

Wohin mit dem Atommmüll?



AG Nuklearia

Rainer Klute

<http://nuklearia.de/wir-ueber-uns>

Twitter: @Nuklearia

25. August 2013



- ♦ Was ist Atommüll?
- ♦ Klassifizierung: schwach-, mittel- und hochradioaktive Abfälle
- ♦ Schwerpunkt: gebrauchte Brennelemente – hochradioaktiv
- ♦ Wie entsteht Atommüll im Kernreaktor?
- ♦ Radiotoxizität – Gefahr für den Menschen
- ♦ Welche Entsorgungsmöglichkeiten gibt es?
 - ♦ Direkte Endlagerung
 - ♦ Plutonium-Recycling (MOX-Brennelemente)
 - ♦ Transmutation
- ♦ Was will die Nuklearia?



Was ist Atommüll?

- ♦ Herkunft und Beispiele
 - ♦ **Kernkraftwerke**
 - ♦ Bestrahlte («abgebrannte») Brennelemente
 - ♦ Putzlappen, Arbeitskleidung, Verpackungen, Putzwasser usw.
 - ♦ Ausgediente, aktivierte Maschinenteile, Reaktordruckbehälter, Pumpen, Rohre, Bauschutt, Kühlwasser usw.
 - ♦ **Forschung, Industrie, Bergbau, Ölförderung**
 - ♦ Werkzeuge, Geräte, Präparate
 - ♦ Forschungsreaktoren, Kernbrennstoff usw. usw.
 - ♦ **Medizin**
 - ♦ Radioaktive Präparate in Diagnostik und Therapie
 - ♦ Spritzen, Kanülen, Abwässer usw.



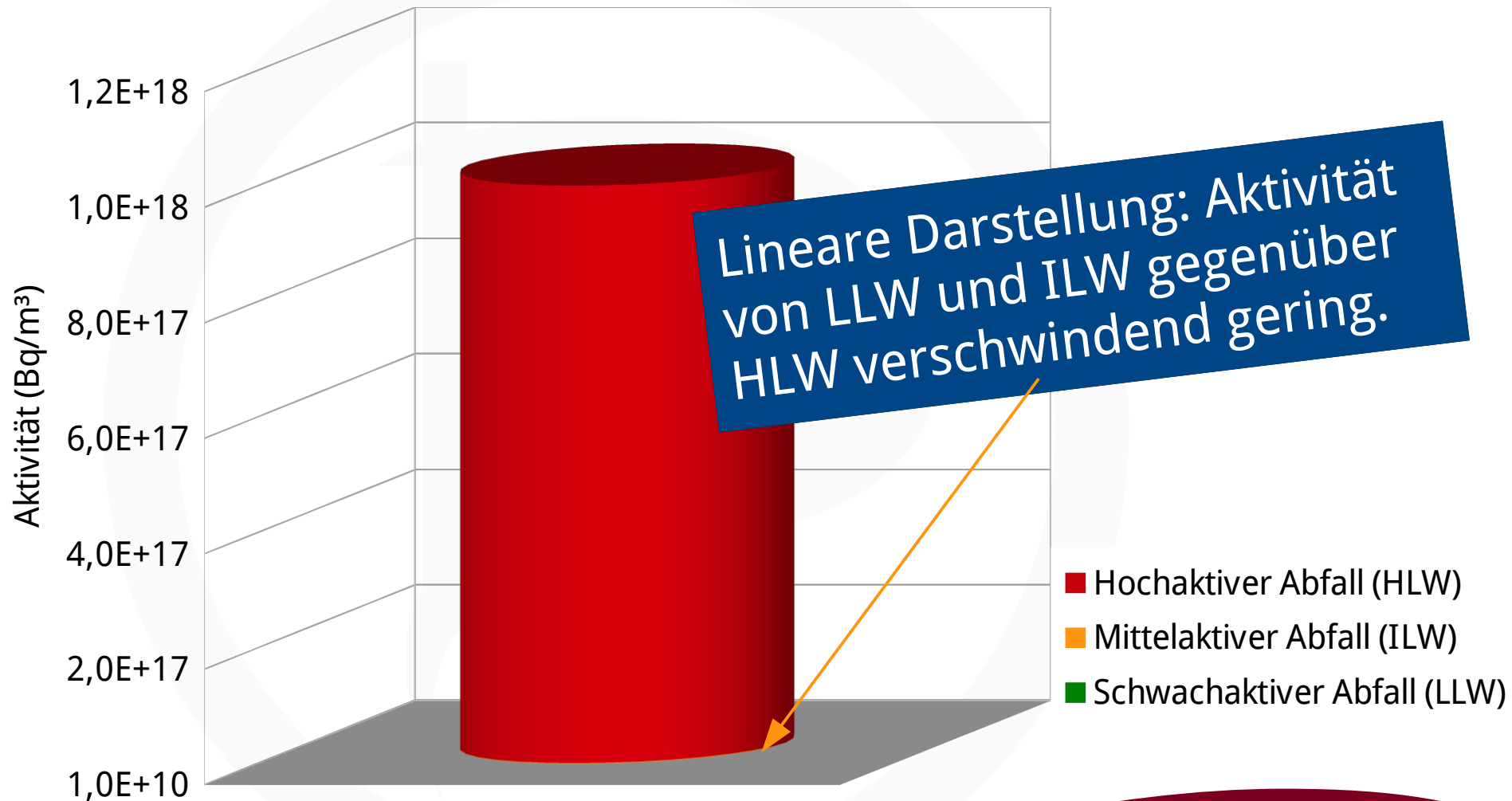
Klassifizierung nach Radioaktivität (IAEA)

- Einheit **Becquerel (Bq)** gibt die Anzahl radioaktiver Zerfälle pro Sekunde an.
- **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



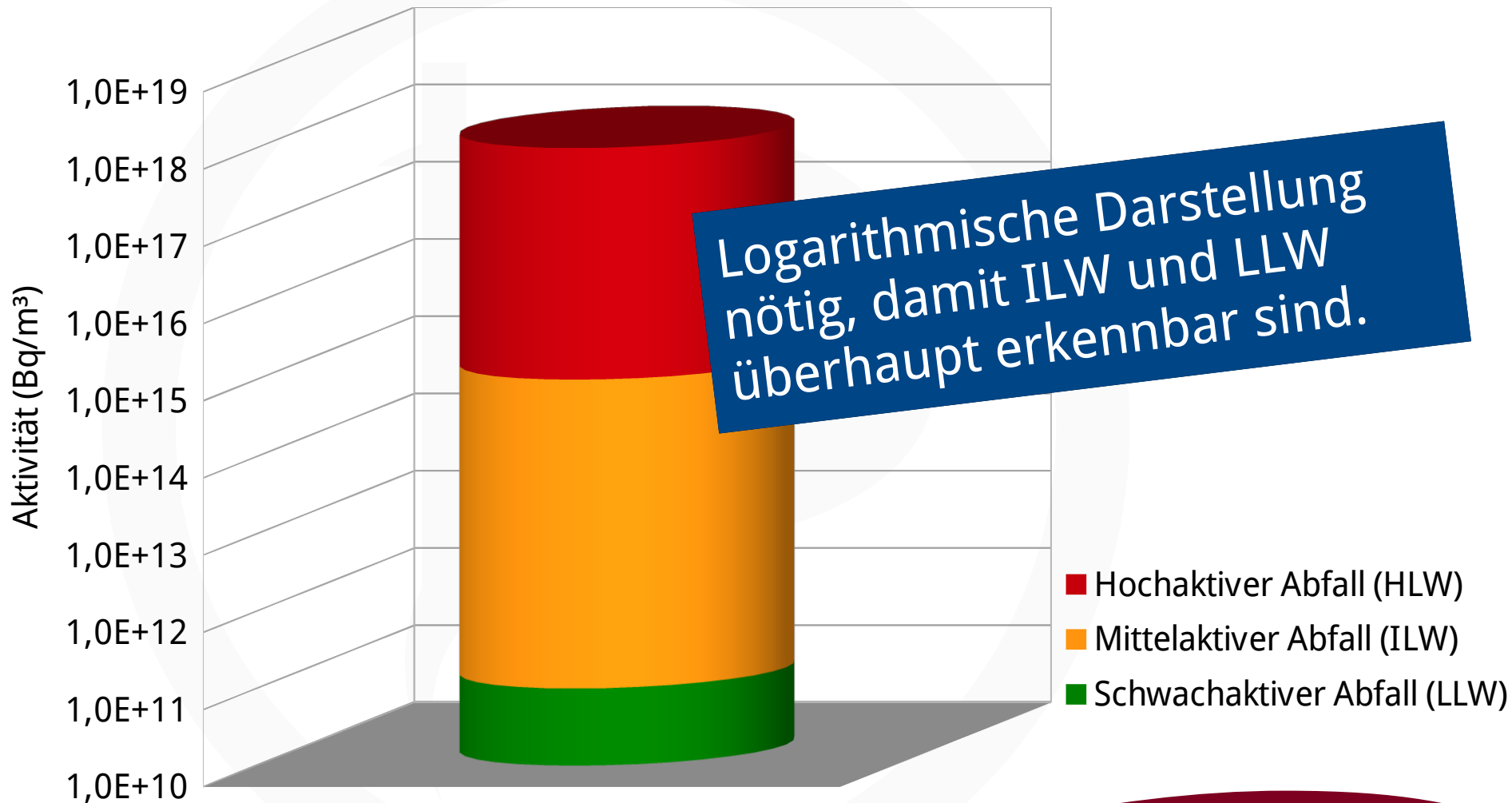
Klassifizierung nach Radioaktivität (IAEA)

- Radioaktivität nach Abfallkategorien (Bq/m³), 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 anschaulicher?
- Vergleich der Größenordnungen durch Längenangaben
- Wenn eine Billion Becquerel ein Zentimeter wäre ...



Größenordnungen im Vergleich

- ♦ Hochradioaktiv:
1 m – 10 km
- ♦ Burj Khalifa, Dubai
(828 m)
 - ♦ Höchstes Gebäude
der Welt
- ♦ Gebrauchte
Brennelemente



