

Radioaktivität

Die Bausteine des Kernes (n^0 und p^+) halten mittels der sehr starken aber nur über eine sehr kurze Distanz wirkenden Kernkräfte zusammen. Sie verhindern ein Auseinanderbrechen der Kerne als Folge der grossen abstoßenden Kräfte. Gelingt es dennoch einen Atomkern durch Beschuß mit Teilchen zum Zerplatzen zu bringen, fliegen die Bruchstücke wegen den abstossenden elektrostatischen Kräften mit hoher Energie auseinander. Diese Energie wird im KKW genutzt. Neutronen üben keine elektrostatischen, wohl aber Kernkräfte aus. Ein Kern braucht immer eine gewisse Anzahl Neutronen, damit die Protonen nicht zu konzentriert, die abstossenden Kräfte nicht zu gross sind. Zu viele Neutronen machen aber den Kern übergewichtig. Es existieren für alle Elemente optimale p^+/n^0 Verhältnisse. Stimmt das Verhältnis nicht, dann ist der Kern instabil. Er versucht durch Abstrahlen oder Umwandeln von Teilchen Stabilität zu erlangen. Man nennt dieses Verhalten der Kerne

radioaktiv: = strahlungsaktiv; Teilchen oder Energie abstrahlend.

Der meist vorhandene Energieüberschuss wird in Form von energiereicher röntgenähnlicher Strahlung abgegeben. Man nennt diese Strahlung

γ -Strahlung: *Eine dem Licht verwandte energiereiche Strahlung, die bei vielen Kernprozessen auftritt.*

Die wichtigsten Kernprozesse sind die folgenden:

β^- -Zerfall: Kerne, welche zu viele n^0 im Verhältnis zu den p^+ haben, wandeln ein n^0 um in ein p^+ und ein e^- . Das Proton verbleibt im Kern, das e^- wird mit hoher Geschwindigkeit weggeschleudert.
Folge: Die Ordnungszahl nimmt um 1 zu, die Massenzahl bleibt dieselbe. Weil Radioaktivität unabhängig von der Art des Stoffes ist, wird das weggeschleuderte Elektron nicht in Betracht gezogen.
Es tritt eine e^- -Strahlung auf.

β^+ -Zerfall: Kerne, welche zu viele p^+ im Verhältnis zu den n^0 haben, wandeln ein p^+ in ein n^0 um und senden ein positives Elektron, genannt Positron aus. Das Positron ist ein Teilchen der Antimaterie und verstrahlt in Kontakt mit einem Elektron zu einem Lichtblitz.
Folge: Die Ordnungszahl nimmt um 1 ab, die Massenzahl bleibt dieselbe.
Es tritt eine e^+ -Strahlung auf.

α -Zerfall: Der Kern schleudert ein α -Teilchen bestehend aus 2 p^+ und 2 n^0 , eigentlich ein He-Kern, weg.
Folge: Massenzahl nimmt um 4, die Ordnungszahl um 2 ab.
Es tritt eine α -Strahlung auf.

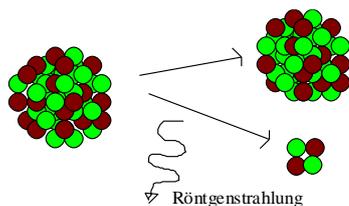
Die Häufigkeit mit der Kernzerfälle statistisch auftreten wird angegeben mit der

Halbwertszeit: *Die Zeit, in der die Hälfte der Kerne einer Probe zerfällt.*

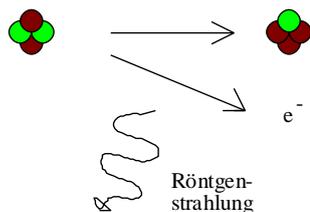
Zerfallsarten

● = Neutron

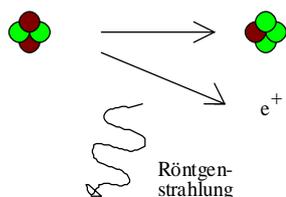
● = Proton

Alpha-Zerfall

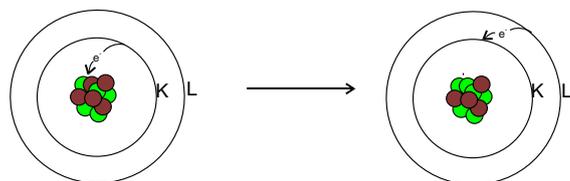
Der schwere Atomkern schleudert ein Alpha-Teilchen (He-Kern, $2n^0$ und $2p^+$) weg.
 Strahlung: - Alphateilchen (Reichweite 2.5-9 cm an der Luft)
 - Gammastrahlung (energiereiches "Licht")

Beta-minus-Zerfall

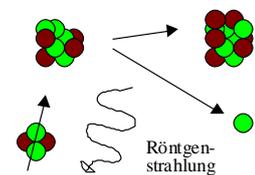
Ein Neutron wird in ein Proton umgewandelt, wobei ein Elektron frei wird.
 Strahlung: - Elektron (Reichweite 150 - 850 cm)
 - Gammastrahlung (Reichweite abhängig von Materialdichte)

Beta-plus-Zerfall

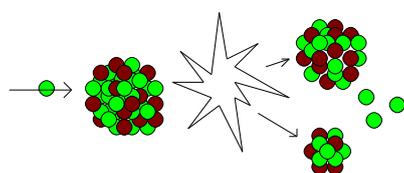
Ein Proton wird in ein Neutron umgewandelt, wobei ein Positron (ein Teilchen der Antimaterie) freiwird.
 Strahlung: - Positron (Reichweite ähnlich Elektron, sofern es kein Elektron trifft)
 - Gammastrahlung

K-Einfang

Ein Elektron der K-Schale wird eingefangen und mit einem Proton zusammen in ein Neutron umgewandelt.
 Strahlung: nur energiereiches Neutrino

Künstlicher Kernzerfall durch Beschuss mit α -Teilchen

Ein Neutron wird vom Kern weggeschleudert, nach Treffer von α -Teilchen, z.B. von Rn gemischt mit Be.
 Strahlung: - Neutronen (durchdringen praktisch ungehindert viele Materialien)

Künstlicher Kernzerfall durch Beschuss mit Neutronen

Ein Kern wird mit einem Neutron beschossen, er zerfällt darauf in zwei ungleiche Bruchstücke undefinierter Grösse und setzt drei Neutronen frei: (Im Fall von ^{235}U)

Kernspaltung

AKW (Spaltreaktor)

$^{235}\text{U} + \text{n}^0$ (langsames n^0 , 2.2 km/s) \implies ^{236}U \implies z.B. $^{90}\text{Sr} + ^{143}\text{Xe} + 3 \text{n}^0$ (70km/s) aber auch Ba (s. Experimente von Otto Hahn)

Von den drei entstehenden Neutronen muss eines abgebremst werden mit einem Moderator material (Graphit, schweres Wasser), zwei müssen durch Regel- oder Kontrollstäbe (Borstahl, Cadmium) absorbiert werden oder sonstwie entweichen.

Trotzdem läuft die folgende Nebenreaktion ab:

$^{238}\text{U} + \text{n}^0$ (schnell, 70km/s) \implies ^{239}U \implies ^{239}Np \implies ^{239}Pu \implies Halbwertszeit 24400a

Reaktionsbedingungen: Natururan angereichert mit ^{235}U damit Nebenreaktion mit ^{238}U nicht zu viele Neutronen absorbiert und damit die Kettenreaktion verunmöglicht. Kann vom Prinzip her nicht explodieren, weil die Uranbrennstäbe eine genügend grosse Oberfläche haben, so dass viele Neutronen entweichen und nicht für die Kettenreaktion zur Verfügung stehen.

AKW (Schneller Brüter)

$^{238}\text{U} + \text{n}^0$ (schnell, 70km/s) \implies ^{239}U \implies ^{239}Np \implies ^{239}Pu
 $^{239}\text{Pu} + \text{n}^0 \implies$ Zerfall, s. Uranspaltung

Reaktionsbedingungen: Natururan kann als Brennstoff verwendet werden. In einem Brutprozess wird daraus spaltbares ^{239}Pu erzeugt.

Die Giftigkeit von Pu verbunden mit erheblichen Regel- und Kühlproblemen (flüssiges Natriummetall) machen diesen Reaktor gefährlich.

Atombomben

$^{235}\text{U} + \text{n}^0 \implies$ ^{236}U \implies z.B. $^{90}\text{Sr} + ^{143}\text{Xe} + 3 \text{n}^0$

Reaktionsbedingungen: Kein ^{238}U (es werden sonst zu viele Neutronen absorbiert). Die Herstellung des seltenen ^{235}U bereitet vielen Ländern zum Glück grösste Schwierigkeiten und verunmöglicht zum Teil den Bau der Bombe.

Es braucht mehr als 50 kg spaltbares Material je Bombe, sonst gehen zu viele Neutronen durch Oberfläche verloren.

$^{239}\text{Pu} + \text{n}^0 \implies$ versch. Bruchstücke.

Reaktionsbedingungen: 10-30 kg Pu reichen. ^{239}Pu kann entweder in Brutreaktoren oder durch Aufarbeitung der Abfälle konventioneller Reaktionen leichter gewonnen werden als ^{235}U . Ein Grund für viele Länder in die Atomenergie einzusteigen.

Verschiedene Einheiten zur Messung der Radioaktivität:

Becquerel [Bq]:	1 Bq = 1 radioaktiver Zerfall pro Sekunde
Curie [Ci]:	1 Ci = Anzahl der Zerfälle, die pro Sekunde in 1 g Radium stattfinden = $3.7 \cdot 10^{10}$ /s. Veraltete Einheit, begründet durch Mme Curie.
Röntgen [r]:	Strahlendosiseinheit, die angibt wieviele Teilchen in 1 cm^3 Luft durch eine Strahlenquelle ionisiert (aufgeladen) werden. Alle Dosiseinheiten, sagen nichts über die Aktivität der Strahlenquellen aus, weil sie abhängig sind von der Entfernung von der Strahlenquelle. (Was kommt an, und nicht was wurde ausgesendet).
Röntgen Equivalent Man [rem]:	Dosiseinheit, die noch die Art der Strahlung berücksichtigt und damit ihr biologisches Schadenpotential beim Menschen.
Sievert [Sv]:	Heute gebräuchlich anstelle von rem. 1 Sv = 100 rem. Bedeutet physikalisch: Strahlenenergie in Joule, die von 1 kg eines bestrahlten Körpers aufgenommen wurde.

