Energie , eine Herausforderung für die Zukunft

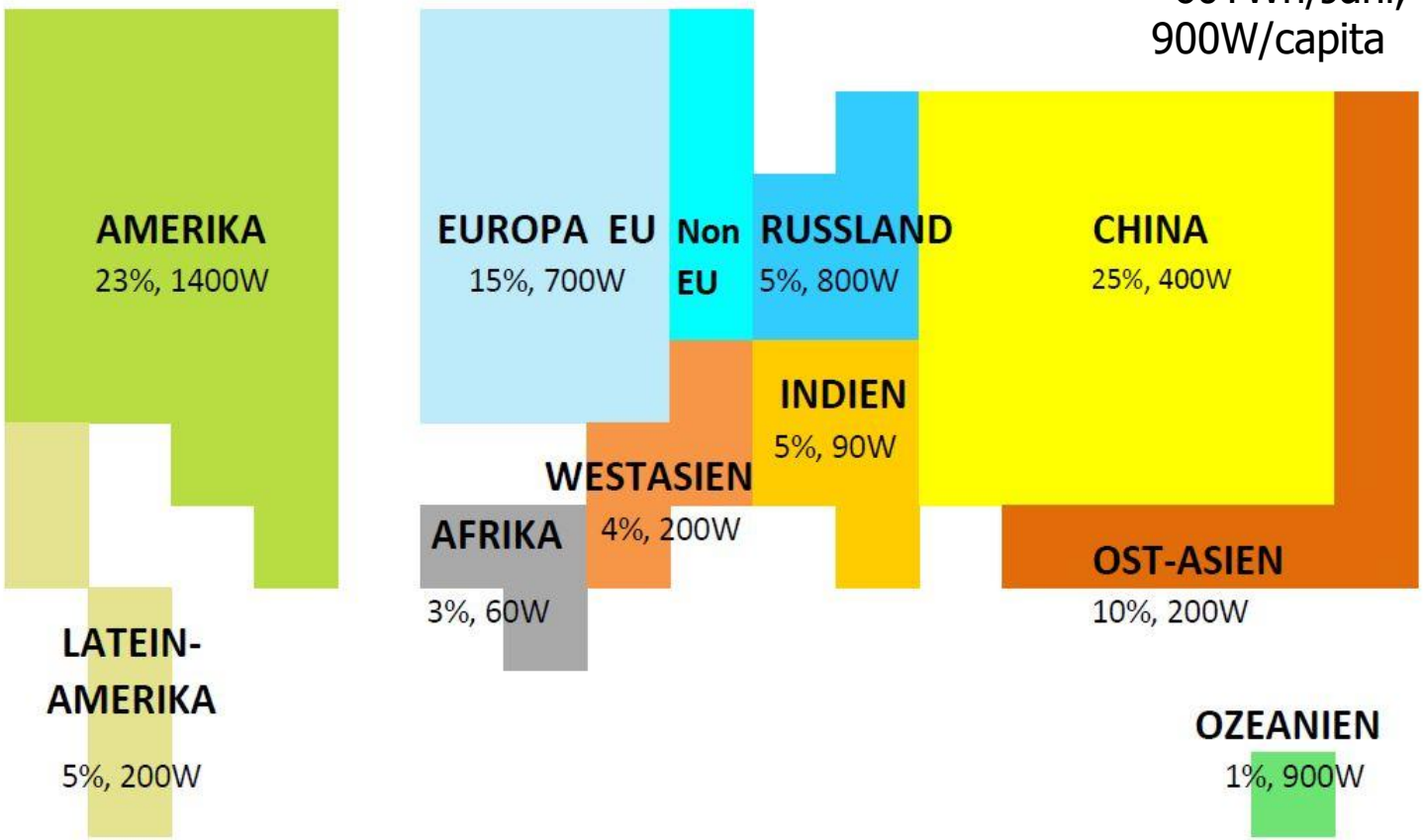
Werner Joho (ehemals PSI)

Weltkarte nach Stromverbrauch

+mittlerer Verbrauch per capita (400W weltweit)

1 Quadrat =1%
= 250TWh/Jahr

Schweiz: 0.24%
= 60TWh/Jahr,
900W/capita



Themen

- 3 Varianten für eine Weltkarte , Energieverbrauch
- Energieforschung am PSI
- Wasserstoff-Auto, Brennstoffzellen
- Photovoltaik
- Windanlagen
- Geothermie
- Energieprognose Schweiz
- Kernenergie
- Klimawandel

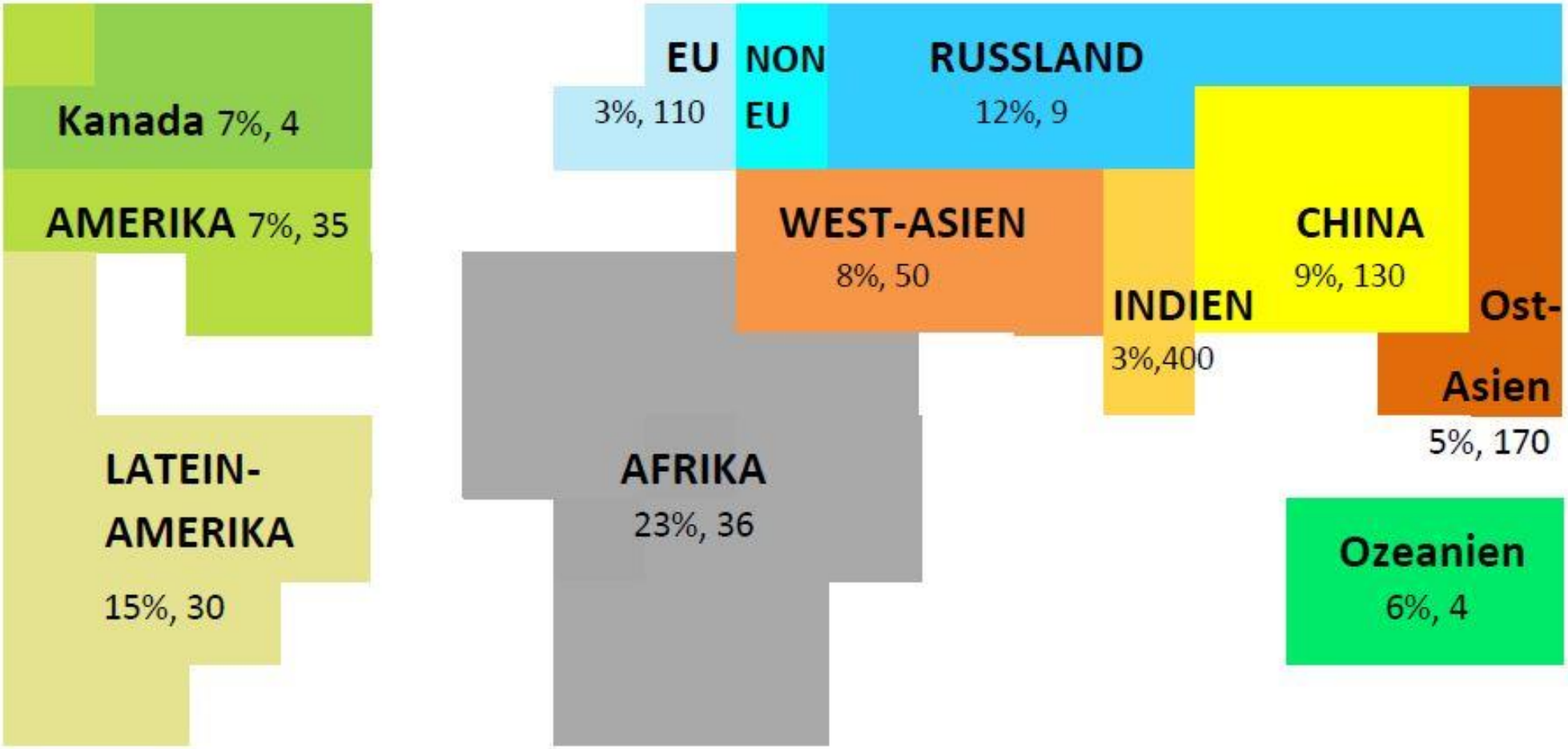
Weltkarte nach Fläche

(ohne Antartica, Grönland)

und Personendichte (pro km²)

1 Quadrat =1%
= 1.3 Mill. km²

Schweiz: 0.03%
= 0.041 Mill. km²

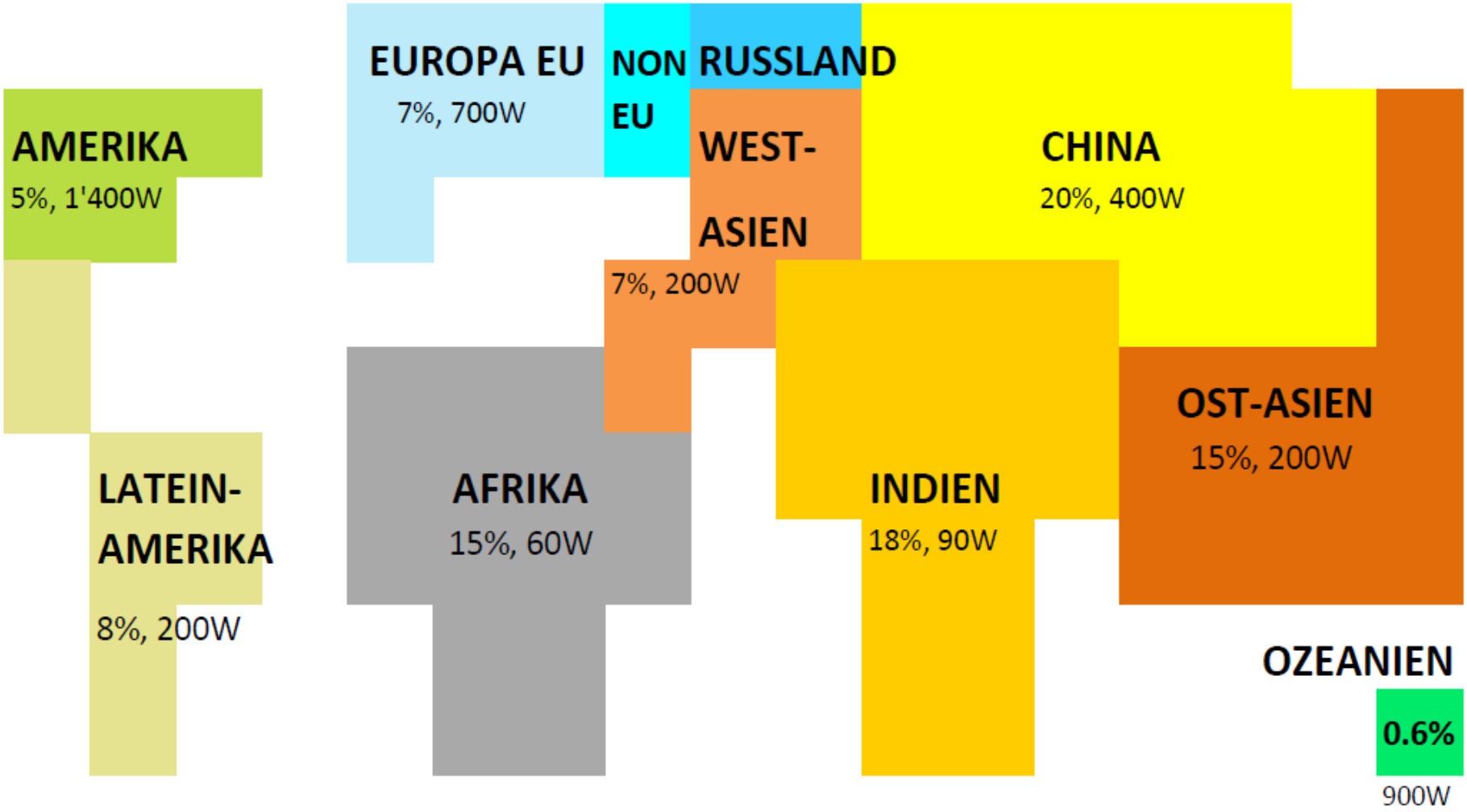


Weltkarte nach Bevölkerung

(+mittlerer Stromverbrauch per capita)

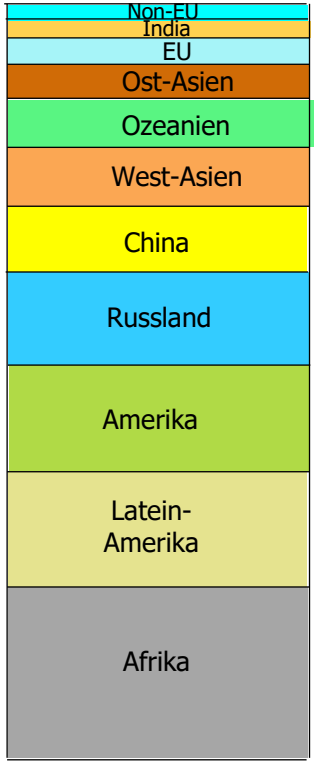
1 Quadrat =1%
= 70 Mill. Einw.

Schweiz: 0.1%
= 8 Mill. Einw.

