brennelemente enthalten eine Mischung aus UO₂ und PuO₂. An die Spaltzone schließt sich nach außen radial die Brutzone an. Die Brutelemente enthalten UO₂ mit abgelenktem Gehalt an ²³⁵U („abgereichertes Uran“). Durch schnelle Neutronen (kein Moderator!) kann so viel ²³⁸U in Plutonium umgewandelt werden, dass mehr spaltbares Material „erbrütet“ als verbraucht wird. - Da Brutreaktoren mit schnellen Neutronen arbeiten, kann als Kühlmittel kein Wasser verwandt werden, da dieses die Neutronen abbremst. Man verwendet daher flüssiges Natrium von etwa 550 °C, das keine Bremswirkung auf Neutronen hat und wegen seiner guten Wärmeleitfähigkeit für die Abführung der entstehenden Wärme besonders gut geeignet ist. Nachteile der Verwendung des Natriums liegen darin, dass Natrium mit Wasser und Luft reagiert und bei 98 °C erstarrt. Es muss also durch Zusatzeinrichtungen dafür gesorgt werden, dass bei einem Reaktorstillstand der Kühlkreislauf nicht „einfriert“.

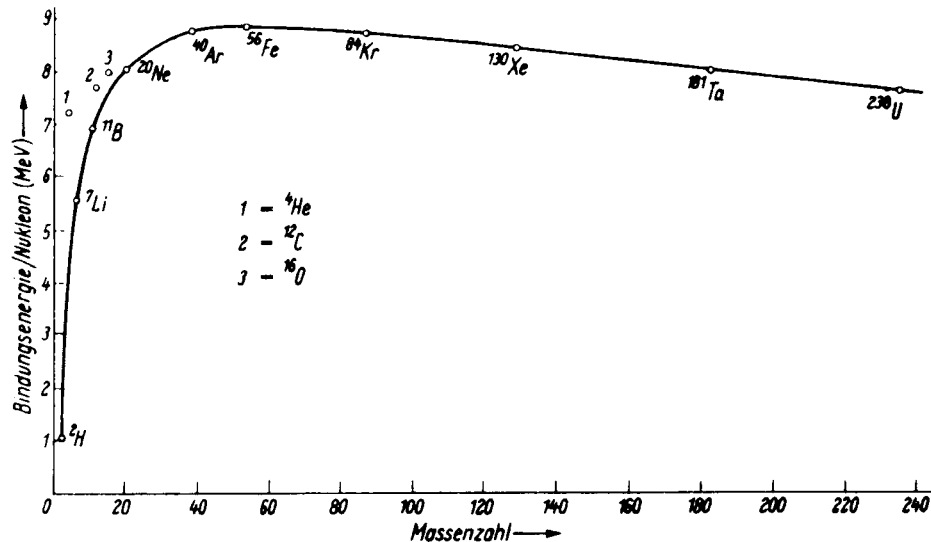
Prototyp mit 300 MW elektrischer Leistung in Kalkar am Niederrhein (Kreis Kleve) gebaut, vor Inbetriebnahme 1991 stillgelegt. (Es wären 1100 t Natrium erforderlich gewesen!)

Heliumgekühlter Hochtemperaturreaktor vom Kugelhaufentyp: in Jülich entwickelt; Versuchskernkraftwerk Jülich 1967 in Betrieb genommen und 1988 stillgelegt; Core 3 m hoch und 3 m im Durchmesser; enthielt 100.000 Graphitkugeln von 6 cm Durchmesser, in denen sich jeweils 30.000 bis 40.000 Teilchen von Thorium-Uran-Carbid mit einem Durchmesser von 0,2 mm befanden (Uran mit 93 % ²³⁵U!); ²³⁵U war der Spaltstoff, ²³³Th war Brutstoff und lieferte ²³³U, welches wieder als Kernbrennstoff verwendet werden kann; mittlere Verweilzeit der Kugeln im Kern des Reaktors 3 Jahre; täglich 50 bis 60 Kugeln ausgetauscht; Erwärmung des als Kühlmittel verwendeten Heliums auf ca. 950 °C; elektrische Leistung 13 MW. - Der Hochtemperaturreaktor könnte zur Erzeugung von „Prozesswärme“ eingesetzt werden, z.B. zur Vergasung von Kohle oder zur Spaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff.

In der Nähe von Hamm ist eine Prototypanlage mit rund 300 MW elektrischer Leistung 1985 in Betrieb genommen, aber bereits 1989 wieder stillgelegt worden (670.000 Brennelementkugeln; Helium mit 750 °C in die Dampferzeuger).

5 Kernverschmelzung (Kernfusion)

Die Kernbindungsenergie kann als die Energie angesehen werden, die erforderlich ist, um die Nucleonen des Kerns zu trennen, oder als die Energie, die bei der hypothetischen Bildung eines Kerns aus einzelnen Nucleonen frei wird. Die folgende Abbildung zeigt die Abhängigkeit der Kernbindungsenergie je Nucleon von der Nucleonenzahl der Elementatome: Je höher ein Element in der Kurve steht, umso beständiger sind seine Atomkerne.

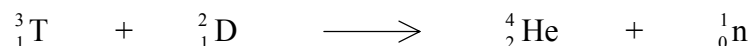


Das Maximum der Stabilität liegt in der Mittelsektion (Fe, Co, Ni). Dadurch wird verständlich, dass sowohl die Spaltung von schweren zu leichteren Kernen als auch die Verschmelzung von leichten zu schwereren Kernen Energie liefert, denn in beiden Fällen führt die zunehmend festere Bindung (höhere Bindungsenergie) der Nucleonen zum Freiwerden von Kernbindungsenergie. Zur Nutzbarmachung der Bindungsenergie des Atomkerns wird man also bei der Kernspaltung Atome mit großer Nucleonenzahl, bei der Kernverschmelzung Atome mit kleiner Nucleonenzahl den Vorzug geben.

