



Wohin mit dem Atommüll?

Nuklearia e. V.

Rainer Klute

<https://nuklearia.de/>

16. August 2019



- Was ist Atommüll?
- Klassifizierung: schwach-, mittel- und hochradioaktive Abfälle
- Schwerpunkt: gebrauchte Brennelemente – hochradioaktiv
- Wie entsteht Atommüll im Kernreaktor?
- Gefahren durch Atommüll
- Welche Entsorgungsmöglichkeiten gibt es?
 - Direkte Endlagerung
 - Plutonium-Rückgewinnung (MOX-Brennelemente)
 - Atommüll-Recycling



Was ist Atommüll?



- **Kernkraftwerke**

- Bestrahlte («abgebrannte») Brennelemente
- Arbeitskleidung, Putzlappen, Verpackungen, Putzwasser usw.
- Ausgediente, aktivierte Maschinenteile, Reaktordruckbehälter, Pumpen, Rohre, Bauschutt, Kühlwasser usw.



Herkunft des Atommülls

- **Forschung, Industrie, Bergbau, Ölförderung**
 - Werkzeuge, Geräte, Präparate
 - Forschungsreaktoren, Kernbrennstoff usw. usw.
- **Medizin**
 - Radioaktive Präparate in Diagnostik und Therapie
 - Spritzen, Kanülen, Abwässer usw.



Klassifizierung: schwach-, mittel- und hochradioaktive Abfälle



Klassifizierung nach Radioaktivität (IAEA)

- Radioaktive Abfälle werden anhand ihrer Radioaktivität klassifiziert:
 - **Hochaktive Abfälle**
 - **Mittelaktive Abfälle**
 - **Schwachaktive Abfälle**
- Maßgeblich ist die Anzahl der Zerfälle von Atomen pro Sekunde.
- Einheit **Becquerel (Bq)**
 - Ein Becquerel = ein Zerfall pro Sekunde



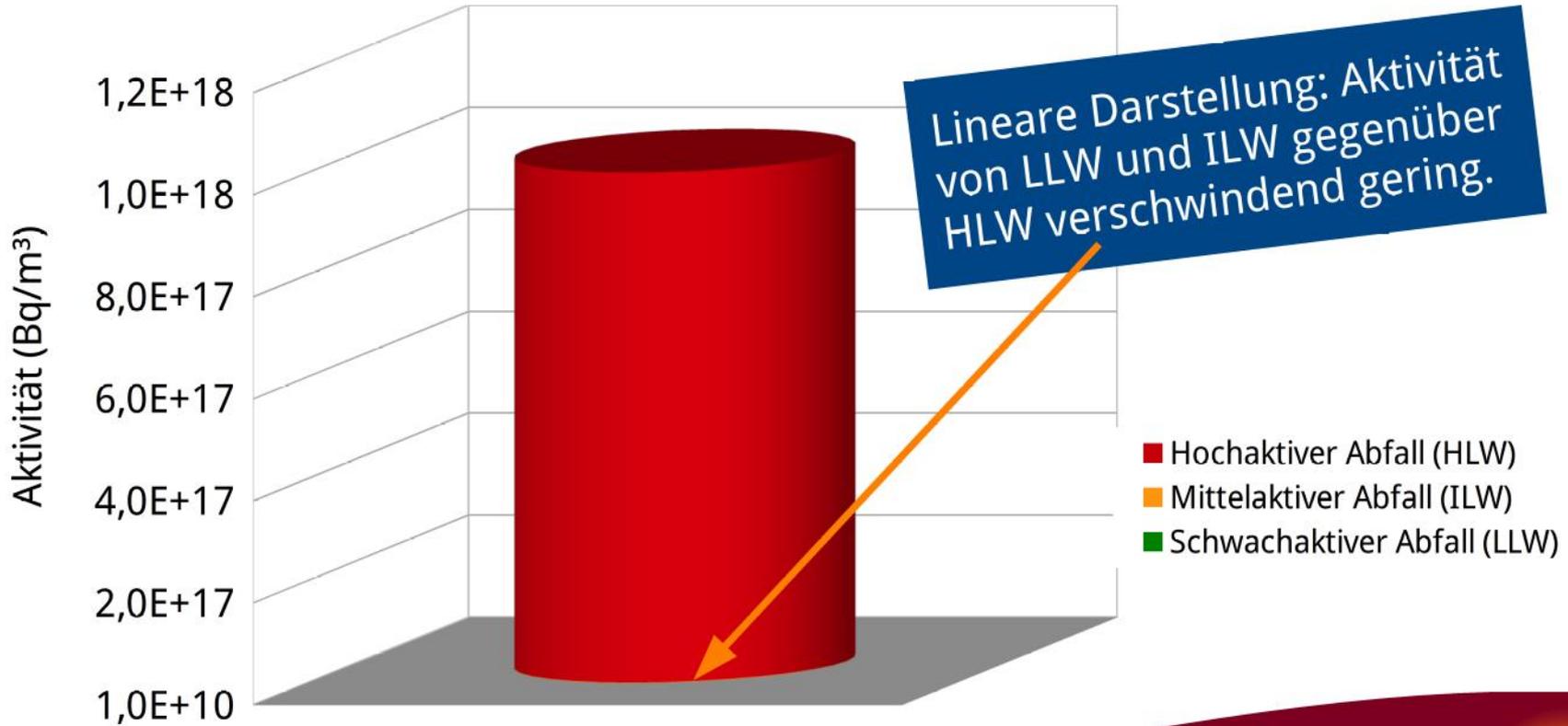
Klassifizierung nach Radioaktivität (IAEA)

- **Hochaktiver Abfall** (HLW, high-level waste)
 - $> 10^{14}$ Bq/m³, typisch: $5 \cdot 10^{16}$ bis $5 \cdot 10^{17}$ Bq/m³
 - Abschirmung und Kühlung nötig
- **Mittelaktiver Abfall** (ILW, intermediate-level waste)
 - 10^{10} bis 10^{15} Bq/m³
 - Abschirmung nötig, Kühlung nicht immer
- **Schwachaktiver Abfall** (LLW, low-level waste)
 - $< 10^{11}$ Bq/m³
 - Abschirmung oder Kühlung unnötig



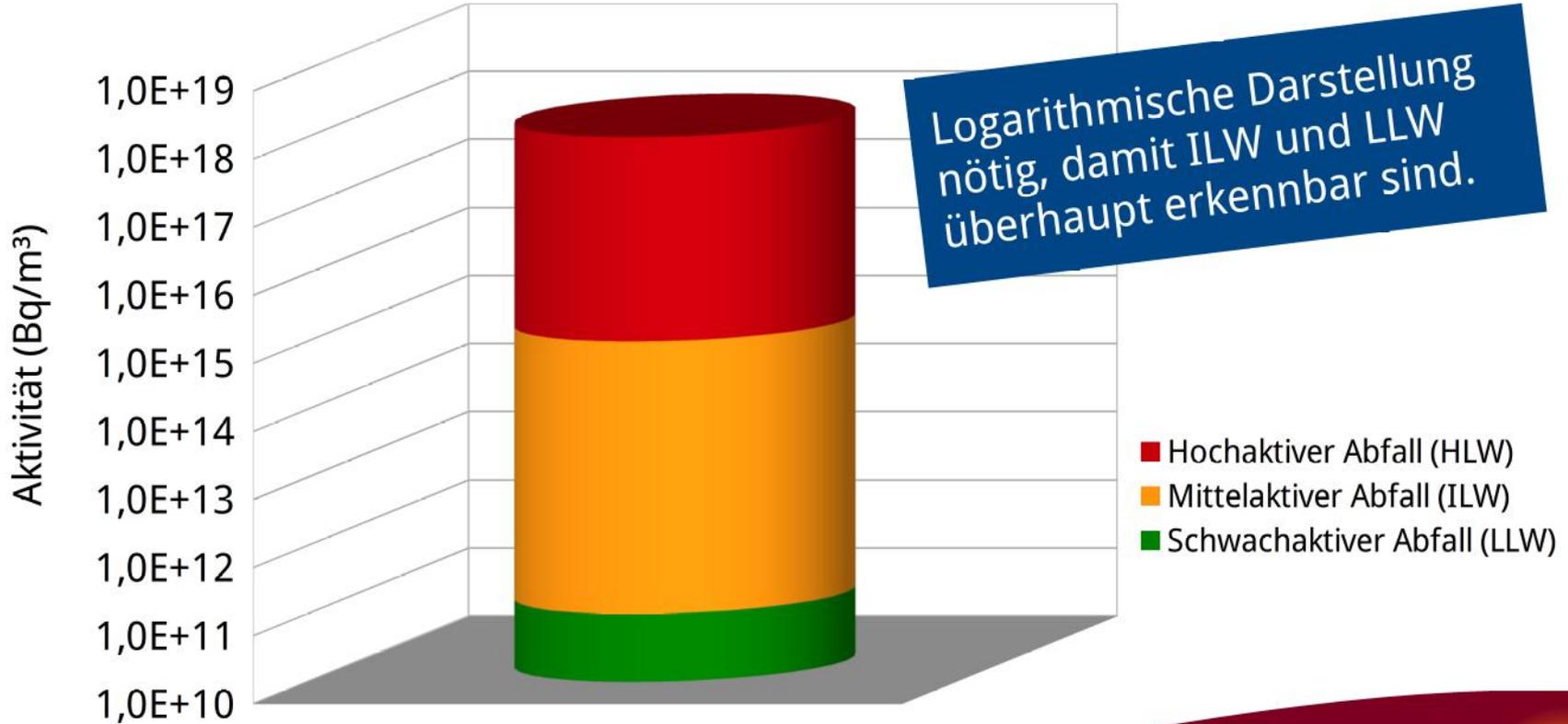
Klassifizierung nach Radioaktivität (IAEA)

- Radioaktivität nach Abfallkategorien (Bq/m^3), linear



Klassifizierung nach Radioaktivität (IAEA)

- Radioaktivität nach Abfallkategorien (Bq/m³), logarithmisch



Größenordnungen im Vergleich

- Angaben wie 10^{10} , 10^{14} oder 10^{17} Bq sind nicht sehr anschaulich.
- Wie werden unterschiedliche Radioaktivitätsniveaus besser verständlich?
- Vergleich der Größenordnungen durch Längenangaben
- Wenn eine Billion Becquerel ein Zentimeter wäre ...



Hochaktive Abfälle

- Radioaktivität von mehr als $10.000.000 \text{ Bq/cm}^3$ (1 m – 10 km)
- Gebrauchte Brennelemente aus Kernkraftwerken
- Anfangs typischerweise $50.000.000.000$ bis $500.000.000.000 \text{ Bq/cm}^3$
- Abschirmung nötig
- Kühlung nötig
- Castor-Behälter
- Burj Khalifa, Dubai (828 m)



Mittelaktive Abfälle

- 10.000 bis 1.000.000.000 Bq/cm³ (0,1 mm – 10 m)
- Aktivierte Maschinenteile, medizinische Präparate usw.
- Abschirmung nötig
- Kühlung nicht immer nötig
- Gelbe Fässer
- Schneewand in Tateyama, Japan (ca. 8 m)



Schwachaktive Abfälle

- Radioaktivität unter 100.000 Bq/cm^3 (kleiner als 1 mm)
- Arbeitskleidung, Putzlappen, Bauschutt, Kanülen usw.
- Abschirmung unnötig
- Kühlung unnötig
- Gelbe Fässer
- Sandkorn (1/16 mm bis 2 mm)



Klassifizierung nach Wärmeentwicklung (DE)

- Deutschland klassifiziert Atommüll nicht nur nach Radioaktivität, sondern auch nach **Wärmeentwicklung** – wesentliches Kriterium bei der (End-)Lagerung.
- Abfälle mit **vernachlässigbarer Wärmeentwicklung**
 - Z.B. ausgediente Anlagenteile, Pumpen, Rohrleitungen, Ionenaustauscherharze, Luftfilter, kontaminierte Werkzeuge, Schutzkleidung, Dekontaminations- und Reinigungsmittel, Laboratoriumsabfälle, umschlossene Strahlenquellen, Schlämme, Suspensionen, Öle
- **Wärmeentwickelnde** Abfälle
 - Z.B. Spaltproduktkonzentrat, Hülsen, Strukturteile, Feedklärschlamm, gebrauchte Brennelemente



Herkunft schwach- und mittelaktiver Abfälle

- Schätzung für 2040 (Bundesamt für Strahlenschutz):
 - Etwa zwei Drittel aus Kernkraftwerken
 - Rest aus Medizin, Industrie, Forschung



Volumina radioaktiver Abfälle

- Schätzung für 2040 (Bundesamt für Strahlenschutz):
 - 277.000 m³ schwach- und mittelaktiver Abfall
 - 29.000 m³ hochaktiver Abfall



Radiotoxizität radioaktiver Abfälle (2040, BfS)

- Schätzung für 2040 (Bundesamt für Strahlenschutz):
 - 2 % der Radiotoxizität aus schwach- und mittelaktivem Abfall
 - 98 % der Radiotoxizität aus hochaktivem Abfall



Derzeitige Rechtslage in Deutschland

- Radioaktive Abfälle müssen nach geltendem Recht in einem **Endlager** entsorgt werden – egal, ob man sie noch weiter nutzen könnte oder nicht.
- Keine **Kreislaufwirtschaft**. Recycling ist nicht gestattet.
- Die Bundesrepublik Deutschland hat sich gesetzlich verpflichtet, Endlager für radioaktive Abfälle bereitzustellen.