Strahlenbelastungen:

Natürliche Strahlung aus Kosmos und Erde:	1 mSv (milli-Sievert) / Jahr
Kernkraftwerk in der Nähe:	0.01 mSv/Jahr
6 Std. Farbfernsehen täglich:	0.04 mSv/Jahr
1 Röntgenuntersuchung	1 mSv

Strahlenwirkung:

250 mSv:	Grenzdosis, bis zu der im allgemeinen keine erkennbaren klinischen Schäden auftreten.
1 Sv:	Erbrechen, Müdigkeit
2 Sv:	Schädigung aller Blutzellen, verminderte Vitalität
4 Sv:	50% Mortalität innerhalb von 30 Tagen
6 Sv:	100% Mortalität

Fakten zur Kernspaltung

"Erfinder": Otto Hahn und Fritz Strassmann (1938)

AKW

Brennstoff: Angereichertes Uranoxid (UO₂) enthaltend ca 97.5% ²³⁸U und 2.5% ²³⁵U.
(Natururan: 0.7% ²³⁵U)

Kernreaktion: $^{235}\text{U} + \text{n}^0 \rightarrow 3 \text{n}^0 + 2 \text{ ungleiche Bruchstücke}$

Energie: 500 000 kWh pro kg Brennstoff
(= ca. 50 Tonnen Steinkohle)

Abfälle: Ausgebrannte Brennstäbe enthalten alle möglichen Bruchstücke der Spaltung, die weiterzerfallen unter Aussendung von radioaktiver Strahlung. Es sind 37 verschiedene Elemente bekannt in Form von fast 300 Isotopen. Die ebenfalls auftretende Reaktion
 $^{238}\text{U} + \text{n}^0 \rightarrow ^{239}\text{Pu}$ erzeugt Plutonium:
Bis die Hälfte des Plutoniums zerfallen ist dauert es 24 400 Jahre!

Biologische Wirkung: Radioaktive Strahlen bestehen entweder aus Teilchen (Neutronen, Elektronen, Heliumkerne) oder aus Energie (Röntgenstrahlen). Die Teilchen können durch Stöße mit Zellbestandteilen die Zellstrukturen zerstören, die hochenergetischen Strahlen durch verbrennungsähnliche Vorgänge. Im besten Fall stirbt die Zelle ab wie bei Verbrennungen. Im schlimmsten Fall treten Änderungen in den Genen auf. Das kann sich in Erbkrankheiten aber auch in Krebs äussern. Wenn die Zellen der Immunabwehr betroffen werden tritt Immunschwäche auf (Strahlen-Aids).

Funktionsweise eines Atomreaktors (aus Wikipedia)

Thermische Neutronen und der Moderator

Der Neutronenabsorptionsquerschnitt beispielsweise des Isotops ^{235}U nimmt mit abnehmender Energie und damit gleichbedeutend mit abnehmender Geschwindigkeit des Neutrons zu, das heißt, je langsamer das Neutron ist, desto wahrscheinlicher ist es, dass es von einem U^{235} -Kern eingefangen wird. Daher bremst man in einem Kernreaktor die schnellen Neutronen aus der Kernspaltung durch den Einsatz eines Moderators ab. Ein Moderator ist ein Material wie etwa Graphit, schweres oder normales Wasser, welches viele Atomkerne enthält, die nicht sehr viel schwerer als ein Neutron sind, und das einen sehr niedrigen Absorptionsquerschnitt für Neutronen hat. Die erste Eigenschaft führt dazu, dass die Neutronen durch Stöße mit diesen Atomkernen abgebremst werden. Die zweite Eigenschaft hat zur Folge, dass die Neutronen der Kettenreaktion weiter zur Verfügung stehen. Durch die Stöße mit den Atomkernen des Moderators können die Neutronen maximal auf die Geschwindigkeiten der Kerne des Moderators abgebremst werden. Die Geschwindigkeit der Moderatorkerne ist nach der Theorie der Brownschen Bewegung durch die Temperatur des Moderators definiert. Es findet also eine Thermalisierung statt. Man spricht daher nicht von abgebremsten, sondern von thermischen Neutronen, d. h., die Neutronen besitzen anschließend eine ähnliche Geschwindigkeitsverteilung wie die Moleküle des Moderators. Ein Reaktor, der zur Kernspaltung thermische Neutronen verwendet, wird dementsprechend als "Thermischer Reaktor" bezeichnet. Im Gegensatz dazu nutzt ein "schneller" Reaktor die nicht abgebremsten, schnellen Neutronen zur Spaltung (daher auch die Bezeichnung "Schneller Brüter").

Steuerung der Kettenreaktion

Damit die Kettenreaktion nicht unkontrolliert abläuft, muss sie gesteuert werden. Hierfür benutzt man Stoffe mit einem hohen Absorptionsquerschnitt für Neutronen. Beispiele für diese Stoffe sind Cadmium, Gadolinium und Bor. Aus chemischen Verbindungen dieser Materialien werden beispielsweise die Steuerstäbe eines Kernreaktors gefertigt. Durch Zugabe oder Entzug dieser Stoffe in oder aus dem Reaktorkern (beispielsweise durch das Herausziehen oder Hineinfahren der Steuerstäbe) kann der Reaktor geregelt werden.

Zur leichteren Beschreibung der Vorgänge beim Regeln eines Kernreaktors sei nun der Multiplikationsfaktor k eingeführt. Er beschreibt das Verhältnis der Neutronenzahlen zweier aufeinander folgender Neutronengenerationen:

$k = \text{Anzahl der Neutronen einer Generation} / \text{Anzahl der Neutronen der vorausgegangenen Generation}$
Im stationären Betrieb ist der Multiplikationsfaktor $k = 1$, d. h. jede Neutronengeneration weist genau so viele Neutronen auf wie die ihr vorausgegangene. Das wird dadurch erreicht, dass sich gerade so viel Neutronen absorbierendes Material im Kern befindet, wie nötig ist, damit im Durchschnitt nur eines der pro Kernspaltung freiwerdenden Neutronen für eine weitere Kernspaltung zur Verfügung steht. Alle übrigen Neutronen werden beispielsweise durch Bor oder Cadmium absorbiert oder gehen der Kettenreaktion auf anderen Wegen verloren (Leckrate). In diesem Fall liegt eine stationäre Kettenreaktion vor. Die Zahl der Kernspaltungen pro Zeit bleibt konstant und es wird eine konstante Leistung in Form von Wärme abgegeben. Einen Reaktor in diesem Zustand bezeichnet man als kritisch.

Will man die Leistung des Reaktors reduzieren, verkleinert man zeitweilig seine Reaktivität durch Zufuhr Neutronen absorbierender Stoffe (beispielsweise durch das Einfahren der Steuerstäbe). Dadurch werden mehr Neutronen absorbiert, als zur Aufrechterhaltung des stationären Betriebs nötig wären. Es stehen nun mit jeder Neutronengeneration weniger Neutronen für weitere Spaltungen zur Verfügung, als bei der vorhergehenden. Für den Multiplikationsfaktor gilt $k < 1$ und eine stationäre Kettenreaktion lässt sich nicht aufrechterhalten. Einen Reaktor in diesem Zustand bezeichnet man als unterkritisch. Die Wärmeleistung in

einem unterkritischen Reaktor sinkt, jedoch nur so lange, bis sich erneut ein Gleichgewicht eingestellt hat, denn eine bestimmte, zusätzliche Menge an Neutronen absorbierendem Material kann auch nur eine bestimmte Menge an Neutronen zusätzlich weg fangen. Daher stellt sich durch Zufuhr von beispielsweise einer bestimmten Menge an Bor erneut ein stationärer Betrieb ein, allerdings bei einer reduzierten Leistung. Durch die Zufuhr von genügenden Mengen an Neutronen absorbierendem Material lässt sich die Leistung des Reaktors auf Null reduzieren und der Reaktor damit abschalten.

Um die Leistung eines Kernreaktors zu erhöhen, entzieht man dem Reaktorkern Neutronen absorbierendes Material (beispielsweise durch das Herausfahren der Steuerstäbe). Dadurch steht mehr als ein Neutron pro Kernspaltung für weitere Spaltungen zur Verfügung, die Anzahl der Spaltungen pro Generation nimmt zu und die Leistung des Reaktors ebenso. Für den Multiplikationsfaktor gilt $k > 1$. Einen Reaktor mit zunehmender Zahl an Kernspaltungen nennt man überkritisch.

Genauer zur Leistungssteuerung und -regelung s. unter Kritikalität.

Ein prompt überkritischer Reaktor ist nicht mehr regelbar und es kann zu schweren Unfällen kommen, denn der Neutronenfluss und damit die abgegebene Wärmeleistung des Reaktors steigen exponentiell im Bereich von 10-14 Sekunden an. Bei wassermodierten Reaktoren kommt es dabei zur Verdampfung des Moderators, welcher aber notwendig ist, um die Kettenreaktion aufrecht zu erhalten. Dadurch kehrt der Reaktor, sofern nur das Wasser verdampft, aber die räumliche Anordnung des Brennstoffs noch erhalten ist, in den unterkritischen Bereich zurück.

Dieses Verhalten gilt nicht für beispielsweise Graphit-modierte Reaktortypen, denn speziell Graphit verliert bei zunehmender Temperatur seine moderierenden Eigenschaften nicht. Gerät ein solcher Reaktor in den prompt überkritischen Bereich, so kommt die Kettenreaktion nicht zum Erliegen und binnen Sekundenbruchteilen führt dies zur Überhitzung und Zerstörung des Reaktors. Schlagartig verdampfende Flüssigkeiten und Metalle können dabei zu weiträumiger Verteilung des radioaktiven Inventars führen, wie in der Reaktorkatastrophe von Tschernobyl geschehen.

