

Der Brennstoffkreislauf und die Entsorgung eines Kernkraftwerks

Mit dem Begriff Brennstoffkreislauf werden zusammenfassend alle Arbeitsschritte und Prozesse bezeichnet, die der Versorgung und Entsorgung von Kernkraftwerken dienen.

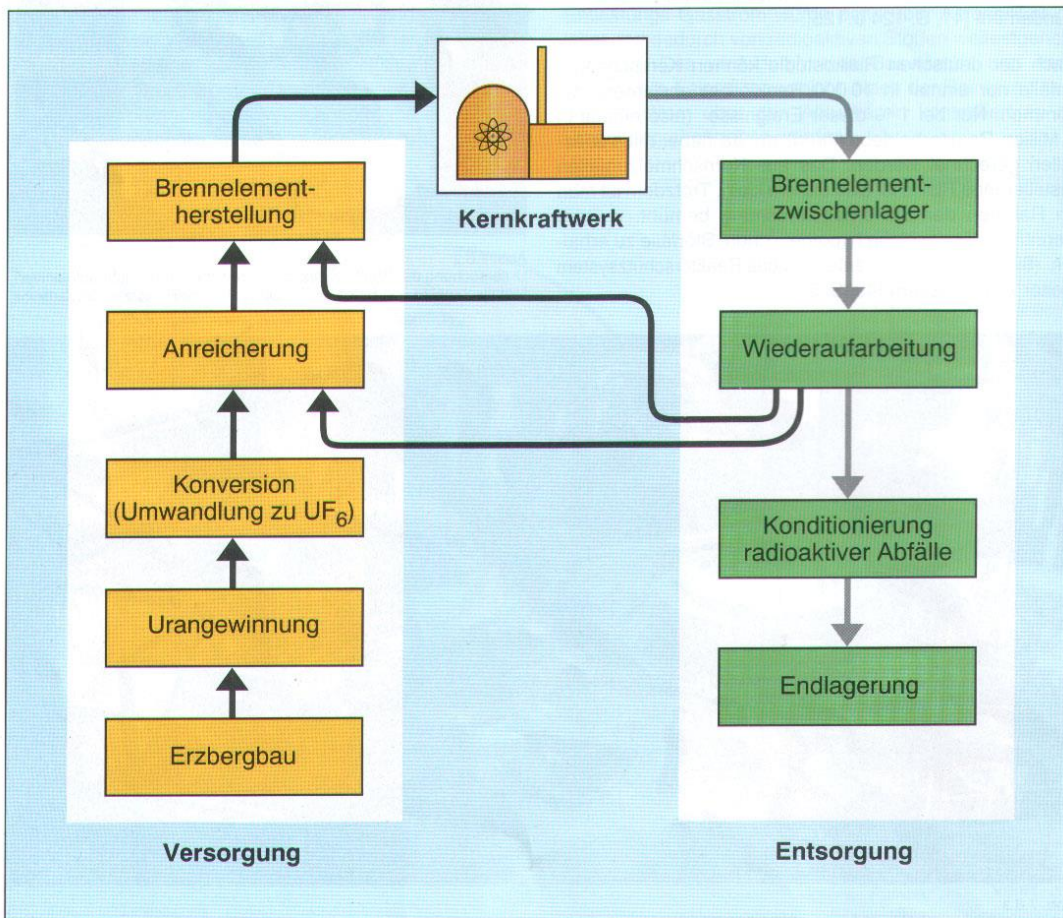


Abb. 8.1.1
Brennstoffkreislauf bei Leichtwasserreaktoren (vereinfachte Darstellung)

Zur Versorgung gehören die Suche und der Abbau von Uranerz (Tagebau oder Untertagebau), die Gewinnung des Urans aus den Erzen, die Anreicherung von Uran – 235, die Herstellung von Brennelementen und ihre Anlieferung in den Kernkraftwerken.

