

ÜBERSICHT

- **Physikalische Grundlagen**
 - Was ist Radioaktivität?
 - Welche Arten von Strahlung gibt es?
 - Wie wird Strahlung beschrieben?
- **Strahlenschutz**
 - Biologische Auswirkungen von Strahlung
 - Deutsche Strahlenschutzgesetze
 - Messwerte in Japan
- **Kernreaktoren in Deutschland und Japan**

WAS IST RADIOAKTIVITÄT?

„Radioaktivität ist die Eigenschaft instabiler Atomkerne, unter Abgabe von Energie spontan zu zerfallen.“

WAS IST RADIOAKTIVITÄT?

„Radioaktivität ist die Eigenschaft instabiler **Atomkerne**, unter Abgabe von Energie spontan zu zerfallen.“

- Atom: Kleiner, sehr schwerer Kern, darum kreisen Elektronen
- Kern: Besteht aus *Protonen* und *Neutronen* (Nukleonen), die etwa 1800x schwerer sind als ein Elektron
- Proton: 1 positive Elementarladung
Neutron: keine Ladung
- Stabiler Zustand eines Atoms: Neutral geladen, also Protonenzahl = Elektronenzahl
- Isotope: Verschiedene Neutronenzahlen für dieselbe Protonenzahl (1p: H, 1p1n: D oder 6p6n: C, 6p8n: ^{14}C)
Auch „Nuklide“ genannt, ggf. „Radionuklide“

WAS IST RADIOAKTIVITÄT?

„Radioaktivität ist die Eigenschaft **instabiler** Atomkerne, unter Abgabe von Energie spontan zu zerfallen.“

- Stoffe im Alltag: i.d.R. nicht radioaktiv („stabil“)
- Natürlich auf der Erde vorhandene Elemente:
94, davon 14 rein radioaktiv (z.B. Uran, Polonium, Radium)
- Natürlich auf der Erde vorhandene Nuklide:
297, davon ~10% radioaktiv (z.B. $^3\text{H}/\text{T}$, ^{14}C oder ^{40}K)
- Alle beobachteten Nuklide, auch synthetische:
~3000, davon ~90% radioaktiv
- Herkunft der auf der Erde vorhandenen Radionuklide:
Primordial (Halbwertszeiten größer als 150 Mio. Jahre, z.B. Uran),
kosmogen (z.B. ^{14}C), natürlich radiogen (z.B. Radium und Radon),
[anthropogen (z.B. div. Cäsium-Isotope, ^{90}Sr)]

WAS IST RADIOAKTIVITÄT?

„Radioaktivität ist die Eigenschaft instabiler Atomkerne, unter Abgabe von Energie spontan zu **zerfallen**.“

- „Zerfall“: Veränderung eines Zustands zugunsten eines energetisch günstigeren (weniger energetischen) Zustands
- Ist ein Kern zerfallen, liegt nur noch sein Zerfallsprodukt vor: Entweder stabil (nicht mehr radioaktiv) oder selbst auch radioaktiv
- Radioaktive Zerfallsprodukte ergeben Zerfallsreihen:
z.B. Uran --> Thorium --> Radium --> Radon
Ende aller natürlichen Zerfallsketten: Stabiles Blei
- Unterschiedliche Halbwertszeiten: Reines Präparat ist nach einiger Zeit bunte Mischung aller Zerfallsprodukte

WAS IST RADIOAKTIVITÄT?

„Radioaktivität ist die Eigenschaft instabiler Atomkerne, unter Abgabe von Energie **spontan** zu zerfallen.“

- Statistischer Prozess: Für einzelne Prozesse keine exakten Vorhersagen
- Jeder Vorgang passiert pro Zeit nur mit einer gewissen *Wahrscheinlichkeit*
- Vorhersagen aber bei großer Messzeit und Teilchenzahl möglich: *makroskopische Systeme*
- *Halbwertszeit*: Zeitraum, in dem in einer Probe voraussichtlich die Hälfte aller Kerne *eines* Radionuklids zerfallen ist
- Zeitliche Entwicklung: Exponentielles Abfallen der Radioaktivität

WAS IST RADIOAKTIVITÄT?

„Radioaktivität ist die Eigenschaft instabiler Atomkerne, **unter Abgabe von Energie** spontan zu zerfallen.“

Energieabgabe in Form von
Alpha-, Beta- und Gammastrahlung

DIE VERSCHIEDENEN ARTEN VON STRAHLUNG

Alphastrahlung

- Kern emittiert 2 Protonen und 2 Neutronen, zusammengebunden in einem Heliumkern
- Alphateilchen sehr hochenergetisch aber vglw. „schwer und träge“, verlieren durch Stöße schnell ihre Energie
- Abschirmung: Wenige cm Luft oder einige μm Material (z.B. ein Blatt Papier).
- Menschlicher Körper wird schon durch abgestorbene Hautschuppen abgeschirmt. Bei Aufnahme in den Körper hochgefährlich: Wenige μg von ^{210}Po in einer Tasse Tee töteten A. Litwinienko
- [Im groben Vergleich: Alphastrahler sind LKW]

DIE VERSCHIEDENEN ARTEN VON STRAHLUNG

Betastrahlung

- Kern emittiert schnelle Elektronen/Positronen (Antimaterie!) und Neutrinos/Antineutrinos
- Energie etwa 10-mal geringer als bei Alphateilchen, aber mehr Durchdringungskraft wegen geringerer Stoßwahrscheinlichkeit (Ablenkung)
- Abschirmung schwierig: Wenige mm Material reichen für Betastrahlen, aber es tritt sekundäre Gammastrahlung auf, nämlich Bremsstrahlung oder Vernichtungsstrahlung (aus Proton-Elektron-Annihilation)
- [Im groben Vergleich: Betastrahlen sind Kanonenkugeln]