Die Abbildung zeigt, dass bei der Verschmelzung von sehr leichten Kernen zu einem schwereren Kern besonders viel Energie freigesetzt wird. Hierbei ist die im Vergleich zu den Nachbarkernen auffallend große Stabilität des Heliumkerns ^4He (und in geringerem Maße auch die der Kerne ^{12}C und ^{16}O) hervorzuheben, die sich durch ihre Lage oberhalb der sonst recht stetigen Kurve zu erkennen gibt.

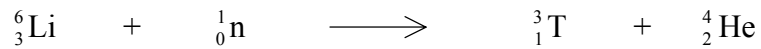
Fusionsreaktionen, die in mehreren Teilreaktionen zur Verschmelzung von 4 Protonen zu einem Heliumkern führen (unter Abgabe von 2 Positronen), sind die Ursache für die von der Sonne ausgestrahlte Energie. (Anmerkung 4)

In der Wasserstoffbombe erfolgt ein Aufbau von Heliumkernen aus Tritonen und Deuteronen:



Da sich die positiv geladenen Atomkerne abstoßen, ist für eine Kernfusion eine äußerst große Bewegungsenergie notwendig. Hierzu muss das Tritium-Deuterium-Gemisch auf über 50 Millionen K erhitzt werden. Man baut daher als Zünder eine Atombombe in ein Gemisch der Wasserstoffisotope ein.

Die erste Wasserstoffbombe (1.11.1952; Eniwetok-Atoll im Pazifik) enthielt Deuterium und Tritium im molekularen Zustand, die durch Kühlung und Druck bis zur Zündung flüssig gehalten wurden. Heute verwendet man das feste Lithiumdeuterid ${}^6\text{LiD}$, das schalenförmig um eine als Zünder dienende Atombombe angeordnet wird. Das Nuclid ${}^6\text{Li}$ liefert beim Beschuss mit Neutronen Tritium:



Der größte Teil der Radioaktivität bei der Explosion einer Wasserstoffbombe stammt aus dem radioaktiven Zerfall der Spaltprodukte, die bei der Explosion der als Zünder dienenden Atombombe entstehen. Die Verschmelzung von Deuterium und Tritium liefert nur Neutronen, die allerdings das Umgebungsmaterial aktivieren können.

Eine „saubere“ Wasserstoffbombe, bei der der Anteil der Radioaktivität an der zerstörenden Wirkung gering ist, ist also stets eine Bombe extrem hoher Sprengkraft. Eine „schmutzige“ Wasserstoffbombe ist eine Bombe mit kleiner Sprengkraft. Die insgesamt ausgesandte radioaktive Strahlung ist jedoch bei einer sauberen Wasserstoffbombe im Prinzip ebenso groß wie bei einer schmutzigen Wasserstoffbombe, weil der Zünder in beiden Fällen die gleiche Größe hat.

Neutronenbombe: Mini-Wasserstoffbombe mit einer Mini-Atombombe als Zünder

Mini-Atombomben kann man z.B. durch Verwendung von ${}^{251}\text{Cf}$ erhalten, dessen kritische Masse nur etwa ein Achtel der kritischen Masse von ${}^{235}\text{U}$ beträgt, oder - da die kritische Masse eines Nuclids von der Dichte abhängig ist - durch Ausnutzung von Schockwellen, indem man als äußere Schicht in der Bombe über dem Lithiumdeuterid einen konventionellen Sprengstoff anbringt.

Eine Neutronenbombe wirkt fast nur durch ihre Neutronenstrahlung. Obwohl Neutronen keine unmittelbaren Ionisationen verursachen, können sie dennoch große biologische Schäden hervorrufen. In jedem lebenden Organismus sind Wassermoleküle und damit Protonen in großer Anzahl vorhanden. Die bei den Zusammenstößen schneller Neutronen mit den Protonen bewirkte Abbremsung ist mit der Bildung von „Rückstoßkernen“ verbunden, die sich durch den Absorber bewegen und auf einem verhältnismäßig kurzen Weg starke Ionisation verursachen. Diese mittelbaren Ionisationen führen zu schweren Zellschädigungen.

Die militärische Bedeutung der Neutronenbombe liegt darin, dass ihre Explosion bei allen Personen bis zu einem Abstand von 1 km zur sofortigen Lähmung und nach wenigen Stunden zum Tod führt, während an Gebäuden und Material nur geringe Schäden entstehen. Gedacht ist vor allem an den Einsatz gegen Panzertruppen: Die Panzerung schirmt nur etwa die Hälfte der Strahlung ab. Allerdings kann die Abschirmung durch Folien aus borhaltigem Material verstärkt werden.

Um die bei Kernfusionen frei werdende Energie in einem Fusionsreaktor ausnutzen zu können, müsste zunächst ein sehr heißes Plasma erzeugt werden. (Unter einem Plasma versteht man ein durch Energiezufuhr vollständig ionisiertes Gas.) Dieses Plasma müsste eine ausreichend hohe Teilchendichte haben und für eine genügend lange Zeit zusammengehalten werden. Aus Berechnungen von Lawson ergibt sich, dass für einen D-T-Fusionsreaktor (mit 50 % D + 50 % T) das Produkt aus Plasmadichte und Einschlusszeit über $10^{14} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}$ und die Temperatur etwa 10^8 K betragen müsste.

Zündbedingungen:

Plasmatemperatur: 100 bis 200 Millionen Grad

Plasmadichte: ca. 10^{14} Teilchen $\cdot \text{cm}^{-3}$

Einschlusszeit: 1 bis 2 Sekunden

In der Fusionsforschung werden vor allem zwei Experimenttypen untersucht: der Tokamak und der Stellarator (siehe Anhang 4).