Die Entsorgung umfasst den Abtransport abgebrannter Brennelemente aus den Kernkraftwerken, die Trennung wiederverwertbaren Spaltstoffs von nicht wiederverwertbaren radioaktiven Abfällen, die Herstellung neuer Brennelemente aus den zurückgewonnenen Spaltstoffen, die Verpackung bzw. den sicheren Einschluss der Abfälle und ihre Endlagerung sowie alle dafür notwendigen Transporte.

Ein Kreislauf entsteht dadurch, dass die aus abgebrannten Brennelementen zurückgewonnenen Spaltstoffe erneut zur Brennelementherstellung eingesetzt werden. Dadurch sind Versorgungsteil und Entsorgungsteil miteinander verbunden. Ein vollständiger Kreislauf liegt jedoch nicht vor, da fortlaufend Uranerz zugeführt und radioaktive Abfälle aus dem Kreislauf entfernt werden müssen.

Uranvorkommen

Die Erdrinde enthält in 1t Gestein im Mittel etwa 3g Uran, das sind 0,0003 Gewichtsprozent. Damit ist das Element Uran etwa 100mal häufiger in der Erdrinde anzutreffen als Silber oder Gold. Heute werden Erze wirtschaftlich genutzt, die zwischen 0,1 und 0,5% Uran enthalten. Solche Lagerstätten befinden sich in *Kanada, USA, Brasilien, Süd- und Mittelfrika, Australien, Frankreich, Schweden* oder der ehemaligen *UdSSR*.



Abb. 8.1.2
Urannerztagebau

Quelle: Urangesellschaft mbH

Tritt Uran im Verbund mit anderen Metallen auf (z.B. Gold oder Vanadium), lassen sich auch an Uran ärmere Erze wirtschaftlich verwerten.

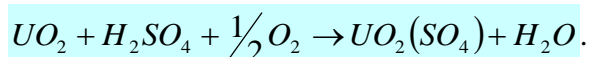
Der gesamte Urangehalt der Erdkruste wird auf knapp $41 \cdot 10^{12} t$ geschätzt. Davon liegen etwa drei Viertel auf den Kontinenten, der Rest ist im Meerwasser gelöst. Als z.Z. wirtschaftlich nutzbare Uranvorräte der westlichen Welt werden $6 \cdot 10^6 t$ geschätzt. Die Weltjahresproduktion der westlichen Länder liegt bei etwa $4,5 \cdot 10^4 t$, der Jahresbedarf der BRD bei $3,3 \cdot 10^3 t$.

Ausgehend vom heutigen Bedarf würde also für die nächsten 130 Jahre genügend Spaltstoff zur Verfügung stehen.

Urangewinnung

Das im Erz vorhandene Uran wird durch physikalische und chemische Verfahren vom übrigen Gestein getrennt. Dazu wird das Erz gebrochen, fein zermahlen und mit Säure (oder Lauge) unter Anwesenheit eines Oxidationsmittels (z.B. MnO_2 oder Na_2ClO_4) ausgelaugt. Die Oxidation ist notwendig, um das Uran von der im Erz vorliegenden vierwertigen, schlecht löslichen Form in die sechswertige, gut lösliche Form zu überführen.

Beispiel für Pechblende:



Die chemische Verbindung $UO_2(SO_4)$ trägt den Namen **Uranylsulfat**.

Durch die Herauslösung mit Hilfe von Säuren kann bis zu 90% des Urans aus dem Erz gewonnen werden. Das Uranylsulfat enthält jedoch eine Reihe von Begleitstoffen, die in weiteren Reinigungsprozessen entfernt werden (Dekantieren, Filtern, Flüssigextraktion, Ionenaustausch usw.).

Durch Zugabe von MnO , $NaOH$ oder NH_3 wird das Uran aus der uranhaltigen Flüssigkeit abgeschieden. Beim Einsatz von NH_3 ergibt sich Ammoniumuranat, das meist in der Form von Ammoniumdiuranat $(NH_4)_2U_2O_7$

vorliegt. Es wird eingedickt, gefiltert, gewaschen und getrocknet. Dieses Konzentrat enthält 70 bis 80% Uran. Wegen seiner gelben Farbe hat es den Namen „Yellow Cake“ erhalten.

