

Übung zur Lehrveranstaltung „Einführung in die Energiewirtschaft“

SoSe 2017

Dr. Patrick Jochem, Hannes Schwarz und Nico Lehmann
Übung 6: Der Energieträger Uran

INSTITUT FÜR INDUSTRIEBETRIEBSLEHRE UND INDUSTRIELLE PRODUKTION (IIP)
Lehrstuhl für Energiewirtschaft (Prof. Fichtner)



Termine

Übung		
Übung 6	13.06.2016	Kernenergie
Übung 7	20.06.2016	Kernenergie/ Elektrizität
Übung 8	04.07.2016	Elektrizität
Übung 9	11.07.2016	Elektrizität/ Wärme
Übung 10	25.07.2016	Wärme/ Klausur-Fragen

Klausur: 03.08.2017

Anmeldung: Ab 01.06.2017 online über den Link <https://studium.kit.edu>

Anmeldeschluss: 13.07.2017, danach werden keine Anmeldungen mehr entgegengenommen!

Abmeldung: Eine Abmeldung ist vorgeschrieben.

Agenda

- Kernspaltung
- Kernenergie in Deutschland und weltweit
- Vor- und Nachteile der Kernenergienutzung
- Übungsaufgaben



Kernspaltung (Kernfission)

Prozess, bei dem ein Atomkern unter Energiefreisetzung in zwei oder mehr Bestandteile zerlegt wird

(nicht zu verwechseln mit Kernfusion, bei der zwei Kerne verschmelzen)

- a) Spontane Spaltung sehr schwerer, instabiler Kerne ($A > 230$) mit Halbwertszeiten von wenigen Sekunden bis hin zu 10^{18} Jahren
- b) Künstliche Spaltung schwerer Kerne durch Beschuss von Atomkernen mit anderen Partikeln (i.d.R. Neutronen)
 - Bei der Kernspaltung des Uran-235 Isotops werden ca. 200 MeV Energie pro Kern frei (<http://www.zum.de/dwu/depotan/apke001b1.htm>)
 - Kettenreaktion wird durch abbremesen der schnellen Neutronen (Spaltprodukt) im Moderator aufrechterhalten
- Instabile Ausgangs- und Spaltprodukte sind radioaktiv, d. h. dass sie energiereiche α -, β - oder γ -Strahlung aussenden und sich dabei in, eventuell über mehrere Zwischenschritte, stabile Atomkerne umwandeln

Kernkraftwerke

- Kernkraftwerke sind Dampfkraftwerke, bei denen die Wärmeerzeugung nicht durch fossile Brennstoffe erfolgt, sondern durch Spaltung schwerer Atomkerne und die damit verbundene Freisetzung von Kernenergie
- Durch die Freisetzung der Kernbindungsenergie entsteht Wärme, bzw. zunächst kinetische Energie sowie α -, β - und γ -Strahlung der Spaltungsprodukte
- Beispiel für eine typische Spaltreaktion ist die Spaltung von Uran in Barium und Krypton sowie 3 Neutronen (n) bei Beschuss von Uran mit einem Neutron:



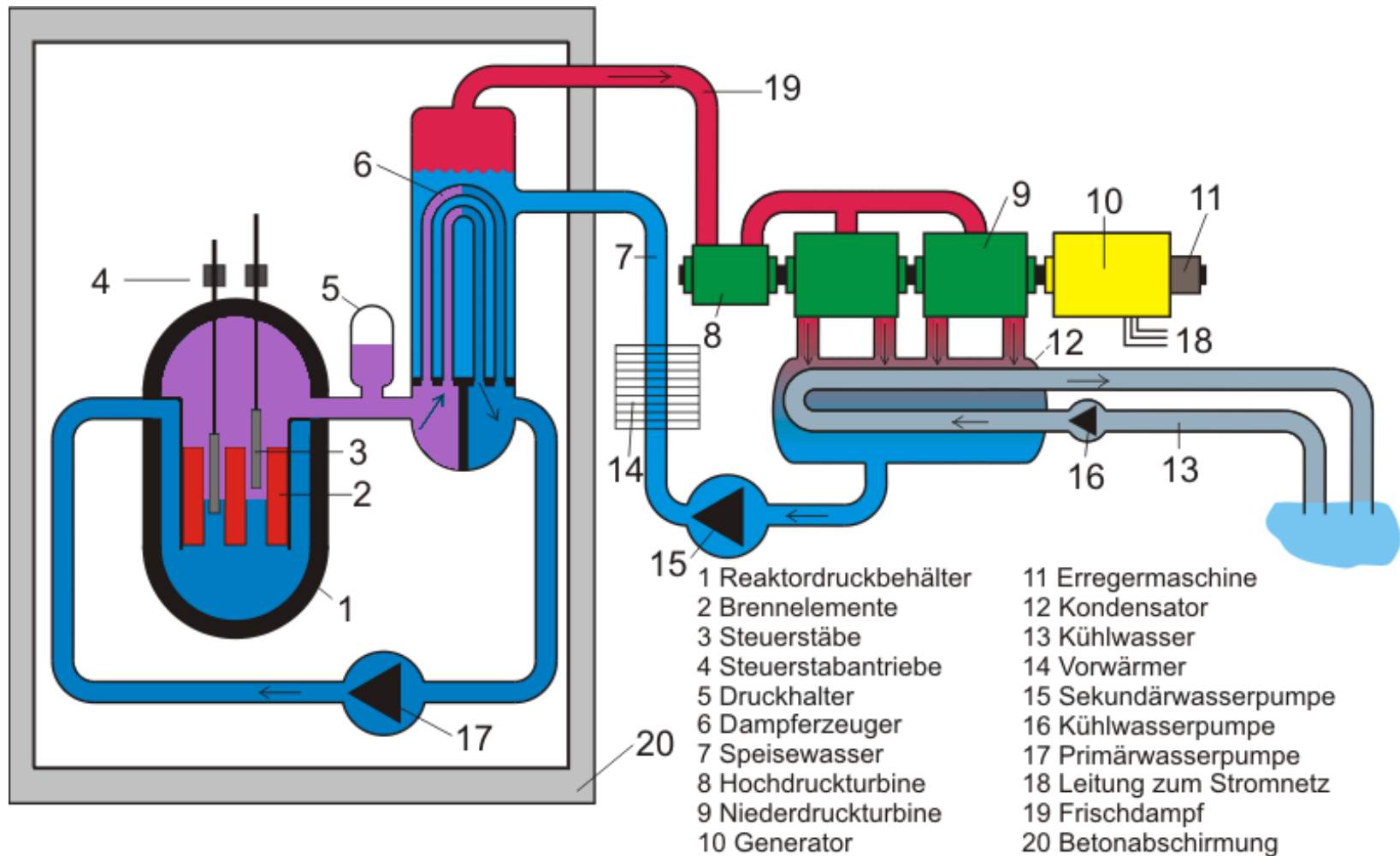
- Die entstehende Wärme wird durch Gas, Wasser oder flüssiges Metall abgeführt und zur Dampferzeugung verwendet

Kernkraftwerke

- Abhängig vom Moderator unterscheidet man
 - 1) Leichtwasserreaktoren (H_2O , 90% aller Leistungsreaktoren)
 - 2) Schwerwasserreaktoren (D_2O)
 - 3) Graphitmoderierte Reaktoren (C, Graphit)

 - ..und abhängig vom Kühlverfahren
 - a) Druckwasserreaktoren
 - b) Siedewasserreaktoren
 - c) Gasgekühlte Reaktoren
 - d) Flüssigmetallgekühlte Reaktoren
- In Deutschland sind derzeit nur leichtwassermoderierte (und -gekühlte) Druck- oder Siedewasserreaktoren im Einsatz