Tokamak

z.B. ASDEX Upgrade (Axialsymmetrisches Divertor-Experiment Upgrade) im Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Garching bei München (seit 1990)

Plasmaquerschnitt: 1 m breit und 1,6 m hoch

Plasmatemperatur: bis 100 Millionen Grad

Plasmadichte: bis $2 \cdot 10^{14}$ Teilchen \cdot cm⁻³

In einem ringförmigen Gefäß schließen 2 sich überlagernde Magnetfelder das Plasma ein: erstens ein ringförmiges Feld, das durch 16 äußere Magnetspulen erzeugt wird, und zweitens das Feld eines starken, im Plasma fließenden elektrischen Stromes. Ein drittes, durch äußere Ringspulen erzeugtes Feld bestimmt die Plasmaform und die Lage des Stromes im Plasma.

[Der Plasmastrom wird durch eine Transformatorspule induziert. Wegen des Transformators arbeitet ein Tokamak nicht kontinuierlich, sondern gepulst: In einem Transformator kann nur für eine beschränkte Zeit ein ansteigender Strom in der Primärwicklung erzeugt und damit ein Strom im Plasma getrieben werden. Danach muss der Transformator „entladen“ und der Strom von neuem hochgefahren werden.]

Stellarator

z.B. Wendelstein 7-AS im Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Garching bei München (seit 1988) und Wendelstein 7-X im Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Greifswald (Experimentierbeginn ca. 2005):

| | Wendelstein 7-AS | Wendelstein 7-X |
|----------------------|---|---|
| Durchmesser | 7,2 m | 15 m |
| Höhe | 4m | 4m |
| Masse | 250 t | 550 t |
| großer Plasmaradius | 2m | 5,5 m |
| kleiner Plasmaradius | 0,2 m (im Mittel) | 0,53 m (im Mittel) |
| Plasmatemperatur | 15 bis 60 Millionen Grad | 10 bis 60 Millionen Grad |
| Plasmadichte | bis $3 \cdot 10^{14}$ Teilchen \cdot cm ⁻³ | bis $3 \cdot 10^{14}$ Teilchen \cdot cm ⁻³ |

Stellaratoren sind für den Dauerbetrieb geeignet. Sie schließen das Plasma mit einem Magnetfeld ein, das ausschließlich von äußeren Spulen erzeugt wird.

Die in verschiedenen Versuchsanordnungen bisher erreichten Parameter sind aus dem beigefügten Lawson-Diagramm ersichtlich (siehe Anhang 5).

Anmerkungen

Anmerkung 1

Dreifingerregel der rechten Hand:

Hält man Daumen, Zeigefinger und Mittelfinger der rechten Hand paarweise zueinander senkrecht, sodass

der Daumen in die Richtung zeigt, aus der ein negativer Teilchenstrahl kommt (bzw. in die sich ein positiver Teilchenstrahl bewegt)

und

der Zeigefinger in die Feldlinienrichtung (von Norden nach Süden) weist,

so gibt

der Mittelfinger die Richtung der Ablenkung an.

Anmerkung 2

Zur nuclearmedizinischen Untersuchung angewandte Radionuclide:

| <u>untersuchtes Organ</u> | <u>angewandte Radionuclide</u> |
|-------------------------------------|--------------------------------|
| Bauchspeicheldrüse | Se-75, Tc-99m |
| Gehirn | Tc-99m |
| Leber | Tc-99m, Au-198 |
| Lunge | Kr-81m, Tc-99m, Xe-133 |
| Milz | Tc-99m, Hg-197 |
| Niere | Cr-51, Tc-99m, Hg-203 |
| Schilddrüse | Tc-99m, I-123, I-125, I-131 |
| Skelett | Sr-85, Sr-87m |
| Eisenstoffwechsel | Fe-59 |
| Vitamin-B ₁₂ -Absorption | Co-60 |

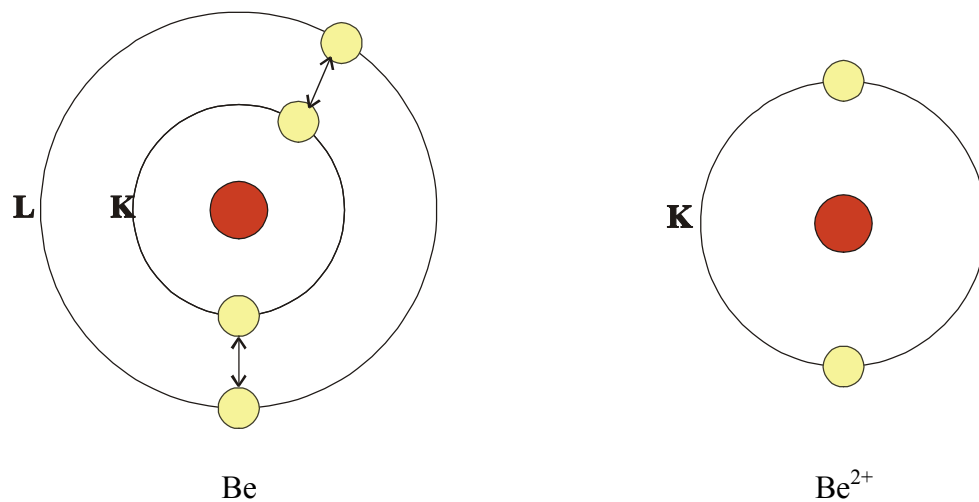
Anmerkung 3

Eine eindrucksvolle Aktivierungsanalyse wurde 1961 mit einer Milligramm-Menge einer Haarprobe von Napoleon I. durchgeführt, die einen Tag nach seinem Tod auf der Insel St. Helena (5. Mai 1821) genommen und seitdem aufbewahrt worden war. Sie führte zu dem Schluss, dass Napoleon offensichtlich keines natürlichen Todes gestorben, sondern das Opfer einer Arsenvergiftung geworden ist. Man konnte nicht nur die Anwesenheit und Menge von Arsen sicherstellen, sondern durch schrittweise Ermittlung des Arsengehaltes in einigen 13 cm langen, dem Wachstum eines Jahres entsprechenden Haaren sogar zeigen, dass das Arsen während dieser Zeit mit Unterbrechungen gegeben worden ist und zu welchem Zeitpunkt dies geschah.