Die automatische Unterbrechung der Kettenreaktion bei wassermodierten Reaktoren ist, anders als gelegentlich behauptet, kein Garant dafür, dass es nicht zu einer Kernschmelze kommt, da die Nachzerfallswärme bei Versagen aktiver Kühlsysteme ausreicht, um diese herbeizuführen. Aus diesem Grunde sind die Kühlsysteme redundant und diversitär ausgelegt. Eine Kernschmelze wird als Auslegungstörfall bei der Planung von Kernkraftwerken berücksichtigt und ist prinzipiell beherrschbar. Wegen der veränderten geometrischen Anordnung ist erneute Kritikalität allerdings nicht grundsätzlich auszuschließen.

Als inhärent sicher gelten daher beim derzeitigen Stand der Technik nur bestimmte Hochtemperaturreaktoren geringerer Leistung, die eine Kernschmelze prinzipbedingt ausschließen.

Nachwärme

Wird der Reaktor abgeschaltet, so wird durch den radioaktiven Zerfall der Spaltprodukte weiterhin Wärme produziert. Die Leistung dieser so genannten Nachzerfallswärme entspricht anfänglich etwa 5 % der thermischen Leistung des Reaktors im Normalbetrieb und klingt in einem Zeitraum von einigen Tagen ab. Häufig wird dafür auch der Begriff "Restwärme" verwendet, welcher aber irreführend ist, weil es sich nicht um die verbleibende aktuelle Hitze des Reaktorkerns handelt, sondern um zusätzliche Energie, die durch weiterlaufende Zerfallsreaktionen frei wird.

Um die Nachzerfallswärme auch in Notfällen sicher abführen zu können, besitzen alle Kernkraftwerke ein aufwändiges Not- und Nachkühlssystem. Sollte jedoch der unwahrscheinliche Fall eintreten und auch diese Systeme versagen, kann es auch in diesem Fall durch die steigenden Temperaturen zu einer Kernschmelze kommen, bei der die Strukturen des Reaktorkerns und insbesondere der Kernbrennstoff schmelzen.

Wenn mehrere Kernbrennstäbe miteinander verschmelzen nimmt die Kettenreaktion wieder zu und es kommt zu einer enormen unkontrollierten Aufheizung. Um diesen Prozess zu verhindern oder wenigstens zu verzögern, werden in einigen Reaktoren die im Reaktorkern verarbeiteten Materialien so gewählt, dass ihr Neutronen-Absorptionsvermögen mit steigender Temperatur anwächst, die Reaktivität also bei hohen Temperaturen abnimmt. Aber auch ohne diese Rekritikalität wird der Fall der Kernschmelze als größter anzunehmender Unfall, kurz als GAU bezeichnet. Hält das Reaktorgebäude nicht stand oder tritt eine größere Menge radioaktiver Stoffe aus, wird von Super-Gau gesprochen. Bei einem Super-GAU muss damit gerechnet werden, dass grenzwertüberschreitende Mengen radioaktiver Stoffe in die Umwelt entweichen.

Siehe auch: Kernspaltung

Reaktortypen

Die ersten Versuchsreaktoren waren simple Aufschichtungen von spaltbarem Material, siehe Chicago Pile. Moderne Reaktoren werden nach der Art der Kühlung, der Moderation und der Bauweise unterteilt.

Mit normalem, leichtem Wasser moderierte Reaktionen finden im Leichtwasserreaktor statt, der als Siedewasserreaktor oder Druckwasserreaktor ausgelegt sein kann. Eine Weiterentwicklung des Druckwasserreaktors ist der European Pressurized Water Reactor (EPR). Eine russische Variante ist der WWER-Reaktor. Leichtwasserreaktoren benötigen angereichertes Uran, Plutonium oder Mischoxide (MOX) als Brennstoff. Ein Leichtwasserreaktor war auch der Naturreaktor Oklo.

Mit schwerem Wasser moderierte Schwerwasserreaktoren erfordern eine große Menge des teuren schweren Wassers, können aber mit natürlichem, nicht angereichertem Uran betrieben werden. Der bekannteste Vertreter dieses Typs ist der in Kanada entwickelte Candu-Reaktor.

Die Geschichte der Kernspaltung

Zwei Prämissen:

1. Physik:

Atome gehen bei künstlichen Kernumwandlungen immer in benachbarte Elemente über, analog zum radioaktiven Zerfall.

2. Chemie

Neue Elemente sind chemisch verwandt mit bekannten Elementen der selben Gruppen im PSE

1919: Rutherford beschiesst Stickstoff mit Alpha-Teilchen und erhält ein Sauerstoffisotop und Wasserstoffkerne.

1930: James Chadwick, nach Vorarbeit von Bothe/Becker und Curie/Joliot, entdeckt die Neutronenstrahlung nach Beschuss von Be, Paraffin (Wasserstoff) und Stickstoff mit Alpha-Teilchen (aus Radon).

1934: Curie und Joliot beschossen B, Mg und Al mit Alphateilchen und entdecken, dass nach Beendigung der Bestrahlung die Radioaktivität nicht aufhört. Es wurden die ersten künstlichen radioaktiven Isotope hergestellt. → Nobelpreis.

1934: Fermi versucht mit Hilfe von Neutronen aus einer Ra-Be Quelle (${}^9\text{Be} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^{12}\text{C} + {}^1_0\text{n}$) auf U eine Kernreaktion einzuleiten. Neutronen sollten ideal sein zum Eindringen in Kern. Er nahm an, dass wie bei leichteren Kernen, das Neutron eingefangen wird und anschliessend eine Elementumwandlung mit begleitender Beta-Strahlung erfolgt. Es würden dabei Elemente mit Ordnungszahl > 92 entstehen, die sog. Transurane.

1934: Ida Noddack publiziert Zweifel an der These von Fermi. Es müssten zuerst alle Elemente mit Ordnungszahl < 92 ausgeschlossen werden, ausserdem sei auch ein Zerplatzen des Kernes möglich. Sie wird nicht ernst genommen, weil der Gedanke damals physikalisch keinen Sinn machte.

1934: Fermi entdeckt, dass die Reaktionsraten der Kernreaktionen stark ansteigen, wenn die Neutronenquelle mit Wasserstoff reichem Material (Paraffin) ummantelt wird und so die Neutronen verlangsamt werden. → Nobelpreis.

1937: Curie und Savitch finden nach Beschuss von Uran eine 3.5h (Halbwertszeit) Aktivität eines La-ähnlichen Elements, das sie für Ac hielten. Eine Fraktionierung mit Lanthan ergab jedoch eine Trennung von Ac, nicht aber von La. Sie halten es aber trotzdem für Ac, da sie experimentelle Fehler nicht ausschliessen konnten.

1938: Auch Hahn und Strassmann erhielten diese 3.5h Aktivität und dachten, es sei eine Mischung von Ac und Ra. Ra entstünde durch zwei Alpha-Zerfälle aus U. Ein anschliessender Beta-Zerfall würde Ac-produzieren. Ra war einfach nachzuweisen.

Die erste Radium-Barium-Fraktionierung wird am 25. November 1938 durchgeführt. Sie sei exemplarisch eingehender beschrieben:

11 g Ammoniumdiuranat waren 16 Stunden mit verlangsamt (thermischen) Neutronen bestrahlt worden, die Bestrahlung wird um 11:36 Uhr beendet. Die Probe wird dann in Salzsäure gelöst, und nach Zugabe von 1,5 g Bariumchlorid (als Trägersubstanz) wird das Barium mit starker Salzsäure ausgefällt; die durch die Bestrahlung gebildeten Radiumisotope werden hierbei mitgefällt. Der Niederschlag wird abfiltriert und so von der Uranlösung getrennt. Das Gemisch von Barium- und Radiumchlorid wird dann in heissem Wasser gelöst und so lange tropfenweise mit starker Salzsäure versetzt, bis die Lösung trüb wird. Durch Abkühlen der Lösung kristallisiert ein Teil des Bariumchlorids aus und wird abfiltriert; durch weiteres Abkühlen des Filtrats werden zwei weitere Kristallfraktionen gewonnen. Nach der Abtrennung der ersten Kristallfraktion kann dann bereits mit den Zählrohrmessungen begonnen werden. In der Zeit von 12:05 Uhr bis 13:22 Uhr wird dann die Zählrate jeweils gleicher Mengen der drei Fraktionen (350 mg BaCl_2) alternierend mit dem gleichen Zählrohr gemessen. Die Aktivität der Proben nimmt während dieser Zeitspanne kontinuierlich ab (für die erste Fraktion von 387 auf 132 Impulse/Minute), dies ist durch den radioaktiven Zerfall von RaII und RaIII bedingt. Eine sprunghafte Abnahme der Aktivität zwischen der ersten und zweiten oder der zweiten und dritten Kristallfraktion ist jedoch nicht zu erkennen. Eine Anreicherung der Radiumisotope in der Kopffraktion hat also nicht stattgefunden.

Aus verschiedenen Gründen mussten sie Barium von Radium trennen. Zum einen schirmte Ba die ohnehin schwache Strahlung ab, andererseits wollte sie sicher sein, dass es sich um Ra handelt. Sie waren erstaunt, dass die Trennung von Ba nicht klappte.