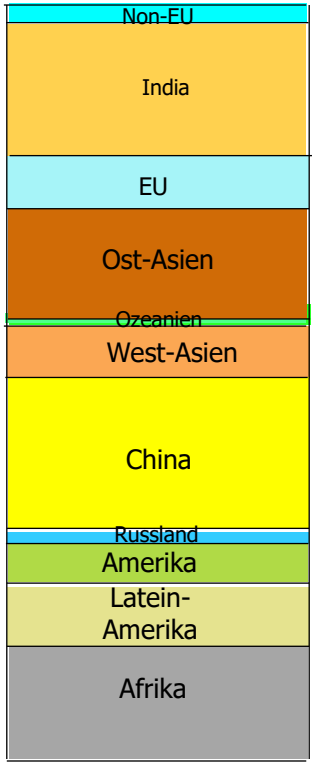


Fläche , Bevölkerung, Elektrizität

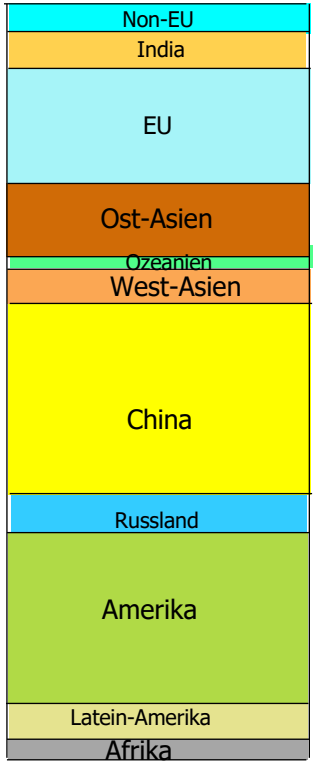
Fläche



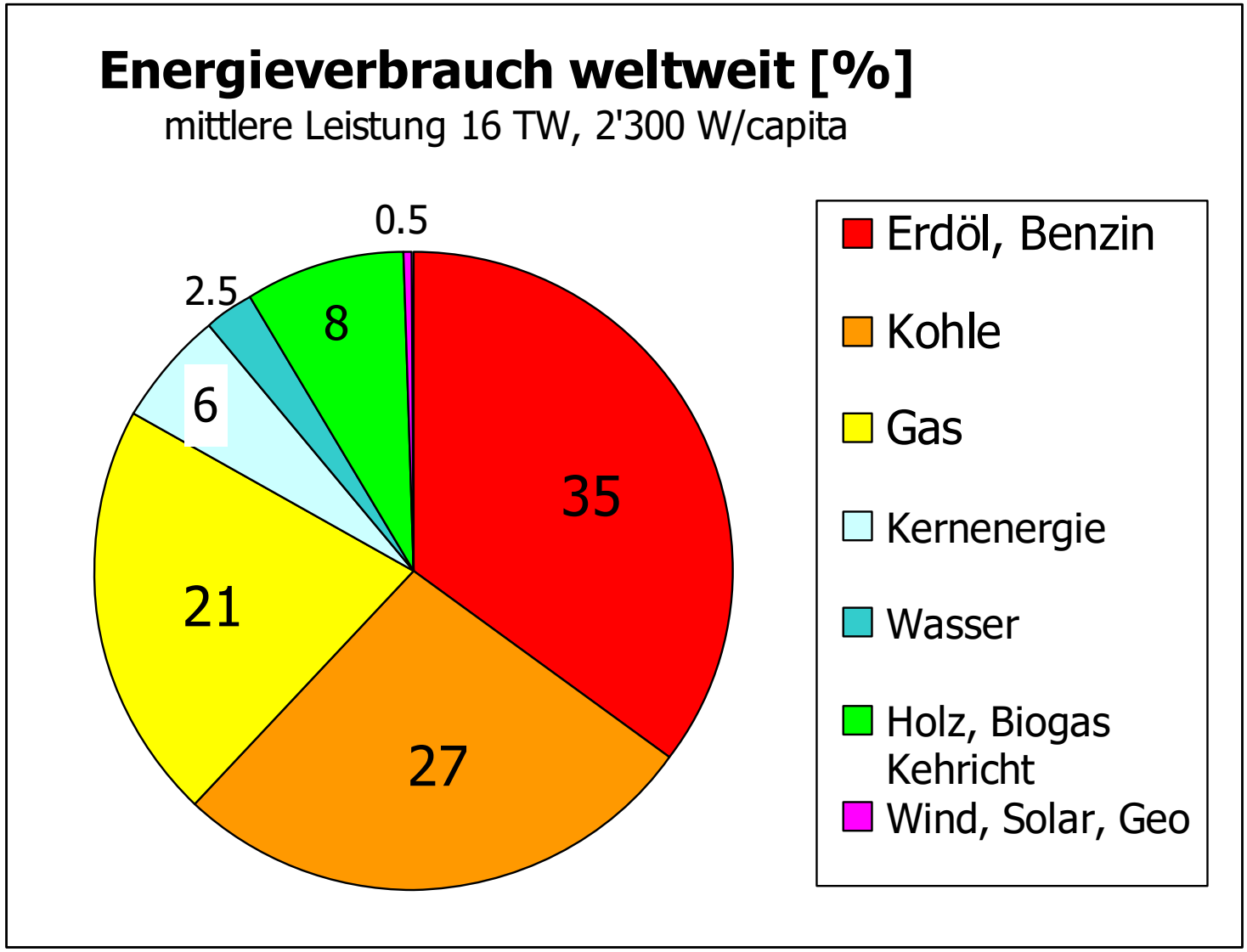
Bevölkerung



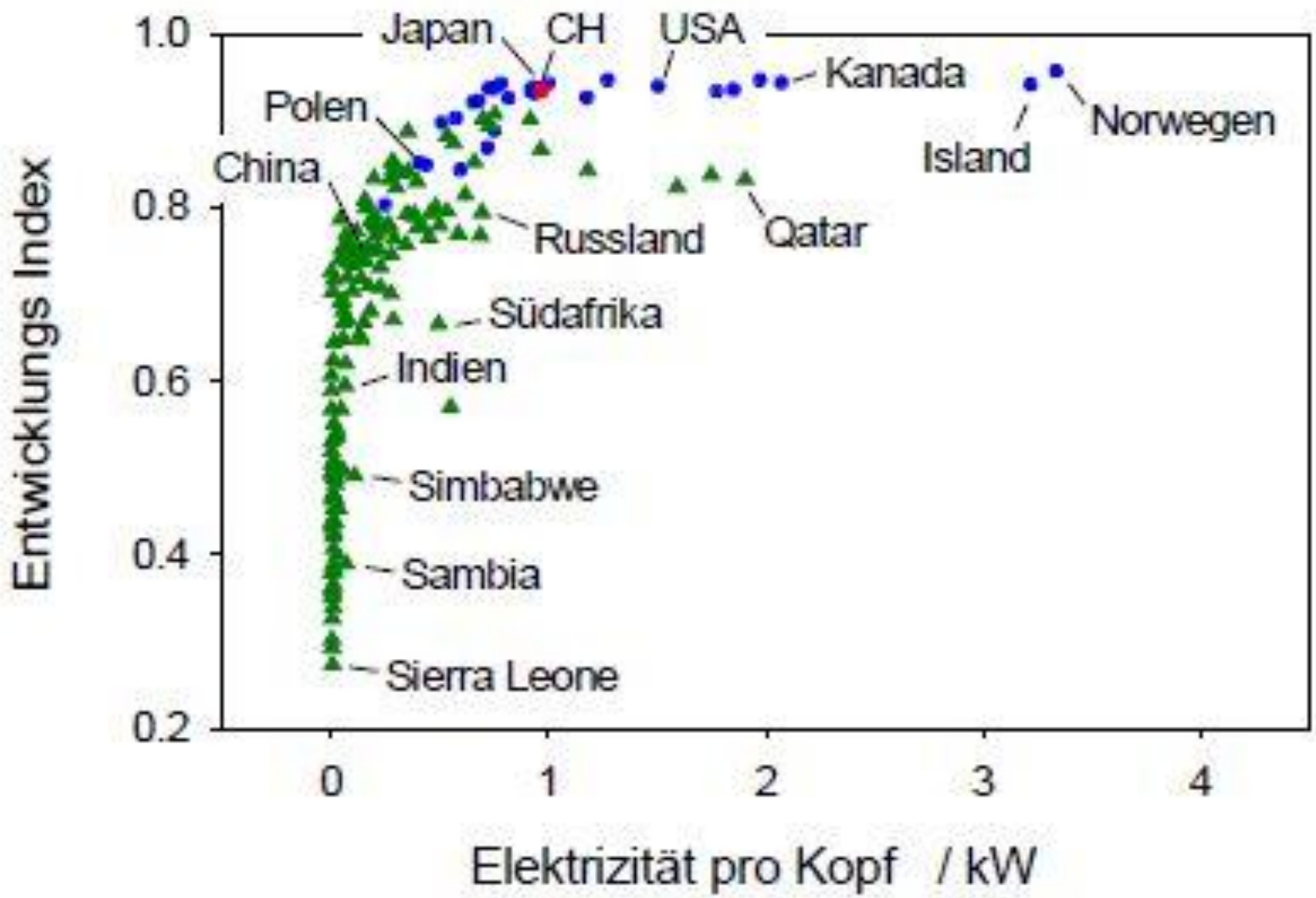
Elektro-
verbrauch



Energiequellen

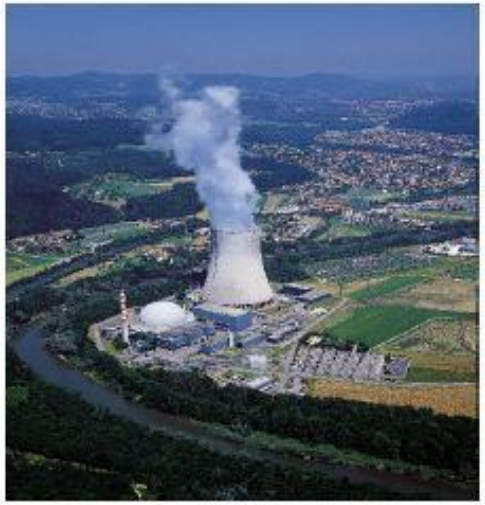


Stromverbrauch pro Kopf



1000 W
= 1 kW

1000 kW
= 1 MW



1000 MW
= 1 GW

Energie-Forschung am PSI

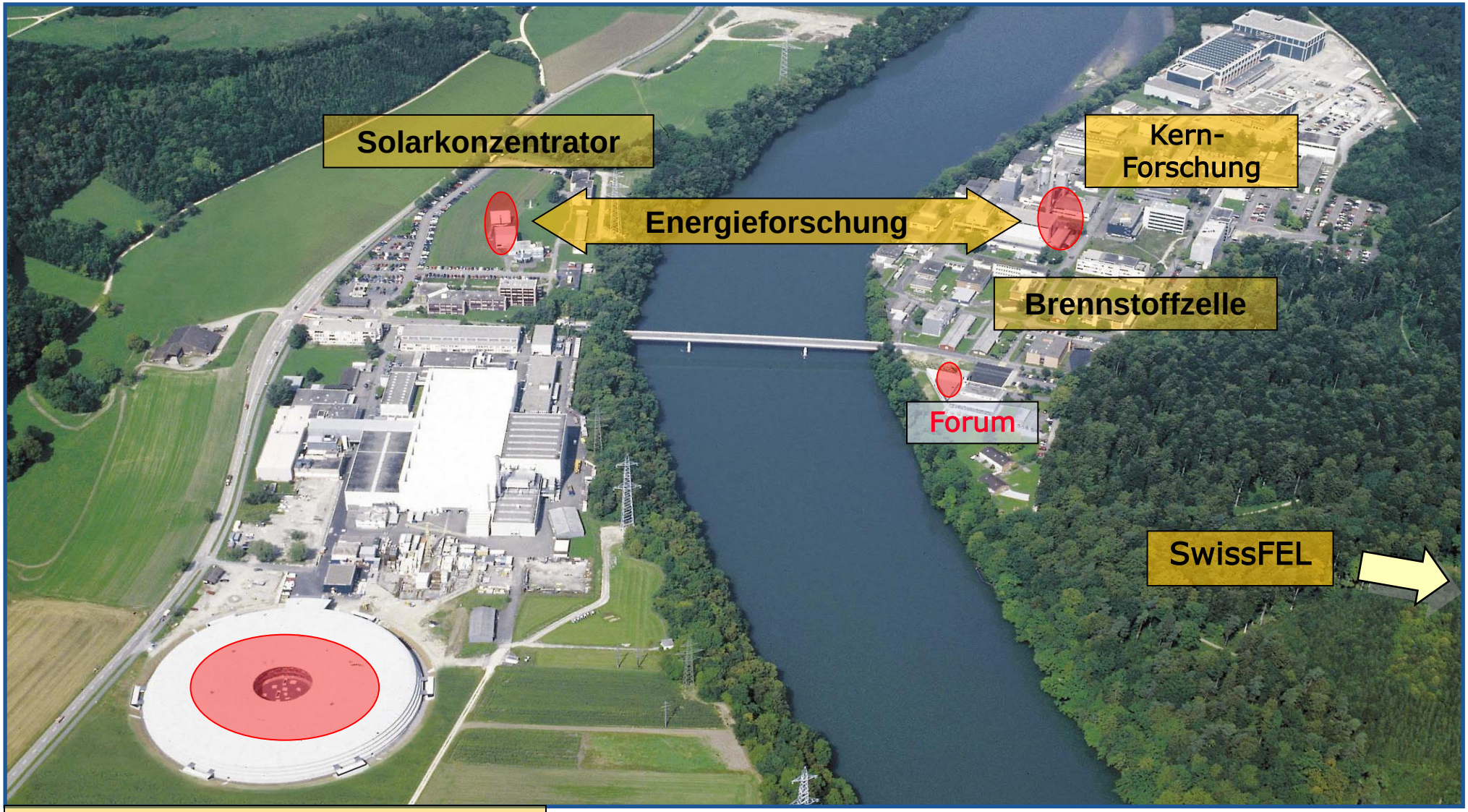
Alternativ-Energien

- Wasserstoffauto, Brennstoffzellen
- effiziente Batterien
- Solar-Ofen, Solarzellen

Nukleare Energie

- Sicherheit von KKW's
- Abfallentsorgung
- (Transmutation des Abfalls ?!)

PSI, das Paul Scherrer Institut in Villigen



Synchroton Lichtquelle Schweiz

SLS

Wasserstoff Auto

Kollaboration PSI/Michelin
neu: Hayek (Belenos)

Elektromotor mit

30 kW Brennstoffzellen (H_2/O_2)

45 kW Superkondens.

400 km Reichweite

- keine Abgase !!

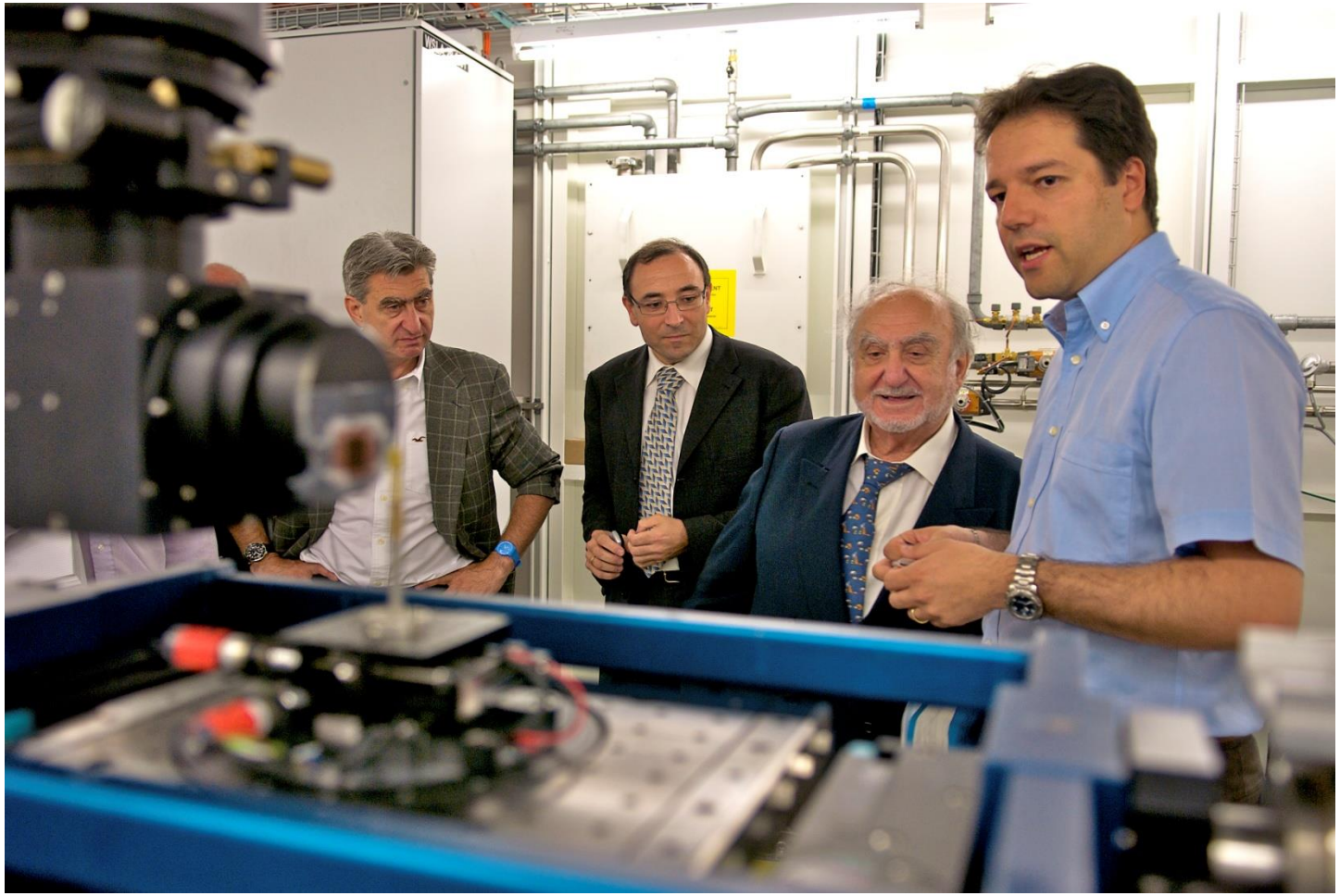
- kein Benzin !!

- schnelles Auftanken !

2012 Verkehrsbetriebe Brugg: 5 Autobusse

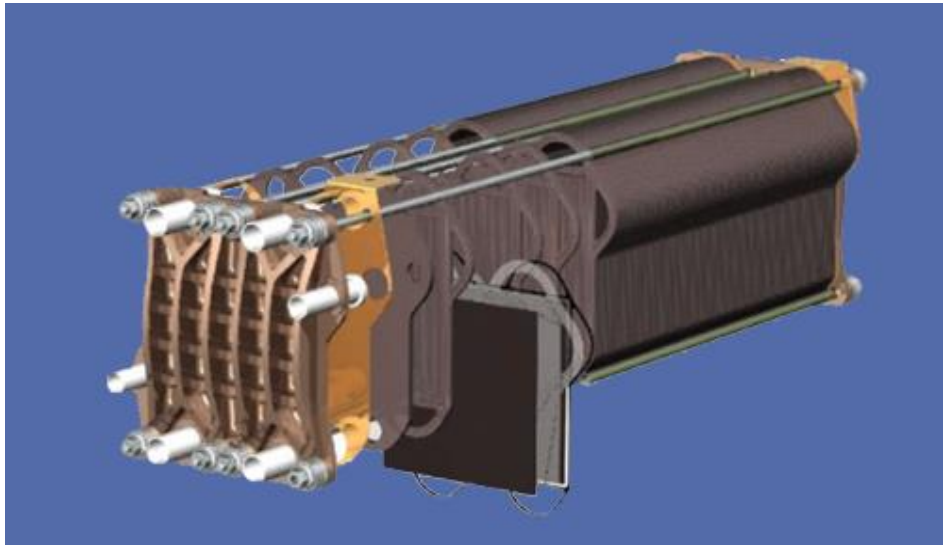
(noch 5 mal teurer als Benzinbusse)

Kollaboration Belenos (Swatch Group) und PSI

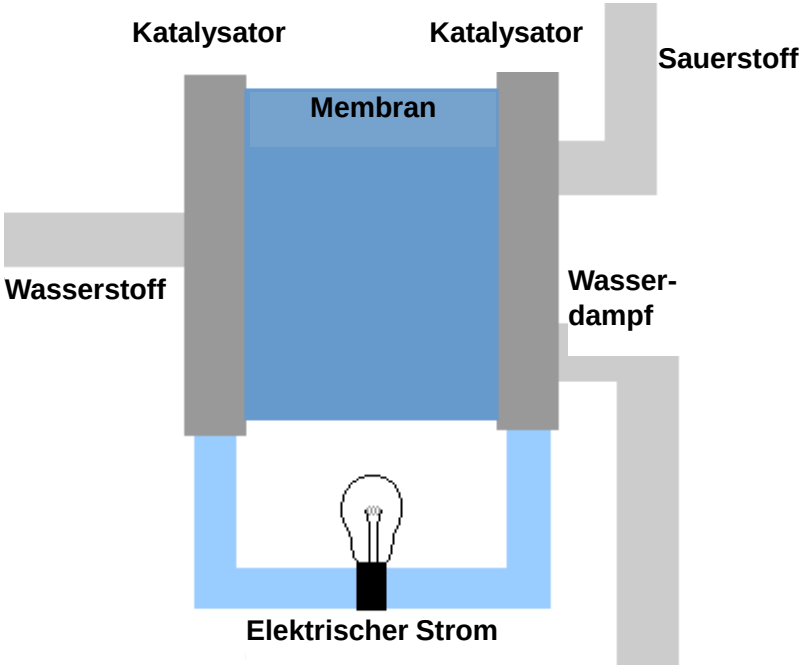


Nick Hayek, Philipp Dietrich, Nicolas Hayek, Marco Stampanoni

Brennstoffzelle



Brennstoffzellenstapel mit 30kW



Wasserstoff +Sauerstoff = elektr. Energie (+Wasser)