Anmerkung 4

1.) Ein β^+ -Zerfall findet sich nicht bei natürlich vorkommenden radioaktiven Nucliden, sondern nur bei dem Zerfall künstlich hergestellter Radionuclide.

2.) Beim K-Elektroneneinfang leichter Nuclide kann die Halbwertszeit durch die chemische Bindung beeinflusst werden. So zerfällt z.B. ${}^7\text{Be}$, das durch Elektroneneinfang in ${}^7\text{Li}$ übergeht, als Beryllium-Metall schneller als in Be^{2+} -Verbindungen. Beim Beryllium-Atom führt nämlich die gegenseitige Abstoßung der negativen Ladungen auf der K- und der L-Schale dazu, dass die beiden Elektronen der K-Schale näher zum Kern gedrückt werden. Diese Wechselwirkung zwischen den Elektronen der K-Schale und denen der L-Schale besteht beim Be^{2+} -Ion nicht mehr. Die mittlere Entfernung der beiden 1s-Elektronen vom Kern ist daher beim Be^{2+} -Ion größer als beim Be-Atom, d.h. der Elektroneneinfang durch ein Proton kann nicht so leicht erfolgen.



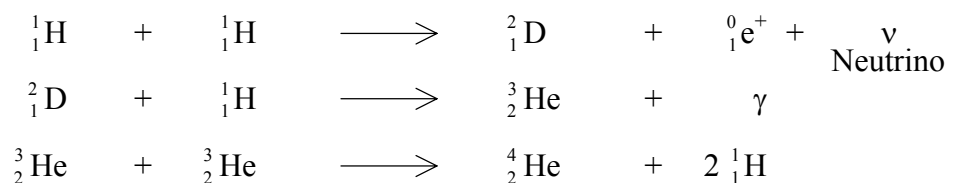
Die Folge davon ist, dass beim Be^{2+} -Ion die Halbwertszeit für die Umwandlung eines Protons in ein Neutron durch Elektroneneinfang um ungefähr 0,1 % verlängert ist.

Auch durch eine Änderung des Drucks wird die Halbwertszeit beeinflusst: Druckerhöhung führt zu einer Verkürzung der Halbwertszeit (für BeO bei einem Druck von 270 kbar Verkürzung der Halbwertszeit um 0,6 %).

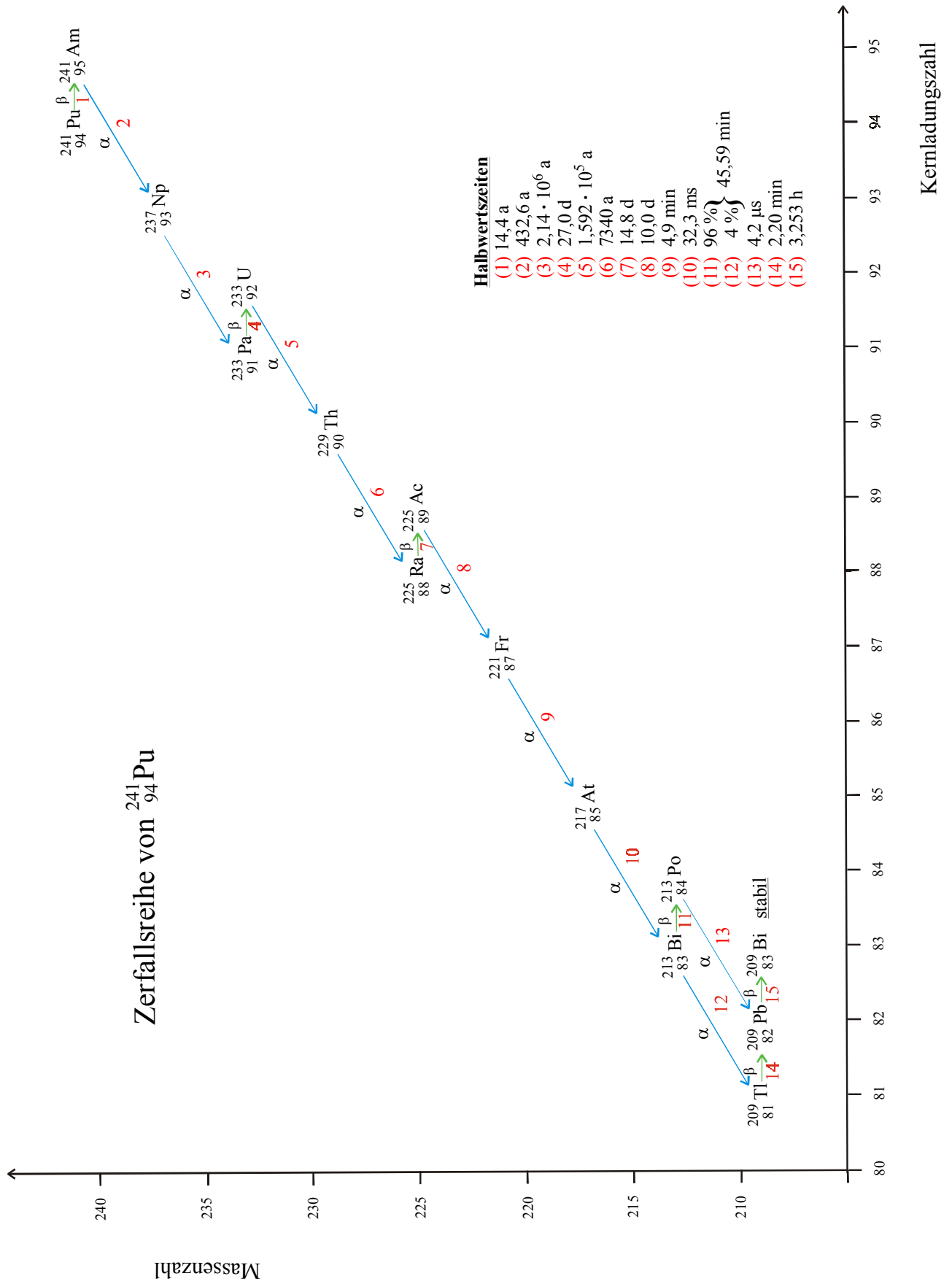
3.) Röntgenstrahlen entstehen, wenn auf Atome Kathodenstrahlen, d.h. Elektronen sehr hoher Energie, auftreffen und dadurch Elektronen aus inneren Bahnen der Atome herausgeschleudert werden. Diese Lücken werden dadurch ausgefüllt, dass Elektronen aus weiter außen liegenden Schalen in die Lücken hineinspringen, wobei dann die kurzwelligen Röntgenstrahlen ausgesandt werden.

