



TU Clausthal

# Energiewende und Klimafolgen

**Prof. (em.) Dr.-Ing. Michael F. Jischa**

Institut für Technische Mechanik

Abschließender Vortrag auf der Arbeitstagung

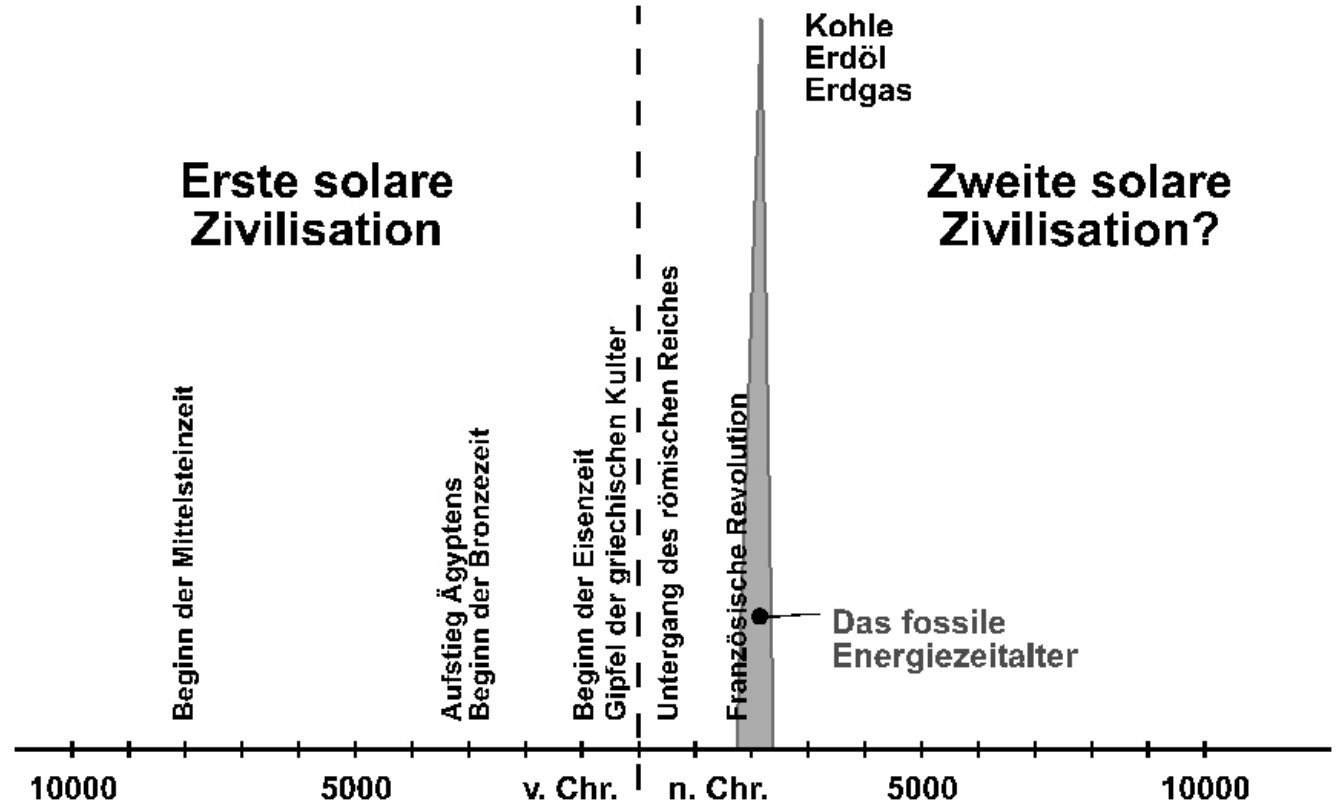
**„Praxisseminar Energie“**

der HIS GmbH und der TU Clausthal

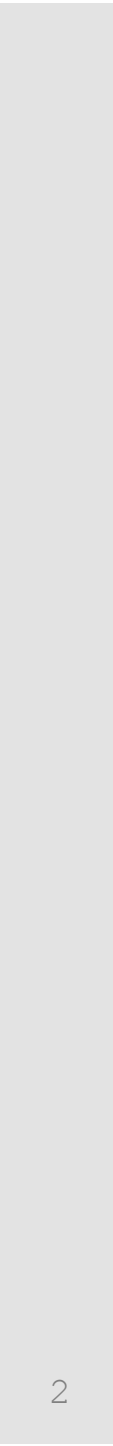
in Kooperation mit der Ruhr-Univ. Bochum

am 4. Juni 2008 in Clausthal-Zellerfeld

Anmerkung: Etliche Bilder und Tabellen stammen aus dem Buch  
Jischa (2005) Herausforderung Zukunft – Technischer Fortschritt und Globalisierung



**Energiegeschichte der Menschheit**, in Anlehnung an Hubbert, siehe Winter C-J (1993) *Die Energie der Zukunft heißt Sonnenenergie*. Droemer Knauer, München





## Die wesentliche Energiequelle ist die Sonne!

(zusätzlich die Rotation der Erde sowie Zerfallsprozesse im Erdinneren)

### Energieträger unterteilen in

- **Primärenergieträger**
  - regenerativ : Holz, Biomasse, Wind, Laufwasser, Gezeiten, Wellen
  - nichtregenerativ : Kohle, Erdöl, Erdgas, Uran
- **Sekundärenergieträger** (auch **Endenergie** genannt):  
Elektrischer Strom, Benzin, Dieselöl, Heizöl, Gas, Wasserstoff
- **Nutzenergie**: Licht, Raumwärme, Geschwindigkeit, Betrieb von Geräten

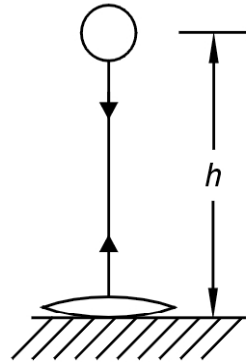
Primärenergie wird in Nutzenergie **umgewandelt**. Wegen der Verluste beträgt das Verhältnis von Primär- zu Sekundär- zu Nutzenergie etwa 3 : 2 : 1



## Reversibel

1. Beispiel: Eine Kugel fällt auf eine Unterlage

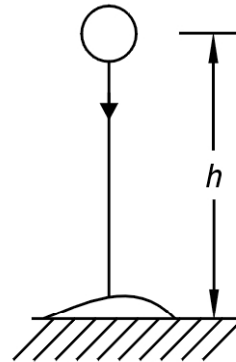
Kugel ist ideal elastisch



Potentielle → Kinetische → Verformungs-  
→ Kinetische → Potentielle Energie usw.

## Irreversibel

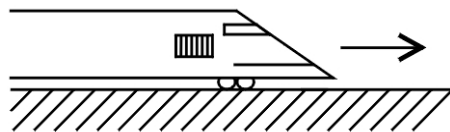
Kugel ist aus plastischem Material



Potentielle → Kinetische → Verformungs-  
energie

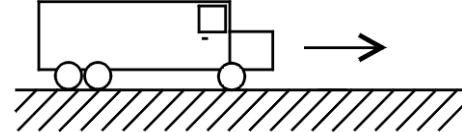
2. Beispiel: Abbremsen eines Fahrzeugs

Bahn



Kinetische → Elektrische Energie  
→ Netz (oder Akkumulator)

Automobil



Kinetische → Innere Energie

## **Reversible (links) und irreversible Energieumwandlung (rechts)**



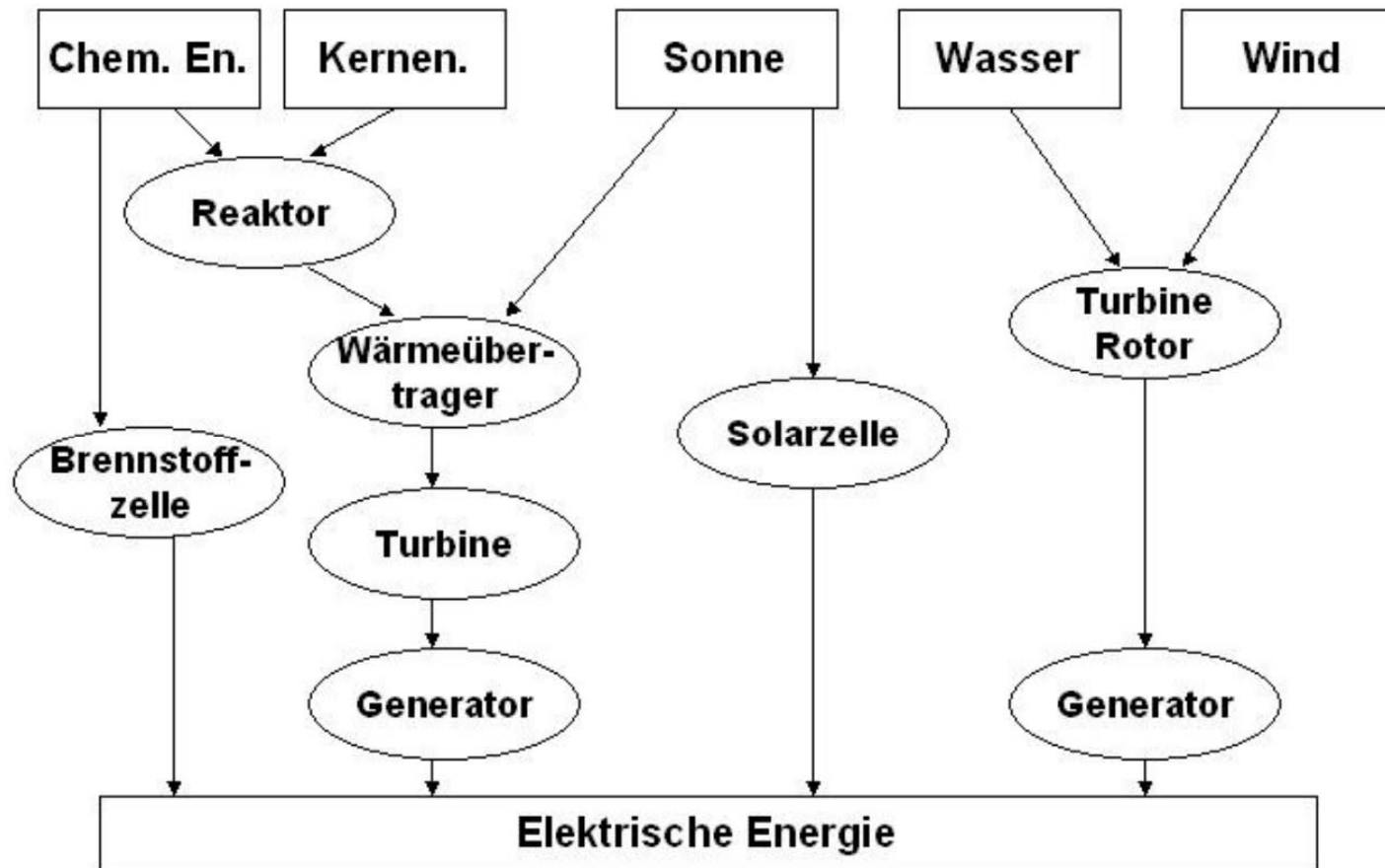
## Wandlung **W**, Speicherung **S** und Transport **T** von Energie