- Endlager für schwach- und mittelaktive Abfälle:
 - **Schacht Konrad** (Salzgitter)
 - Inbetriebnahme nicht vor **2027**
- Endlager für hochaktive Abfälle:
 - Es gibt noch kein Endlager. Gemäß **Standortsuchgesetz** soll eines gefunden werden.
 - Etwa 2020: Benennung von Teilgebieten
 - Bis 2031: Entscheidung über einen Standort



Im Folgenden verstehen wir unter »Atommüll«
ausschließlich **hochaktiven Abfall** aus
gebrauchten Brennelementen.

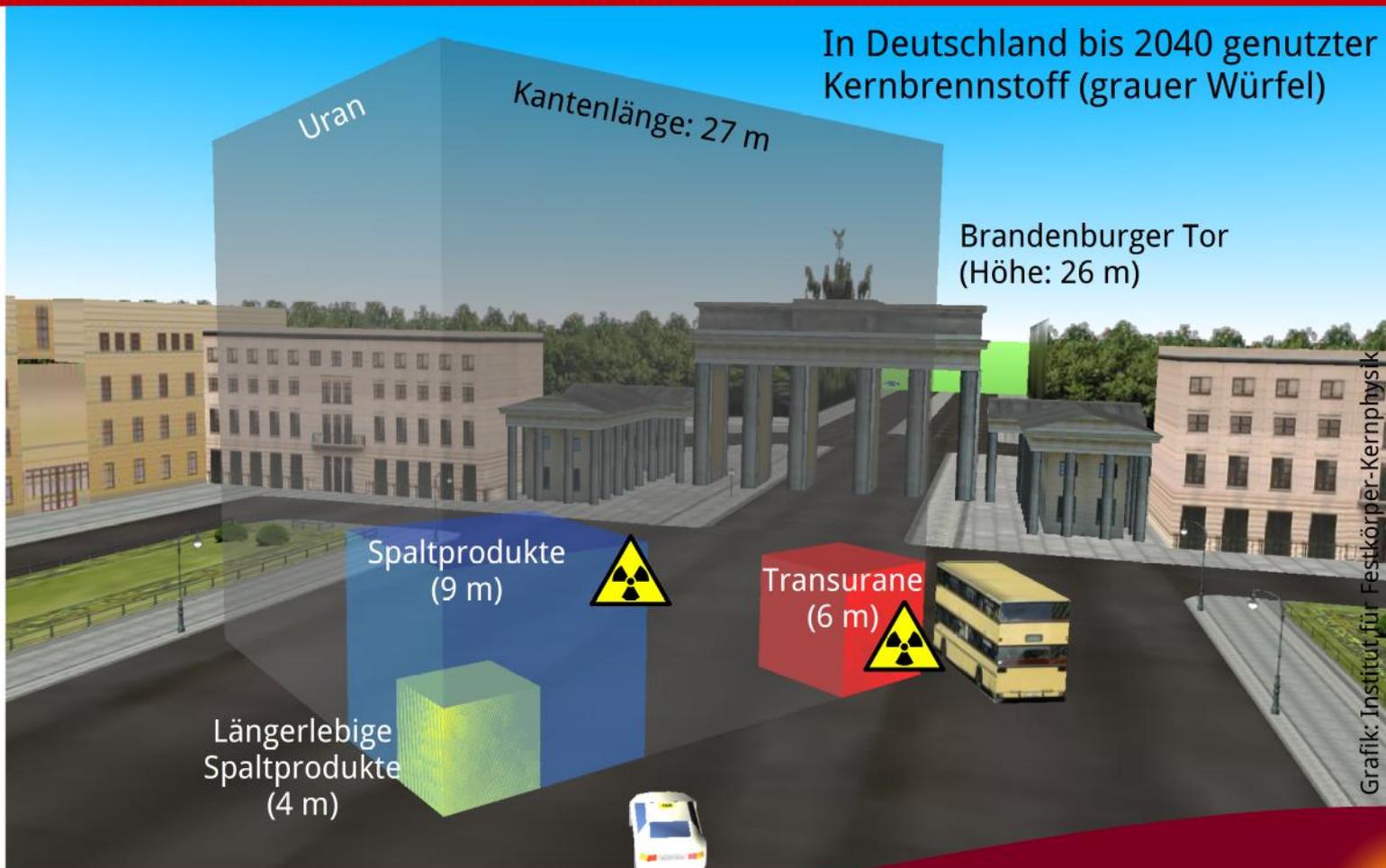


Atommüll in bestrahlten Brennelemente

- Fragen, die wir behandeln werden:
 - Wie viel hochaktiven Atommüll haben wir?
 - Was sind Brennelemente?
 - Wie entstehen die Abfallprodukte?
 - Wie setzt sich der radioaktive Abfall in Brennelementen zusammen?
- Wir werden drei verschiedene Abfalltypen kennenlernen:
 - Spaltprodukte, Uran, Transurane
- Radiotoxizität und Entsorgungsvarianten



Wie viel hochaktiven Atommüll haben wir?



Wie entsteht Atommüll im Kernreaktor?



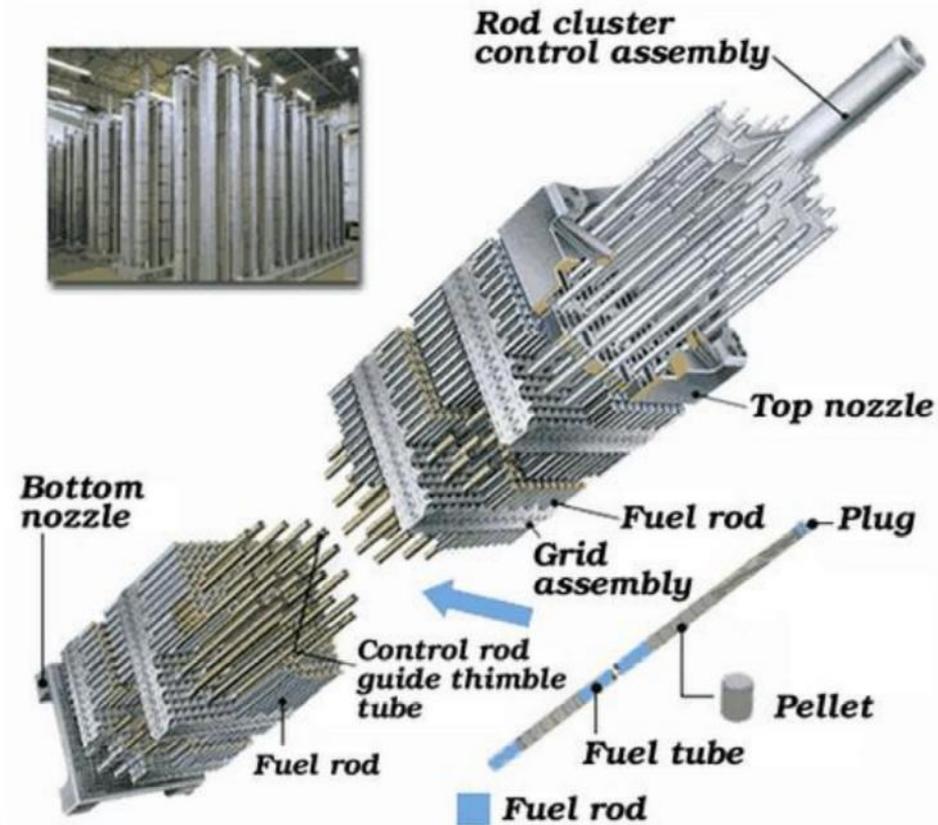
Was sind Brennelemente?



- **Pellets:** Kernbrennstoff aus
 - **Uranoxid** (U_3O_8) oder
 - **Uran-Plutonium-Mischoxid** (MOX)
- Frische Pellets sind nur ganz **schwach radioaktiv**.
- **Brennstab** aus Zirkalloy enthält die Pellets.
 - Gasdicht verschlossen
- Ach ja: Der Handschuh schützt die Pellets, nicht die Hand.



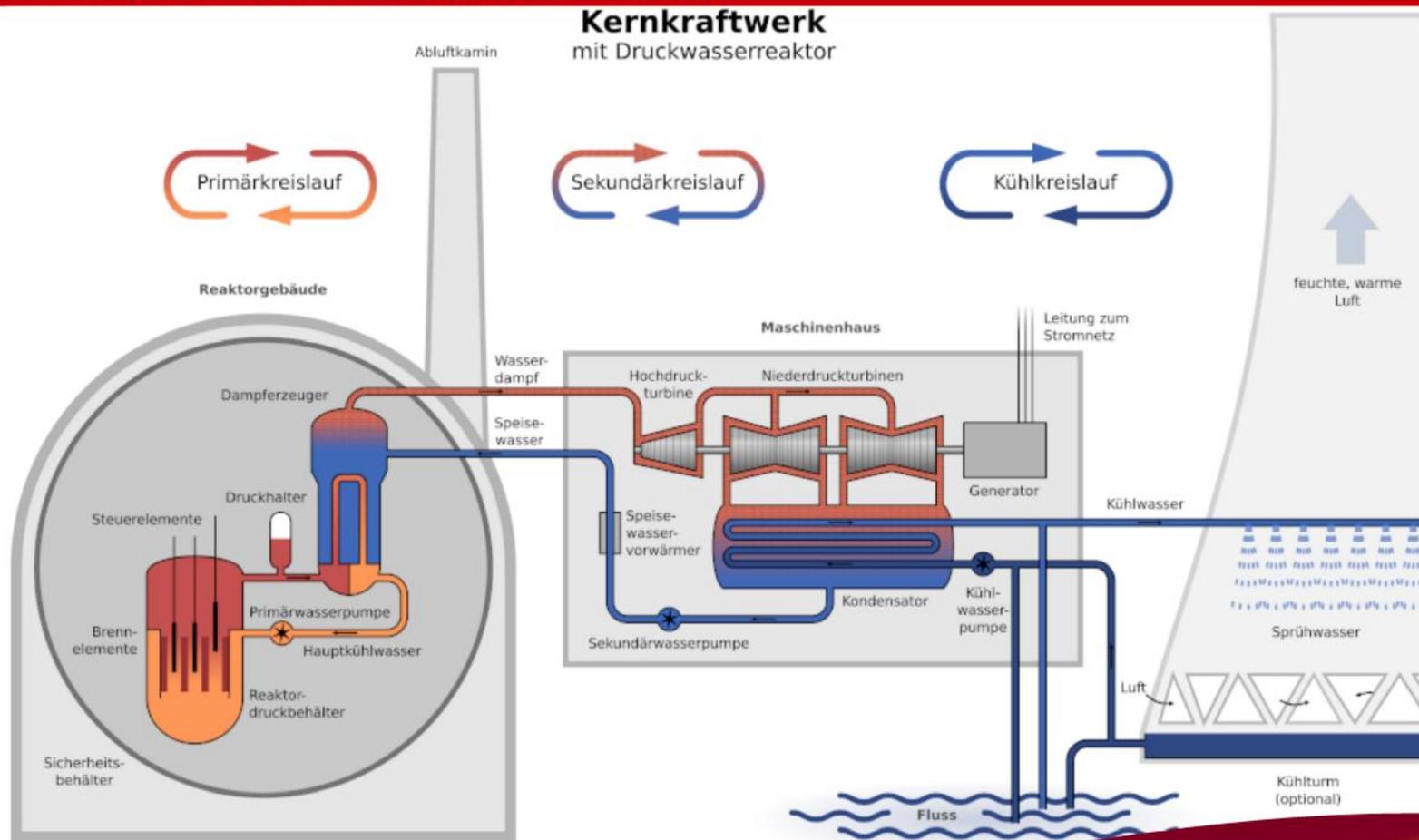
Was sind Brennelemente?