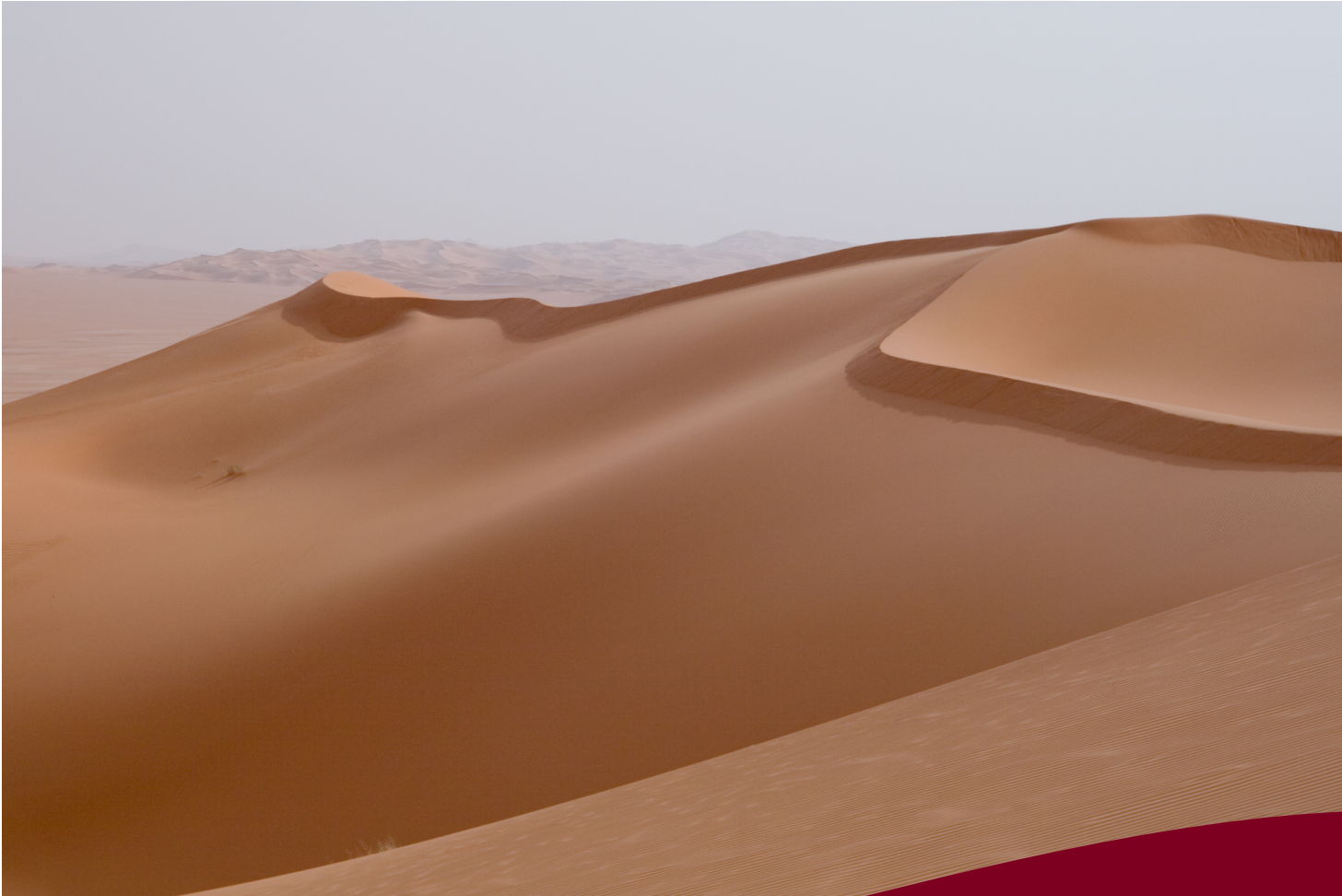
Größenordnungen im Vergleich

- ♦ Mittelradioaktiv: 0,1 mm – 10 m
- ♦ Schneewand in Tateyama, Japan (ca. 8 m)



Größenordnungen im Vergleich

- ♦ Schwachradioaktiv: kleiner als 1 mm
- ♦ Sandkorn (1/16 mm bis 2 mm)



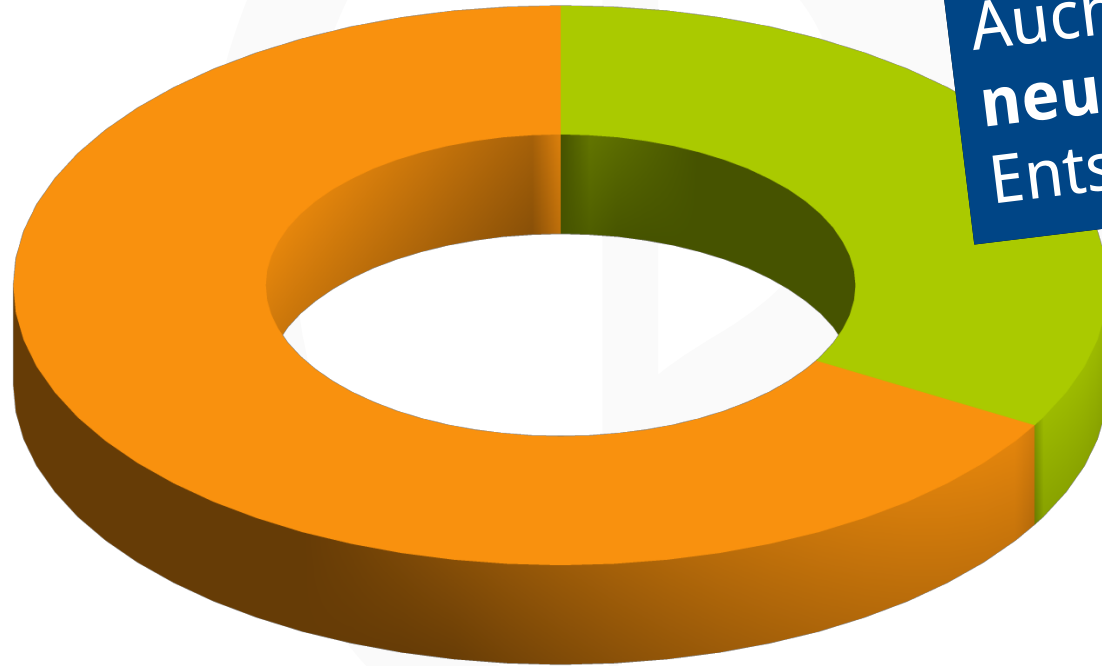
Klassifizierung nach Wärmeentwicklung (DE)

- ♦ 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



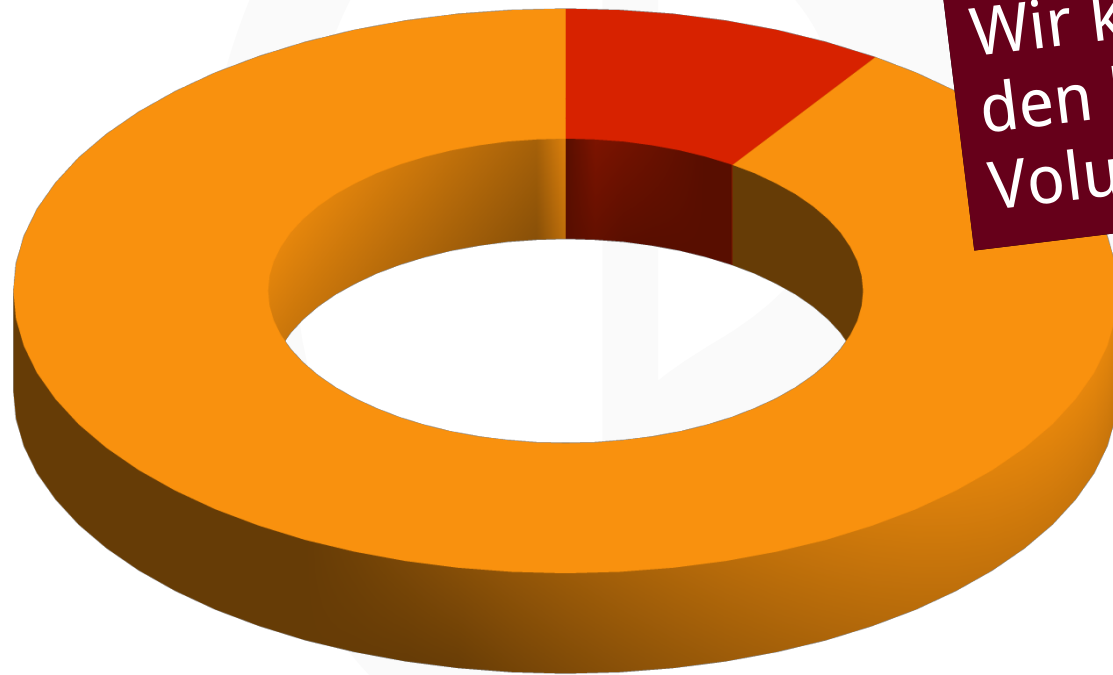
Auch ohne Kernenergie fällt **neuer Atommüll** an. Die Entsorgungsfrage bleibt.

- Kernkraftwerke
- Medizin, Industrie, Forschung



Volumina radioaktiver Abfälle

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



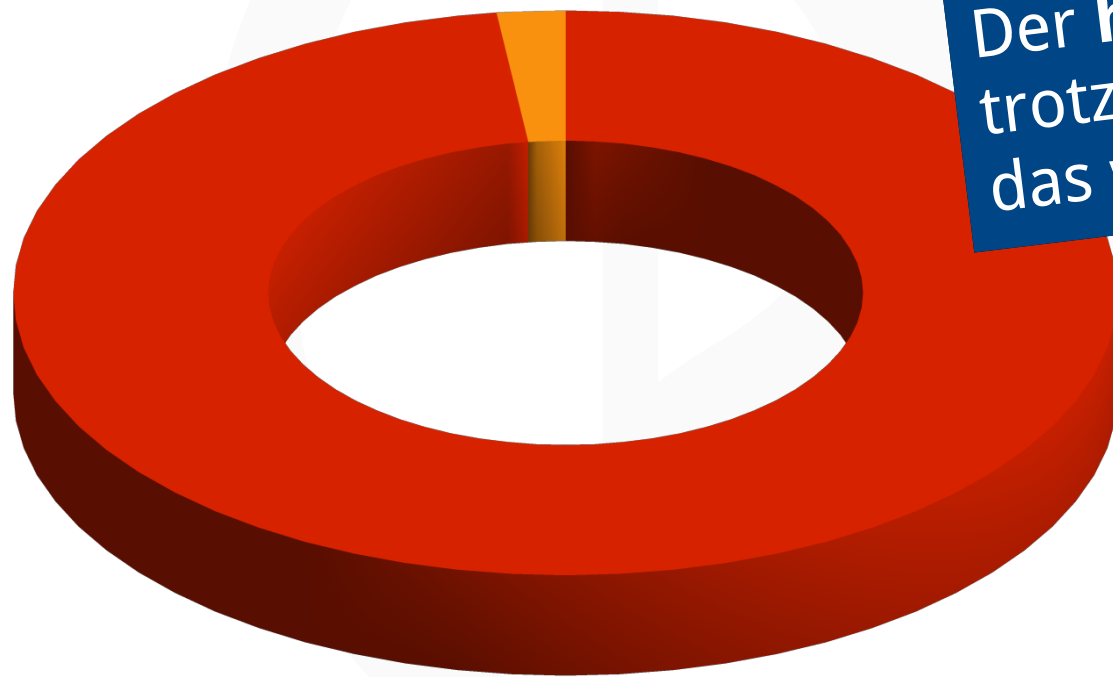
Wir konzentrieren uns auf den **kleineren Teil** des Volumens. Warum?

- Schwach- und mittelaktiver Abfall
- 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



Der **hochaktive** Abfall ist trotz geringeren Volumens das weit größere Problem.

- Schwach- und mittelaktiver Abfall
- Hochaktiver 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. Recycling ist nicht erlaubt.
- ♦ Schwach- und mittelaktive Abfälle:
 - ♦ **Schacht Konrad** (Salzgitter)
 - ♦ Inbetriebnahme nicht vor **2019**
- ♦ Hochaktive Abfälle:
 - ♦ Es gibt **kein Endlager**, sondern nur ein **Standortsuchgesetz**.
 - ♦ Bis 2015: Suchkriterien definieren
 - ♦ Bis 2031: Standort beschließen



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?
 - ♦ Was passiert in den Brennelementen?
 - ♦ Wie entstehen die Abfallprodukte?
 - ♦ Wie setzt sich der radioaktive Abfall in Brennelementen zusammen?
- ♦ Wir werden zwei verschiedene Abfalltypen kennenlernen:
 - ♦ Spaltprodukte
 - ♦ Transurane
- ♦ Radiotoxizität und Entsorgungsvarianten



Wie viel hochaktiven Atommüll haben wir?