Wirkungsgrad ca. 60%

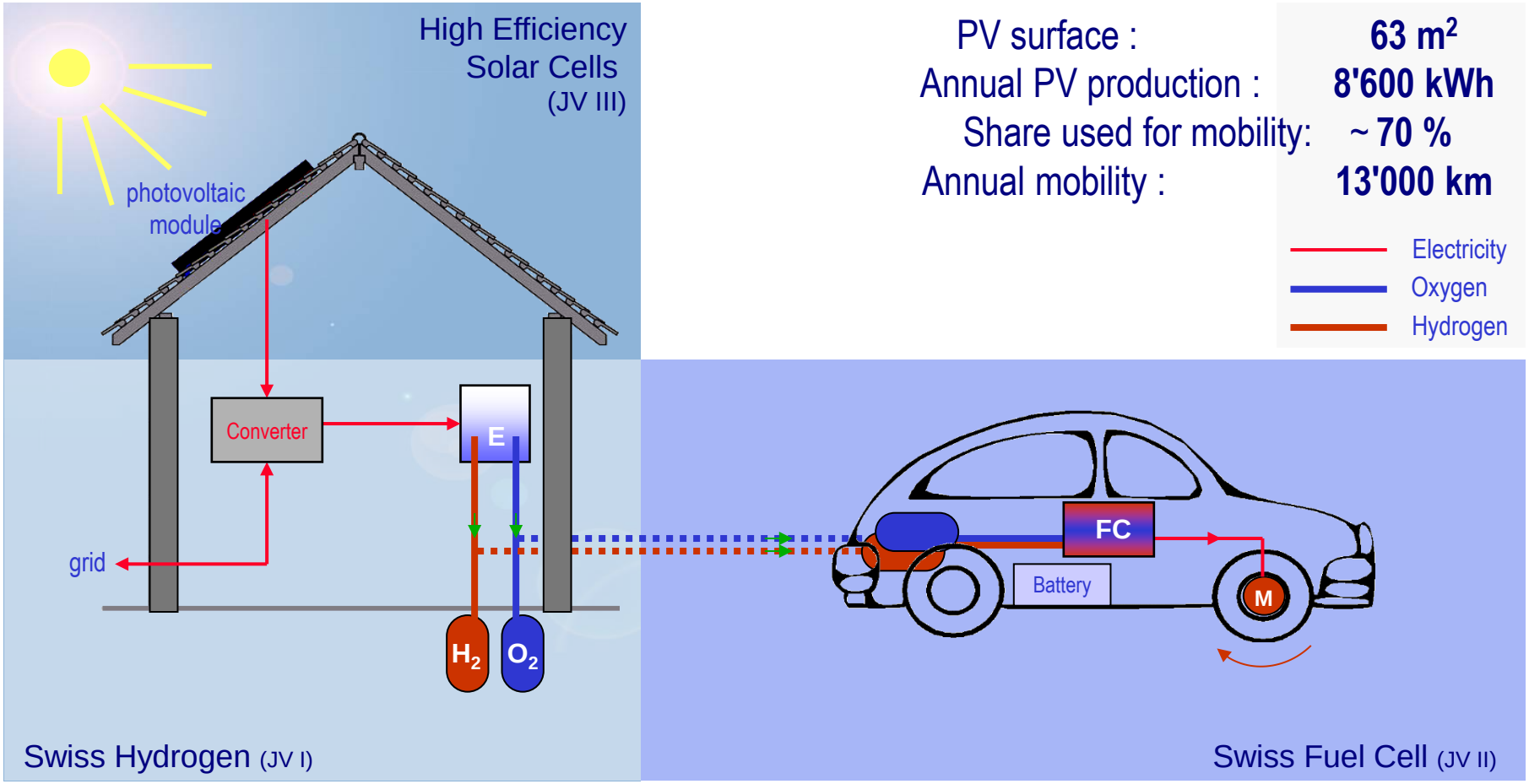
Energiepreis des Bundes:

Watt d'Or 2011

Wasserstoff-Auto, zu Hause tanken ?!

Belenos Clean Power *Holding*

PV surface :	**63 m²**
Annual PV production :	**8'600 kWh**
Share used for mobility:	**~ 70 %**
Annual mobility :	**13'000 km**



warum noch kein serienmässiges Wasserstoffauto ?

- Die Brennstoffzellen brauchen Platin (wie ein Katalysator)

  ca. 100g pro Auto; Rohstoffwert ca. 5‘000 Fr., bearbeitet ca. 10‘000-20‘000 Fr.

  => Suche nach Alternativprodukten

- Herstellungskosten der Brennstoffzellen noch sehr teuer

weitere Probleme:

- Lebensdauer Membrane

- Abfluss des Wassers aus Membrane

- Wasserstofftank für 200 bar => 700 bar

wie gefährlich ist der Wasserstofftank?

weniger gefährlich als ein Benzintank!

Wasserstoff Auto Benzin Auto

nach einigen Sekunden

Solar-energie

N.Linse, PSI

- im wesentlichen unbegrenzt
- ökologisch sinnvoll

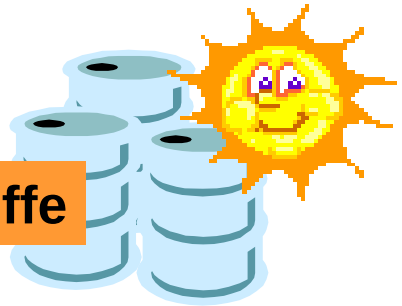
3 Hauptprobleme:

- nicht dauernd verfügbar
- ungleichmässig verteilt
- sehr verdünnt (nur etwa 1 kW/m^2)

deshalb muss man die Solarenergie:

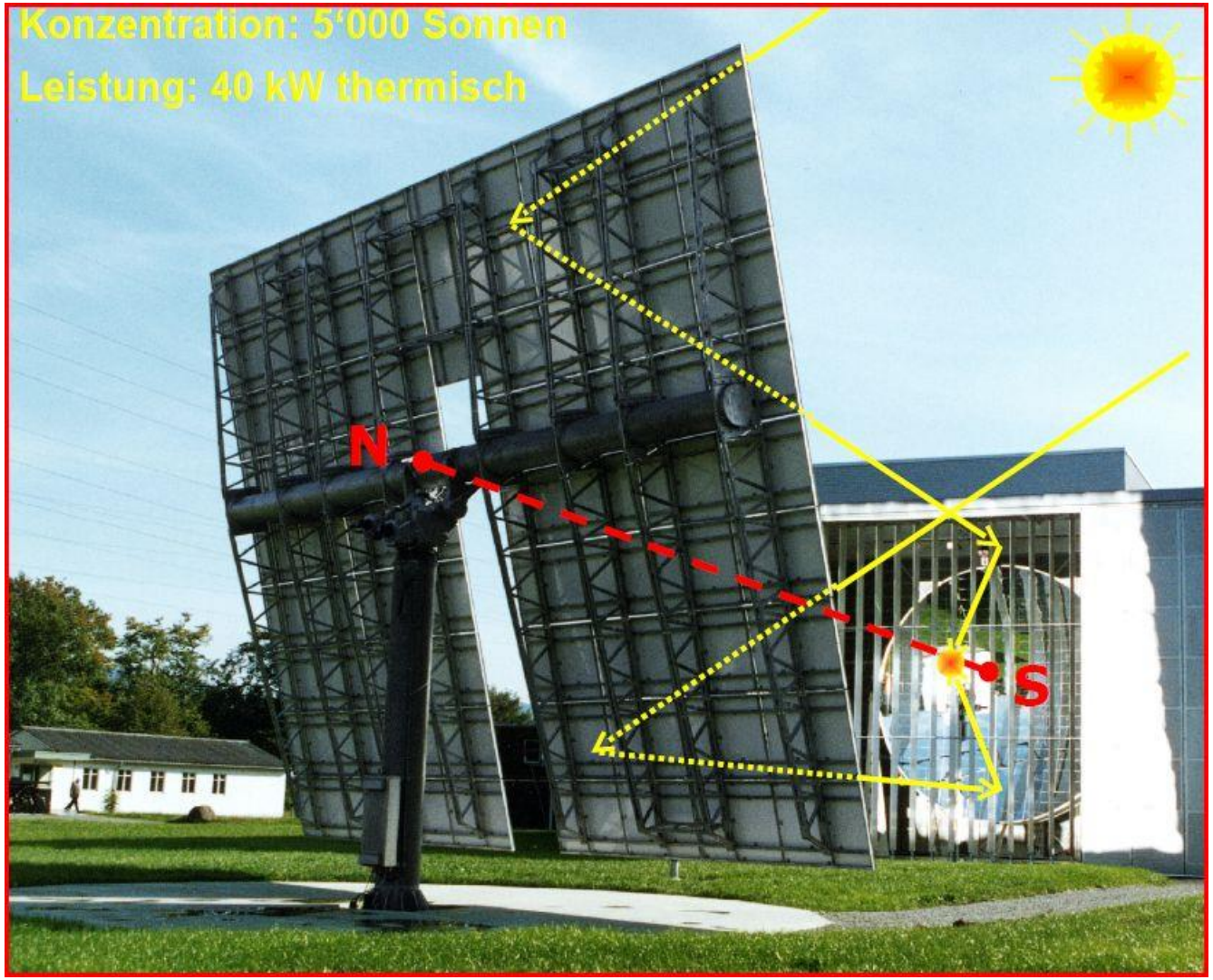
- **speichern**
- transportieren
- konzentrieren

solare Brennstoffe



→ Umwandlung in chemische Energieträger

Solarkonzentrator PSI



Solarofen 2000^0

40 kW thermisch

Gewinnung von Zink aus Zink-oxyd

Vorteil: Speicherung!!