- Brennstäbe sind zu **Brennelementen** zusammengefasst.
- Ein Leistungsreaktor enthält typischerweise einige hundert Brennelemente.
- Einsatz im Reaktor ist durch Korrosion und Strahlung auf 3 – 5 Jahre begrenzt.

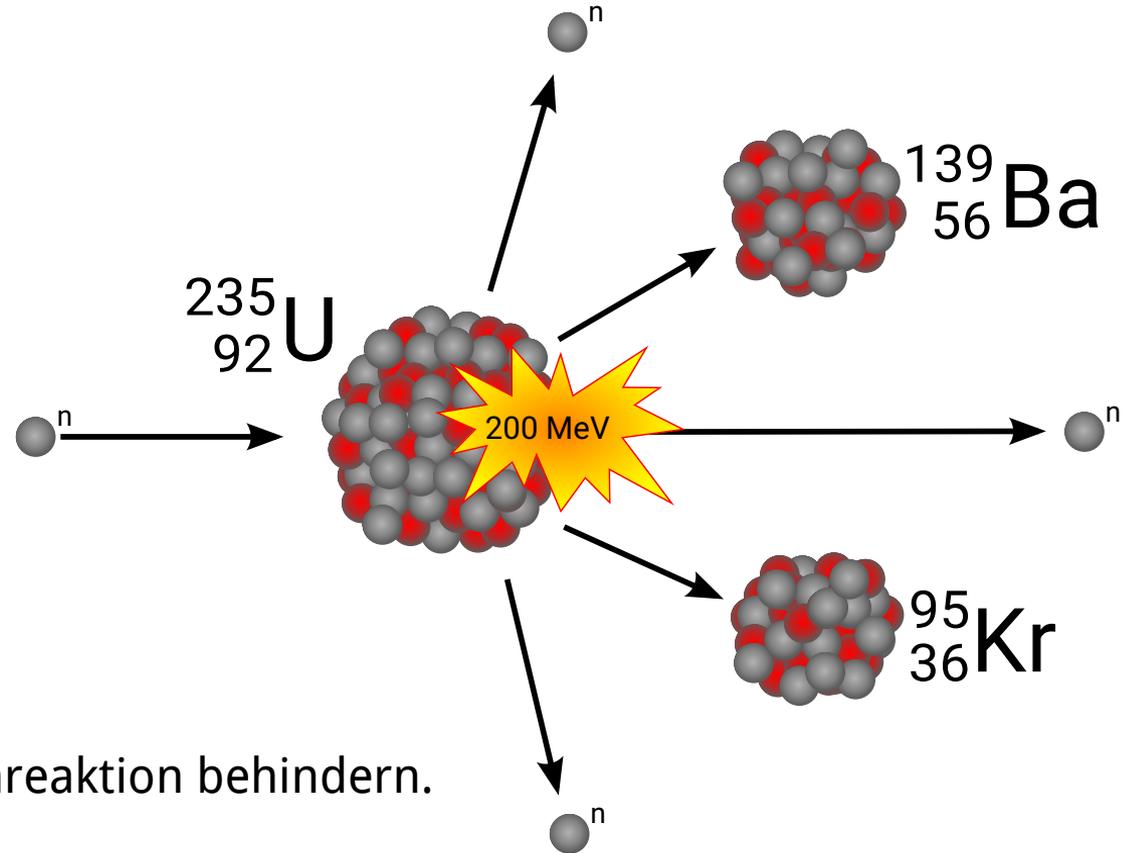


Wie funktioniert ein Kernkraftwerk?



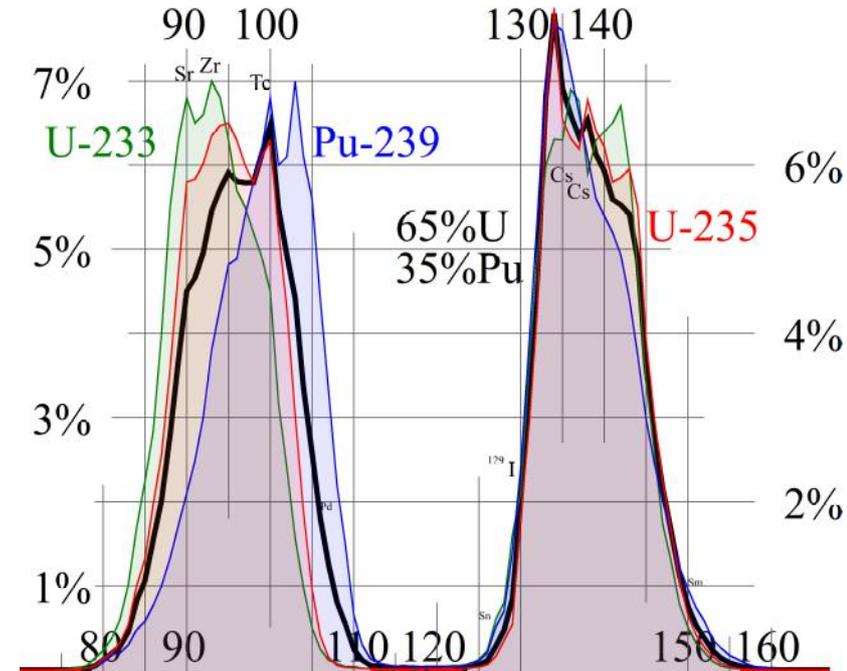
Kernspaltung und Kettenreaktion

- Freies Neutron dringt in den Kern eines **Uran-235**-Atoms ein.
- Kern teilt sich in (meist) zwei **Spaltprodukte**.
- Hohe **Energiefreisetzung**
- Zwei bis drei **Neutronen** für weitere Spaltungen
 - Nötig für **Kettenreaktion**
 - Neutronenverluste können Kettenreaktion behindern.



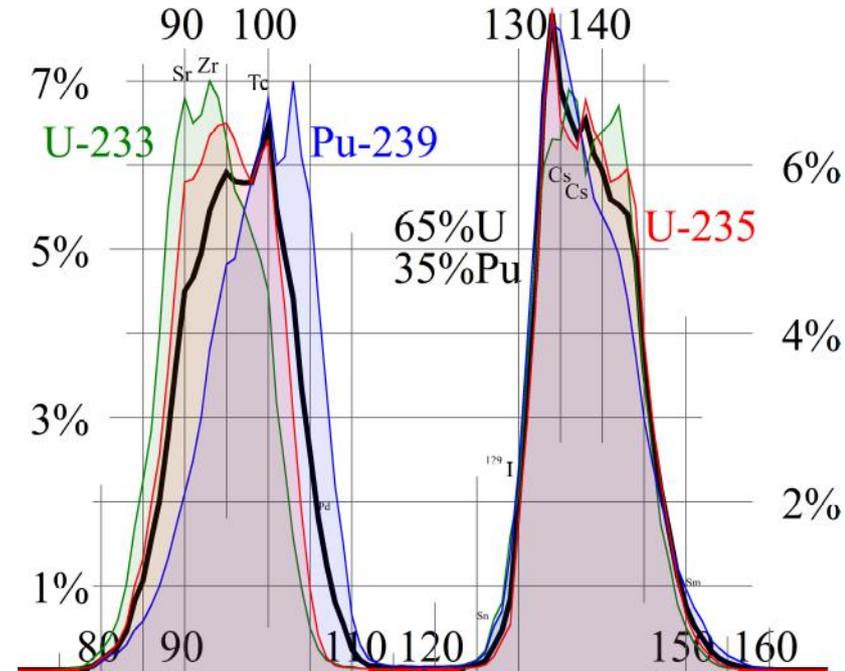
Spaltprodukte

- Es entsteht meist ein **kleineres** und ein **größeres** Spaltprodukt.
- Spaltprodukte sammeln sich in den Brennstäben.
- Spaltprodukte sind für den Reaktor **unbrauchbar** (Müll).
- Spaltprodukte beeinflussen die Kettenreaktion.
 - Reaktorgift Xenon-135 fängt Neutronen weg.
 - Reduktion durch Neutroneneinfang und radioaktiven Zerfall ($t_{1/2}$: 9,2 h).



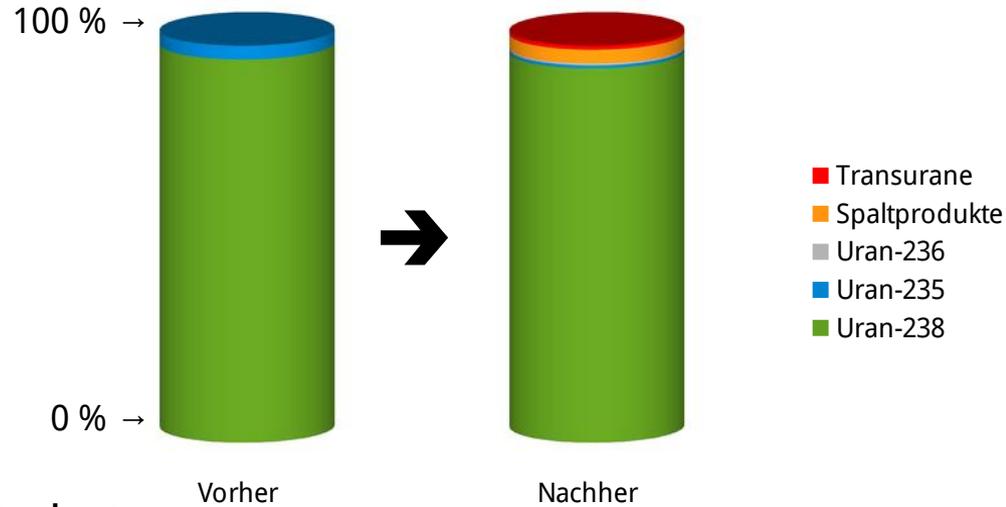
Spaltprodukte

- Es entstehen sowohl **stabile** als auch **radioaktive** Spaltprodukte.
- Weites Spektrum unterschiedlicher chemischer Elemente
- Radioaktive Spaltprodukte zerfallen zu weiteren stabilen und radioaktiven Isotopen im Gesamtmix.
- Am Ende stehen stabile Elemente.



Zusammensetzung bestrahlter Brennelemente

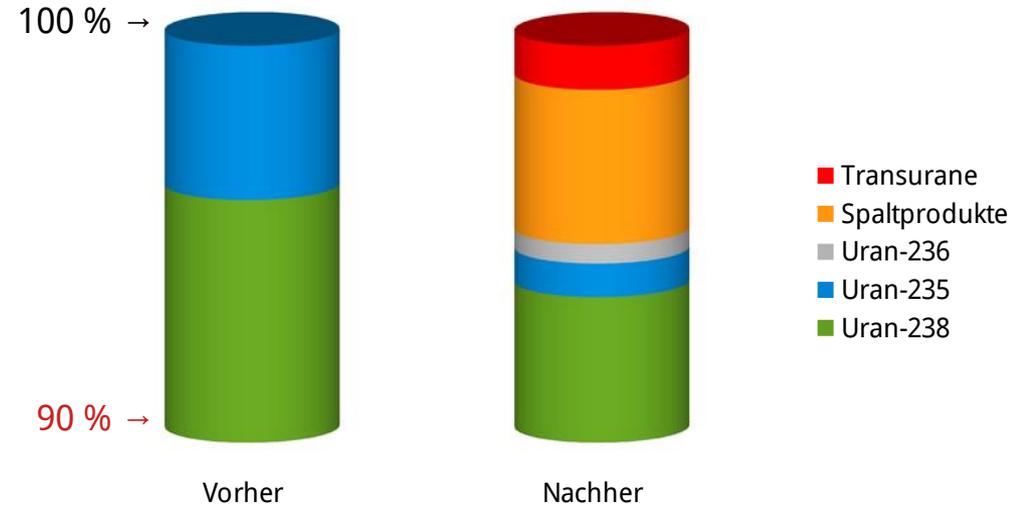
- Unbestrahlte, frische Brennelemente (linke Säule):
 - 3,5 % Uran-235: Spaltmaterial
 - 96,5 % Uran-238: in herkömmlichen, »thermischen« Reaktoren nicht spaltbar (= nicht nutzbar)
- Bestrahlte, »abgebrannte« Brennelemente (rechte Säule):
 - Der gewaltige Anteil U-238 ist fast unverändert. U-238 bleibt im thermischen Reaktor praktisch ungenutzt.
 - Schauen wir uns die oberen Bereiche der Säulen genauer an ...