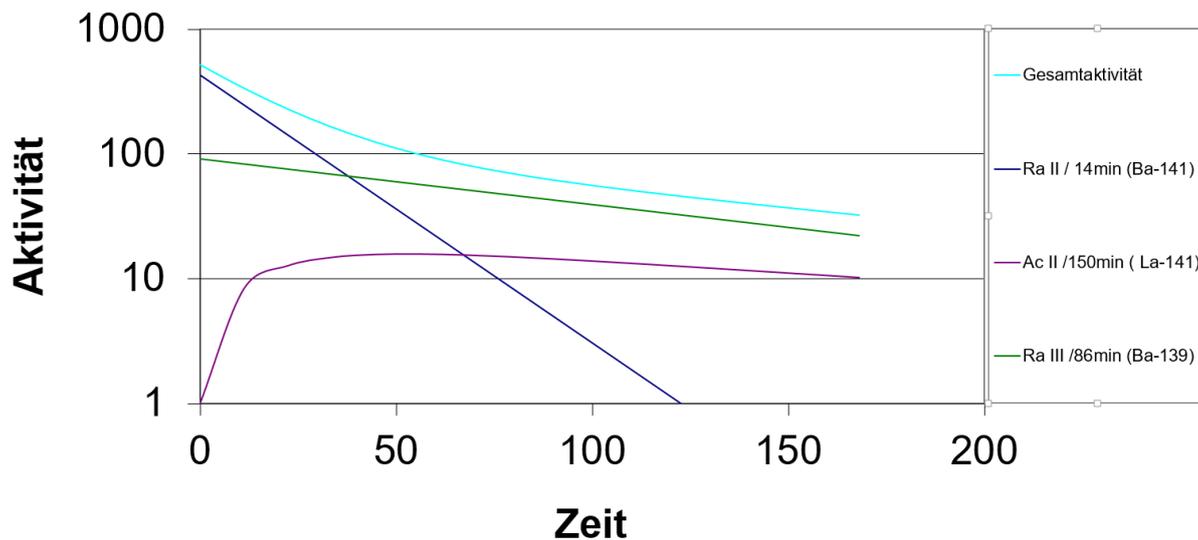


Fig. 1: Uran mit Neutronen bestrahlt. Extraktion mit verdünnter Salzsäure. Zugabe von Bariumchlorid und Fällung mit konz. Salzsäure. Die Halbwertszeiten entsprechen der Steigung (y-Achse als lg einbezogen, also 2 statt 100, da $100 = 10^2$.) Bsp. Die Steigung von RaII ist hier -0.022 (2.2 pro 100 min). Die Halbwertszeit ist gleich $\log(e) \cdot \ln(2) / 0.022 = \text{ca. } 14 \text{ min}$. Die ungefähre Halbwertszeit zu Beginn der Kurve der Gesamtaktivität wird so abgeschätzt, ebenso die Steigung am Ende der Gesamtaktivität. Wartet man nach der Bestrahlung etwa 1 h, hat man praktisch nur noch die Aktivität der zweiten Substanz. Jetzt kann deren Halbwertszeit schon genauer bestimmt werden. Durch Differenzbildung erhält man auch eine genauere Halbwertszeit der ersten Substanz usw. Wartet man mehr als eine Stunde wird auch praktisch kein AcII mehr nachgebildet aus RaII. Eine Umkristallisation liefert jetzt reines RaIII.

Ein Indikatorversuch sollte Klarheit bringen. In diesem Versuch wird mit BaBr_2 gefällt, weil dieses besser anreichert. Es wurde als Indikator Ra-228 eingesetzt. Eine Bromidfraktionierung funktionierte im Wesentlichen so:

Die Uranprobe ist diesmal 45 Stunden lang bestrahlt worden, die Mitfällung der Reaktionsprodukte erfolgt wiederum an Bariumchlorid (mit HCl als Fällungsmittel), die anschließende Fraktionierung jedoch an Bariumbromid (mit HBr als Fällungsmittel). Hierzu wird die Barium- und Radium-Ionen in Mischung aus Barium- und Radiumchlorid in Form ihrer Carbonate ausgefällt und die Fällung in Bromwasserstoffsäure HBr gelöst. Durch tropfenweise Zugabe weiterer HBr wird die Lösung fraktioniert kristallisiert. Vier Kristallfraktionen von Bariumbromid sind diesmal das Ergebnis. Mit dem Beginn der Messungen wartet man etwa eine Stunde, dann liegt nur noch RaIII vor.

Im Indikatorversuch wird noch BaBr_2 zugegeben, nachdem nach der obigen Methode die Ac-Folgeprodukte entfernt wurden.

Der Versuch zur Prüfung von RaIII wird am 17. Dezember 1938 durchgeführt. Nachdem eine Uranprobe über Nacht bestrahlt worden war, bleibt sie 2,5 Stunden stehen, um das kurzlebige RaI und RaII zerfallen zu lassen. Die Folgeprodukte AcI und AcII werden dann entfernt und als Indikator wird gereinigtes MsTh1 (Ra-228) zugegeben. Zur Mitfällung des RaIII und des MsTh1 werden 3 Gramm Bariumbromid zugesetzt.

Die Fraktionierung ergibt drei Fraktionen mit je 500 mg BaBr_2 . Um zu entscheiden, wie sich die beiden Radium-Isotope verhalten, muss die Aktivität der Fraktionen über mehrere Tage hinweg gemessen werden, da es hierzu ja drei Beiträge gibt:

RaIII, das mit einer HWZ von 86 Minuten zerfällt,

MsTh1 (Ra-228), dessen Aktivität während der Versuchsdauer konstant bleibt (HWZ: 6,7a),

MsTh2 (Ac-228), das bei der Fraktionierung in der Mutterlauge zurückbleibt, aber während der Messdauer aus MsTh1 nachgebildet wird (HWZ: 6,13h).

Erst anhand einer graphischen Auswertung kann dann das Ergebnis ermittelt werden. Die Kurven zeigen in den ersten Stunden einen steilen Aktivitätsabfall, der durch den Zerfall von RaIII verursacht ist. Dieser Abfall wird gebremst und schließlich in einen Aktivitätsanstieg umgemünzt durch das aus MsTh1 (Ra-228) nachgebildete MsTh2 (Ac-228), das nach ca. 60 Stunden seinen Endwert erreicht hat und dann im radioaktiven Gleichgewicht mit seiner langlebigen Muttersubstanz MsTh1 (Ra-228) ist. Dieser Endwert liegt für die drei Fraktionen bei $67,6 / 25 / 11$ Impulsen/Minute. Er besagt, dass das MsTh1 (Ra-228) in den Bariumbromidfraktionen 1 bis 3 in Konzentrationen vorhanden ist, die sich wie $6,1 : 2,3 : 1$ verhalten; das natürliche Radiumisotop hat sich also wie erwartet in der Kopffraktion stark angereichert.

Der Aktivitätsanteil des RaIII bei jeder der drei Fraktionen ergibt sich, wenn von der jeweils gemessenen Aktivität die Anteile abgezogen werden, die dem MsTh1 und dem nachgebildeten MsTh2 zuzuordnen sind. Trägt man diese bereinigten Messwerte in Abhängigkeit von der Zeit in ein Diagramm mit halblogarithmischem Maßstab ein, so liegen die Messpunkte für jede Fraktion auf einer Geraden, deren Neigung der HWZ des RaIII entspricht; extrapoliert man diese Geraden auf den Zeitpunkt Null, so ergeben sich für die drei Fraktionen Aktivitäten von 81, 72 und 81 Impulsen/Minute. Innerhalb der Fehlergrenzen der Messungen ($\pm 10\%$ angesichts der geringen Zählraten) ist die Konzentration des RaIII in den drei Bariumbromidfraktionen also konstant, eine Anreicherung hat nicht stattgefunden. RaIII verhält sich also auch bei diesem Versuch nicht wie der zugesetzte Radiumindikator MsTh1, sondern wie natürliches Barium.

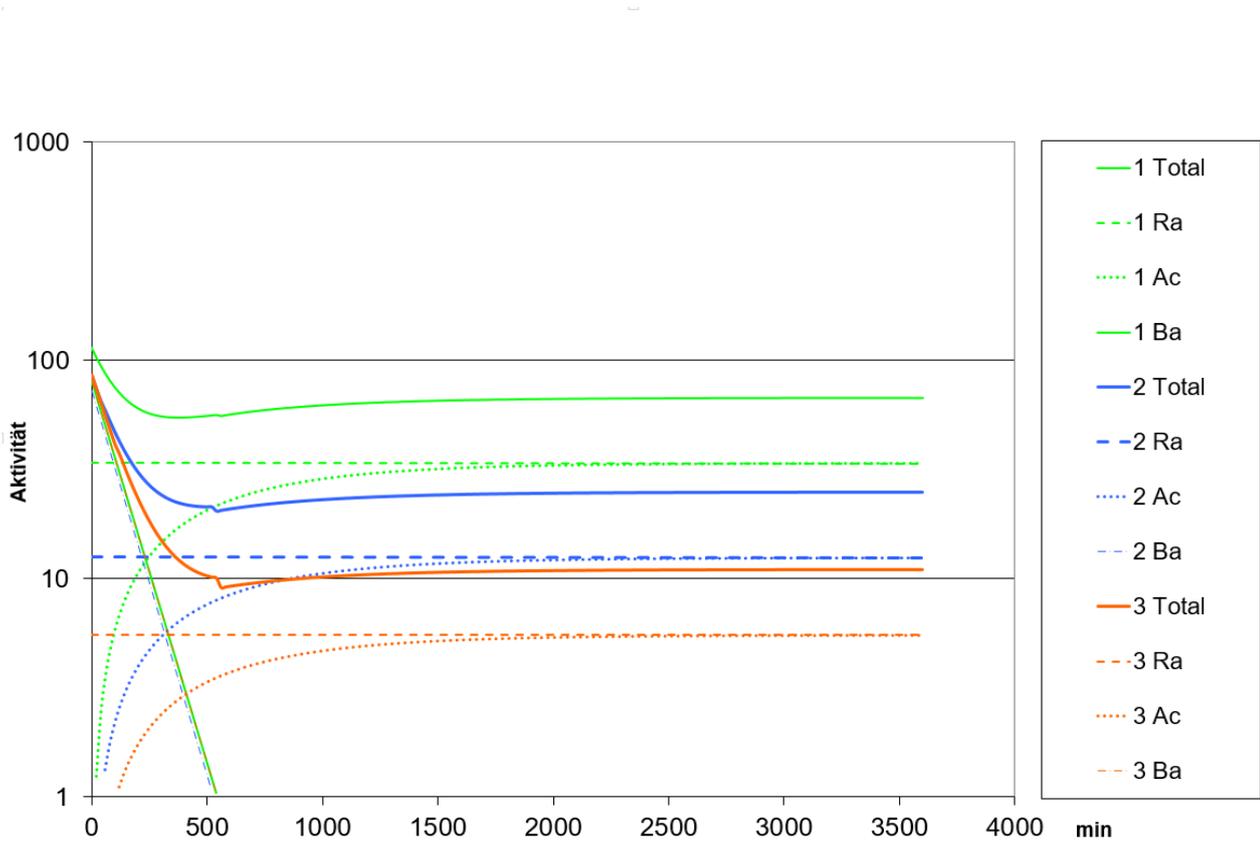
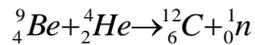


Fig. 2: Der Indikatorversuch mit Zugabe von Ra-228, dessen Aktivität wegen der langen Halbwertszeit während der Messdauer konstant bleibt. Allerdings wird daraus Ac-228 (Kurvenanstieg) nachgebildet. Sein Anteil an der Gesamtaktivität ist im Gleichgewicht ab etwa 2500 min die Hälfte der Gesamtaktivität und wird von dieser abgezogen. Die andere Hälfte ist das konstant strahlende Ra-228 und wird auch von der Gesamtaktivität abgezogen. Es bleiben die reinen Bariumanteile.

