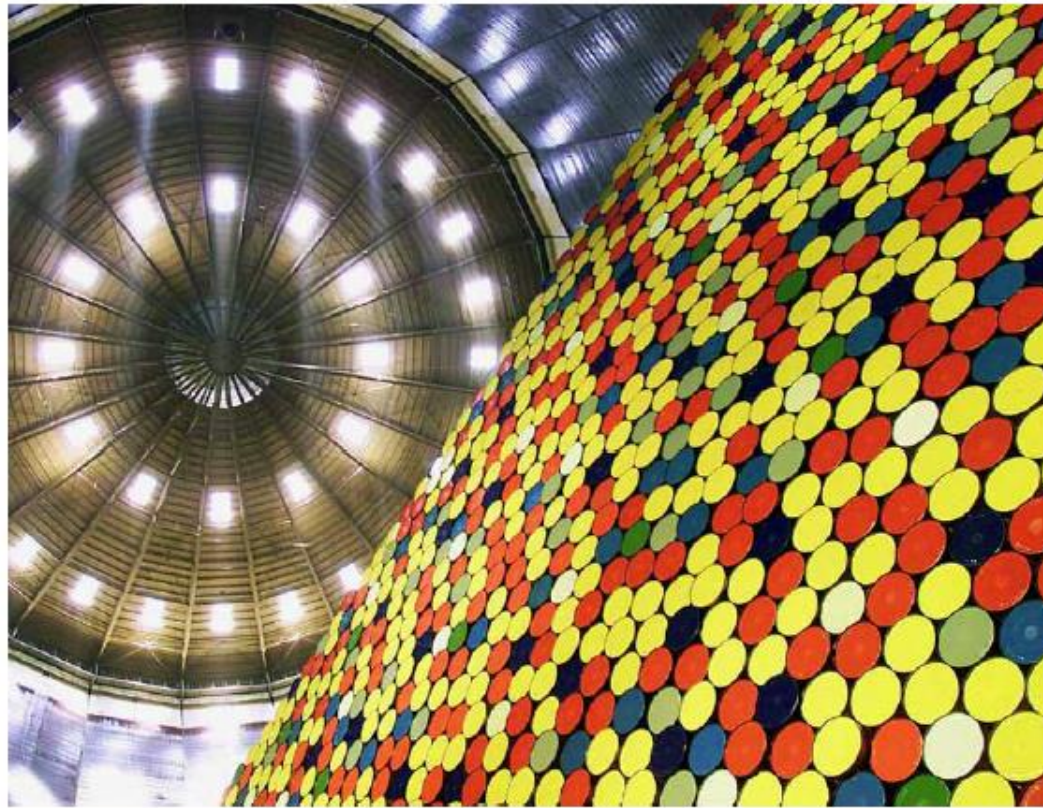




Ende  
Wie sie

el:  
ukunft



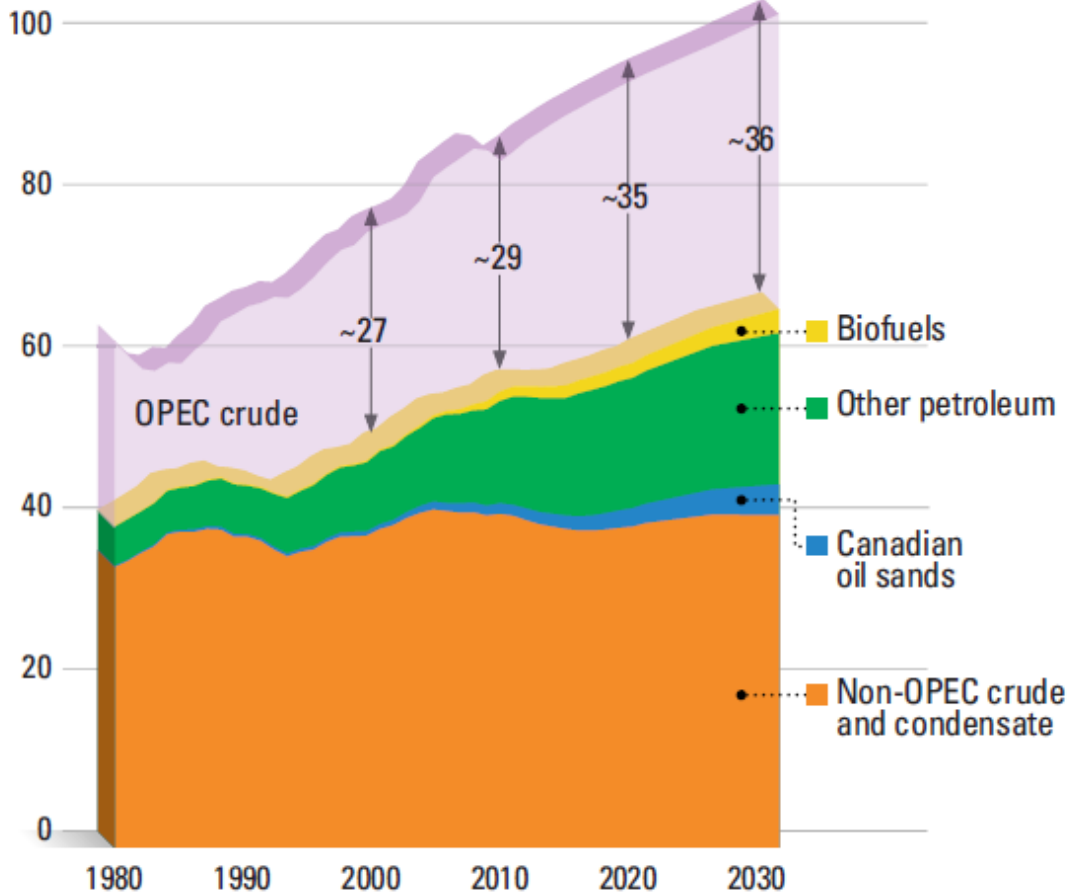
Energiewende: Herausforderung für die Menschheit | Klimawandel: Missachtete Gewissheit | Werkstoffe: Feuerfest und schadstoffarm | Elektroautos: Mit dem Akku auf die Überholspur | Fotovoltaik: Sonnige Aussichten | Energiespeicher: Die Gasometer von morgen | Stoffwechsel: Der selbstsüchtige Energiefresser im Kopf