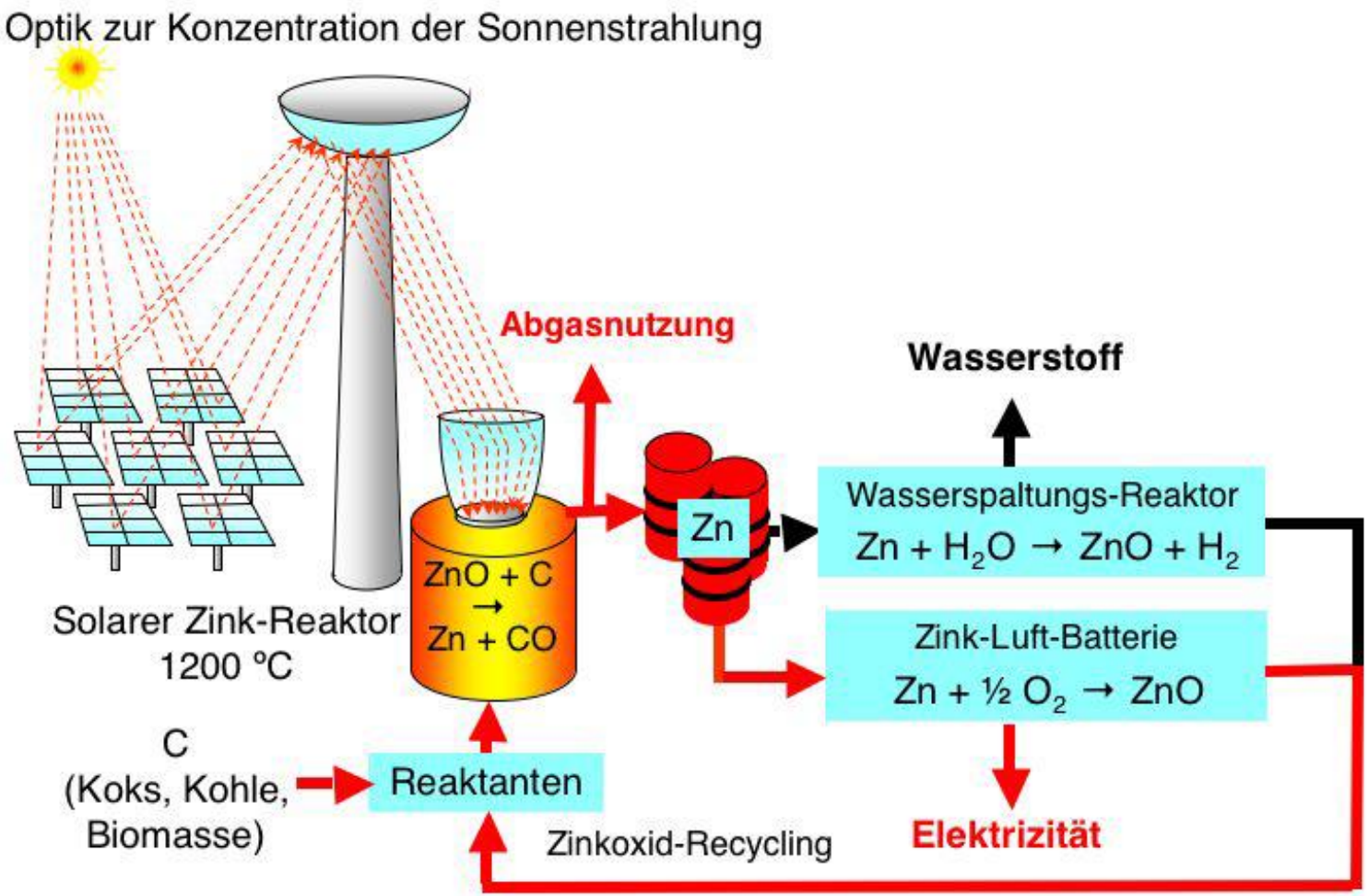
Zink => Wasserstoff

=> Zink-Luft Batterie

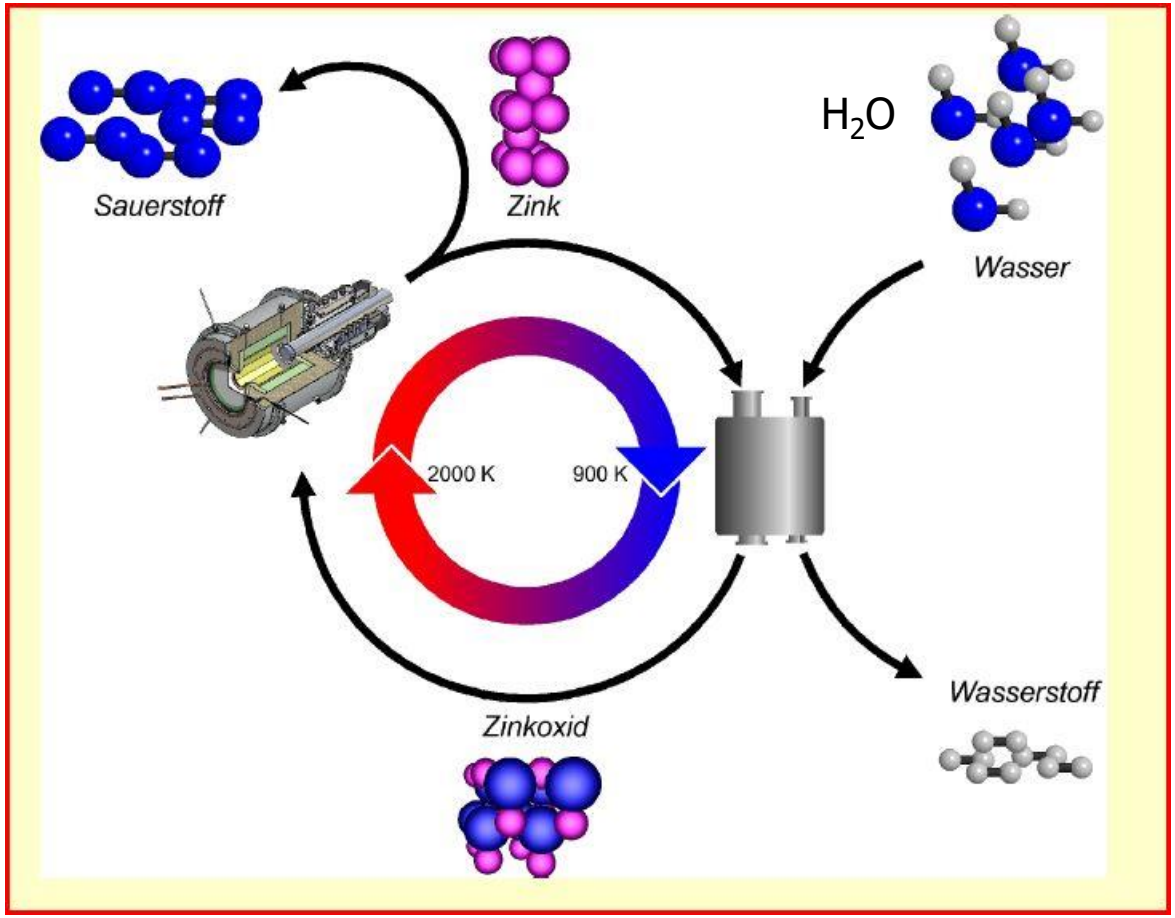
=> Brennstoffzellen

=> Treibstoff Syngas

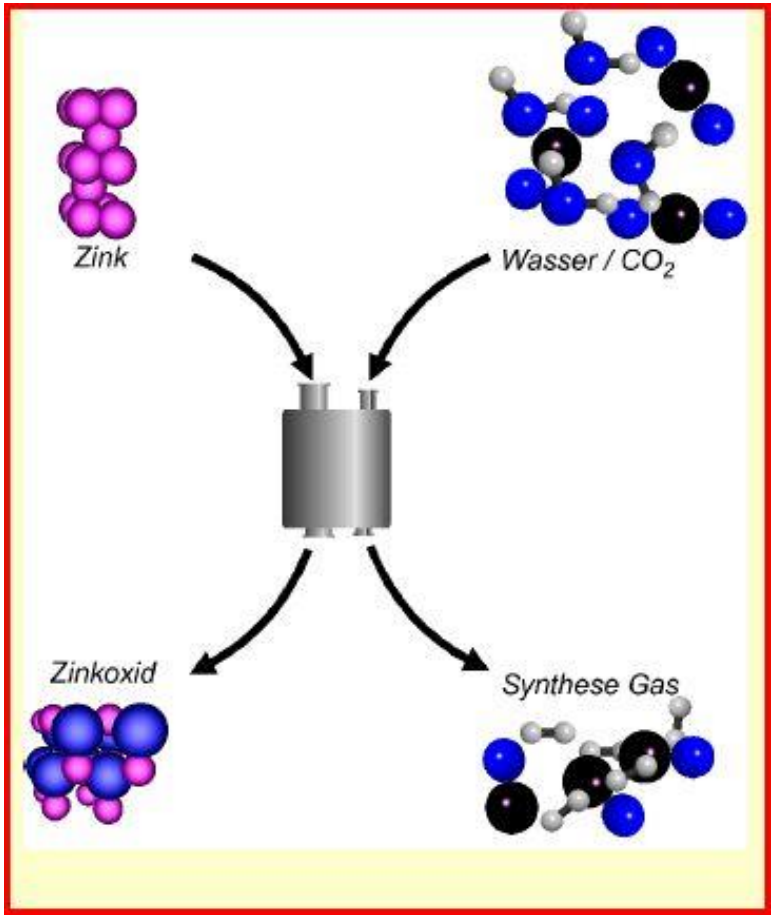
Solarer Zink Reaktor



Solarofen



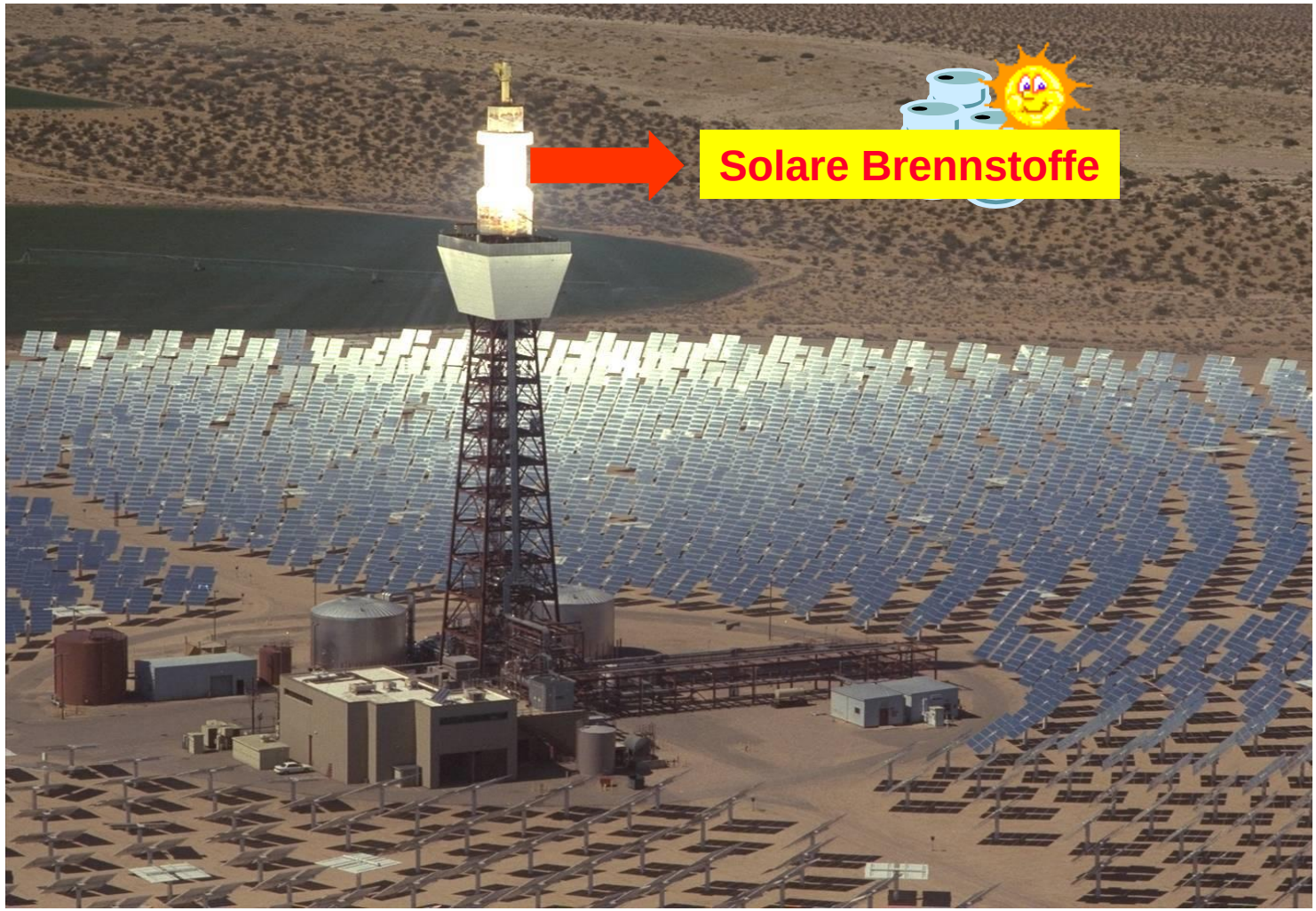
Produktion von Wasserstoff
(Zink als Katalysator)



Produktion von Syngas,
Vorstufe zu Benzin

Solarfabrik

Grosstechnische Solare Thermochemische Anlage



Solartürme in Sevilla

vorne:

20MW$_e$ Anlage (2009)

1’255 Heliostate à 120m^2

165m Turm

mit Dampfgenerator

Dampfspeicher (1 Stunde)

48’000 MWh/Jahr

=> 5.5MW Jahresmittel

Kosten 100 MFr.

hinten: 10MW$_e$ Anlage (2005)

Künstlicher Brennstoff (Syngas) aus Sonnenenergie (Aldo Steinfeld, PSI)

Sonnenenergie + Metalloxyd CeO_2 (schwammartige Keramik):

1. Zyklus , Reduktion: $CeO_2 \Rightarrow CeO + \frac{1}{2} O_2$ (bei $1'500^0$)

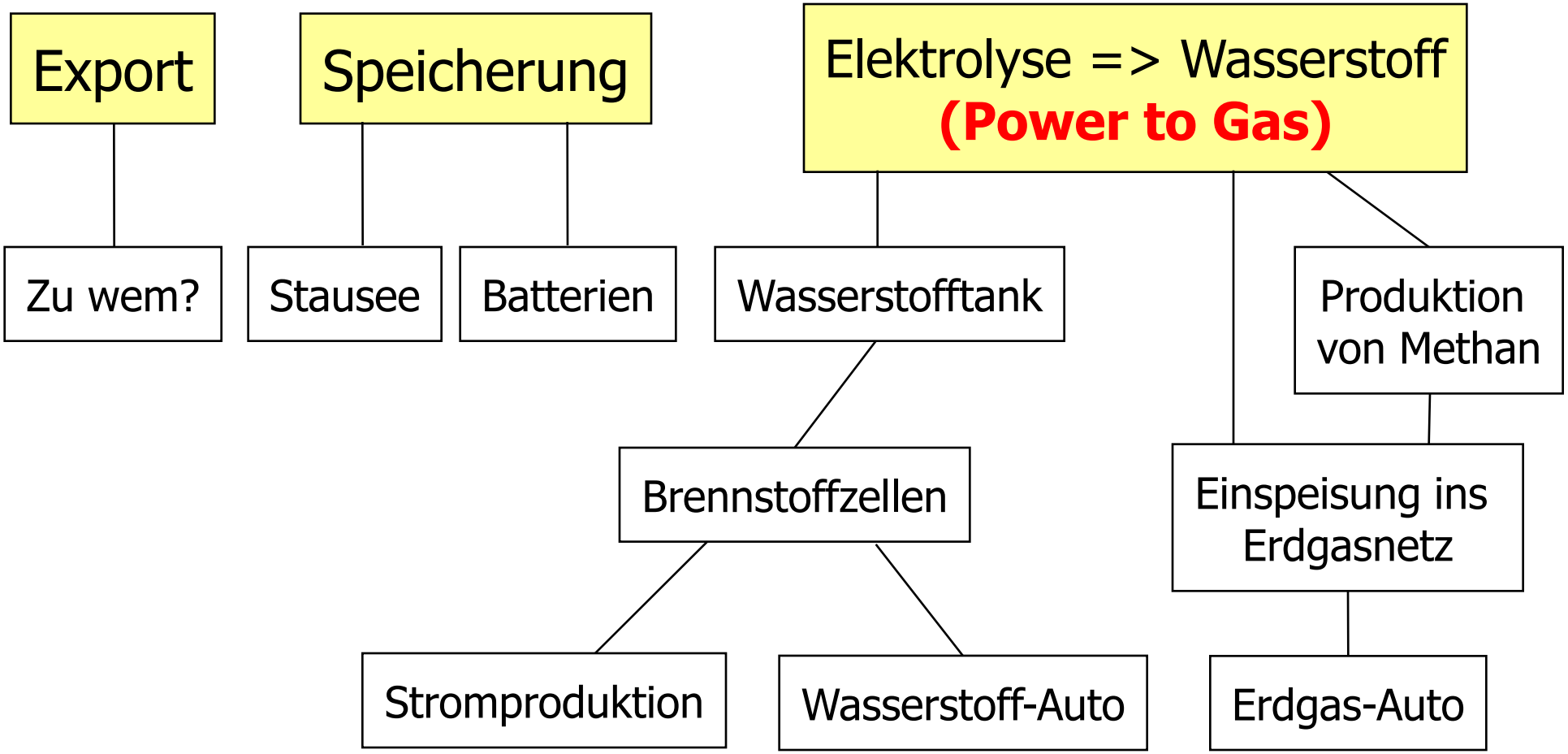
2. Zyklus , Oxydation: a) $CeO + H_2O \Rightarrow CeO_2 + \mathbf{H_2}$

b) $CeO + CO_2 \Rightarrow CeO_2 + \mathbf{CO}$

(H_2O und CO_2 aus Luft !)

H_2 und CO (liquid hydrocarbons) bilden Basis für flüssigen Brennstoff (katalytische Conversion), max. Wirkungsgrad ca. 15%

Stromüberschuss Photovoltaik (und Wind)



Power to Gas

- Speicherung von Spitzenstrom: Strom => Gas
- Elektrolyse von Wasser: $2\ H_2O \rightarrow 2\ \mathbf{H_2} + O_2$

a) Produktion von **Methangas**: $4\ H_2 + \mathbf{CO_2} \rightarrow \mathbf{CH_4} + 2\ H_2O$

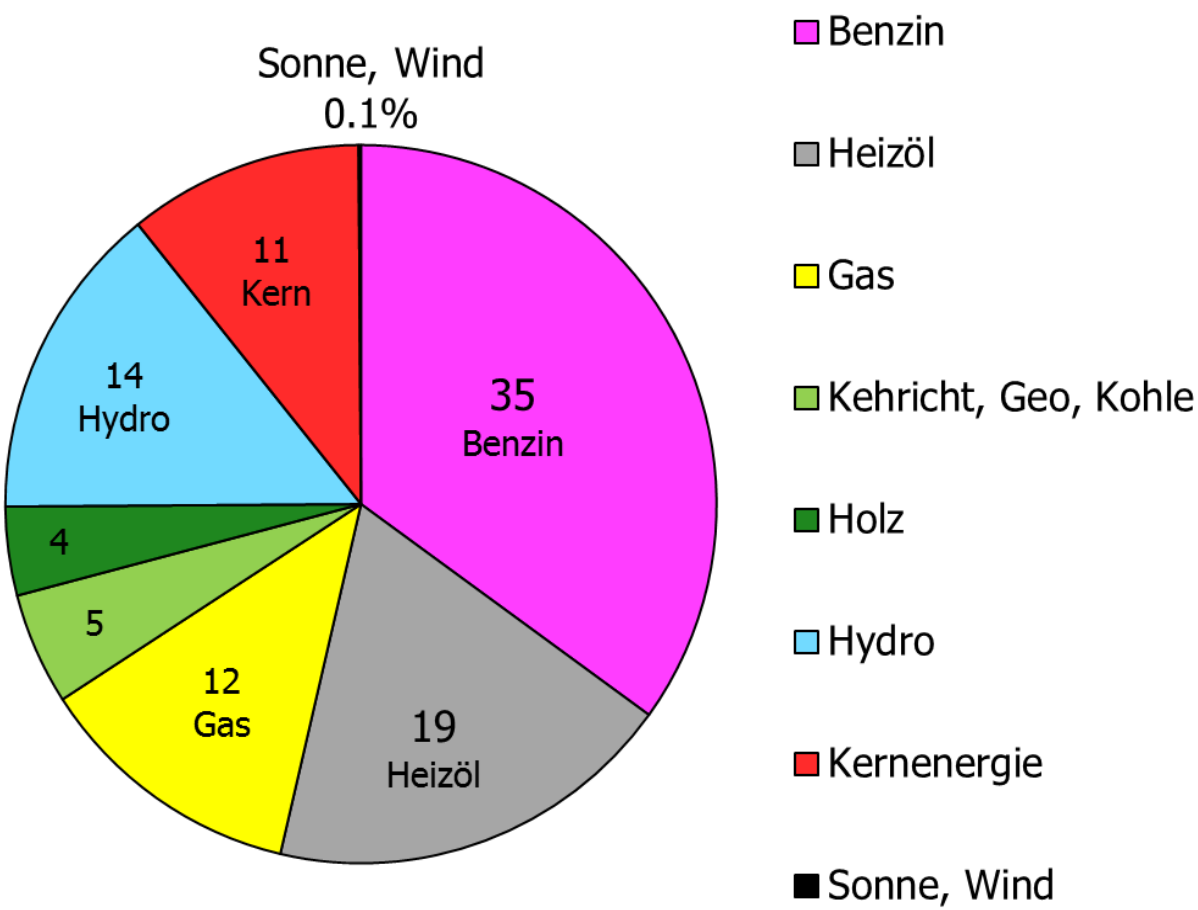
Einspeisung des Methan (CH4) in Erdgasnetz

=> **Heizen** oder **Erdgasauto** **(CO_2 neutral !)**

b) Speicherung von **Wasserstoff**

=> Wasserstoffauto mit Brennstoffzellen

Energie Verbrauch in der Schweiz (%)



Mittelwert: 3.6 kW/Person
(ca. 900W elektrisch,
davon 1/3 für Haushalte)

2‘000 W Gesellschaft ?!

Ersatz von Benzin und Öl :

=> mehr elektr. Energie !

Energiewende bis 2050

- **Bevölkerung** nimmt zu: 8 => 10 Millionen ? (0.6%/Jahr)

- **Benzin** wird sehr teuer => Elektro-autos => Stromzuwachs

- **Heizen** a) bessere Isolation (Minergie-haus)

  b) Erdwärme statt Heizöl und Gas

  (Geokraftwerke und Wärmepumpen)

- **Elektro:** keine Kernkraftwerke mehr

=> Hauptproblem von Sonnenenergie (auch Wind): **Speicherung**

Alle wollen im Sommer Strom exportieren

und im Winter importieren !!