Anmerkung 5

Sonne: 75 % H, 23 % He, 2 % schwere Elemente



Anhang 1



Anhang 2

Schalenmodell des Atomkerns

Atomkerne mit bestimmten Nucleonenzahlen zeichnen sich durch eine besonders große Stabilität aus. Diese „magischen Zahlen“ sind - jeweils mit Extrapolation in das Gebiet der heute noch unbekannteren superschweren Atomkerne -

für Protonen: 2 8 20 28 40 50 82 | 114 164

für Neutronen: 2 8 20 28 40 50 82 126 | 184 196 272 318

Kerne, bei denen entweder die Protonenzahl oder die Neutronenzahl eine magische Zahl ist, heißen magische Kerne. Wenn sowohl die Protonen- als auch die Neutronenzahl magische Zahlen sind, spricht man von doppeltmagischen Kernen (z.B. ${}^4_2\text{He}$, ${}^{16}_8\text{O}$, ${}^{40}_{20}\text{Ca}$).

Elemente mit magischen Protonenzahlen weisen, verglichen mit den Nachbarelementen, eine auffallend große Anzahl von stabilen Isotopen auf (z.B. Sn mit 10 stabilen Isotopen).

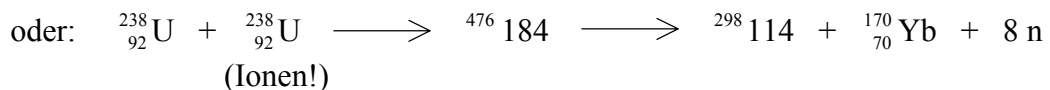
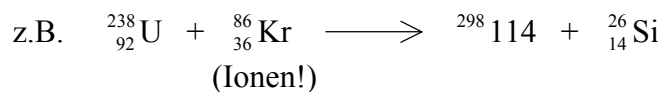
Nuclide mit magischen Nucleonenzahlen zeichnen sich auch durch eine besonders große Häufigkeit innerhalb des betreffenden natürlich vorkommenden Isotopengemisches aus.

Radionuclide mit magischen Nucleonenzahlen weisen im Allgemeinen relativ lange Halbwertszeiten auf, während die im PSE hierauf folgenden Kerne durch besonders kurze Halbwertszeiten gekennzeichnet sind.

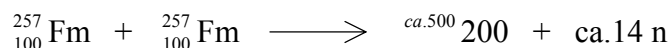
Die magischen Zahlen werden durch abgeschlossene Protonen- bzw. Neutronenschalen erklärt.

[Nur die magischen Kerne sind kugelförmig; die anderen Kerne sind mehr oder weniger stark deformiert, d.h. sie nehmen im Grundzustand eine zigarrenförmige oder diskusförmige Gestalt an.]

Der nächste doppeltmagische Atomkern im PSE wäre das Nuclid ${}^{298}_{114}$ („Eka-Blei“). Die Halbwertszeit dürfte zwischen 100 Jahren und 100 Millionen Jahren liegen. In der Natur konnte Eka-Blei bisher nicht nachgewiesen werden. Es laufen Versuche, Eka-Blei unter Verwendung von Schwerionenbeschleunigern aufzubauen (z.B. Beschuss von ${}^{238}\text{U}$ mit schweren Ionen):