- **Mechanische Energie:** **W** sehr gut, **T** und **S** sehr schlecht
- **Elektrische Energie:** **W** sehr gut, **T** gut, **S** (noch!) schlecht
- **Fossile Energieträger** wie Kohle, Erdöl und Erdgas:
  - W** schlecht wegen des Carnotschen Wirkungsgrades  $1 - T(\text{ab})/T(\text{zu})$ ,
  - T** und **S** gut (Erdgas) bis sehr gut
- **Thermische Energie:** **W**, **T** und **S** schlecht



Primär- energie  Nutz- energie	Fossil				Kern- energie	Erneuerbar				
	Kohle		Erdöl	Erdgas		Sonne	Wind	Wasser	Bio- masse	Ab- fälle
	SK	BK								
Anteile D.	15	15	40	20	5	Σ 5%				
Kraftwerks- technik	x	X	x	X	X	x	X	X	X	X
Prozess- wärme	X			x						
Verkehr			X	x						
Haushalts- heizungen	x	(x)	X	X		x			(x)	(x)

## Energie: Woher und wohin?



## Umwandlungsketten von der Primärenergie zur elektrischen Energie

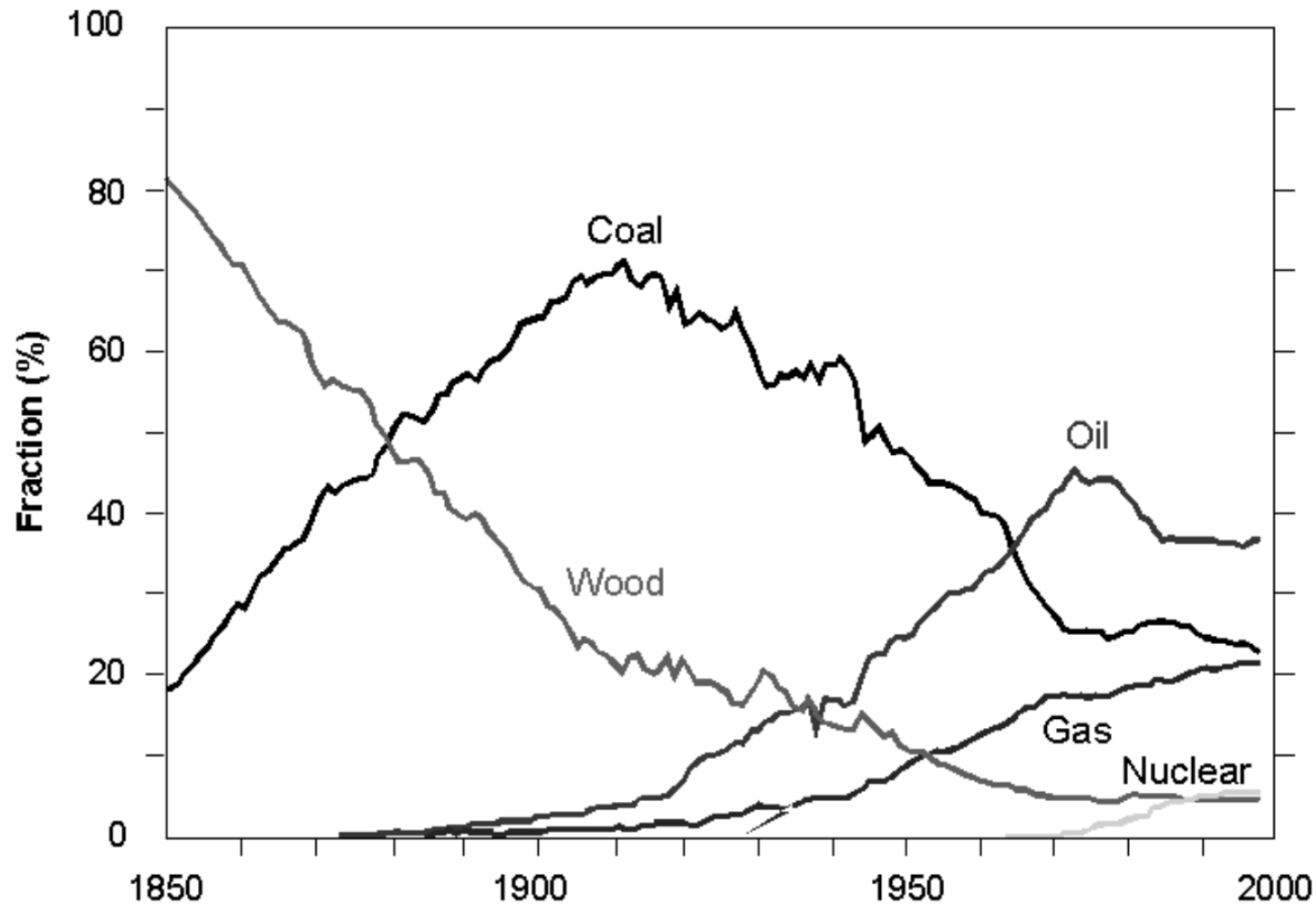


## Wirkungsgrade von Energiewandlern

5 %	Glühlampen
20 %	Solarzellen*
30 bis 40 %	Otto- und Dieselmotoren, Gasturbinen
60 %	Brennstoffzellen
70 bis 80 %	Öl- und Gasheizungen
über 90 %	Große Elektromotoren und Generatoren

\* Bei Solarzellen ist der Erntefaktor (oder die energetische Amortisationszeit) von größerer Bedeutung als der Wirkungsgrad!



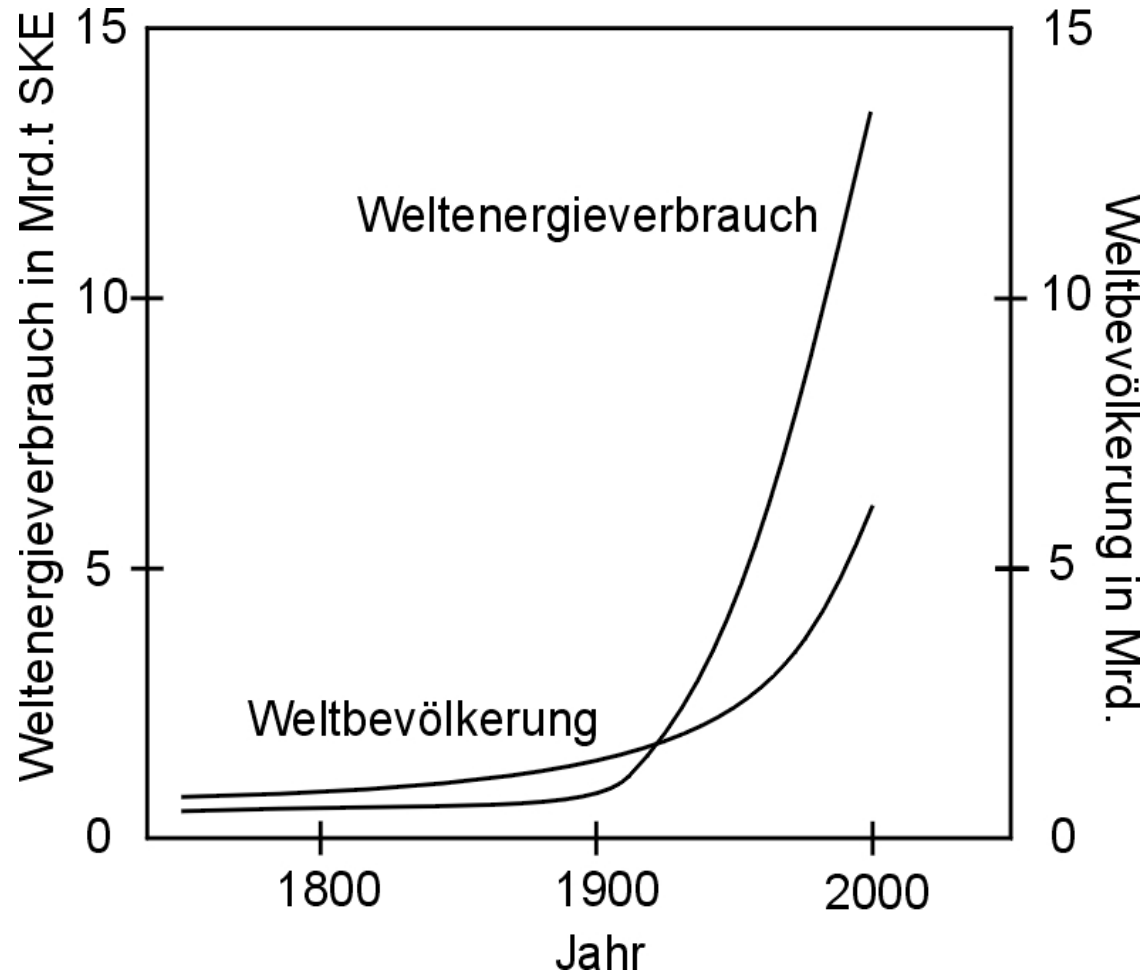


**Globale Nutzung von Energieträgern 1850 – 2000, aus (WBGU 2003)**



## Weltenergieverbrauch in Mrd. t SKE, Anteile der Energieträger nach Fischer Weltalmanach 2005 (2004)

	1970		1980		1990		2000	
	Mrd. t SKE	%	Mrd. t SKE	%	Mrd. t SKE	%	Mrd. t SKE	%
Erdöl	3,009	45,3	3,835	44,6	4,011	36,9	4,305	35,5
Kohle	2,184	32,9	2,623	30,5	3,239	29,8	3,220	26,5
Erdgas	1,293	19,5	1,836	21,4	2,563	23,6	3,261	26,9
Kernenergie	0,010	0,1	0,101	1,2	0,738	6,8	0,947	7,8
Sonstige	0,145	2,2	0,198	2,3	0,314	2,9	0,405	3,3
Summe	6,641	100	8,593	100	10,865	100	12,138	100



### Weltbevölkerung und Weltenergieverbrauch seit der industriellen Revolution



## **Der Weltenergieverbrauch nimmt stärker zu als die Weltbevölkerung!** Somit steigt der Verbrauch pro Kopf und Jahr ständig weiter an.