DIE VERSCHIEDENEN ARTEN VON STRAHLUNG

Gammastrahlung

- Kern emittiert elektromagnetische Strahlung von hoher Energie (harte Röntgenstrahlung und aufwärts)
- Abschirmung sehr schwierig: Strahlungsintensität sinkt nur exponentiell, mehrere Meter Beton oder Stahl zur Abschirmung auf harmlose Intensität
- [Im groben Vergleich: Gammastrahlen sind Gewehrkugeln]

DIE VERSCHIEDENEN ARTEN VON STRAHLUNG

Neutronenstrahlung

- Keine „ionisierende Strahlung“ (wie Alpha-, Beta-, Gamma-), aber radioaktives Phänomen und medizinisch ebenso relevant
- Bei Kernspaltung werden einzelne „schnelle“ Neutronen frei
- Sekundärstrahlung:
 - Ionisierende Strahlung nach Neutroneneinfang (Aktivierung)
(Beispiel: $n + {}^{197}\text{Au} \rightarrow {}^{198}\text{Au}^* + \gamma \rightarrow {}^{198}\text{Au} + \beta \rightarrow {}^{198}\text{Hg}$)
 - Schnelle, ionisierende Protonen aus Stößen
 - Weitere Neutronen aus Spaltungen (Kettenreaktion!)
- Je nach Material und Energie: Eindringtiefe z.T. größer als bei Gammas
- Abschirmung: Leichte Elemente wie H zum Bremsen (Impulsübertrag)
- [Grober Vergleich: versagt]

DIREKTE WAHRNEHMUNG VON STRAHLUNG

Keine.

BESCHREIBUNG DER RADIOAKTIVITÄT

Aktivität

- **Becquerel (Bq):** SI-Einheit für Radioaktivität
1 Bq: 1 Zerfall pro Sekunde
- **Curie (Ci):** Veraltete aber anschaulichere Einheit für Radioaktivität
Entspricht 37 GBq, etwa die Radioaktivität von einem Gramm Radium
- Angabe der Aktivität unabhängig von der Art der Strahlung
- Jedes radioaktive Präparat zerfällt, daher: Aktivität nie stabil
→ Aussage über Aktivität nur für einen bestimmten Zeitpunkt sinnvoll!
- Menschlicher Körper: Zwischen 1.000 und 10.000 Bq

BESCHREIBUNG DER RADIOAKTIVITÄT

Dosis

- **Gray (Gy)**: SI-Einheit für absorbierte Energie pro Masse
- 1 Gy entspricht 1 **Joule (J)** auf 1 **Kilogramm (kg)** Körpermasse
- 1 J: Etwa die Energie eines Apfels, der aus 1 m Höhe fällt

Äquivalentdosis

- **Sievert (Sv)**: Dosis mal Strahlungsgewichtungsfaktor
- Strahlungsgewichtungsfaktor: Rechnerische Korrektur für die unterschiedliche Wirkung der verschiedenen Strahlungsarten
- 1 Gy Gammastrahlung: 1 Sv
1 Gy Alphastrahlung: 20 Sv
1 Gy Neutronenstrahlung: 5 – 20 Sv (je nach Energie)

FRAGEN ZU DEN PHYSIKALISCHEN GRUNDLAGEN?

BIOLOGISCHE WIRKUNG

Biologische Wirkung: Schädigung von Zellen, insbesondere DNS.
Mögliche Folgen: Schaden wird repariert; Apoptose; Tumorbildung

Zwei grundsätzliche Arten von Schädigung: Akute und stochastische Schäden

Stochastische Schäden (vermutet): 5% frühzeitige Krebstode pro Personensievert
Beispiel: 100 Personen sind je 10 mSv ausgesetzt: 5 von ihnen werden frühzeitig an Krebs sterben.

Konkret: Aus 0,3 mSv/a Höhenstrahlung resultieren ~25.000 Tode in Deutschland

Akute Schäden: Strahlenkrankheit

Symptome nach Dosis (beachte: „walking ghost“-Phase von 7 bis 14 Tagen)

< 1 Sv: Nicht offensichtlich, Leukozyten vorübergehend reduziert

1 bis 2 Sv: LD 10/30. Übelkeit, Erschöpfung, vorübg. Sterilität, Fehlgeburten

3 bis 4 Sv: LD 35/30. Haarverlust, Blutungen, Leukozytenverlust

6 bis 10 Sv: fast LD 100/14. Knochenmark zerstört

PRAKTISCHER STRAHLENSCHUTZ

Grundsatz: „Drei A's“:

Abstand vergrößern (Exposition geht mit r^{-2})

Aufenthaltszeit verringern (Exposition geht mit t)

Abschirmung (Unterschiedlich effektiv nach Strahlungsart)

Wichtiger Effekt: Zeitliche Aufteilung der Exposition → **Goiânia-Unfall**

Zentralbrasilien: Radioaktive Quelle verlassenem Krankenhaus gestohlen.

Material: ^{137}Cs (HWZ 30 a); Aktivität: 51 Tbq (~ 1.400 Ci, also 1.4 kg Radium)

Quelle wird geöffnet, verschenkt und verkauft („schönes blaues Leuchten“).

Vier Tote und 50 Patienten innerhalb weniger Wochen.