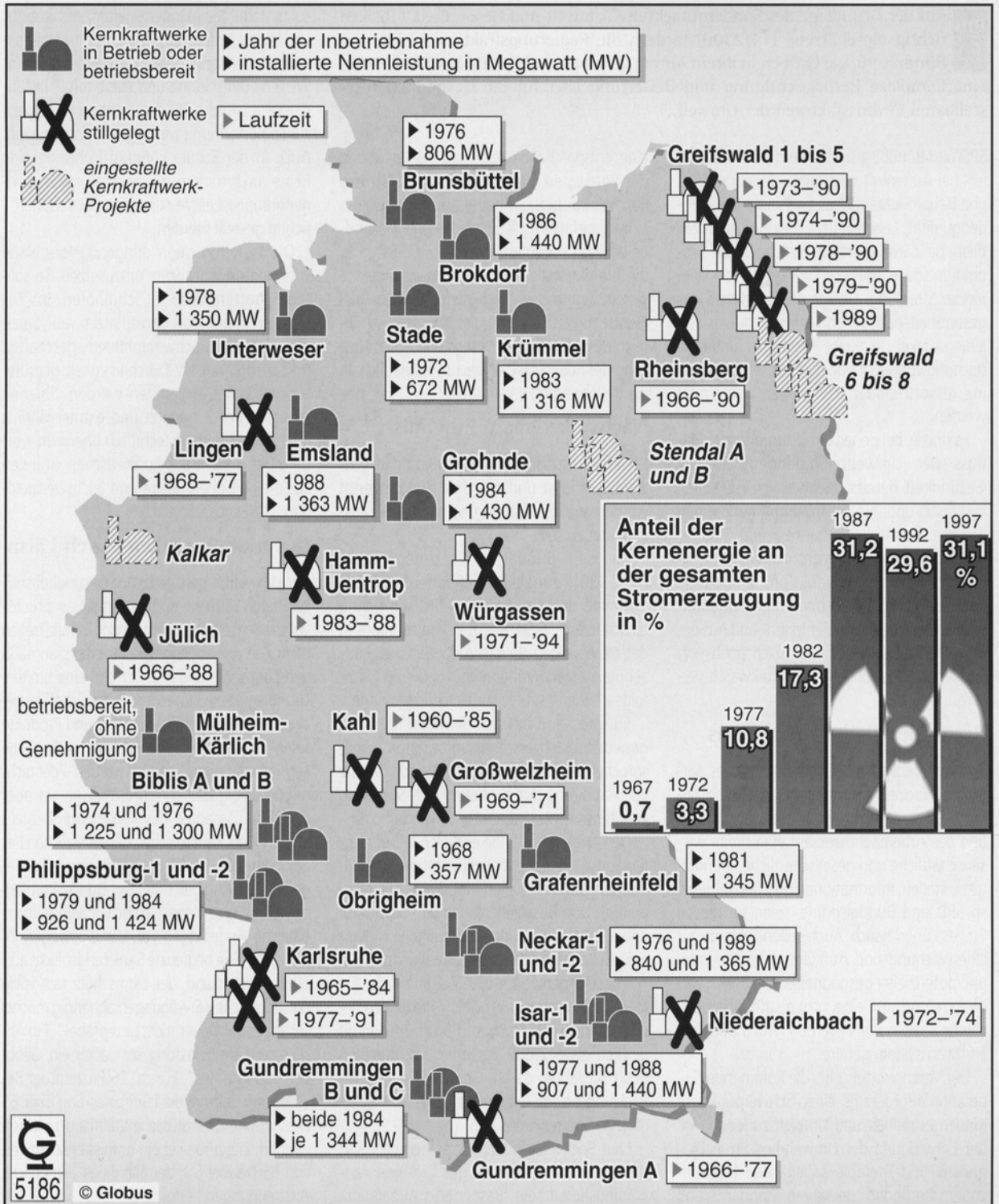
Die Grenze der Darstellungsmöglichkeiten superschwerer Nuclide dürfte beim Element 200 liegen:



(${}^{257}\text{Fm}$ ist das schwerste, in wägbaren Mengen erhältliche Nuclid: Halbwertszeit 100 Tage.)