- Durchschnittlicher Verbrauch in t SKE pro Kopf und Jahr:  
0,60 (1900)      1,83 (1970)      2,11 (2003)
- Regionale Unterschiede (2000):  
11 USA, Kanada      15 Katar  
5 – 6 westeuropäische Industrieländer (D, F, GB)  
1,0 Brasilien, Ägypten  
0,8 China      0,6 Philippinen  
0,5 Indien      0,4 Pakistan  
0,06 Tansania    0,04 Kongo (DR)    0,01 Tschad



## Ressourcen, Reserven und Reichweiten (Lebensdauern)

- *Ressourcen* = vermutete Gesamtvorräte
- *Nachgewiesene Reserven* = Anteil der Ressourcen, der bekannt und sorgfältig untersucht ist
- *Ausbringbare Reserven* = Anteil der nachgewiesenen Reserven, der unter derzeit ökonomisch und technisch vertretbaren Bedingungen gewonnen werden kann
- **Statische Reichweite** = derzeit ausbringbare Reserven bezogen auf den derzeitiger Verbrauch; Angaben hierzu sind unstrittig:
  - Braunkohle 230 Jahre      Erdgas 75 Jahre
  - Steinkohle 200 Jahre      Erdöl 45 Jahre, jedoch 120 Jahre einschl. Teersande und Ölschiefer
- **Dynamische Reichweite** = zukünftige Reserven bezogen auf den zukünftigen Verbrauch; Angaben hierzu sind *spekulativ*



## **Energiepolitische „Verzweigungssituation“**

Charakteristische Studien/Szenarien sind:

- **Enquete-Kommission „Zukünftige Kernenergiepolitik“**  
des 8. Deutschen Bundestages (1980)
- **Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderungen:**  
„Welt im Wandel; Energiewende zur Nachhaltigkeit“ (**WBGU** 2003)
- **World Energy Council (WEC)**
  - „Energy for Tomorrows World“ (WEC 1993)
  - 19. Weltenergiekongress in Sydney Sept. 2004



## Enquete-Kommission „Zukünftige Kernenergiepolitik“ (1980)

Zwei Referenzfälle wurden untersucht; *Kriterien* waren *Wirtschaftlichkeit, internationale Verträglichkeit, Umweltverträglichkeit, Sozialverträglichkeit*

### K-Pfad

K = **Kernenergie**

Zentrale Lösung

### S-Pfad

S = **Solarenergie und Sparen**

Zentrale *und* dezentrale Lösungen

**Fazit:** Beide Pfade sind technisch und ökonomisch machbar. Die Gesamtkosten unterscheiden sich nicht wesentlich voneinander. Sie betreffen:

Ver- und Entsorgungsseite

Hohe Sicherheitsanforderungen

Herstellungs- u. Anwendungsseite

Hoher Flächenbedarf

**Folgerung:** Der Ausstieg aus der Kernenergie ist möglich



## Welt im Wandel; Energiewende zur Nachhaltigkeit (WBGU 2003)

**Globale Energiewende** aus zwei Gründen unerlässlich:

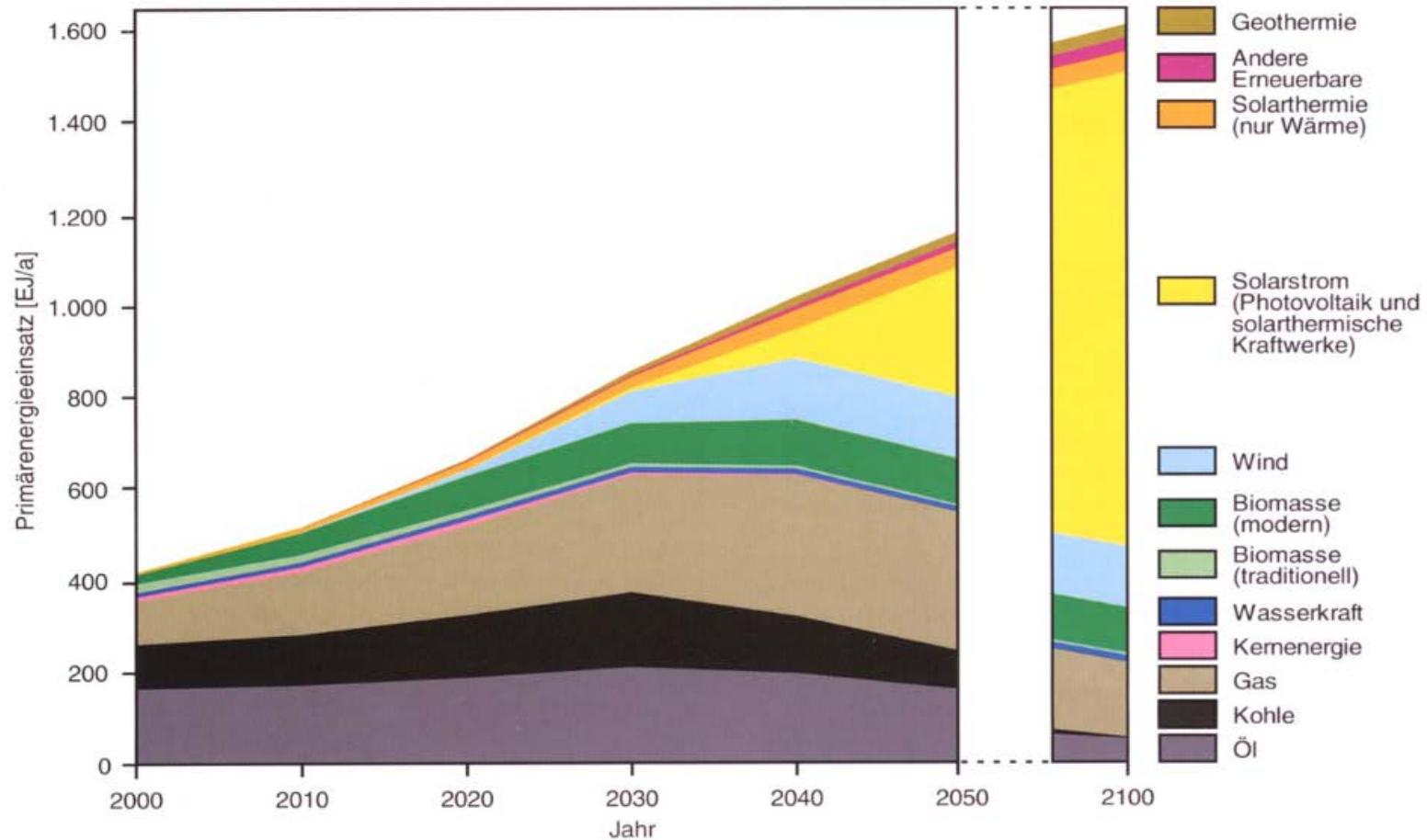
- Schutz der natürlichen Lebensgrundlagen
- Beseitigung der Energiearmut in den Entwicklungsländern

**WBGU-Pfad** hat vier zentrale Bestandteile:

1. Starke Minderung der Nutzung fossiler Energieträger
2. **Auslaufende Nutzung nuklearer Energieträger**
3. Erheblicher Auf- und Ausbau neuer **erneuerbarer Energieträger**, insbesondere der **Solarenergie**
4. Steigerung der Energieproduktivität weit über historische Raten hinaus

Der **WEC (World Energy Council)** geht im Gegensatz dazu davon aus, dass **die Nutzung der Kernenergie zunehmen wird.**





**Abbildung 1**

Die Veränderung des globalen Energiemix im exemplarischen Pfad bis 2050/2100.