Die Versuche von Hahn und Strassmann grafisch:

Kernchemische Gleichung, z.B für Beschuss von

Beryllium-9 mit α -Teilchen (${}^4_2\text{He}$):



Kurzschreibweise: ${}^9_4\text{Be}({}^4_2\text{He}, \text{n}){}^{12}_6\text{C}$

→ in Klammer: (Geschoss, entstehendes Teilchen)

ϵ -Zerfall = Elektroneneinfang und mit $p^+ \rightarrow n^0$

10.2

A 1 Formulieren Sie die kernchemischen Gleichungen für den α -Zerfall von ${}^{212}_{83}\text{Bi}$, ${}^{224}_{88}\text{Ra}$, ${}^{232}_{90}\text{Th}$, ${}^{235}_{92}\text{U}$ und den β^- -Zerfall von ${}^{85}_{38}\text{Kr}$, ${}^{131}_{53}\text{I}$, ${}^{213}_{83}\text{Bi}$, ${}^{241}_{94}\text{Pu}$.

A 2 a) In jeder der in der Natur vorkommenden drei Zerfallsreihen tritt ein Isotop des Edelgases Radon auf. Welche Bedeutung hat diese Tatsache für die Verbreitung der natürlichen Radionuklide?

b) Formulieren Sie die kernchemischen Gleichungen für den α -Zerfall der Radionuklide ${}^{218}_{86}\text{Rn}$, ${}^{220}_{86}\text{Rn}$ und ${}^{222}_{86}\text{Rn}$.

A 4 a) Das Radionuklid ${}^{60}_{27}\text{Co}$ zeigt β^- -Zerfall mit einer Halbwertszeit von 5,27 a. Welcher Anteil des Radionuklids ist in einer reinen Probe nach einem Jahr noch vorhanden? b) Beim β^- -Zerfall von ${}^{231}_{90}\text{Th}$ sind nach 85 h noch 10 % der ursprünglich vorhandenen Atome ${}^{231}_{90}\text{Th}$ vorhanden. Wie groß ist die Halbwertszeit $T_{1/2}$ von ${}^{231}_{90}\text{Th}$?

10.4

A 1 a) Vervollständigen Sie die kernchemischen Gleichungen für die Bildung von Tritium (${}^3_1\text{H}$) in der Atmosphäre: $?(n, {}^{12}_6\text{C}){}^3_1\text{H}$ bzw. ${}^{16}_8\text{O}(n, ?){}^3_1\text{H}$.

b) Formulieren Sie die kernchemische Gleichung für den β^- -Zerfall von ${}^{14}_6\text{C}$.

10.7

2 Warum besitzt Blei, welches aus Thorium- oder Uranmineralien gewonnen worden ist, im Vergleich zu Blei aus anderen Vorkommen eine unterschiedliche Häufigkeitsverteilung der Isotope und damit eine andere durchschnittliche Atommasse?

3 Ausgehend vom Nuklid ${}^{229}\text{Pa}$ tritt nacheinander ϵ -, α - und β^- -Zerfall ein. Formulieren Sie die entsprechenden kernchemischen Gleichungen.

4 Erläutern Sie am Beispiel des Radionuklids ${}^{75}\text{Br}$ den β^+ -Zerfall und am Beispiel des Radionuklids ${}^{137}\text{Cs}$ den β^- -Zerfall.

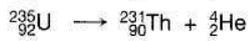
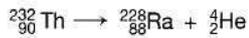
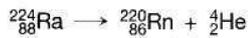
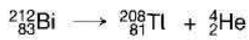
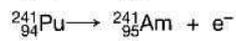
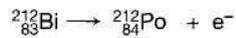
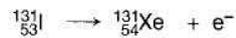
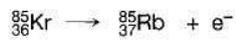
5 Warum hat eine radioaktive Substanz immer eine höhere Temperatur als die in der Nähe befindlichen nicht radioaktiven Substanzen?

11 ${}^{239}_{94}\text{Pu}$ ist ein Nuklid, das durch langsame und noch günstiger durch schnelle Neutronen gespalten wird. ${}^{239}_{94}\text{Pu}$ entsteht im Kernreaktor aus ${}^{239}_{92}\text{U}$ in zwei Schritten unter Emission von β^- -Teilchen.

Formulieren Sie die entsprechenden kernchemischen Gleichungen.

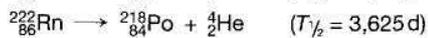
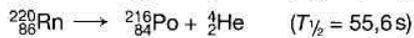
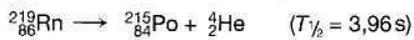
Lösungen:

10.2

Zu den Aufgaben**A1 α -Zerfall** **β^- -Zerfall**

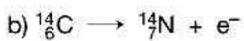
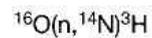
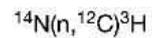
A2 a) Das radioaktive Edelgas Radon kann durch Erdspalten und Bodenkapillaren in die Atmosphäre gelangen. Die in der Atmosphäre entstehenden Folgeprodukte des Radons gelangen durch Sedimentation, Konvektion, Diffusion oder mit dem Niederschlag zur Erde bzw. in die Gewässer.

b) α -Zerfall der Radonisotope



236

A4. a) 87.7% b) 25.6 Stunden
(beide Aufgaben grafisch lösen)

10.4 Strahlenmessung und Strahlenbelastung**Zur Aufgabe****A1**

10.7

Radioaktivität und Kernreaktionen

10.7 Überprüfung und Vertiefung

Zu den Aufgaben

- 1 Gegeben: $\Delta m = 1 \text{ g}$
Gesucht: W (in $\text{kW} \cdot \text{h}$)

Berechnung: $W = \Delta m \cdot c^2$

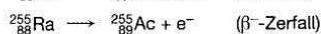
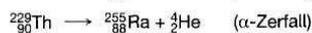
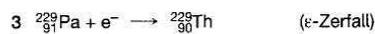
$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, \text{ Lichtgeschwindigkeit}$$

$$W = 10^{-3} \text{ kg} \cdot (3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^2$$

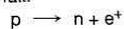
$$W = 9 \cdot 10^{13} \text{ J} = \frac{9 \cdot 10^{13}}{3,60 \cdot 10^6} \text{ kW} \cdot \text{h}$$

$$W = 2,5 \cdot 10^7 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

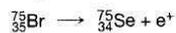
- 2 Es entstehen die stabilen Nuklide der jeweiligen Zerfallsreihen, sodass diese Nuklide ($^{206}_{82}\text{Pb}$, $^{207}_{82}\text{Pb}$, $^{208}_{82}\text{Pb}$) häufiger auftreten.



- 4 β^+ -Zerfall:



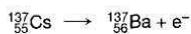
Umwandlung eines Protons in ein Neutron und ein Positron.



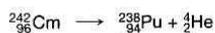
β^- -Zerfall:



Umwandlung eines Neutrons in ein Proton und ein Elektron.



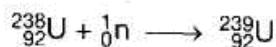
- 5 Die beim radioaktiven Zerfall von Nukliden ausgesandten Teilchen und die dabei entstehenden Kerne stoßen mit den in unmittelbarer Umgebung vorhandenen Atomen zusammen und versetzen diese in heftigere Schwingungen. Dadurch wird die Temperatur gegenüber der Umgebung erhöht. Bei Radionukliden mit sehr hoher Aktivität kann die Erwärmung so stark sein, dass sich eine Probe bis zum Glühen erhitzt. Ein Beispiel ist das Radionuklid $^{242}_{96}\text{Cm}$ (Curium), ein α -Strahler.



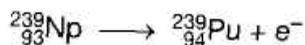
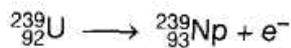
Die emittierten α -Teilchen besitzen hohe Anfangsenergien (6,113 MeV und 6,069 MeV).

261

11 Neutroneneinfang:



β^- -Zerfälle:



Übungsaufgaben

- 1.) Schreiben Sie die kernchemische Gleichung für die Herstellung von ^{20}Ne aus ^{20}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):
- a) $^{14}\text{N}(\dots, \text{p})^{17}\text{O}$ b) $\dots(\alpha, \text{n})^{12}\text{C}$ c) $^{75}\text{As}(\text{d}, \text{p})\dots$ d) $^{51}\text{V}(\text{d}, 2\text{n})\dots$
- e) $^{12}\text{C}(\text{p}, \text{n})\dots$ f) $^{24}\text{Mg}(\text{p}, \dots)^{21}\text{Na}$ g) $\dots(\text{n}, \text{p})^{56}\text{Mn}$ h) $^{35}\text{Cl}(\dots, \alpha)^{32}\text{P}$
- 3.) Schreiben Sie die Gleichungen für folgende Beispiele des radioaktiven Zerfalls:
- a) α -Emission von ^{221}Fr
b) Positronen-Emission von ^{18}F
c) β -Emission von ^{66}Cu
d) Elektroneneinfang von ^{133}Ba
- 4.) Ausgehend von ^{154}Er sind die aufeinanderfolgenden Stufen einer künstlichen Zerfallskette: α , β^+ , Elektroneneinfang, α , α
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:
- a) $(\text{d}, 3\text{n})^{243}\text{Bk}$ b) $(^{12}\text{C}, 4\text{n})^{245}\text{Es}$ c) $(^{10}\text{B}, 3\text{n})^{257}\text{Lr}$ d) $(\text{d}, 6\text{n})^{231}\text{Np}$
- e) $(\alpha, 3\text{T})^{250}\text{Es}$ f) $(\alpha, 2\text{n})^{255}\text{Md}$ g) $(^{22}\text{Ne}, 4\text{n})^{256}\text{No}$
- 6.)
- a) Vervollständigen Sie folgende Gleichung (einschließlich der Protonenzahlen):
- $$^{210}\text{Po} \longrightarrow ^{206}\text{Pb}$$
- 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.