In Deutschland bis 2040 genutzter
Kernbrennstoff (grauer Würfel)

Kantenlänge 27 m

Brandenburger Tor
(Höhe: 26 m)

Spaltprodukte
(9 m)

Längerlebige
Spaltprodukte
(4 m)

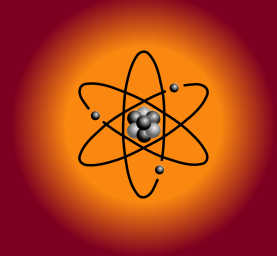
Transurane
(6 m)



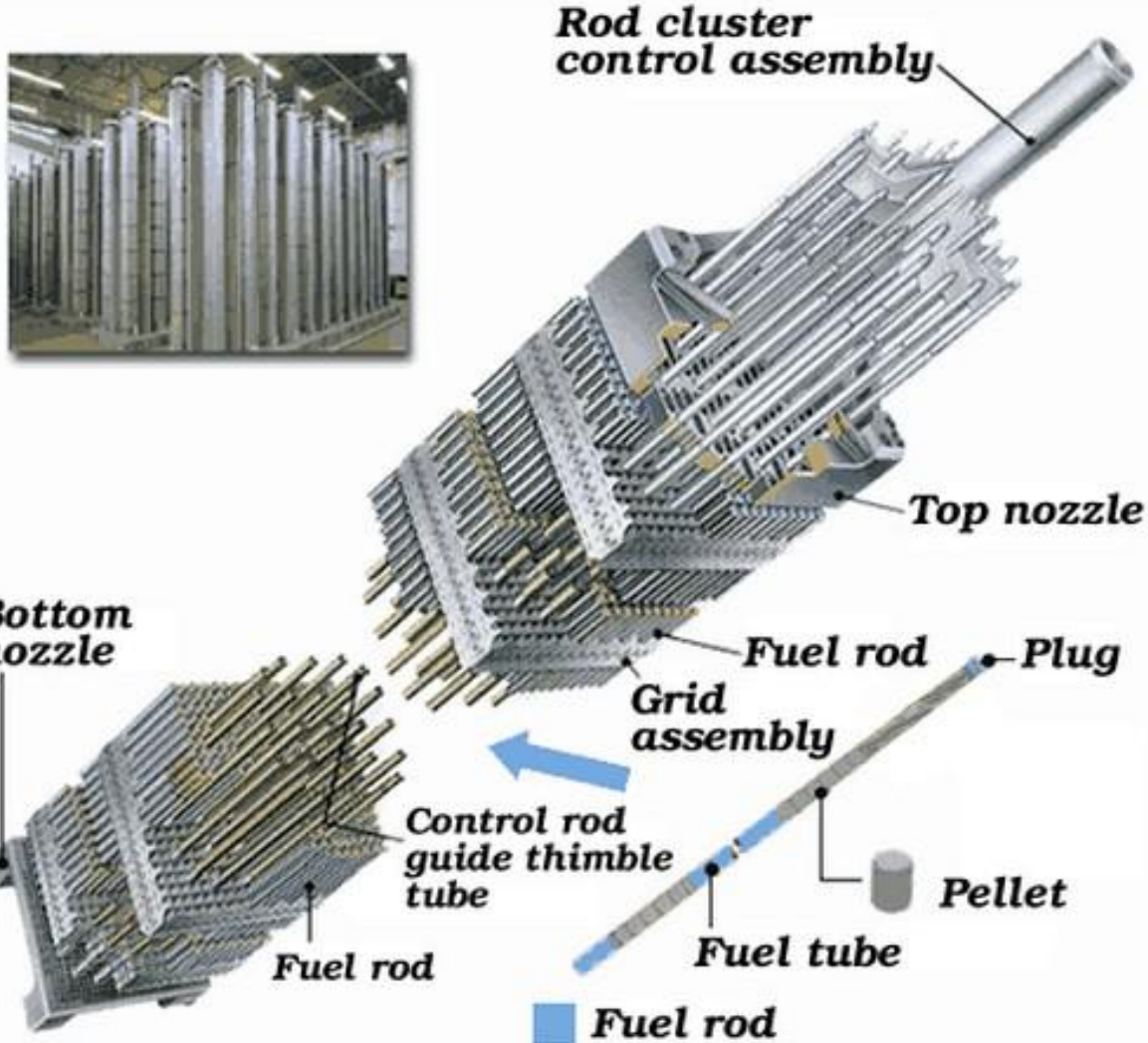
Was sind Brennelemente?



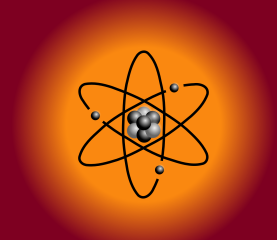
- ♦ **Pellets:** Kernbrennstoff aus
 - ♦ **Uranoxid** (U_3O_8) oder
 - ♦ **Uran-Plutonium-Mischoxid** (MOX)
- ♦ Frische Pellets sind nur ganz **schwach radioaktiv**.
- ♦ **Brennstab** aus Zirkalloy enthält die Pellets.
 - ♦ Gasdicht verschlossen
- ♦ Ach ja: Der Handschuh schützt die Pellets, nicht die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



Was sind Brennelemente?

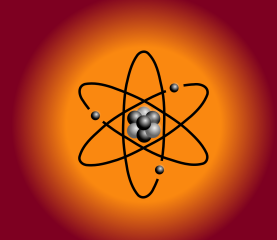
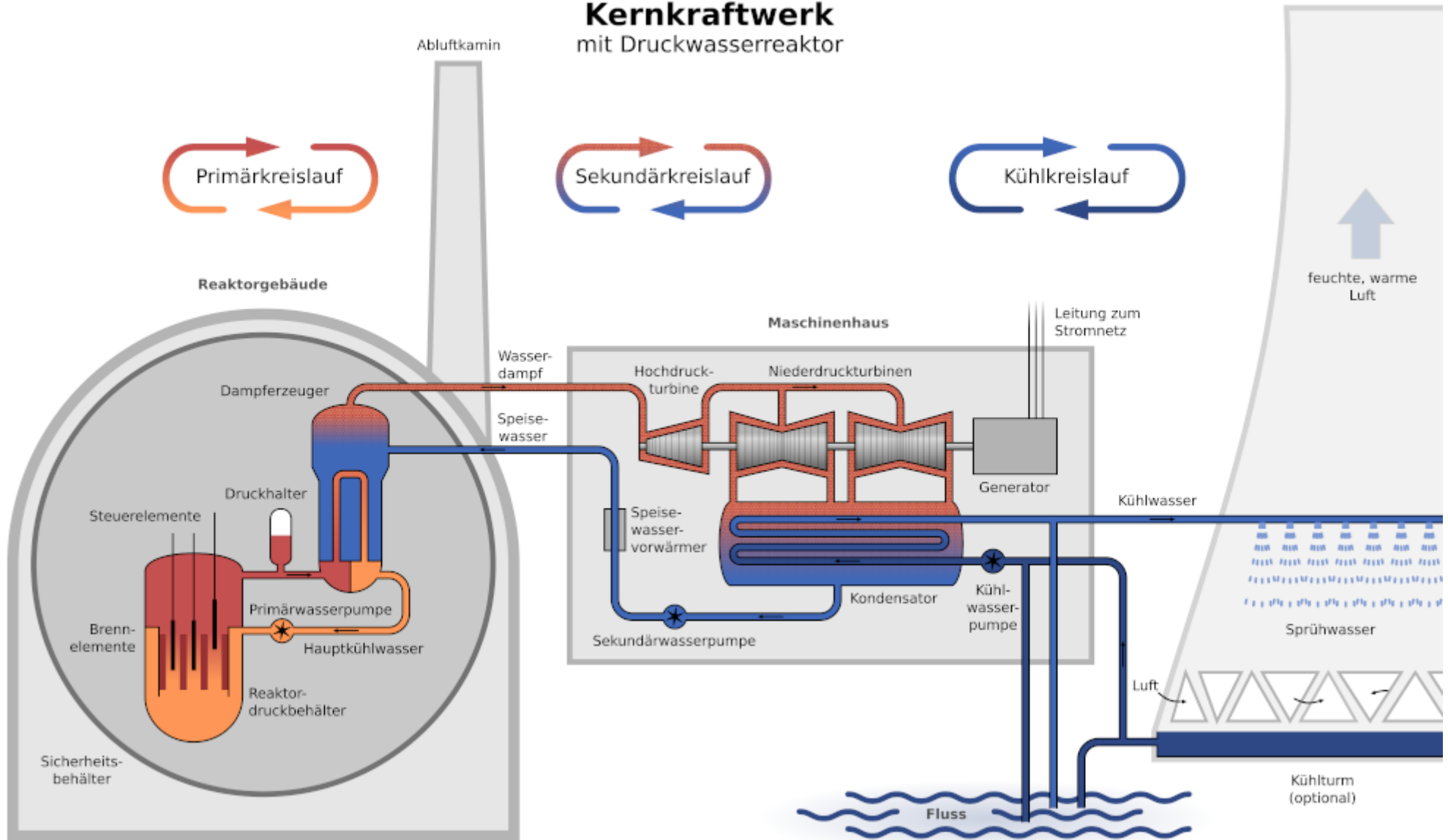


- ♦ Brennstäbe sind zu **Brennelementen / Brennelementbündeln** zusammengefasst.
- ♦ Ein Leistungsreaktor enthält typischerweise einige hundert Brennelemente.
- ♦ Einsatz im Reaktor ist durch Korrosion und Strahlung auf 3 – 5 Jahre begrenzt.



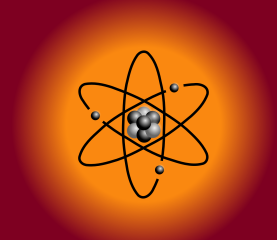
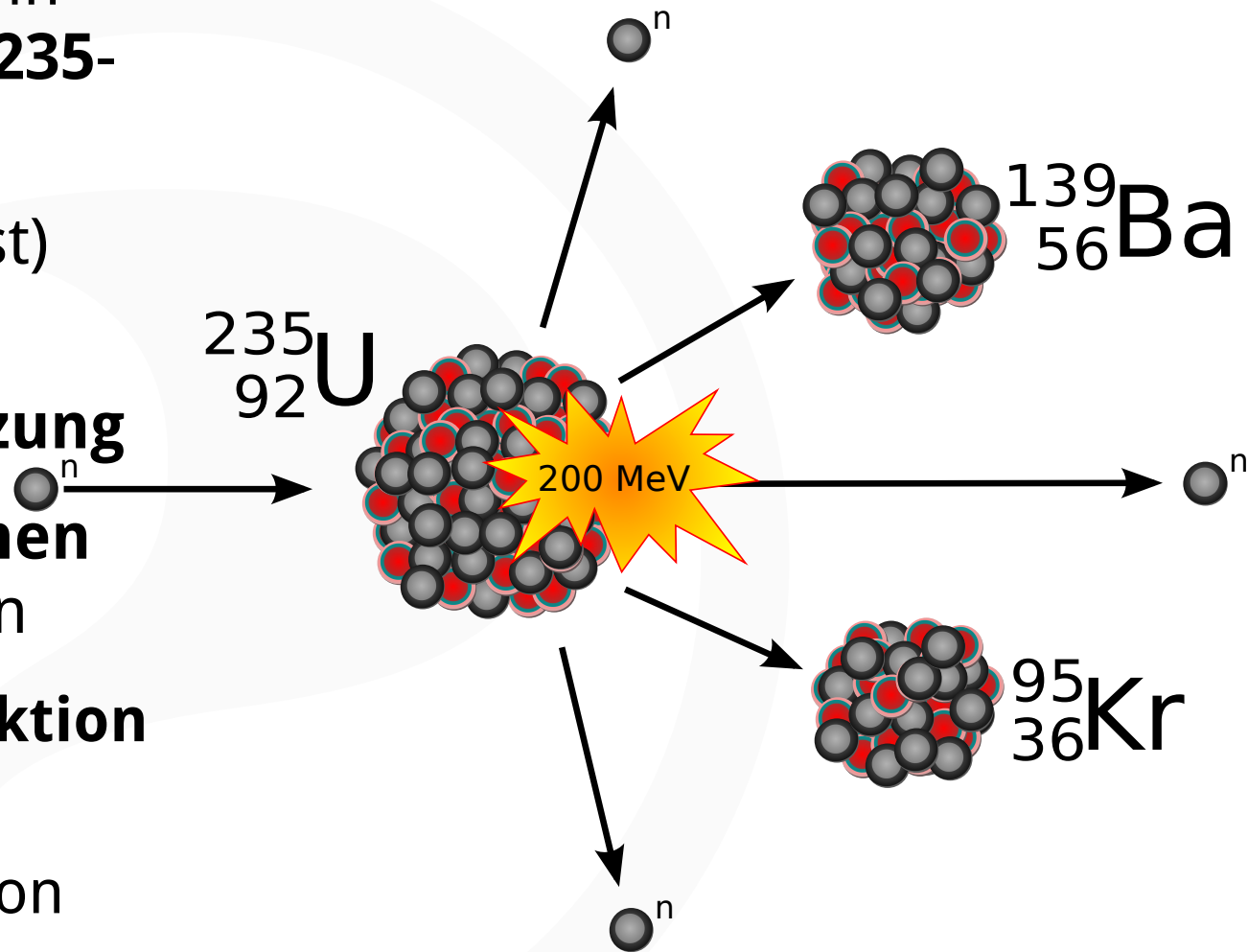
Wie funktioniert ein Kernkraftwerk?