Quelle: WBGU

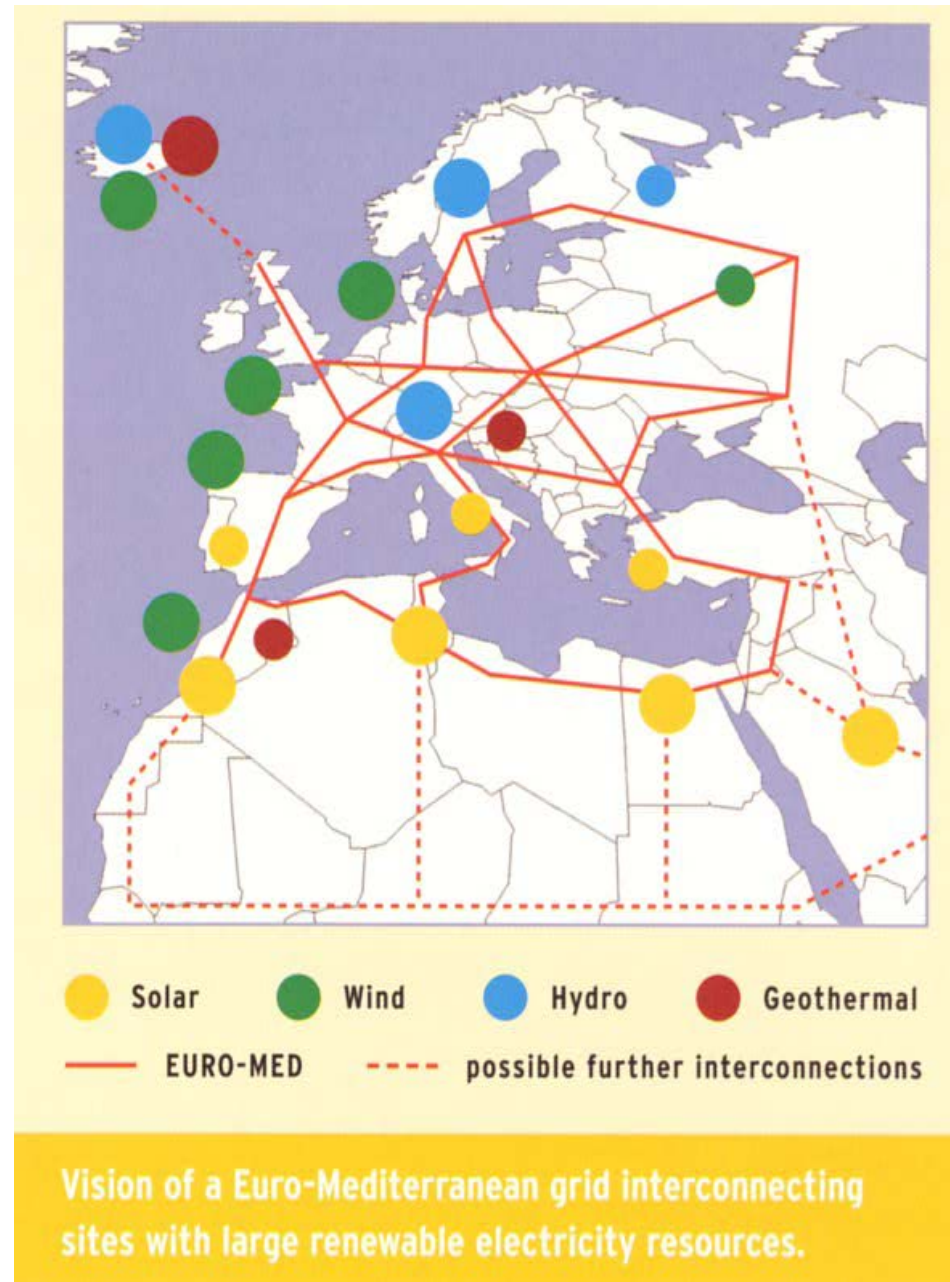
WBGU (2003) Welt im Wandel; Energiewende zur Nachhaltigkeit

400 EJ (Exa =  $10^{18}$ )  $\approx$  13,5 Mrd. t SKE  $\approx$  9,5 Mrd. t RÖE



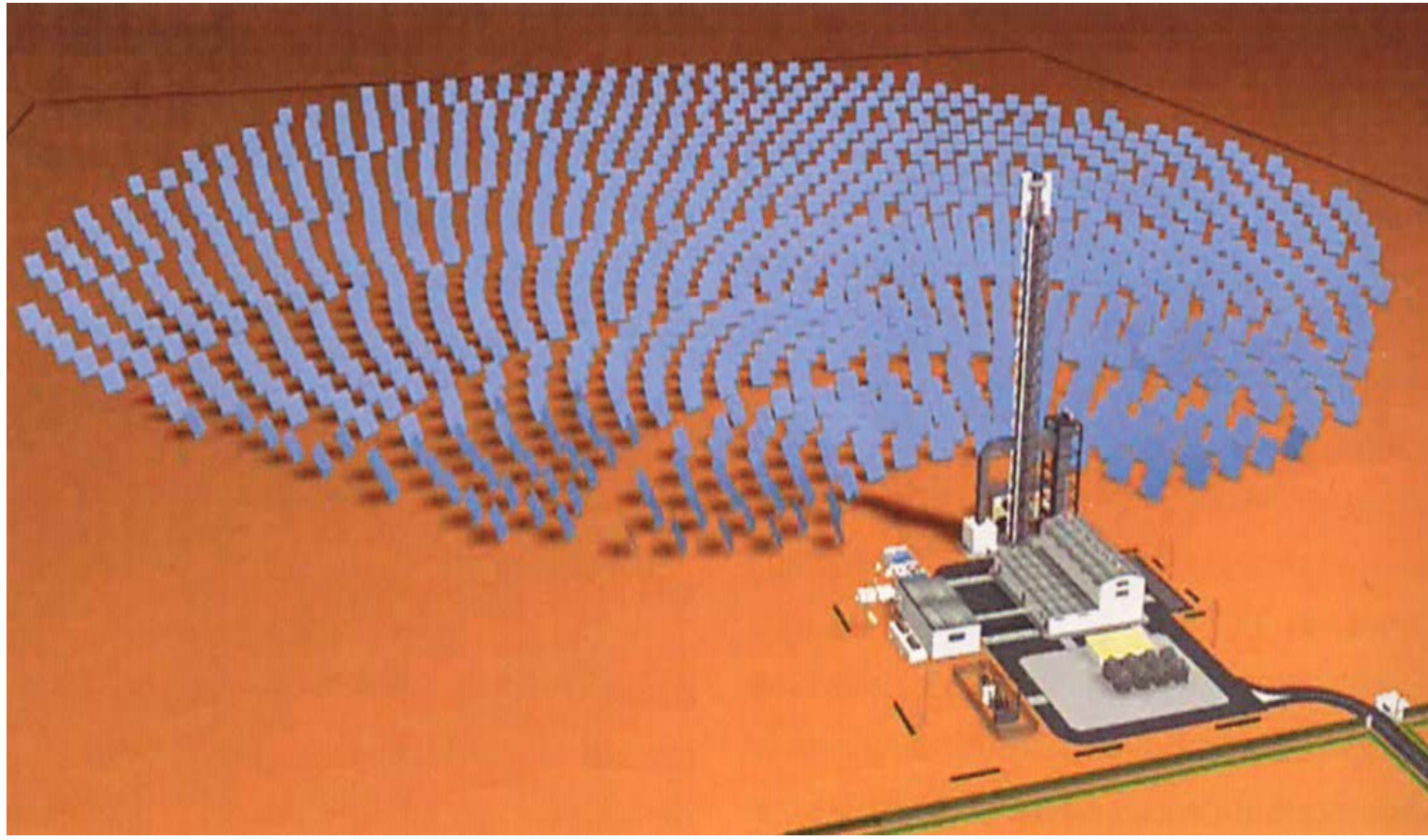
DLR (2002) Concentrating Solar Power (CSP) now

DLR = Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

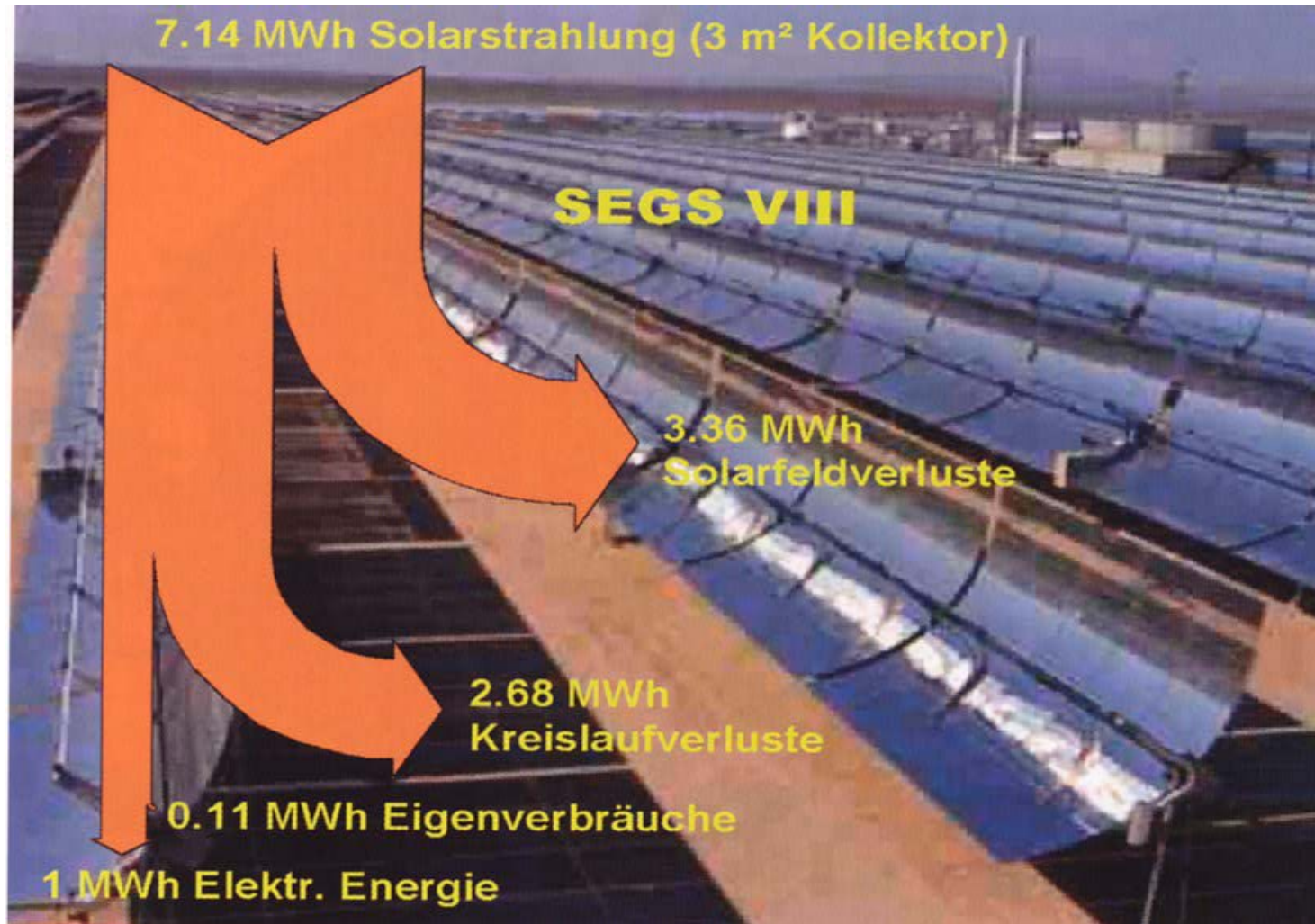




FVS 2002: DISS (Direct Solar Steam) Parabolrinnenstrang zur Direktverdampfung in Spanien  
FVS = ForschungsVerbund Sonnenenergie



