

Kernenergie – Grundlagen, Technik, Risiken

Dienstag, 12.4.2005
OT 18 Wiesbaden

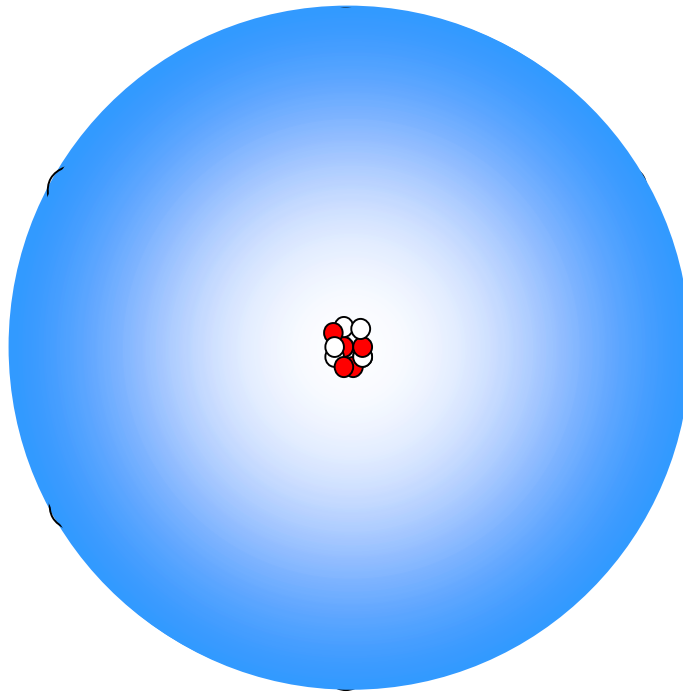
Dr. rer. nat. Holm Gero Hümmler
Dipl.-Phys./Dipl.-Wirt.-Phys.
Partner, The Galileo Consulting Group, Ingelheim
Kontakt: hummler@web.de

Agenda

- Atome und Kerne
- Instabile Kerne und Zerfälle
- Radioaktive Strahlung
- Die Kernspaltung
- Der Aufbau eines Kernkraftwerks
- Gefahren der Kernenergienutzung
- Auslaufmodell oder Zukunftstechnologie?

Atome und Kerne

Das klassische Atommodell

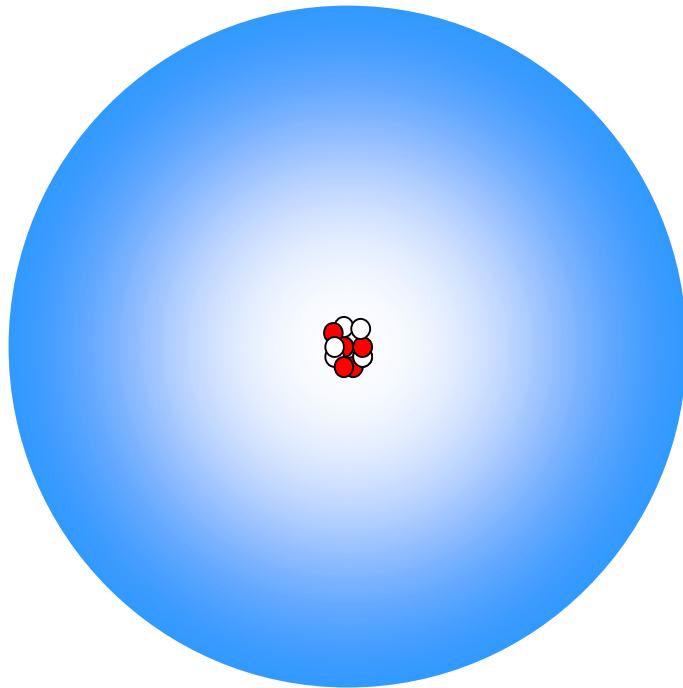


Kern, positiv geladen (+)
99,97% der Masse des Atoms
0,001% des Atomdurchmessers
Große Energien der Kernkräfte,
in radioaktiven Zerfällen

Elektronenhülle, negativ geladen (-)
0,03% der Masse des Atoms
100% des Atomdurchmessers
Kleine Energien der elektromagnetischen Kraft, in chemischen Reaktionen

Atome und Kerne

Atomphysik und Kernphysik



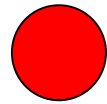
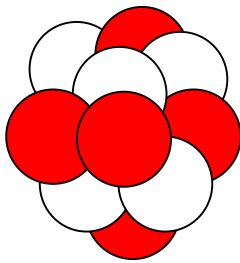
Physikalische und chemische
Eigenschaften des Atoms
(außer Masse):
Bestimmt durch die Elektronenhülle,
nicht durch den Kern

Die Atomphysik (Chemie) beschäftigt
sich nur mit der Elektronenhülle, mit
dem Kern nur die Kernphysik

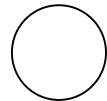
Der Begriff „Atomenergie“ für
Kernenergie ist physikalisch Unsinn!

