

Kohleverbrennung: Folgen für die Umwelt

Claus Grupen



Universität Siegen

Übersicht I

- Der Energiemix
- Fakten zum Kraftwerk Dörpen
- Einheiten der Radioaktivität
- Radioaktivität in der Kohle
- Radioaktivität aus der natürlichen Umwelt
- Radioaktivität aus Kernkraftwerken
- Risikofaktoren für Krebs

Übersicht II

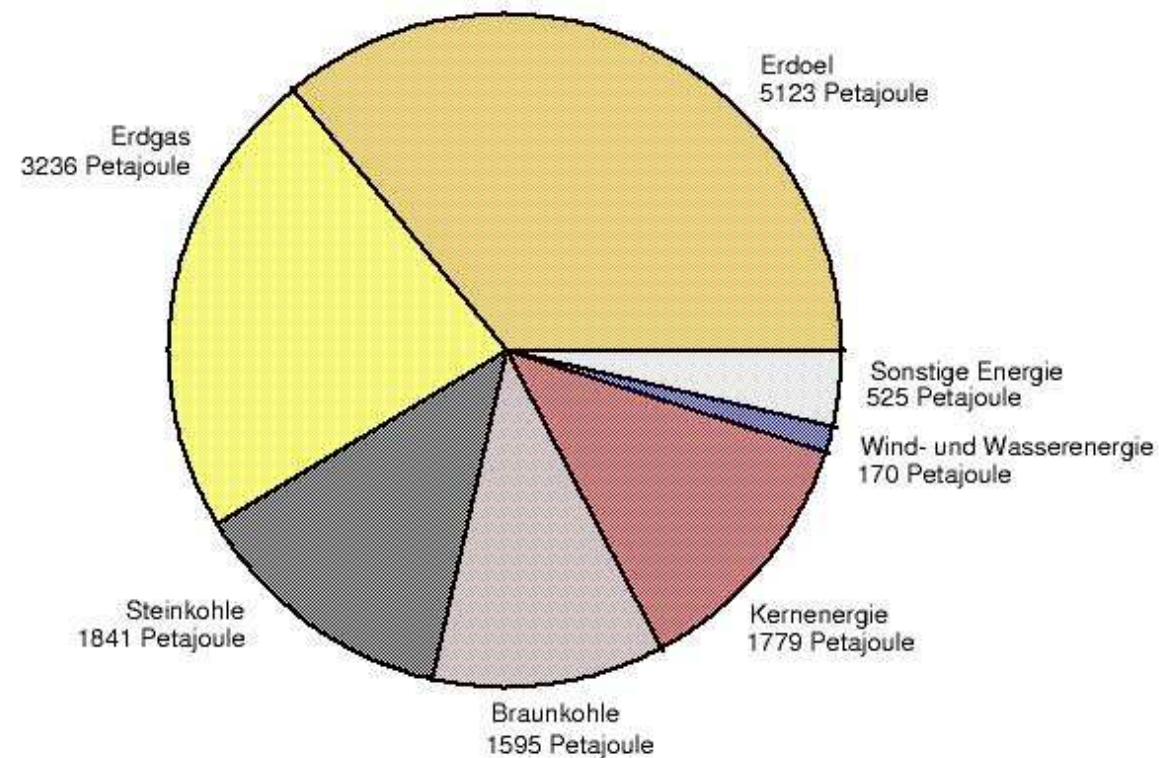
- Chemie der Kohle
- Mineralstoffe
- Verbrennungsstoffe
- Feinstaub
- Filter, Flugasche und Schlacken
- Biologische Folgen

Übersicht III

- Physikalische Aspekte
- Praktische Aspekte
- Politische Aspekte
- Klimafolgen
- Vergleiche
- Alternativen: Energie sparen
- Schlussfolgerungen
- Fazit

Der Energiemix

Primaerenergieträger in Deutschland
im Jahre 2005



1 Petajoule = 10^{15} Joule

Datenquelle: <http://ag-energiebilanzen.de>

Fakten zum Kraftwerk Dörpen

- Leistung 900 MW
- Jahresbetriebsstunden 7500 (entsprechend 85,6 %)
- Betriebsdauer 40 Jahre
- Kohleverbrauch 2 Millionen Tonnen pro Jahr
 $= 2 \cdot 10^9 \text{ kg/a}$
- Energiekonversion: 1 kWh entspricht 330 g Steinkohle
- 350 g Kohle entsprechen 1,2 kg CO₂!
- $A(\text{C}) = 12$; $A(\text{O}) = 16$; $A(\text{CO}_2) = 12 + 2 \cdot 16 = 44$

Dörpen



Dörpen



Papenburg



Einheiten der Radioaktivität

- Einheit der Aktivität: Becquerel (Bq)
- 1 Becquerel = 1 Zerfall pro Sekunde
- alte Einheit: 1 Curie (Ci) = Aktivität von 1 g Ra 226
- $1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$
- Energiedosis D = absorbierte Energie pro Masse (Joule pro kg)
- Einheit der Energiedosis: 1 Gray