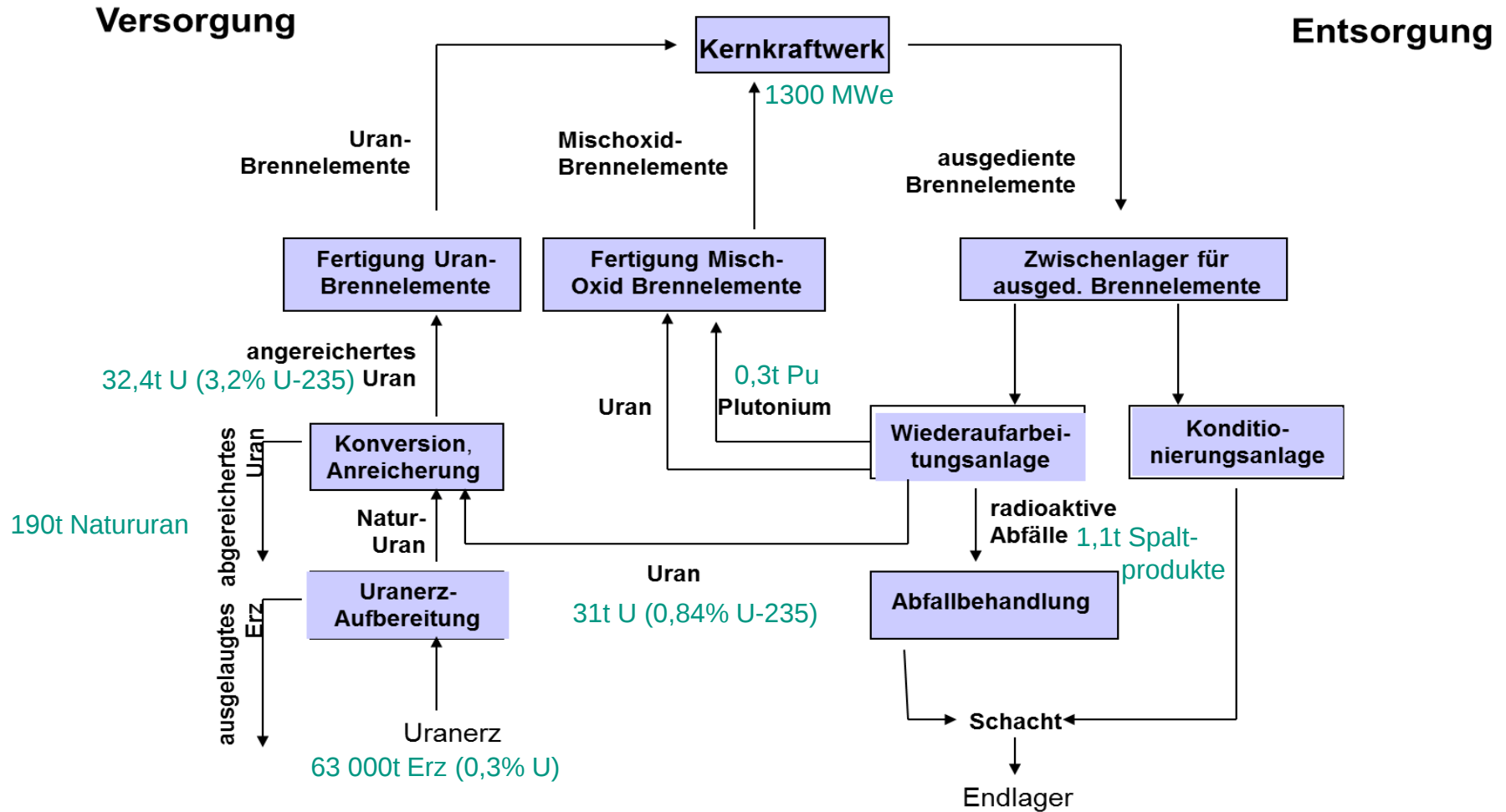
Funktionsweise Kernkraftwerk



[Quelle: Steffens (2006)]

Brennstoffkreislauf

Jahresbedarf eines 1300 MWe Kernkraftwerks [Quelle: Michaelis, H.: Handbuch Kernenergie, S. 466]



Kernenergie in Deutschland

- 1961: Erstes deutsches Kernkraftwerk (Kernkraftwerk Kahl), Leistung: 15 MW_{el}
- Ausstieg aus der Kernenergie gesetzlich geregelt (2002),
- Laufzeitverlängerung durch Erhöhung der Reststrommengen (2010)
- Zurücknahme der Laufzeitverlängerung nach Fukushima (2011):
 - Biblis (Blöcke A und B), Brunsbüttel, Isar (Block I), Krümmel, Neckarwestheim (Block I), Philippsburg (Block I), Unterweser
- letzter Kernreaktor wird bei der derzeitigen Gesetzeslage bis 2022 außer Betrieb genommen:
 - 2015: Grafenrheinfeld (27.Juni)
 - 2017: Gundremmingen, Block B
 - 2019: Philippsburg, Block II
 - 2021: Kernkraftwerke Grohnde, Brokdorf und Gundremmingen, Block C;
 - 2022: Kernkraftwerke Isar Block II, Neckarwestheim, Block II und Emsland

Kernenergie weltweit

- 1954 Inbetriebnahme des ersten kommerziellen Kernkraftwerks der Welt (Kernkraftwerk Obninsk) (Leistung: 6 MW_{el})
- Weltweit wird in 31 Ländern Kernenergie genutzt
- insgesamt 450 Kernkraftwerksblöcke mit Gesamtbruttoleistung von 419.000 MW_{el} (Deutschland: 8 AKWs mit 11.000 MW_{el})
- 58 Kernkraftwerksblöcke im Bau mit einer Gesamtleistung von 62.000 MW_{el}
- Anteil Kernenergie an der Stromerzeugung weltweit 11 %
- Anteil Kernenergie an der Stromerzeugung in der Europäischen Union 25 % (129 Kernkraftwerke)
- Insbesondere Länder mit stark wachsendem Energiebedarf setzen auf den Ausbau der Kernenergienutzung (China, Indien, Russland, USA, VAE u.a.)