Kernkraftwerk mit Druckwasserreaktor



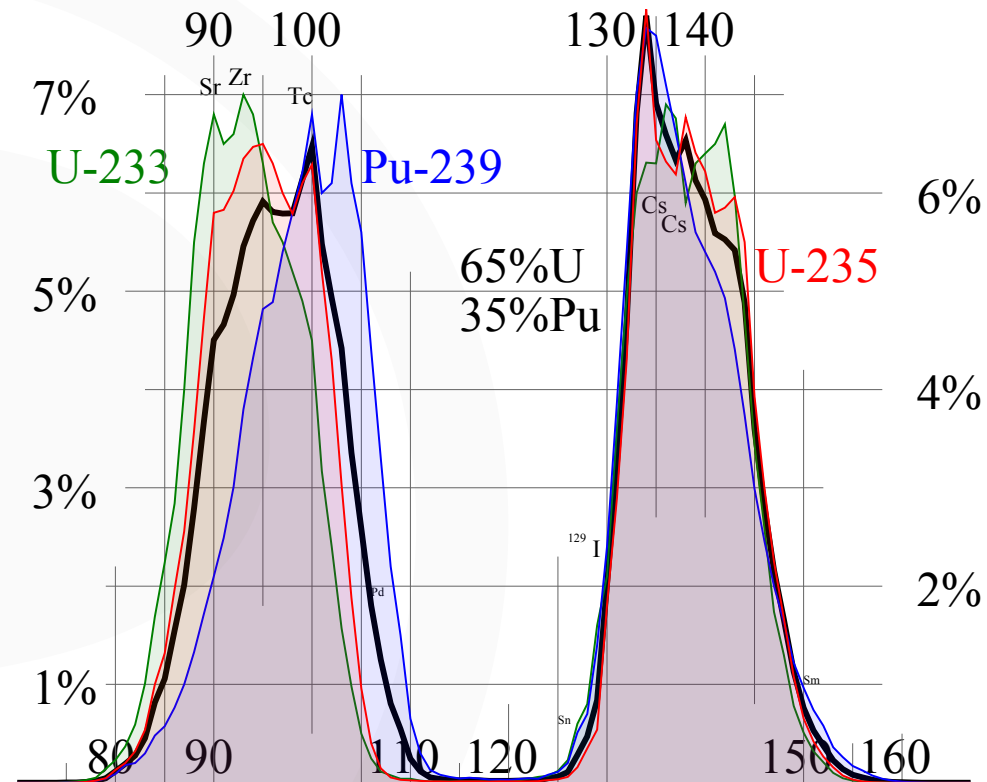
Kernspaltung und Kettenreaktion

- 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).



- Es entstehen **stabile** und **radioaktive Spaltprodukte**.
- Radioaktive Spaltprodukte zerfallen zu weiteren stabilen und radioaktiven Isotopen im Gesamtmix.
- Beispiel:
 - Jod-135 zerfällt mit Halbwertszeit 6,6 Stunden zu Xenon-135.
 - Xenon-135 zerfällt mit Halbwertszeit 9,2 Stunden zu Cäsium-135.
 - Xenon-135 wird durch Neutroneneinfang zu stabilem Xenon-136.

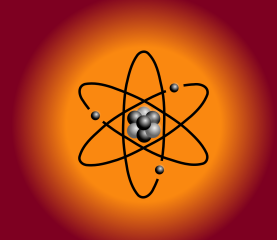
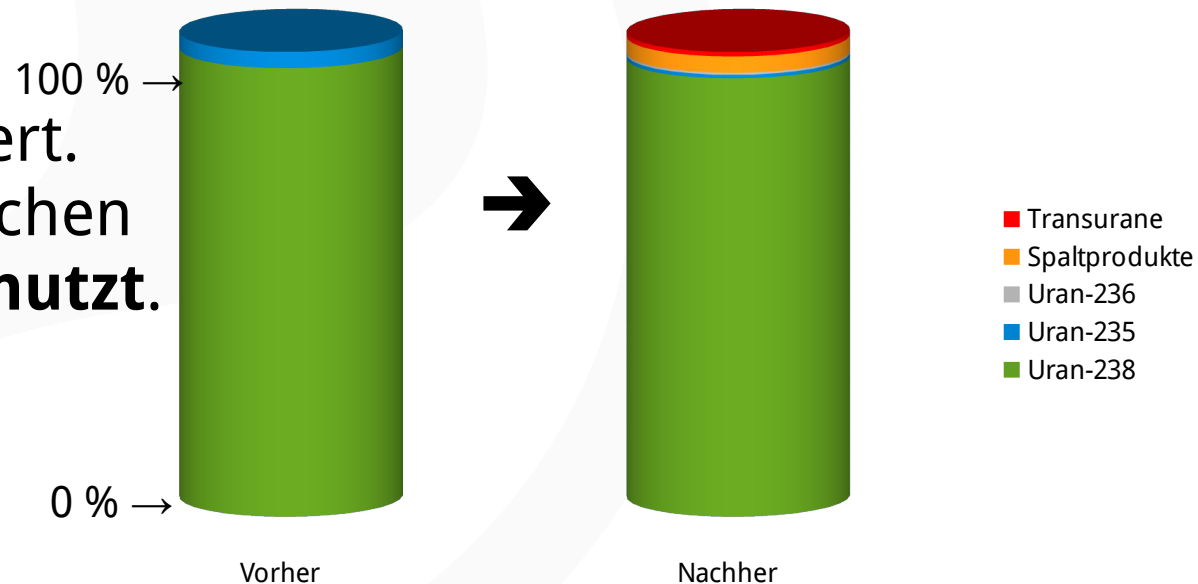


Zusammensetzung bestrahlter Brennelemente

- 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**.

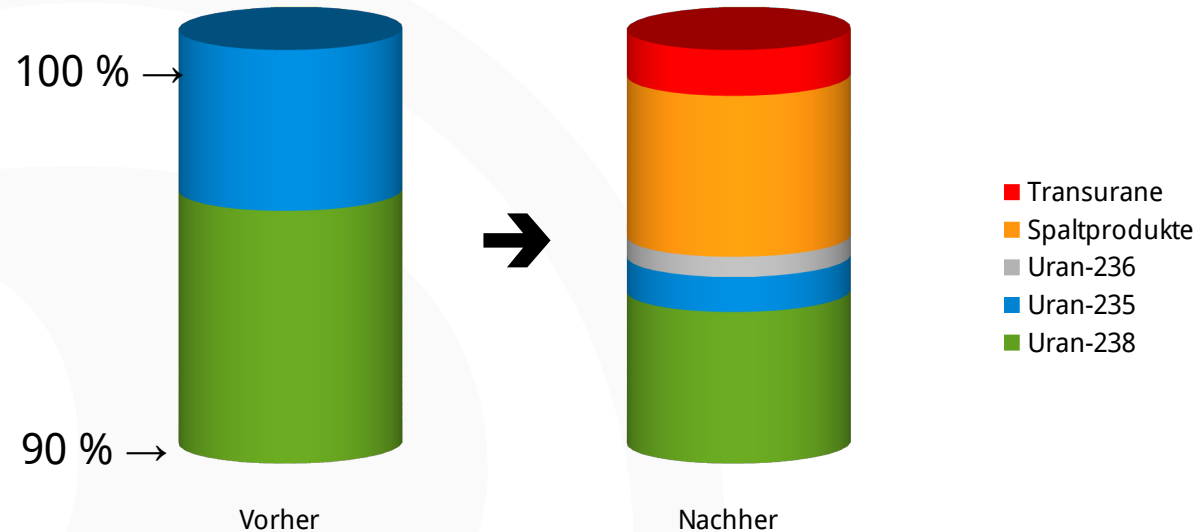
- Schauen wir uns die oberen Bereiche der Säulen genauer an ...



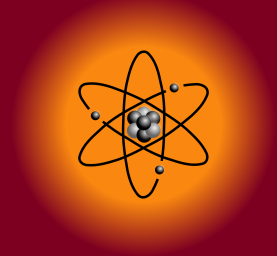
Zusammensetzung bestrahlter Brennelemente

- **Zusammensetzung** bestrahlter Brennelemente

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

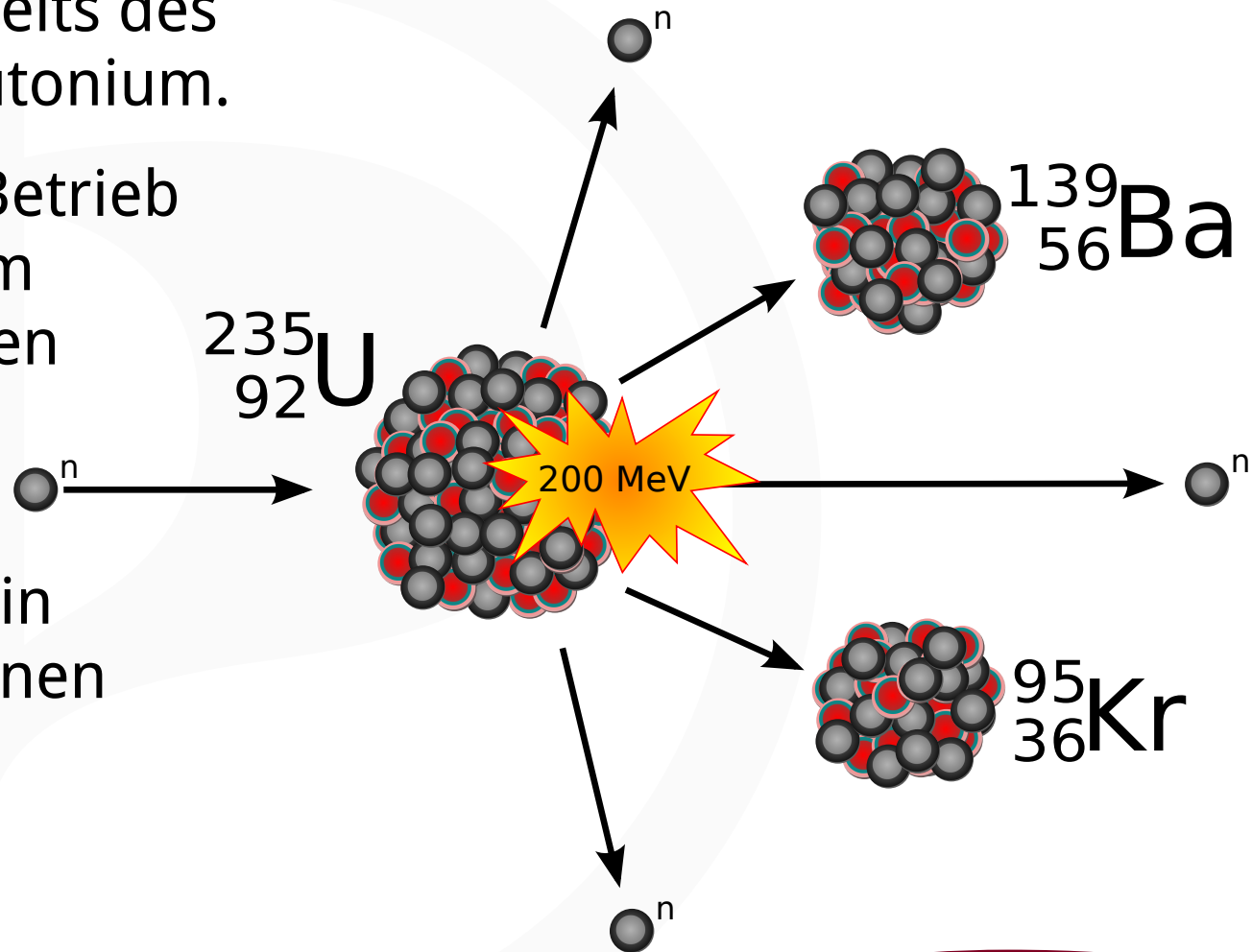


- **Transurane:** Plutonium, Neptunium, Americium, Curium usw.
 - Der besonders üble, langlebige Teil des Abfalls
- **Uran-236:** entsteht aus Uran-235 durch Neutroneneinfang
 - Im Leichtwasserreaktor nicht spaltbar, also Abfall
- **Spaltprodukte:** Abfall