Altersbestimmung mit der C-14-Methode

Problem 1:

Wie funktioniert die C-14 Methode?

Problem 2

Mit dem erarbeiteten Wissen ist selbst eine Altersbestimmung in einem konkreten Fall zu machen.

Aufgaben:

Sie erarbeiten sich selbständig die Grundlagen zur Radioaktivität. Dabei sind insbesondere folgende Begriffe zu klären und deren Bedeutung schriftlich festzuhalten:

- Isotop:

- Nuklid:

- Strahlung:

- Radioaktivität:

- α und β Zerfall:

- Röntgen- oder γ -Strahlung:

- Halbwertszeit:

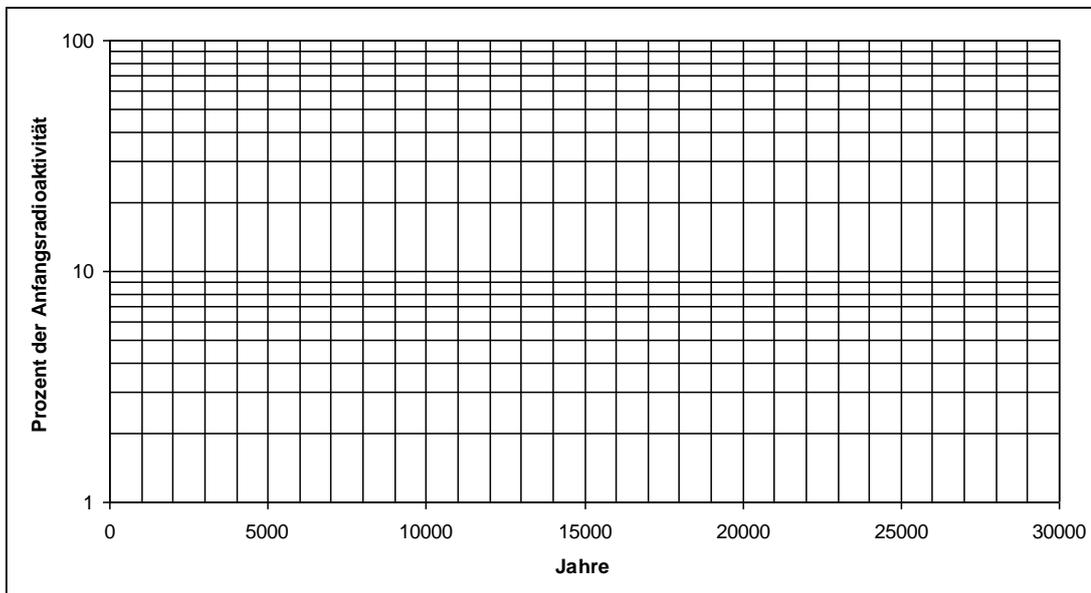
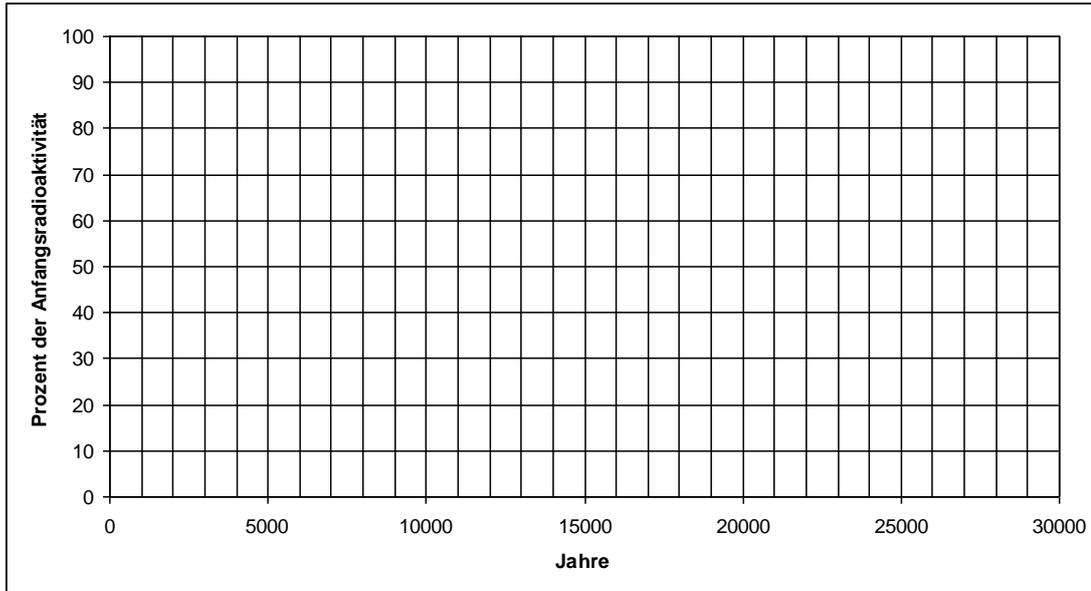
- Die Einheit Becquerel [Bq]:

Dann arbeiten Sie sich in das Thema der Altersbestimmung ein. Sie fassen die wesentlichen Punkte im untenstehenden Kästchen zusammen.

Zusätzlich nehmen Sie eine Altersbestimmung vor. Dazu die folgenden Angaben:

Die ^{14}C -Radioaktivität von verkohltem Holz eines alten Lagerfeuers beträgt 0.16 Bq pro Gramm. In einem lebenden Baum wird dagegen eine solche von 0.307 Bq/g gemessen. Wie alt ist das Lagerfeuer ungefähr?

1. Suchen Sie die Halbwertszeit des Isotopes ^{14}C heraus.
2. Erstellen Sie im oberen Kästchen eine Grafik, wobei die ursprünglich vorhandene Menge ^{14}C zum Zeitpunkt 0 Jahre als 100% eingetragen wird (einen Punkt machen). Bei der Halbwertszeit von ^{14}C (bei dieser Anzahl Jahren) machen Sie einen Punkt bei 50%. Nach einer weiteren Zeitspanne einer Halbwertszeit dann einen Punkt bei 25%. Es kommen dazu noch Punkte bei weiteren Halbwertszeiten mit 12.5%, 6.25% und 3.125%. Alle eingetragenen Punkte verbinden Sie mit einer Kurve (ohne Knicke).
3. Bestimmen Sie rein grafisch mit den oben erwähnten Radioaktivitätswerten möglichst genau das Alter des Lagerfeuers, indem Sie schauen, wievielen Jahren die noch vorhandene Radioaktivität (in Prozent der ursprünglichen Radioaktivität berechnet) entspricht.
4. Machen Sie dasselbe wie unter 3., diesmal aber im Kästchen darunter mit der logarith. Skala.



Reaktortypen:

Typ	Moderator	Kühlmittel	Druckwasser	Siedewasser	Brennstoff	Vorteil
Schwerwasserreaktor	Deuterium	Wasser	möglich	möglich	Natururan	Natururan
Leichtwasserreaktor	normales Wasser	Wasser	möglich	möglich	angereichertes Uran	normales Wasser
Siedewasser-Druckröhrenreaktor	Grafit	Wasser		nötig	angereichertes Uran	Einfach, kein Druckbehälter, nur Röhren, Wasser ohne Kontakt mit Brennelementen

Druckwasserreaktor: Zwei Wasserkreisläufe, keine Radioaktivität in der Dampfturbine

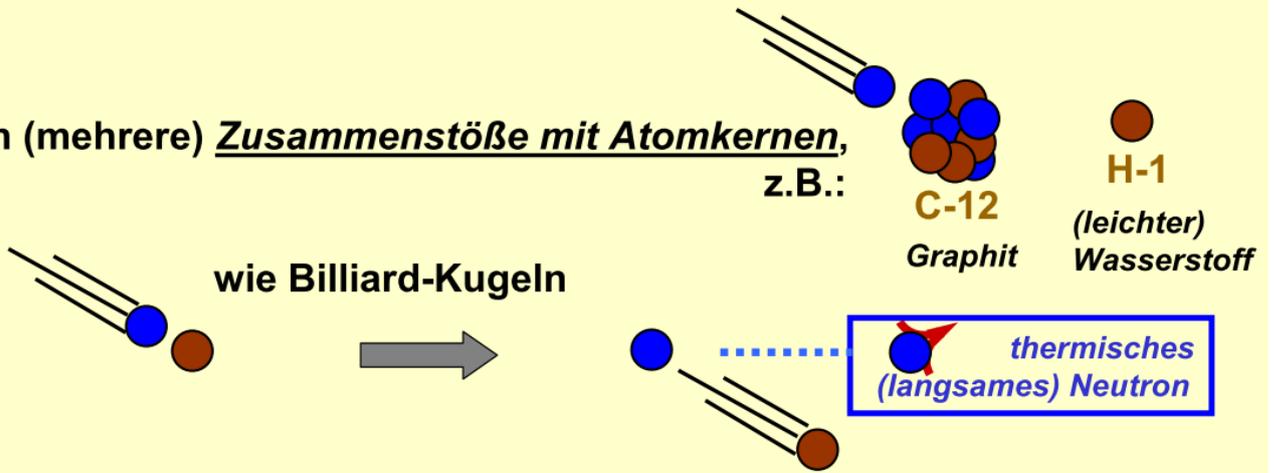
Siedewasserreaktor: Geringer Druck

Bei beiden Typen gilt: höhere Temperatur → Wasser weniger dicht → weniger Moderation → weniger Spaltung

https://www.kernenergie.ch/de/so-funktioniert-ein-kernkraftwerk-_content---1--1254--345.html

Abbremsung der schnellen Neutronen (Moderation)

Durch (mehrere) Zusammenstöße mit Atomkernen,
z.B.:



Absorption thermischer Neutronen



Wesentliche Materialien in Kernreaktoren

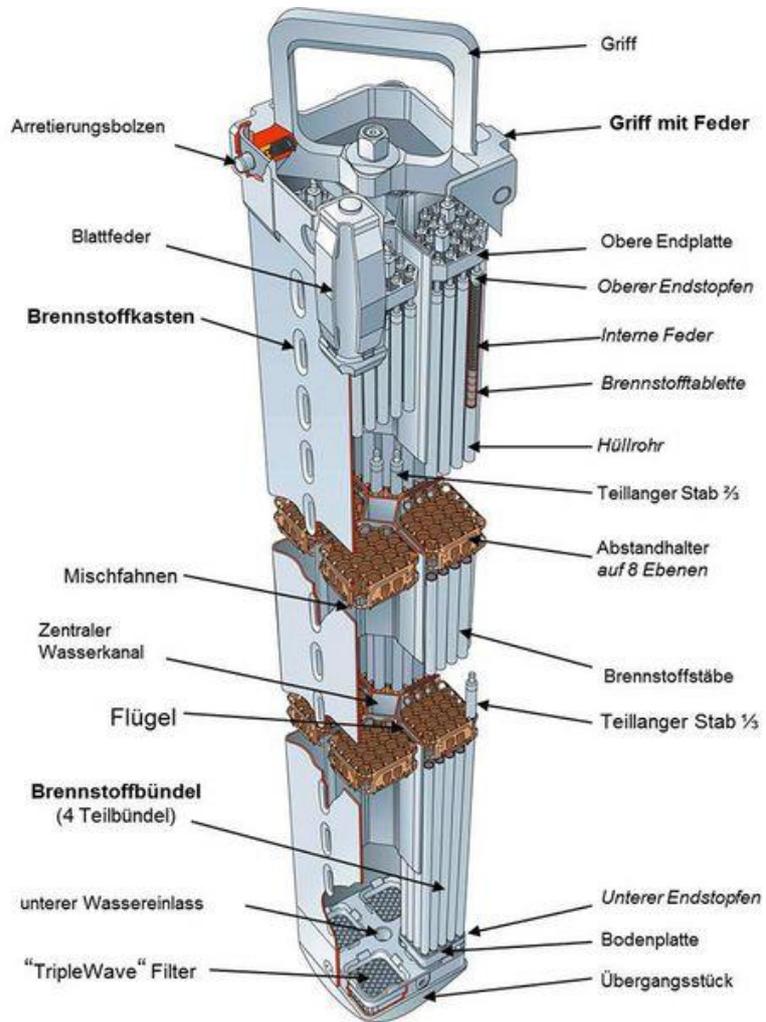
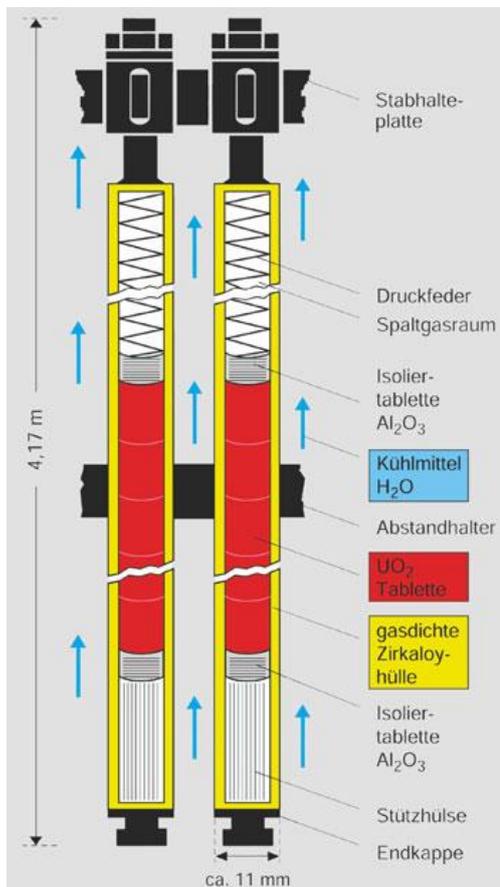
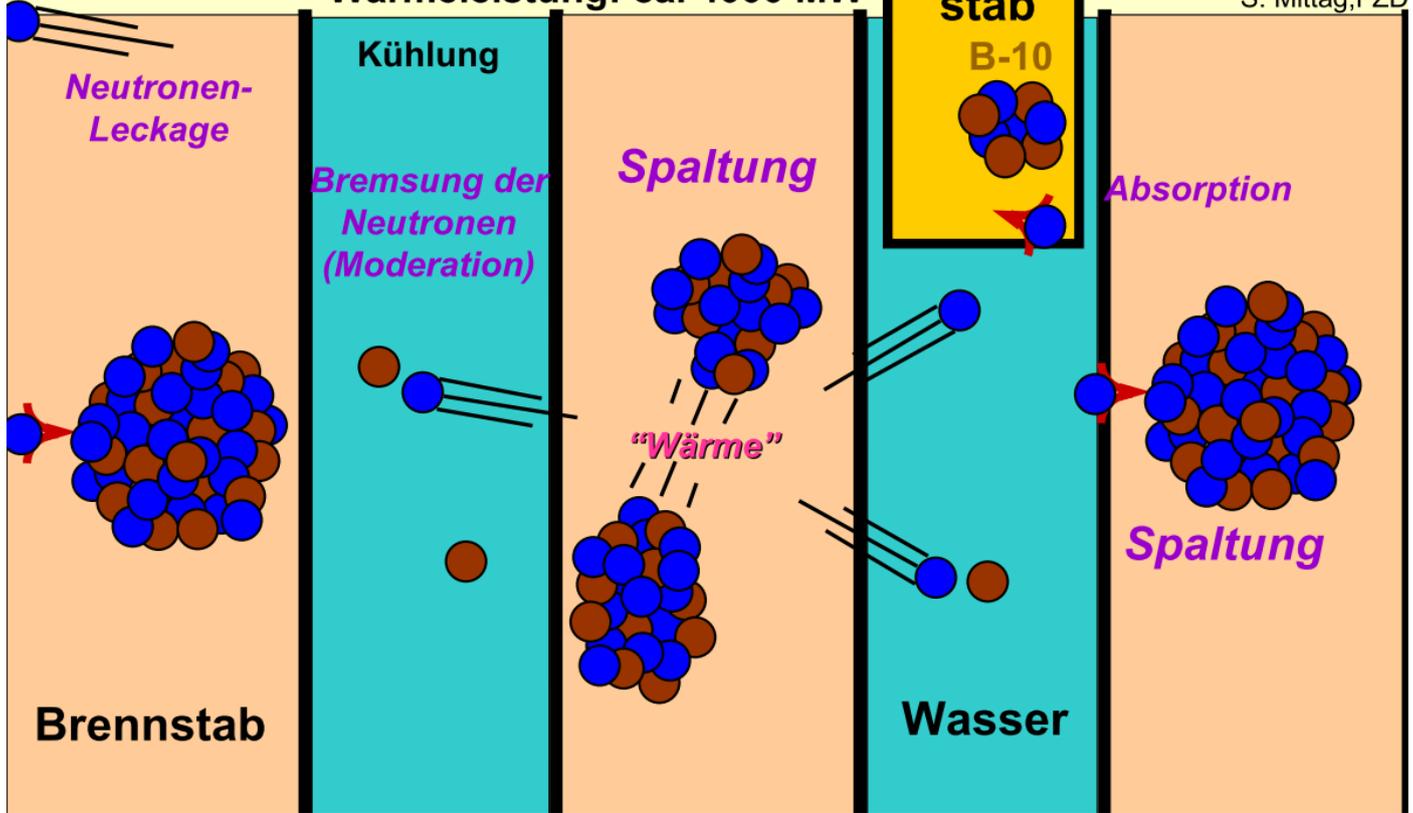
<p>C-12</p>	<p>Graphit</p>		<p>Moderation</p>	
<p>C-12: Keine Absorption durch „stabiles Dutzend“!</p>				
<p>H-1</p>	<p>Wasser</p> <p>Kühlmittel</p>		<p>Moderation</p>	
<p>B-10</p>	<p>Bor</p>		<p>Absorption</p>	<p>(B-11)</p>
<p>Genutzt zur Steuerung der Neutronenzahl im Reaktor</p>				
<p>U-235</p>	<p>Uran</p>		<p>Spaltung</p>	<p>Energiefreisetzung</p>