[Quelle: – atw Compact Statistics 31.12.2016]

Europäische Kernkraftwerke



Armenien	1		1
Belgien	7		1
Bulgarien	2		6
Deutschland	9		35
Finnland	4	2	
Frankreich	58	2	14
Italien			6
Litauen		1	2
Niederlande	1		1
Österreich			1
Polen			4
Rumänien	2	2	1
Russland	30	26	20
Schweden	10		3
Schweiz	5		1
Slowakei	4	2	3
Slowenien	1		
Spanien	8		6
Tschechien	6	2	
UK	16	2	30
Ukraine	14	3	7
Ungarn	4	2	
Weißrussland		1	

Allgemeine Information
IEA Energiestatistik Überblick
IEA Energiestatistik monatlich

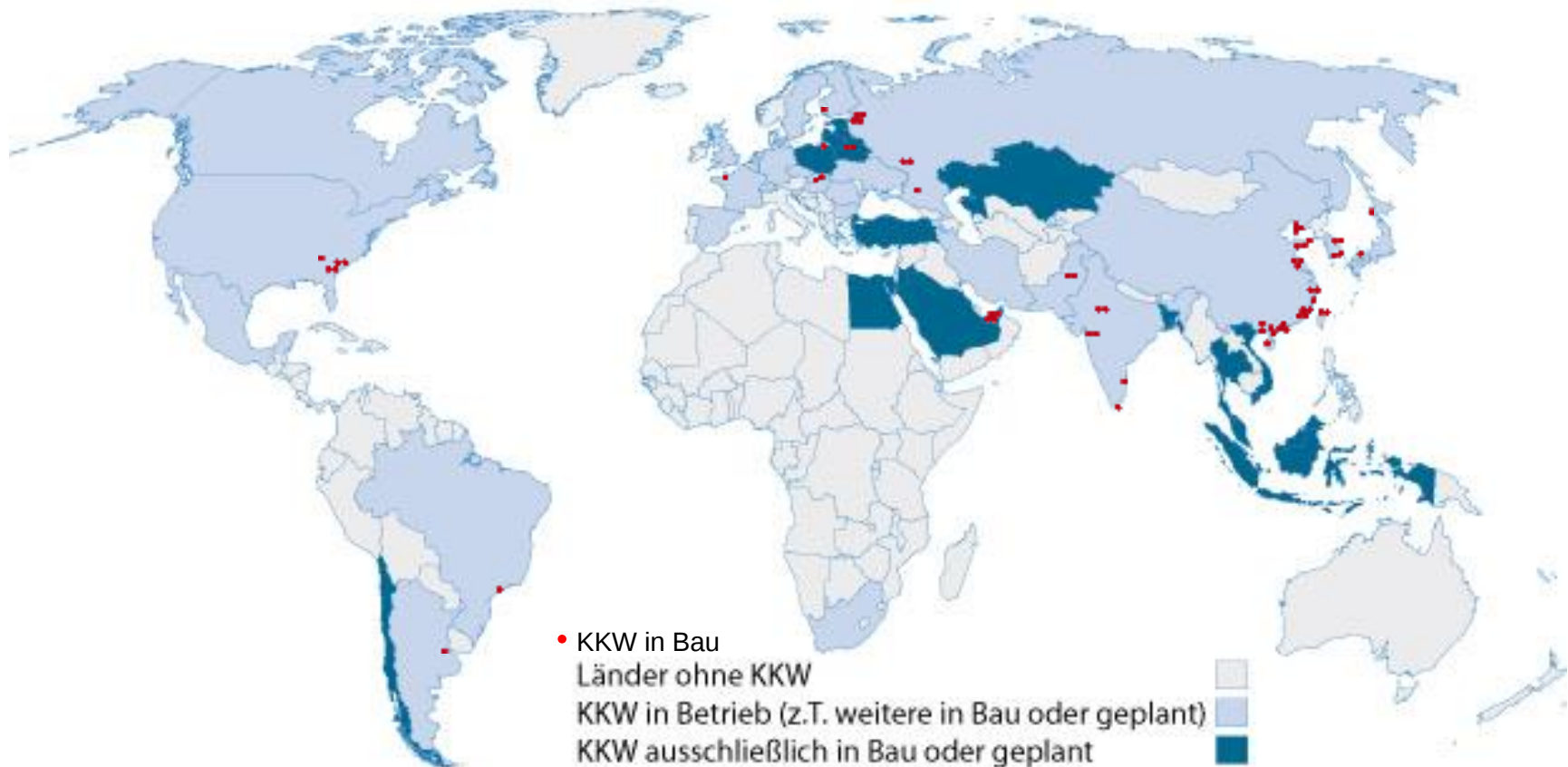
■ **31.21.2016:** in der EU 129 Kernkraftwerke (127 GW_e) in Betrieb und in 3 Ländern 4 Kernkraftwerke (4 GW_e) im Bau.