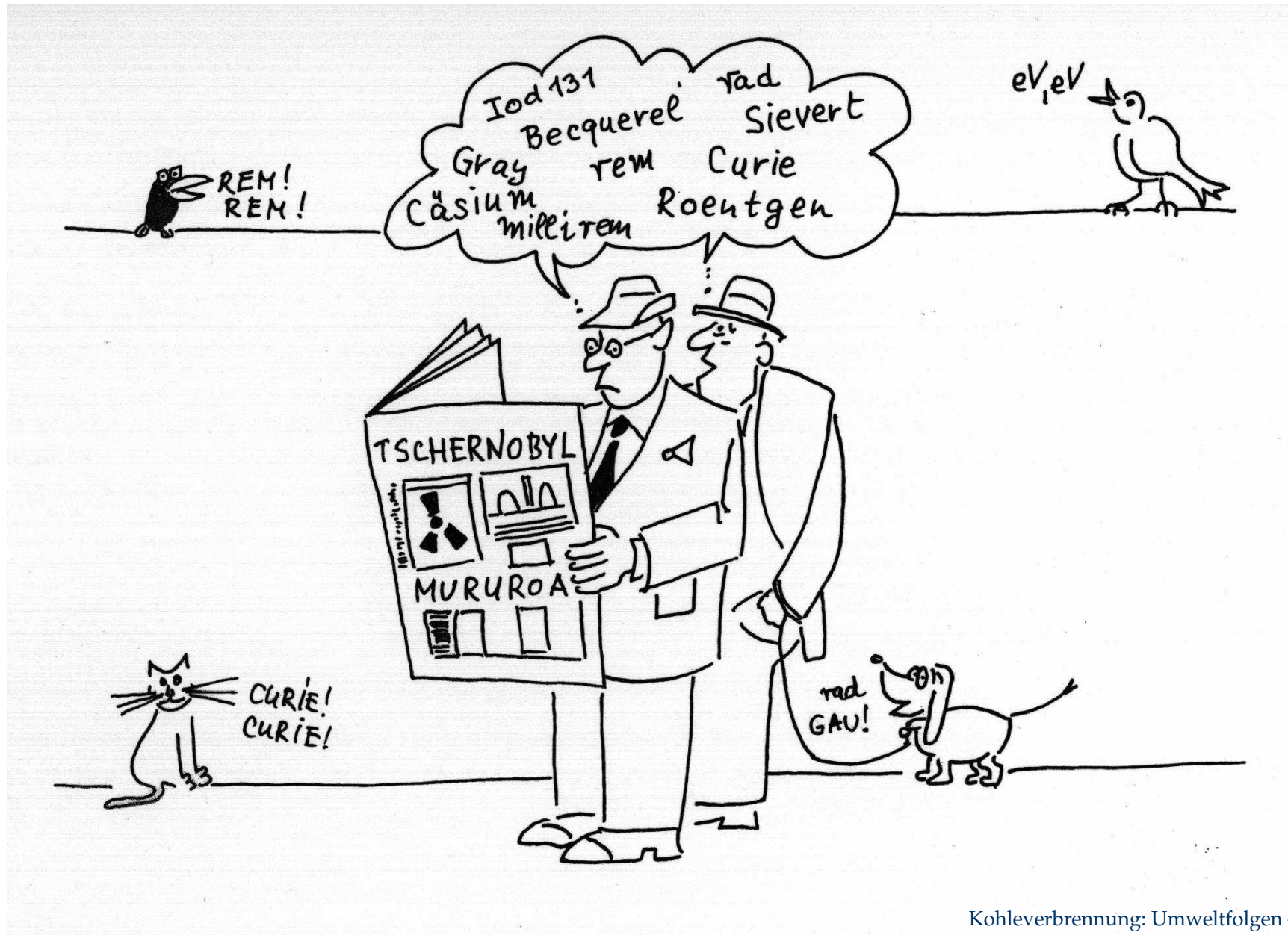
Einheiten der Radioaktivität

- Einheit der Äquivalentdosis (H); Sievert (Sv)
- Energiedosis D x Relative Biologische Wirksamkeit (RBE)
- $H = RBE \times D$
- RBE oder Wichtungsfaktoren für Strahlung
- $\alpha = 20; \beta = \gamma = 1$
- Neutronen, je nach Energie 5 bis 20

Marie und Pierre Curie



Einheitenmix



Radioaktivität in der Kohle

- Ra 226; 40 Bq/kg Halbwertszeit 1600 a
- Th 232; 30 Bq/kg Halbwertszeit $1,4 \cdot 10^{10}$ a
- K 40; 240 Bq/kg Halbwertszeit $1,3 \cdot 10^9$ a
- in geringen Mengen U 238, U 235, Po 210, Bi 214, ...
- insgesamt 4 TBq (Jahresverbrauch)
- Strahlenbelastung durch Inhalation (70 %)
- und Ingestion (30 %)
- im Umkreis von 10 km: $\approx 100 \mu\text{Sv}$ pro Jahr*