Beispiel für Expositionsaufteilung: Schrottplatzeinhaber erhält 7 Gy über mehrere Tage verteilt, überlebt. Seine Frau erhält eine einmalige, kontinuierliche Dosis von 5,7 Gy und stirbt.

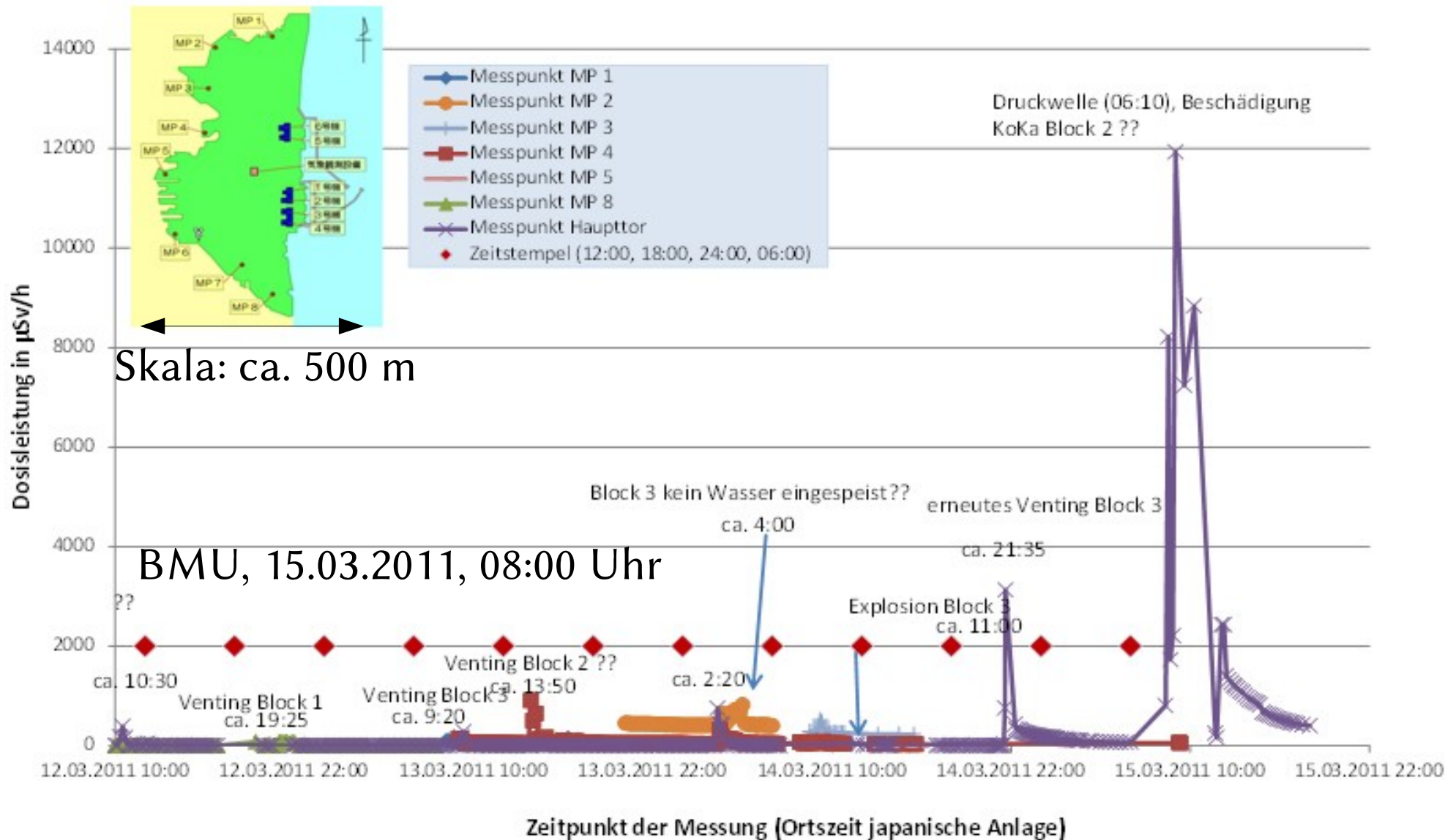
Wichtiges Werkzeug: Dosimeter. Klein, tragbar, erfasst die Strahlenbelastung einer Person oder in einem Bereich.

STRAHLENSCHUTZGSETZE IN DEUTSCHLAND

„Die Äquivalentdosis, die durch den Betrieb kerntechnischer Anlagen in Deutschland bei einem Menschen aus der Bevölkerung verursacht werden darf, beträgt maximal 1 mSv (Tausendstel Sievert) pro Jahr. Mitarbeiter kerntechnischer Anlagen dürfen maximal 20 mSv pro Jahr aufnehmen.“ (Strahlenschutzverordnung)

- Dosis aus natürlichen Quellen: etwa 2,4 mSv pro Jahr (Inhalation von Radon und dessen Zerfallsprodukten, Höhenstrahlung)
- Medizinische Quellen
 - Röntgenuntersuchung: 0,05 bis 2 mSv
 - Szintigraphie: 1 bis 4 mSv
 - Computertomographie (CT): 5 bis 20 mSv
- Transatlantikflug: Zwischen 0,05 und 0,10 mSv

Gemessene Dosisleistungen an ausgewählten Messpunkten Fukushima Daiichi - Daten des Betreibers TEPCO