Zusammensetzung bestrahlter Brennelemente

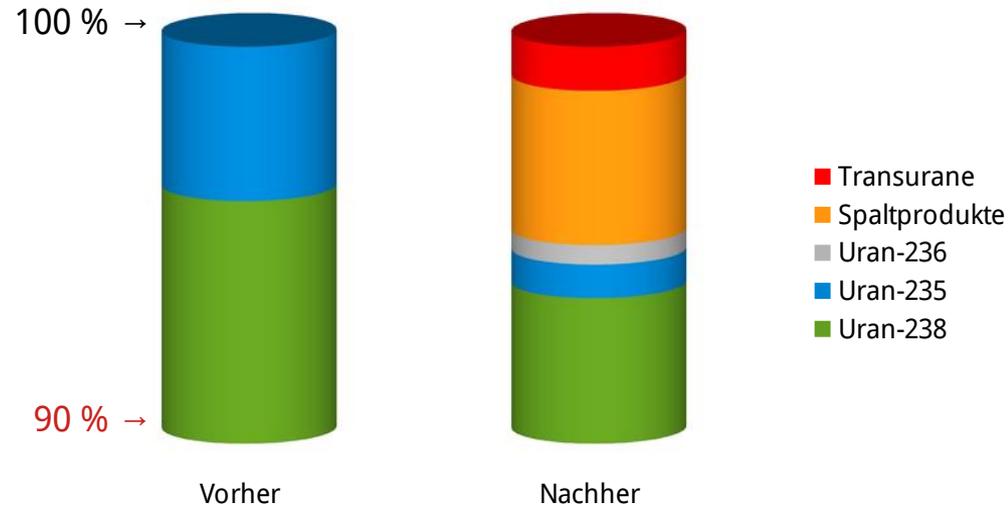
- **Zusammensetzung** bestrahlter Brennelemente

- 1,00 % Transurane
- 3,50 % Spaltprodukte
- 0,44 % Uran-236
- 0,76 % Uran-235
- 94,30 % Uran-238



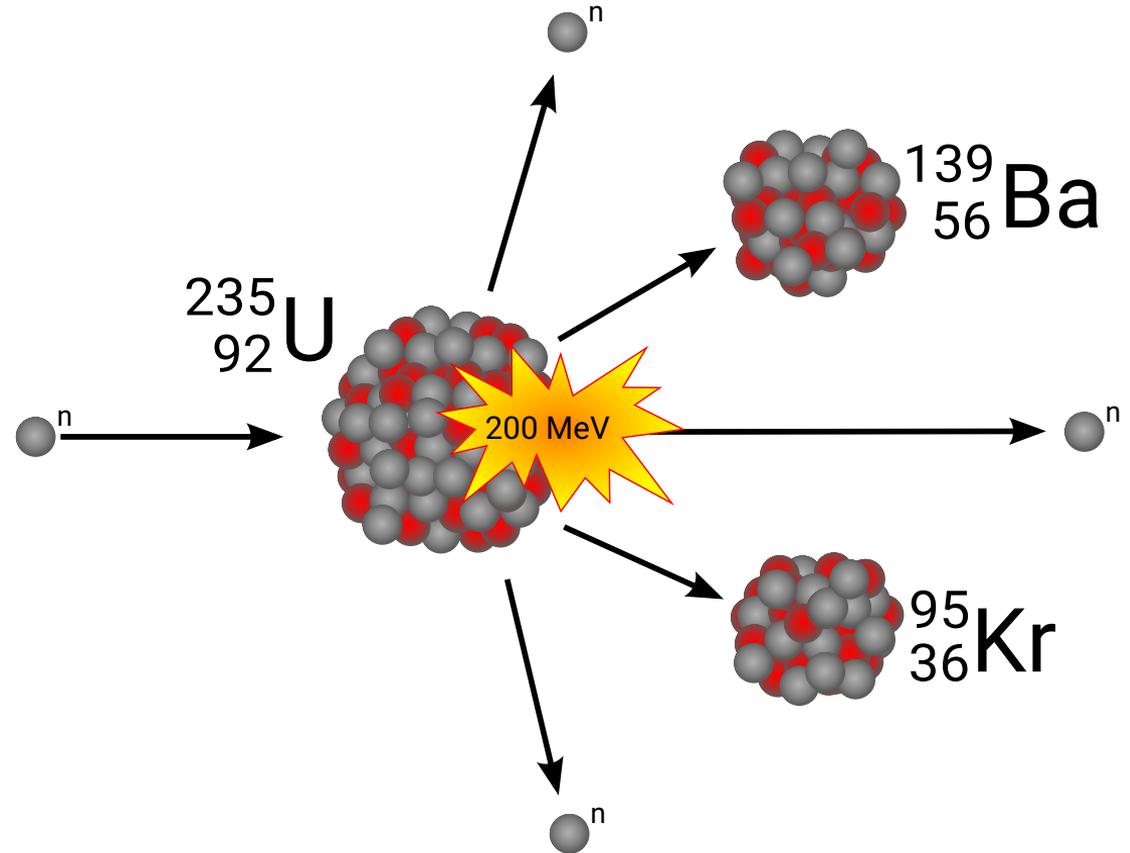
Zusammensetzung bestrahlter Brennelemente

- **Transurane:** Plutonium, Neptunium, Americium, Curium usw.
 - Der besonders üble, langlebige Teil des Abfalls
- **Uran-236:** entsteht aus Uran-235 durch Neutroneneinfang
 - Im Leichtwasserreaktor nicht spaltbar, also Abfall
- **Spaltprodukte:** Abfall



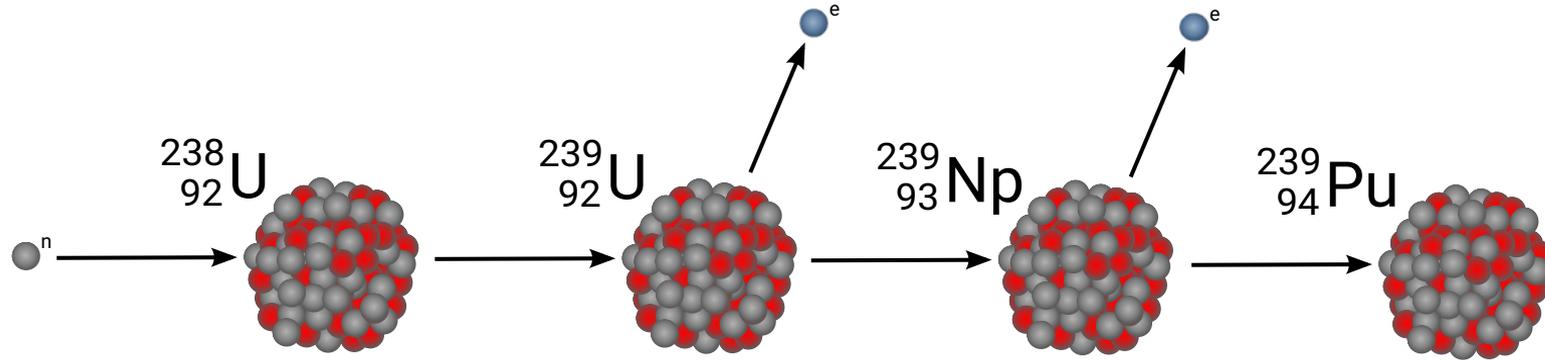
Transurane (Plutonium und Konsorten)

- **Transurane** sind Elemente, die im Periodensystem jenseits des Urans liegen, z.B. Plutonium.
- Sie entstehen beim Betrieb des Reaktors aus dem eigentlich ungenutzten **Uran-238**.
- Wir haben gesehen, was passiert, wenn ein freies Neutron auf einen Uran-235-Kern trifft: Kernspaltung.



Neutroneneinfang erbrütet Transurane

- Was passiert, wenn ein freies Neutron auf einen Uran-**238**-Kern trifft?



- Kern spaltet sich nicht, sondern wird zu Uran-**239** und über zwei β --Zerfälle zu spaltbarem **Plutonium-239** («Brüten«).
- Leichtwasserreaktor erbrütet mehr Plutonium, als er nutzt.
- Durch weiteren Neutroneneinfang entstehen aus Plutonium weitere Transurane.



- Uran-236 entsteht durch **Neutroneneinfang** aus Uran-235.
- Absorbiert ein U-235-Kern ein Neutron, kommt es
- in 82 Prozent der Fälle zur Kernspaltung,
- in 18 Prozent der Fälle zum Neutroneneinfang → U-236.
- Halbwertszeit: **23,48 Millionen Jahre**
- 190-fach höhere Aktivität als Uran-238
- Damit hat der U-236-Anteil von 0,44 % am Brennelement fast dieselbe **Radiotoxizität** wie der U-238-Anteil von 94,3 %.



Gefahren durch Atommüll



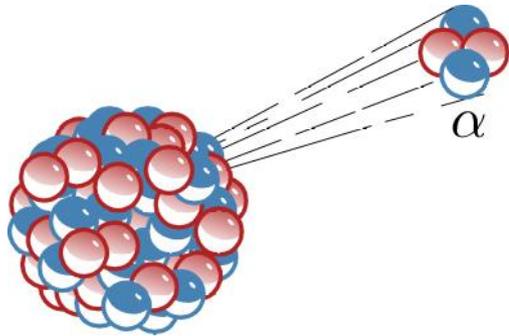
Langlebigkeit des Atommülls

- Häufiges Argument gegen Kernenergie: Die Abfälle strahlen Jahrtausenden!
- Atommüll in bestrahlten Brennelementen ist **hochradioaktiv** und **langlebig**.
- Die **radioaktiven** Substanzen zerfallen über verschiedene radioaktive Zwischenstufen zu **stabilen** Isotopen.
- Wie lange dauert das?
- Wann ist die **Radiotoxizität** des Atommülls auf ein unbedenkliches Maß abgeklungen?
- Wichtiges (aber nicht einziges) Kriterium bei diesen Fragen ist die **Halbwertszeit**.



Exkurs: Halbwertszeit





- Wie lange dauert es, bis ein radioaktives Atom zerfällt?
- Kann man für ein **einzelnes Atom** nicht sagen. Es kann im nächsten Moment zerfallen oder nie.
- Hat man eine **sehr große Anzahl von Atomen**, sind statistische Aussagen möglich.
- **Halbwertszeit:** Zeit, nach der die Hälfte einer bestimmten Menge einer radioaktiven Substanz zerfallen ist.
 - Beispiel: Von 100 g Radium-226 sind nach 1.600 Jahren noch 50 g übrig, nach weiteren 1.600 Jahren 25 g usw.
- **Faustformel:** nach $10 \times$ Halbwertszeit ist fast nichts mehr da.



- Die C-14-Methode zur Altersbestimmung macht sich die Halbwertszeit des Kohlenstoff-Isotops C-14 zunutze:
 - **Kohlenstoff-14: 5.700 ± 30 Jahre**
- Von Nuklearunfällen her besonders gut bekannte Spaltprodukte:
 - **Jod-131: 8,0252 Tage**
 - **Cäsium-134: 2,0652 Jahre**
 - **Cäsium-137: 30,08 Jahre**



- Hauptquelle von Radioaktivität in der Natur, in allen Lebensmitteln enthalten:
 - **Kalium-40: 1,248 Milliarden Jahre**
 - Kalium ist das siebthäufigste Element in der Erdkruste.
 - Trägt zur Radioaktivität unseres Körpers bei (ca. 100 Bq/kg).
- Gasförmiges Zerfallsprodukt von Uran-238 in der Erdkruste:
 - **Radon-222: 3,8235 Tage**
 - Kann sich z.B. in Kellern ansammeln → Lüften ist wichtig.
- Interessant für Raucher, da im Tabak enthaltener starker Alpha-Strahler:
 - **Polonium-210: 138,376 Tage**



- Brennstoff für herkömmliche Kernreaktoren:
 - **Uran-235: 703,8 Millionen Jahre**
 - 0,72 % des Natururans
- Brennstoff für moderne Kernreaktoren:
 - **Uran-238: 4,468 Milliarden Jahre**
 - 99,28 % des Natururans
 - **Thorium-232: 14,05 Milliarden Jahre**
 - 3 – 4 mal so häufig wie Uran



- Was ist gefährlicher: ein Stoff mit **kurzer** oder mit **langer Halbwertszeit**?
- Dazu betrachten wir den Begriff der **Aktivität**.
- **Aktivität**: Anzahl der Zerfälle pro Sekunde und Masse
 - Maßeinheit für die Anzahl der Zerfälle pro Sekunde: **Becquerel (Bq)**
 - Aktivität wird z.B. in **Bq/kg** angegeben.
- Bei einer langen Halbwertszeit zerfallen pro Sekunde sehr viel weniger Atome als bei einer kurzen Halbwertszeit.
- Je **länger** die Halbwertszeit, desto **niedriger** die Aktivität.
- Je **kürzer** die Halbwertszeit, desto **höher** die Aktivität.

