



# Basics of Electrical Power Generation

## Nukleartechnik



Stand: 2011  
1 / 43

Umweltwissenschaften, Oliver Mayer

GE Global Research  
Freisinger Landstrasse 50  
85748 Garching  
[kontakt@reg-energien.de](mailto:kontakt@reg-energien.de)

## Inhalte

1. Kernkraftwerke
2. Kraftwerkstypen
3. Der Brennstoffkreislauf
4. Endlagerung
5. Kernfusion

Stand: 2011  
2 / 43

Umweltwissenschaften, Oliver Mayer

# Kernkraftwerke

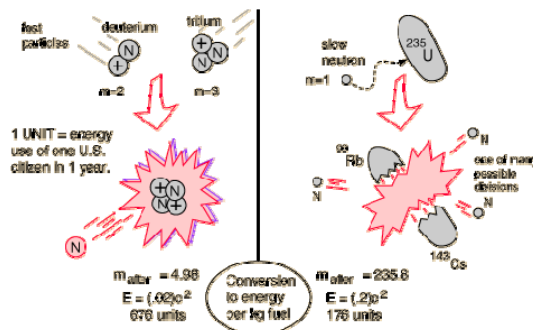
## Kernenergie aus...

### Kernfusion:

- Kernreaktion, bei der zwei Atomkerne zu einem neuen Kern „verschmelzen“

### Kernspaltung:

- Ein Atomkern wird unter Energiefreisetzung in zwei oder mehr Bestandteile zerlegt



Stand: 2011  
4 / 43

Umweltwissenschaften, Oliver Mayer

## Kernenergie

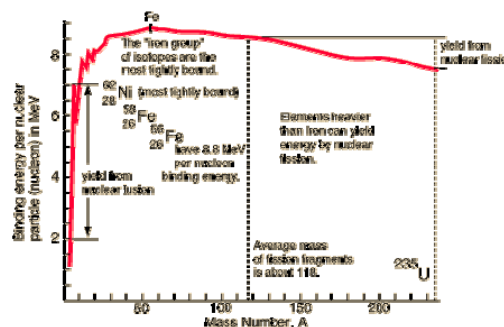
- Die Energiegewinnung erfolgt durch den sogenannten „Massendefekt“
- Bei der Kernfusion ist die Masse des erzeugten Kerns kleiner als die Summe der Massen der Ausgangskerne
- Bei der Kernspaltung ist die Summe der Massen der erzeugten Kerne kleiner als die Masse des Ausgangskerns
- Die Energie berechnet sich aus der bekannter Formel  $E = \Delta m \cdot c^2$
- Die Energie wird hauptsächlich als Bewegungsenergie der Spaltprodukte freigesetzt. Durch deren Abbremsung im umgebenden Material entsteht Wärme, mit der Wasserdampf erzeugt wird

Stand: 2011  
5 / 43

Umweltwissenschaften, Oliver Mayer

## Kernbindungsenergie

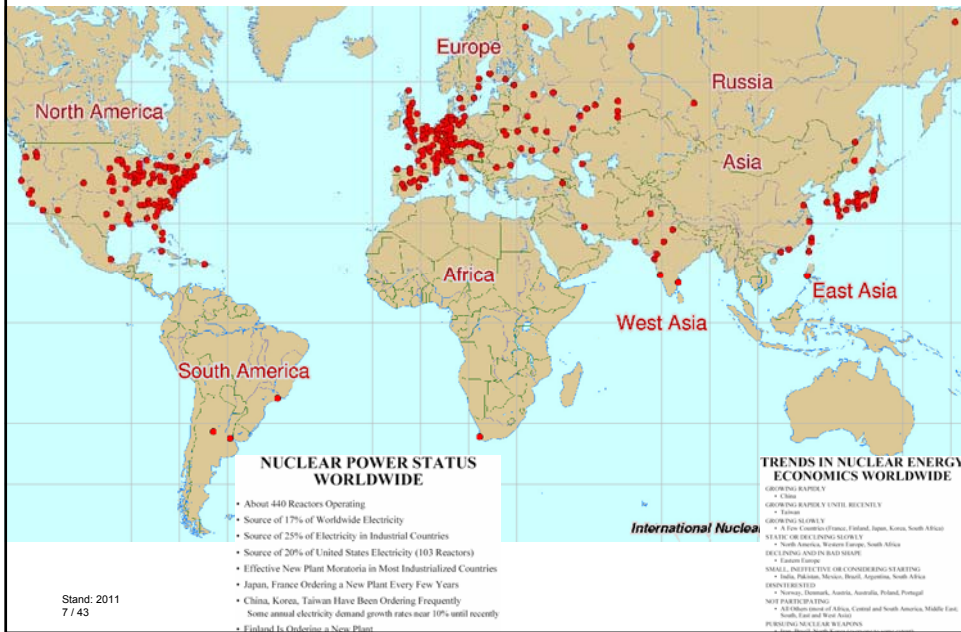
- Eisen (Fe) hat die höchste Bindungsenergie
- Auf der „schwereren“ Seite von Eisen kann Energie durch Kernspaltung gewonnen werden
- Auf der „leichteren“ Seite von Eisen kann Energie durch Kernfusion gewonnen werden
- Der größte Energiesprung liegt bei Wasserstoff zu Helium über die Kernfusion