[Quelle: <http://www5.umweltbundesamt.at>]

Länder mit Kernkraftwerken weltweit

Länder mit Kernkraftwerken in Betrieb und

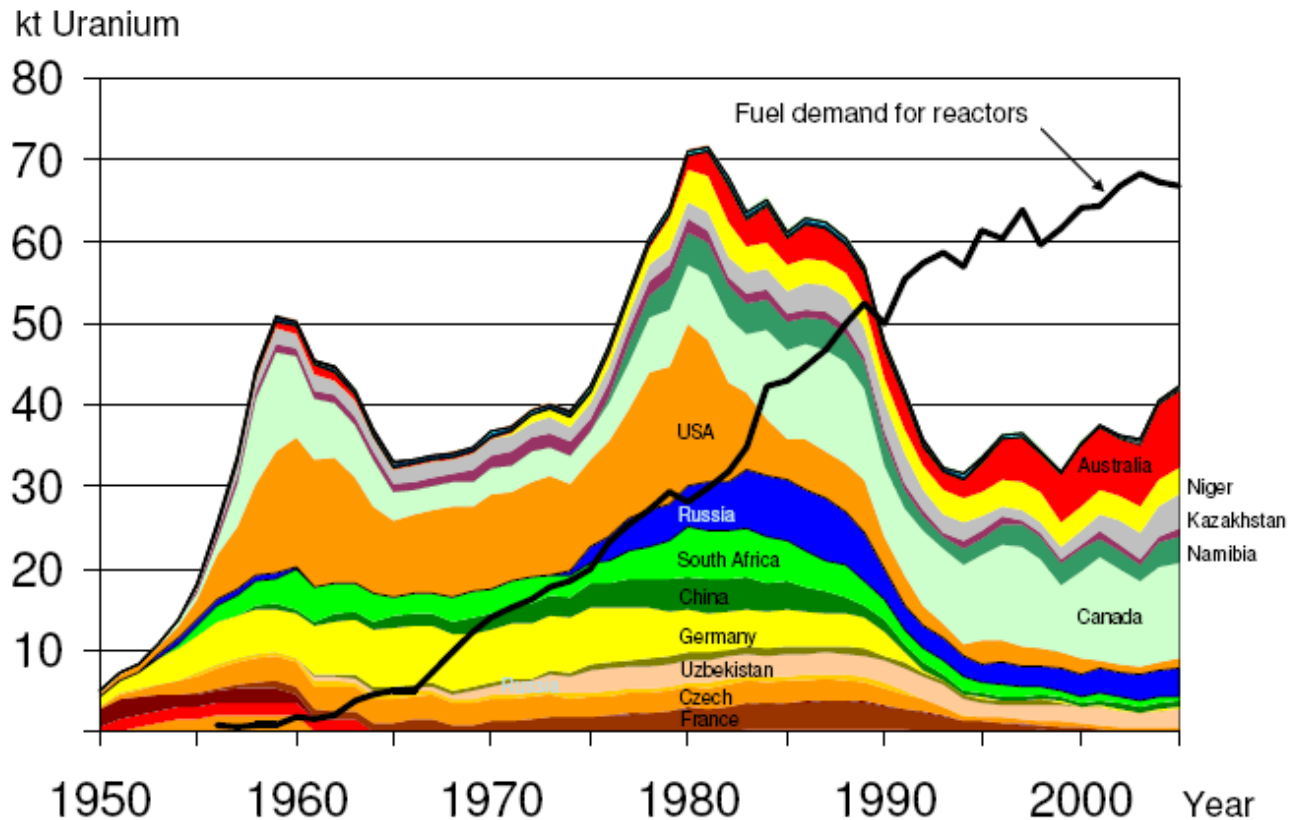
Länder, die bislang keine Kernkraftwerke betreiben mit KKW in Bau, Planung bzw. Vorplanung 2015



- **31.21.2016:** in 31 Ländern 450 Kernkraftwerke (419 GW_e) in Betrieb und in 15 Ländern 58 Kernkraftwerke (62 GW_e) in Bau.