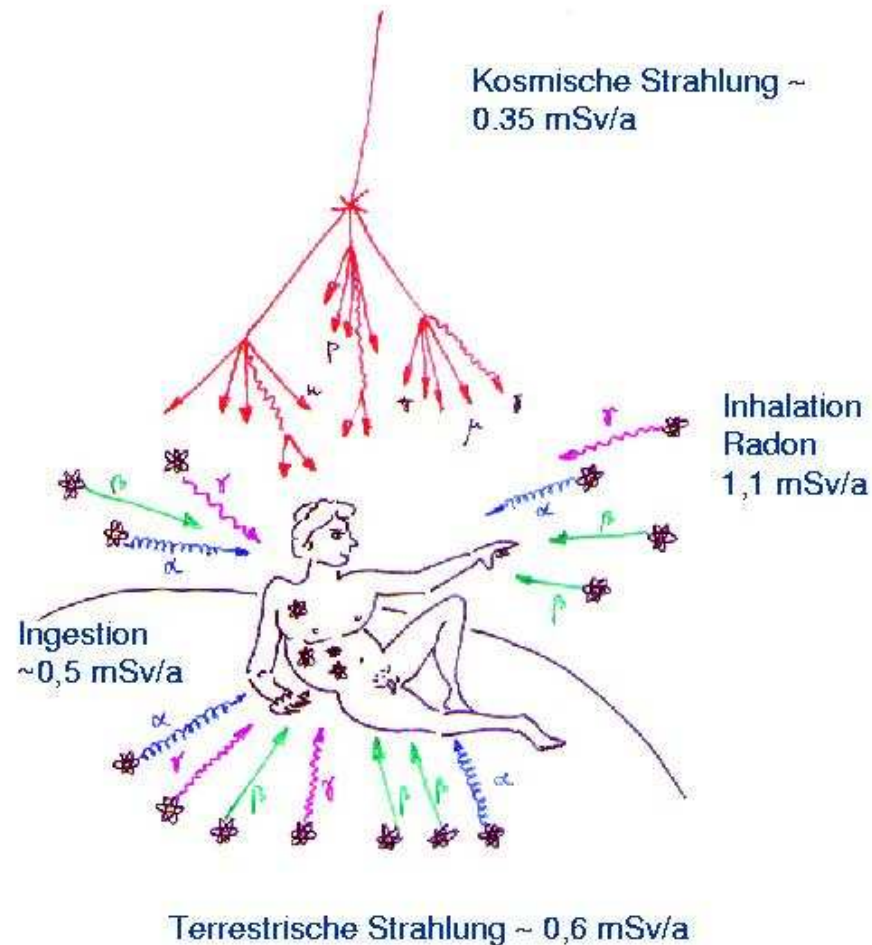
*Scientific American, Dec. 2007

Radioaktivität der natürlichen Umwelt

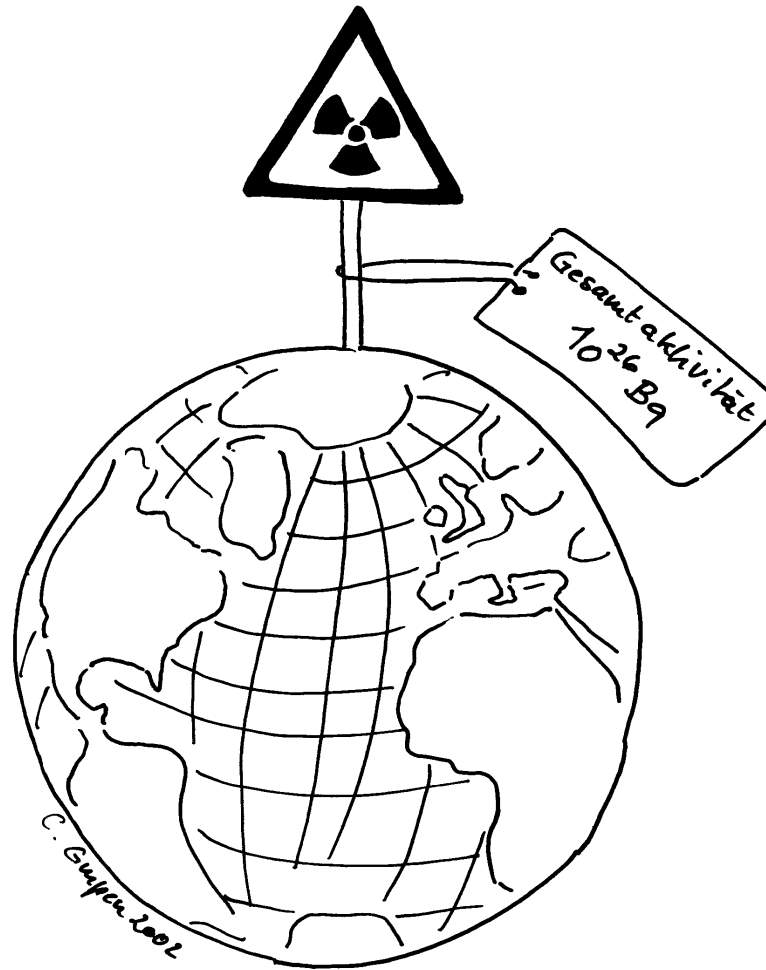
- Kosmische Strahlung 0,35 mSv/a; Myonen und Elektronen
- Terrestrische Strahlung 0,6 mSv/a; Ra 226; Th 232; K 40; ...
- Inhalation 1,1 mSv/a; Rn 222; Rn 220
- Ingestion 0,5 mSv/a; C 14; K 40; ...
- insgesamt $\approx 2,5$ mSv/a
- Grenze für strahlenexponiertes Personal; 20 mSv/a
- Letale Dosis: 4500 mSv