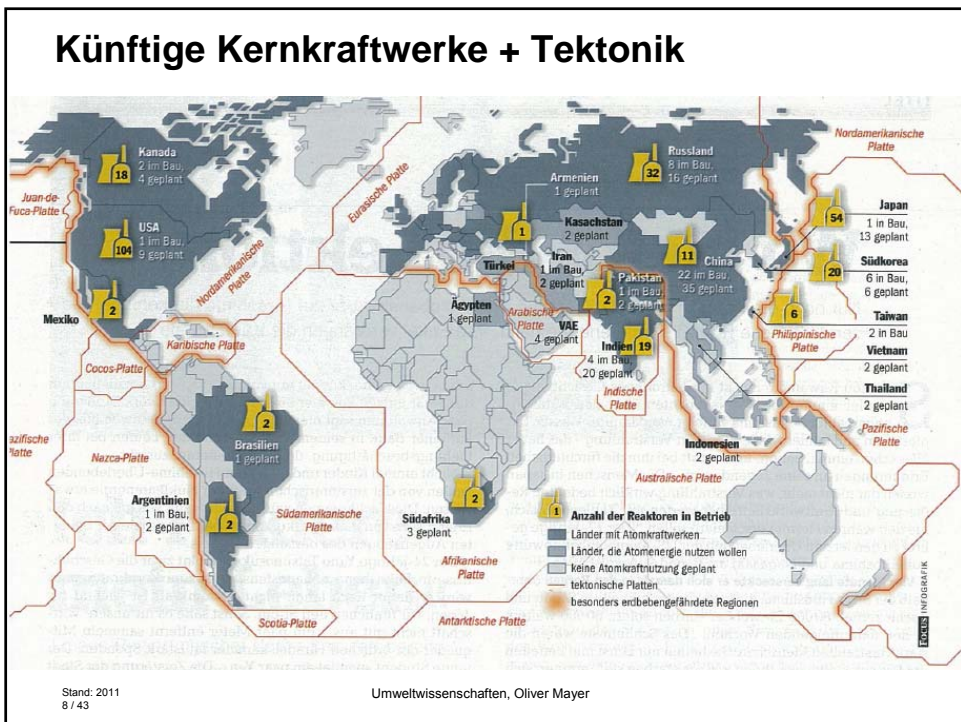
Stand: 2011  
6 / 43

Umweltwissenschaften, Oliver Mayer

# Kernkraftwerke in der Welt



# Künftige Kernkraftwerke + Tektonik



## Top Ten Anlagen der Jahresstromproduktion

Jahr	Weltmeisteranlage		2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.
	Nation	Produktion									
1997		<b>12,53 TWh</b>									
1998		11,76 TWh									
1999		12,27 TWh									
2000		11,94 TWh									
2001		12,40 TWh									
2002		12,17 TWh									
2003		12,32 TWh									
2004		12,24 TWh									
2005		11,98 TWh									
2006		12,40 TWh									
2007		12,36 TWh									
2008		<b>12,84 TWh</b>									

Deutschland Frankreich Großbritannien Japan Litauen USA  
 Quellen: atw, Deutsches Atomforum, Platts Nucleonics Week, VGB

Stand: 2011  
9 / 43

Umweltwissenschaften, Oliver Mayer

## Deutsche Kernkraftwerke 2009

Kernkraftwerk	Inbetriebnahme	Leistung (MW)	Restmenge (TWh)	Stilllegungstermin
Biblis-A	1975	1.167	5,24	2010
Neckarwestheim-1	1976	785	6,44	2010
Biblis-B	1977	1.240	12,57	2012
Brunsbüttel	1977	771	11,00	2010
Isar-1	1979	878	16,68	2011
Phillippsburg-1	1980	890	22,51	2012
Unterweser	1979	1.345	34,28	2012
Grafenrheinfeld	1982	1.275	59,82	2014
Krümmel	1984	1.346	88,58	2018
Phillippsburg-2	1985	1.392	102,66	1018
Grohnde	1985	1.360	103,30	2018
Grundremmingen-B	1984	1.284	70,10	2018
Brokdorf	1986	1.410	116,91	2019
Grundremmingen-C	1985	1.288	79,17	2019
Isar-2	1988	1.400	12,68	2019
Neckarwestheim-2	1989	1.310	141,51	2022
Emsland	1988	1.329	130,93	2023
<b>Summe</b>		<b>20.470</b>	<b>1.129,38</b>	
Mülheim-Kärlich			107,25	
Obrigheim	1969	340	0,00	2005
Stade	1972	640	4,79	2003
<b>Gesamtsumme</b>		<b>21.450</b>	<b>1.241,41</b>	

Stand: 2011  
10 / 43

Umweltwissenschaften, Oliver Mayer

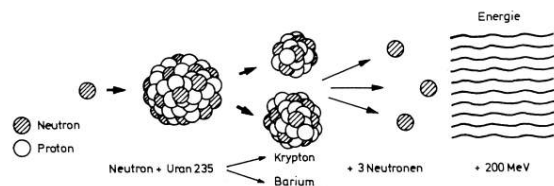
## Lage deutscher Kernkraftwerke + Erdbebengefahr



Stand: 2011  
11 / 43

## Funktionsweise eines Kernkraftwerkes (1)

- Spaltbare Atome:  
Isotope von Uran 235, Plutonium 239 oder Thorium 232
- Ein Neutron vom U-235-Kern wird absorbiert
- Der entstandene Kern ist instabil und spaltet sich in 2 Kerne: Krypton und Barium
- Die Spaltprodukte fliegen mit großer Geschwindigkeit auseinander
- Gleichzeitig werden 2 oder 3 Neutronen mit großer Geschwindigkeit (ca. 20.000 km/h) und Energie frei
- Das Spiel beginnt von Neuem: Grundlage für Kettenreaktion