Atome und Kerne

Der Aufbau des Atomkerns



Proton: Masse 1 Ladung +1



Neutron: Masse 1 Ladung 0



Elektron: Masse ≈ 0 Ladung -1
(in Elektronenhülle)

Anzahl Protonen:

→ Anzahl Elektronen in Hülle

→ Chemische Eigenschaften des Atoms

→ Chemisches Element

Anzahl Protonen+Neutronen: → Masse des Atoms

Atome und Kerne

Die Bezeichnung von Atomkernen



Analog: **¹²C** „Kohlenstoff 12“ 6 Protonen, 6 Neutronen
¹⁴C „Kohlenstoff 14“ 6 Protonen, 8 Neutronen

Anzahl Protonen: → Anzahl Elektronen in Hülle
→ Chemische Eigenschaften des Atoms
→ Chemisches Element

Anzahl Protonen+Neutronen: → Masse des Atoms

Instabile Kerne und Zerfälle

Die drei Kräfte im Atomkern

Starke Kernkraft	Hält Protonen und Neutronen zusammen Kurze Reichweite, Analogie: Klebstoff
Elektromagnetische Kraft	Zu viele Protonen (positive Ladungen) im Kern stoßen sich ab
Schwache Kernkraft	Reguliert Verhältnis von Protonen zu Neutronen im Kern

Drei Gründe für Instabilität von Atomkernen

Zu schwerer Kern Abstoßende Kräfte > Zusammenhalt	Zu viele Protonen je Neutron (ideal 1:1 bis 1:1,4)	Zu viele Neutronen je Proton
---	--	---------------------------------

Instabile Kerne und Zerfälle

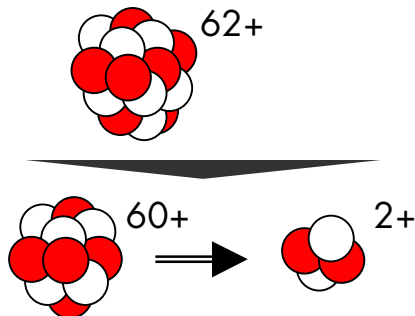
Die wichtigsten Zerfälle von Atomkernen

Zu schwerer Kern
Abstoßende Kräfte >
Zusammenhalt

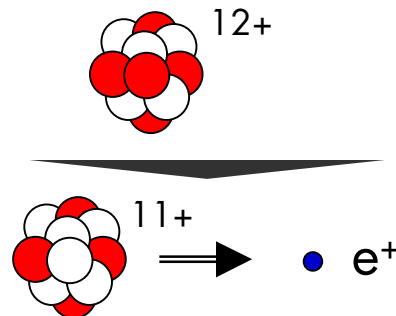
Zu viele Protonen
je Neutron
(ideal 1:1 bis 1:1,4)

Zu viele Neutronen
je Proton

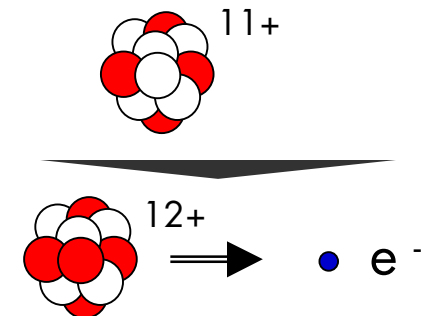
Ausstoß eines kleinen
(^4He -) Atomkerns