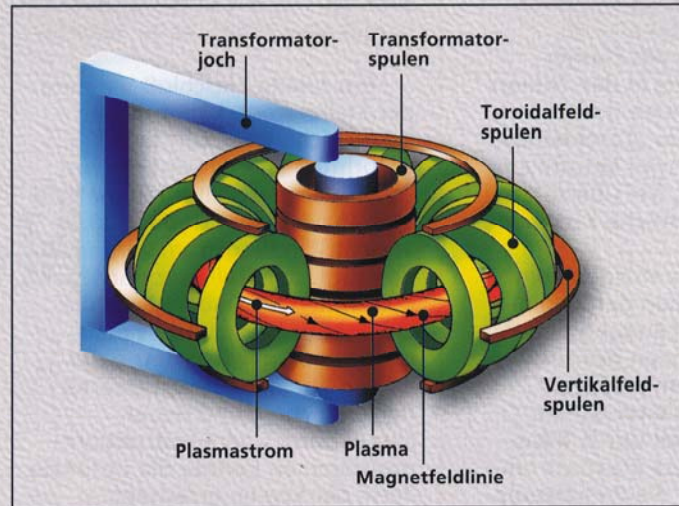
Anhang 3

Übersicht der Atomkraftwerke in Deutschland mit bisheriger Laufzeit

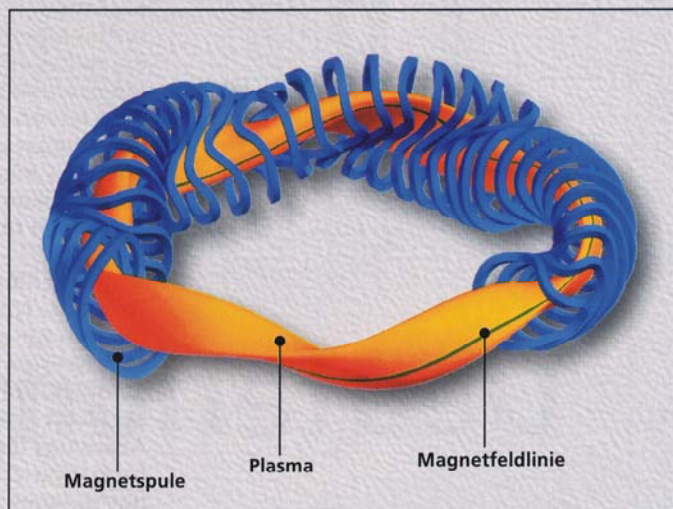


Anhang 4

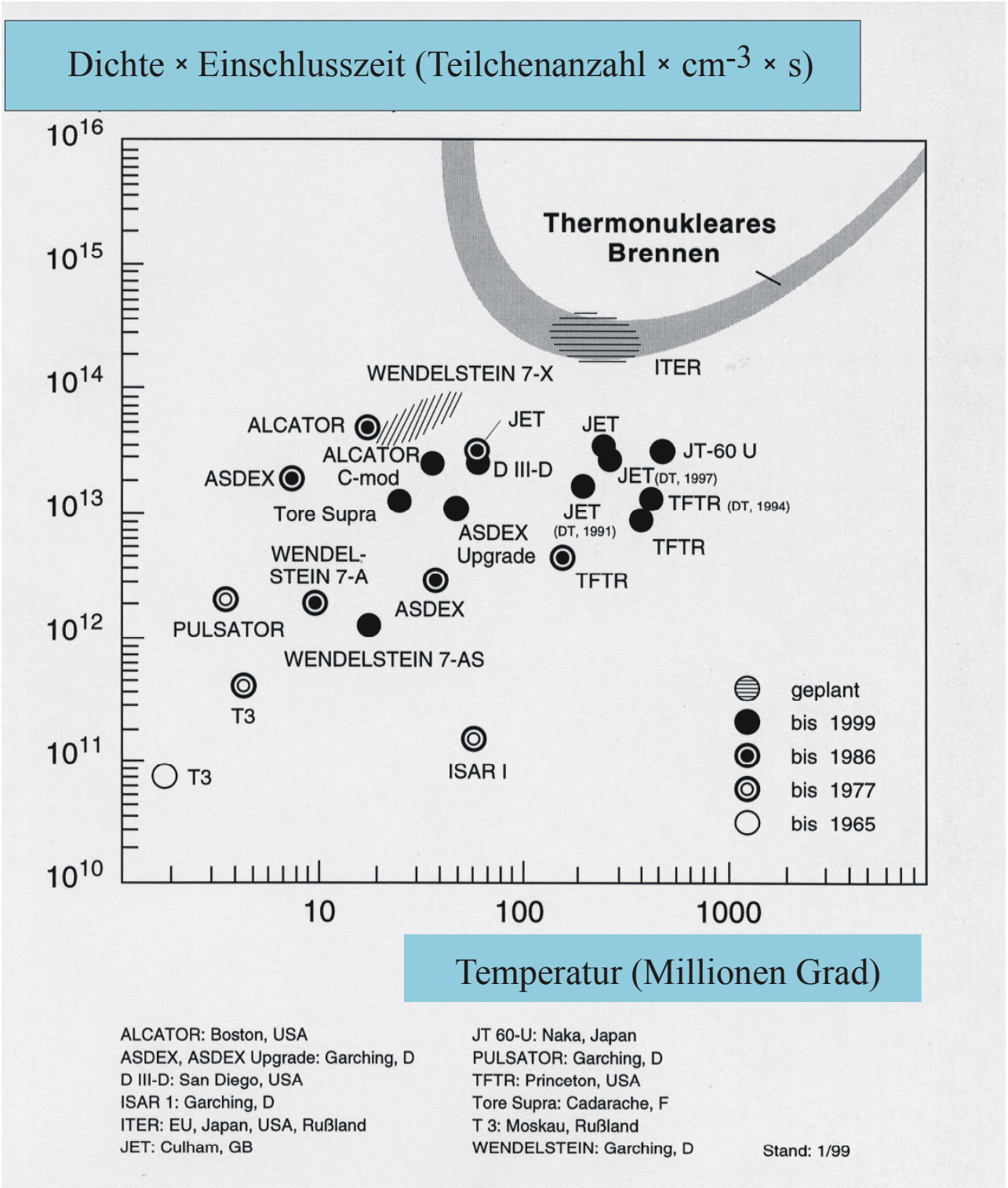
Tokamak



Stellarator



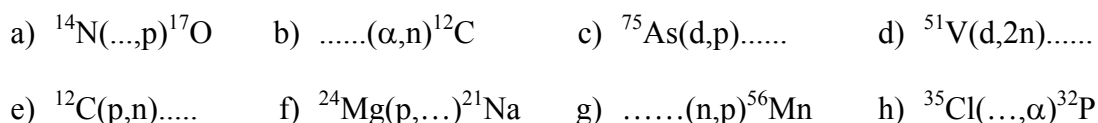
Anhang 5



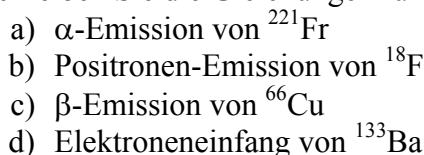
Übungsaufgaben

Vorbemerkung: Für die Elemente der Nebengruppen und Reihen kann die Protonenzahl im PSE nachgeschlagen werden.

- 1.) Schreiben Sie die kernchemische Gleichung für die Herstellung von ${}^{20}_{10}\text{Ne}$ aus ${}^{20}_8\text{O}$.
- 2.) Vervollständigen Sie die in Kurzform geschriebenen kernchemischen Gleichungen und schreiben Sie zusätzlich jede Gleichung in ausführlicher Schreibweise (d.h. unter Angabe aller Elementsymbole, Protonenzahlen und Nucleonenzahlen):



- 3.) Schreiben Sie die Gleichungen für folgende Beispiele des radioaktiven Zerfalls:

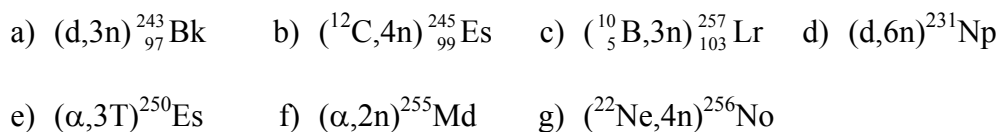


- 4.) Ausgehend von ${}^{154}_{68}\text{Er}$ sind die aufeinanderfolgenden Stufen einer künstlichen Zerfallskette:



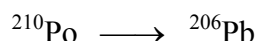
Welches sind die Tochterglieder dieser Kette?

- 5.) Im Folgenden sind Transuran-Nuclide angegeben und die Typen der Kernreaktionen aufgeführt, die für ihre Entstehung verwendet wurden. Geben Sie jeweils das Nuclid an, das als Ausgangsnuclid benutzt wurde:



- 6.)

- a) Vervollständigen Sie folgende Gleichung (einschließlich der Protonenzahlen):



- b) Welche Art radioaktiver Strahlen wird bei a) ausgesandt?
c) Nennen und charakterisieren Sie alle Strahlenarten, die beim natürlichen Atomzerfall auftreten können, und vergleichen Sie das Durchdringungsvermögen dieser Strahlen.