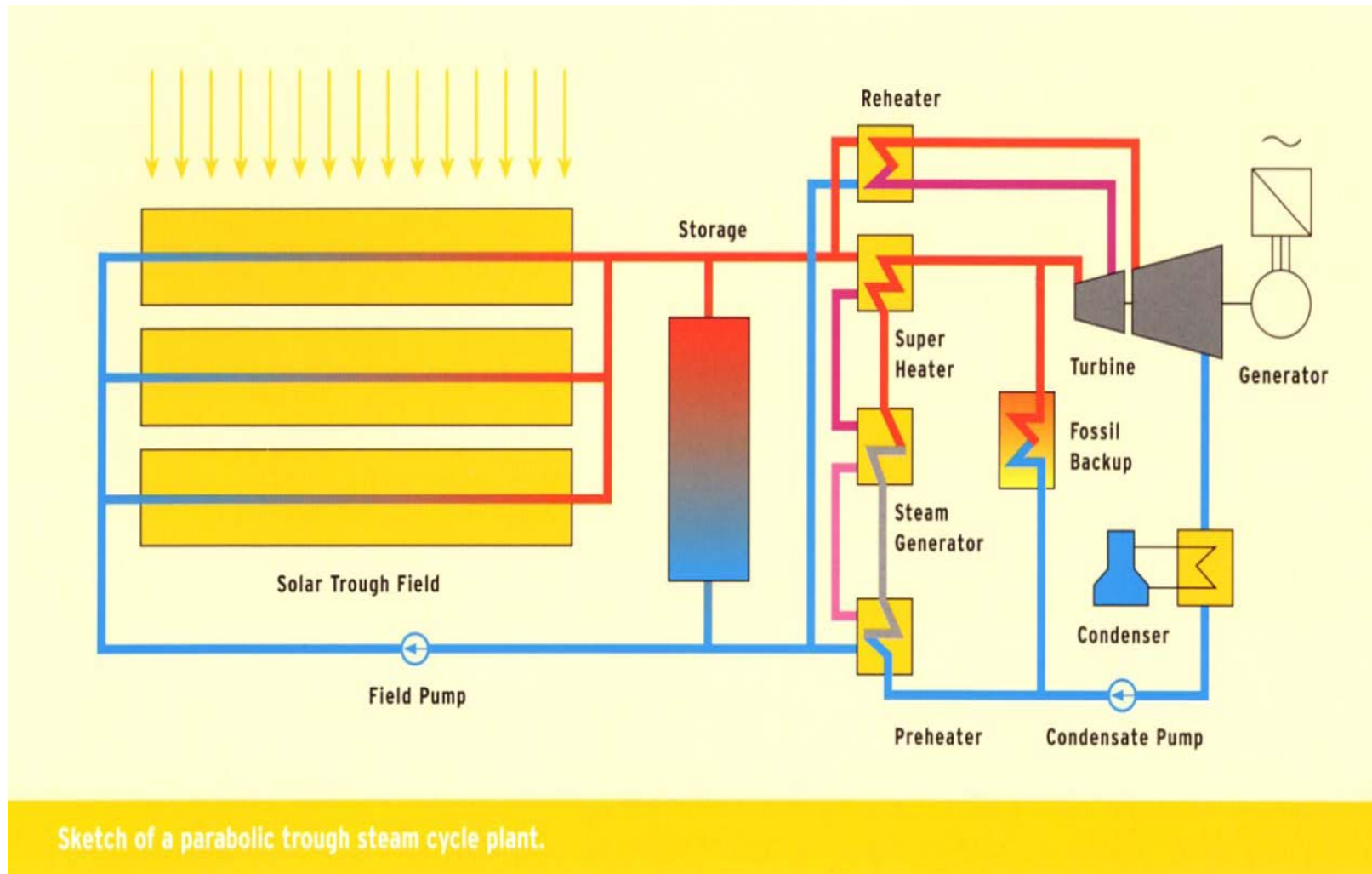
FVS 2002: Fotoanimation eines geplanten 10 MW Solarturmkraftwerks in Spanien



FVS 2002: Jahresertrag eines SEGS-Kraftwerks (Solar Electric Generating System)



FVS 2002: Jahresertrag eines Solarturm-Kraftwerks mit Luftrezeivertechnik



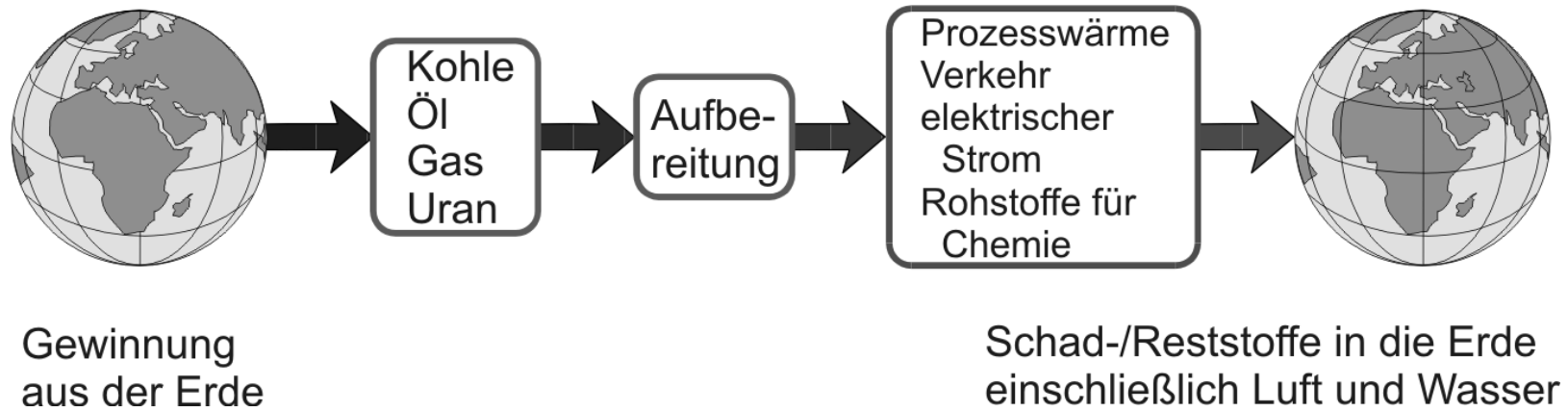
DLR (2002) Concentrating Solar Power now



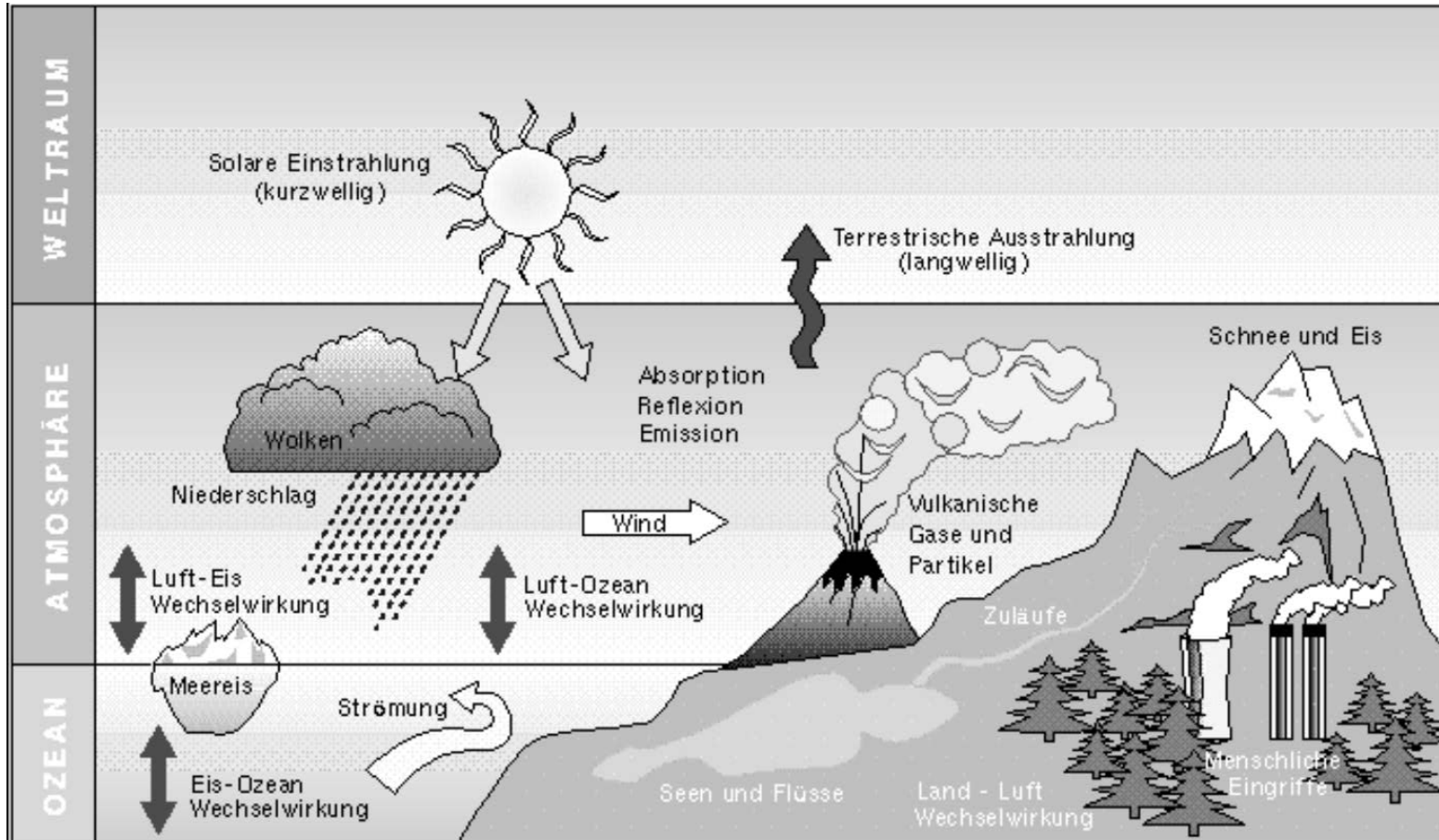
Abbildung 3  
Kirche Schönau mit  
50 kW<sub>p</sub>-PV-Anlage