[Quelle: <http://www.kernenergie.de>]

Uranverbrauch und -bereitstellung



- Seit den frühen 90er Jahren ist der Verbrauch höher als die Bereitstellung von Uran und wird sekundär durch Lagervorräte gedeckt

[Quelle: Energy Watch Group]

Uran – Reserven und Ressourcen

- ...werden nach der OECD Nuclear Energy Agency und der Internationalen Atomenergieorganisation (IAEO) auf Basis der Wahrscheinlichkeit ihres Vorkommens kategorisiert in :
 1. **Reasonably Assured Resources (RAR)** - gesicherte Reserven
 2. **Inferred Resources (IR)** - vermutete Ressourcen
 3. **Prognosticated Resources** - noch nicht entdeckt, erwartet
 4. **Speculative Resources** - möglicherweise existierend
- Ressourcen jeder Kategorie werden in Abhängigkeit der Bereitstellungskosten klassifiziert in:
 - <US \$40 pro Kilogramm Uran (kg U)
 - US \$40 – 80 pro Kilogramm Uran (kg U)
 - US \$80 – 130 pro Kilogramm Uran (kg U)

Uran – Reserven und Ressourcen II

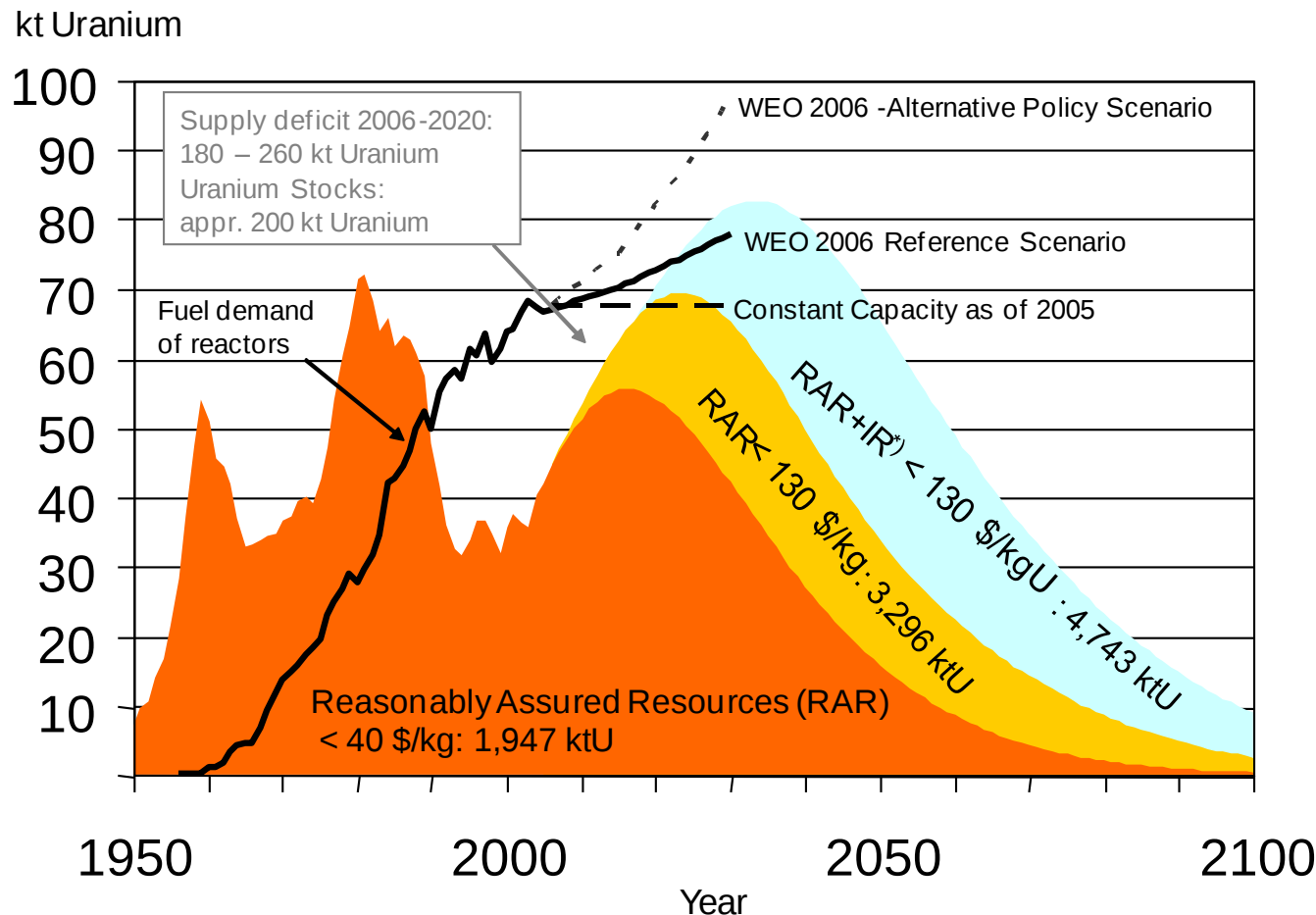
Tabelle: Weltweite Reserven und Ressourcen von Uran