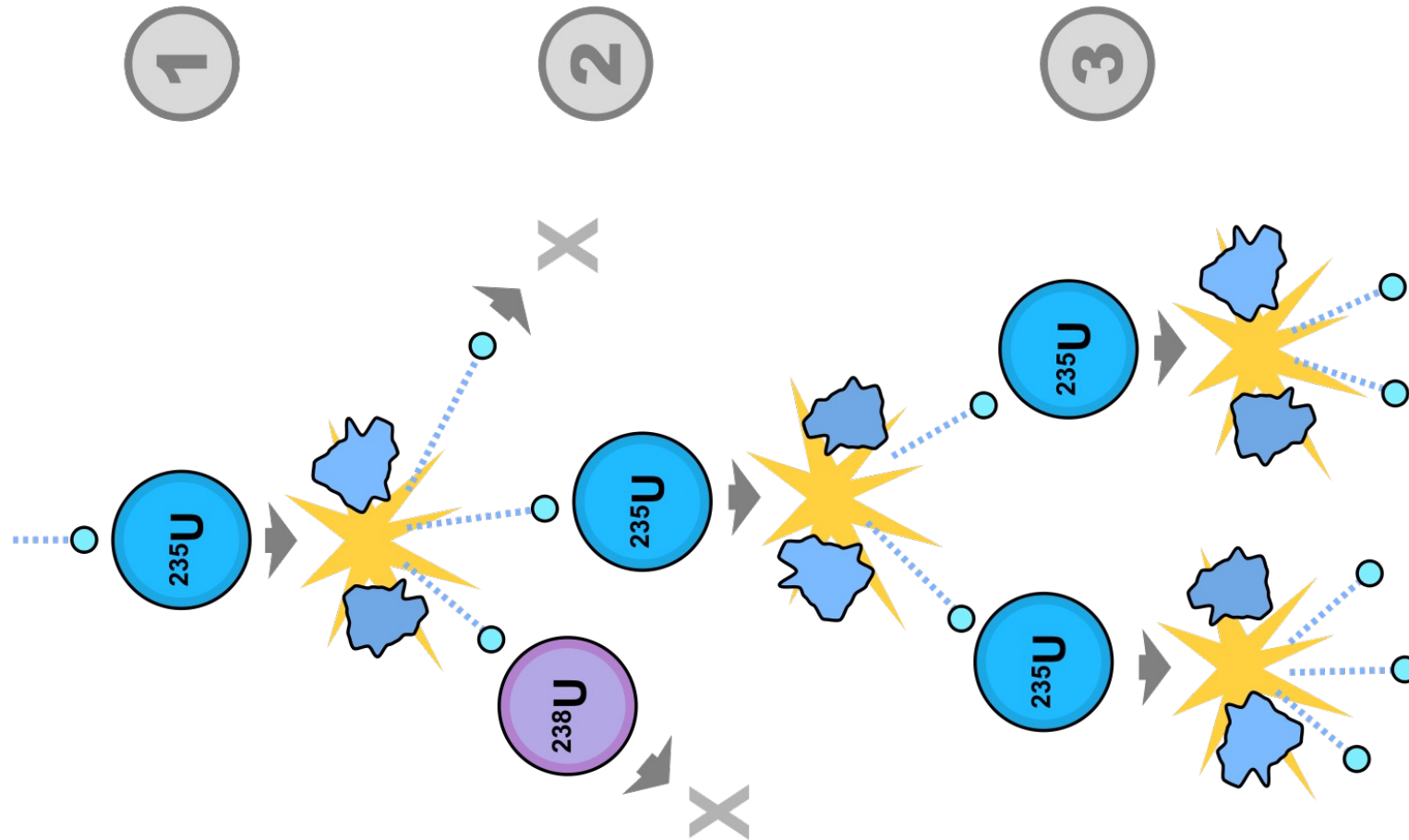


MESSWERTE IN JAPAN

- Fukushima Daini (etwa 10 km von Daiichi): Ortsdosisleistungen von maximal 1 mSv/h zum Zeitpunkt der Beschädigung des Wetwell in Reaktor 2 in Daiichi
- Onagawa (etwa 100 km von Fukushima): 21 μ Sv/h am 12.03. gemessen und gemeldet, seitdem aber keine erhöhten Werte (wohl aus Daiichi)
- Nach der Exposition in Reaktor 2: **In Daiichi stellenweise 400 mSv/h**

FRAGEN ZUM STRAHLENSCHUTZ?