Umwandlung Proton
in Neutron+Positron



Umwandlung Neutron
in Proton+Elektron



α -Zerfall
 \rightarrow α -Strahlung

β^+ -Zerfall
 \rightarrow β -Strahlung

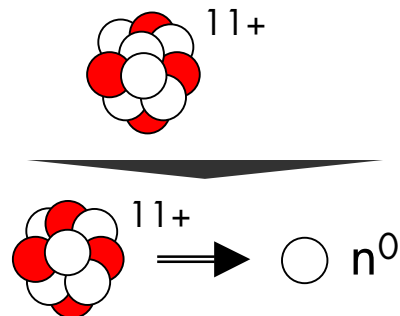
β^- -Zerfall
 \rightarrow β -Strahlung

Instabile Kerne und Zerfälle

Elektrisch neutrale Zerfälle

Viel zu viele
Neutronen je Proton

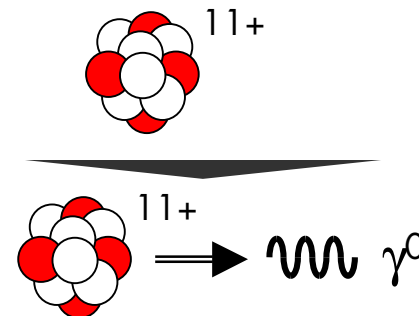
Ausstoß eines
freien Neutrons



Neutronzerfall
→ Neutronenstrahlung

Restenergie aus
einem vorher-
gehenden Zerfall

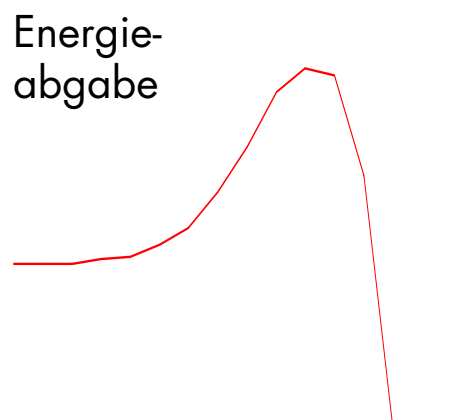

Ausstoß eines elektro-
magnetischen Impulses



γ -Zerfall
→ γ -Strahlung

Radioaktive Strahlung

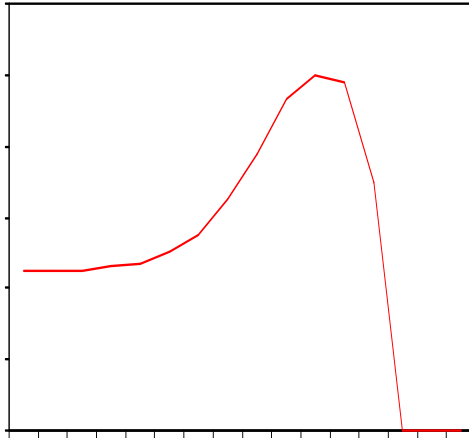
Absorption von Strahlung in Materie

Elektrisch geladene Strahlung (α , β^+ , β^-)	 <p>Energieabgabe</p>	Reichweite in Luft α : 4cm β : 3m	Notwendige Abschirmung α : 1 Blatt Papier β : 5mm Plexiglas
Elektrisch neutrale Strahlung (n , γ)	 <p>Holm Hümmler, Tanja Schilling, Institut für Kernphysik, Universität Frankfurt 12.6.1995</p>	Reichweite in Luft n : 1000m γ : 700m	Notwendige Abschirmung n : 2m Wasser γ : 10cm Blei

Radioaktive Strahlung

Strahlung als Energiequelle?

Elektrisch
geladene
Strahlung
(α , β^+ , β^-)



Strahlung gibt bei Absorption die Energie des Kernzerfalls an die absorbierende Materie ab, die Materie wird dabei erwärmt.

Instabile Kerne sind eine ergiebige Energiequelle

Elektrisch
neutrale
Strahlung
(n , γ)

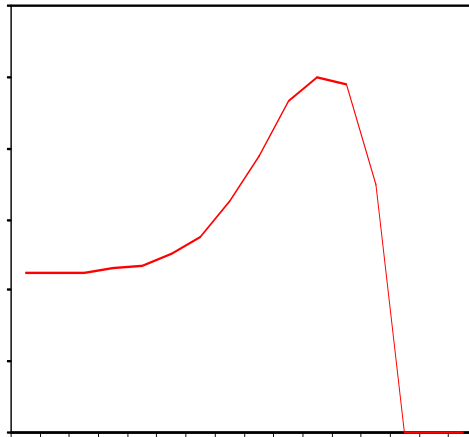


Aber: Instabile Kerne entstehen nur im Labor oder in Sternen; auf der Erde vorkommende zerfallen entweder sehr langsam oder sind schon zerfallen

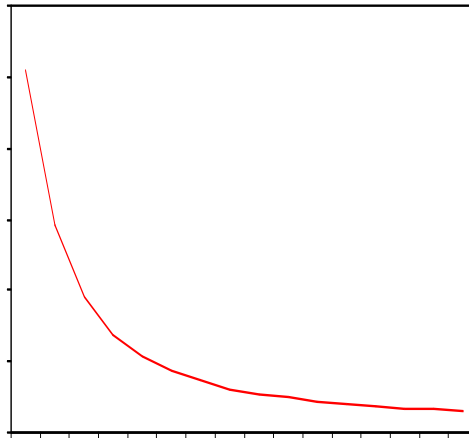
Radioaktive Strahlung

Strahlung als Energiequelle?

Elektrisch
geladene
Strahlung
(α , β^+ , β^-)



Elektrisch
neutrale
Strahlung
(n , γ)