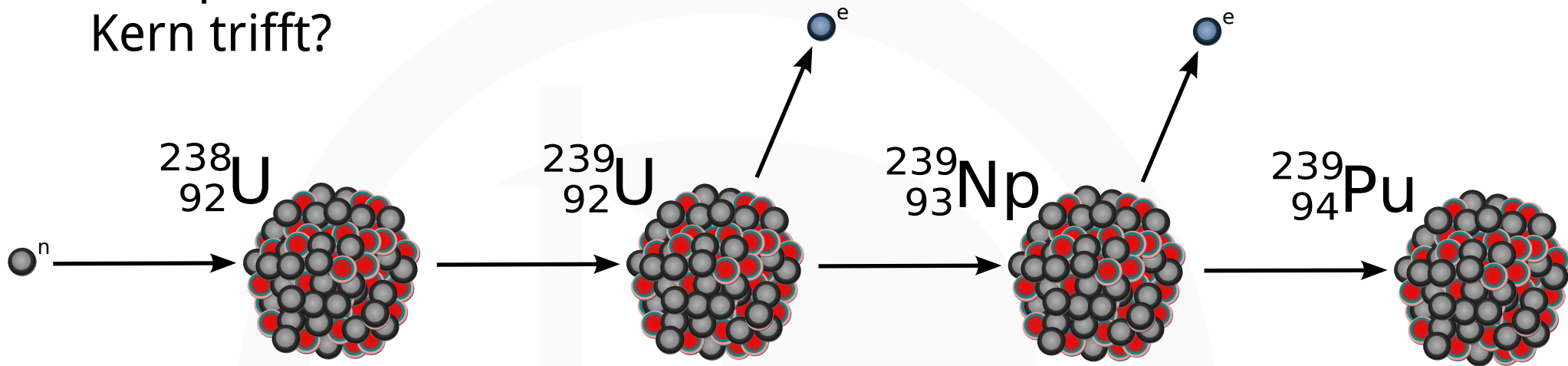
Transurane (Plutonium und Konsorten)

- **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**.

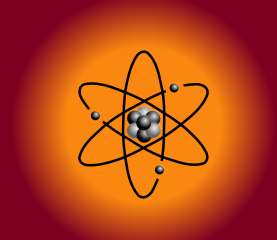


Neutroneneinfang erbrütet Transurane

- 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

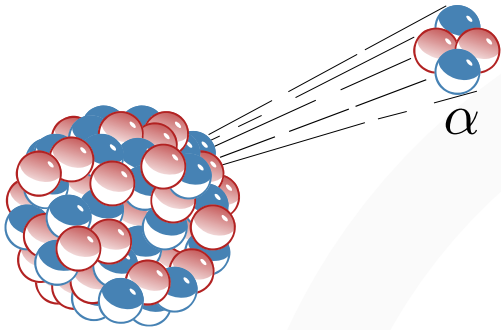
- Uran-236 entsteht durch **Neutroneneinfang** aus Uran-235.
- Absorbiert ein U-235-Kern ein Neutron, kommt es
 - in 82 Prozent der Fälle zur Kernspaltung,
 - in 18 Prozent der Fälle zum Neutroneneinfang → U-236.
- Halbwertszeit: **23,48 Millionen Jahre**
- 190fach höhere Aktivität als Uran-238
- Damit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



Radiotoxizität des Atommülls

- ♦ 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 Substanzgemisches auf ein geringes Maß abgeklungen?
- ♦ Wichtiges Kriterium bei diesen Fragen ist die **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.
- Für **sehr viele** Atome 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 Halbwertszeit mal 10 ist fast nichts mehr da.



- Von der C-14-Methode zur Altersbestimmung her bekannt:
 - **Kohlenstoff-14: 5.730 ± 40 Jahre**
- Von Nuklearunfällen her besonders bekannte Spaltprodukte:
 - **Jod-131: 8,0197 Tage**
 - **Cäsium-134: 2,0652 Jahre**
 - **Cäsium-137: 30,17 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**
 - 1.000 Tote in Deutschland jährlich durch Lungenkrebs
- Interessant für Raucher, da im Tabak enthalten:
 - **Polonium-210: 138,376 Tage**
 - Starker Alpha-Strahler



- ♦ 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

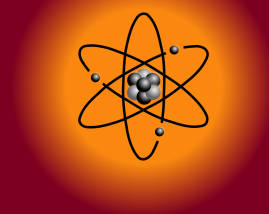
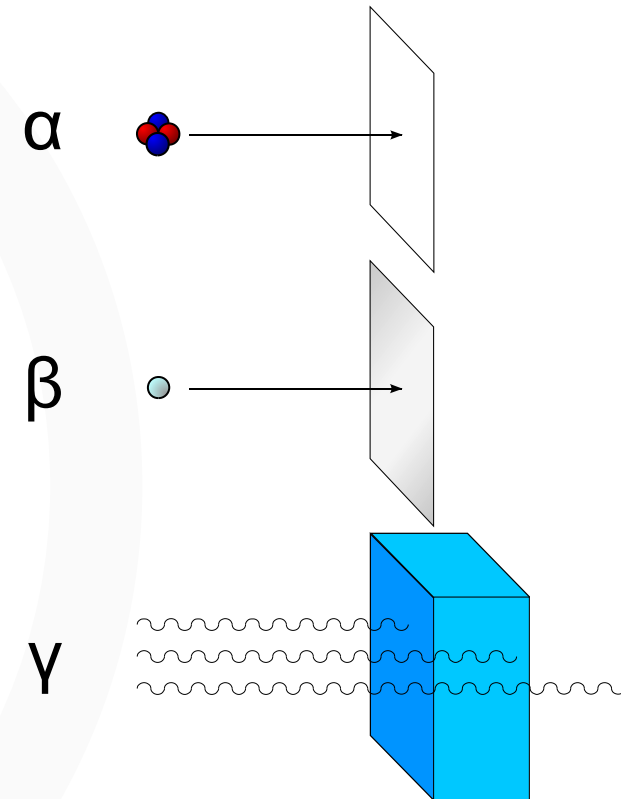


- Was ist gefährlicher: ein Stoff mit kurzer oder mit langer **Halbwertszeit**?
- Dazu betrachten wir den Begriff der **Aktivität**.
- **Aktivität**: Anzahl der Zerfälle pro Sekunde und Masse
 - Maßeinheit für die Anzahl der Zerfälle pro Sekunde: **Becquerel (Bq)**
 - Aktivität wird z.B. in **Bq/kg**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



♦ Strahlung

- ♦ Risiko für die Umgebung des Strahlers
- ♦ Schutz durch
 - ♦ **Abschirmung**
 - ♦ **Abstand**
- ♦ **α -Strahlung:** durchdringt kein Blatt Papier
- ♦ **β -Strahlung:** reicht nur wenige Zentimeter weit, Abschirmung z.B. durch Aluminiumblech
- ♦ **γ -Strahlung:** erfordert starke Abschirmung, z.B. durch Blei oder Beton. Dicke hängt von Energie der Strahlung ab.



- ♦ **Wärmeentwicklung**

- ♦ Risiko für die unmittelbare Umgebung der wärmeentwickelnden Substanz
 - ♦ Veränderung der Gebäude- oder Gesteinsstrukturen
 - ♦ Beschädigung/Zerstörung der Anlagen
- ♦ Schutz durch
 - ♦ wärmeresistente Lagerung
 - ♦ ausreichende Kühlung



- ♦ **Proliferation**

- ♦ Risiko Nuklearwaffen (gering)
- ♦ Risiko Terror
 - ♦ Schmutzige Bombe: erzeugt mehr Angst als Schaden
- ♦ Schutz durch Überwachung oder Unzugänglichkeit



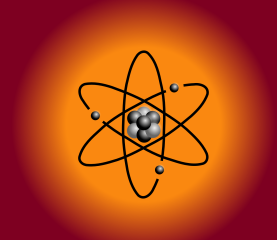
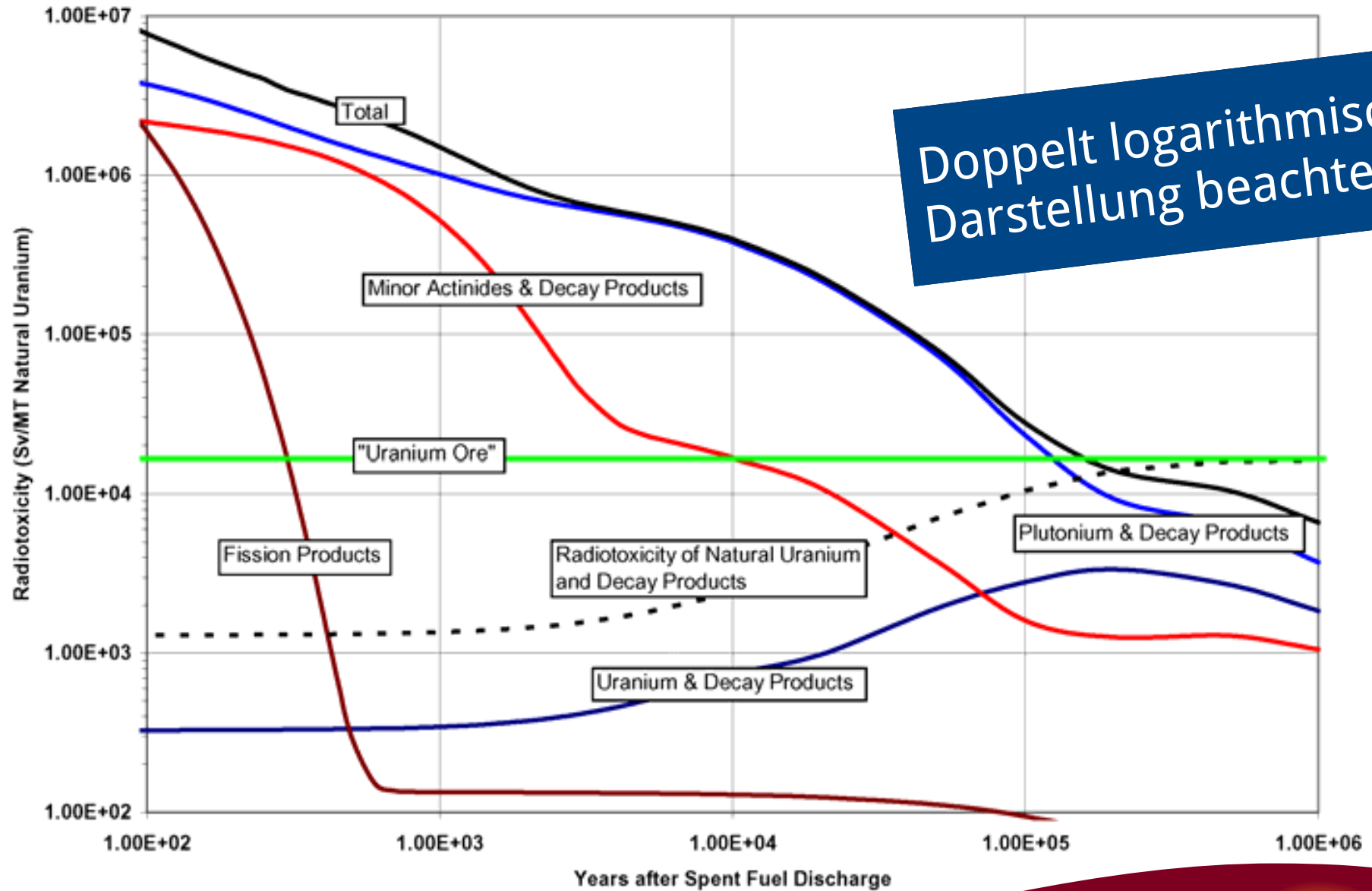
- ♦ **Radioaktive Substanzen im Körper**
 - ♦ Risiko für Menschen
 - ♦ Schädigung der Zellen
 - ♦ Krebs
 - ♦ **Radionuklide dürfen nicht in die Nahrungskette gelangen!**
 - ♦ Schutz durch Bindung in unlösliche Feststoffe
 - ♦ Wie gefährlich die Strahlung eines bestimmten Stoffes im Körper tatsächlich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