Energieverbrauch CH
jährlicher Mittelwert in GW
(+persönliche Prognose)

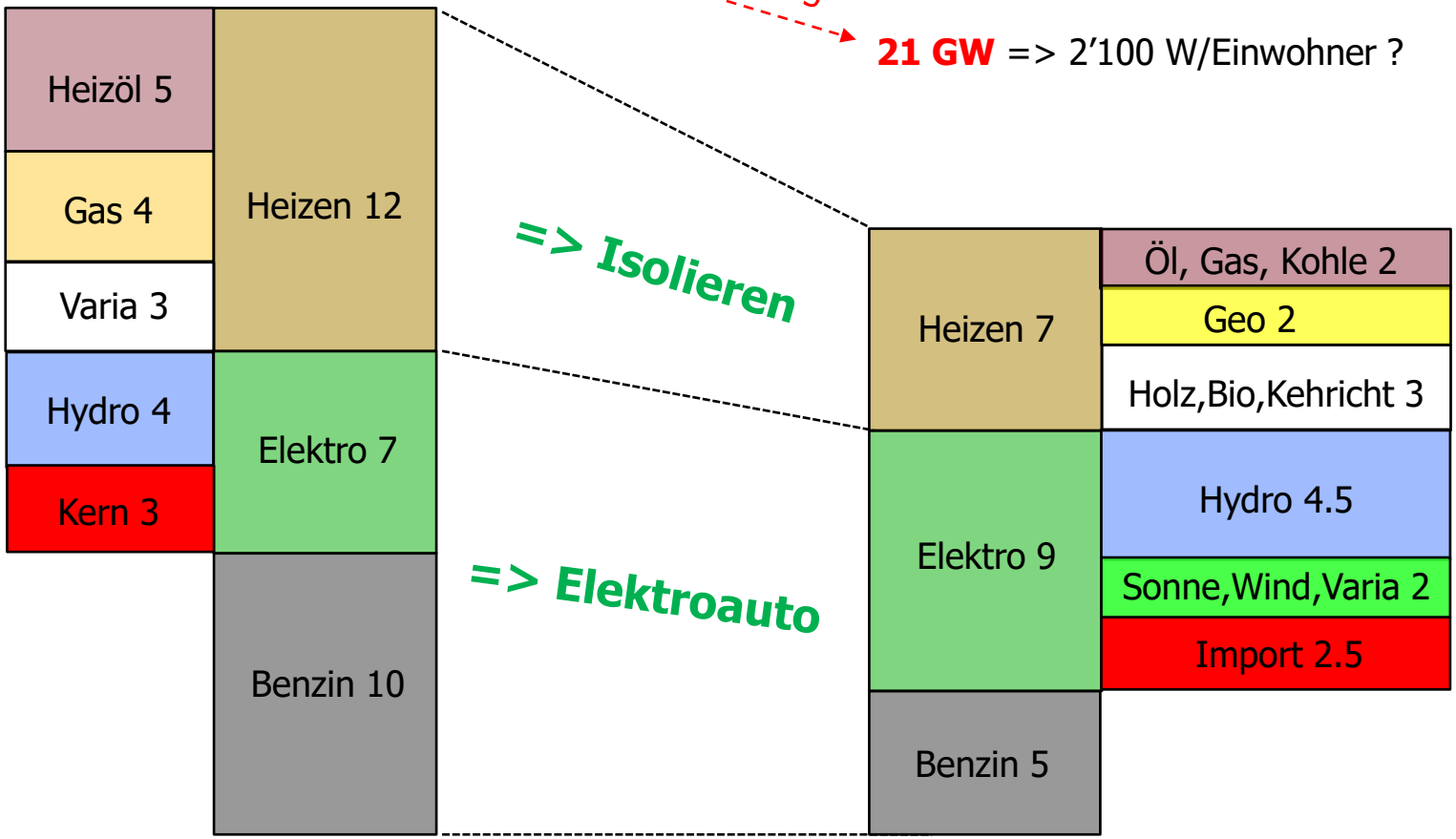
heute: 8 Millionen Einwohner

29 GW => 3'600 W/Einwohner

persönliche Einschätzung

2050: 10 Millionen Einwohner

21 GW => 2'100 W/Einwohner ?



zukünftiger Strombedarf

warum wir weniger Strom verbrauchen werden

- effizientere Elektrogeräte
- Verbot von Elektroheizungen
- Strom wird teurer

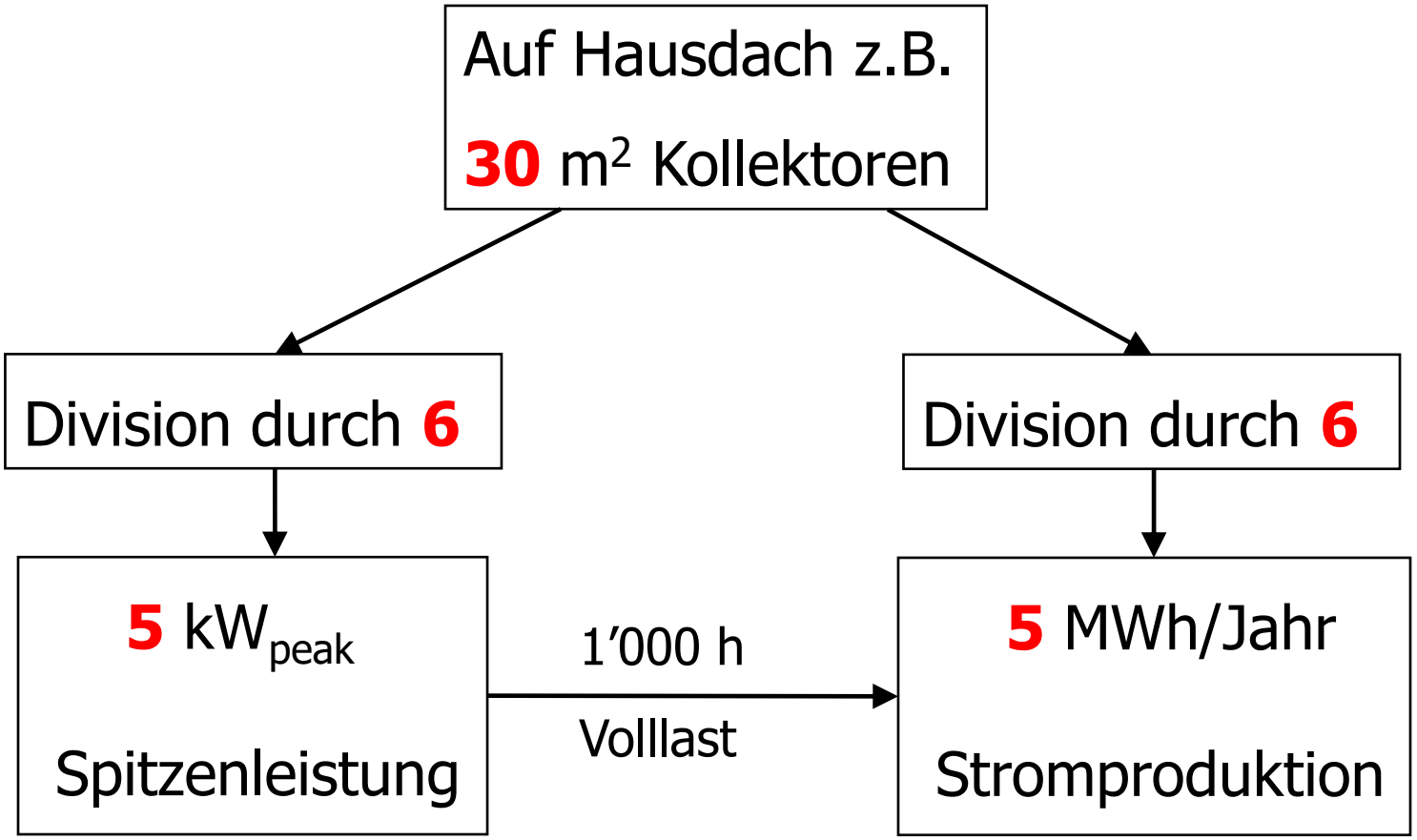
  => Sparwillen, Umweltbewusstsein

warum wir mehr Strom verbrauchen werden

- **Zunahme der Bevölkerung**
- Umstieg auf **Elektrofahrzeuge**
- Wärmepumpen ersetzen Ölheizungen
- Zunahme des Eisenbahnverkehrs
- mehr „Komfort" (im Haushalt etc.)

Was hat Sex mit Photovoltaik zu tun ?

=> **6** nur als Gedächtnisstütze !



Migros Neuendorf SO, 2016

grösste Photovoltaikanlage der Schweiz

41’000 m^2 Solarpanels (Division durch ≈ 6)

6’700 kW_p Spitzenwert, 950 Volllaststunden, 6’400 MWh/Jahr

=> 1’400 Haushalte

La Boverie Payerne, 2015

zweitgrösste Photovoltaikanlage der Schweiz

38’000 m^2 Solarpanels

(Division durch ≈ 6)

6’000 kW_p Spitzenwert

1’000 Volllaststunden

6 GWh/Jahr

=> 1’300 Haushalte

Palexpo Genf, 2012

drittgrösste Photovoltaikanlage der Schweiz

27’000 m^2 Solarpanels

(Division durch ≈ 6)

4’200 kW_p Spitzenwert

1’000 Volllaststunden

4’200 MWh/Jahr

=> 900 Haushalte

Stade de Suisse, Bern

12’000 m^2 Sonnenkollektoren

2007	Zukunft	
1.3 MW_p	1.8 MW_p	Spitzenwert
140 kW	200 kW	Mittelwert
10 MFr.	5 MFr.	Kosten
54 Rp/kWh	18 Rp/kWh	

Die 7 grössten Photo-Voltaik Anlagen der Schweiz

Migros Neuendorf SO	41’000 m^2	6.7 MWp	6.4 GWh/a
La Boverie Payerne	38’000 m^2	6.0 MWp	6.0 GWh/a
Palexpo Genf	27’000 m^2	4.2 MWp	4.2 GWh/a
ETHL Lausanne	15’000 m^2	2.2 MWp	2.2 GWh/a
Stadien Biel	16’500 m^2	2.0 MWp	1.5 GWh/a
Stade de Suisse Bern	12’000 m^2	1.3 MWp	1.2 GWh/a
Migros Ecublens	8’500 m^2	1.1 MWp	1.1 GWh/a

Stromproduktion pro Jahr total 22 GWh

(davon nur 9% von anfangs November bis Ende Januar)

Als Vergleich: AKW Leibstadt (1.1 GW) braucht dazu 20h

10% Elektro mit Photo-Voltaik (2050)

(2015 waren es 2%)

- 8 GW_p x 1'000 Volllaststunden => 8 TWh/a (ersetzt KKW Leibstatt)
- elektrische Spitzenleistung: 200 W_p/m^2 (heute 160W_p/m^2)

  es braucht total ca. 40 Millionen m^2 Kollektoren:

  - **400'000 Einfamilienhäuser à 36 m^2 (6mx6m)=> 3 GWp**
  - **5'000 Anlagen à 2'000 m^2 (40mx50m)=> 2 GW_p (Schulhäuser etc)**
  - **400 Grossanlagen (auch Alpen!) à 40'000 m^2 (200mx200m)=> 3 GW_p**
- Kosten 15 Mrd Fr. (300 Fr./m^2 , +Netzausbau) => ca. 20Rp/kWh
- Problem: **Speicherung !!** (Grand Dixence speichert 2 TWh)

Windanlagen

Jura: 23 Windanlagen

(je 2 MW Spitze , 400 kW mittel)

Schweiz 2015:
ca. 0.2% der Stromproduktion

Projekt Obersaxen: 40 Windräder

15 MW mittel

Belgien

Wind bläst etwa doppelt so stark wie in der Schweiz

5% Elektro mit Windanlagen (2050)

(2015 waren es 0.18%)

- 2.5 GW_p x 1'600 Volllaststunden = 4 TWh/a (50% von KKW Gösgen)
- Windrad: Nabenhöhe 110m, Φ 90m , Spitzenleistung: 2.5 MW_p
  damit ist die Jahresproduktion ≈ 4 GWh/Turbine

=> es braucht 1'000 Anlagen (wie die bisherigen 23 im Jura)

z.B. 25 Windparks à 40 Windräder (wie Projekt Obersaxen)

- Kosten ca. 8 Mrd Fr. (inkl. Netzausbau)
- Energiekosten ca. 15 Rp./kWh
- Problem: **Speicherung , Naturschutz**

Grand Dixence , gebaut 1935

Staumauer 285m hoch

(weltweit an 2.Stelle)

Stausee 4 km^2 , bis 227m tief

Fallhöhe ca. 1’800m

gespeicherte Energie: 2 TWh

= 3% des Jahresbedarfs Schweiz

Spitzenleistung : 2 GW

(4 Kraftwerke)

Probleme der Alternativen Stromquellen

- **Wasser**
  - limitiert, Naturschutz
- **Gas**
  - CO_2
- **Import**
  - Atomstrom, Kohle, Wind
    - Netzausbau
- **Geothermie**
  - 15% elektr.
  - 85% Fernwärme
- **Wind**
  - Panorama
    - **Speicherung** => Netzausbau
- **Solar**
  - Flächen-bedarf
    - **Speicherung** => Netzausbau

Geothermie

- 200^0 Wasser in 5'000m Tiefe
- sehr gut für Fernwärme => in Nähe von Städten

  aber: kleiner Wirkungsgrad für Stromerzeugung (≈15%)
- Potential bis 2050 (optimistische Prognose):

  20 Anlagen à 40MW thermisch, 7MW elektrisch

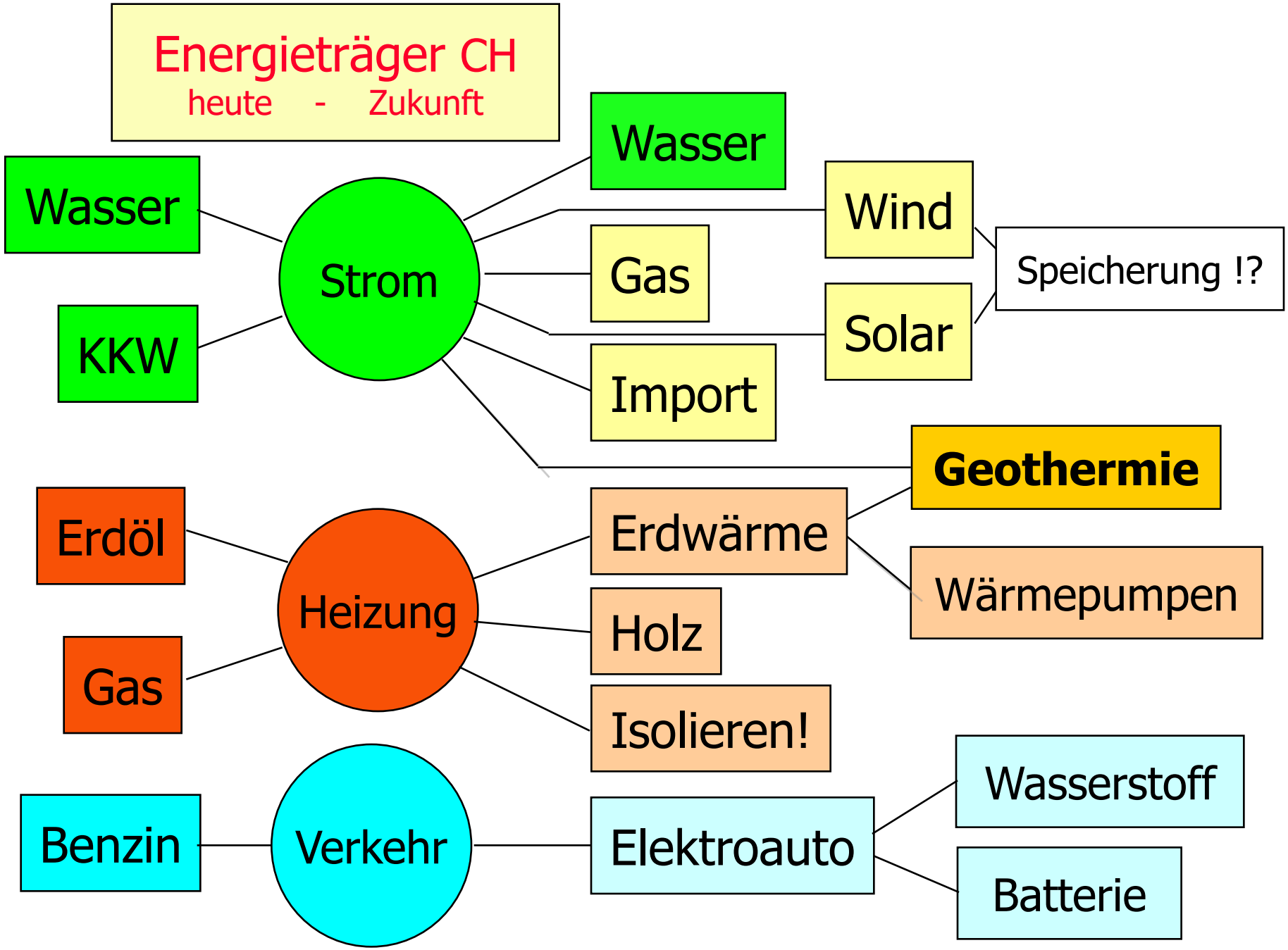
  => Beitrag an Stromproduktion 1.1 TWh/a (ca. 1.5%)
- liefert Bandenergie (im Sommer: Wärme zurück in den Boden)
- Problem: **Abkühlung um 20^0 innert 20 Jahren => neuer Standort !**

Geothermie in Island
25% Anteil an Stromproduktion

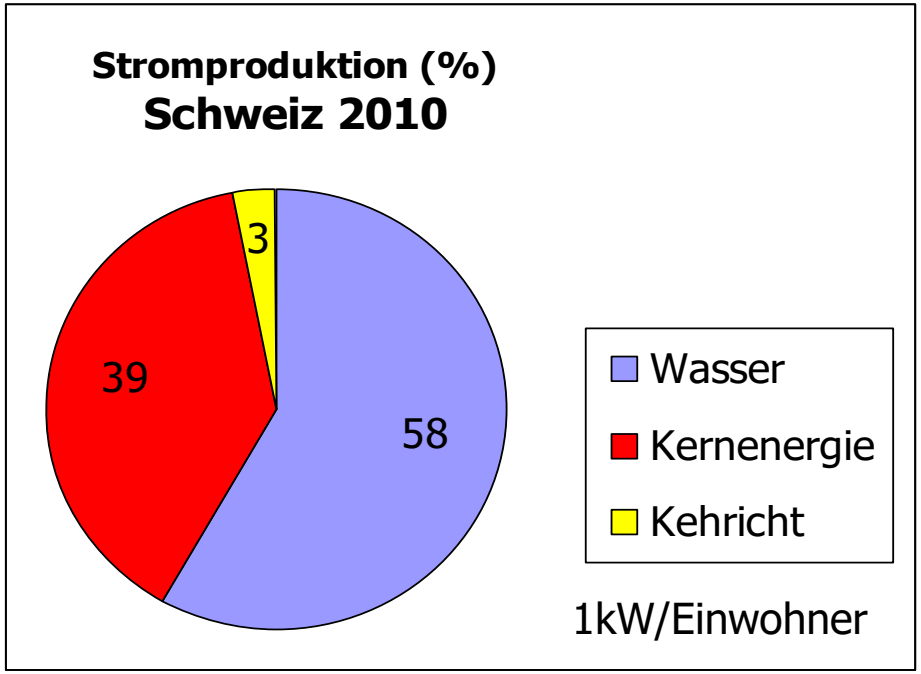
Wasser: 300^0 , Stromerzeugung: 300 MW_{peak}

Geothermie
warum nicht mit etwas Glück !?