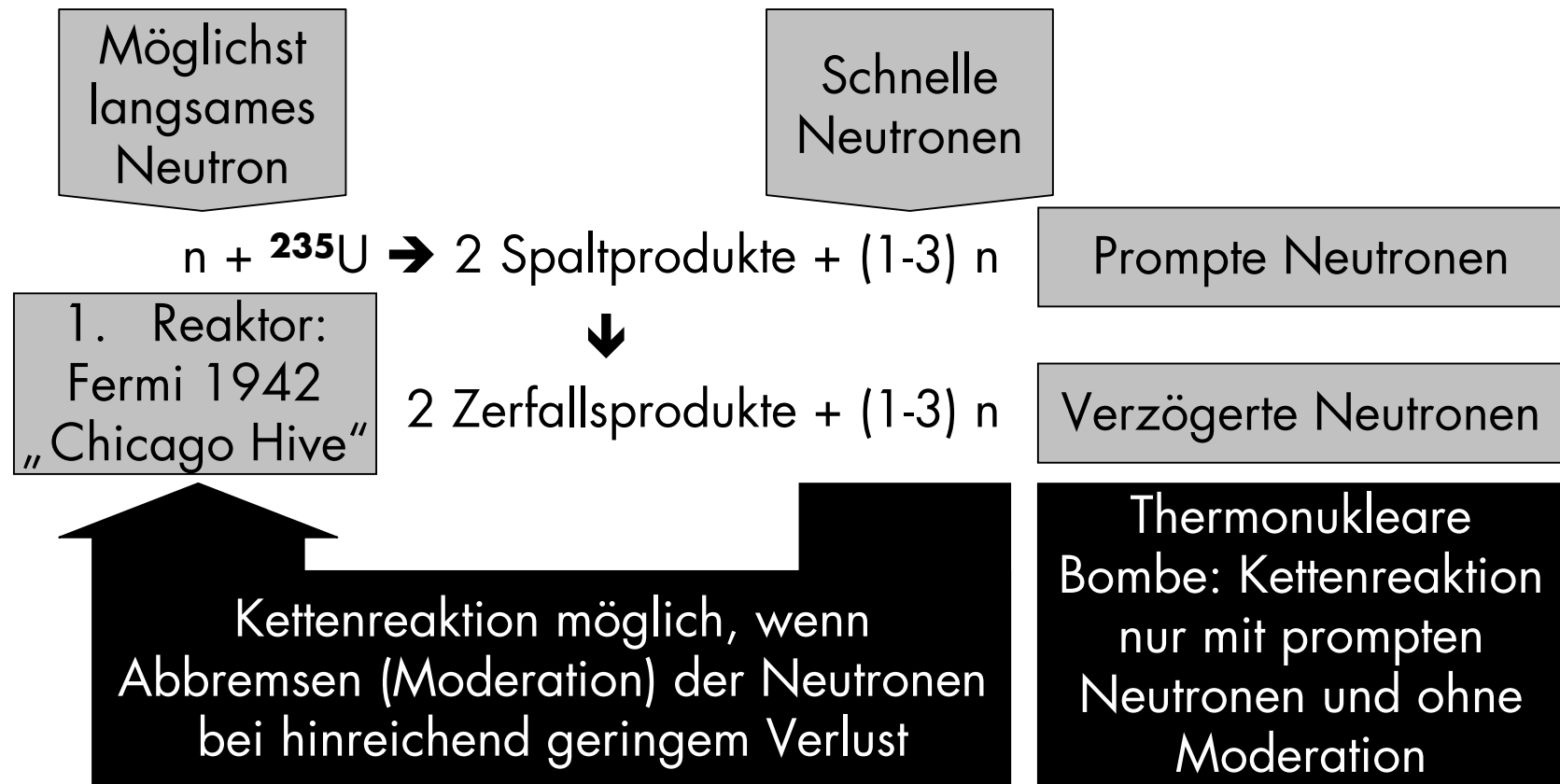


*„Wer glaubt, man könnte die
Energie der Kernkräfte freisetzen,
hat die Physik nicht verstanden.“*

- Albert Einstein

Die Kernspaltung

Das Prinzip der Kernspaltung
(Otto Hahn/Lise Meitner/Fritz Straßmann 1938)