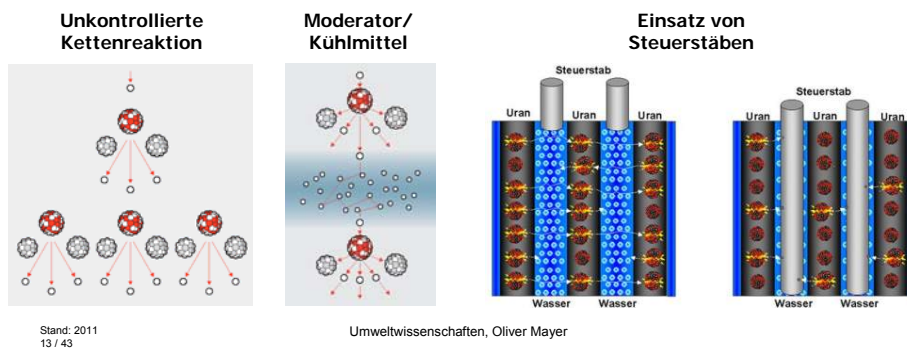
Stand: 2011  
12 / 43

Umweltwissenschaften, Oliver Mayer



## Funktionsweise eines Kernkraftwerkes (2)

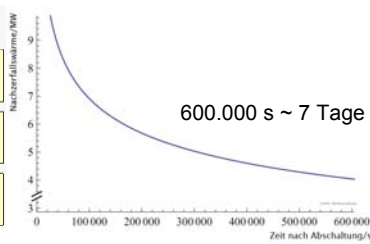
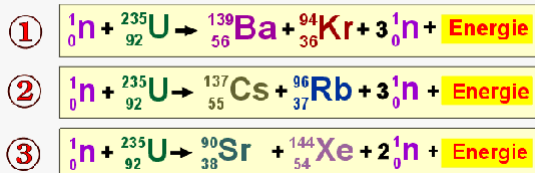
- Es entstehen mehr freien Neutronen als zum Starten des Prozesses notwendig → unkontrollierte Kettenreaktion
- Der Moderator senkt die Bewegungsenergie der freien Neutronen, weil der Uran-Kern langsame Neutronen besser aufnimmt
- Steuerstäbe absorbieren freie Neutronen sehr gut und somit kann eine kontrollierte Kettenreaktion eingestellt werden (labiler Betriebspunkt)



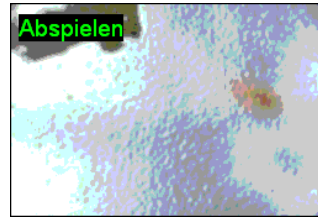
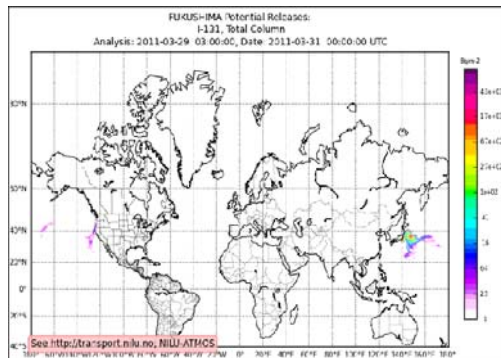
## Spaltketten

- Bei einer Kernspaltung können unterschiedliche Spaltungsergebnisse erzielt werden
- Die Resultate selbst sind wiederum instabil. Sie haben unterschiedliche Zerfallszeiten
- Das bedeutet, dass selbst bei gestoppter Spaltung von U235 Zerfallsprozesse weitergehen und thermische Leistung erzeugt wird

### mögliche Kernspaltungs-Resultate



## Verbreitung in Fukushima



Stand: 2011  
15 / 43

Umweltwissenschaften, Oliver Mayer

## Halbwertszeit (HWZ)

Diejenige Zeitdauer innerhalb derer Radionuklide bis zur Hälfte des Anfangswertes zerfallen sind. Der Zerfallvorgang erfolgt kontinuierlich und kann weder durch Druck, Temperaturänderung oder chemische Beeinflussung verlangsamt oder beschleunigt werden.

**Beispiel:** Das ursprünglich vorhandene Plutonium 239 hat eine physikalische HWZ ( $T_{1/2}$ ) von etwa 24.000 Jahren.

Es zerfällt auf...

1/2 oder 50,0 % nach 24.000 Jahren  
 1/4 oder 25,0 % nach 48.000 Jahren  
 1/8 oder 12,5 % nach 72.000 Jahren  
 1/16 oder 6,25 % nach 96.000 Jahren  
 1/32 oder 3,12 % nach 120.000 Jahren

### Halbwertszeiten ( $T_{1/2}$ ) einiger radioaktiver Isotope:

Krypton 85 (Kr)	10,6 Jahre
Strontium 90 (Sr)	28,6 Jahre
Cäsium 137 (Cs)	30,2 Jahre
Radium 226 (Ra)	1.620 Jahre
Kohlenstoff 14 (C)	5.730 Jahre
Plutonium 239 (Pu)	24.110 Jahre
Uran 234 (U)	245.500 Jahre
Jod 129 (J)	15,7 Mio. Jahre
Uran 235 (U)	704 Mio. Jahre
Uran 238 (U)	4,5 Mrd. Jahre
Thorium 232 (Th)	14,1 Mrd. Jahre
Indium 115 (In)	400 Billionen Jahre

Stand: 2011  
16 / 43

Umweltwissenschaften, Oliver Mayer



# Kraftwerkstypen

## Kernkraftwerkstypen

### ▪ Unterscheidung der einzelnen Reaktortypen nach:

- dem Brennstoff (natürliches Uran, angereichertes Uran, Plutonium oder Thorium)
- dem Kühlmittel (Kohlendioxid, Helium, leichtes und schweres Wasser, Natrium)
- dem Moderator (Graphit, leichtes oder schweres Wasser, Beryllium, organische Flüssigkeiten wie z.B. Diphenyl)

### ▪ Unterscheidung nach der Art der Moderatoren:

- Reaktoren ohne Moderator: z.B. schnelle Brüter
- Graphitmoderierte Reaktoren:  
z. B. Natururan Hochtemperaturreaktoren
- Wassermoderierte Reaktoren:  
z. B. Druckwasserreaktoren, Siedewasserreaktoren

## Leichtwasserreaktor (LWR)

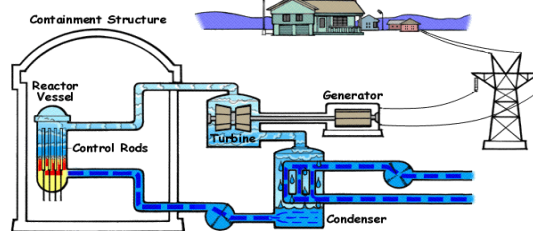
- LWR haben normales Wasser als Kühlmittel und Moderator
- LWR arbeiten mit angereichertem Uran
- Es gibt 2 Grundtypen des LWR:
  - Siedewasserreaktor
  - Druckwasserreaktor