- ♦ 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** + **übrige Aktinide**)
 - ♦ **Uran**

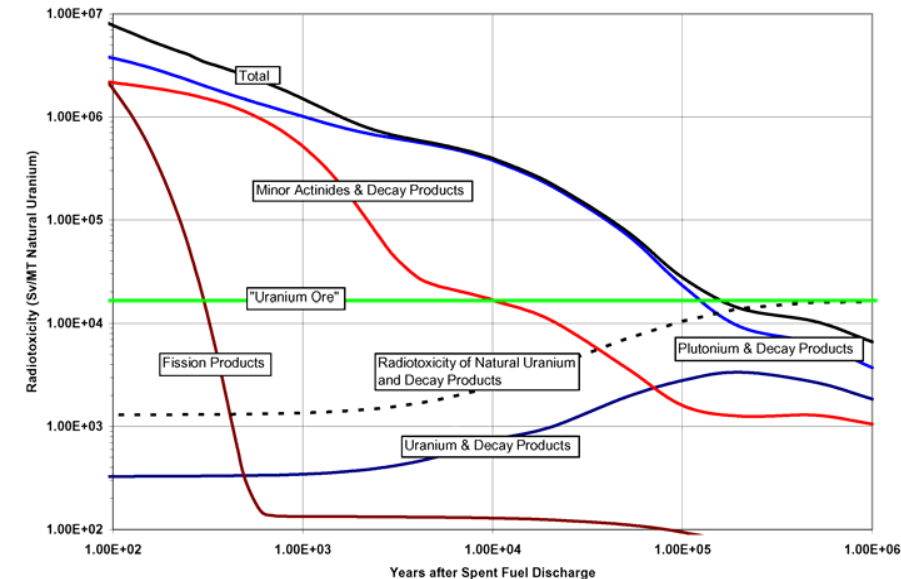


Radiotoxizität des Atommülls



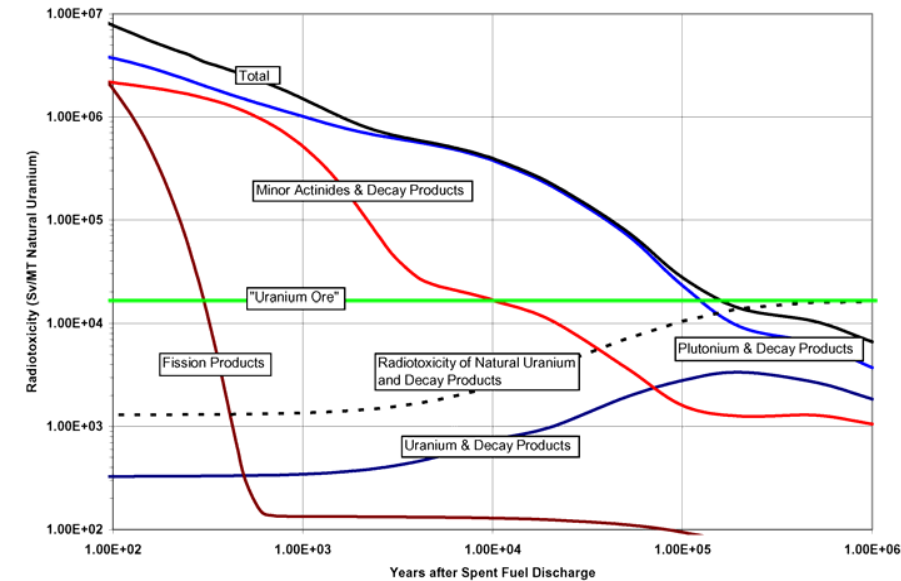
Radiotoxizität der Spaltprodukte

- ♦ **Spaltprodukte** (braune Kurve) haben durchweg eine kurze Halbwertszeit.
- ♦ Anfangs hohe Radiotoxizität
- ♦ Nach **300 Jahren** erreicht die Radiotoxizität das Niveau von **Uranerz**, wie es in der Natur vorkommt \approx **1 Promille** des Ausgangswerts.
- ♦ Nach **800 Jahren** liegt die Radiotoxizität nur noch bei einem Prozent von Uranerz \approx **0,01 Promille** des Ausgangswerts.



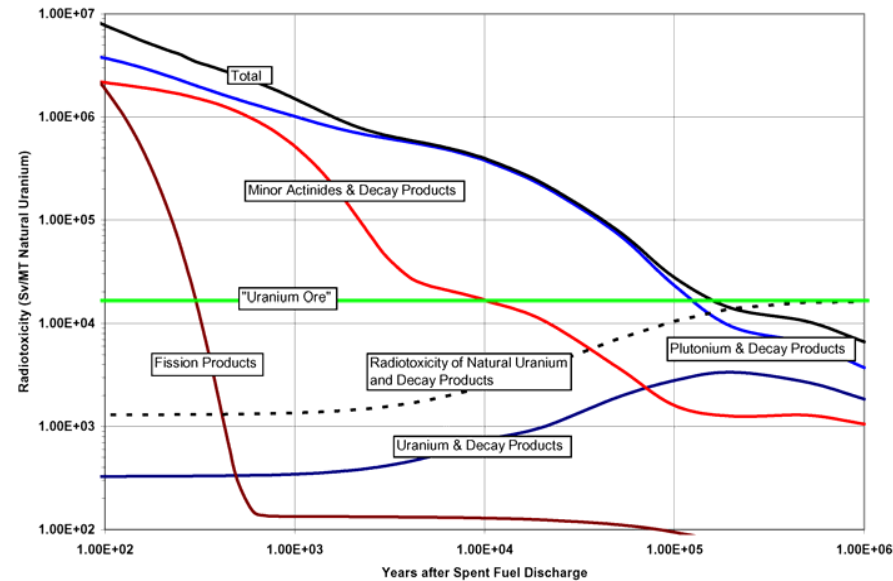
Radiotoxizität der Transurane

- ♦ **Plutonium** und seine Zerfallsprodukte (blaue Kurve) machen den wesentlichen Anteil an der Radiotoxizität der Transurane aus.
- ♦ Hinzu kommen vor allem Neptunium, Americium, Curium, Californium (rote Kurve), die sogenannten übrigen **Aktinide**.
- ♦ Die Radiotoxizität der Transurane klingt nur **sehr langsam** ab.
- ♦ Transurane – besonders Plutonium – bestimmen die Gesamtradiotoxizität (schwarze Kurve).
- ♦ Niveau von Uranerz wird erst nach etwa **300.000 Jahren** erreicht.



Radiotoxizität des Urans

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



Wohin mit dem Atommüll?

- ♦ Es gibt prinzipiell drei ernsthaft diskutierte Lösungen:
 - ♦ Direkte **Endlagerung** ← geltendes Recht (Atomgesetz)
 - ♦ **Recycling des Plutoniums-239** in MOX-Brennelementen
 - ♦ Spaltung des Urans und der Transurane – **Transmutation**
- ♦ **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.
- ♦ **Keine Reduktion** der Radiotoxizität
- ♦ Erste Silbe im Wort **Endlagerung** verrät die Absicht:
 - ♦ Keine Rückholmöglichkeit
- ♦ Verzicht auf Rückholbarkeit ist aus Sicht der **Proliferationssicherheit** langfristig sinnvoll:
 - ♦ Hochaktive Spaltprodukte zerfallen relativ schnell.
 - ♦ Anteil des spaltbaren Materials steigt mit der Zeit an.
 - ♦ Nichtspaltbares Pu-240 zerfällt schneller als spaltbares Pu-239.
 - ♦ Spaltbares Pu-239 zerfällt zu spaltbarem U-235.
 - ♦ Waffenfähiges Material nach ca. 9.000 Jahren



- ♦ 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
- **Ist das zu gewährleisten?**



Plutonium-Recycling (MOX-Brennelemente)

- ♦ Rückgewinnung von Uran und Plutonium (PUREX-Verfahren) und Herstellung von **Mischoxid-Brennelementen (MOX)**
- ♦ Leichtwasserreaktor nutzt nur etwa 30 % dieses Plutoniums.
- ♦ Recycling ist nur wenige Male wiederholbar, weil immer mehr **nichtspaltbares Plutonium** entsteht.
 - ♦ Pu-240, Pu-242, Pu-238
 - ♦ Abtrennung der spaltbaren Isotope technisch nicht machbar
- ♦ Reduktion der Radiotoxizität um **10 Prozent**
- ♦ Rest muss ins Endlager.
- **Ist das zielführend?**



Atommüll-Abbau durch Transmutation

- ♦ Problematischer, langlebiger Anteil des Atommülls:
 - ♦ Uran + Transurane = **Aktinide**
- ♦ Aktinide lassen sich mittels **schneller Neutronen** spalten.
 - ♦ **Transmutation**
- ♦ Übrig bleiben nur noch Spaltprodukte.
- ♦ Radiotoxizität der Spaltprodukte fällt **erheblich schneller** als die der Aktinide:
 - ♦ Nach **300** Jahren auf **1 Promille** des Ausgangsmixes
 - ♦ Nach **800** Jahren auf **0,01 Promille** des Ausgangsmixes
- ♦ **Aus unserer Sicht die einzige wirkliche Lösung!**



Wie funktioniert das?

- Herkömmliche Reaktoren arbeiten mit **langsamen** Neutronen, sogenannten **thermischen** Neutronen.
- Die bei der Kernspaltung freiwerdenden Neutronen sind erst 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 Aktiniden.
 - ♦ Alle mit geraden und ungeraden Massenzahlen
 - ♦ Alle Transurane
 - ♦ Alle Uran-Isotope
- ♦ Technische Lösungen, die mit schnellen Neutronen arbeiten:
 - ♦ **Schnelle Reaktoren**
 - ♦ **Subkritische Transmutationsanlagen**



- ♦ Der **Schnelle Reaktor** heißt so, weil er mit schnellen 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.