# Peak Oil?

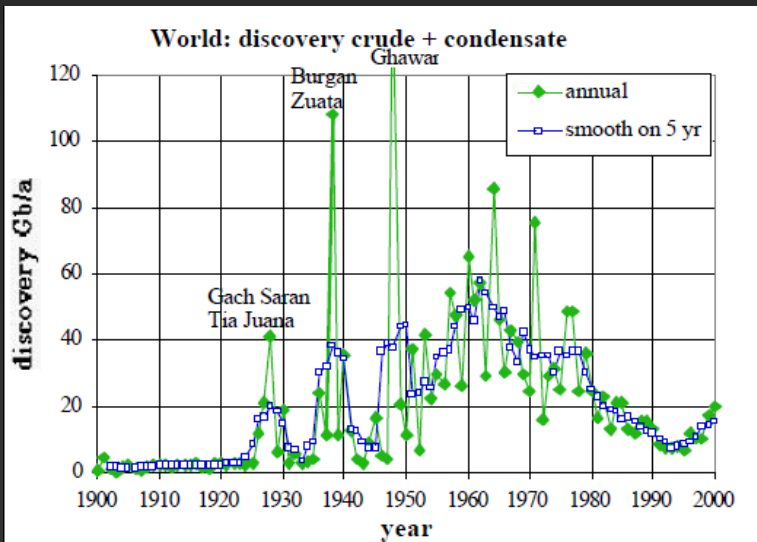
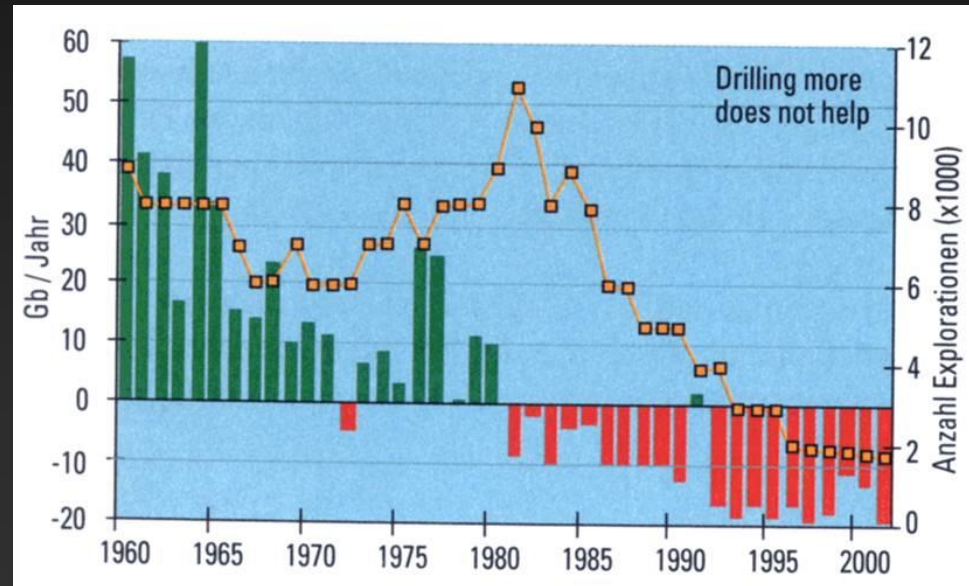
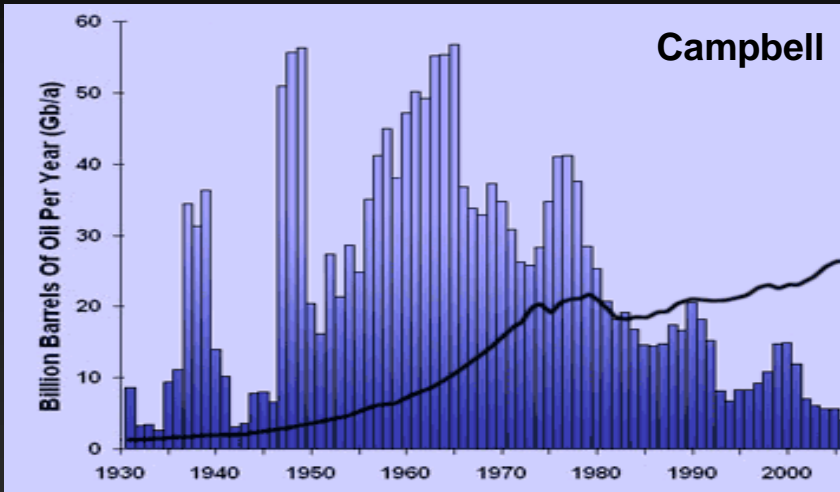