Umweltradioaktivität

Natürliche Strahlenbelastung



Kernkraftwerke



© by Claus Gruppen

Kernkraftwerke



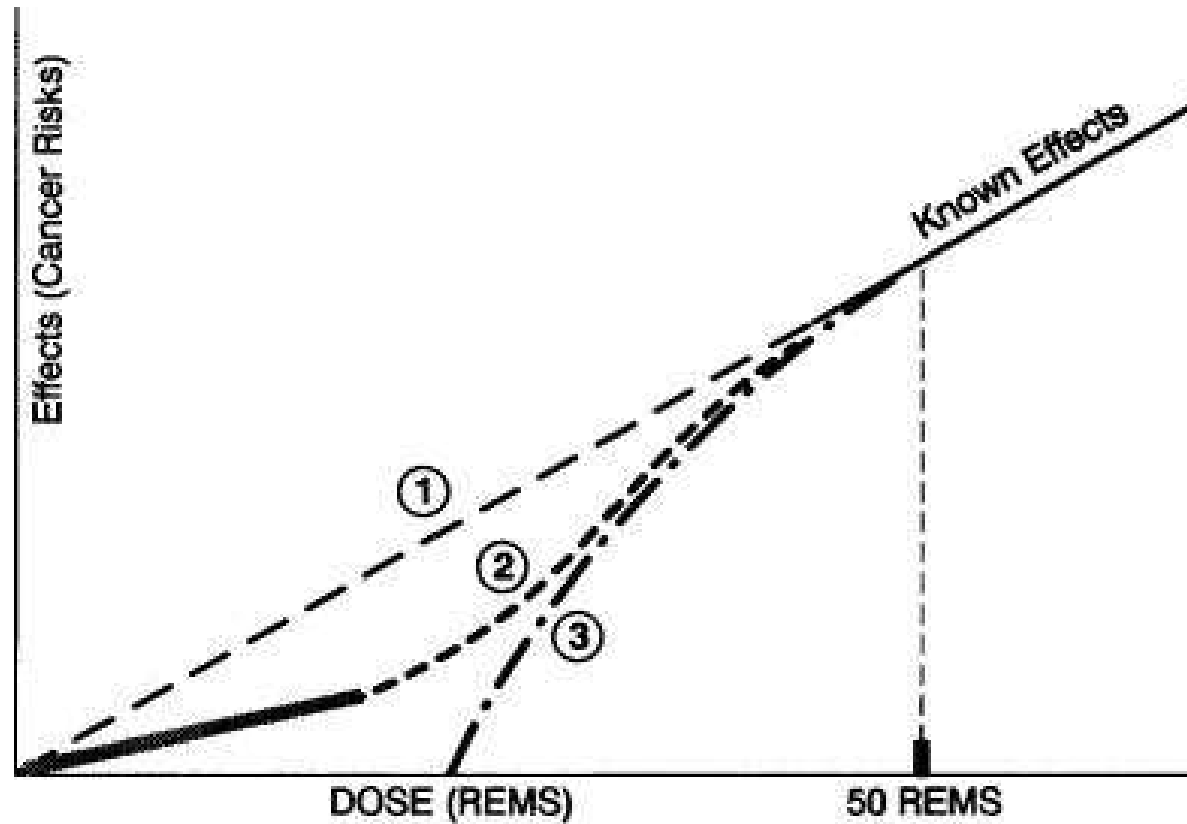
Radioaktivität aus Kernkraftwerken

- Strahlung aus dem Reaktor
- Strahlung von Spaltprodukten
- Strahlung aus Zwischen- und Endlagern
- Strahlung durch Ableitungen über Wasser und Luft
- Hauptnuklide: H 3; Sr 90; Cs 137; Kr 85; Xe 133; ...
- Zulässige Belastung der Umwelt $\approx 300 \mu\text{Sv/a}$
- Tatsächliche Belastung der Umwelt $\approx 1 \mu\text{Sv/a}$
- Faktor 100 weniger als bei Kohlekraftwerken
- Aber: in beiden Fällen relativ gering

Risikofaktoren durch Radioaktivität

- für Kohlekraftwerke
- keine Frühschäden
- Risikofaktor für Strahlenkrebs 5 % pro Sievert
- 5 % pro Sievert halte ich für pessimistisch
- Annahme : 100 000 Einwohner sind betroffen
- $r = 0,05 \cdot 100 \mu\text{Sv} \cdot 100\,000 = 0,5/\text{a}$
- Laufzeit 40 Jahre $\rightarrow$ 20 Krebsfälle pro Laufzeit
- wenig im Verhältnis zur “normalen” Krebsrate
- bei Kernkraftwerken: vernachlässigbar

Dosis-Effekt Kurven



Chemie der Kohle

- Kohle ist reich an natürlichen Mineralstoffen mit großen regionalen Schwankungen
- 2 Millionen Tonnen Kohle (Jahresverbrauch) enthalten*
- 34 000 kg Arsen; 200 kg Cadmium
- 12 000 kg Gold; 400 kg Quecksilber
- 16 000 kg Blei; 6 000 kg Uran 238
- 10 000 kg Thorium; 50 kg Uran 235

*Trace elements in West Virginia Coals

<http://www.wvgs.wvnet.edu/www/datastat/te/index.htm>

Freigesetzte Mineralstoffe

- Angenommene Filtereffizienz: 90 %
- in Flugasche werden die Mineralstoffe angereichert
- bei 2 Millionen Tonnen Kohle (Jahresverbrauch) werden freigesetzt:
 - 3 400 kg Arsen; 20 kg Cadmium
 - 1 200 kg Gold; 40 kg Quecksilber
 - 1 600 kg Blei; 6 00 kg Uran 238; 1000 kg Thorium
- Achtung: diese Werte sind großen Schwankungen unterworfen
- andere Quellen: 100 kg Schwermetall pro Tag und Kraftwerk