KETTENREAKTION



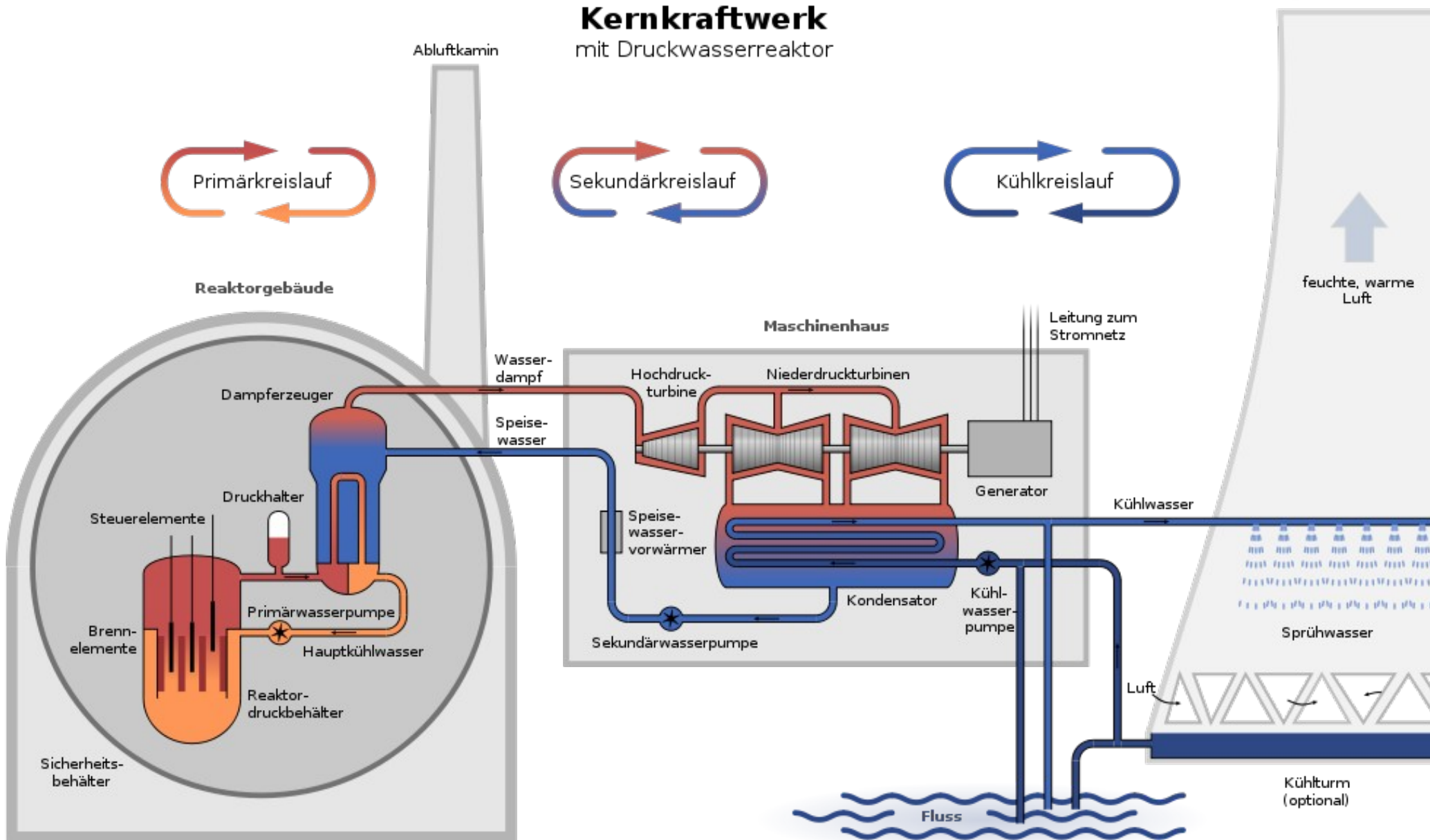
Unterschied zu Kernexplosion: Moderation (für bessere Ausbeute)
und verzögert kritischer Betrieb (verzögerte Spaltneutronen)