## Liquids supply

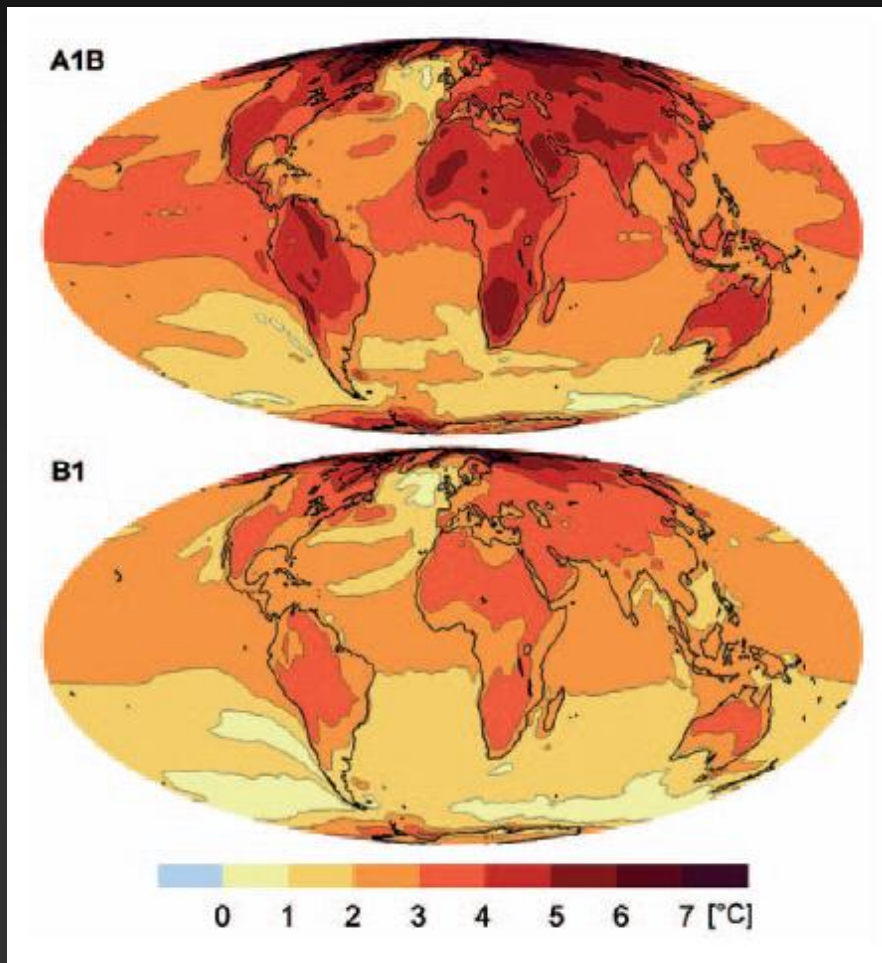
Millions of oil-equivalent barrels per day



# Ölfunde gehen zurück



# Zusätzliche Herausforderung: Klimawandel



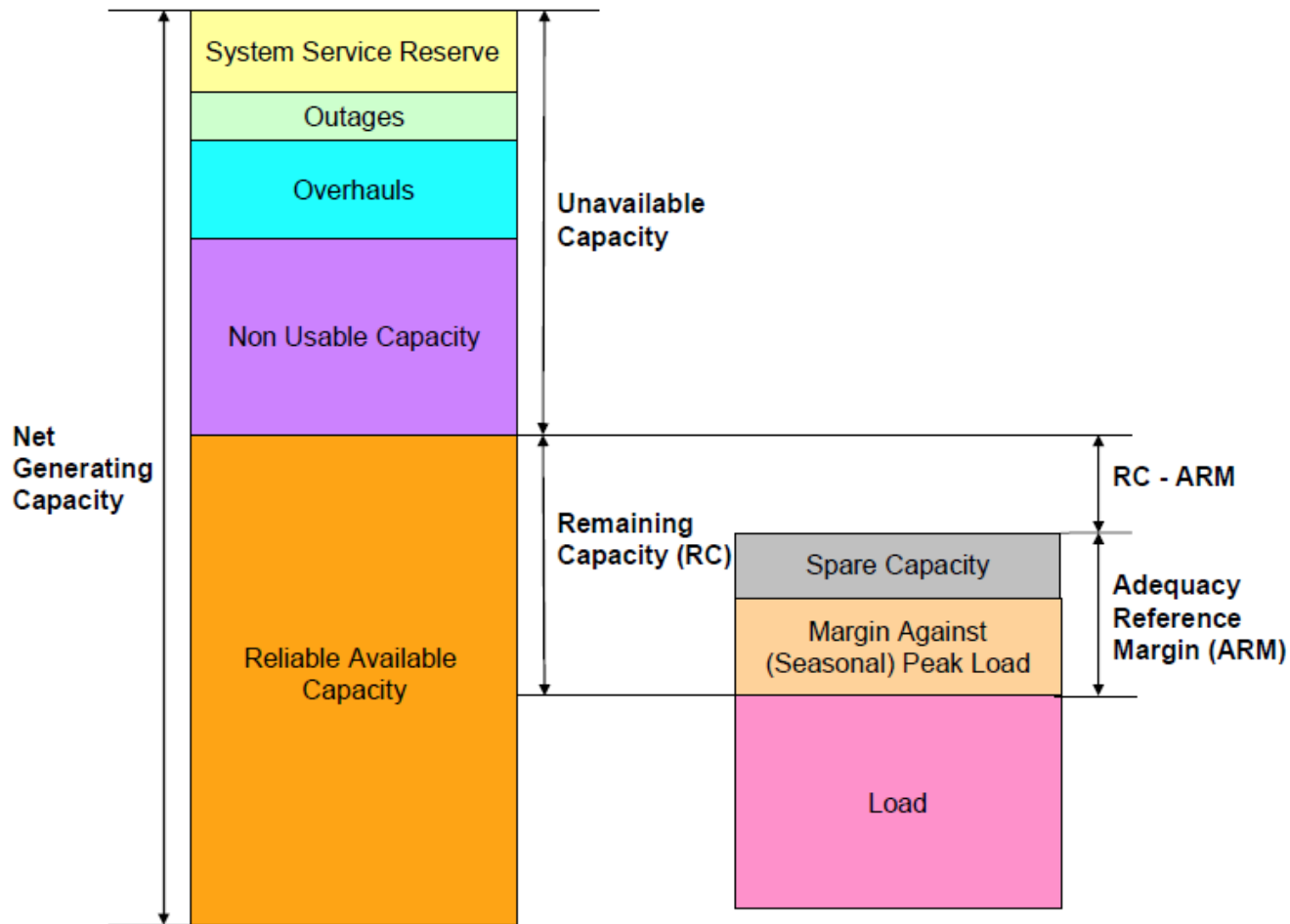
Errechnete Temperaturdifferenz  
zwischen 2071-2100 und 1961-  
1990 für zwei unterschiedliche  
Szenarien (Quelle: MPI für  
Meteorologie)