Stand: 2011  
19 / 43

Umweltwissenschaften, Oliver Mayer

## Siedewasserreaktor (SWR)

- Der SWR kommt dem konventionellen Dampfkraftwerk am nächsten
- Dampf wird im Reaktorkern erzeugt und in einem einzigen Kreislauf zur Turbine geführt
- Der Dampf ist daher leicht radioaktiv angereichert
- Die Turbine muss sich damit im abgeschirmten Bereich des Kernkraftwerkes befinden



- |   |                      |
|---|----------------------|
| ① Reaktordruckbehälter                    | ⑦ Kondensator        |
| ② Umwälzpumpe                             | ⑧ Vorwärmanlage      |
| ③ Wasserabscheider und Zwischenüberhitzer | ⑨ Speisepumpe        |
| ④ Turbinensatz                            | ⑩ Kühlwasserbecken   |
| ⑤ Generator                               | ⑪ Kühlwasserpumpe    |
| ⑥ Transformator                           | ⑫ Kraftschlussbecken |
|   | ⑬ Kühlturm           |

Stand: 2011  
20 / 43

Umweltwissenschaften, Oliver Mayer

# Anlagendaten SWR Philippsburg 1

## KKP 1 Siedwasser-Reaktor

Thermische Reaktorleistung 2575 MW  
**Frischwasserbetrieb:**  
 Generatorklemmenleistung 900 MW  
 Kraftwerksnettoleistung 864 MW  
 Bruttowirkungsgrad 35 %  
 Nettowirkungsgrad 33,6 %

**Ablaufbetrieb:**  
 Generatorklemmenleistung 900 MW  
 Kraftwerksnettoleistung 856 MW  
 Bruttowirkungsgrad 35 %  
 Nettowirkungsgrad 33,2 %

**Kreislaufbetrieb:**  
 Generatorklemmenleistung 845 MW  
 Kraftwerksnettoleistung 800 MW  
 Bruttowirkungsgrad 32,8 %  
 Nettowirkungsgrad 31 %

Alle Werte bei 10° C Kühlwasser-Temperatur

## Nukleares Dampferzeugungssystem

Druck am Druckbehälteraustritt 69 bar  
 Sattdampf Temperatur am Druckbehälteraustritt 287° C  
 Dampfmenge am Druckbehälteraustritt 1390 kg/s  
 Dampfleuchte am Druckbehälteraustritt 0,2 %  
 Speisewassereintrittstemperatur 215° C  
 Wasserdurchflußmenge durch den Kern 37400 t/h

## Kühlturm

Typ Naturzug-Naßkühlturm  
 Anzahl 1  
 Höhe 152 m  
 Durchmesser unten 124 m  
 Durchmesser oben 78 m  
 Wasserdurchsatz ca. 40 m³/s  
 Wasserverdunstung ca. 0,6 m³/s

## Dampf- und Speisewasserkreislauf

Dampfmenge am Turbineneintritt 1270 kg/s  
 Dampfdruck am Turbineneintritt ca. 60 bar  
 Dampfleuchte am Turbineneintritt 0,45 %  
 Zwischenüberhitzung auf Druck nach Zwischenüberhitzung 11 bar  
 Zahl der Anzapfungen 6  
 Anzahl der Vorwärmanne 2 ND/2 HD  
 Anzahl der Speisewasserpumpen 3 x 50 %  
 Leistung je Pumpe 7,6 MW  
 Anzahl der Kondensatpumpen 3 x 50 %  
 Leistung je Pumpe 3,0 MW

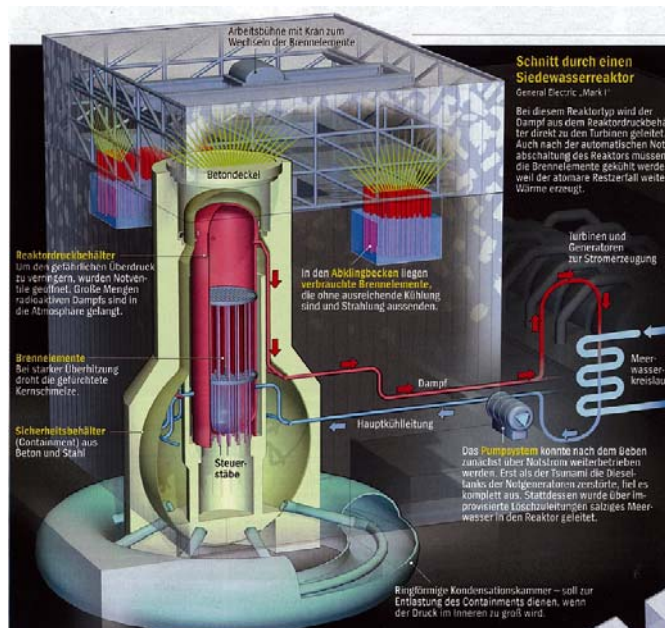
## Kühlwasserkreislauf

Anzahl der Kühlwasserpumpen 4  
 Leistung je Pumpe 2,1 MW  
 Kühlwassermenge 40 m³/s  
 max. Kühlwasseraufwärmung 10° C

Stand: 2011  
 21 / 43

Umweltwissenschaften, Oliver Mayer

# Fukushima



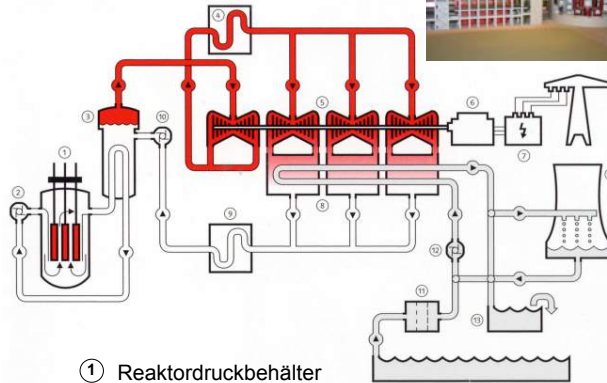
Stand: 2011  
 22 / 43

## Druckwasserreaktor (DWR)

Der DWR hat zwei voneinander getrennte Kühlkreisläufe:

Reaktor-Kühlkreislauf = Primärkreislauf

Speisewasser-Dampf-Kreislauf = Sekundärkreislauf



- |   |                      |
|---|----------------------|
| ① Reaktordruckbehälter                    | ⑧ Kondensator        |
| ② Umwälzpumpe                             | ⑨ Vorwärmanlage      |
| ③ Dampferzeuger                           | ⑩ Speisewasserpumpe  |
| ④ Wasserabscheider und Zwischenüberhitzer | ⑪ Kühlwassereinheit  |
| ⑤ Turbinensatz                            | ⑫ Kühlwasserpumpe    |
| ⑥ Generator                               | ⑬ Kraftschlussbecken |
| ⑦ Transformator                           | ⑭ Kühlturm           |

Stand: 2011  
23 / 43

Umweltwissenschaften, Oliver Mayer

## Anlagendaten DWR Isar 2

- Leistung: 1300 MW
- Primärkreislauf:  
vier parallel geschaltete Umwälzpumpen fördern 72.000 m<sup>3</sup>/h Wasser von vier Dampferzeugern zum Reaktor und wieder zurück
- Sekundärkreislauf:  
Hauptspeisepumpen fördern bis zu 7.160 m<sup>3</sup>/h Speisewasser zu den Dampferzeugern
- Kühlwasser:  
Zur Kühlung des Turbinenabdampfes, der in drei Oberflächenkondensatoren niedergeschlagen wird, werden etwa 60 m<sup>3</sup>/s Wasser benötigt

Stand: 2011  
24 / 43

Umweltwissenschaften, Oliver Mayer

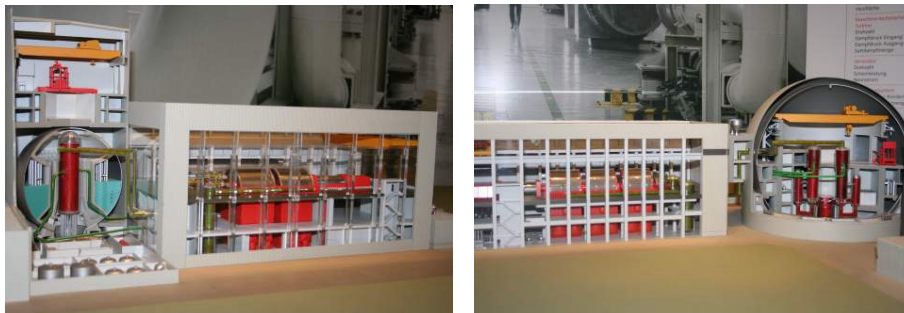
## Vergleich SWR und DWR

Anlage		Stade	Biblis A	Würgassen	Phillipsburg
Art des Reaktors		DWR		SWR	
Reaktorwärmeleistung	MW	1900	3462	1912	2575
Generatorklemmenleistung	MW	662	1204	670	900
Eigenbedarf	MW	32	58	30	36,3
Speisewasserendtemperatur	°C	207,5	207	190,5	215
Frischdampf Temperatur vor Turbine	°C	265,2	265	281,5	281,5
Frischdampfdruck	bar	51	51	65,7	67,2
Frischdampfstrom	t/h	3592	6538	3315	4600
Kühlmitteldurchsatz	t/h	44000	72000	26500	38200
Druck am Reaktoraustritt	bar	155	155	69,7	69,7
Temperatur am Kernein-/austritt	°C/°C	288,4/316,4	284,6/316,4	274/285,4	278,1/286,3
Maximale Heizflächenbelastung	MW/m <sup>2</sup>	1,646	ca. 1,65	1,334	1,346
Mittlere Heizflächenbelastung	MW/m <sup>2</sup>	0,568	0,57	0,513	0,518
Mittlere Raumbelastung	MW/m <sup>3</sup>	85,6	87	50,6	51,1
Abbrand					
Urangewicht	t	56,2	99,2	86,6	115
Aktive Kernhöhe	m	2,985	3,9	3,66	3,66
Kerndurchmesser	m	3,045	3,66	3,63	4,19
Volumenverhältnis Moderator/UO <sub>2</sub>		2,09	ca. 2,1	2,35	2,38
Anzahl der Brennelemente		157	193	444	592
Brennstäbe je Element		205	236	49	49
Brennstabdurchmesser	mm	10,75	10,75	14,3	14,3
Hüllrohrwandstärke	mm	0,7	0,7	0,81	0,81
Anzahl der Regelstäbe		49 · 20	61 · 20	109	145

Stand: 2011  
25 / 43

Umweltwissenschaften, Oliver Mayer

## Modelle eines SWR und DWR



Stand: 2011  
26 / 43

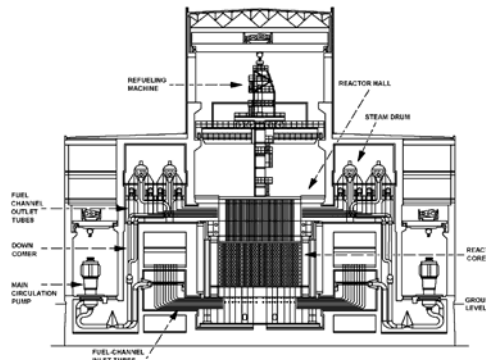
Umweltwissenschaften, Oliver Mayer

## Hochtemperurreaktor (HTR)

- Der Spaltstoff und Moderator werden als „Brennelementkugeln“ zusammengepackt
- Verbrauchte Brennelementkugeln werden im Betrieb entnommen und neue nachgefüllt
- Gas dient als Kühlmittel
- Als Wärmeübertragungsmittel dient Helium
- Brennelemente sind keramisch anstatt metallisch umhüllt