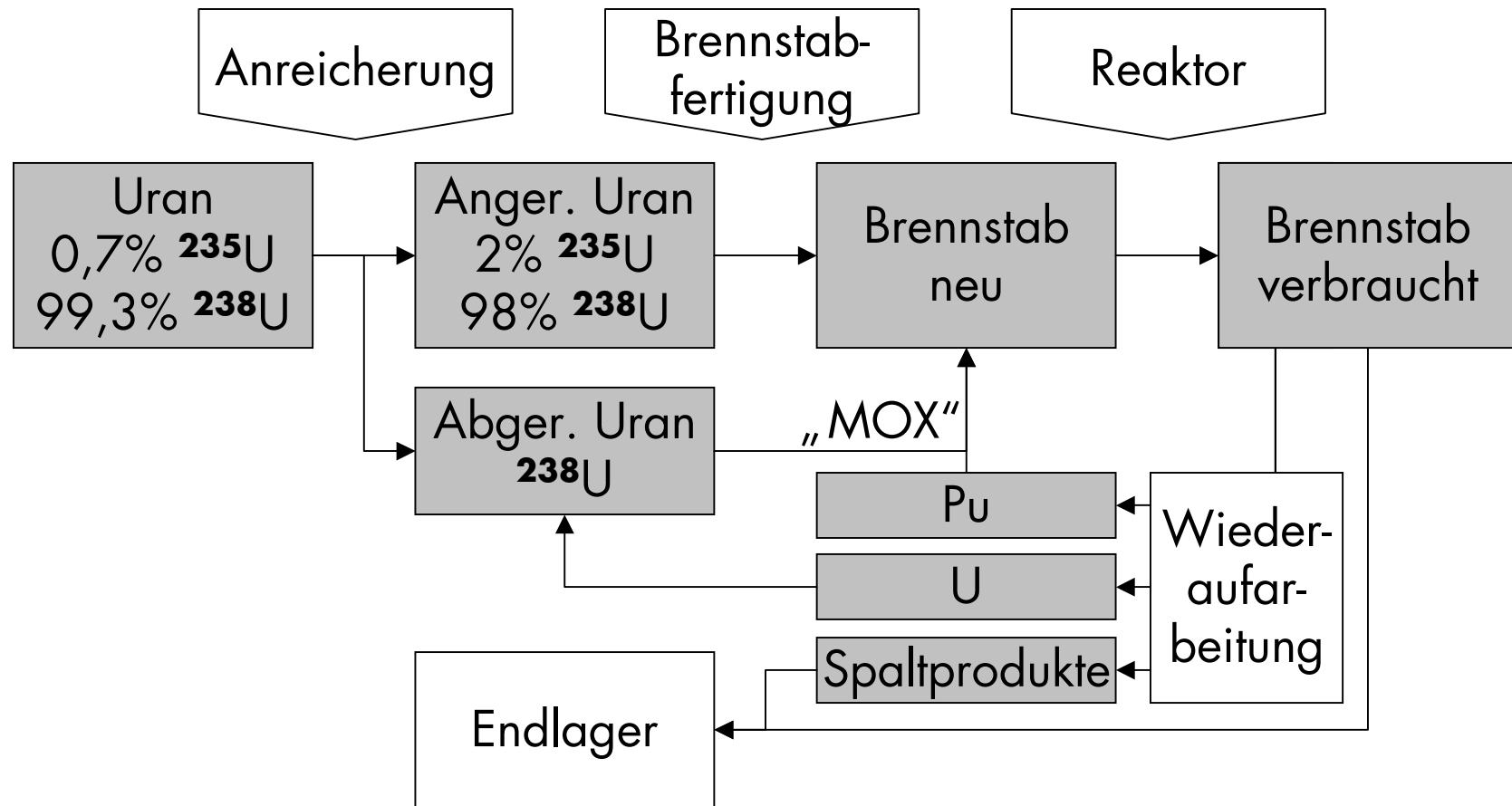
Die Kernspaltung

Materialien in der Kernspaltung

Kern	Vorkommen	Reaktion mit Neutronen	Bedeutung
^{235}U	0,7% von Natururan	Spaltung	Spaltstoff Reaktor, Bombe
^{238}U	99,3% von Natururan	Streuung, evtl. n-Einfang und β -Zerfall zu ^{239}Pu	Brutstoff Plutoniumkreislauf
^{239}Pu		Spaltung , evtl. n-Einfang zu ^{240}Pu	Spaltstoff Reaktor, Bombe
^{240}Pu		Spaltung, z.T. auch spontan (ohne Neutron)	„Vergiftet“ Pu für Bomben
^{232}Th	100% von Thorium	Streuung, evtl. n-Einfang und β -Zerfall zu ^{233}U	Brutstoff Reaktor (THTR)
^{233}U		Spaltung	Spaltstoff Reaktor (THTR)

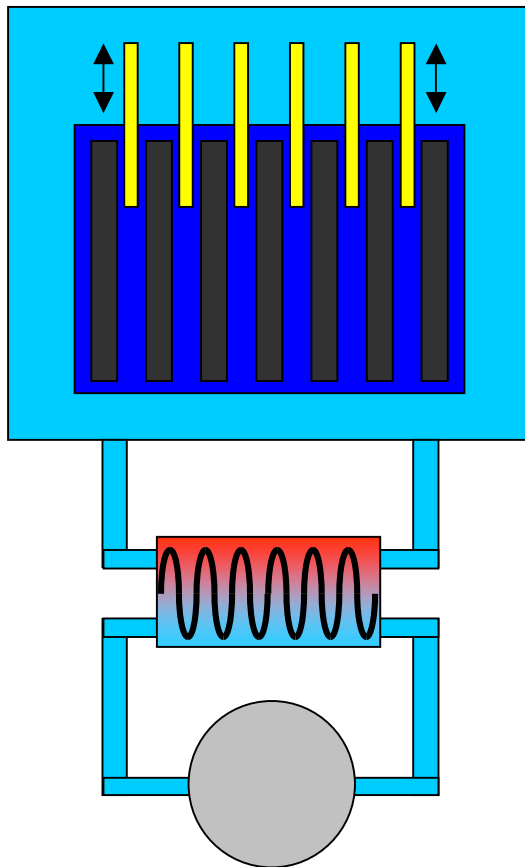
Die Kernspaltung

Der Brennstoffkreislauf



Der Aufbau eines Kernkraftwerks

Die Bestandteile eines Leistungsreaktors



Brennelemente (i.d.R. angereichertes Uran in Edelstahl-Hüllrohren)

Moderator (Wasser oder Graphit)

Regelstäbe (Neutronenabsorber, z.B. Indium, Gadolinium, Bor)

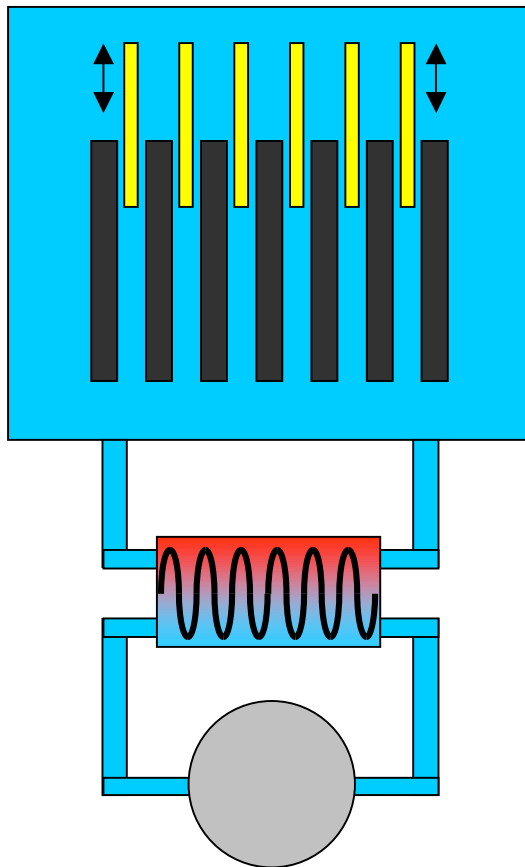
Kühlmittel (Wasser, Helium oder flüssiges Natrium)

Dampfturbine, Generator

Wärmetauscher

Der Aufbau eines Kernkraftwerks

Der Leichtwasserreaktor (z.B. alle derzeit aktiven deutschen KKW)



Leichtwasserreaktor:
Kühlmittel = Moderator = Wasser

1. Kühlmittelverlust (durch Leck oder Überhitzung) beendet automatisch die Kettenreaktion
2. Im Reaktor nur Edelstahl, Metalloxide, Wasser, nichts entzündliches (Graphit, Natrium)
3. Wärmetauscher nicht unbedingt nötig (Siedewasserreaktor, sonst: Druckwasserreaktor)