# Energie und Leistung

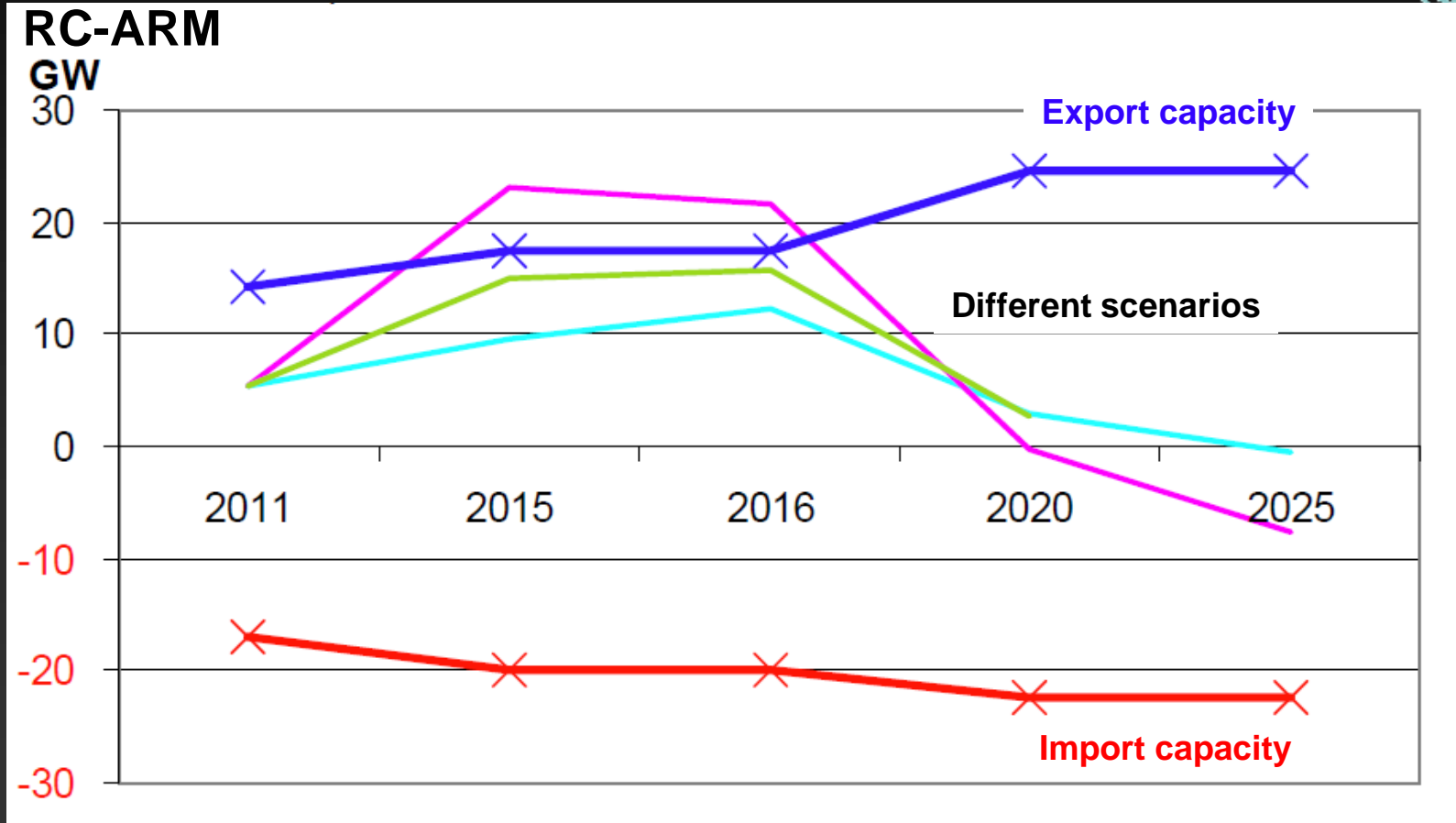


- **Leistung gemessen in Watt, „W“  
(kW = 1000 W, MW = 1 Mio. W, GW = 1 Mrd. W)**
- **Energie gemessen in Kilowattstunden, „kWh“, oder Joule, „J“  
(1 kWh = 3 600 000 J)**
- **1 J erhitzt zehn Liter Wasser um etwa 0.000024 °C**
- **1 kWh erhitzt zehn Liter Wasser um etwa 86 °C**
- **Ein AKW-Kraftwerksblock (1200 MW) produziert in einer Stunde 1.2 Mio. kWh, d.h. bei Strompreis von 0.2 €/kWh für etwa 240.000 € Energie**
- **Eine große Windturbine (5 MW) produziert in einer Stunde 5000 kWh, d.h. für etwa 1000 € Energie**
- **Deutschlands Primärenergieverbrauch: ~ 14 EJ (etwa 3.9 Bio. kWh)**
- **Weltprimärenergieverbrauch: ~ 435 EJ (etwa 120 Bio. kWh)**