Rauchende Schornsteine



gasförmige Emissionen (ohne CO₂)*

NO _x	25 000 Tonnen
SO ₂	65 000 Tonnen
flüssige organische Verbindungen	200 Tonnen
elementarer Kohlenstoff	500 Tonnen
NH ₃ (Ammoniak)	10 Tonnen
Summe	etwa 91 000 Tonnen#

*Power Plant Emissions; Clean Task Force, Boston 2004

entsprechend 4,6 % der Steinkohle

Feinstaub-Emissionen

PM 10	1500 Tonnen/a
-------	---------------

PM 2,5	700 Tonnen/a
--------	--------------

- Volumen $V \sim r^3$
- Oberfläche $O \sim r^2$
- Oberfläche pro Volumen $\sim 1/r$
- Oberfläche PM 2,5/PM 10 $\rightarrow$ Faktor 4 bei gleicher Masse
- Achtung: kleine Staubpartikel sind gefährlicher!

Filter, Flugasche, Schlacken

- gute Filter sind ganz wesentlich
- Flugasche ist 10 mal so radioaktiv wie Steinkohle
- Schlacken sind schwach radioaktiver Müll
- Schlacken enthalten wertvolle Minerale
- Achtung: es gibt keine Vorschriften für die Lagerung von Schlacken

Rauchende Schornsteine



Kohle- und Abraumhalden



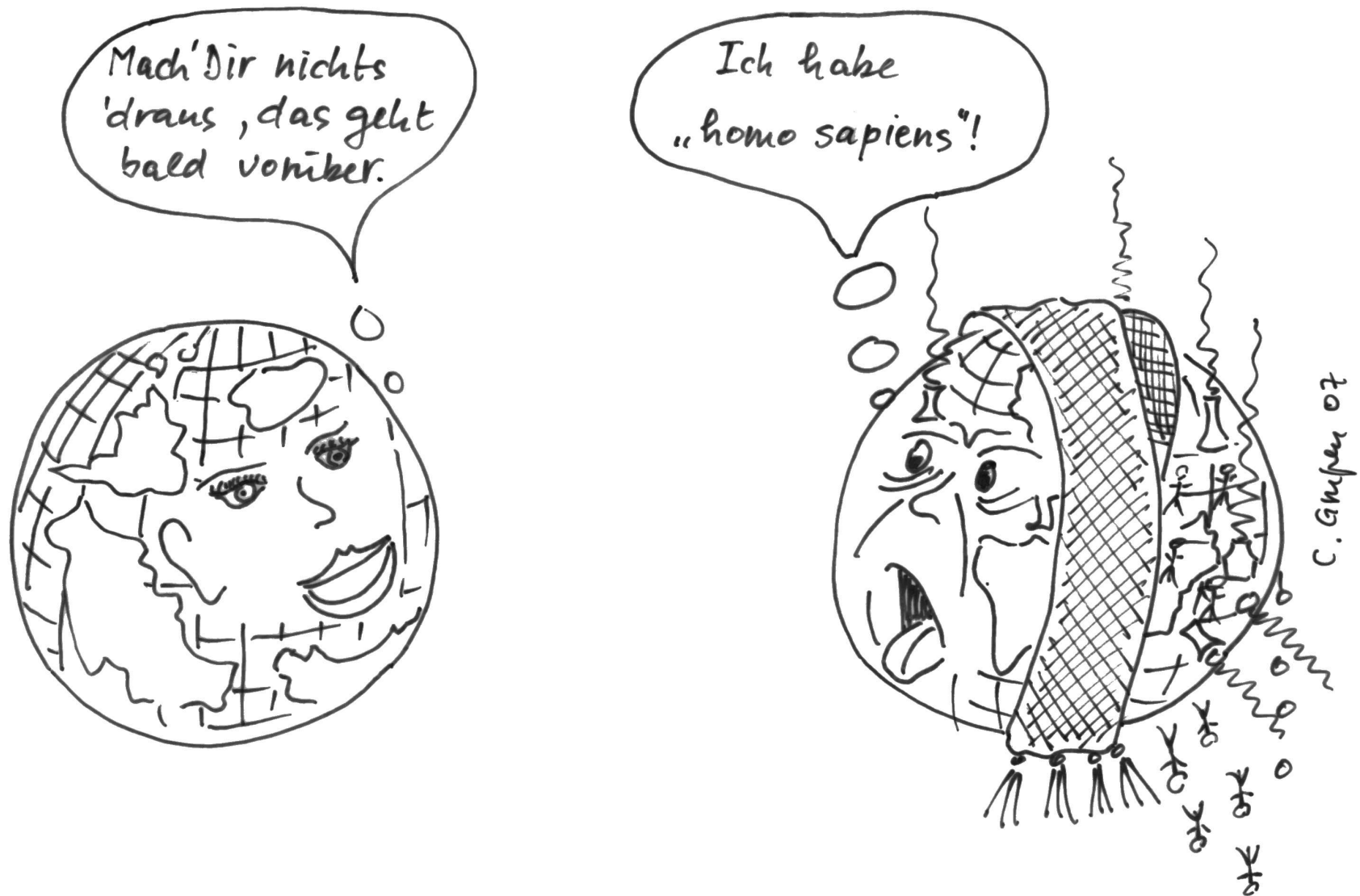
Biologische Folgen*

Krankheit	pro 10 ⁵ Einwohner/a
Chronische Bronchitis	35
Akute Bronchitis	80
Chronische Lungenkrankheiten	3
Asthma	6
Lungenentzündung	17
Herzanfälle	85
Herz-Kreislaufbeschwerden	30
Allergien	viele

insgesamt 3 Promille der Bevölkerung sind betroffen

*Power Plant Emissions; Clean Task Force, Boston 2004

Auswirkung der Technisierung



Physikalische Aspekte

- Carnot Wirkungsgrad
- $\eta = 1 - T_1 / T_2$
- T_2 Dampftemperatur; T_1 Kühlttemperatur
- Temperaturen in Kelvin
- Dampftemperatur 500 bis 600 K
- $\eta \rightarrow 40 \% \text{ bis } 50 \%$
- Verbesserung der Energieeffizienz?
- der Rest ist Abwärme
- Kraft-Wärme Kopplung vorgesehen?