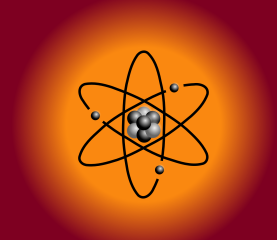
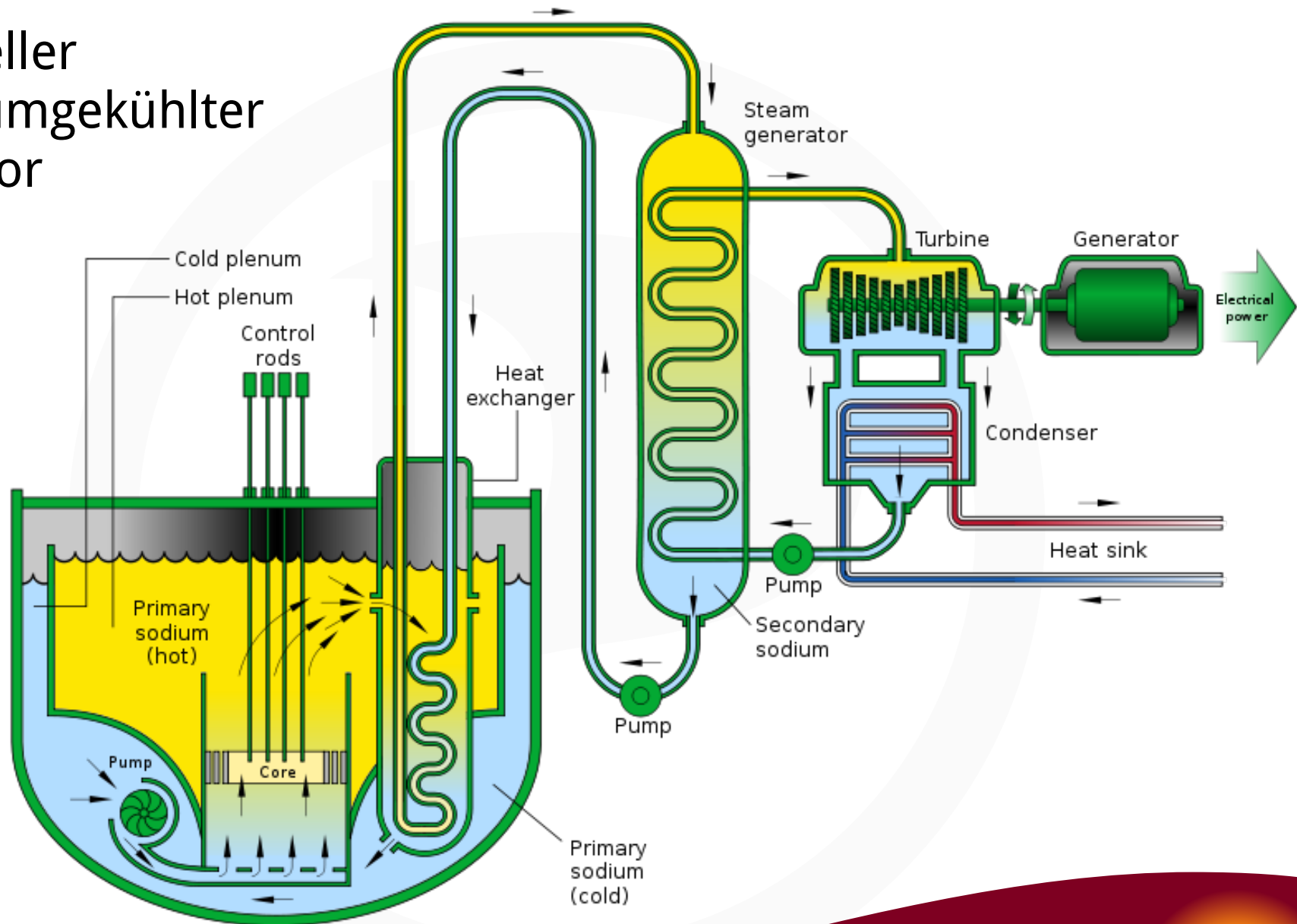
Unterschiede zu herkömmlichen Reaktoren

- ♦ Kühlmittel darf Neutronen **nicht abbremesen** .
 - ♦ Flüssiges **Metall** oder **Helium**
 - ♦ **Natrium** besonders geeignet: greift Reaktorwände nicht an.
- ♦ Metallkühlung ermöglicht Betrieb unter **Normaldruck** .
 - ♦ Sicherheitsgewinn gegenüber Reaktoren mit hohem Überdruck
- ♦ **Inhärente Sicherheit**
 - ♦ "Walk-away safety"
 - ♦ Stromausfall, kein Personal: Reaktor geht einfach aus.
 - ♦ 1986 am Experimental Breeder Reactor II (EBR-II) demonstriert
 - ♦ Sicherheit durch **Physik und Naturgesetze**, nicht durch aufwendige externe Sicherheitseinrichtungen



Sodium-Cooled Fast Reactor (SFR)

Schneller
natriumgekühlter
Reaktor



Integral Fast Reactor (IFR)

- ♦ Brennelemente aus **Metall** statt Oxid
 - ♦ Sehr guter Wärmeleiter → geringere Gefahr der Überhitzung
 - ♦ Höherer negativer Reaktivitätskoeffizient
 - ♦ Reaktivität sinkt bei steigender Temperatur
- ♦ Integrierte Wiederaufarbeitungsanlage
 - ♦ **Pyroprozessor** trennt Spaltprodukte ab.
 - ♦ Pyroprozessor **integraler** Bestandteil der Anlage.
 - ♦ **Keine Plutonium-Transporte** von/nach außerhalb der Anlage
 - ♦ **Proliferationsschutz** durch Integration und für Kernwaffen ungeeigneten Mix von Plutonium-Isotopen
- ♦ Noch keine kommerzielle Stromerzeugung

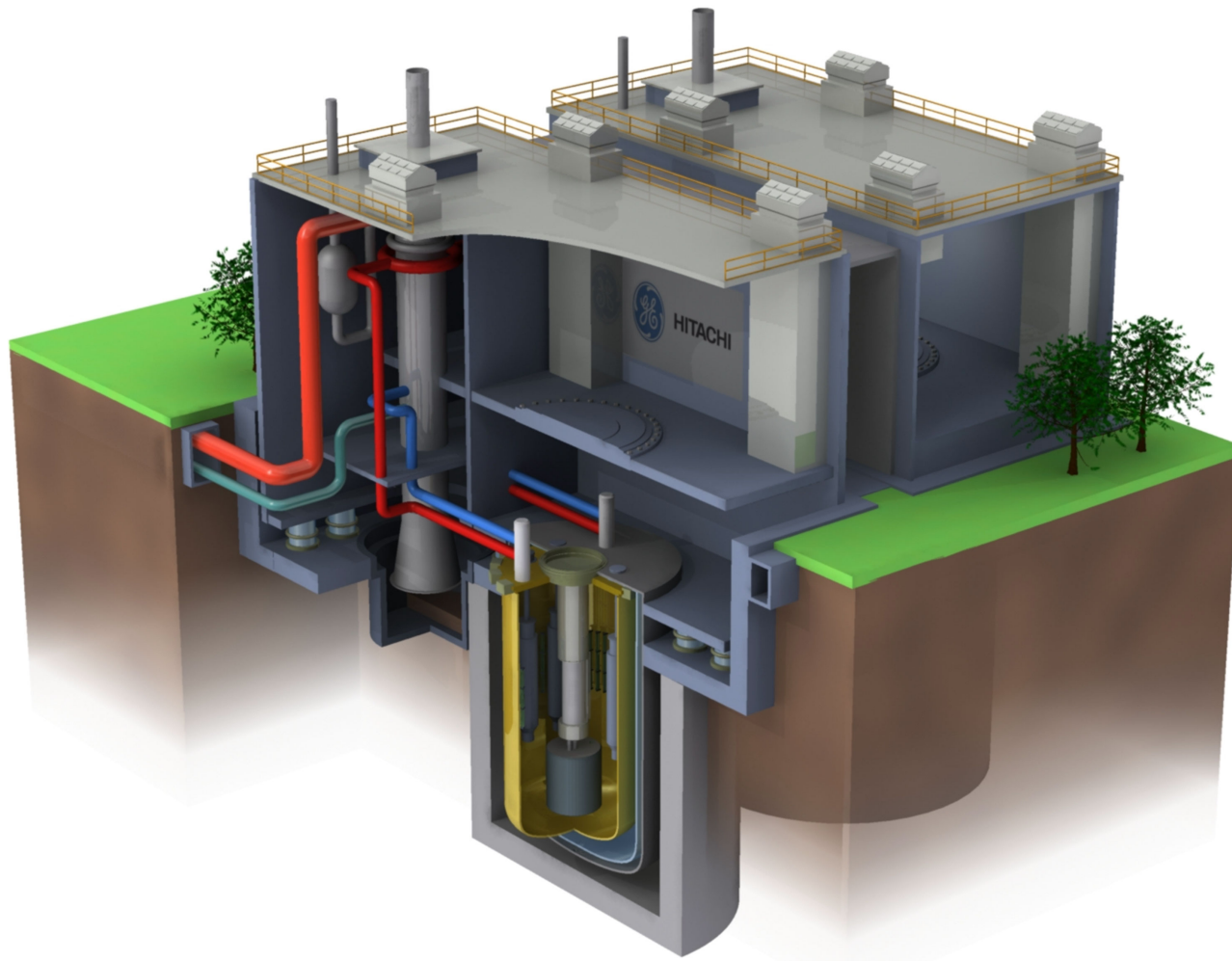


Experimental Breeder Reactor II

- ♦ Forschungsreaktor und **IFR-Prototyp**
- ♦ 20 MW Stromerzeugung
- ♦ 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**
- ♦ Angebot von GE Hitachi Nuclear liegt Großbritannien vor.
- ♦ Ziel: Verarbeitung von 110 t Plutonium
- ♦ Hersteller zahlt Bau.
- ♦ Großbritannien zahlt pro verarbeiteter Plutonium-Menge.
- ♦ Entscheidung **2013**



Advanced Recycling Center

- ♦ 6 **S-PRISM**-Reaktoren + 1 **Pyroprozessor**
- ♦ 1.866 MW
- ♦ Bei GE Hitachi Nuclear im Angebot
- ♦ 3,2 Mrd. US\$ für die erste Anlage



- ♦ **BN-600** seit 1980 im KKW Beloyarsk (RU) in Betrieb
 - ♦ > **30 Jahre** Erfahrung
- ♦ **BN-800** in Bau
 - ♦ Ab 2014 Abbau von Plutonium aus russischen Kernwaffen.
- ♦ **BN-1200** geplant
 - ♦ Soll 2020 den BN-600 ablösen.