Der Aufbau eines Kernkraftwerks

Andere Reaktortypen

Schneller Brüter, z.B. Kalkar, Superphénix, Monju (Japan)	Kein Moderator, daher weniger Spaltung als $n + {}^{238}\text{U} \rightarrow {}^{239}\text{Pu}$, produziert mehr Plutonium Problem: Kühlung mit flüssigem Natrium
Thorium-Hochtemperaturreaktor (THTR), z.B. Hamm-Uentrop	Erzeugt seinen Brennstoff in $n + {}^{232}\text{Th} \rightarrow {}^{233}\text{U}$ regelt sich durch Temperatur selbst, vor Marktreife stillgelegt (Politik, Uranpreisverfall)
Hochfluß-Forschungsreaktoren, z.B. FRM II Garching	Neutronenfluß aus dem Reaktor für Forschung und Medizin gewollt \rightarrow hoher Neutronenverlust, daher hochangereichertes Uran nötig
Besondere Reaktoren	Diverse Forschungsreaktoren, Reaktoren zur Produktion von Waffenplutonium (ohne ${}^{240}\text{Pu}$) z.B. RBMK 1000, Tschernobyl

Gefahren der Kernenergienutzung

Die Wirkung radioaktiver Strahlung im Gewebe

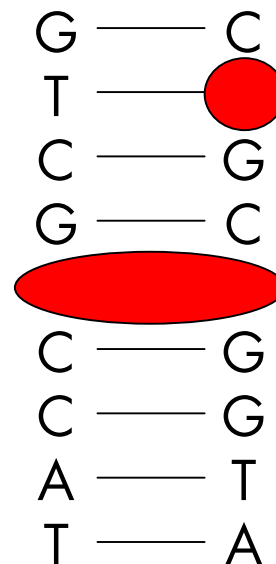
Ionisierende Strahlung zerstört chemische Bindungen, z.B. im Erbgut

Einzeldefekte kann der Körper reparieren

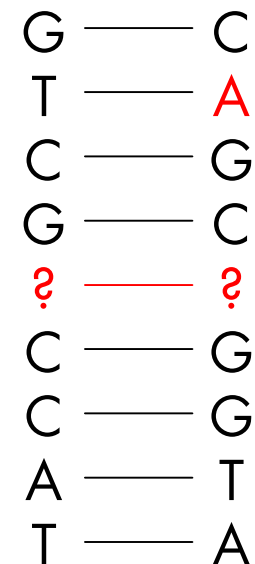
Doppeldefekte, DNA-Brüche sind meist irreparabel

Zellversagen (viele Zellen: Strahlenkrankheit), unkontrolliertes Wachstum (Krebs)

DNA mit Strahlenschäden



DNA nach Reparatur



Gefahren der Kernenergienutzung

Welche Strahlung ist die gefährlichste?

**Ionisierende Strahlung
zerstört chemische
Bindungen, z.B. im Erbgut**

Einzeldefekte kann der
Körper reparieren

Doppeldefekte, DNA-Brüche
sind meist irreparabel

Zellversagen (viele Zellen:
Strahlenkrankheit),
unkontrolliertes Wachstum
(Krebs)

n , γ haben hohe Reichweite,
verursachen aber meist Einzeldefekte

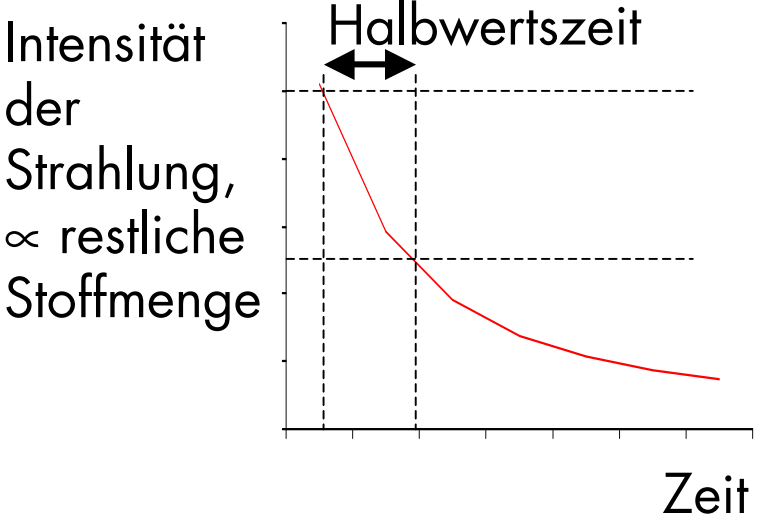
α , β -Strahler wirken fast nur im
Körper, aber mehr Doppeldefekte

n und γ belasten praktisch nur
Personen im Umfeld von Reaktoren
und Strahlenlabors;
 α - und β -Strahler wirken als Gifte

Gefahren der Kernenergienutzung

Physikalische und biologische Halbwertszeit

Die Wirkung ionisierender Strahlung hängt ab von der Intensität und von der Dauer der Einwirkung

Physikalische Halbwertszeit	Biologische Halbwertszeit
<p>Intensität der Strahlung, \propto restliche Stoffmenge</p>  <p>Zeit</p>	<ul style="list-style-type: none">• Halbwertszeit, die ein Stoff im System bleibt, $<$ physikalische Halbwertszeit• z.B. ^{135}Xe wird sofort wieder ausgeatmet, ^3H (in H_2O) wird in Tagen ausgewaschen• Radioaktive Spurenelemente (J, Sr) oder Schwermetalle (U, Pu) werden über Jahre gespeichert

Gefahren der Kernenergienutzung

Welche radioaktiven Stoffe sind besonders gefährlich?