(Vertrauens-) Kategorie		Einteilung nach erwarteten Produktionskosten		
		< 40 \$/kg U	< 80 \$/kg U	< 130 \$/kg U
1	Reasonably Assured Resources (RAR) gesicherte Reserven	1.947.000 t	2.643.000 t	3.297.000 t
2	Inferred Resources (IR) vermutete Ressourcen	799.000 t	1.161.000 t	1.446.000 t
3	Prognosticated Resources noch nicht entdeckt, erwartet	-	1.700.000 t	2.519.000 t
4	Speculative möglicherweise existierend	-	-	4.557.000 t
Total		2.746.000 t	5.504.000 t	11.819.000 t

[Quelle: Energy Watch Group]

Entwicklung – zukünftige Uranbereitstellung und -nachfrage

(Szenario nach IEA)



[Quelle: Energy Watch Group]

Aspekte der Kernenergienutzung

Vorteil

Nachteile

Aufgabe 1

- a) Berechnen Sie die Bindungsenergie (in MeV und J), die in der Spaltung von 1 kg eines Stoffes mit $A = 235$ frei wird.

Bindungsenergie pro Nukleon: $E_{\text{Bind, Nukleon}} = 0,9 \text{ MeV}$

atomare Masseneinheit $u = 1,661 \times 10^{-27} \text{ kg}$

[$1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$]

- b) Welche Menge Steinkohle (in t) ist notwendig, um durch ihre Verbrennung eine äquivalente Energiemenge freizusetzen?

1u ist definiert als 1/12 der Masse eines isolierten Atoms des Kohlenstoff-Isotops ^{12}C

Ein Elektronenvolt entspricht der kinetischen Energie, die ein Teilchen mit der Ladung $1e$ (Elementarladung) erhält, wenn es im Vakuum durch eine Spannung von 1 V beschleunigt wird.

Aufgabe 2

Ein Leichtwasserreaktor mit einer elektrischen Leistung von 1.400 MW wird mit einem Wirkungsgrad von 33 % betrieben. Die Volllaststundenzahl betrage 7.200 h/a und es wird angenommen, dass die Energie nur aus der Spaltung von Uran-235 stammt. Es wird eine Gesamtenergie pro Spaltung von 200 MeV angenommen.

- a) Bestimmen Sie die Anzahl der Spaltungen pro Stunde!
- b) Welche Menge Uran-235 (in t) wird pro Jahr verbraucht?

Aufgabe 3

Der Brennstoffbedarf eines Reaktors ist technisch durch die Leistung, den Lastfaktor und die Abbrandrate (energetische Ausnutzung des Brennstoffs) in Quantität und Qualität (Anreicherung) festgelegt:

elektrische Leistung	1.300 MW
Wirkungsgrad	33 %
Lastfaktor (Verfügbarkeit)	0,95
Abbrand	40.000 MWd/t Brennstoff
Anteil Uran-235 im geförderten Natururan	0,7 %
Anteil Uran-235 nach Anreicherung (im Brennstoff)	4,0 %