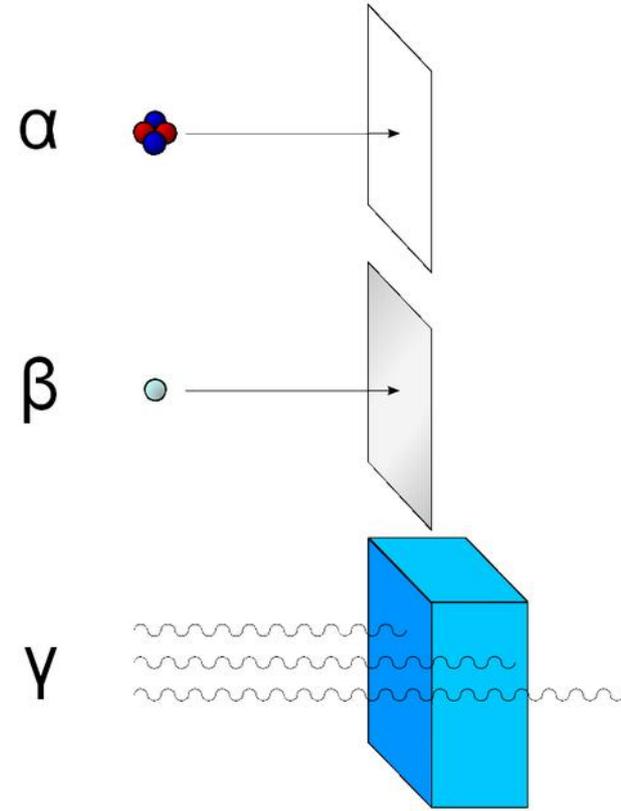


Gefahren durch Atommüll

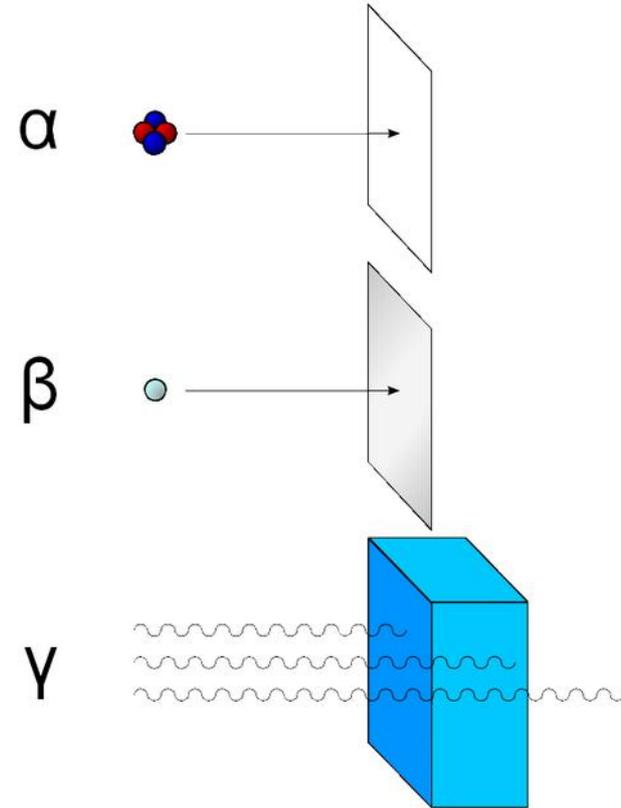


Gefahren durch Atommüll

- **Strahlung** durch radioaktive Substanzen außerhalb des menschlichen Körpers
 - Risiko für die Umgebung des Strahlers
 - Schutz recht einfach möglich durch
 - **Abschirmung**
 - **Abstand**



- **Die wichtigsten Arten ionisierender Strahlung:**
 - **α -Strahlung:** durchdringt nicht einmal ein Blatt Papier
 - **β -Strahlung:** reicht nur wenige Zentimeter weit, Abschirmung z.B. durch Aluminiumblech
 - **γ -Strahlung:** lässt sich nur dämpfen, nicht komplett eliminieren, z.B. durch Blei oder Beton. Nötige Dicke der Abschirmung hängt von der Energie der Strahlung ab.



- **Wärmeentwicklung**
 - Radioaktiver Zerfall setzt Energie frei (Wärme)
 - Risiko für die unmittelbare Umgebung der wärmeentwickelnden Substanz
 - Veränderung der Gebäude- oder Gesteinsstrukturen
 - Beschädigung/Zerstörung der Anlagen
 - Schutz durch
 - wärmeresistente Lagerung
 - ausreichende Kühlung



- **Proliferation**

- Weitergabe von Materials zwecks Herstellung von Waffen
- Risiko Nuklearwaffen
 - Geringes Risiko, da Plutonium aus Leichtwasserreaktoren nicht waffenfähig ist
 - Geringes Risiko, da gerade Staaten mit Kernenergie besonders unter Beobachtung stehen
 - IAEA Safeguards
- Risiko Terror
 - Schmutzige Bombe: erzeugt mehr Angst vor »Atom« als tatsächlichen Schaden
- Schutz des Atommülls durch Überwachung oder Unzugänglichkeit



- **Radioaktive Substanzen im Körper**
 - Risiko für Menschen
 - Schädigung der Zellen
 - Krebs
 - **Radionuklide dürfen nicht in die Nahrungskette gelangen!**
 - Schutz durch Bindung in unlösliche Feststoffe
 - Wie gefährlich die Strahlung eines bestimmten Stoffes im Körper tatsächlich ist, hängt von seiner **Radiotoxizität** ab.



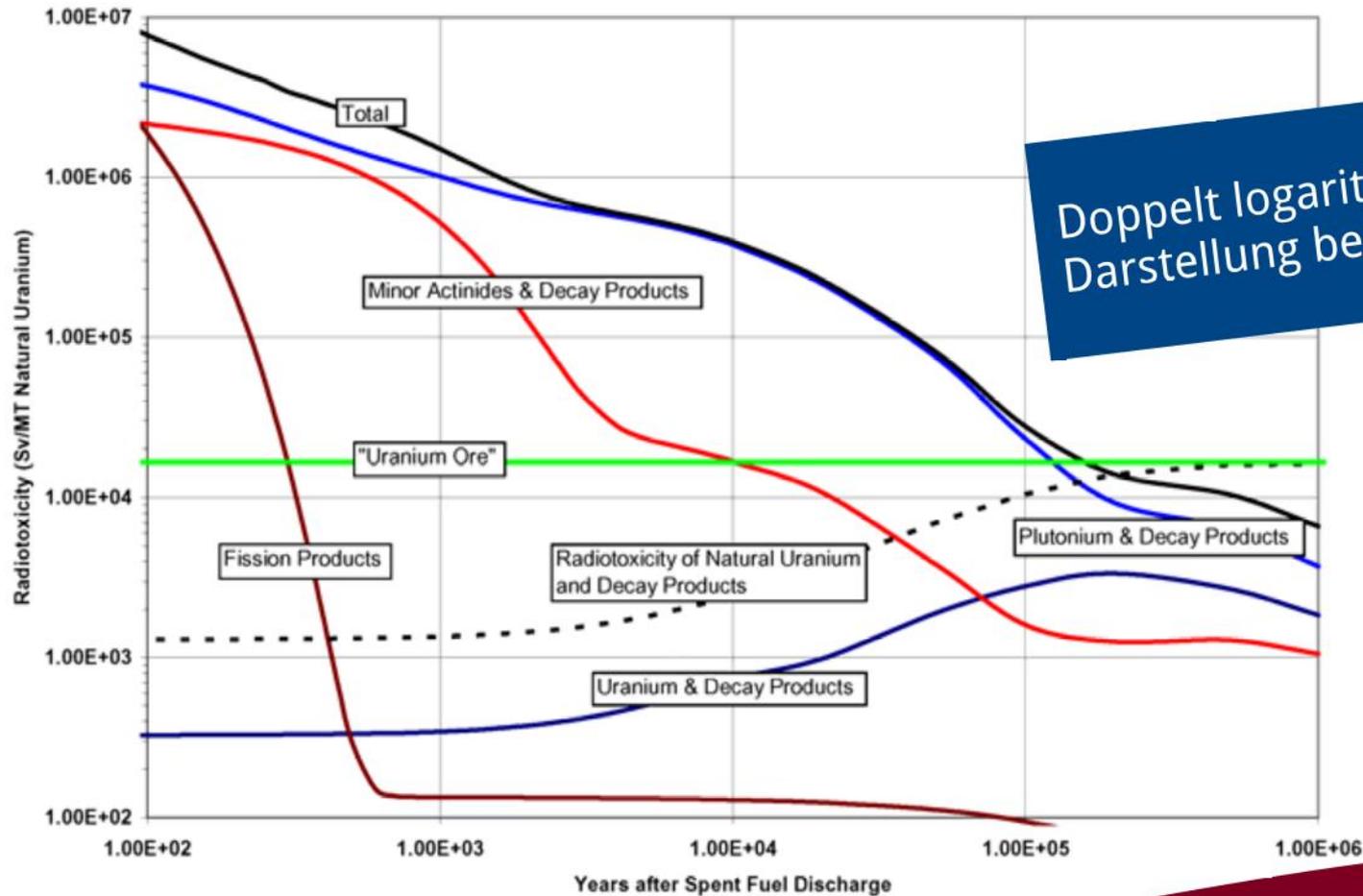
Radiotoxizität



- Fachbegriff **Radiotoxizität:**
 - *»Aktivität jedes Radionuklids multipliziert mit einem Toxizitätsfaktor; normalerweise ein radionuklidspezifischer Dosisumrechnungsfaktor für den Verzehr (Sv/Bq). Maßeinheit in Sievert.«* (Bundesamt für Strahlenschutz)
 - Maß für die **Gefährlichkeit eines Stoffes im Körper** aufgrund seiner Radioaktivität.
- Abfallstoffe mit unterschiedlicher Radiotoxizität in bestrahlten Brennelementen:
 - **Spaltprodukte**
 - Transurane (**Plutonium** + **minore Actinoide**)
 - Uran

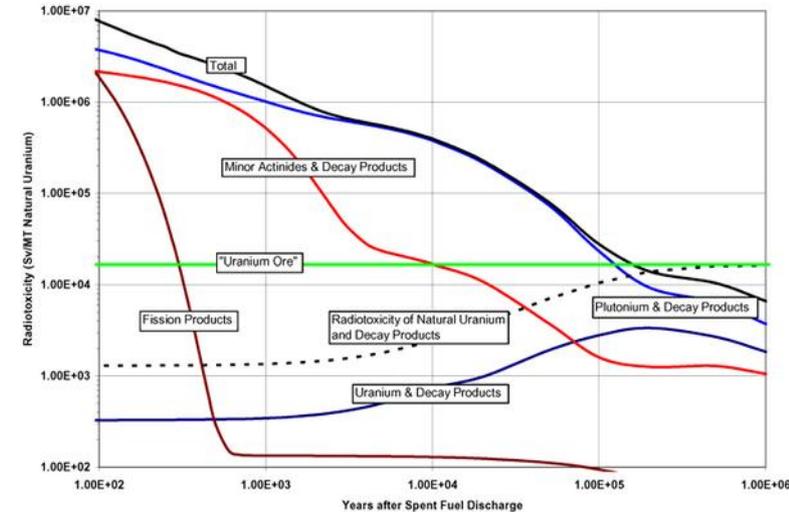


Radiotoxizität des Atommülls



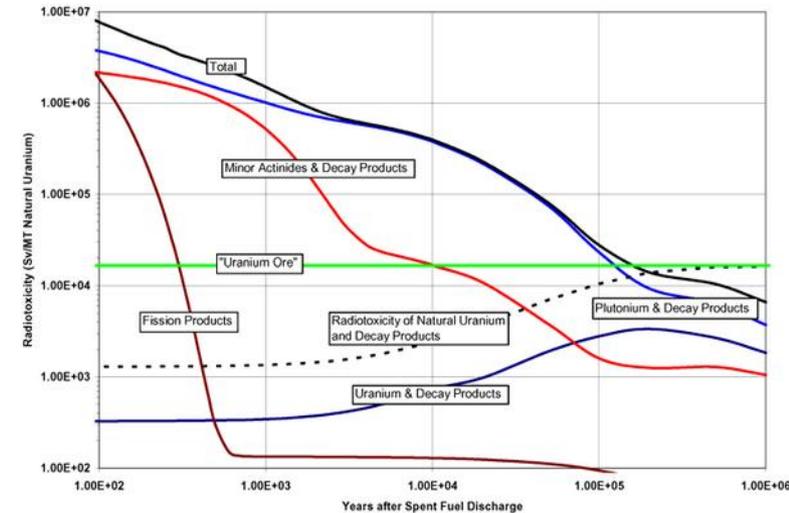
Radiotoxizität der Spaltprodukte

- **Spaltprodukte** (braune Kurve) haben durchweg eine kurze Halbwertszeit.
- Die Radiotoxizität ist anfangs sehr hoch, klingt dann aber schnell ab.
- Nach **300 Jahren** erreicht die Radiotoxizität der Spaltprodukte das Niveau von **Uranerz**, wie es in der Natur vorkommt \approx **1 Promille** des Ausgangswerts.
- Nach **800 Jahren** liegt die Radiotoxizität der Spaltprodukte nur noch bei einem Prozent von Uranerz \approx **0,01 Promille** des Ausgangswerts.