Praktische Aspekte

- Notwendigkeit für 380 kV Hochspannungsleitungen
- Aufheizen des Kühlwassers mit
- möglichen ökologischen Folgen
- bauliche Verschandelung der Natur
- Wertminderung von Grundstücken
- Belastung durch Schwertransporte
- Anlieferung von 2 Millionen t Kohle pro Jahr
- Abraumhalden

Politische Aspekte

- billige Kohle aus Kolumbien, Südafrika, Rußland?
- Ausbeutung der Bergleute dort?
- Braucht die Region 900 MW zusätzlich?
- DK und NL lehnen den Bau von KohleKW ab
- die dänischen Betreiber (DONG-Energy) wollen in Deutschland bauen?
- Alternativen: Wind? Solare Energie?
- → Probleme mit der Grundlast
- würde effiziente Speicher erfordern:
Pumpwasserspeicher wie in Norwegen? → bessere europäische Netze

Klimafolgen

- Klimakonferenz Bali ??
- Reduktion des CO₂ Ausstoßes ??
- CO₂ Probleme sind bekannt
- einige Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr sind nicht wenig
- Anstieg des Meeresspiegels
- Einschränkung der Biodiversität
- Ausbreitung von Tropenkrankheiten (Malaria, ...)

Vergleiche

Europas schlimmste Kohlekraftwerke

	Standort	Rohstoff	Betreiber	Relative Emission*	Absolute Emission**
1.	Agios Dimitrios	Braunkohle	DEH	1.350	12,4
2.	Kardia	Braunkohle	DEH	1.250	8,8
3.	Niederaußem	Braunkohle	RWE	1.200	27,4
4.	Jänschwalde	Braunkohle	Vattenfall	1.200	23,7
5.	Frimmersdorf	Braunkohle	RWE	1.187	19,3
6.	Weisweiler	Braunkohle	RWE	1.180	18,8
7.	Neurath	Braunkohle	RWE	1.150	17,9
8.	Turow	Braunkohle	BOT GiE S.A.	1.150	13,0
9.	As Pontes	Braunkohle	ENDESA	1.150	9,1
10.	Boxberg	Braunkohle	Vattenfall	1.100	15,5
11.	Belchatow	Braunkohle	BOT GiE S.A.	1.090	30,1
12.	Prunerov	Braunkohle	CEZ	1.070	8,9
13.	Sines	Steinkohle	EDP	1.050	8,7
14.	Schwarze Pumpe	Braunkohle	Vattenfall	1.000	12,2
15.	Longannet	Steinkohle	Scottish Power	970	10,1
16.	Lippendorf	Braunkohle	Vattenfall	950	12,4
17.	Cottam	Steinkohle	EDF	940	10,0
18.	Rybnik	Steinkohle	EDF	930	8,6
19.	Kozienice	Steinkohle	Staatseigentum	915	10,8
20.	Scholven	Steinkohle	E.ON	900	10,7
21.	West Burton	Steinkohle	EDF	900	8,9
22.	Fiddlers Ferry	Steinkohle&Öl	Scottish & Southern	900	8,4
23.	Ratcliffe	Steinkohle	E.ON	895	7,8
24.	Kingsnorth	Steinkohle&Öl	E.ON	892	8,9
25.	Brindisi Sud	Kohle	ENEL	890	14,4
26.	Drax	Steinkohle	AES	850	22,8
27.	Ferrybridge	Steinkohle	Scottish & Southern	840	8,9
28.	Großkraftwerk Mannheim	Steinkohle	RWE, EnBW, MVV	840	7,7
29.	Eggborough	Steinkohle	British Energy	840	7,6
30.	Didcot A & B	Steinkohle & Gas	RWE	624	9,5

* CO₂ in Gramm pro Kilowatt Stunde (g CO₂/kWh)

** Jahresemissions für das Jahr 2006 in Millionen Tonnen von CO₂ (mtCO₂)

Durchschnittliche Emissionsdaten für diese Kraftwerkstypen (in gCO₂/kWh):

Braunkohle	950-970
Steinkohle	750
Gas	365

CO₂ Ausstoß; Vergleiche

■ Angaben in Millionen Tonnen pro Jahr

Weltweit	12 000
USA	2790
China	2680
Russland	661
Indien	583
Japan	400
Deutschland	356
Australien	226
Südafrika	222
Großbritannien	212
Südkorea	185
Frankreich	175

<http://vorort.bund.net/suedlicher-oberrhein/>

[neue-kohlekraftwerke-enbw-eon-rwe-vattenfall.html](#)