- 7.) Erläutern Sie am Beispiel des Nuclids ^{50}V , was man unter dem „K-Elektroneneinfang“ versteht.
- 8.) Nennen Sie 2 typische Eigenschaften, die Flussspat (CaF_2) aufweist, wenn seine Lagerstätte von einer stark radioaktiven Erzader durchzogen wird (nähere Erläuterung!).
- 9.) Welche Energie entspricht einem Massendefekt von 0,1 g?

Multiple-Choice-Aufgaben

- a) Was wird durch die „radiologische Aktivität“ angegeben?
 Anzahl der Kernumwandlungen
 Anzahl der Kernumwandlungen/Zeit
 Anzahl der Kernumwandlungen/Masse
- b) In Welcher Einheit misst man die Energiedosis?
 $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$
 $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$
 $\text{Sv}\cdot\text{a}^{-1}$
- c) In welcher Einheit misst man die Äquivalentdosis?
 Bq
 Sv
 J
- d) Die wesentliche Ursache für die zivilisatorisch bedingte Strahlenbelastung ist
 das Fernsehen;
 der Betrieb von Kernkraftwerken;
 die medizinische Strahlenanwendung.
- e) Die Eigenstrahlung des menschlichen Körpers wird vor allem hervorgerufen durch
 radioaktives Iod in der Schilddrüse;
 radioaktives Strontium in den Knochen;
 radioaktives Kalium in verschiedenen Geweben.
- f) Welche Neutronen eignen sich besonders zur Spaltung von ^{235}U ?
 schnelle Neutronen
 mittelschnelle Neutronen
 langsame Neutronen
- g) Welcher Stoff wird heute vorwiegend als Moderator in den Kernreaktoren verwendet?
 Blei
 Borcarbid
 Wasser
- h) Eine unkontrollierte Kettenreaktion im ^{235}U wird verhindert durch
 Abbremsen von Neutronen;
 Absorption von Neutronen;
 Kühlung des Reaktorkerns.
- i) In Brutreaktoren wird aus
 ^{238}U das Nuclid ^{235}U erbrütet;
 ^{238}U das Nuclid ^{239}Pu erbrütet;
 ^{238}U das Nuclid ^{233}U erbrütet.
- j) Der Kern des Hochtemperaturreaktors wird gekühlt mit
 Helium;
 schwerem Wasser;
 Graphit.

Lernziele zum Kursthema "Grundlagen der Kernchemie"

- 1 einen Einblick in die Geschichte der Entdeckung der Radioaktivität gewinnen
- 2 beschreiben können, wie die verschiedenen Arten radioaktiver Strahlung experimentell zu unterscheiden sind
- 3 für die α -, β - und γ -Strahlung die Natur der Strahlung (Heliumkerne, Elektronen, elektromagnetische Wellen) sowie Unterschiede des Durchdringungsvermögens angeben können
- 4 Beispiele für die physikalische, chemische und biologische Wirkung der radioaktiven Strahlung nennen können
- 5 in der Lage sein, die wichtigsten Gebote des Strahlenschutzes zu nennen und zu begründen
- 6 die Begriffe Aktivität, Energiedosis und Energiedosisleistung interpretieren können
- 7 den α - und β -Zerfall erklären können und die Verschiebungsgesetze von Fajans auswendig wissen
- 8 kernchemische Gleichungen formulieren können
- 9 den Begriff Halbwertszeit definieren können
- 10 den Begriff Zerfallsreihe kennen und eine gegebene Zerfallsreihe interpretieren können
- 11 Rutherfords Experiment zur künstlichen Kernumwandlung kennen und das Ergebnis interpretieren sowie in der kernchemischen Schreibweise formulieren können
- 12 einen Überblick gewinnen über die Möglichkeiten von Kernumwandlungen unter Verwendung verschiedenartiger „Geschosse“ (nicht verbindlich)
- 13 einen Einblick in die praktische Durchführung der Kernumwandlungen gewinnen (nicht verbindlich)
- 14 den Unterschied zwischen einer Austauschreaktion und einer Einfangreaktion angeben und für derartige Reaktionen die kernchemischen Gleichungen formulieren können (auch in der abgekürzten Schreibweise)
- 15 Beispiele für die Anwendung von Radioisotopen in Chemie, Biologie, Biochemie, Medizin und Technik nennen können
- 16 die wissenschaftlichen Grundlagen und die Bedeutung der Radiocarbonmethode angeben können
- 17 eine Erklärung für die künstliche Radioaktivität bei Neutronenüberschuss und bei Protonenüberschuss geben können
- 18 das Experiment von Hahn und Straßmann zur Kernspaltung beschreiben und das Ergebnis in einer kernchemischen Gleichung formulieren können
- 19 das Masse-Energie-Gesetz von Einstein angeben und für Berechnungen anwenden können
- 20 das Prinzip der ungesteuerten Kettenreaktion in der Atombombe angeben können
- 21 das Prinzip der gesteuerten Kettenreaktion im Kernreaktor beschreiben können
- 22 die Funktionen des Moderators und des Kühlmittels angeben und Beispiele für Moderatoren und Kühlmittel nennen können
- 23 die technischen Besonderheiten der wichtigsten Reaktortypen angeben können
- 24 einen Überblick gewinnen über die Aufbereitung des Uranerzes und seine Verarbeitung zu Uran als Beispiel für einen technologischen Prozess (nicht verbindlich)
- 25 das Prinzip einiger technischer Verfahren zur ^{235}U -Anreicherung beschreiben können
- 26 das Prinzip der Wasserstoffbombe beschreiben können
- 27 einen Einblick gewinnen in die Forschungsarbeiten zur gesteuerten Kernfusion und in die Bedeutung dieser Forschungen für die Zukunft der Menschheit
- 28 die Stichhaltigkeit von Argumenten für und gegen die technische Anwendung der Kernenergie sachlich beurteilen können