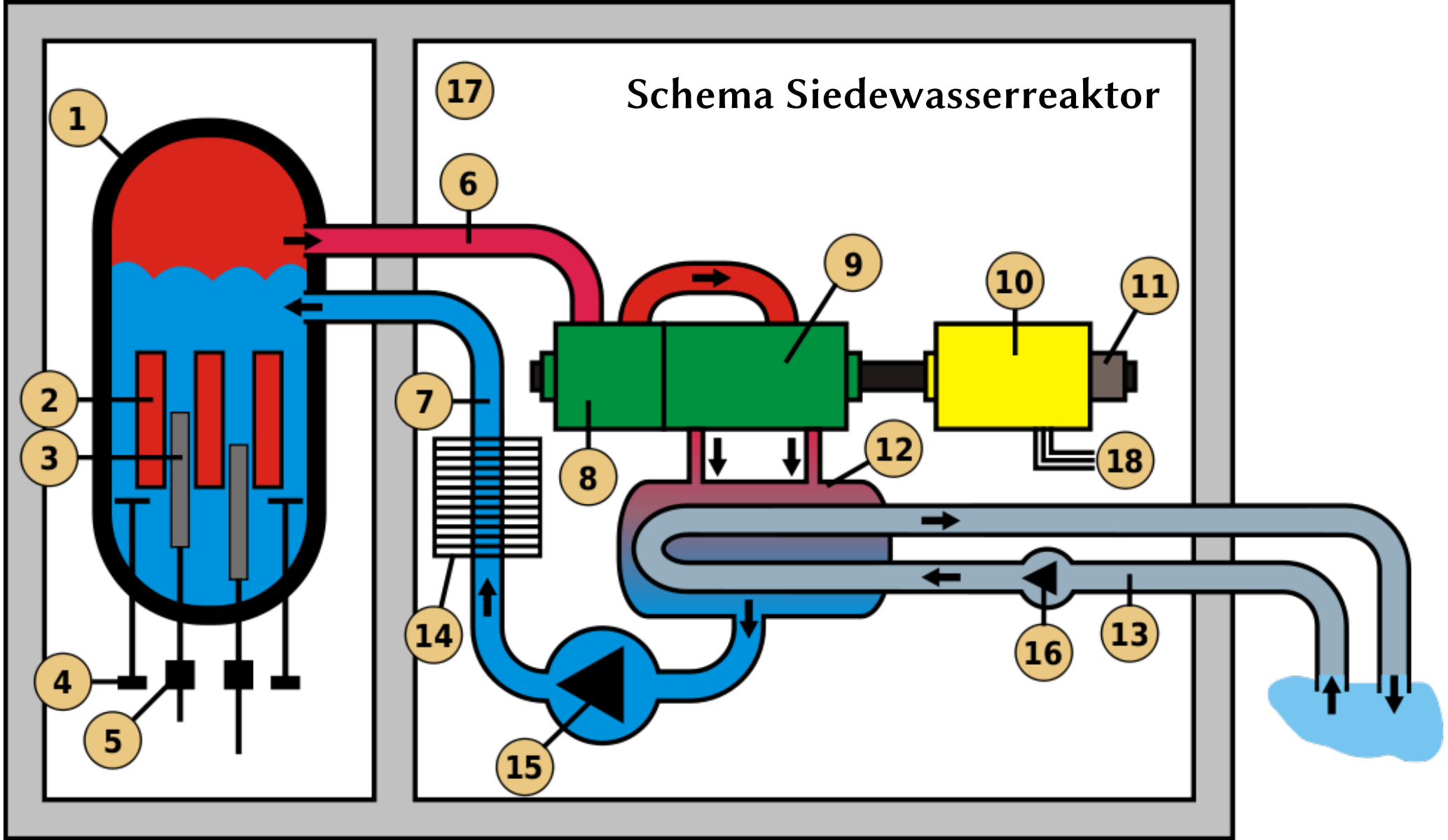
NATUR EINES REAKTORUNGLÜCKS

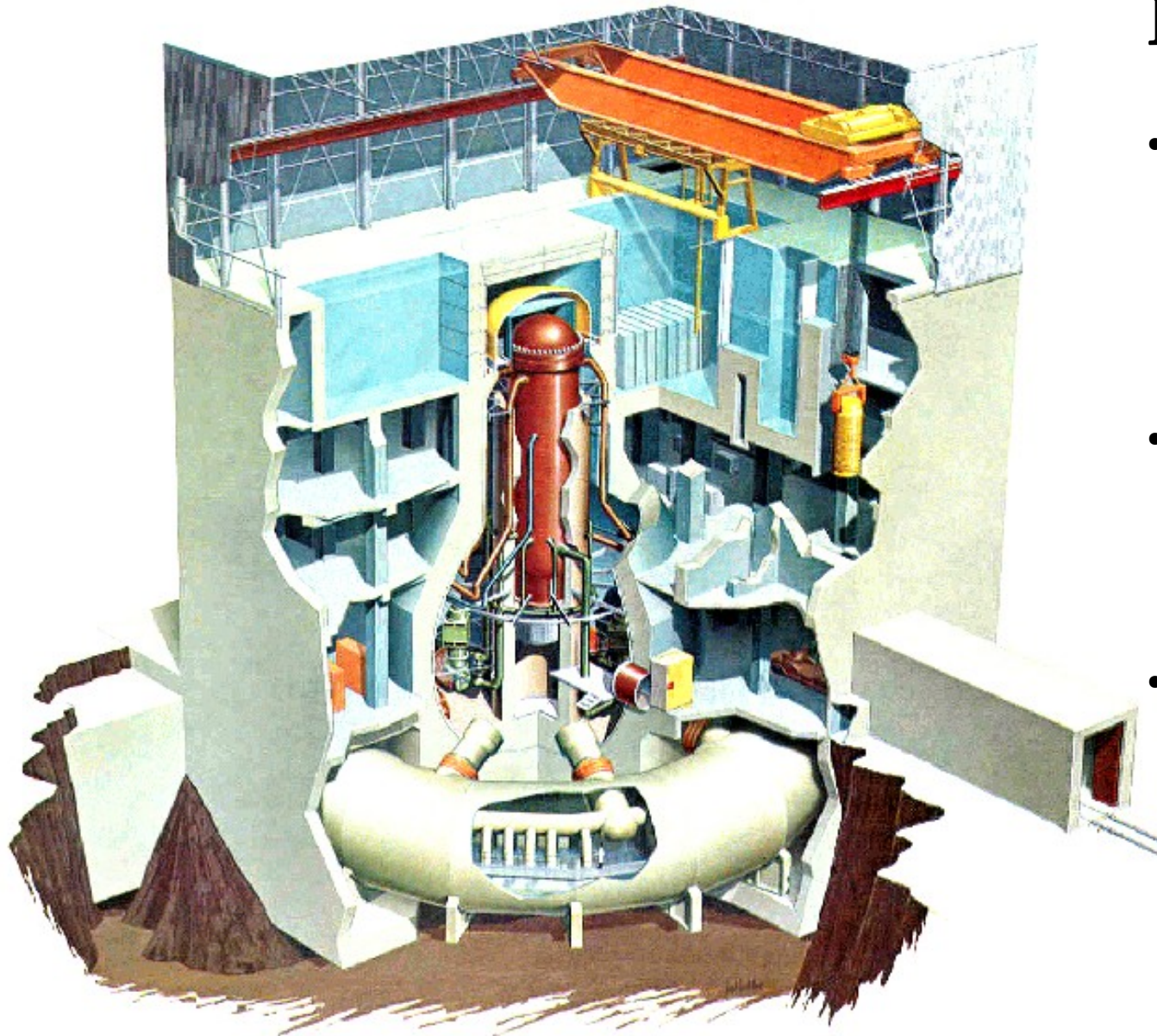
- Die Natur der Kettenreaktion und des Brennstoffs bedingen:
Es ist unter allen Umständen unmöglich, dass eine nukleare Explosion ähnlich der in einer Kernwaffe stattfindet!
- In einer Kernwaffe kommt hochangereichertes Uran oder Plutonium (über 90 %) in einer Anordnung zum Einsatz, die extrem schnell prompt überkritisch gemacht wird
- In einem Reaktor kommt Uran oder Plutonium mit einem Anreicherungsgrad von 3–6 % zum Einsatz, dessen Anordnung höchstens verzögert kritisch betrieben wird, und dessen Kritikalität selbst bei einer Katastrophe vergleichsweise sehr langsam verändert
- Deshalb: GAU in einem Reaktor bedeutet massive Freisetzung

PRINZIPIELLE ELEMENTE DES KERNREAKTORS

- Brennstoff, Moderator
- Kühlmittel, Kühlkreislauf
- Elektrizitätserzeugung
- Sicherheitsvorrichtungen (Containment usw.)