Physikalische Halbwertszeit	Biologische Halbwertszeit
Physikalische Halbwertszeit < 100.000 Jahre ansonsten ist die Strahlungsintensität relativ gering	Biologische (also auch physikalische) Halbwertszeit > 7 Tage ansonsten ist die Expositionsdauer relativ gering

Auch in kleinen Mengen gefährlich sind α - und β -Strahler mit nicht zu langer physikalischer Halbwertszeit und nicht zu kurzer biologischer Halbwertszeit. Dies trifft aus dem breiten Spektrum der Spaltprodukte nur auf eine überschaubare Anzahl von Stoffen zu

Gefahren der Kernenergienutzung

Gefährliche Stoffe in der Kernenergie

	Halbwertszeit	Strahlung	Bemerkung
^{235}U	704 Mio. Jahre	α	Aus Kernbrennstoff, wegen hoher Masse bei Unfällen nur lokale Kontamination
^{238}U	4,5 Mrd. Jahre	α	
^{239}Pu	24.000 Jahre	α	
^{131}I	8 Tage	β	Spaltprodukte, nach Unfällen überregionale/ globale Ausbreitung
^{137}Cs	30 Jahre	β, γ	
^{90}Sr	29 Jahre	β	
^3H	12 Jahre	β	Aktiviertes Wasser
Diverse	einige Jahre	β, γ	Div. aktiviertes Material

Gefahren der Kernenergienutzung

Die Entsorgung gefährlicher Stoffe

	Halbwertszeit	Entsorgung
^{235}U	704 Mio. Jahre	Wiederverwertung, Endlagerung nur bei Verunreinigung (Pu) problematisch
^{238}U	4,5 Mrd. Jahre	
^{239}Pu	24.000 Jahre	Spaltung, Endlagerung problematisch
Spaltprodukte	Bis 30 Jahre	Endlagerung als hochradioaktiv, nur bei Verunreinigung (Pu) langfristig problematisch
Aktiviertes Material	einige Jahre	Endlagerung als schwach radioaktiv, z.T. Freilagerung, Wiederverwertung

Gefahren der Kernenergienutzung

Der Reaktor von Tschernobyl

Tschernobyl: 4 Reaktoren Typ RBMK 1000 in 2 Gebäuden

Reaktordesign: Optimiert für Herstellung von Waffenplutonium, nebenbei Stromerzeugung (1000 MW), heute Hauptaufgabe

Brennelemente müssen häufig und ohne große Betriebsunterbrechung gewechselt werden können (Erbrüten von ^{240}Pu vermeiden)

- **Kein** äußerer **Druckbehälter**, **kein Betonmantel** (Platz zum Wechseln)
- Reaktor besteht aus **1693 Modulen** mit jeweils nur **einem Kühlzufluß**
- **Kühlung** erfolgt mit Wasser in relativ **dünnen Leitungen**
- **Moderator** ist **Graphit** (nicht identisch mit Kühlmittel, brennbar)
- **Regelstäbe** laufen in **engen Führungen**
- Modularer Aufbau erzeugt **immense Regelungskomplexität**

Gefahren der Kernenergienutzung

Der Ablauf des Unfalls von Tschernobyl 1987

1. Versuchsprogramm zum Anlaufen der Notkühlung, dafür alle Sicherheitssysteme abgeschaltet, dazu Vorschriften mißachtet und auf Teillast weitergearbeitet, um bis zuletzt Strom zu erzeugen
2. Durch schrittweises Abschalten Hauptkühlung schon zu schwach, Kühlmittel (Wasser) verdampft, Moderator (Graphit) ist noch da
→ Kettenreaktion außer Kontrolle
3. Notabschaltung per Hand ist zu langsam, Regelstäbe bleiben in erhitzten Führungen stecken → Reaktor nicht mehr abschaltbar
4. Brennstäbe und Kühlwasserrohre platzen, Wasserdampfexplosion bringt das Hallendach zum Einsturz
5. Dach zertrümmert Reaktorstruktur, Luft tritt ein, Graphit brennt. Brand und Kettenreaktion im geschmolzenen Reaktor dauern zwei Wochen, Spaltprodukte durch Feuer in Atmosphäre transportiert

Gefahren der Kernenergienutzung

Der GAU im Leichtwasserreaktor: Three Mile Island/Harrisburg 1979

1. Im Regelbetrieb (Druckwasserreaktor) äußerer Kühlkreislauf blockiert, Ventile des Ersatzzuflusses waren geschlossen
→ Innerer Kühlkreislauf kann Wärme nicht abgeben, überhitzt
2. Automatische Notabschaltung: Regelstäbe fallen in den Reaktor, Kettenreaktion gestoppt, Reaktor gibt aber noch Restwärme ab
3. Überdruckventile des inneren Kühlkreislaufes brechen, Kühlwasserdampf tritt ins (druckgesicherte) Reaktorgebäude aus, Notkühlsystem pumpt Wasser von außen in den Reaktor
4. Durch Überdruck entweicht Kühlwasserdampf aus dem Gebäude, geringe Mengen Radioaktivität freigesetzt
5. Notkühlung abgeschaltet, um Überdruck zu reduzieren, dadurch schmilzt der Reaktorkern, Kühlung erst nach gewisser Abkühlung wieder angeschaltet

Gefahren der Kernenergienutzung

Die Messung von Strahlung und Strahlenbelastung

In den Medien kursieren zur Strahlung eine Vielzahl von Meßwerten in zum Teil veralteten Einheiten: Rad, Rem, Röntgen, Curie...
...davon Milli-, Micro-, Mega-...