FVS 2002

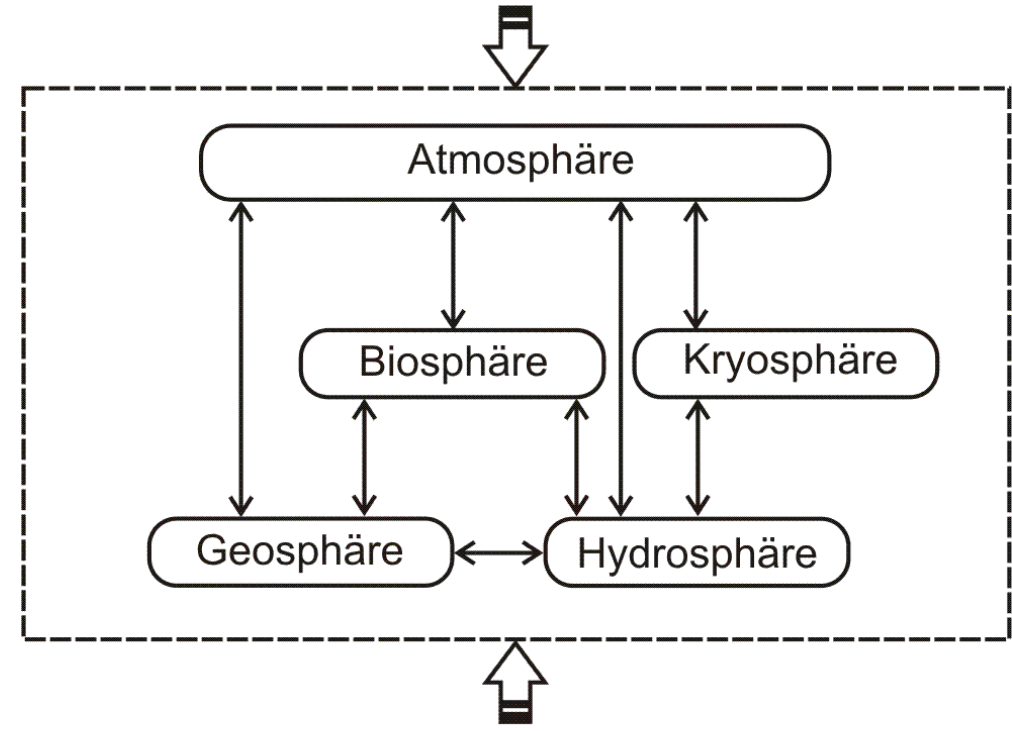




## Heutige Energieversorgung



**Unser Klimasystem, aus [www.dlr.de/ipa/](http://www.dlr.de/ipa/)**



↔ Energie- und Stoffkreisläufe  
↑ Externe Vorgänge (Sonnenstrahlung, kosmische Strahlung, Vulkanausbrüche)

## Ökosystem Erde mit seinen Wechselwirkungen



## **Natürlicher Treibhauseffekt**

- Ohne Atmosphäre würde sich eine mittlere Temperatur von  $-18\text{ °C}$  an der Erdoberfläche einstellen
- Durch die Filterwirkung der Atmosphäre beträgt die mittlere Temperatur auf der Erde (lebensfreundliche)  $15\text{ °C}$  (= 288 K)
- Der Erwärmungseffekt der in der Atmosphäre vorhandenen Treibhausgase liegt somit bei 33 Grad

## **Anthropogener Treibhauseffekt**

- Die Konzentration des klimawirksamen Treibhausgases Kohlendioxid hat seit der Industrialisierung deutlich zugenommen
- Dadurch hat sich in den letzten 100 Jahren die mittlere Temperatur der Atmosphäre um etwa 0,7 Grad erhöht



## Klimamodelle und Prognosen

- Zustandsgrößen im Klimageschehen sind Druck, Temperatur, Dichte, Feuchte und Zusammensetzung der Luft sowie Windgeschwindigkeit
- Deren zeitliche und räumliche Veränderungen werden durch Bilanzgleichungen, ergänzt durch thermodynamische Relationen und reaktionskinetische Ansätze, beschrieben
- Damit steht ein System von gekoppelten, nichtlinearen, partiellen Differenzialgleichungen zweiter Ordnung zur Verfügung, das nur numerisch gelöst werden kann
- Hierarchie der Modellgleichungen: vom einfachen Energiebilanzmodells bis zu dreidimensionalen Zirkulationsmodellen
- Probleme in den Modellen: Atmosphäre – Ozean - (Eis-) Modelle mit stark unterschiedlichen Zeitskalen; unklare Rückkopplungs-Mechanismen; noch unverstandene Effekte wie das El-Nino-Phänomen; stark eingeschränktes Auflösungsvermögen



## Modellrechnungen zur *Kohlendioxid-Verdopplungsstudie*

Dabei wird eine Zunahme von 300 auf 600 ppm CO<sub>2</sub> angenommen; die wesentlichen **Resultate** lauten:

- Die globale Mitteltemperatur steigt um 1,5 bis 4,5 Grad
- In polaren Gebieten findet eine stärkere Erwärmung statt (positive Rückkopplung), da wegen Schrumpfung der Eisgebiete die Rückstreuung vermindert wird
- In Äquatornähe wird die Erwärmung geringer sein, da mit zunehmender Temperatur die Verdunstung einen Teil der Energie verbraucht (negative Rückkopplung)
- Zunahme der Niederschläge, da mit steigender Temperatur die Verdunstung ansteigt
- Anstieg des Meeresspiegels durch thermische Ausdehnung des Wassers

**Fazit:** Sämtliche Beobachtungen bestätigen qualitativ die „Prognosen“ (besser Szenarien) der Modellrechnungen

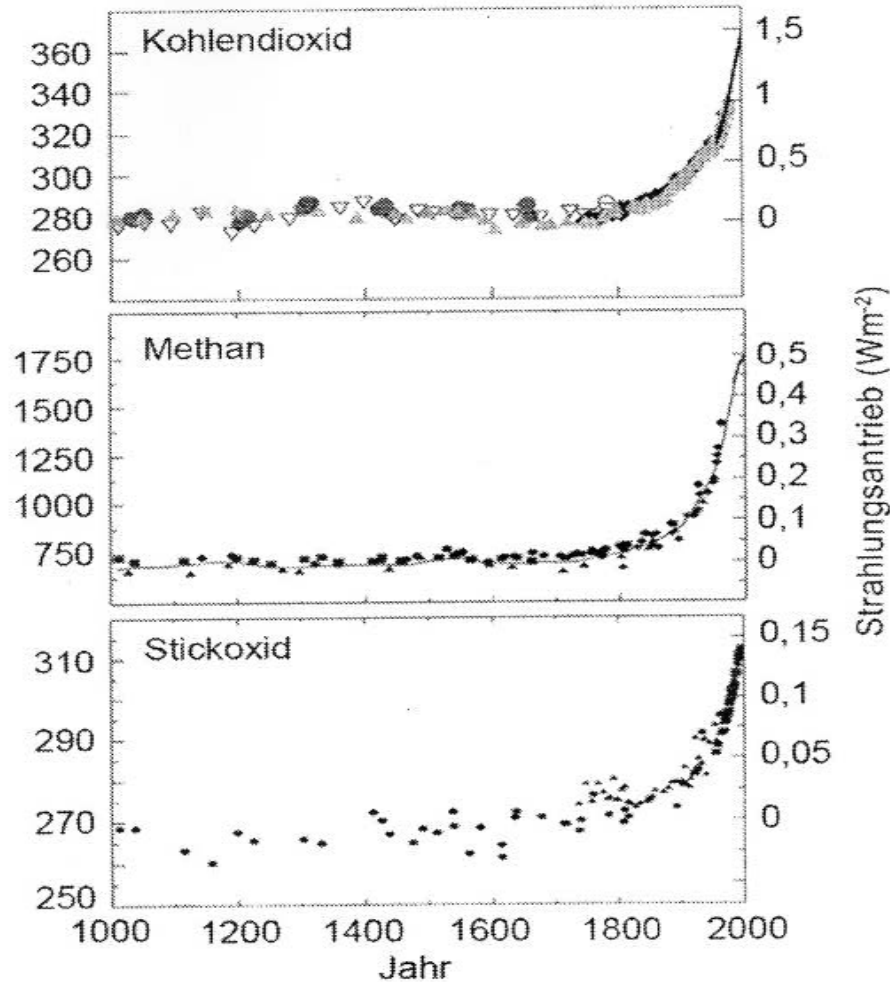


Abb. 2.2: Die Entwicklung der Konzentration wichtiger Treibhausgase in der Atmosphäre über die abgelaufenen tausend Jahre. Linke Skala: Konzentration in Teilen pro Million (ppmv, für  $\text{CO}_2$ ) bzw. pro Milliarde (ppbv, für Methan und Stickoxid). Rechte Skala: der dadurch verursachte zusätzliche Treibhauseffekt in  $\text{Watt/m}^2$ . (Quelle: IPCC<sup>37</sup>)