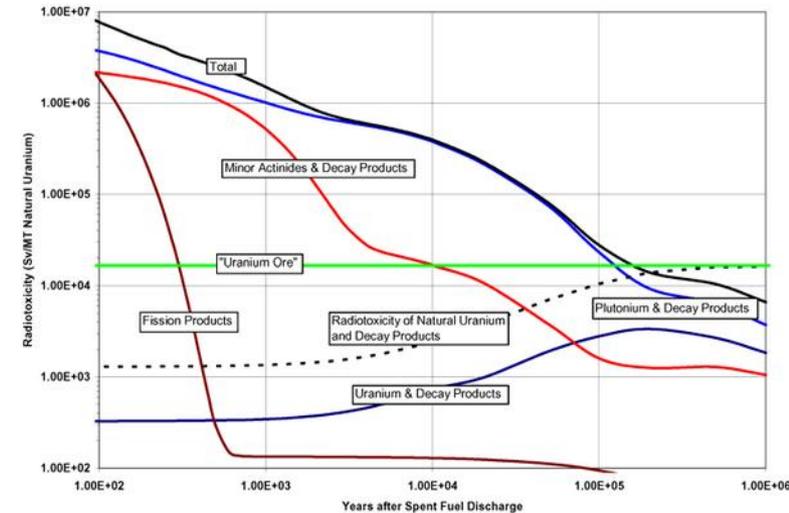
Radiotoxizität der Transurane

- **Plutonium** und seine Zerfallsprodukte (blaue Kurve) stellen den wesentlichen Anteil an der Radiotoxizität der Transurane.
- Hinzu kommen vor allem Neptunium, Americium, Curium, Californium: die sogenannten **minoren Actinoide** (rote Kurve).
- Die Radiotoxizität der Transurane klingt nur **sehr langsam** ab.
- Transurane – besonders Plutonium – dominieren die Gesamtradiotoxizität (schwarze Kurve).
- Niveau von Uranerz erst nach etwa **300.000 Jahren**



Radiotoxizität des Urans

- **Uran** und seine Zerfallsprodukte besitzen anfangs nur eine **geringe** Radiotoxizität (dunkelblaue Linie).
- Radiotoxizität steigt später durch die radioaktiven **Zerfallsprodukte** des Urans bis zum Zehnfachen an und nimmt dann wieder ab.
- Maximum bei ca. 300.000 Jahren



Entsorgungsmöglichkeiten



Wohin mit dem Atommüll?

- Es gibt prinzipiell drei ernsthaft diskutierte Lösungen:
 - **Direkte Endlagerung** ← geltendes Recht (Atomgesetz)
 - **Rückgewinnung des Plutoniums** für MOX-Brennelemente
 - **Partitionierung und Transmutation (P&T)**: Abtrennung von Uran und Transuranen, Nutzung als Kernbrennstoff
- **Zwischenlagerung** ist möglich, schiebt aber eine endgültige Lösung nur auf.
- Entsorgung des Atommülls im **Weltraum** bzw. in der **Sonne** ist völlig unrealistisch:
 - Viel zu teuer, mindestens 10.000 €/kg nur bis zur Erdumlaufbahn
 - Viel zu gefährlich, z.B. bei Fehlstarts



- Atommüll wird in **tiefen geologischen Schichten** entsorgt.
- In Deutschland gesetzlich vorgeschrieben
- **Keine Reduktion** der Radiotoxizität
- Erste Silbe des Wortes **Endlagerung** verrät die Absicht:
 - Keine Rückholmöglichkeit
 - Aber: Endlagerkommission empfiehlt Möglichkeit der Rückholung, solange die Behälter unbeschädigt sind.
- Deutschland will nicht 300.000, sondern **1.000.000 Jahre** sichere Verwahrung.
- Finnland baut zur Zeit das **Endlager Onkalo** für hochradioaktive Abfälle.



- Rückholbarkeit ist aus Sicht der **Proliferationssicherheit** langfristig eher bedenklich:
 - Plutonium ist durch hohen Pu-240-Anteil zunächst nicht waffenfähig.
 - Die hochaktiven Spaltprodukte zerfallen recht schnell.
 - Anteil des spaltbaren Materials steigt mit der Zeit an.
 - Das nicht spaltbare Pu-240 zerfällt schneller als das spaltbare Pu-239.
 - Das Pu-239 bekommt dadurch einen höheren Reinheitsgrad.
 - Das spaltbare Pu-239 zerfällt zu spaltbarem U-235.
 - Nach ca. **9.000 Jahren** kann man nach **waffenfähigem Material** graben.



- Anforderungen an ein Endlager:
 - Dauerhafte Trennung der Radionuklide von der Biosphäre
 - Sicher gegenüber geologischen Einflüssen
 - Erdbeben, Verschiebungen, Wassereinbruch usw.
 - Sicher gegenüber Wärmeentwicklung der Abfälle
 - Sicher gegen unbefugte Zugriffe
 - Das alles für mindestens 300.000 Jahre – oder sogar 1.000.000 Jahre
- **Ist das zu gewährleisten?**



Plutonium-Rückgewinnung (MOX-Brennelemente)

- Rückgewinnung von Uran und Plutonium (PUREX-Verfahren) und Herstellung von **Mischoxid-Brennelementen (MOX)**
- Recycling ist nur wenige Male wiederholbar, weil immer mehr **nichtspaltbares Plutonium** entsteht.
 - Pu-240, Pu-242, Pu-238
 - Abtrennung nur der spaltbaren Isotope ist technisch nicht machbar.
- Ergebnis: Reduktion der Radiotoxizität um **10 Prozent**
- Der Rest muss ins Endlager.
- **Ist das zielführend?**



Atommüll-Recycling durch Partitionierung und Transmutation

- Problematischer, langlebiger Anteil des Atommülls:
 - Uran + Transurane = **Actinoide**
- Actinoide lassen sich mittels **schneller Neutronen** spalten.
 - **Transmutation**
- Übrig bleiben nur noch Spaltprodukte.
- Radiotoxizität der Spaltprodukte fällt **erheblich schneller** als die der Actinoide:
 - Nach **300** Jahren: **1 Promille** des Ausgangsmixes ($\hat{=}$ Uran)
 - Nach **800** Jahren: **0,01 Promille** des Ausgangsmixes ($\hat{=}$ 1 Prozent von Uran)
- **Die einzige wirkliche Lösung!**



Wie funktioniert das?

- Herkömmliche Reaktoren arbeiten mit **langsamen** Neutronen, sogenannten **thermischen** Neutronen.
- Die bei der Kernspaltung freiwerdenden Neutronen sind zunächst schnell, doch das Wasser im Reaktor bremst sie stark ab.
- Thermische Neutronen spalten praktisch nur Kerne mit **ungeraden Massenzahlen**.
 - Spaltbar: U-235, Pu-239, Pu-241, U-233 usw.
 - Nicht spaltbar: U-238, U-236, Pu-240, Pu-242, Pu-238 usw.



Wie funktioniert das?

- **Schnelle** Neutronen spalten **sämtliche** Isotope der Actinoiden.
 - Alle mit geraden und ungeraden Massenzahlen
 - Alle Transurane
 - Alle Uran-Isotope
- Technische Lösungen, die mit schnellen Neutronen arbeiten:
 - **Schnelle Reaktoren**
 - **Subkritische Transmutationsanlagen**



Schnelle Reaktoren



- Der **Schnelle Reaktor** heißt so, weil er mit schnellen (energiereichen) Neutronen arbeitet.
- Drei Varianten:
 - **Schneller Brüter:** erzeugt **mehr** Spaltmaterial, als er verbraucht.
 - **Schneller Brenner:** erzeugt **weniger** Spaltmaterial, als er verbraucht.
 - Erzeugung und Verbrauch halten sich die Waage (Equilibrium).



Unterschiede zu herkömmlichen Reaktoren

- Kühlmittel darf Neutronen **nicht abbremesen**.
 - Flüssiges **Metall** oder **Helium**
- Metallkühlung ermöglicht Betrieb unter **Normaldruck**.
 - Sicherheitsgewinn gegenüber wassergekühlten Reaktoren, die unter hohem Überdruck arbeiten
 - Keine radioaktive Wolke möglich



Unterschiede zu herkömmlichen Reaktoren

- **Inhärente Sicherheit**
- Sicherheit wird durch **Physik und Naturgesetze** gewährleistet, nicht durch aktive Sicherheitssysteme, die ausfallen könnten
- Der Reaktor ist so konstruiert, dass er auch bei schweren Störungen stabil bleibt.
 - “Walk-away safety”
 - Kein Strom, kein Personal? Kein Problem!
 - Wurde 1986 am Experimental Breeder Reactor II (EBR-II) erfolgreich demonstriert.
 - Komplette Abschaltung der Kühlsysteme

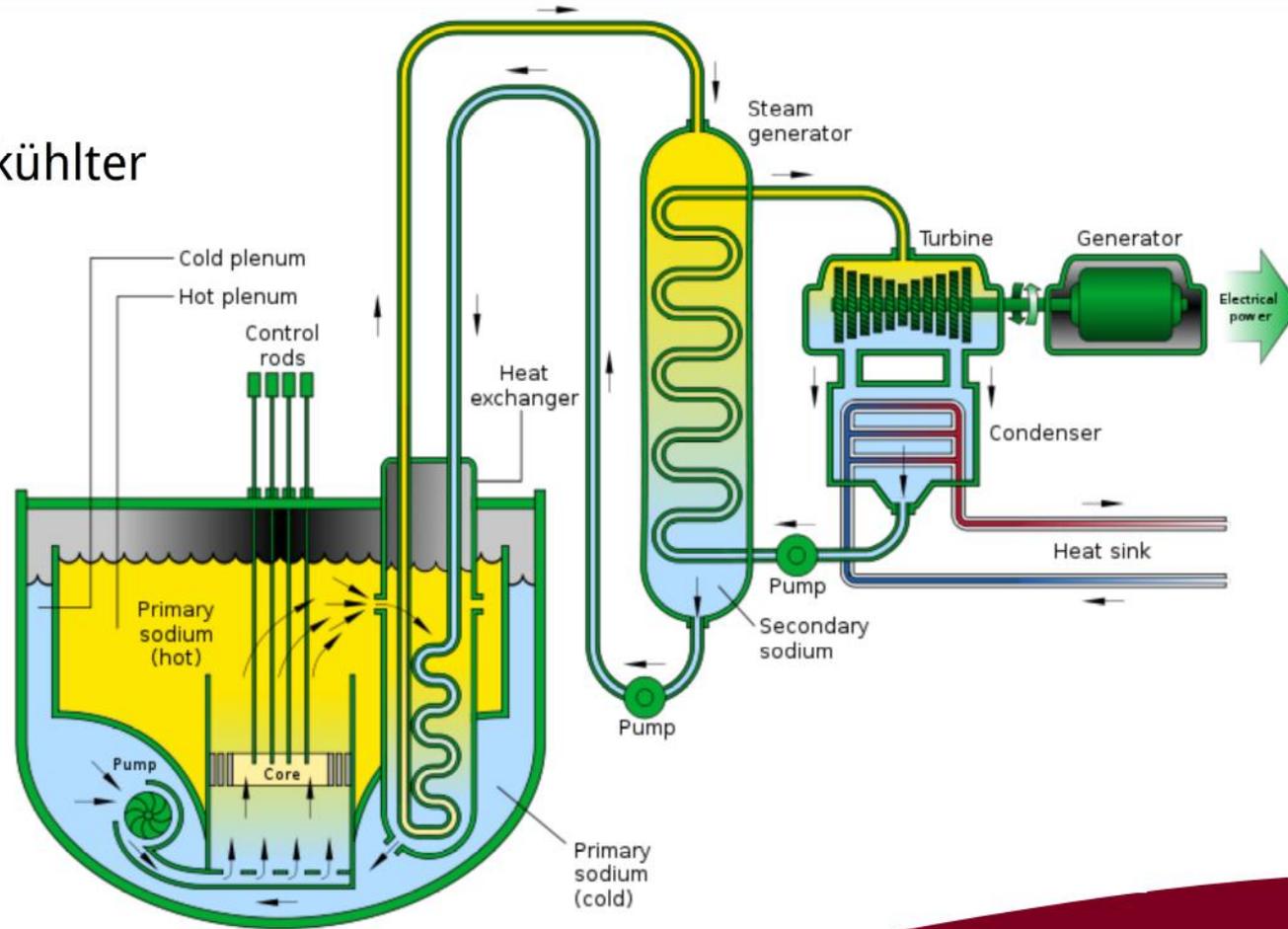


- Von allen Schnellreaktortypen am weitesten entwickelt: **schnelle natriumgekühlte Reaktoren** (Sodium-cooled Fast Reactor, SFR)
- Beliebtes Kühlmittel, weil flüssiges Natrium Reaktorbehälter und Rohre nicht angreift.
- Kontakt mit Wasser oder Sauerstoff vermeiden!
- Entgegen landläufiger Ansicht sind Natriumbrände nicht katastrophal, sondern bleiben relativ klein und gut beherrschbar.
 - 27 Natriumlecks beim russischen BN-600 in den ersten 14 Jahren, dabei 14 Brände
 - Die Schäden blieben gering und wurden repariert. Die Anlage läuft heute noch.