### Vorteile:

- Temperaturen über 700°C
- Realisierung von hohen Wirkungsgraden



Stand: 2011  
27 / 43

Umweltwissenschaften, Oliver Mayer

## Schnelle Brutreaktoren

- Dieser Kernreakortyp dient zur Stromerzeugung und Plutoniumgewinnung
- Als Spaltstoff wird Plutonium verwendet
- Aus Uran-238 entsteht durch Neutroneneinfang Plutonium-239 (Brutvorgang)
- Der „schnelle Brüter“ heißt so, weil er schnelle Neutronen benötigt werden → kein Moderator
- Durch Verbundwirtschaft aus Brutreaktoren, Wiederaufarbeitung und Leichtwasserreaktoren kann der Uranvorrat der Erde etwa 60-mal mehr Energie liefern, als wenn nur das Uran-235 gespalten wird.
- Natrium dient als Kühlmittel. Dies ist ein Risiko weil Natrium mit Wasser reagiert und verbrennt

Stand: 2011  
28 / 43

Umweltwissenschaften, Oliver Mayer



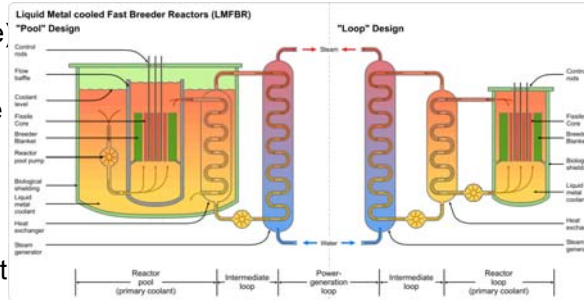
## Schnelle Brutreaktoren

### Situation heute

- Die bisherigen Anlagen nutzen das Uran nur zu etwa 1%
- Die Vorräte der westlichen Welt reichen für den 30-jährigen Betrieb von etwa 1000 großen Leichtwasserreaktoren

### Vorteile

- Schnelle (ungebremste) Brutreaktoren können das Natururan bis zu über 60% für die Energieerzeugung ausnutzen
- Die Uranvorkommen der Welt können auf Jahrhunderte oder Jahrtausende gestreckt werden
- Wegen der 60-fach besseren Ausnutzung können auch weniger ergiebige Vorkommen genutzt werden

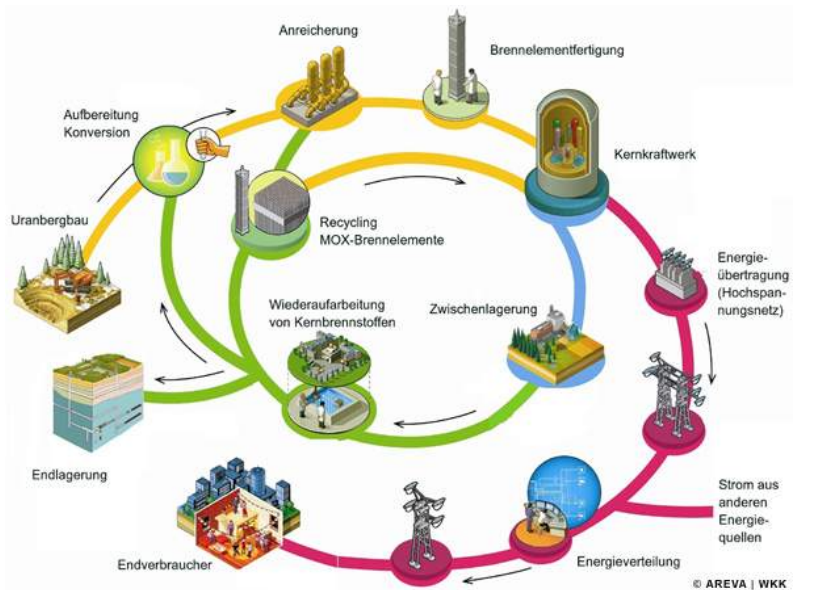


Stand: 2011  
29 / 43

Umweltwissenschaften, Oliver Mayer

## Der Brennstoffkreislauf

## Nuklearer Brennstoffkreislauf



Stand: 2011  
 31 / 43

Umweltwissenschaften, Oliver Mayer

## Transport- und Lagerbehälter

- Abgebrannten Brennelemente werden in Behälter vom Typ CASTOR eingebracht
- Castor ist aus besonders festem und zähen Gusseisen mit Kugelgraphit-Einschlüssen gefertigt und hat eine Wandstärke von 45 cm
- Die Behälter sind so konstruiert, dass sie:
  - die radioaktiven Stoffe – selbst bei schwersten Unfällen – sicher einschließen
  - die Nachzerfallswärme (über Kühlrippen) ableiten
  - die Strahlung der radioaktiven Stoffe abschirmen



Stand: 2011  
 32 / 43

Umweltwissenschaften, Oliver Mayer

## Brennelementwechsel



Endlagerung

# Entsorgung

## Waste Storage

### High Level Waste

High level waste is used nuclear fuel. It is stored at the nuclear generating site where it was used. It can be stored in the station's spent fuel bay or after a period of years transferred to above ground dry storage containers.



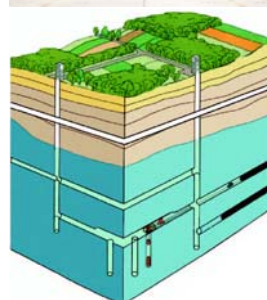
### Low Level Waste

Low level waste consists of minimally radioactive materials such as mop heads, rags, paper towels, floor sweepings and protective clothing. These items make up about 95 percent of the total non-fuel waste volume.



### Intermediate Level Waste

Intermediate level waste consists primarily of used reactor components, and resins and filters used to keep reactor water systems clean. Intermediate level waste makes up about 5 percent of the total volume of non-fuel waste produced from the nuclear power stations.