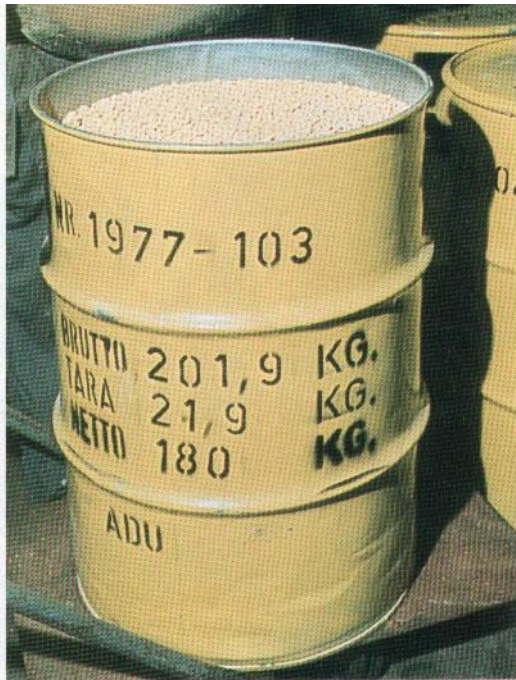


Abb. 8.1.3 Quelle: Urangesellschaft mbH
Urankonzentrat "Yellow Cake"

Anreicherung von Uran – 235

Das Produkt „Yellow Cake“ besitzt nur technische Reinheit. Außerdem liegt darin das Uran in seiner natürlichen Isotopenzusammensetzung vor (ca. 99,3% U – 238, ca. 0,7% U – 235).

Um das Uran in Kernkraftwerken einsetzen zu können, ist eine wesentlich höhere Reinheit erforderlich, und der Anteil von U – 235 muss von 0,7% auf 3 bis 4% erhöht werden. Verunreinigungen würden zu einer erhöhten Neutronenabsorption und zu störenden Reaktionen mit dem Hüllrohrmaterial der Brennstäbe führen. Zur Anreicherung und weiteren Reinigung wird das „Yellow Cake“ in die gasförmige Verbindung Uranhexafluorid UF_6 umgewandelt. Dazu sind eine Reihe chemischer Reaktionen erforderlich, bei denen gleichzeitig Reinigungsprozesse ablaufen.

Uranhexafluorid ist eine farblose, kristalline Substanz. Bei Normaldruck geht sie bei einer Temperatur von $56,5^{\circ}C$, von der festen Phase in die Gasphase über. Als Gas lässt sich UF_6 durch Filter von noch enthaltenen Feststoffen und durch Ausfrieren von anderen Gasen befreien.

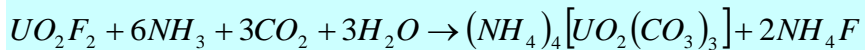
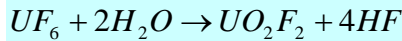
Mit einer Reinheit von mindestens 99,5% wird es in Stahlbehältern gelagert bzw. zur Anreicherungsanlage transportiert.

Für die Anreicherung stehen das Diffusions-, Zentrifugen und Trenndüsenverfahren zur Verfügung.

Herstellung von Brennelementen

In der Brennelementefabrik wird das an U – 235 angereicherte UF_6 in UO_2 umgewandelt. Dazu verwendet man in der BRD ein nasschemisches Verfahren.

Das UF_6 lässt man in einem Behälter mit Wasser, Ammoniak und Kohlendioxid reagieren. Es entsteht dann Ammonium – Uranyl – Carbonat.



Das gelbe AUC fällt aus der Lösung aus und kann durch Filter abgetrennt werden. Durch Erhitzen wird es in Ammoniak, Kohlenstoffdioxid, Fluorwasserstoff und Urantrioxid UO_3 getrennt. Anschließend reduziert man es in einer Wasserstoffatmosphäre bei hohen Temperaturen zu Urandioxid.