BN-600



Russlands Kernenergiestrategie

- ♦ Strategische Umstellung auf Schnelle Reaktoren
- ♦ Nötige Infrastruktur soll bis 2020 fertig sein.
- ♦ Bleigekühlter Schneller Reaktor mit 300 MW als Pilotanlage
 - ♦ Baubeginn 2016, Betriebsbeginn 2020
 - ♦ Reaktor BREST-300 soll Vorläufer einer landesweiten Flotte von 1200-MW-Reaktoren werden.
- ♦ Natriumgekühlte Schnellreaktoren BN-600, BN-800, BN-1200



Weitere Schnelle Reaktoren weltweit

- ♦ **Japan:** Schneller Brüter Monju – nach Natriumleck und anderen Problemen außer Betrieb. Weiterer Testbetrieb wegen laxer Sicherheitskultur fraglich.
- ♦ **Indien:** mehrere Schnelle Brüter im Bau, z.B. PFBR Kalpakkam
- ♦ **China:** baut massiv Kernenergie (und alle andere Energiequellen) aus. 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



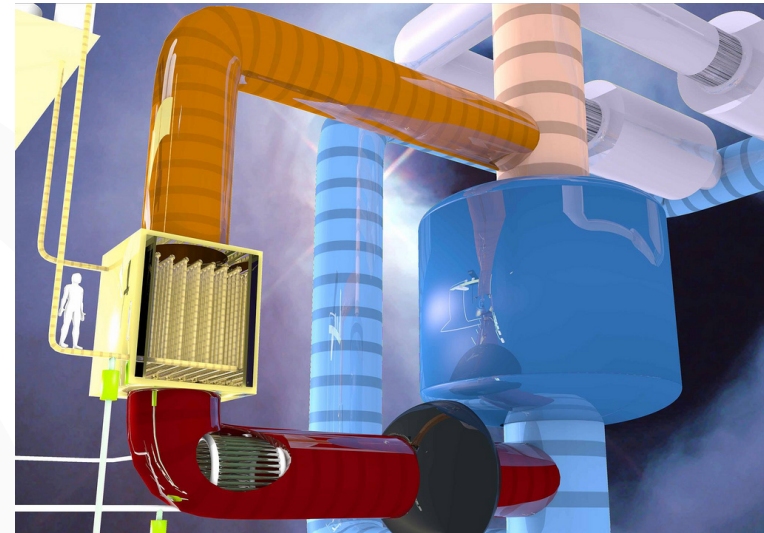
Weitere Schnelle Reaktoren weltweit

- ♦ **Frankreich:** Demonstrationsreaktor ASTRID (Advanced Sodium Technical Reactor for Industrial Demonstration)
- ♦ **Südkorea:** kooperiert mit TerraPower.
 - ♦ TerraPower: Startup von Bill Gates
 - ♦ **Traveling Wave Reactor** (ab 2030)

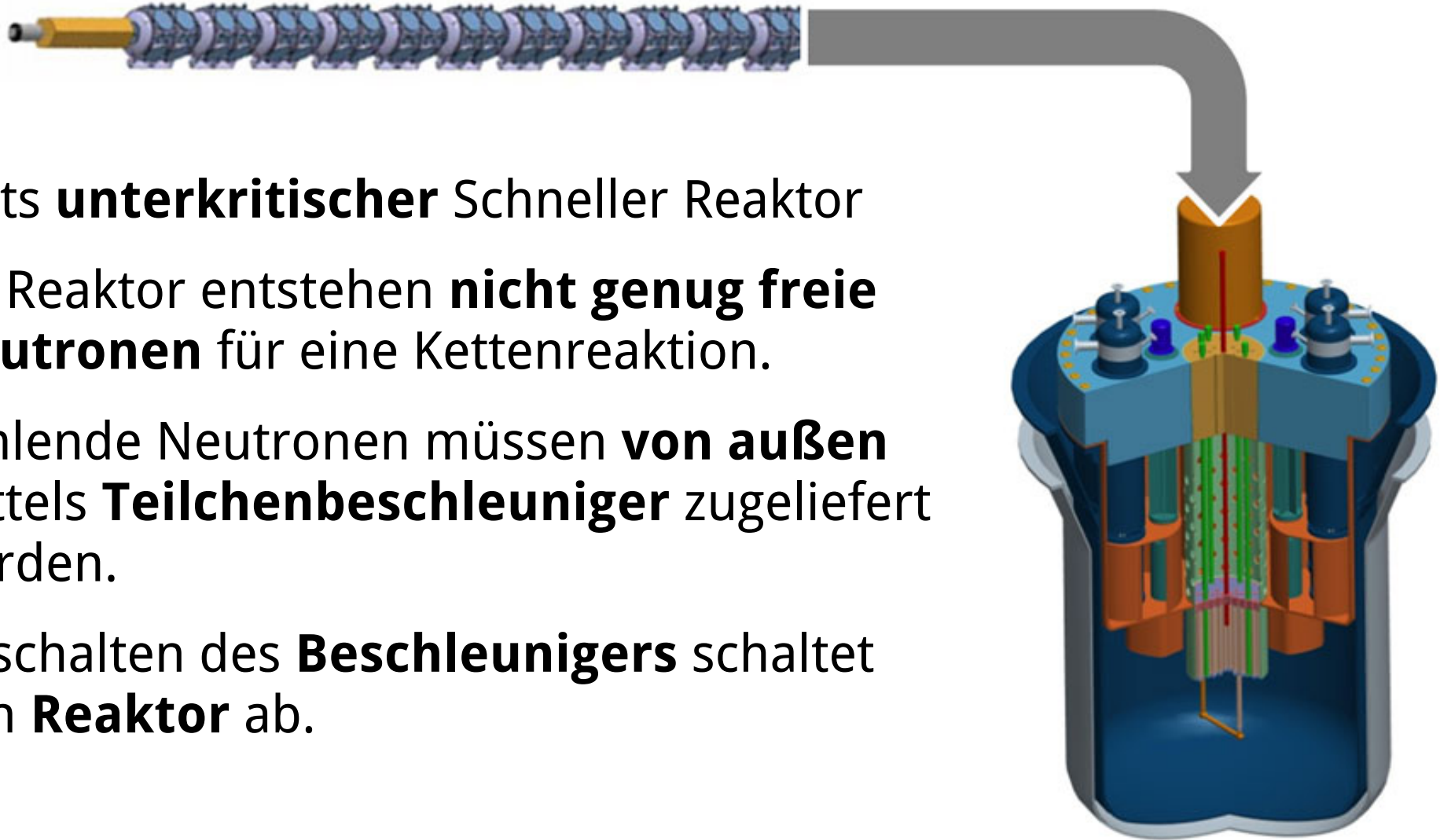


Dual-Fluid-Reaktor

- ♦ Reaktordesign aus Deutschland
 - ♦ Institut für Festkörper-Kernphysik
 - ♦ Sieger der Herzen bei den GreenTec Awards 2013
- ♦ **Atommüll** (Aktinide) als Brennstoff
- ♦ Kernbrennstoff in **Salzschmelze** gelöst
- ♦ Kühlung durch flüssiges **Blei**
- ♦ **Hohe Temperatur** (1.000 °C)
 - ♦ Effiziente Stromerzeugung
 - ♦ Prozesswärme für Industrie/Chemie
 - ♦ Wasserstoffgewinnung, Kraftstoffsynthese



Subkritische Transmutationsanlagen



- ♦ Stets **unterkritischer** Schneller Reaktor
- ♦ Im Reaktor entstehen **nicht genug freie Neutronen** für eine Kettenreaktion.
- ♦ Fehlende Neutronen müssen **von außen** mittels **Teilchenbeschleuniger** zugeliefert werden.
- ♦ Abschalten des **Beschleunigers** schaltet den **Reaktor** ab.



Subkritische Transmutationsanlagen

- ♦ Abschalten des Reaktors ersetzt nicht die **Kühlung**.
- ♦ **Nachzerfallswärme** muss abgeführt werden.
 - ♦ Wärme, die durch radioaktiven Zerfall der Spaltprodukte entsteht
- ♦ Subkritikalität erhöht lediglich den **Wohlfühlfaktor**.
- ♦ Deutliche höhere Komplexität als normaler Schneller Reaktor
 - ♦ Höhere Kosten für Konstruktion und Betrieb
 - ♦ Beschleuniger verbraucht einen Teil der gewonnenen elektrischen Energie (ca. 10 – 20 MW)
- ♦ Europäisches Projekt **MYRRHA** (Mol, Belgien)
- ♦ Weitere Projekte weltweit



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.



Vorher



Nachher

- Transurane
- Spaltprodukte
- Uran-236
- Uran-235
- Uran-238



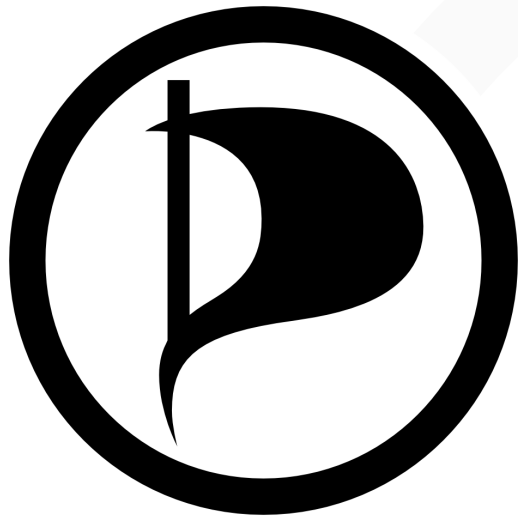
Reichweite des Atommülls

- 2022 hat Deutschland **18.000 Tonnen Aktinide** 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: $18.000 / 70 = 250$ Jahre
 - Bei **25prozentiger 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**





- Die Piratenpartei hat bislang keine Lösung für das Atommüllproblem.
- Bundestagswahlprogramm 2013 fordert
 - *»verantwortungsvollen Umgang mit Atommüll«*
- Das ist doch selbstverständlich. Das braucht man nicht ins Programm zu schreiben.
- Viel spannender ist diese Frage:
 - *Wie sieht verantwortungsvoller Umgang mit Atommüll in der Praxis aus?*



Was will die Nuklearia?

- Öffentliche und parteiinterne Diskussion **aller** Entsorgungsvarianten:
 - **Direkte Endlagerung**
 - **Plutonium-Recycling**
 - **Transmutation**
- Welche Variante halten die Menschen für die sinnvollste?
- Welche Variante hält die Piratenpartei für die sinnvollste?
- Welche Variante halten Skeptiker und Kernenergiegegner für am wenigsten schlimm?
- In welche Variante sollten bevorzugt Forschungsmittel fließen?
- Wir wollen eine Entscheidung der Piratenpartei.



Was will die Nuklearia?

- ♦ **Keine Tabus!**
 - ♦ Bevorzugung einer Variante bedeutet nicht, dass über die anderen nicht mehr geredet werden darf.
 - ♦ Beschlusslage muss sich an Stand von Wissenschaft und Technik anpassen lassen.
- ♦ Keine Entscheidung ist auch eine Entscheidung: Geltendes Atomrecht sieht **direkte Endlagerung** vor.
- ♦ Oberirdische Zwischenlager können **Zeit** verschaffen. Doch wir müssen uns entscheiden, in welche Richtung wir künftig **forschen und entwickeln** wollen.
- ♦ Präferenz der Nuklearia ist klar: **Transmutation**



Vielen Dank!

Fragen?



- ◆ Nuklearia

- ◆ http://wiki.piratenpartei.de/AG_Nuklearia
- ◆ http://wiki.piratenpartei.de/AG_Nuklearia/Atom%C3%BCII
- ◆ <http://nuklearia.de/wir-ueber-uns>
- ◆ Unsere Treffen:
http://wiki.piratenpartei.de/AG_Nuklearia/Nuklearia#Mumble

- ◆ Diese Präsentation

- ◆ http://wiki.piratenpartei.de/AG_Nuklearia/Pr%C3%A4sentation/Wohin_mit_dem_Atomm%C3%BCII



- ♦ 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



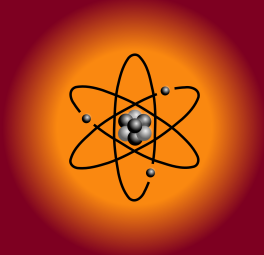
- ♦ S-PRISM
 - ♦ http://en.wikipedia.org/wiki/PRISM_%28reactor%29
- ♦ Advanced Recycling Center
 - ♦ <http://www.ecomagination.com/portfolio/ge-hitachi-nuclear-energy-advanced-recycling-center>
 - ♦ <http://nordic-gen4.org/wordpress/wp-content/uploads/2011/11/David-Powell.pdf>
- ♦ Dual-Fluid-Reaktor
 - ♦ <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



- 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:20090503yukinoohtani02.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
- ♦ Brennelementbündel
 - ♦ <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 (S-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