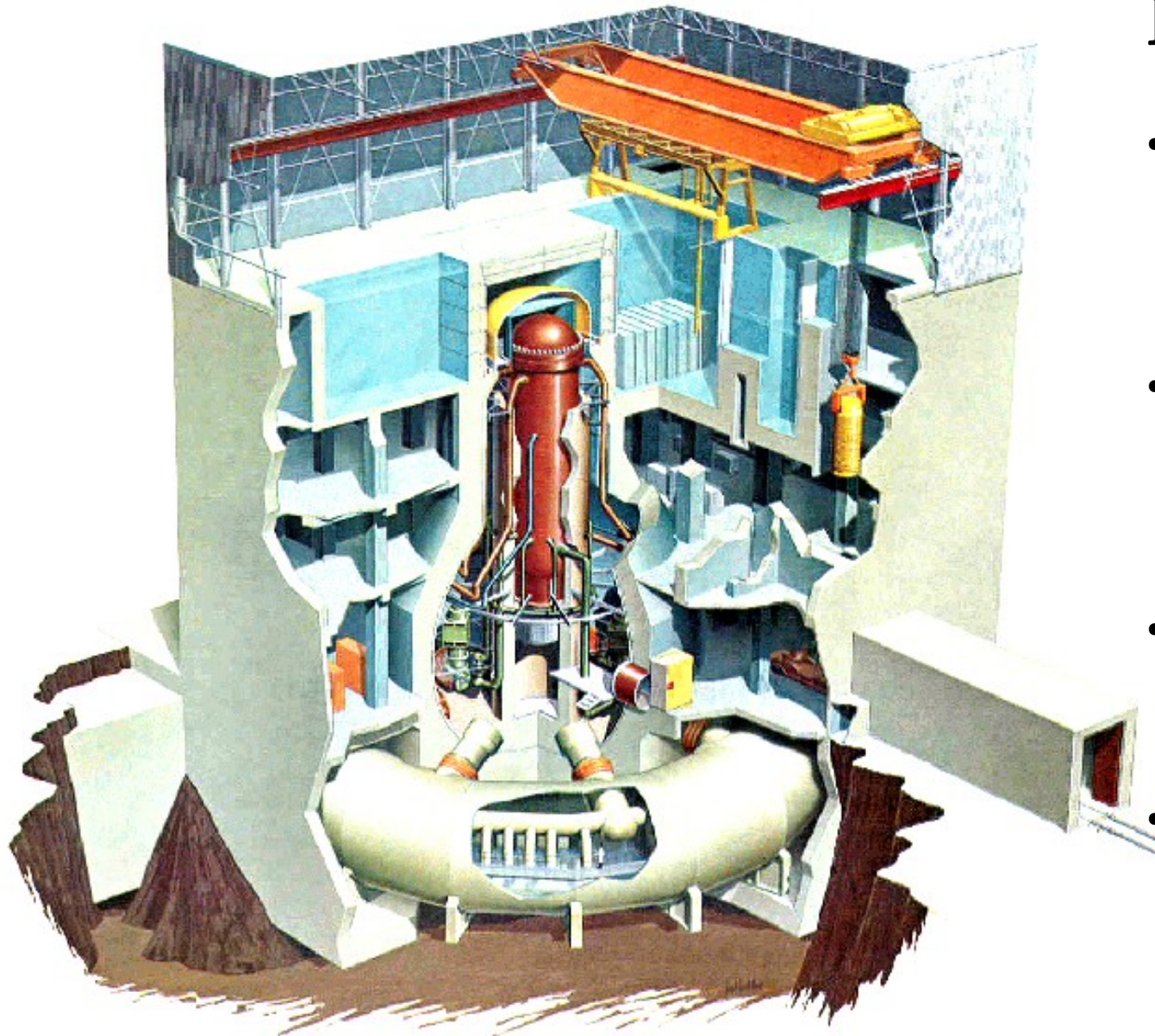






EREIGNISSE

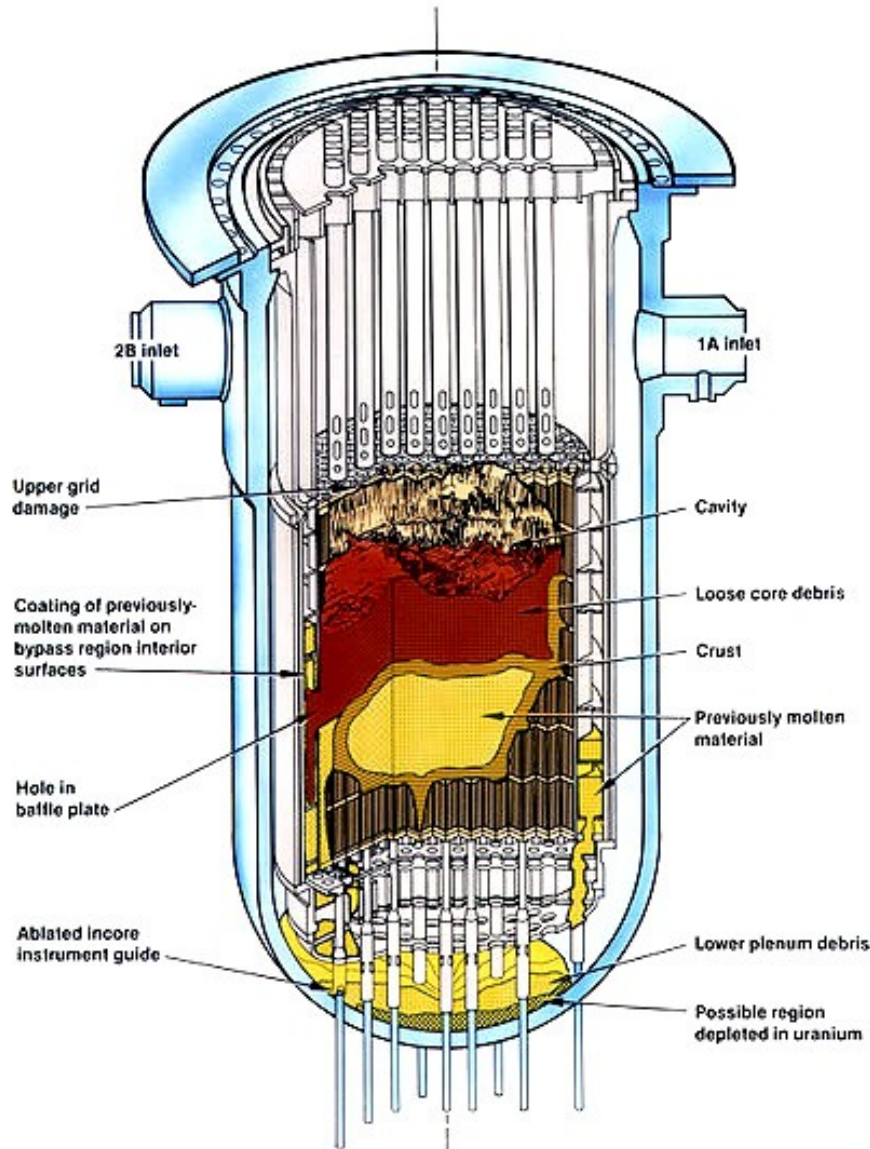
- Reaktoren 1, 2 und 3, kurz nach Erdbeben: Stromausfall, versagen der Dieselgeneratoren, Leerlaufen der Batterien
- Reaktoren 1, 2 und 3, kurz nach Erdbeben: Druckablass aus dem Druckbehälter über Ventile
- Reaktoren 1 und 3, Samstag und Montag: Wasserstoffexplosion zwischen 2. Cont. und Reaktorgebäude



EREIGNISSE

- Reaktoren 1, 2 und 3, seit Sonntag: Einleitung von borierterem Meerwasser
- Reaktor 2, heute Nacht: Explosion und Beschädigung des Torus (2. Containment!), Druckabfall v. 3 auf 1 bar
- Reaktor 4, heute: Brand in Abklingbecken, Äthmosphärische Exposition
- Reaktoren 1, 2 und 3: Vermutlich Kernschmelze

TMI-2 Core End-State Configuration



KERNSCHMELZE

- Beispiel Reaktor Three Mile Island (INES-5)
- Zerstörung der Brennstab-Struktur, Zusammenlaufen und Absinken des Kerns
- Möglicherweise neue, kritische Konfiguration unter großer Hitzeentwicklung
- Core Catcher:
Hat Fukushima I nicht

SCHÖNES SCHLUSSWORT



Danke!

„Jawohl wir wissen, dass wir auch ein Stück weit in Gottes Hand sind.“
–Angela Merkel am 12.03.2011 zu Naturkatastrophen und Kernenergie

BILDQUELLEN

- Titelbild: Wikimedia Commons