Kohle vs. Kraftfahrzeuge

- Summe der CO_2 Emissionen der 10 größten deutschen Kohlekraftwerke: 165,6 Millionen Tonnen CO_2 pro Jahr
- PKW: 180 g/km CO_2 für Mittelklassewagen
- Fahrleistung 15 000 km/a
- Anzahl der zugelassenen Fahrzeuge: 42 Millionen
- $m(\text{CO}_2) = 0,18 \text{ kg/km} \cdot 42 \cdot 10^6 \cdot 15000 = 113 \cdot 10^6$ Tonnen

Kernenergie; Vergleiche

■ Anteile an der Stromproduktion in %

Frankreich	78
Litauen	72
Slowakei	55
Belgien	55
Schweden	52
Bulgarien	42
Schweiz	40
Slowenien	39
Tschechien	32
Deutschland	30
Großbritannien	19
Russland	16

<http://de.wikipedia.org/wiki/Kernkraftwerk>

Kernenergie vs Alternative Energien

- CO_2 Ausstoß in der Bauphase?
- weniger als bei Wind- oder Solaranlagen
- Biomasse? Methan!
- Endlagerung oder Zwischenlagerung
- → Transmutation
- Club of Rome ist mutiert zum Kernenergiebefürworter
- England und Frankreich: Energieunion KKW?