Aus Rahmstorf u. Schellnhuber (2006): Der Klimawandel

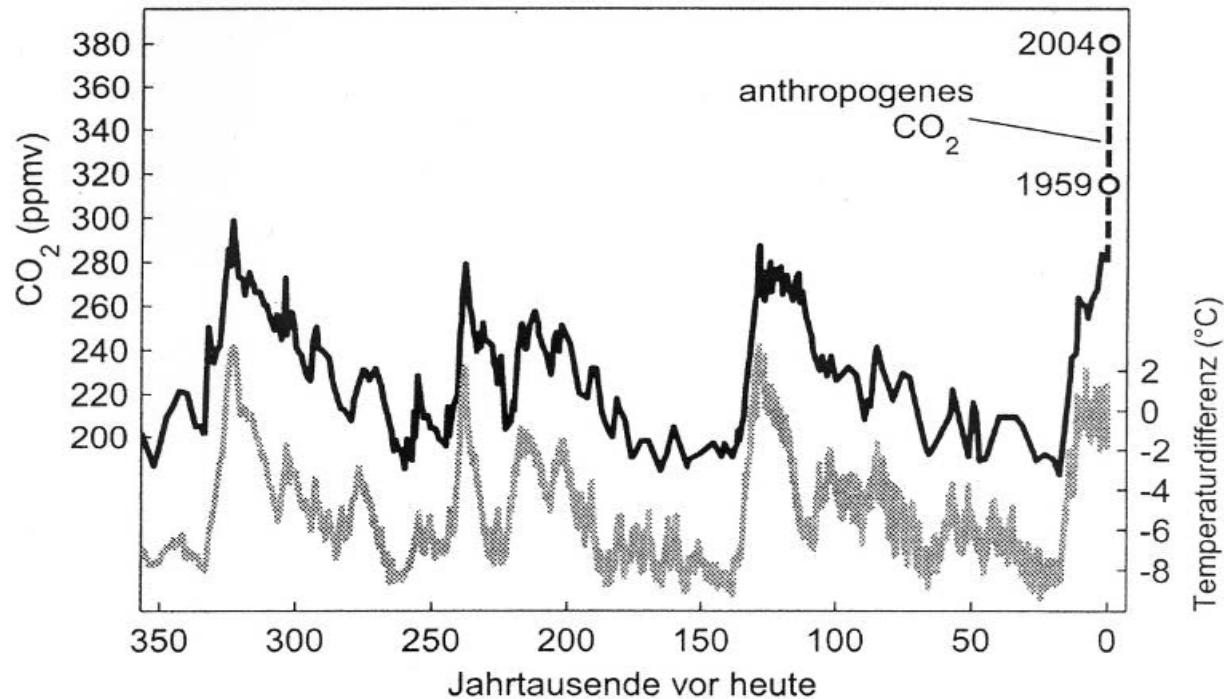


Abb. I.1: Verlauf der Temperatur in der Antarktis (graue Kurve, Änderung relativ zu heute) und der CO<sub>2</sub>-Konzentration der Atmosphäre (schwarze Kurve) über die abgelaufenen 350 000 Jahre aus dem Wostok-Eiskern.<sup>7</sup> Man erkennt drei Eiszeitzyklen. Am Ende ist der vom Menschen verursachte Anstieg des CO<sub>2</sub> gezeigt.

Aus Rahmstorf u. Schellnhuber (2006): Der Klimawandel

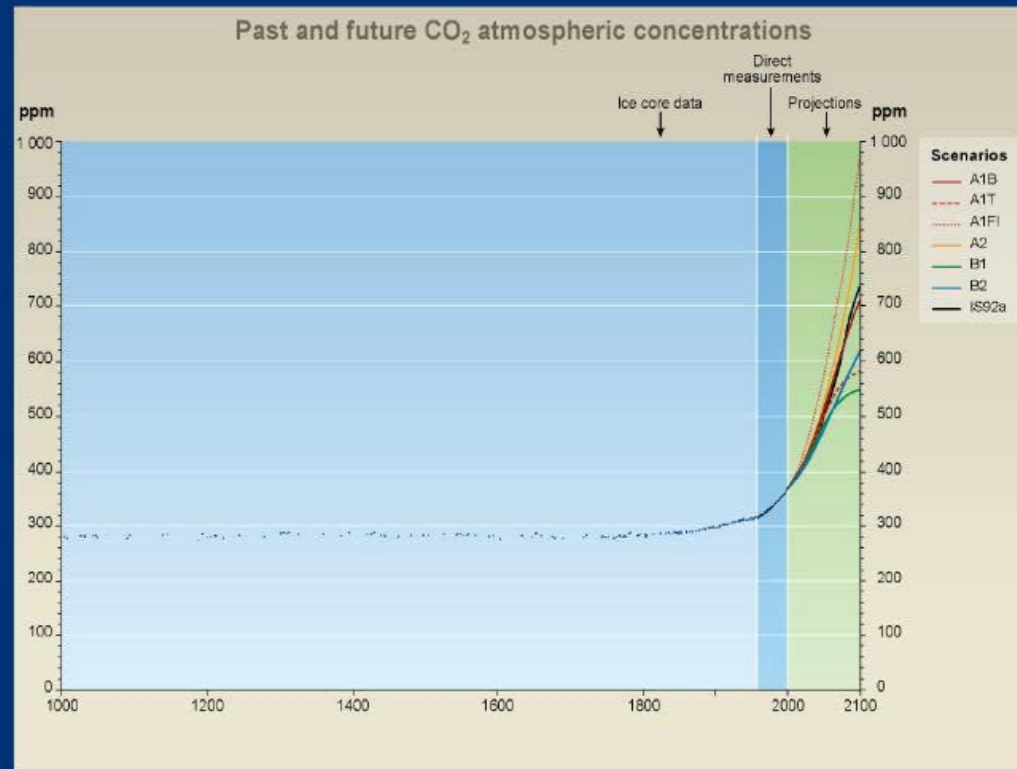




**Zukunftsszenarien des IPCC für 2001 bis 2100**, basierend auf unterschiedlichen Annahmen über den demographischen, gesellschaftlichen, wirtschaftlichen und technologischen Wandel

- **A1**: Rasches Wirtschaftswachstum und schnelle Einführung neuer und effizienterer Technologien; *Unterszenarien* betreffen den Energiemix:  
**A1 FI**: vorw. fossile; **A1 T** vorw. regenerative Energieträger;  
**A1 B**: Mix fossiler und regenerativer Energieträger
- **A2**: Heterogene Welt mit einem Schwerpunkt auf traditionelle Werte; fragmentierter und langsamer technologischer Wandel
- **B1**: Ähnlich wie Szenario A1, jedoch rascher Übergang zur Dienstleistungs- und Informationsgesellschaft; saubere und sparsame Technologien setzen sich durch; Leitbild Nachhaltigkeit wird umgesetzt
- **B2**: Setzt auf Nachhaltigkeit wie B1, Schwerpunkt liegt auf lokalen Lösungen wie bei A2
- Vergleichsszenario **IS 92a** (1992): „Weiter wie bisher“

**Fazit** bezüglich der Änderungen von CO<sub>2</sub>-Konz., Temperatur, Meeresspiegel:  
**Größte Anstiege bei A1 FI, geringste Anstiege bei B1**