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:First_nuclear_chain_reaction.jpg
- Grafik zur Ortsdosisleistung um Fukushima I, Seite 20: BMU
http://www.bmu.de/files/bilder/allgemein/image/jpeg/japan_tepco_messung_05_gr.jpg
Inzwischen überholt! Siehe http://www.bmu.de/atomenergie_sicherheit/doc/47088.php
- Illustration der Kettenreaktion, Seite 23: Wikimedia Commons
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fission_chain_reaction.svg
- Schema eines Druckwasserreaktors, Seite 26: Wikimedia Commons
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kernkraftwerk_mit_Druckwasserreaktor.svg
- Schema eines Siedewasserreaktors, Seite 27: Wikimedia Commons
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Schema_reacteur_eau_bouillante.svg
- Aufschnitt des GE Mk I-BWR, Seiten 28–29: USNCR Technical Training Center, Reactor Concepts Manual: Boiling Water Reactor Systems
<http://1.usa.gov/gDaGqh>
- Schema des Reaktokerns TMI-2 in Three Mile Island, Seite 30: Wikimedia Commons
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Graphic_TMI-2_Core_End-State_Configuration.jpg
- Satirisches CDU-Wahlkampfplakat „Wir wählen die Atomkraft“, Seite 31:
Urheberschaft unklar, virale Verbreitung, zahlreiche Quellen
Aufzufinden über Google-Bildersuche nach: Merkel Atomkraft Burns