Das Urandioxid liegt zunächst als graues Pulver vor. Für Leichtwasserreaktoren presst man es zu Tabletten, die anschließend in einer Wasserstoffatmosphäre bei $1700^\circ C$ gesintert und dadurch weiter verdichtet werden.

Da die Urandioxidtabletten sehr maßgenau sein müssen, werden sie noch geschliffen. Anschließend füllt man sie in Hüllrohre aus Zirkaloy. Diese werden dann mit Helium geflutet und durch aufschweißen der Endkappen gasdicht verschlossen. Dadurch entsteht ein Brennstab. Mehrere zu einem Bündel zusammengefasste Brennstäbe bilden ein Brennelement.

Wiederaufarbeitung

Man setzt Brennelemente bis zu sieben Jahre in einem Reaktor ein. In dieser Zeit werden sie innerhalb des Reaktors nach einem genau festgelegten Plan mehrfach in andere Positionen gebracht, um einen möglichst hohen Abbrand zu erreichen. Außerdem werden beim jährlichen Brennelementwechsel bereits eingesetzte Brennelemente entnommen und in einem Wasserbecken außerhalb des Reaktors zwischengelagert, dafür neue Brennelemente in den Reaktor eingesetzt. Im Kernkraftwerk Krümmel werden dadurch jährlich von 840 Brennelementen 120 ausgetauscht. Das entspricht etwa 21t Uran. Die zwischengelagerten Brennelemente, die weniger als sieben Jahre im Einsatz waren, lassen sich in der Regel zu einem späteren Zeitpunkt erneut im Reaktor verwenden.

Nach dem Einsatz der Brennelemente in einem Reaktor hat sich die Zusammensetzung der Uran – Tabletten geändert.

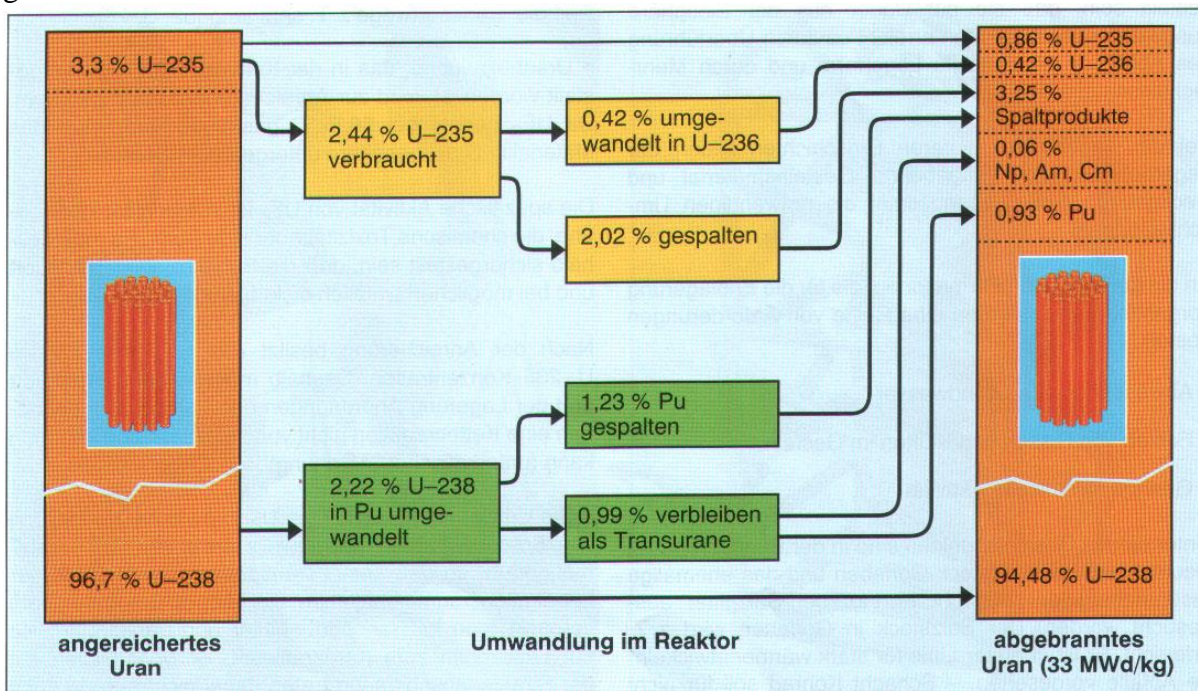


Abb. 8.1.5
Zusammensetzung des Kernbrennstoffes bei Leichtwasserreaktoren vor und nach dem Einsatz im Reaktor [71, S. 122]