From Bill Bryson:
A Short History of Nearly Everything


Energieträger CH
heute - Zukunft
Wasser
KKW
Strom
Wasser
Gas
Import
Wind
Solar
Speicherung !?
Geothermie
Erdöl
Gas
Heizung
Erdwärme
Holz
Isolieren!
Wärmepumpen
Benzin
Verkehr
Elektroauto
Wasserstoff
Batterie

Stromproduktion CH ⇔ Österreich, 2010



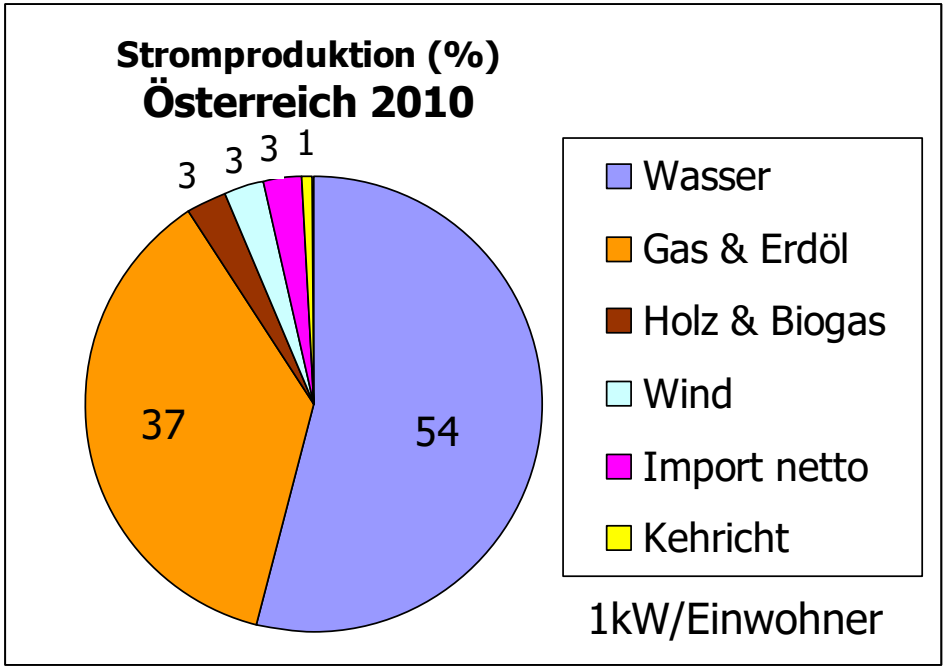


Photo-voltaik 0.1%

Wind 0.07%

Import 27% (Frankreich)

Export 28.5% (Pumpspeicherwerke)

Photo-voltaik 0.1%

Wind 3%

Import 18% (davon 6% Kernenergie)

Export 15% (Pumpspeicherwerke)

Energiepolitik Schweiz

3 politische Forderungen

keine KKW's

unabhängig vom Ausland

keine Gefährdung des Wirtschafts-standorts Schweiz

pick any two !

warum ist Nutzung der Kernkraft attraktiv?

- Einstein: $E = mc^2$ gibt ungeheure Energiedichte
- 1kg entspricht 10^{17} J = 25 TWh ,
  dies ist der Energieverbrauch in der Schweiz in 4 Wochen !
- Spaltung von U_{235} –Kern mit Neutronen
  => frei werdende Neutronen ermöglichen Kettenreaktion
- **1 kg** Natur-Uran enthält **7 g** spaltbares Isotop U_{235} , davon werden durch die Spaltung **7 mg** in Energie umgesetzt
- dies ist äquivalent zu **20'000 lt Öl**
  (bringt 30 t Lastwagen in Satellitenbahn !)
- **Band-energie**

warum schafft Kernkraft Unbehagen?

- Radioaktivität ist nicht wahrnehmbar
- grosses Gefahrenpotential
- Angst vor Strahlenschäden
- Unfälle in Tchernobyl (1986) und Fukushima (2011)
- Langzeitlagerung der Abfälle

einzige Chance für Akzeptanz:

bei allfälligem Reaktorunfall => **keine Evakuation !**

=> keine Emission von radioaktiven Stoffen

Tchernobyl 1986

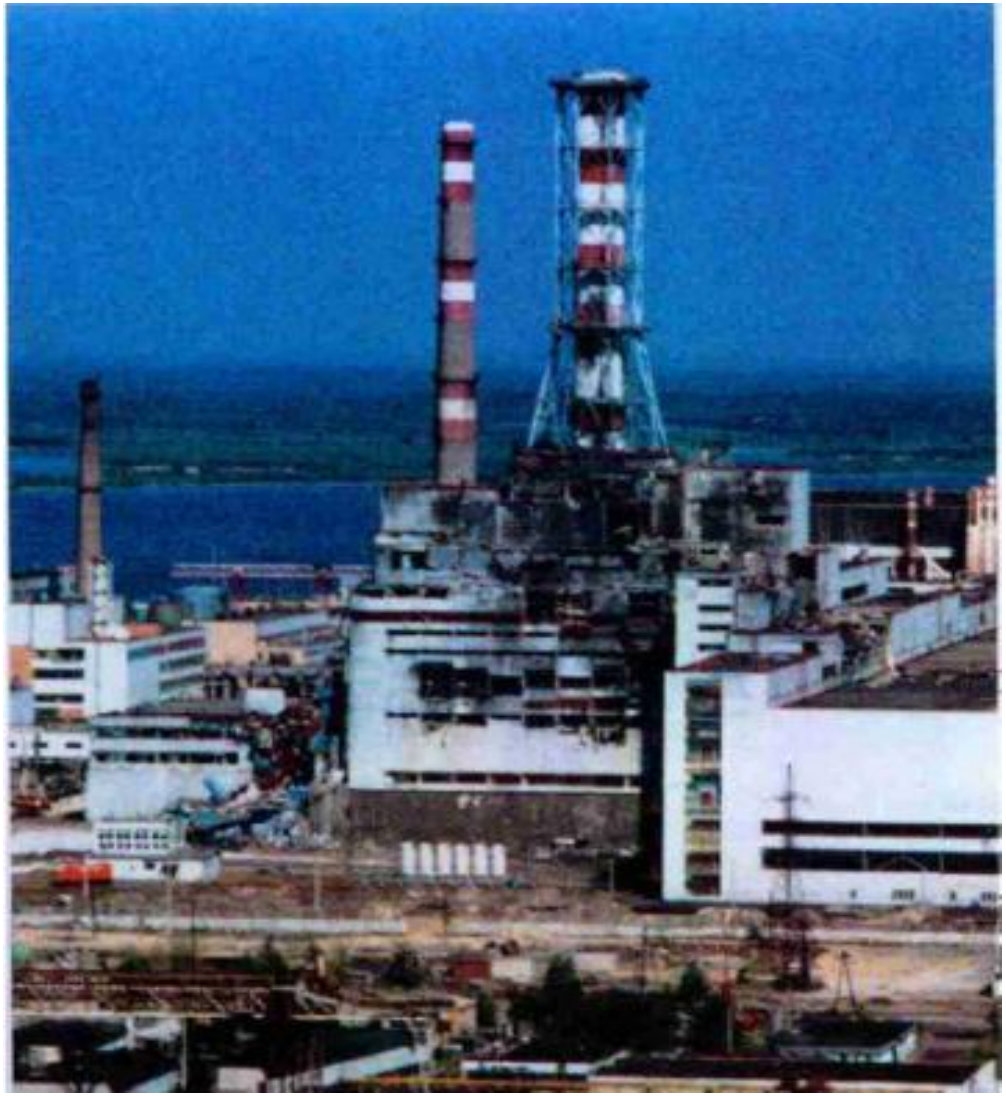
warum kam es zum Reaktorunfall?

- kriminelle Verletzung der Betriebsvorschriften,
  Betriebsleiter wollte Leistungserhöhung ausprobieren
  => laufender Reaktor explodierte
- veralteter Reaktortyp (Graphitreaktor)

wieso entwickelte sich der Unfall zur Katastrophe?

- nur schwache Betonhülle um den Reaktor !
- Vertuschung durch Behörden verhinderte Evakuation !!

Tchernobyl



Fukushima 12.3.2011

- KKW übersteht Jahrhundert Erdbeben (Stärke 9) => normale Abschaltung
- Tsunami erzeugt 30 Min. später eine 14m Flutwelle => Stromausfall
- Notkühlung mit Dieselmotoren, nach 1h Ausfall wegen Verschlammung
- Brennstäbe überhitzen sich und erzeugen grossen Druck im Reaktorgefäss
- Dampf abgelassen durch Operateure, Bildung von Wasserstoff im Gebäude
- wegen fehlenden Rekombinatoren: Explosion zerstört äussere Betonhülle

Fukushima Folgen

- radioaktive Gase entweichen durch zerstörte Gebäudehülle

  => Evakuierung bis 30 km Entfernung

  max. Dosis 2 mSv/Tag , nach 1 Monat 0.7 mSv/Tag

  (natürliche Jahresdosis ≈ 1 mSv/Jahr)

- Versuch Reaktor mit Meerwasser zu kühlen

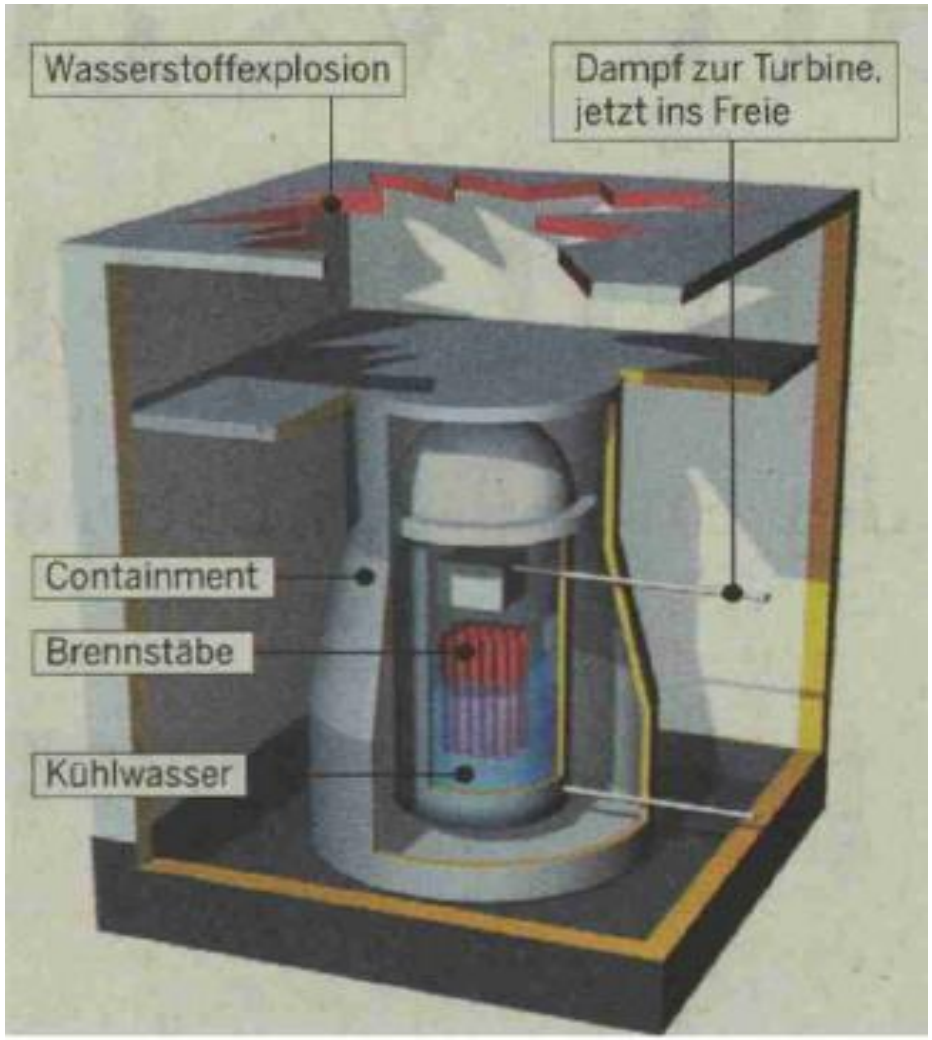
- ca. 100 Arbeiter erhalten Dosis bis 250 mSv

  => Risiko an Krebs zu erkranken erhöht sich von 30% auf ca. 31%,

  2 Jahre nach Katastrophe: bisher kein Todesfall durch Strahlung

  (20'000 Tote direkt durch Tsunami)

Fukushima 2011



Haben neue Kernkraftwerke eine Chance?

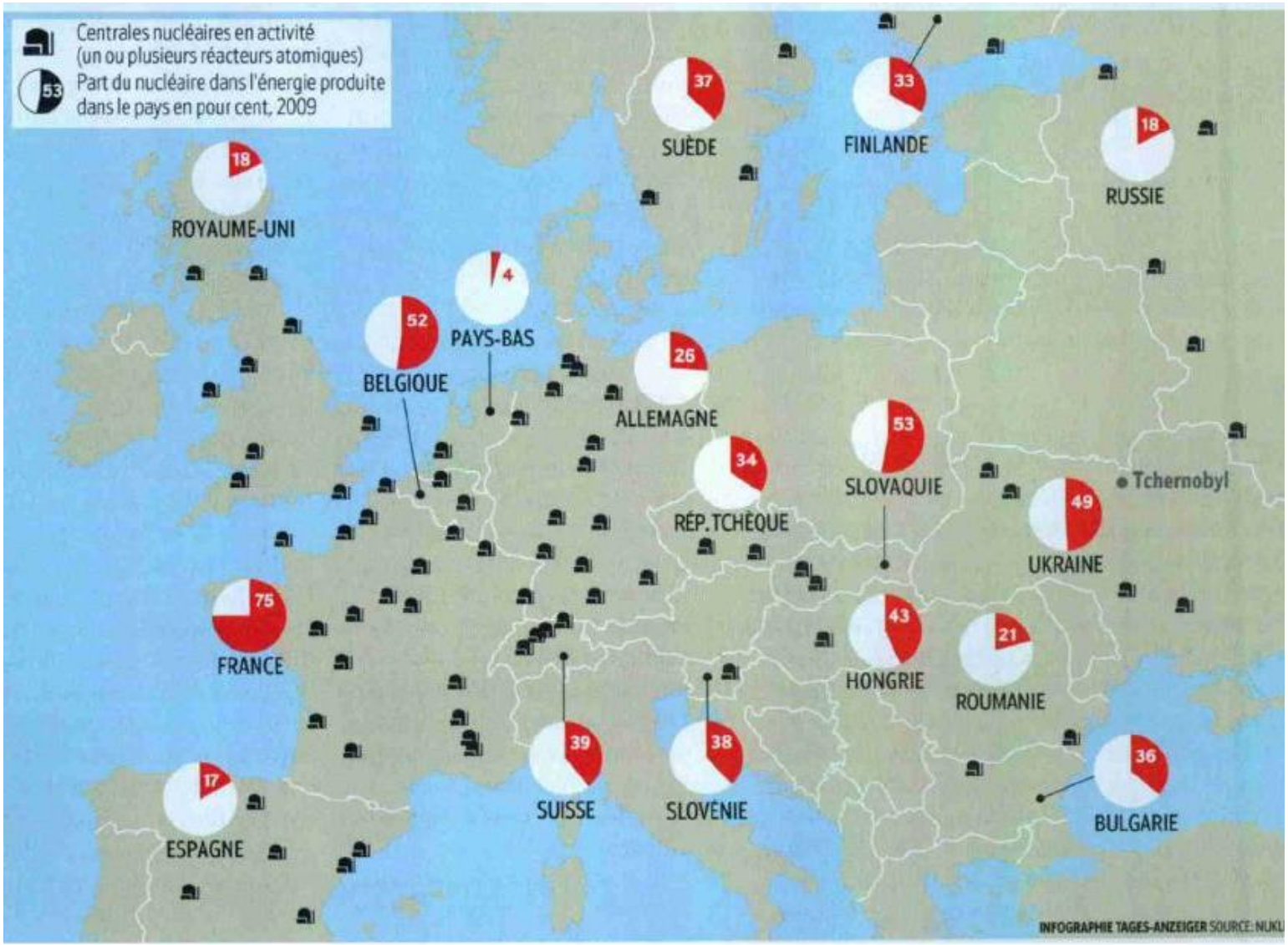
100% Sicherheit wird es nie geben! Aber bei Reaktorunfall:

es darf keine Radioaktivität entweichen

=> keine Evakuation der Bevölkerung !!