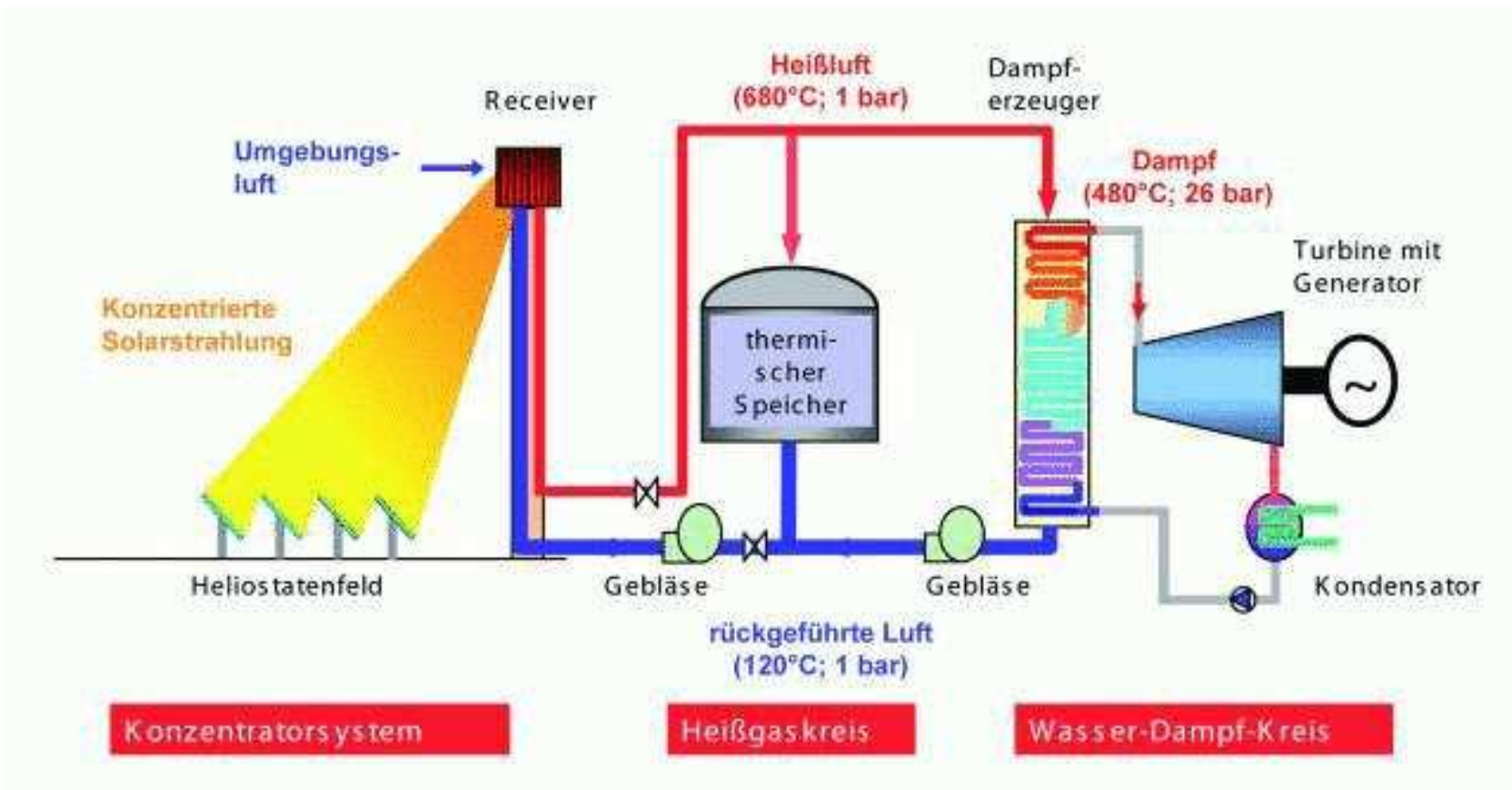
Windräder



Solaranlagen



Solkraftwerk

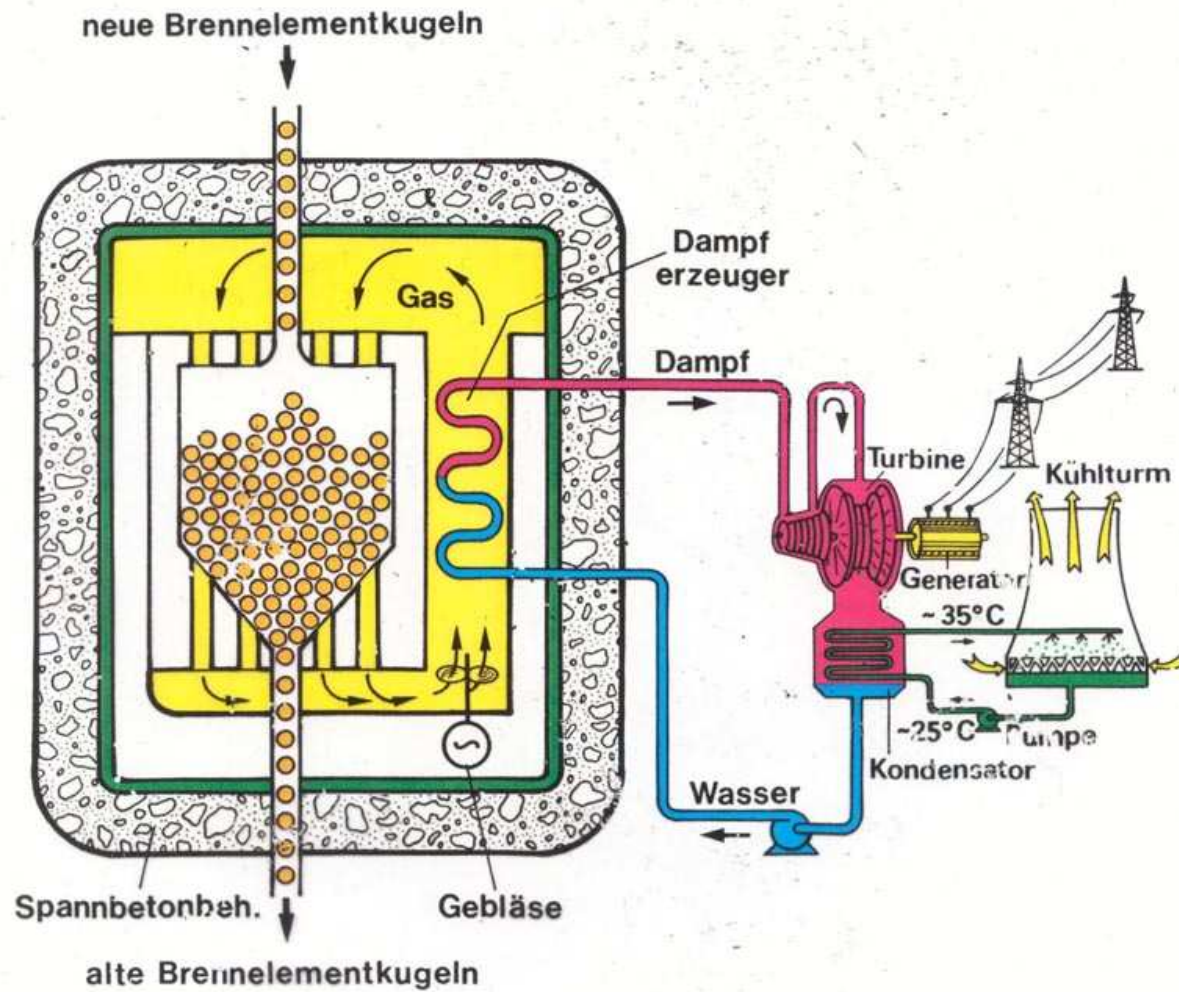


Kernenergie vs Kohle

- Kohle ist als Dreckschleuder in Verruf geraten
- die Energieunternehmen wenden sich langsam davon ab
- “früher oder später müssen wir doch wieder in die Kerntechnik rein”; Rolf Linkohr (EU Palamentarier)
- Der deutsche Atomausstieg spielt weltweit keine Rolle
- Paradoxon: Südafrika exportiert billige Steinkohle nach Deutschland
- Südafrika und China importieren das know-how über Hochtemperaturreaktoren aus Deutschland und bauen sie im eigenen Land auf!

Vergleiche

Hochtemperaturreaktor



Alternativen und Ideen

- Energie sparen
- Verbesserung der Energieeffizienz in Betrieben
- Gebäudesanierung
- Kernenergie ??
- wenn schon Kohle: dann optimale Filter und
- Konzept zur Lagerung von Schlacken
- Recycling des Mülls: Gewinnung wertvoller Minerale
- weniger schlecht: Gaskraftwerk

Schlußfolgerungen

- die Natur hat dafür gesorgt, dass die Kohle unter der Erde gut abgeschirmt ist
- es gibt keine Einschränkungen (wie bei Kernkraftwerken) für die Verteilung von Schlacken in der Umwelt. Wiederverwendung?
- die Effekte von Rückständen akkumulieren sich im Laufe der Jahre
- Kohle ist viel zu schade, als dass man sie verheizt!

Fazit

- Physik: Falls Kernkraftwerke eine solche Menge an schwach radioaktivem Müll (in Form von Flugasche und Schlacken) freisetzen würden wie Kohlekraftwerke, dann gäbe es einen Aufschrei in der Bevölkerung!
- Chemie: Kohlekraftwerke gehören immer noch zu den größten Luftverschmutzern in Deutschland
- für Energieinteressierte:
Wer im Treibhaus sitzt. Wie wir der Klima- und Energiefalle entkommen. von Konrad Kleinknecht