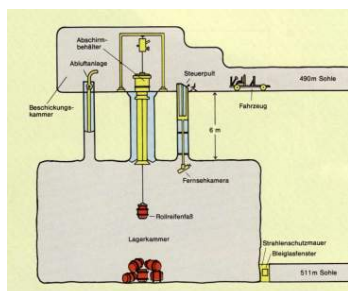


Stand: 2011  
35 / 43

Umweltwissenschaften, Oliver Mayer

## Endlagerung (1)

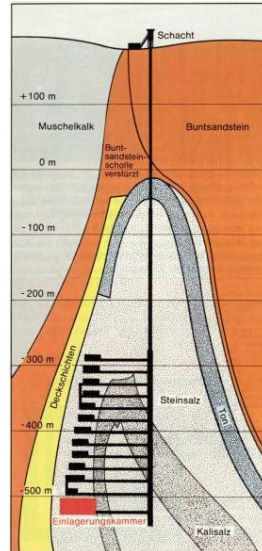
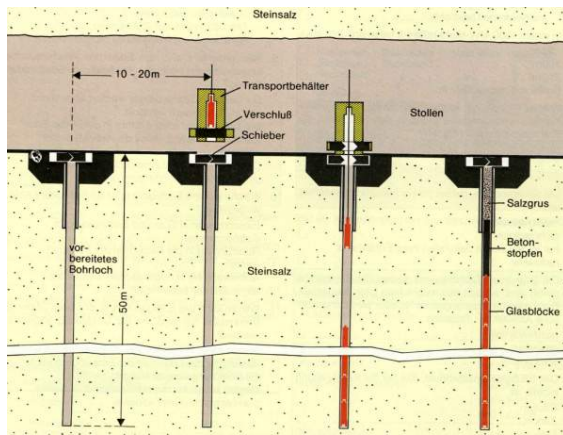
- Die Entsorgung von Abfällen geschieht durch deren Verbringung in eine speziell dafür angelegte Einrichtung
- Das deutsche Entsorgungskonzept ist die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen
- Weltweit werden Salz-, Ton- und Granitformationen auf ihre Eignung als Endlager untersucht



Stand: 2011  
36 / 43

Umweltwissenschaften, Oliver Mayer

## Endlagerung (2)



Stand: 2011  
37 / 43

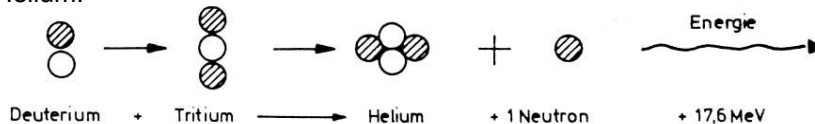
Umweltwissenschaften, Oliver Mayer

# Kernfusion



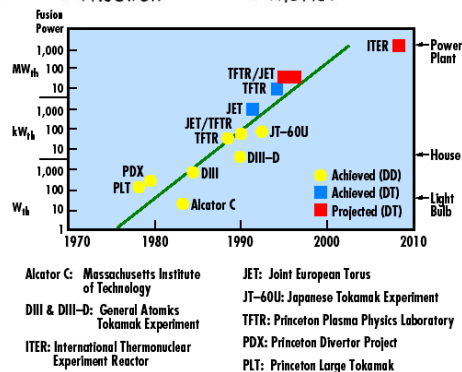
## Die Kernfusions-Reaktion

Zwei Wasserstoff-Isotope, z.B. Deuterium oder Tritium, werden so dicht aneinander gebracht, dass sie miteinander verschmelzen. Sie werden zu Helium.



Probleme:

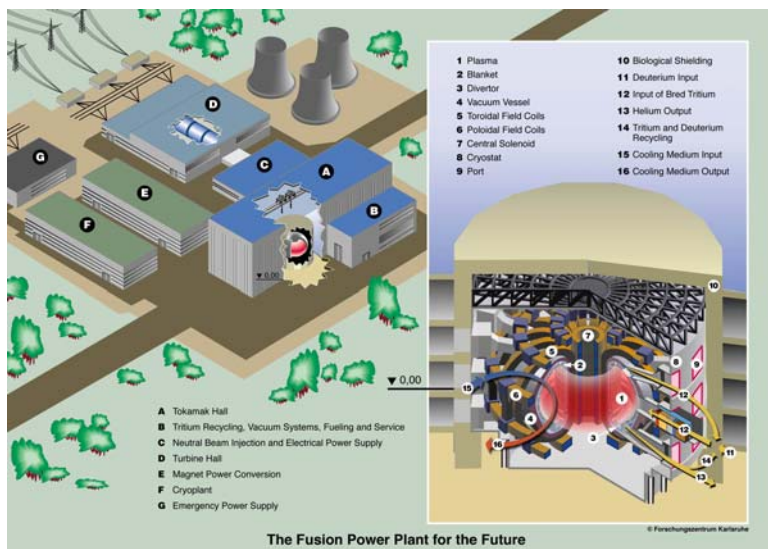
- Ein derartiger Reaktor ist nach heutiger Technik nicht sauber, da radioaktive Teilchen durch die Schutzhülle hindurch strahlen
- Ein solches Kraftwerk müsste eine Leistung von ca. 5 GW haben, dafür existieren jedoch noch keine Kühltürme