# Haben wir genug Leistung ohne Kernkraftwerke?



# Analyse für Winterreferenztag



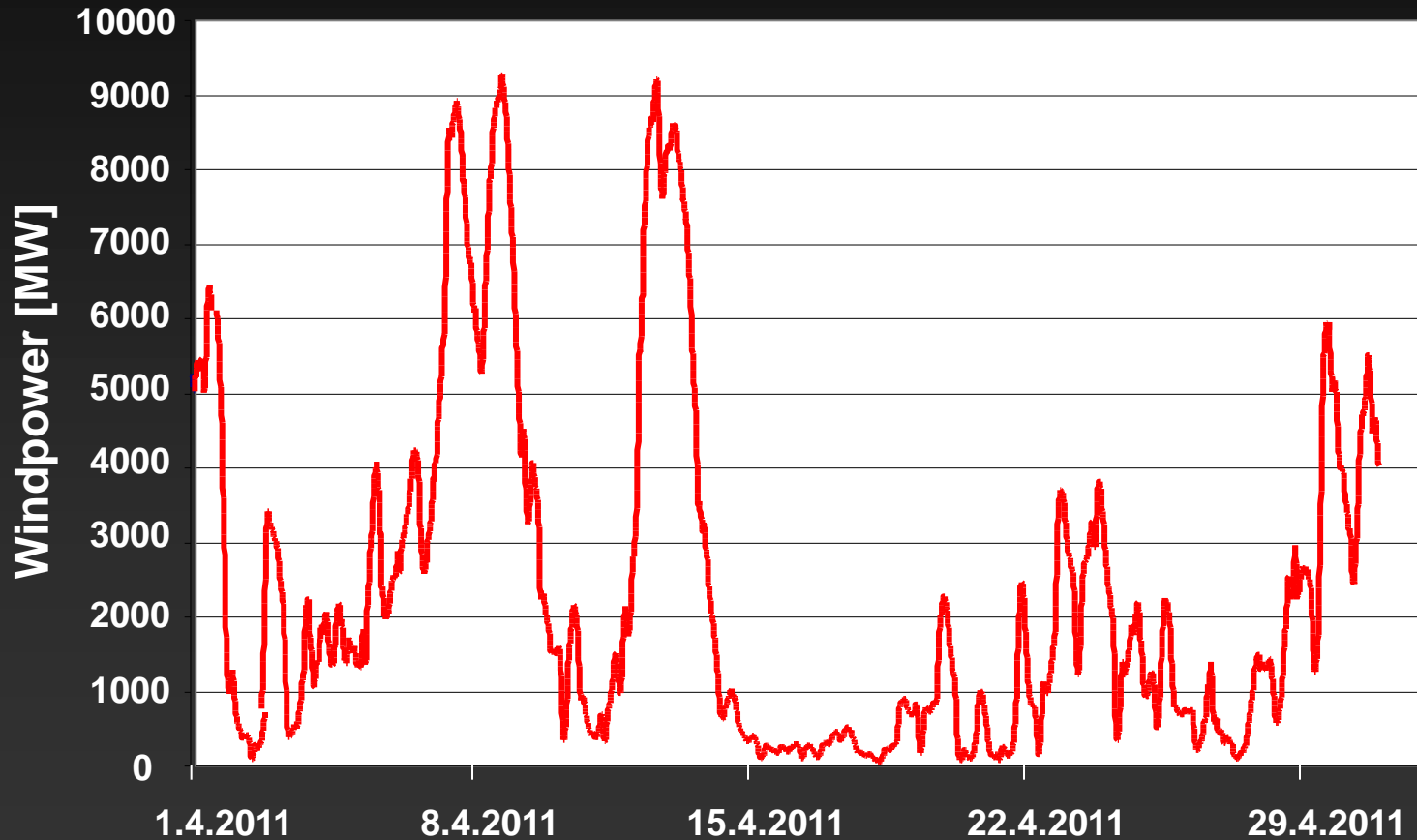
**Resultat: RC-ARM winter + 1.4 GW, summer + 0.4 GW**