Berechnen Sie, wie viel **Natururan** ein Druckwasserreaktor benötigt:

a) pro Jahr sowie

b) während der gesamten Betriebszeit von 40 Jahren benötigt:

Aufgabe 4

Berechnen Sie aus den Angaben den Verbrauch des Jahres 2003 (aus der Grafik entnehmen) sowie die statische Reichweite des Energieträgers Uran für folgende Reserven-/ Ressourcen-Klassen:

- a) Reasonably Assured Resources (RAR) mit Produktionskosten bis US \$40/kg U
- b) Reasonably Assured Resources (RAR) mit Produktionskosten bis US \$130/kg U
- c) Reserven/ Ressourcen aller Kategorien mit Produktionskosten bis US \$130/kg U

Aufgabe 5

Berechnen Sie die dynamische Reichweite des Energieträgers Uran unter folgenden Annahmen:

- alle Kategorien mit Produktionskosten bis US \$130/kg U sind zu berücksichtigen
- der Verbrauch in 2003 soll 65.000 t betragen
- der jährliche Verbrauch steige bis 2010 um jährlich 2% im Vergleich zum Vorjahr und bleibt anschließend für den Rest des Betrachtungszeitraums konstant

Aufgabe 6

- a) Berechnen Sie (ausgehend von der vorhergehenden Aufgabe 3) die jährlichen Brennstoffkosten für einen Druckwasserreaktor:

Brennelementfertigungs- kosten	2.000 €/kg
Urankosten	10 \$/pound
Entsorgungskosten	500.000 €/t

(1 pound = 0,45359 kg; 1 \$ = 0,721 €)

- a) Wie hoch ist der Kostenanteil für Natururan an den Brennstoffkosten?

Aufgabe 7

Ein neu zu errichtendes Kernkraftwerk mit einer elektrischen Nennleistung von 1.000 MW soll die folgenden ökonomischen Parameter aufweisen:

Parameter	Einheit	Leichtwasserreaktor
Input (Anteil)		Uran (100 %)
Output (Anteil)		Elektrizität (100 %)
Wirkungsgrad	[%]	35 %
Investition	[€/kW _{el}]	1.250 €/kW _{el}
Sonstige Fixkosten	[€/(kW _{el} *a)]	42 €/(kW _{el} *a)
Betriebskosten	[Cent/kWh _{el}]	0,05 Cent/kWh _{el}
Brennstoffkosten	[Cent/kWh _{th}]	0,5 Cent/kWh _{th}
Nutzungsdauer	[a]	40 a
CO ₂ -Emissionen	[kg/kWh]	-

Es soll über die gesamte Nutzungsdauer hinweg 7.500 Betriebsstunden pro Jahr erreichen. Die Investition soll gleichmäßig über die Nutzungsdauer verteilt werden. Berechnen Sie:

- die Gesamtkosten pro Jahr
- die spezifischen Stromerzeugungskosten [Cent / kWh_{el}] dieses Kernkraftwerks

Umrechnungstabellen

Von \ Zu	Joule [J]	Kilowattstunden [kWh]	Steinkohleeinheiten [kg SKE]	Rohöleinheiten [kg RÖE]	Kilokalorien [kcal]	British Thermal Unit [BtU]
1J	1	2,78E-07	3,41E-08	2,39E-08	2,39E-04	9,47E-04
1 kWh	3,60E+06	1	0,123	8,60E-02	860	3410
1 kg SKE	2,93E+07	8,141	1	0,7	7000	27755
1 kg RÖE	4,19E+07	11,630	1,429	1	10000	39658,3
1 kcal	4186,800	1,16E-03	1,43E-04	1,00E-04	1	3,965
1 BtU	1055,870	2,93E-04	3,60E-05	2,52E-05	0,252	1

From \ To	Joule	Kilowattstunden	Steinkohleeinheiten	Rohöleinheiten	Kilokalorien	British Thermal Unit
1 t Steinkohle	3,00E+10	8320,77	1022	715,25	7,15E+06	2,84E+07
1 t Braunkohle	8,50E+09	2361,08	290	203	2,03E+06	8,05E+06
1 t Erdöl	4,19E+10	1,16E+04	1430,81	1000,56	1,00E+07	3,97E+07
1 t Heizöl-L	4,27E+10	1,19E+04	1458,13	1019,66	1,02E+07	4,04E+07
1 m³ Erdgas	3,17E+7	8,8167	1,083	0,7581	7581	30084
1 m³ Holz	1,47E+10	4070,83	500	350	3,50E+06	1,39E+07