Sodium-Cooled Fast Reactor (SFR)

- Schneller natriumgekühlter Reaktor



Integral Fast Reactor (IFR)

- Projekt der USA zur Entwicklung eines metallgekühlten Schnellreaktors
- Brennelemente aus **Metall** statt aus Oxid
 - Sehr guter Wärmeleiter → geringere Gefahr der Überhitzung
 - Höherer negativer Reaktivitätskoeffizient
 - Reaktivität sinkt bei steigender Temperatur



Integral Fast Reactor (IFR)

- Integrierte Wiederaufarbeitungsanlage
 - **Pyroprozessor** trennt Spaltprodukte ab.
 - Verbleibender Uran-/Transuranmix wird zu neuen Brennelementen gegossen.
 - Pyroprozessor ist **integraler** Bestandteil der Anlage.
 - **Keine Plutonium-Transporte** von/nach außerhalb der Anlage
 - **Proliferationsschutz** durch Integration von Reaktor und Wiederaufarbeitung
- Das IFR-Projekt wurde 1994 von der Clinton-Regierung gestoppt.

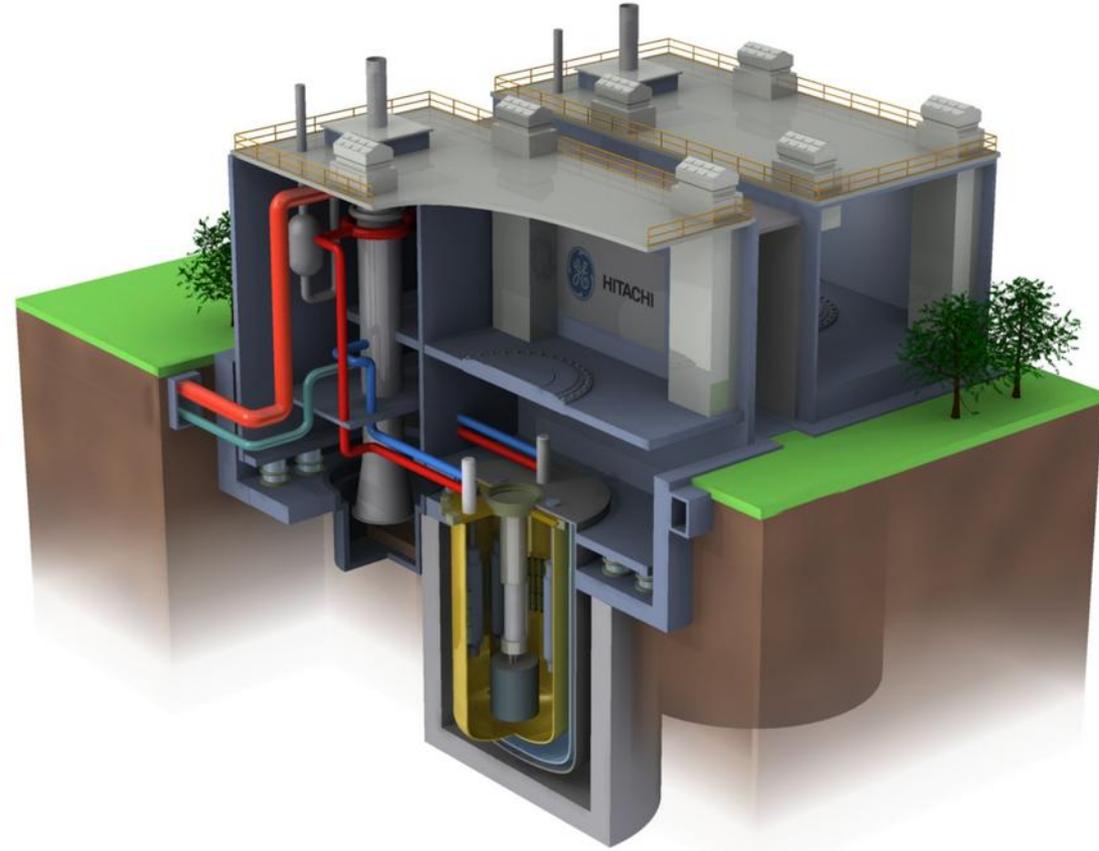


Experimental Breeder Reactor II

- Forschungsreaktor und **IFR-Prototyp**
- 20 MW elektrische Leistung
- Von 1965 – 1994 Einsatz am Argonne National Laboratory (USA)
- **30 Jahre** Erfahrung
- Alle **IFR-Komponenten** wurden am EBR-II fertig entwickelt.



- ♦ »Kleiner« IFR **ohne Pyroprozessor**
- ♦ Hersteller: GE Hitachi Nuclear Energy
 - ♦ IFR-Wissen und -Ergebnisse stecken heute im PRISM.
 - ♦ Weiterentwicklung des EBR-II
- ♦ Angebot zur Verarbeitung von 140 t Plutonium liegt **Großbritannien** vor.
- ♦ Grundlage für den von den USA geplanten **Versatile Test Reactor (VTR)**



Advanced Recycling Center

- Sechs **PRISM**-Reaktoren + ein **Pyroprozessor** zur Wiederaufarbeitung
- 1.866 MW
- Kommerziell verfügbar
- **“Waste to Watts”**
- **Kosten:** Erste Anlage mit 2 PRISM + Pyroprozessor: **\$6,5 Mrd. (2015)**



PRISM: Aus Atommüll mach Wohlstand

- Südaustralien diskutierte 2015/2016 die Idee, den **Atommüll** anderer Staaten entgegenzunehmen und zu lagern.
- Bau von **PRISM-Reaktoren**, bzw. Advanced Recycling Centers, finanziert durch die Entsorgungsgebühren
- Verwertung des Atommülls als stabile, saubere, CO₂-freie **Energiequelle**
- Nutzen: billiger **Strom**, Reduzierung oder Wegfall von **Steuern**, Ansiedelung neuer **Industrien, Arbeit** und **Wohlstand**
- Leider durch eine Bürger-Jury verworfen



- Strategische Umstellung auf Schnelle Reaktoren
- Einführung eines **nuklearen Wertstoffkreislaufs**
 - Nötige Infrastruktur soll bis 2020 fertig sein.
 - Industrielle Wiederaufarbeitung und Brennelementfertigung
 - Sibirisches Chemiekombinat Seversk
- Es ist noch offen (2019), auf welche Schnellreaktorlinie Russland setzen wird.
 - **Natriumgekühlte** oder **bleigekühlte** Reaktoren
 - Beide Technologien zugleich zu kommerzialisieren und in die Fläche zu bringen, wäre zu teuer.



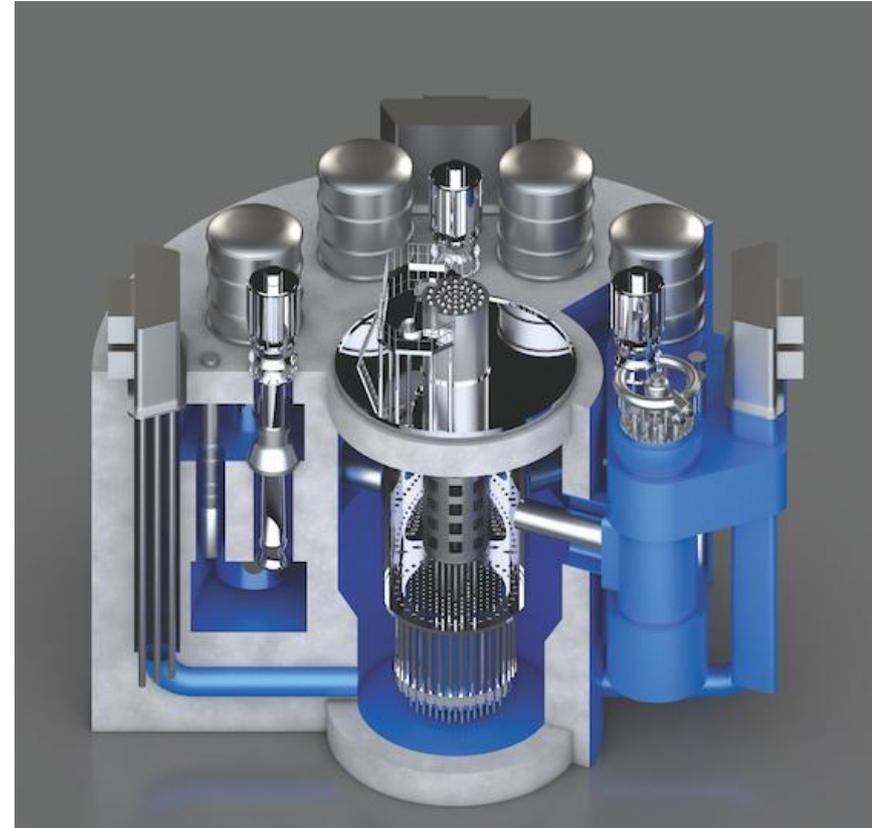
Russlands natriumgekühlte Reaktoren

- ♦ **BN-600** seit 1980 im KKW Beloyarsk (RU) in Betrieb
 - ♦ **40 Jahre** Erfahrung
- ♦ **BN-800** seit 2014 in Betrieb
 - ♦ Abbau von Plutonium aus sowjetischen Kernwaffen
- ♦ **BN-1200** geplant
 - ♦ Kommerzielle Weiterentwicklung des BN-800
 - ♦ Entscheidung zum Bau der ersten Anlage 2019 erwartet



Russlands Kernenergiestrategie

- ♦ **Brest-OD-300:** bleigekühlter Schneller Demonstrationsreaktor (300 MW)
 - ♦ Zur Zeit im Bau
 - ♦ Standort: Sibirisches Chemiekombinat Seversk
 - ♦ Betriebsbeginn 2026
 - ♦ Möglicher Vorläufer einer landesweiten Flotte von 1200-MW-Reaktoren



- **Indien:** mehrere Schnelle Brüter im Bau
 - PFBR Kalpakkam soll nach zahlreichen Verzögerungen nun 2020 in Betrieb gehen.
- **China:** baut massiv Kernenergie (und alle anderen Energiequellen) aus.
 - China hat gewaltige Umweltprobleme durch Kohle.
 - Bis 2040: 200 GW aus konventionellen Kernkraftwerken
 - Bis 2050: 200 GW aus Schnellen Reaktoren
 - Bis 2100: 1.400 GW aus Kernenergie
 - Demonstrationsreaktor CFR-600 (600 MW) im KKW Xiapu seit Ende 2017 im Bau



- **Frankreich:** umfassende Erfahrung mit Wiederaufarbeitung
 - F&E an Schnellen Reaktoren, um Atommüll zu beseitigen
 - Demonstrationsreaktor ASTRID (Advanced Sodium Technical Reactor for Industrial Demonstration)
- **USA:** wollen nach 25 Jahren Schnellreaktorpause zurück an die Weltspitze
 - Erfahrung bis hin zum **Integral Fast Reactor (IFR)** bzw. PRISM
 - **Versatile Test Reactor (VTR)** als Entwicklungsumgebung
 - **Traveling Wave Reactor (TWR):** Bau einer Pilotanlage in China war schon beschlossen. Durch Nuklearexportverbot im Handelskrieg China/USA muss Hersteller Terra Power (Bill Gates) neuen Standort suchen.