# Deutschlands Regelzonen



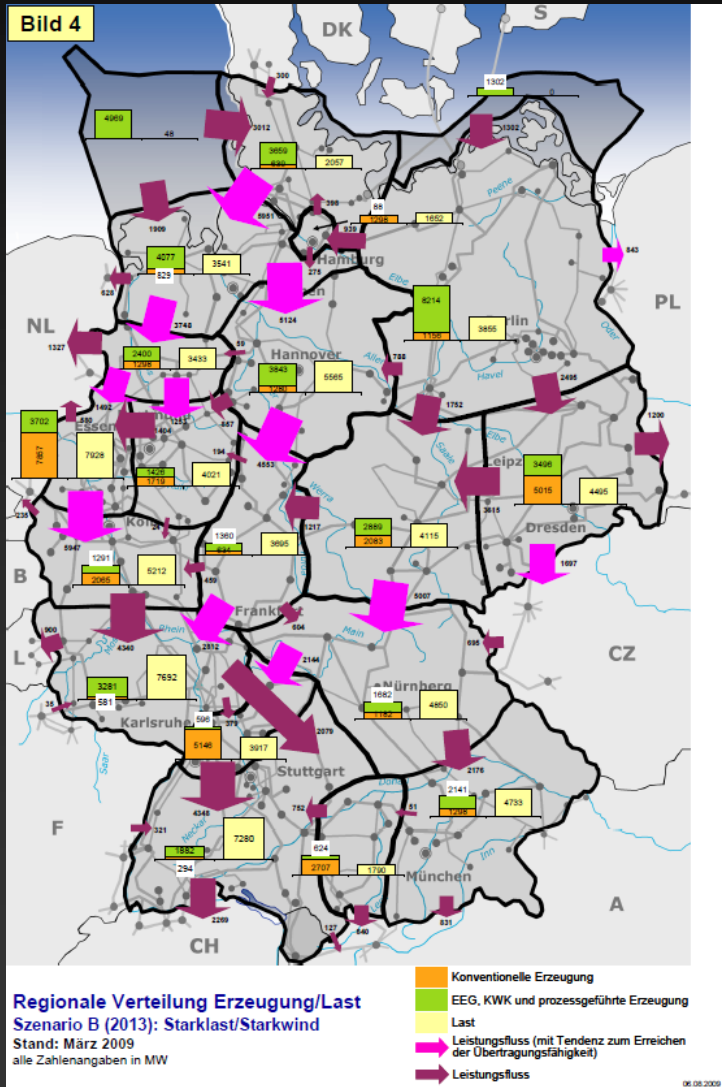


# Windenergiefluktuationen in der 50 Hertz Regelzone



Windpower in 50 Hertz control area April 2011

# Netzstabilität

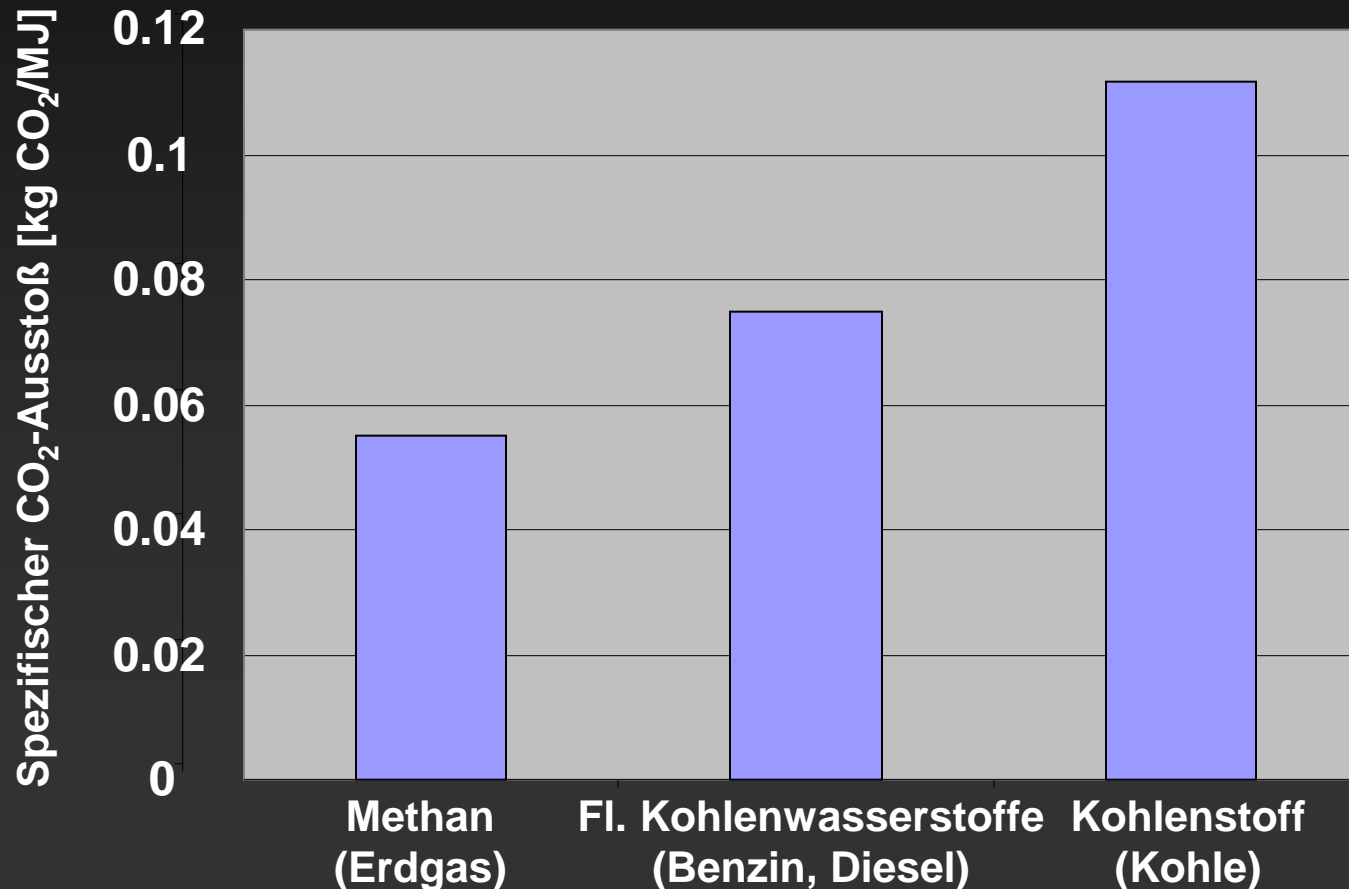


- Stromleitungen für regional nicht balancierte Produktion und Verbrauch elektrischer Energie fehlen
- Große Kraftwerke fehlen für Blindleistungsregelung
- Detailanalyse der Bundesnetzagentur zeigt, dass ein „außergewöhnliches Fehlerereignis“ und gleichzeitig Ausfall von entweder Brokdorf oder Philippsburg gerade noch beherrscht werden könnten.