Siemens-Reaktor (LWR), vereinfacht

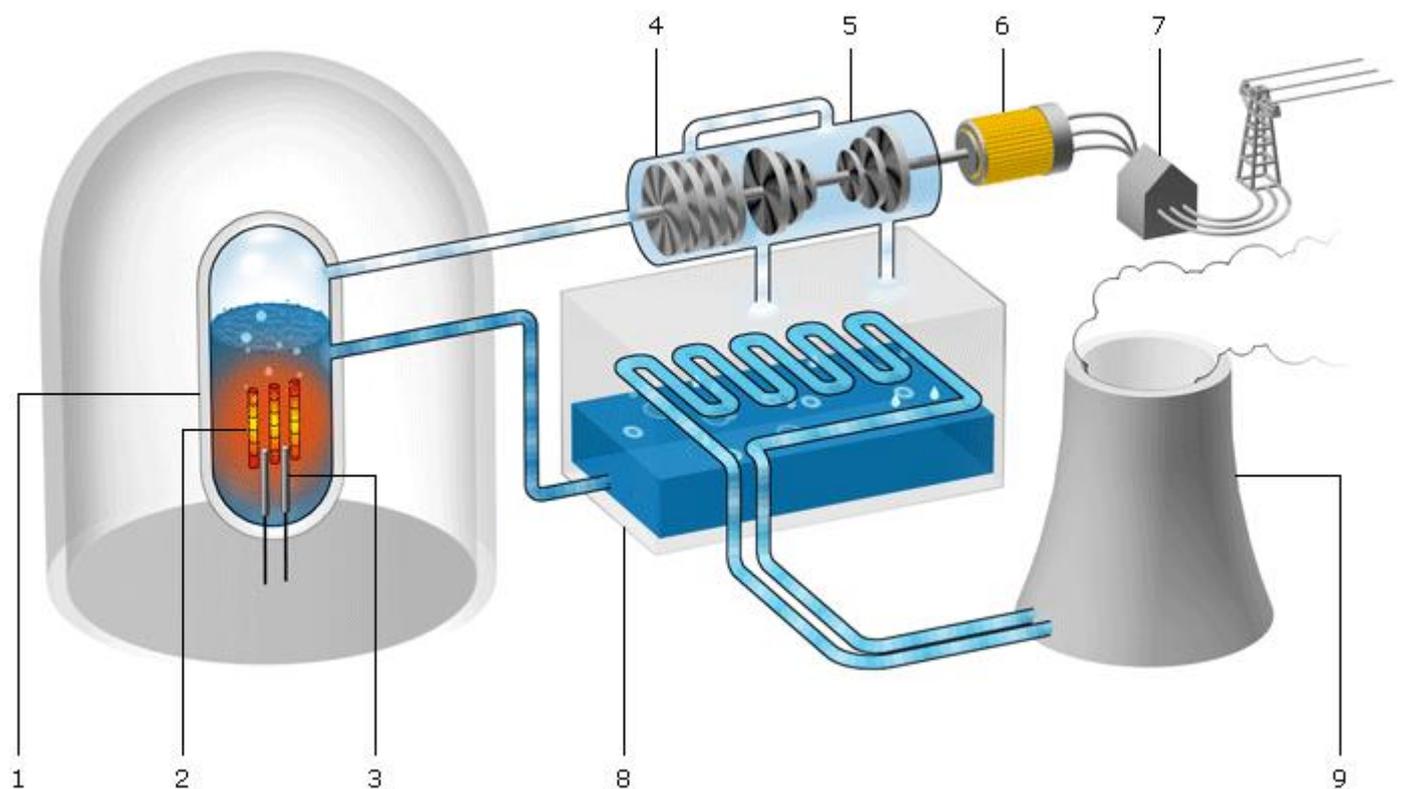
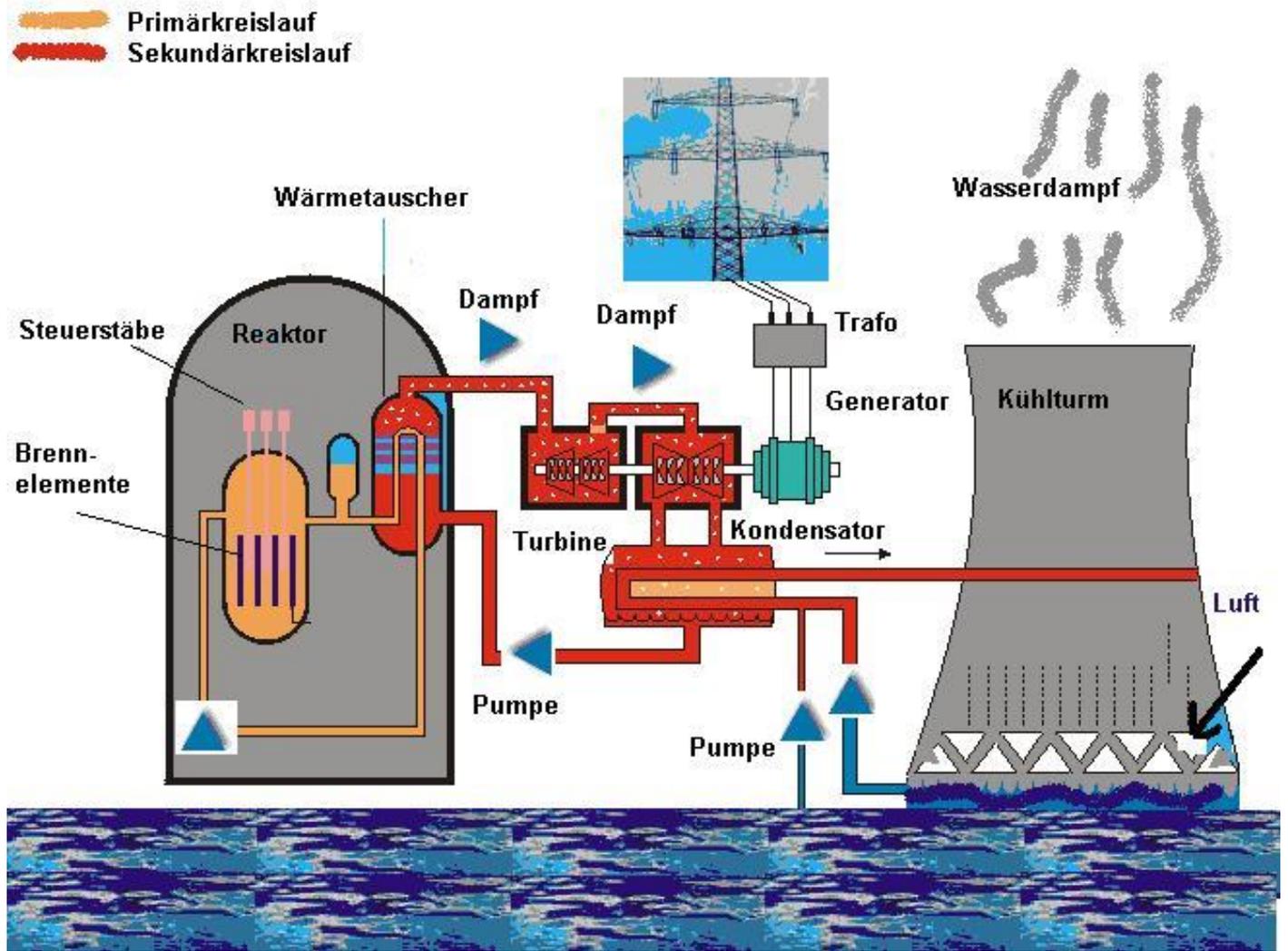
Wärmeleistung: ca. 4000 MW

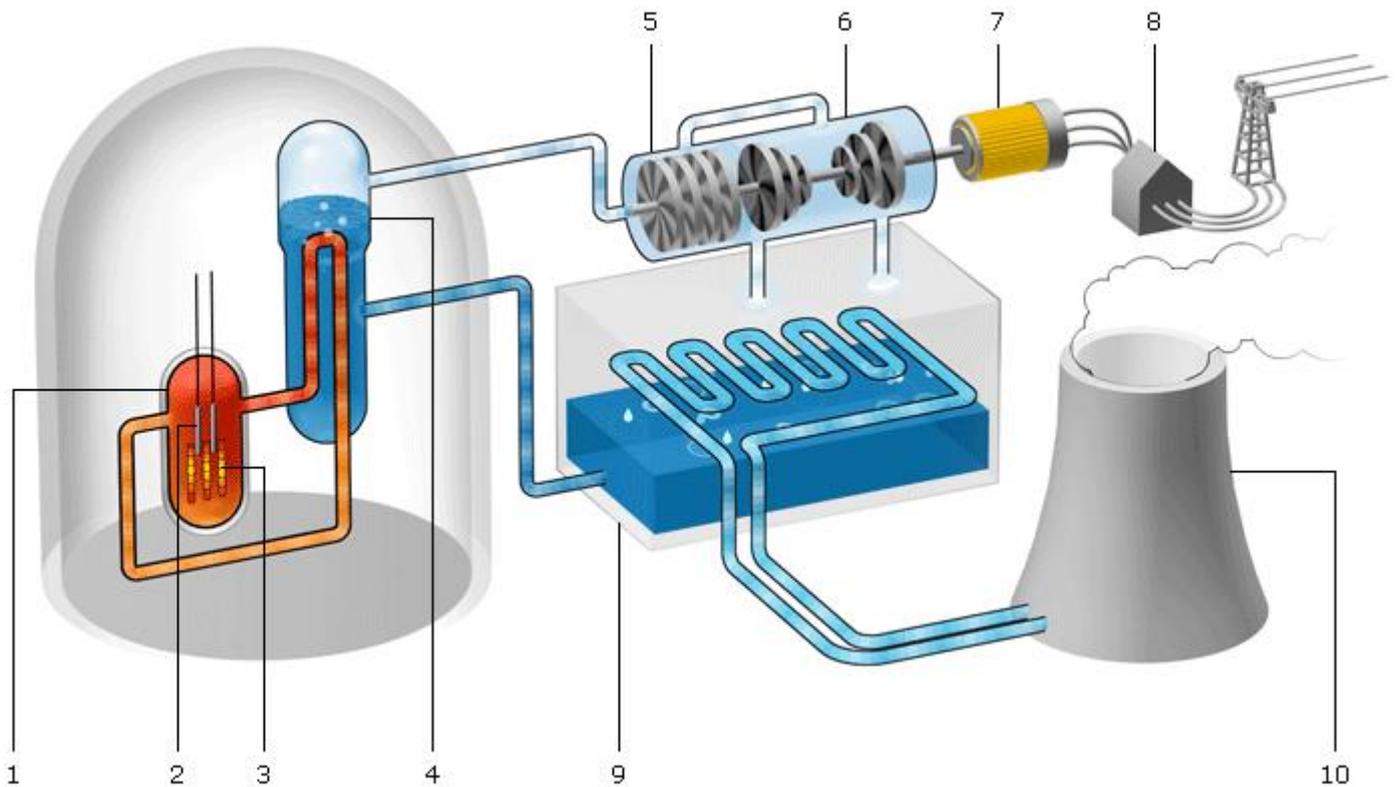
8

S. Mittag, FZD









Druckwasserreaktor

Reaktortypen

Typ	Moderator	Kühlmittel	Druckwasser	Siedewasser	Brennstoff	Vorteil
Schwerwasserreaktor	Deuterium	Wasser	möglich	möglich	Natururan	Natururan
Leichtwasserreaktor	normales Wasser	Wasser	möglich	möglich	angereichertes Uran	normales Wasser
Siedewasser-Druckröhrenreaktor	Grafit	Wasser		nötig	angereichertes Uran	Einfach, kein Druckbehälter, nur Röhren, Wasser ohne Kontakt mit Brennelementen