- damit sind Kernkraftwerke versicherbar, selbst gegen Totalausfall
- Reaktorhülle muss geschmolzenen Kern zurückbehalten
- Rekombinatoren verhindern Explosion von Wasserstoff
- Abklingbecken muss <u>ausserhalb</u> des Reaktorgebäudes sein
- grosses Wasserreservoir zum Fluten des Reaktors
- Schutz vor Hochwasser, flutsicherer Ersatzkommandoraum

KKW's in Europa

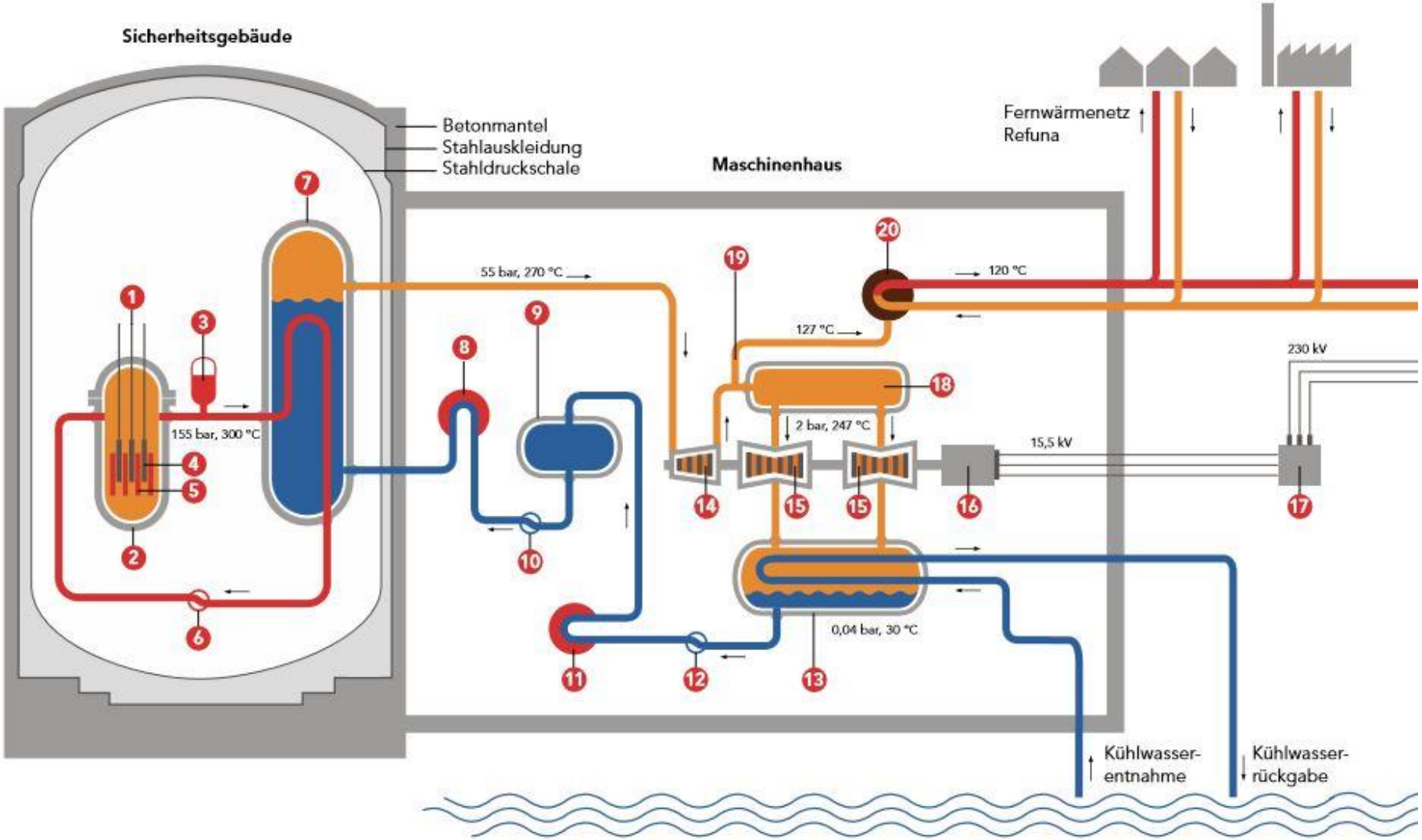


447 KKW's weltweit

Europa	200
Nordamerika	122
Südamerika	6
Asien	117
Afrika	2

Zwischenlager Würenlingen

Refuna Fernwärme ab KKW Beznau I,II



Refuna, Quo Vadis?

Fernwärmenetz unteres Aaretal
134 km, angeschlossen:
11 Gemeinden 15’000 Einwohner

Die Hauptleitungen sind 31 Kilometer, die Ortsleitungen 103 Kilometer lang.

Wärmeauskopplung nach Hochdruckturbine von Beznau I & II

⇒ 127^0 Dampf => 120^0 Wasservorlauf für Refuna

170 GWh/Jahr, spart 15’000 Tonnen Heizöl/Jahr

Maximale Wärmeleistung: 80 MW

Stromproduktion von Beznau I & II: 730 MW

Verlust durch Wärmeauskopplung: max. 8MW

=> **Refuna ist eine geniale Wärmepumpe**
mit coefficient of performance (COP) von 10

Diese Wärmepumpe muss gemäss Energiewende 2050 durch eine Direktheizung ersetzt werden

Entschärfung von radioaktivem Abfall !

chem. Separierung der langlebigen Aktinide

⬇

hoch intensiver Protonen Strahl
≈ 40 MW (30*PSI) , ab ca. 2050 ?

⬇

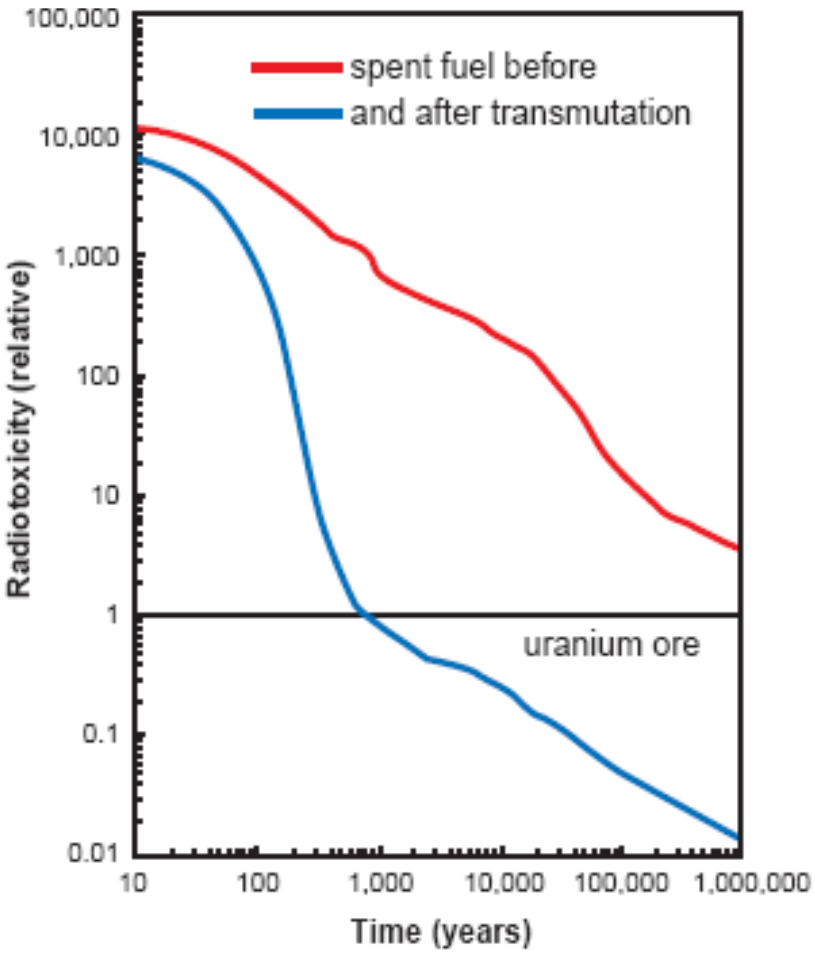
Erzeugung von Neutronen

⬇

Umwandlung der Aktiniden

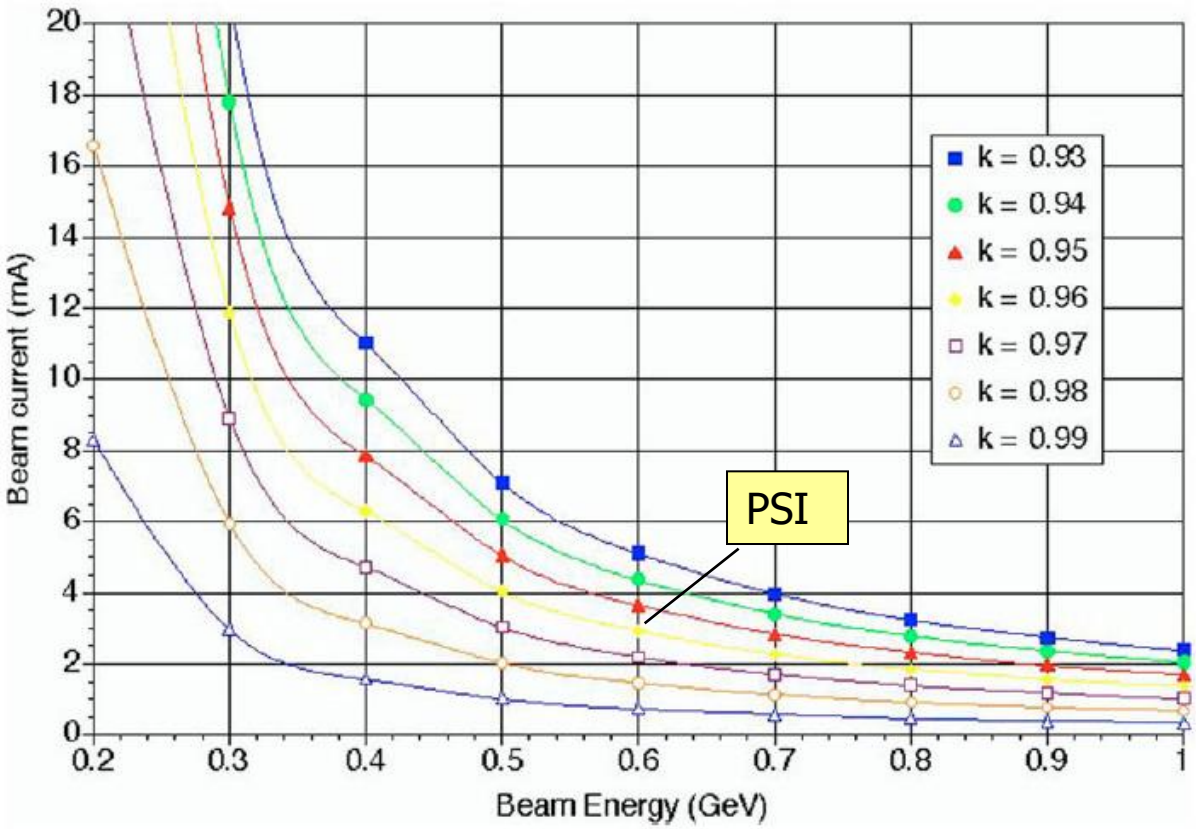
⬇

Reduktion von 1 Mill. Jahre auf 400 Jahre



European Roadmap for Accelerator Driven Systems … ENEA Italien 2001

Energy Amplifier Concept (C.Rubbia)



Protonen Strahlstrom, um 80 MW(thermisch) zu erzeugen, abhängig vom kritischen Faktor k (ref. Ansaldo 2001)

Produktion von Neutronen in subkritischem Reactor (k=0.97)

z.B. 600 MeV PSI Cyclotron,

3 mA => **1.8 MW** Strahlleistung

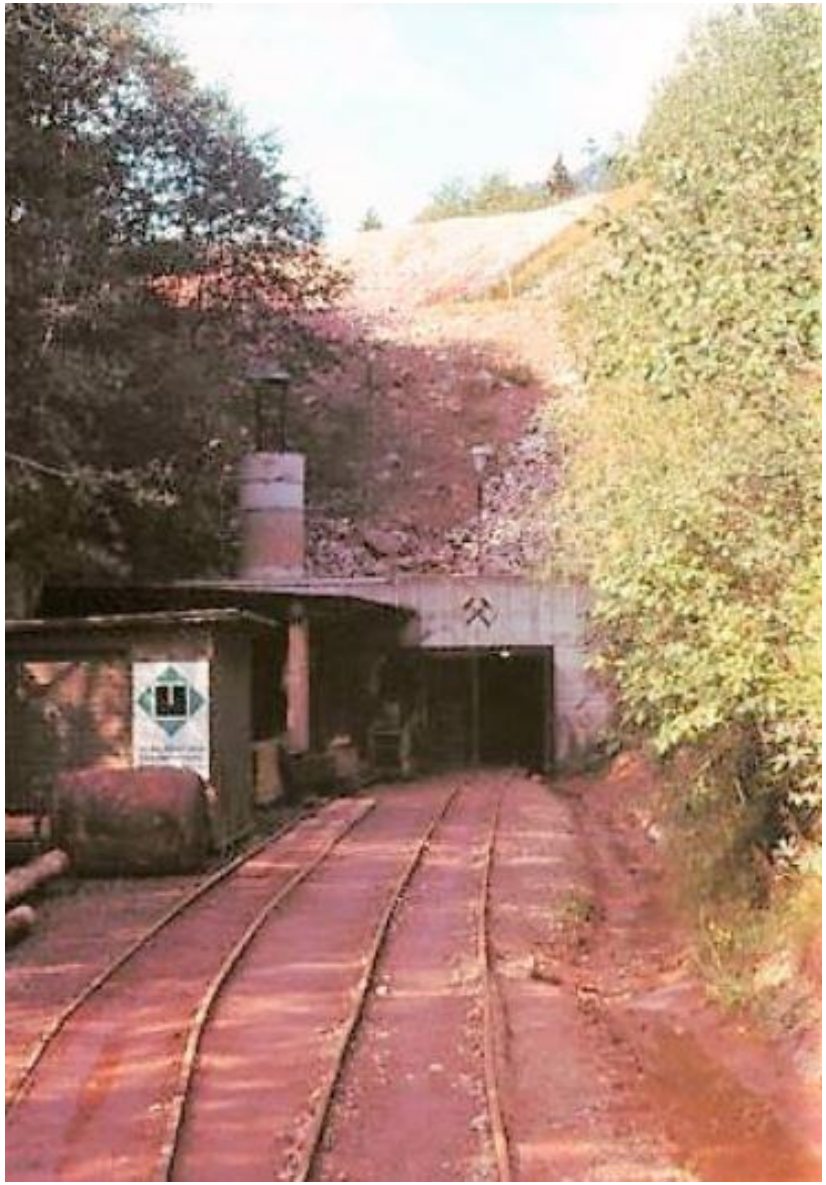
=> 110 MW_{th} = **40 MW_{el}**

=> Kraftwerk mit 1 GW_{el} braucht 35mA Protonen bei 1 GeV => s.c. Linac

- **inherente Sicherheit**
- **Thorium** (grosse Reserven)
- kein langlebiger Abfall
- kein Material für Kernwaffen

Die Natur lagert Uran seit Urzeiten

1957 wurde im **Schwarzwald** bei Menzenschwand, 27km nördlich von Leibstadt, **Uranerz** entdeckt.
Von 1961-1991 wurden jährlich 30-70t Uran gewonnen.



Bei einer öffentlichen Führung in einem Stollen konnte mein Vater einen 1kg Klumpen Uranerz nach Hause mitnehmen. Er zeigte ihn immer mit Stolz seinen Gästen.

Jahre später liess ich von diesem Klumpen am PSI in Villigen eine Spektral-analyse der Gamma-Strahlung anfertigen. Der Klumpen wurde mir in 3-fach Plastikfolie verpackt zurückgegeben, versehen mit einem Kleber: **"kontaminiert, nicht anfassen!"**

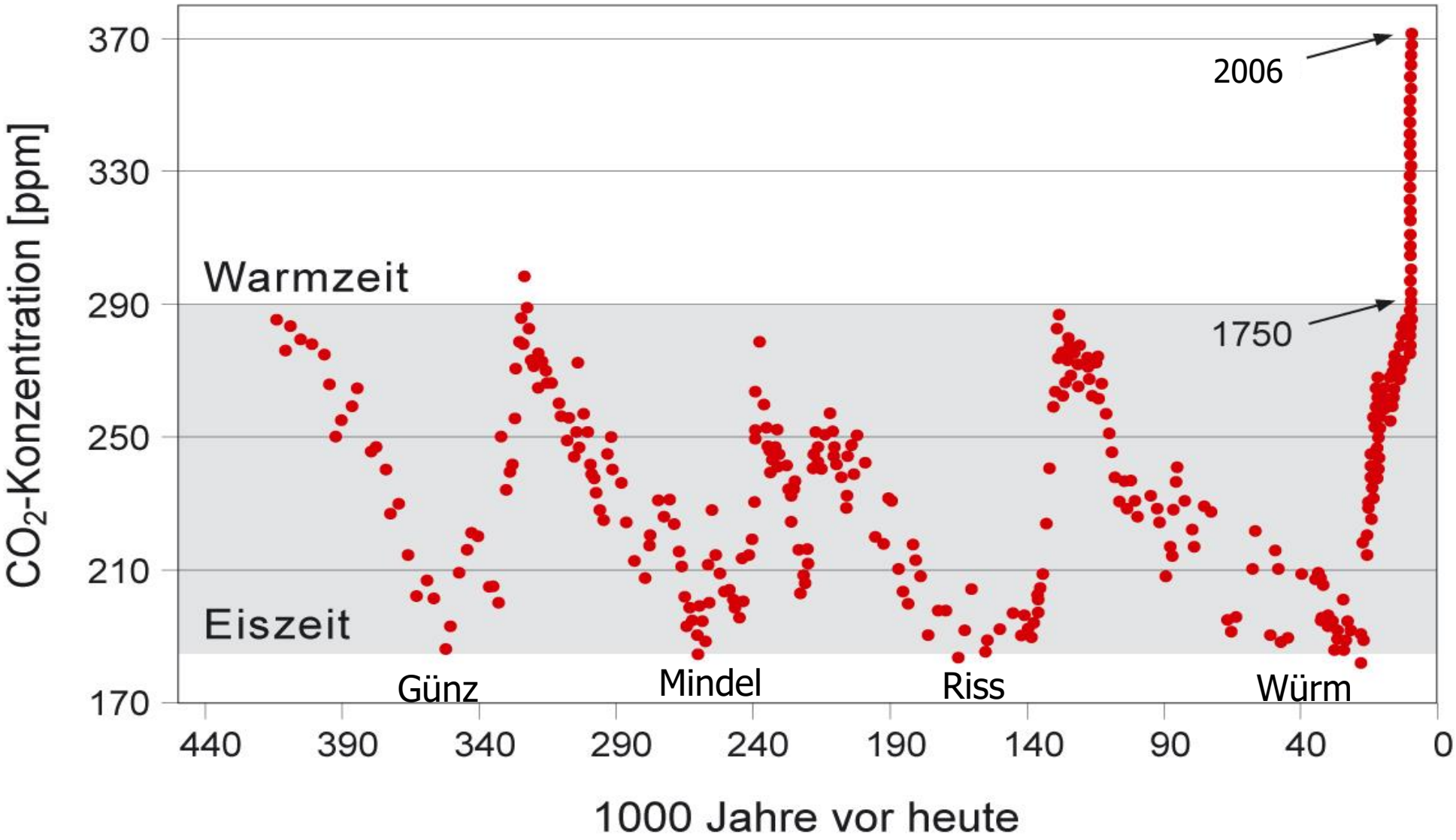
Die «Lagerung des radioaktiven Abfalls» ist zu einem grossen Teil kein physikalisches, sondern ein politisches Problem, weil niemand diesen Abfall in seinem Berg haben will.