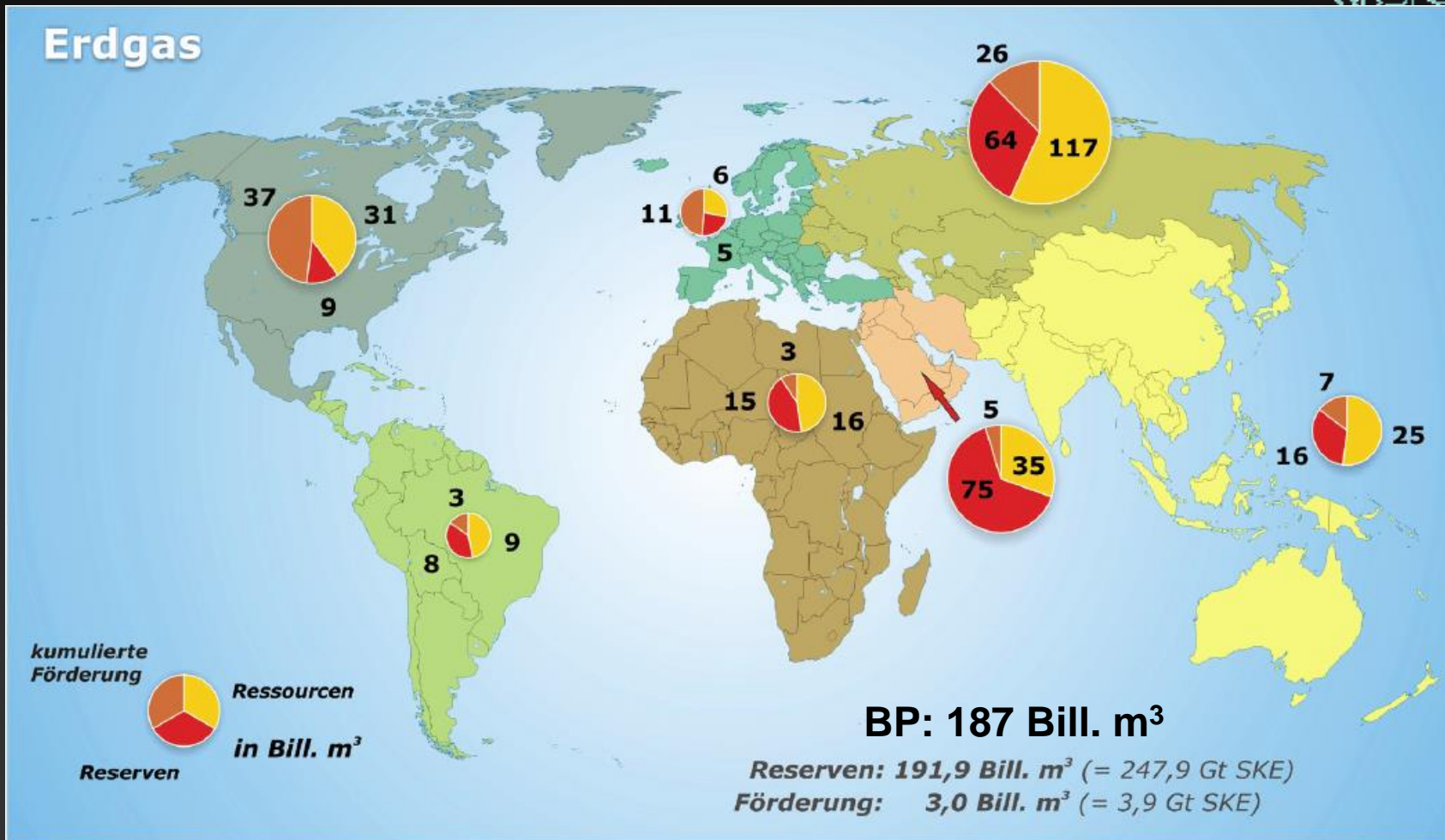
# Schon noch einige Jahrzehnte: Fossile Energieträger



Spezifischer CO<sub>2</sub>-Ausstoß unterschiedlicher fossiler Energieträger, Heizwert, ohne Umwandlungsverluste