Stand: 2011  
39 / 43

Umweltwissenschaften, Oliver Mayer

## Fusionsreaktor



Stand: 2011  
40 / 43

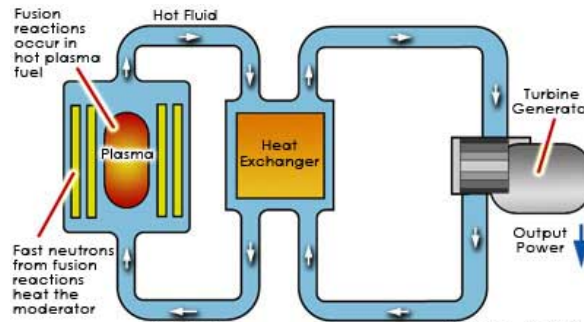
Umweltwissenschaften, Oliver Mayer



# ITER



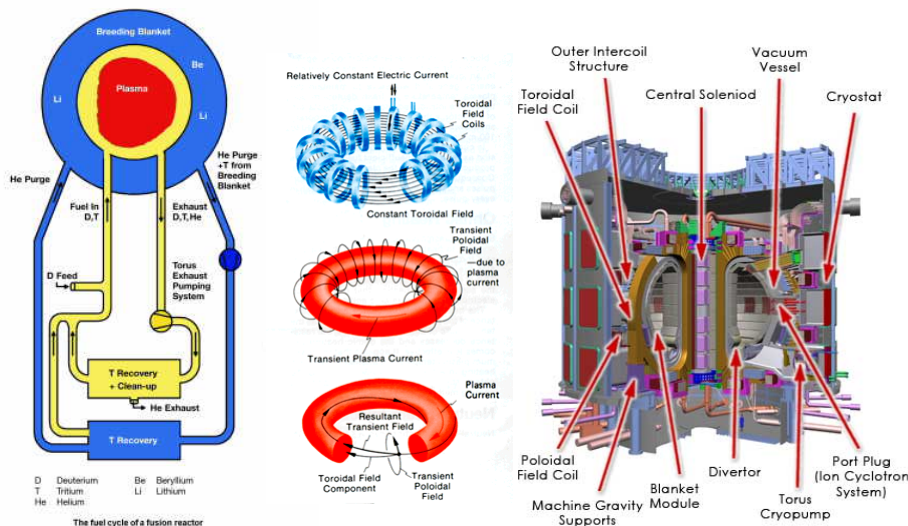
- ITER ist ein Versuchs-Fusionsreaktor
- Er soll die großtechnische Nutzung der kontrollierten Kernfusion zur Stromerzeugung vorbereiten.
- Dabei setzt ein Gramm Wasserstoff etwa dieselbe Menge Energie frei wie die Verbrennung von acht Tonnen Erdöl oder elf Tonnen Kohle



Stand: 2011  
41 / 43

Umweltwissenschaften, Oliver Mayer

# Das ITER-Experiment

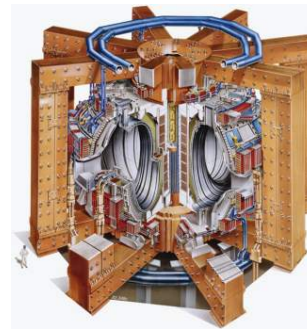
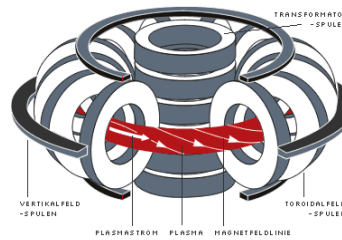


Stand: 2011  
42 / 43

Umweltwissenschaften, Oliver Mayer

## Tokamak-Reaktor

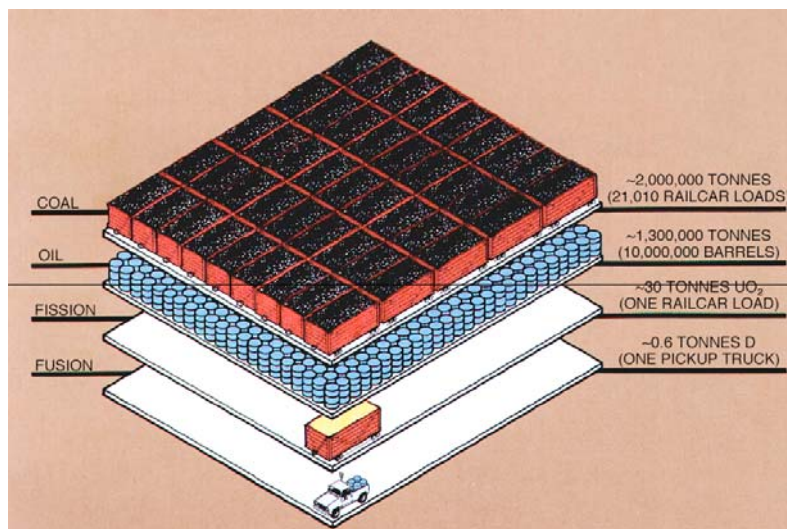
- Am weitesten erforschter Reaktortyp der Kernfusion
- Wasserstoff-Isotope bilden ein extrem heißes (über 100 Mio. °C) und dichtes Plasma damit die Kernfusionsreaktion kettenreaktionsartig abläuft
- Das Plasma wird von einem Magnetfeld eingeschlossen
- Ein Tokamak-Reaktor arbeitet nicht kontinuierlich, sondern gepulst



Stand: 2011  
43 / 43

Umweltwissenschaften, Oliver Mayer

## Massenvergleich von Energieerträgen



Stand: 2011  
44 / 43

Umweltwissenschaften, Oliver Mayer

## Zusammenfassung

- Die Nukleartechnik lässt sich in zwei Gruppen aufteilen: Fusion und Spaltung
- Die Kernspaltung ist ein kritischer Prozess. Es darf pro Spaltung genau ein Neutron „übrig bleiben“, damit keine Kettenreaktion entsteht.
- Der kritische Punkt bei der Endlagerung ist die Vermeidung von Katakt zu Grundwasser -> Slaztollen, Tonstollen, Granitstollen
- Der Treiber der Fusion ist die höhere Energieausbeute:  
1g H<sub>2</sub> ≙ 11t Kohle
- Die Fusion soll in 50 Jahren großtechnisch umsetzbar sein

Stand: 2011  
45 / 43

Umweltwissenschaften, Oliver Mayer

## Frei

Stand: 2011  
46 / 43

Umweltwissenschaften, Oliver Mayer