positiver Beweis für die Klima Erwärmung

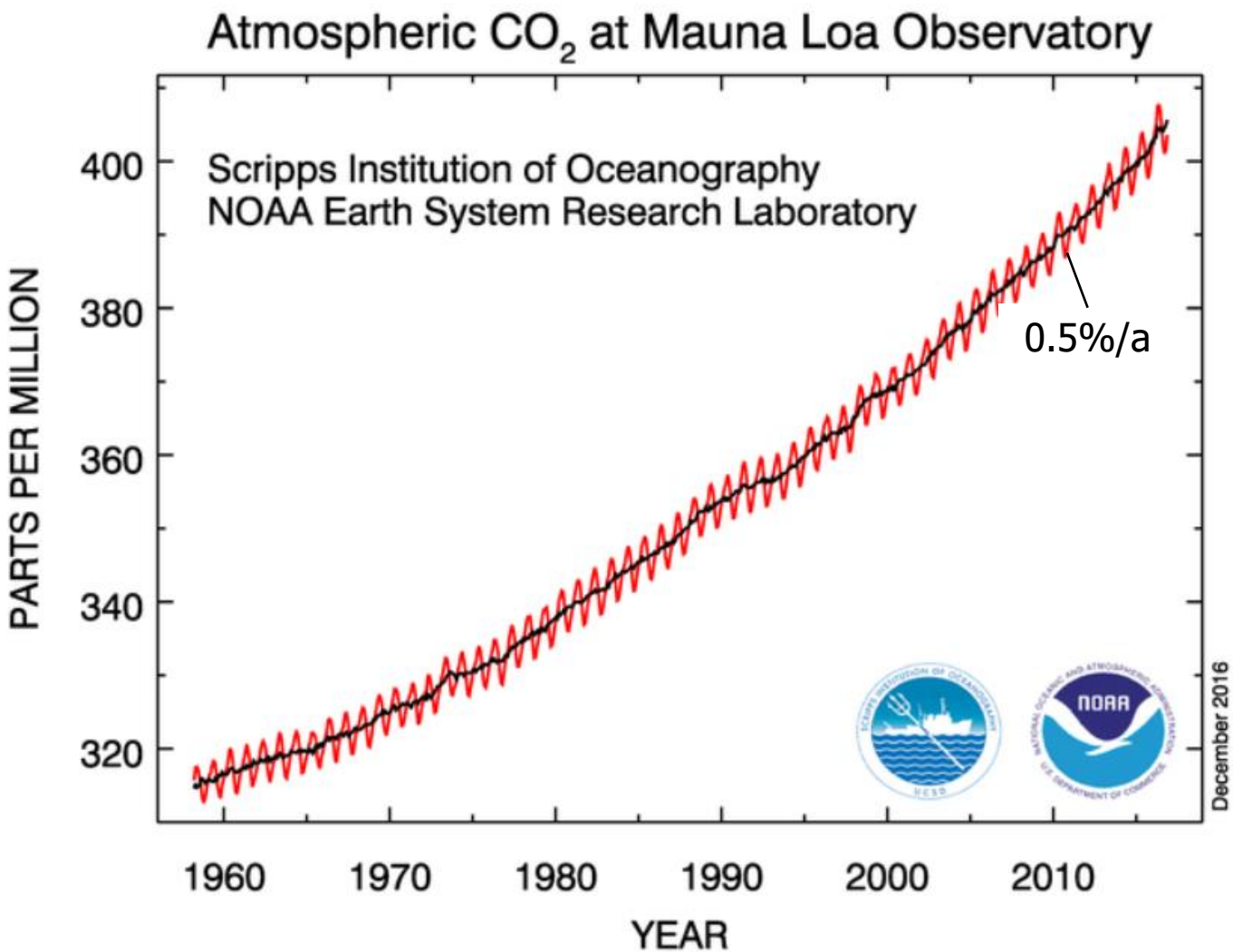
Prognosen für die nächsten 90 Jahre

- Global wir es 2 - 5^0 wärmer => **Ernteausfälle**
- heisse Sommer wie 2003 ....bald die Regel!
- weniger Regen, dafür öfters **Überschwemmungen !**
- das arktische Eis schmilzt , Meeresspiegel steigt 30-60 cm

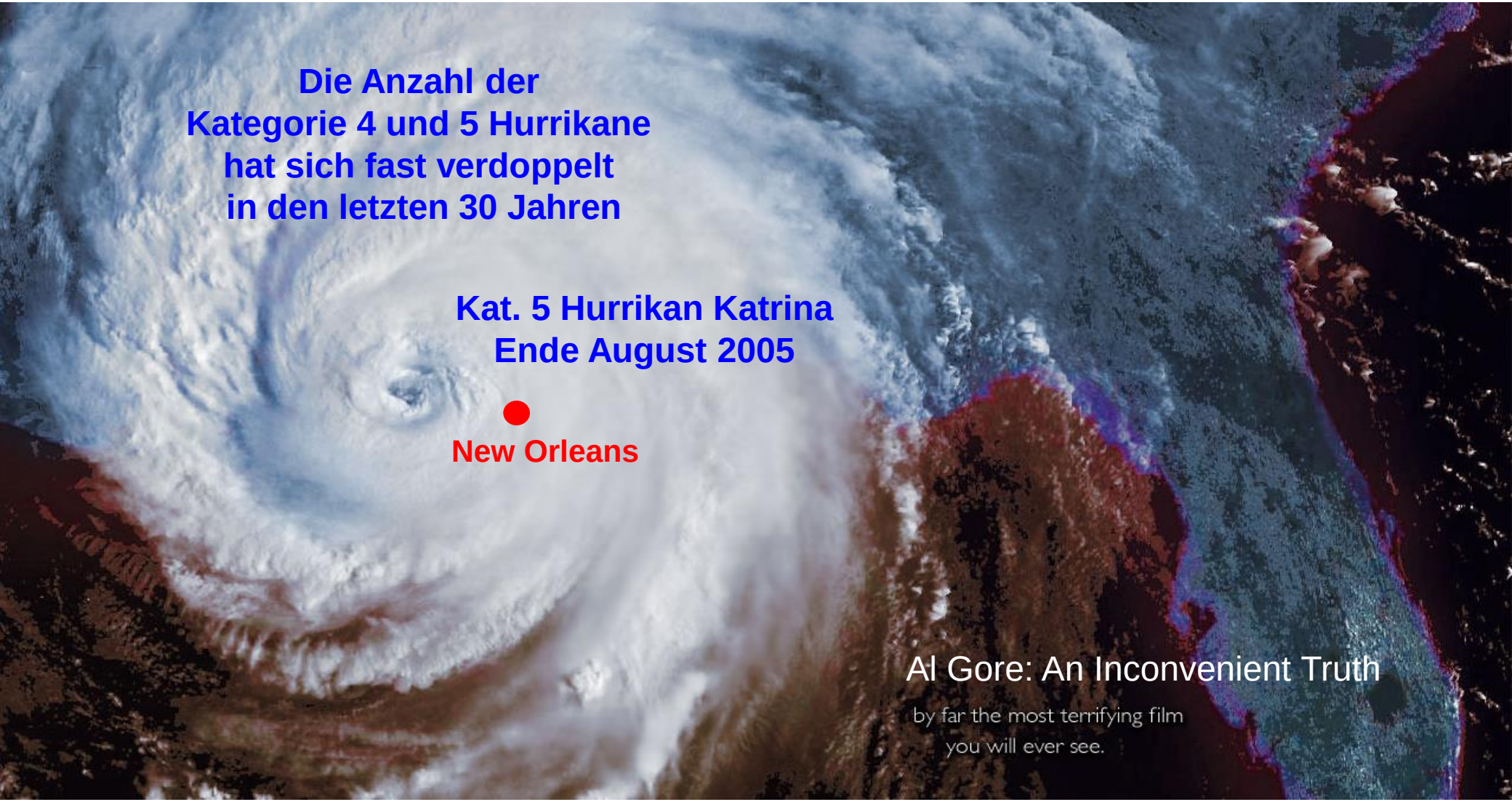
CO_2 Konzentration in der Atmosphäre



Die CO_2 Konzentration steigt ungebremst weiter



Hurrikan, Wirbelsturm, Taifun, Zyklon



Emanuel, K. 2005. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. Nature 436: 686-688.

Morteratsch Gletscher (Engadin)

Bild: Sammlung Gesellschaft für ökologische Forschung

Krisenpotential

- **Übervölkerung** (Afrika !)

  => Migrationsdruck von Süden nach Norden

- **Hunger** (jeder 6.Tote ein Opfer davon)

- **Energie** , Vorräte an Öl und Gas werden knapp

  => Benzin wird extrem teurer => Elektro-auto

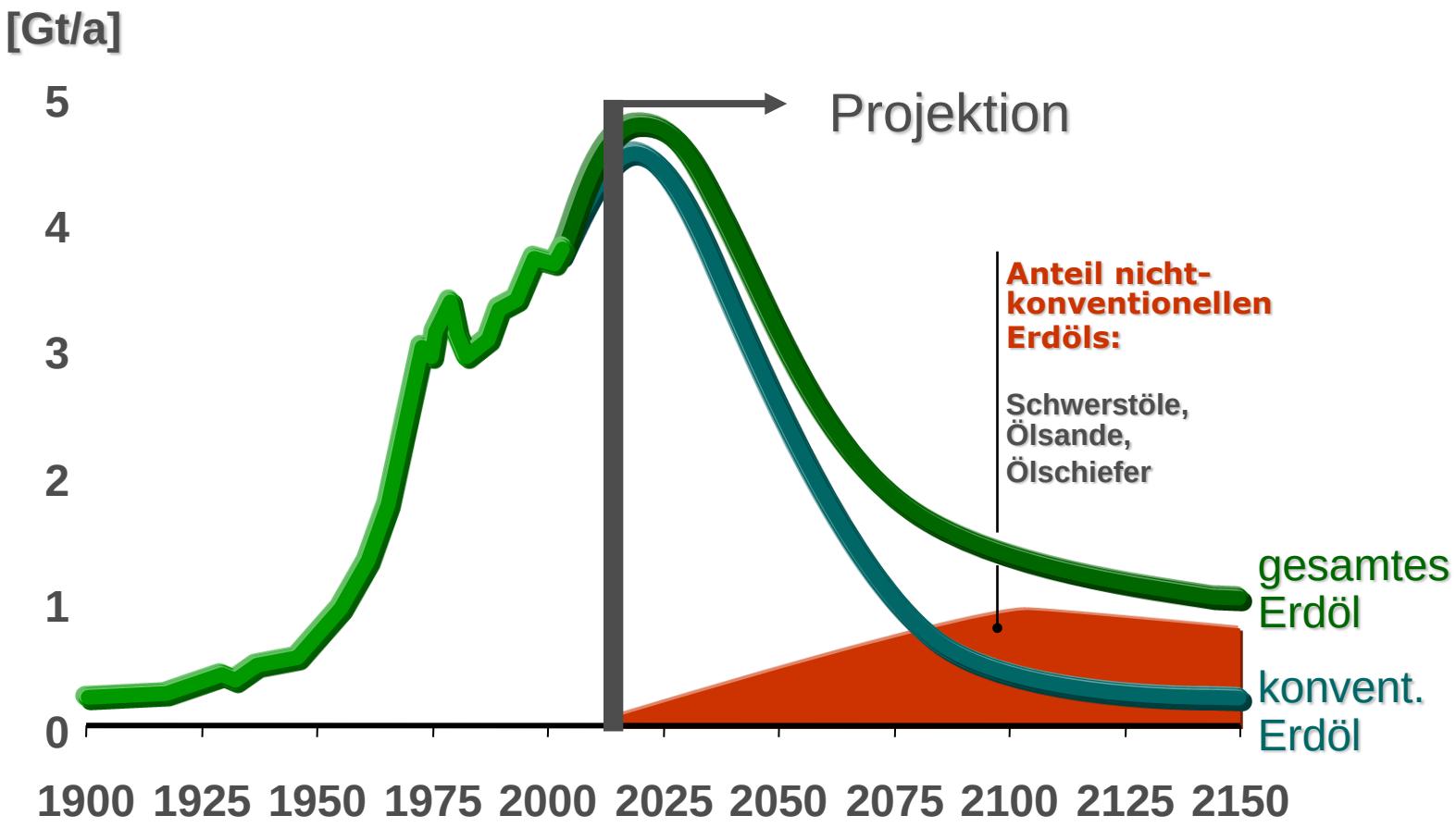
  - Kampf um **Wasser** und **Energie**

=> Potential für Kriege

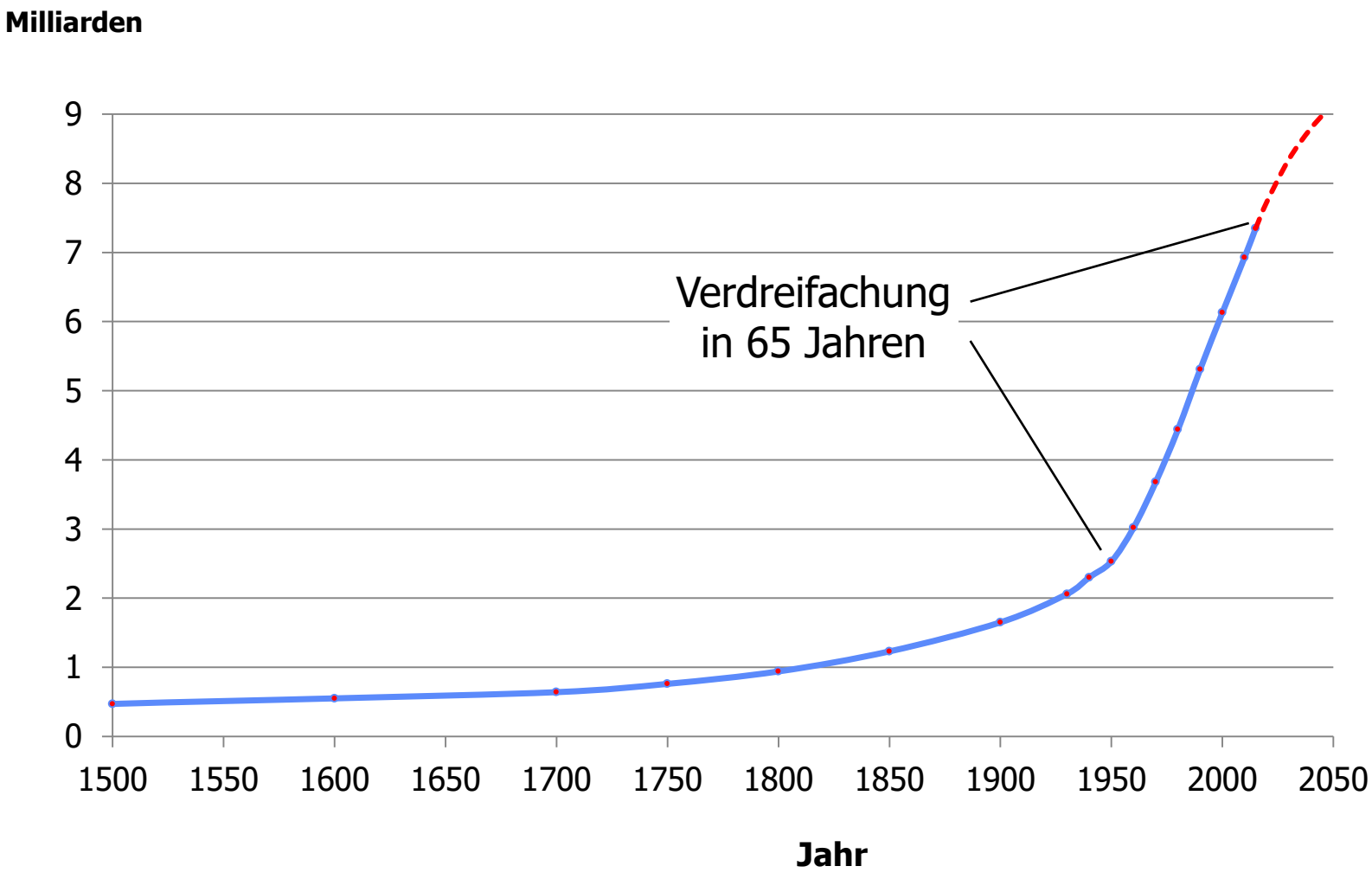
Peak Oil

Irgendwann ist Schluss

Weltweite Erdölförderung 1900 – 2150



Explosion der Weltbevölkerung



Antimaterie als Energie Lösung?

Besuch eines Satelliten
von einer Galaxie mit Antimaterie :

10 Tonnen Antimaterie

$$E = 2 \cdot mc^2 = 1.8 \cdot 10^{21}\ J$$

1. mit kontrollierter Annihilation:

   Energieversorgung der gesamten Erde für 3 Jahre!

2. Unkontrollierte Annihilation:

   Energie von 30 Millionen Hiroshima Bomben!!

Wohin treibt er?