Wichtige gebräuchliche Einheiten:

Becquerel (Bq)	Beschreibt Aktivität einer Strahlungsquelle, 1 Bq = 1 Zerfall pro Sekunde, sehr klein meist als kBq/MBq/GBq angegeben
Sievert (Sv)	Beschreibt biologisch gewichtete Strahlenbelastung, 1 Sv \approx Grenze akuter Strahlenkrankheit, ab \approx 50 mSv/Jahr signifikant erhöhtes Krebsrisiko sehr groß, meist als mSv/ μ Sv angegeben

Gefahren der Kernenergienutzung

Durchschnittliche Strahlenbelastung in Deutschland

Bevölkerungsdurchschnitt Summe		ca. 3,5 mSv/a
Natürliche Quellen	Radioaktivität im Körper (Nahrung, Luft)	0,5 mSv/a
	Bodenradioaktivität (ja nach Gegend)	0,2-1,5 mSv/a
	Kosmische Strahlung	0,4 mSv/a
Menschliche Quellen	Medizin	2,0 mSv/a
	Kosmische Strahlung im Flugzeug	0,1 mSv/100h
	Kohlekraftwerke	0,003 mSv/a
	Inländische Kernenergienutzung	<0,001 mSv/a
	Tschernobyl, seit 1997, je nach Region	0,1-3,0 mSv

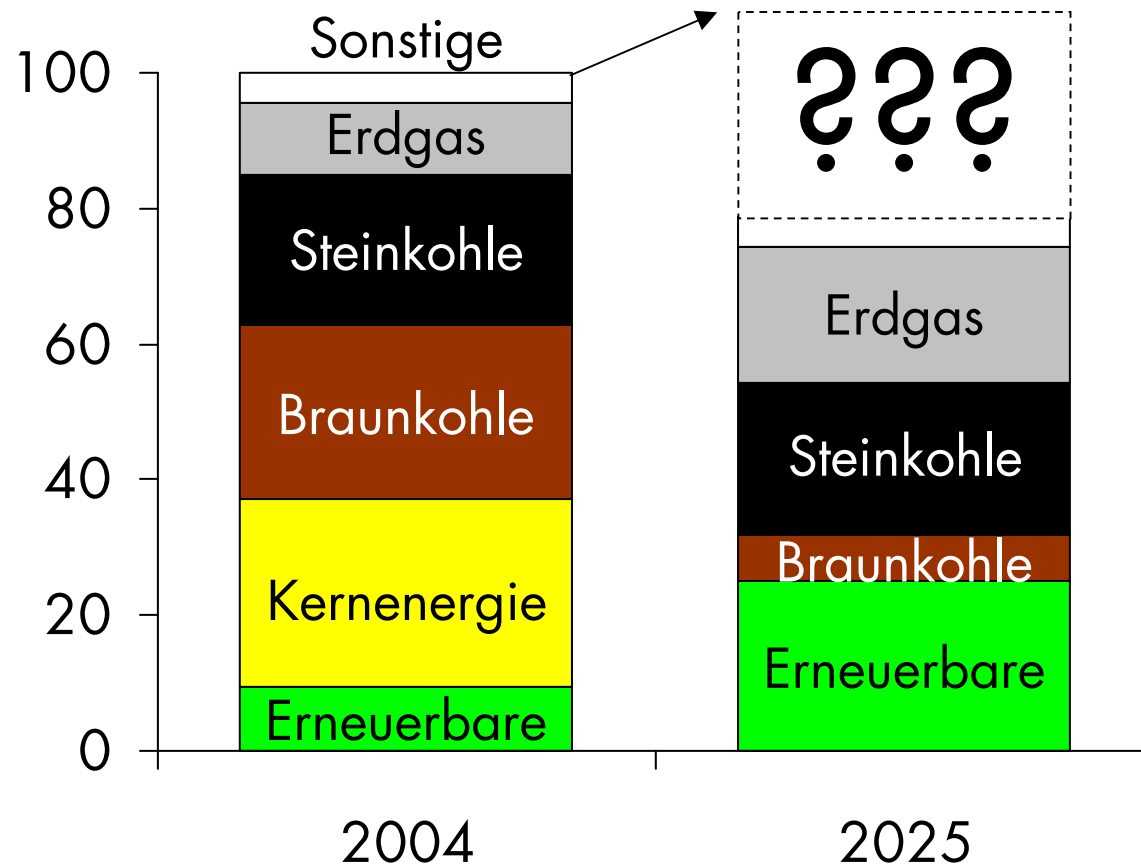
Auslaufmodell oder Zukunftstechnologie?

Risiken über gesamte Wertschöpfungskette

Wertschöpfungsstufe	Risiko	Beispiel
Uranbergbau	Kontamination Umwelt, Personal	Wismut Aue
Anreicherung, Brennstabfertigung	Kontamination Personal, evtl. Umwelt	Tokaimura
Reaktorbetrieb	Freisetzung von Material, z.B. bei Kernschmelze	Three Mile Island
Wiederaufbereitung	Kontamination Umwelt, Personal	Sellafield
Transport	Freisetzung von Material, extrem unwahrscheinlich	/
Endlagerung	Belastung Umwelt?	/

Auslaufmodell oder Zukunftstechnologie?

Die Stromerzeugung in Deutschland in Prozent



Extrem optimistische Annahmen:

- 25% Erneuerbare (Trittin: 20% bis 2020)
- Verdoppelung Erdgas
- Steinkohle konstant
- Doppelter bis dreifacher Strompreis