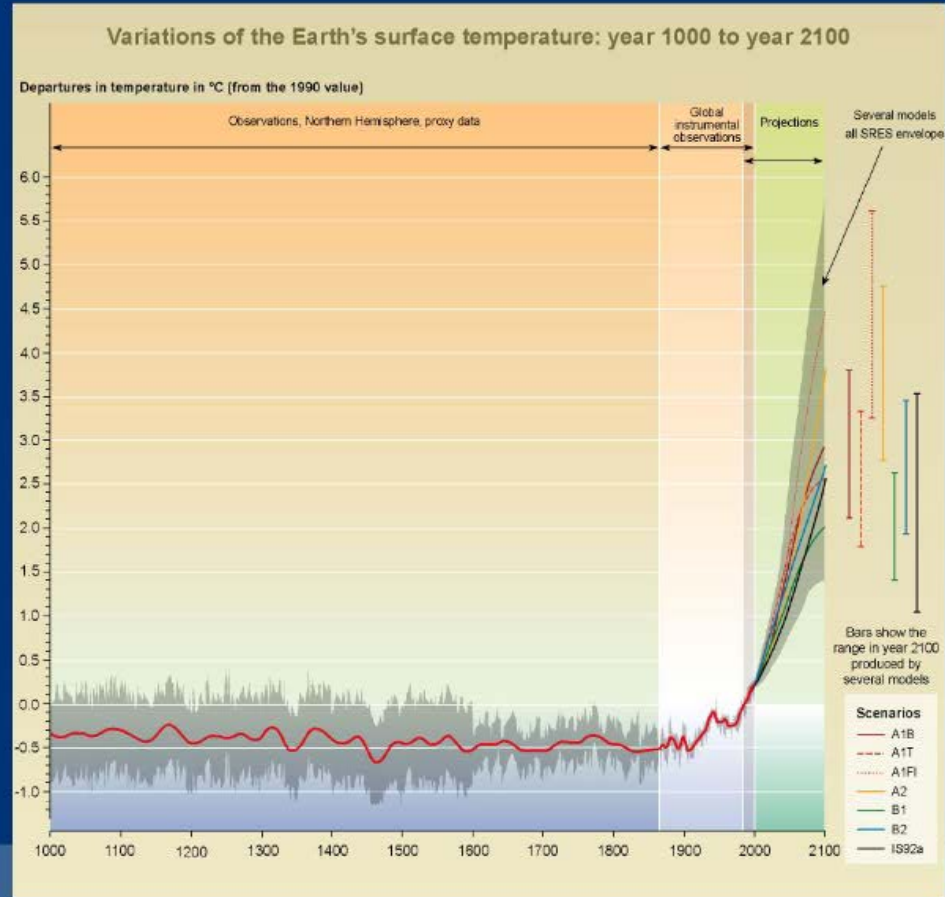


SYR - FIGURE 9-1a

IPCC

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE





SYR - FIGURE 9-1b

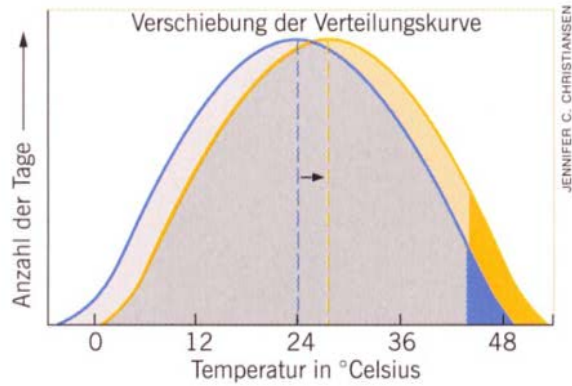
IPCC

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE





## KLIMAFORSCHUNG



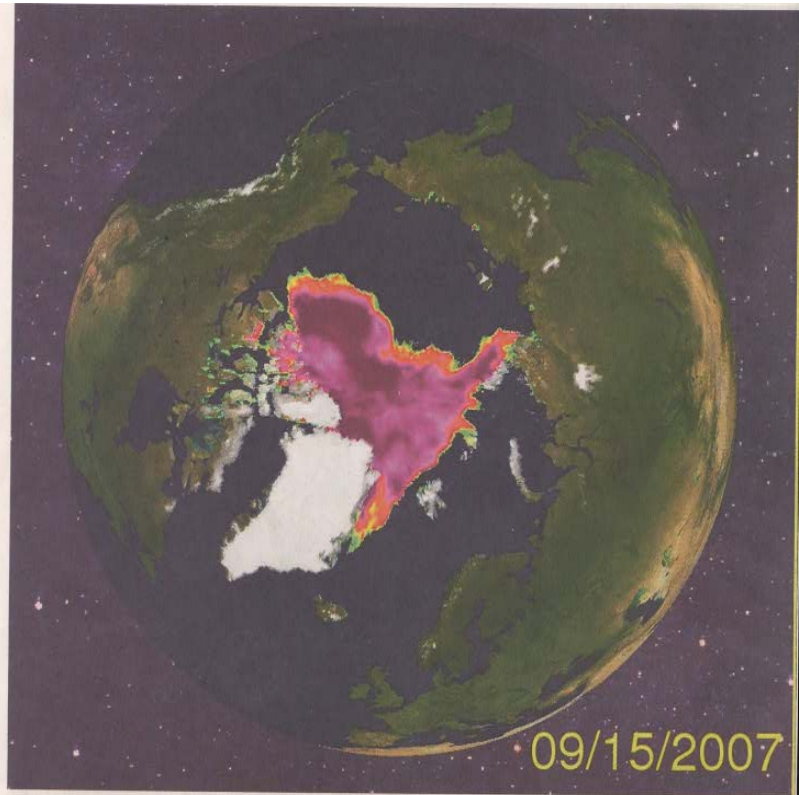
Schon bei kleinen Änderungen in der am häufigsten auftretenden Tageshöchsttemperatur steigt aus statistischen Gründen die Zahl der extrem heißen Tage unverhältnismäßig stark an. Der Grund ist, daß die Temperatur näherungsweise einer Gaußschen Normalverteilung folgt. Wenn der oberste Punkt der Glockenkurve nach rechts wandert, nimmt die Wahrscheinlichkeit dafür, daß sehr hohe Temperaturschwellenwerte überschritten werden, relativ stark zu (orangefarbene Fläche). Die Folge sind häufigere Hitzewellen, die zu Dürren führen können.

Spektrum der Wissenschaft Dossier 1/2002 Klima



GEO Special Nr. 2, 1982  
Wetter



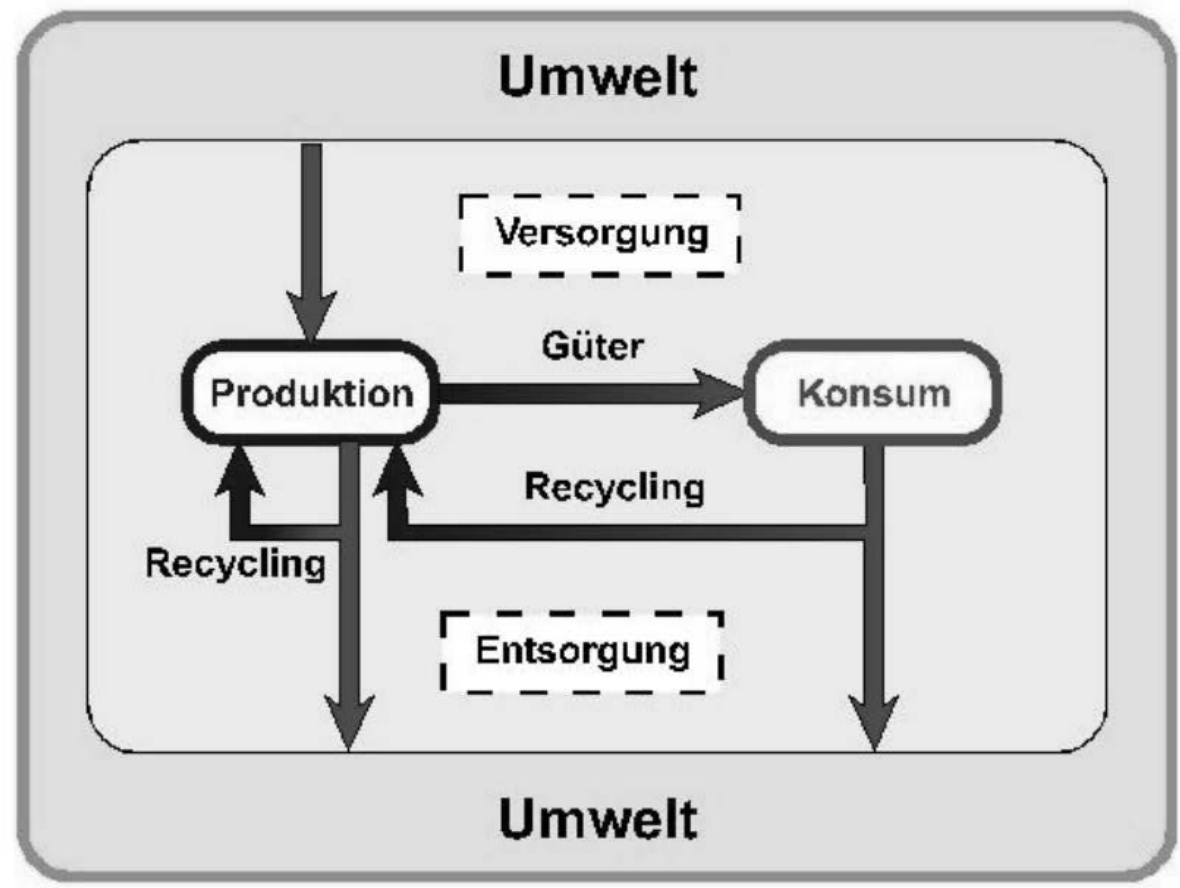


Der Tag, an dem sich der sagenumwobene Seeweg zwischen dem Nordatlantik und dem Nordpazifik öffnete: Erstmals seit Mensch zeigen das Meeres (rosa-violett) an jenem Tag und zum Vergleich die aktuelle Eisausdehnung. Auf dem historischen Tiefstand betrug



ngedenken war die Nordwestpassage am 15. September nachweislich eisfrei. Die beiden von Satellitendaten gespeisten Computerbilder die Eisfläche rund 4,3 Millionen Quadratkilometer – 50 Prozent weniger als vor fünfzig Jahren. Foto William Chapman / University of Illinois

FAZ 28. Dez. 2007



### Unsere Zivilisationsmaschine



Erforderlich ist eine Doppelstrategie:

- *Anpassung an den Klimawandel*, um das **Unvermeidbare zu beherrschen** und
- *Verminderung der Emissionen*, um das **Unbeherrschbare zu vermeiden**

H. J. Schellnhuber, Potsdam-Institut für  
Klimafolgenforschung (PIK)

siehe auch FAZ 2.3.2007, Feuilleton S. 37-43





## Literatureempfehlungen zum Thema Energie

Häfele W (Hrsg) (1990) *Energiesysteme im Übergang*. Poller, Landsberg/Lech

Heinloth K (2003) *Die Energiefrage*. 2. Aufl. Vieweg, Braunschweig

Hennicke P, Müller M (2005) *Weltmacht Energie*. Hirzel, Stuttgart

Michaelis H, Salander C (Hrsg) (1995) *Handbuch Kernenergie. Kompendium der Energiewirtschaft und Energiepolitik*. 4. Aufl. VWEW-Verlag, Frankfurt/Main

Nakicenovic N, Grübler A, McDonald A (Eds) (1998) *Global Energy Perspectives*. Cambridge Univ. Press, Cambridge

Scheer H (1999) *Solare Weltwirtschaft*. Kunstmann, München

Wagner H-J (2007) *Was sind die Energien des 21. Jahrhunderts?* Fischer, Frankfurt/Main

WBGU Gutachten *Welt im Wandel* (2003) *Energiewende zur Nachhaltigkeit*.



## Literaturempfehlungen zum Thema Klima

Al Gore (2006) *Eine unbequeme Wahrheit*. Riemann, München

Flannery T (2006) *Wir Wettermacher*. Fischer, Frankfurt/Main

Graßl H, Klingholz R (1990) *Wir Klimamacher*. Fischer, Frankfurt/Main

Latif M (2007) *Bringen wir das Klima aus dem Takt?* Fischer, Frankfurt/Main

Rahmstorf S, Schellnhuber HJ (2006) *Der Klimawandel*. Beck, München

Müller M u. a. (Hrsg) (2007) *Der UN-Weltklimareport*. KiWi, Köln

WBGU Sondergutachten (2003) *Über Kyoto hinaus denken – Klimaschutzstrategien für das 21. Jahrhundert*

WBGU Gutachten *Welt im Wandel* (2007) *Sicherheitsrisiko Klimawandel*

## Literatur des Vortragenden

Jischa MF (2004) *Ingenieurwissenschaften*. Reihe *Studium der Umweltwissenschaften*. Springer, Berlin (Buch zum „Jahr der Technik 2004“)

**Jischa MF (2005) *Herausforderung Zukunft – Technischer Fortschritt und Globalisierung*. 2. Aufl. Spektrum Akad. Verlag, Heidelberg**