- Der Spaltstoff U – 235 wird z.T. durch Kernspaltungen, z.T. durch Umwandlung in U – 238 verbraucht. Die bei den Kernspaltungen entstehenden Spaltprodukte sind radioaktiv.

Dieser Verbrauch an Spaltstoff wird Abbrand genannt. Der Grad des Abbrandes wird in erzeugter thermischer Energie pro Masse Brennstoff angegeben. Bei Leichtwasserreaktoren werden mittlere Abbrandwerte von 33 MWd/kg erreicht ($1MWd=24000kWh$).

- Durch Neutroneneinfang entsteht aus U – 238 das Plutoniumisotop Pu – 239. Pu – 239 wird durch langsame Neutronen gespalten, oder es wandelt sich zu verschiedenen Aktiniden um.

Wegen der Abnahme des Spaltstoffes und der Zunahme neutronenabsorbierender Spaltprodukte müssen die Brennelemente nach bis zu siebenjährigem Einsatz ausgetauscht werden.

Abgebrannte Brennelemente zeichnen sich durch eine hohe spezifische Aktivität und damit auch hohe Wärmeproduktion aus. Damit der Transport zur Wiederaufbereitungsanlage nicht zu aufwendig wird, lagert man die Brennelemente zunächst in einem wassergefüllten Abklingbecken innerhalb des Kraftwerkes. Das Wasser schirmt die Strahlung fast vollständig ab und nimmt gleichzeitig die erzeugte Nachzerfallswärme auf. Bei einer Lagerzeit von 6 bis 12 Monaten gehen die Aktivität und damit auch die Wärmeproduktion auf etwa 0,1% der Anfangswerte zurück.

In der Wiederaufbereitungsanlage werden die Brennstäbe aufgesägt, der Kernbrennstoff in heißer Säure aufgelöst und durch weitere chemische Verfahren eine Trennung in drei Komponenten vorgenommen: Uran, Plutonium, Spaltprodukte.

Neben der Wiederaufbereitung abgebrannter Brennelemente wird auch die direkte Endlagerung kompletter Brennelemente untersucht.

Konditionierung radioaktiver Abfälle

Radioaktive Abfälle wurden bisher in schwach-, mittel- und hochaktive Abfälle unterteilt, abhängig von der Aktivitätskonzentration. Heute unterscheidet man die radioaktiven Abfälle nach der Wärmeentwicklung.

- Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung,
- gering wärmeentwickelnde Abfälle,
- stark wärmeentwickelnde Abfälle. Bei Endlagerung in Gesteinsschichten können sie Temperaturen des umgebenden Gesteins um bis zu $200^{\circ}C$ erhöhen.

Konditionierung bedeutet, die radioaktiven Abfälle in eine endlagerungsfähige Form zu überführen. Wie das geschieht, ist von der Art des Abfalls abhängig. Bei vernachlässigbarer oder geringer Wärmeentwicklung werden Metallfässer, Bitumen- oder Betonummantelungen verwendet.

Stark wärmeentwickelnde Abfälle werden zu flüssigen Glas gemischt, aus dem dann Glasblöcke hergestellt werden.

Endlagerung

Bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle muss sichergestellt sein, dass sie auf Dauer aus der Biosphäre ausgeschlossen sind. Man erreicht es durch Überführung des Abfalls in eine stabile Lagerform und durch Mehrfacheinschluss.

Bei der Lagerung in tieferen Erdschichten bilden der Lagerbehälter, das umgebende Gesteinsmaterial und Deckgebirge bzw. Nebengestein die notwendigen Umschließungen.