Dual-Fluid-Reaktor (DFR)

- Reaktordesign aus Deutschland
 - Institut für Festkörper-Kernphysik
 - Sieger der Herzen bei den GreenTec Awards 2013
- **Atommüll** (Actinoide) als Brennstoff
- Kernbrennstoff in **Salzschmelze** gelöst
- Kühlung durch flüssiges **Blei**



Dual-Fluid-Reaktor (DFR)

- **Hohe Betriebstemperatur** (1.000 °C)
 - Effiziente Stromerzeugung
 - Prozesswärme für Industrie/Chemie
 - Wasserstoffgewinnung
 - Kraftstoffsynthese
- Geschätzte **Entwicklungszeit**: 10 Jahre
- Geschätzte **Entwicklungskosten**: 10 Mrd. €, inkl. Prototyp
- Geschätzte Kosten für **Serienmodell**: 1,5 Mrd. €
 - 1.000 € pro kW installierter Leistung → sehr günstig



Subkritische Transmutationsanlagen



Subkritische Transmutationsanlagen



- Stets **unterkritischer** Schneller Reaktor
- Im Reaktor entstehen **nicht genug freie Neutronen** für eine Kettenreaktion.
- Fehlende Neutronen werden **von außen** mittels **Teilchenbeschleuniger** zugeliefert.
- Abschalten des **Beschleunigers** schaltet den **Reaktor** ab.
- Abschalten ersetzt keine **Kühlung**.
 - **Nachzerfallswärme** muss abgeführt werden.



Subkritische Transmutationsanlagen

- Vereinfacht die Verwertung bestimmter Transurane
 - Stoffe wie Neptunium-237, Americium, Plutonium mit hohem Pu-240-Anteil usw. erschweren die **Steuerung** eines Schnellen Reaktors.
 - Geringere Wirkung der Steuerstäbe auf schnelle Neutronen
- Transmutationsanlagen sind deutlich **komplexer** als Schnelle Reaktoren
 - Höhere Kosten für Konstruktion und Betrieb
 - Beschleuniger verbraucht Teil der elektrischen Energie (ca. 10 – 20 MW)
- Europäisches Projekt **MYRRHA** (Mol, Belgien)
- Weitere Projekte weltweit

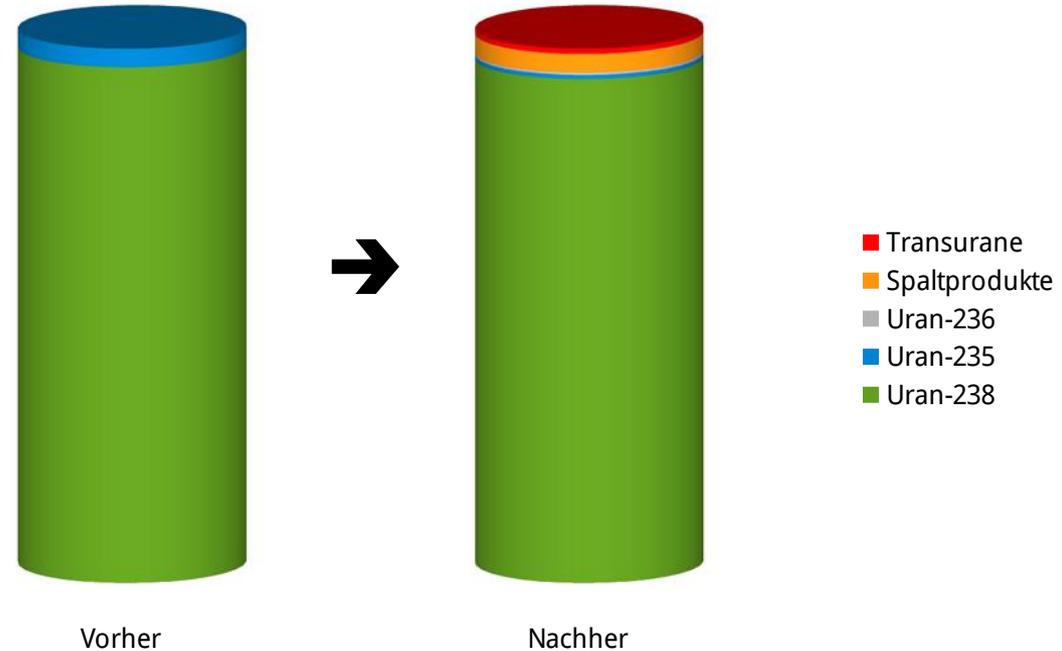


Wie weit reicht Atommüll als Brennstoff?



Atommüll als Kernbrennstoff

- Wie lange reicht Atommüll als Energielieferant?
- Vom ursprünglichen Brennstoff wurde in herkömmlichen Leichtwasserreaktoren **fast nichts** verbraucht.
- **96,5 Prozent** der »abgebrannten« Brennelemente sind **Kernbrennstoff** für Schnelle Reaktoren.



Reichweite des Atommülls

- 2022 hat Deutschland **18.000 Tonnen Actinoide** aus Brennelementen.
- Aus **1 Tonne** Kernbrennstoff gewinnt man **1 Gigawattjahr** Elektrizität.
- Durchschnittlicher Stromverbrauch in Deutschland: **70 GW**
- Überschlagsrechnung (bei gleichbleibendem Stromverbrauch):
 - Bei **Vollversorgung** aus Atommüll: $18.000 / 70 = \mathbf{250 \text{ Jahre}}$
 - Bei **25-prozentiger Versorgung** aus Atommüll: **1.000 Jahre**



- **Abgereichertes Uran**
 - Große Mengen aus der Brennelementherstellung vorhanden
 - Unsere Schätzung: **85.000 Tonnen**
 - Reichweite: **1.200 Jahre** (100 %) bis **4.800 Jahre** (25 %)
 - **Kein Uranabbau** nötig
- Was tun, wenn das alles verbraucht ist?
 - Uran aus dem **Meer** gewinnen – reicht bei heutigem Energieverbrauch für immer
 - **Thorium** – drei- bis viermal häufiger in der Erdkruste als Uran
 - Abbau im **Weltraum**



Fazit



- Über den deutschen **Tellerrand** schauen! Was tun andere?
- Nicht von der **Angst** bestimmen lassen! Probleme **verstehen**, Probleme **lösen**!
- Die Endlagerung ist keineswegs alternativlos!
 - Technische Lösungen sind vorhanden.
 - **Wir brauchen kein Endlager!** Ein Langzeitlager reicht.
 - **Strom** und **Kraftstoff** aus Atommüll gewinnen
 - Zuverlässig, wetterunabhängig, CO₂-frei
- **Informationen** an die Öffentlichkeit
- Gesellschaftliche **Diskussion**





»Man braucht nichts im Leben zu fürchten, man muss es nur verstehen. Jetzt ist die Zeit, mehr zu verstehen, damit wir uns weniger fürchten.«
(Marie Curie)



- **Website:**
 - <http://nuklearia.de/>
- **Twitter:**
 - <https://twitter.com/Nuklearia>
- **Facebook:**
 - <https://www.facebook.com/Nuklearia>
- **Mitmachen**
 - <https://nuklearia.de/verein/mitmachen/>



- Atomgesetz (AtG)
 - http://www.bfs.de/de/bfs/recht/rsh/volltext/1A_Atomrecht/1A_3_AtG_0612.pdf
- Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung – StrlSchV)
 - http://www.bfs.de/de/bfs/recht/rsh/volltext/1A_Atomrecht/1A_8_StrlSchV_0612.pdf
- Wikipedia-Artikel »Radioaktiver Abfall«
 - http://de.wikipedia.org/wiki/Radioaktiver_Abfall



- kernfragen.de
 - <http://www.kernfragen.de/kernfragen/gesellschaft/07-Radioaktive-Abf-ll-e-was-machen-wir-damit/7-1-Worum-geht-es.php>
- Definition »Radiotoxizität«
 - http://www.bfs.de/de/endlager/publika/AG_1_Nachweisfuehrungen_Sicherheitsindikatoren.pdf
- Physics and Safety of Transmutation Systems – A Status Report, © OECD 2006, NEA No. 6090, ISBN 92-64-01082-3
 - <http://www.oecd-nea.org/science/docs/pubs/nea6090-transmutation.pdf>



- To Recycle or not? An intergenerational approach to nuclear fuel cycles, Behnam Taebi and Jan Leen Kloosterman
 - <http://www.janleenkloosterman.nl/taebi0701.php>
- Passively safe reactors rely on nature to keep them cool
 - <http://www.eurekalert.org/features/doe/2002-02/dnl-psr060302.php>
- Experimental Breeder Reactor II
 - http://en.wikipedia.org/wiki/Experimental_Breeder_Reactor_II
- Integral Fast Reactor
 - http://en.wikipedia.org/wiki/Integral_Fast_Reactor



- PRISM
 - http://en.wikipedia.org/wiki/PRISM_%28reactor%29
- Advanced Recycling Center
 - <http://www.ecomagination.com/portfolio/ge-hitachi-nuclear-energy-advanced-recycling-center>
 - <http://nordic-gen4.org/wordpress/wp-content/uploads/2011/11/David-Powell.pdf>
- Versatile Test Reactor
 - <https://www.energy.gov/ne/versatile-test-reactor>



- Dual-Fluid-Reaktor
 - <http://dual-fluid-reaktor.de/>
- BN-800
 - http://www.rosatom.ru/wps/wcm/connect/rosenergoatom/belnpp_en/about/prospects-bn-800/
 - <http://www.spiegel.de/international/world/energy-from-the-bomb-russia-to-produce-electricity-with-former-nukes-a-854318.html>
- Russlands Kernenergiestrategie
 - http://www.world-nuclear-news.org/NP_Russia_speeds_up_nuclear_investment_2211121.html



- Australien: Atommüll zu Wohlstand
 - <http://nuklearia.de/2015/05/25/aus-fuer-kernenergie/>
- Weitere Informationen
 - <http://www.sciencecouncil.org/>
 - <http://bravenewclimate.com/>



- Symbol »Radioaktivität«
 - <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Radioactive.svg>
- Burj Khalifa
 - http://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Burj_Khalifa.jpg
- Schneewand in Tateyama
 - <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:20090503yukinohtani02.JPG>
- Libysche Wüste (Luca Galuzzi)
 - http://en.wikipedia.org/wiki/File:Libya_4608_Idehan_Ubari_Dunes_Luca_Galuzzi_2007.jpg



- Reaktordruckbehälter im Kernkraftwerk Ringhals (Vattenfall)
 - <http://www.flickr.com/photos/vattenfall/3703997708/in/set-72157619489316496/>
- Urandioxid-Pellets
 - http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nuclear_fuel_pellets.jpeg
- Brennelement
 - <http://www.world-nuclear.org/uploadedImages/org/info/Mitsubishi%20PWR%20nuclear%20fuel%20assembly%20schematic.jpg>



- Kernkraftwerk mit Druckwasserreaktor
 - http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kernkraftwerk_mit_Druckwasserreaktor.png
- Kernspaltung (modifiziert)
 - <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kernspaltung.svg>
- Spaltprodukte bei thermischer Kernspaltung
 - <http://en.wikipedia.org/wiki/File:ThermalFissionYield.svg>
- Alpha-Zerfall
 - http://en.wikipedia.org/wiki/File:Alpha_Decay.svg



- Abschirmung von Alpha-, Beta- und Gammastrahlen
 - http://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Alfa_beta_gamma_radiation.svg
- Zeitliche Entwicklung der Radiotoxizität des Atommülls
 - <http://www.oecd-nea.org/science/docs/pubs/nea6090-transmutation.pdf>
- Schneller natriumgekühlter Reaktor
 - http://en.wikipedia.org/wiki/File:Sodium-Cooled_Fast_Reactor_Schemata.svg
- Experimental Breeder Reactor II
 - http://en.wikipedia.org/wiki/File:EBRII_1.jpg



- GE Hitachi Reactor S4 (PRISM)
 - <http://www.ge-energyforourfuture.com/video/main/GEHreactorS4.jpg>
- Advanced Recycling Center
 - <http://nordic-gen4.org/wordpress/wp-content/uploads/2011/11/David-Powell.pdf>
(Seite 22)
- BN-600
 - http://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Reactor_block_3_of_Beloyarsk_Nuclear_Power_Plant.jpg
- Dual-Fluid-Reaktor
 - http://www.flickr.com/photos/rainer_klute/9096645828/



- Beschleunigergetriebene Transmutationsanlage Myrrha
 - http://myrrha.sckcen.be/en/Engineering/Accelerator/~media/Images/Myrrha/Engineering/MYRRHA_ADS_vertical.ashx