An die geologischen Formationen, die für die Endlagerung vorgesehen sind, werden eine Reihe von Anforderungen gestellt:

- Abwesenheit von Grundwasser
- Fehlen von Rissen und Klüften im Gestein
- Geringe seismische Aktivität.

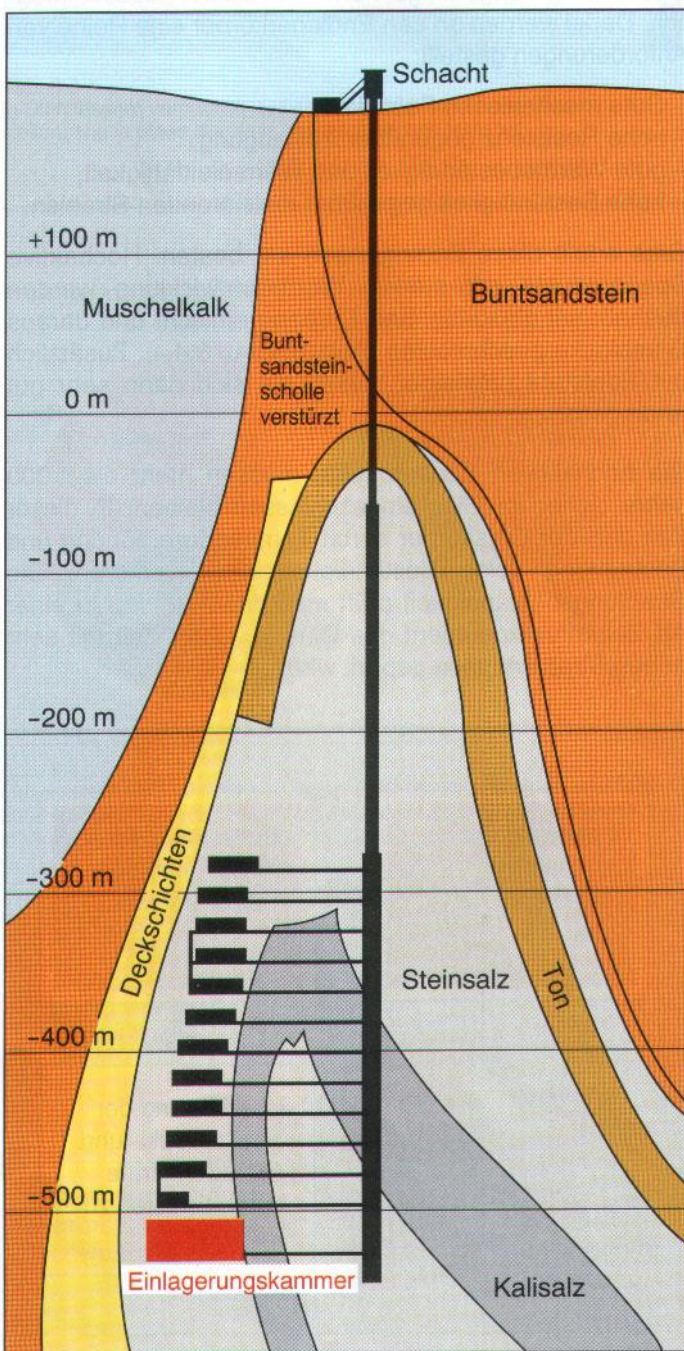


Abb. 8.4.5
Endlagerung radioaktiver Abfälle in geeigneten geologischen Strukturen
(Beispiel: Forschungsbergwerk Salzbergwerk Asse II)

Unter diesen Gesichtspunkten sind in der BRD der Salzstock Gorleben und das ehemalige Eisenerzbergwerk Schacht Konrad bei Salzgitter ausgesucht worden. Der Salzstock in Gorleben wird z.Z. erforscht. Er ist in erster Linie für stark wärmeentwickelnde Abfälle vorgesehen. –Schacht Konrad soll für nicht oder nur schwach wärmeentwickelnde Abfälle und Materialien genutzt werden.