# Verfügbare Energie: Erdgas



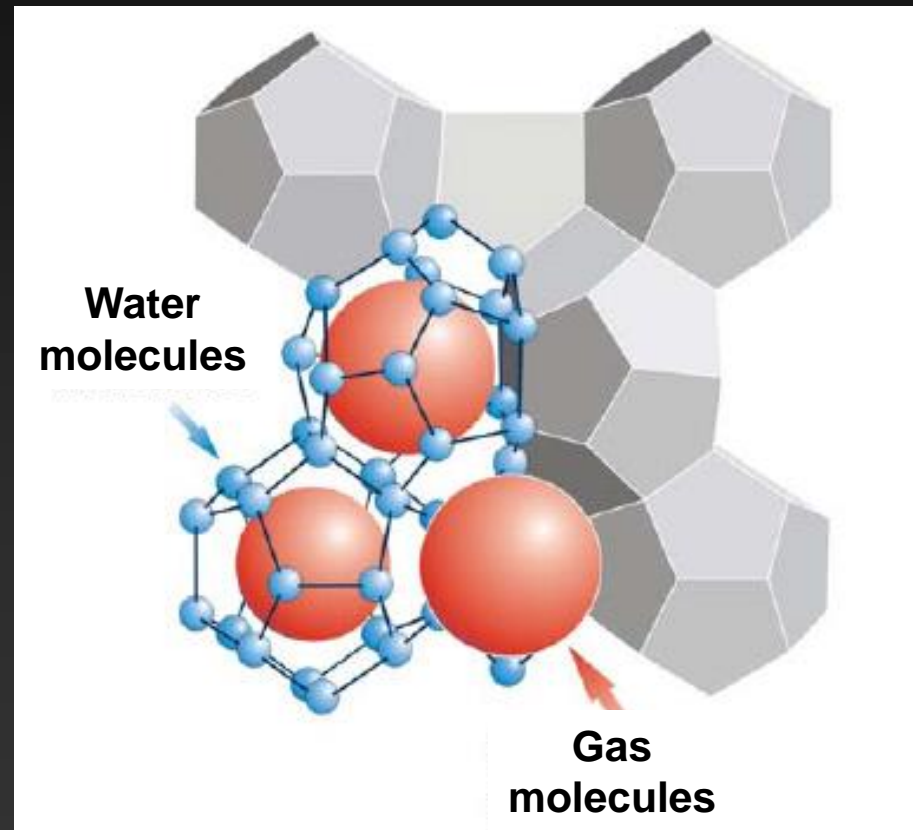
# Unkonventionelles Gas



- Schiefergas
- Kohleflözgas
- Tight Gas (aus Formationen geringer Durchlässigkeit)

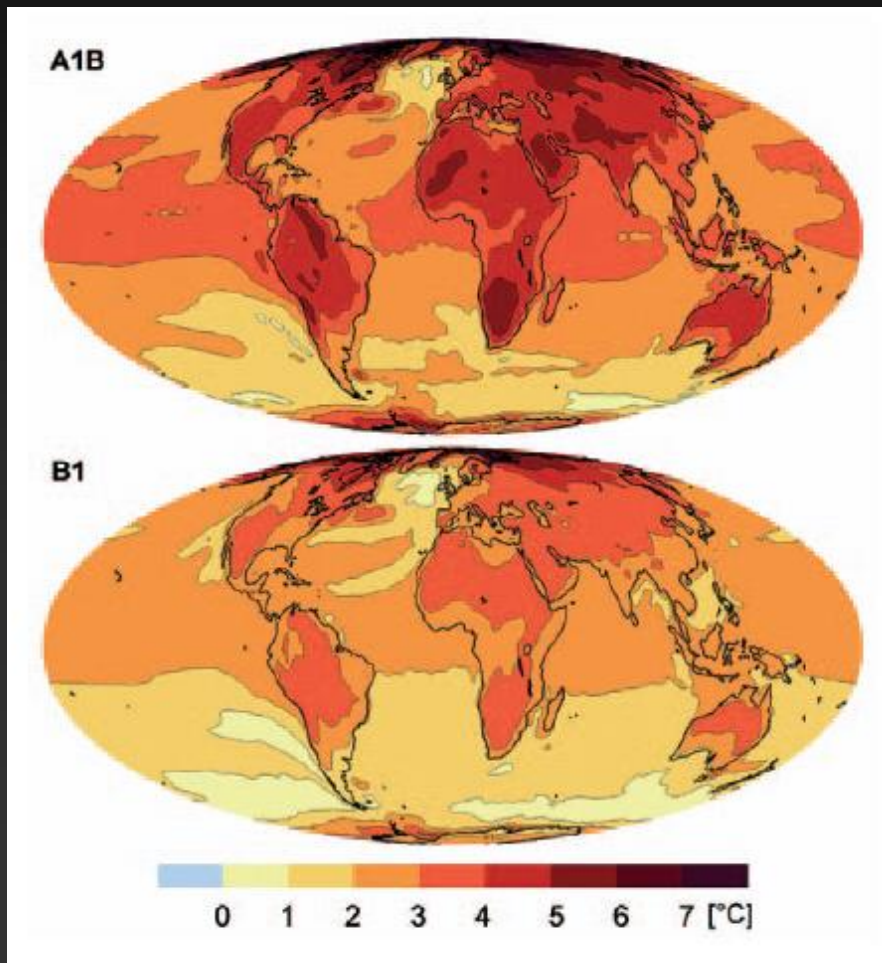
Energieträger	Maßeinheit	Reserven (s. linke Spalte)	EJ	Ressourcen (s. linke Spalte)	EJ
Shale Gas	Bill. m <sup>3</sup>	1,7 <sup>5)</sup>	65 <sup>5)</sup>	456 <sup>6)</sup>	17 329 <sup>6)</sup>
Tight Gas	Bill. m <sup>3</sup>	1 <sup>5)</sup>	46 <sup>5)</sup>	210 <sup>6)</sup>	7 970 <sup>6)</sup>
Kohleflözgas	Bill. m <sup>3</sup>	2	80	254	9 652
Erdgas in Aquiferen	Bill. m <sup>3</sup>	–	–	800	30 400
Gashydrat	Bill. m <sup>3</sup>	–	–	1 000	38 000

# Eine große Ressource: Gashydrate



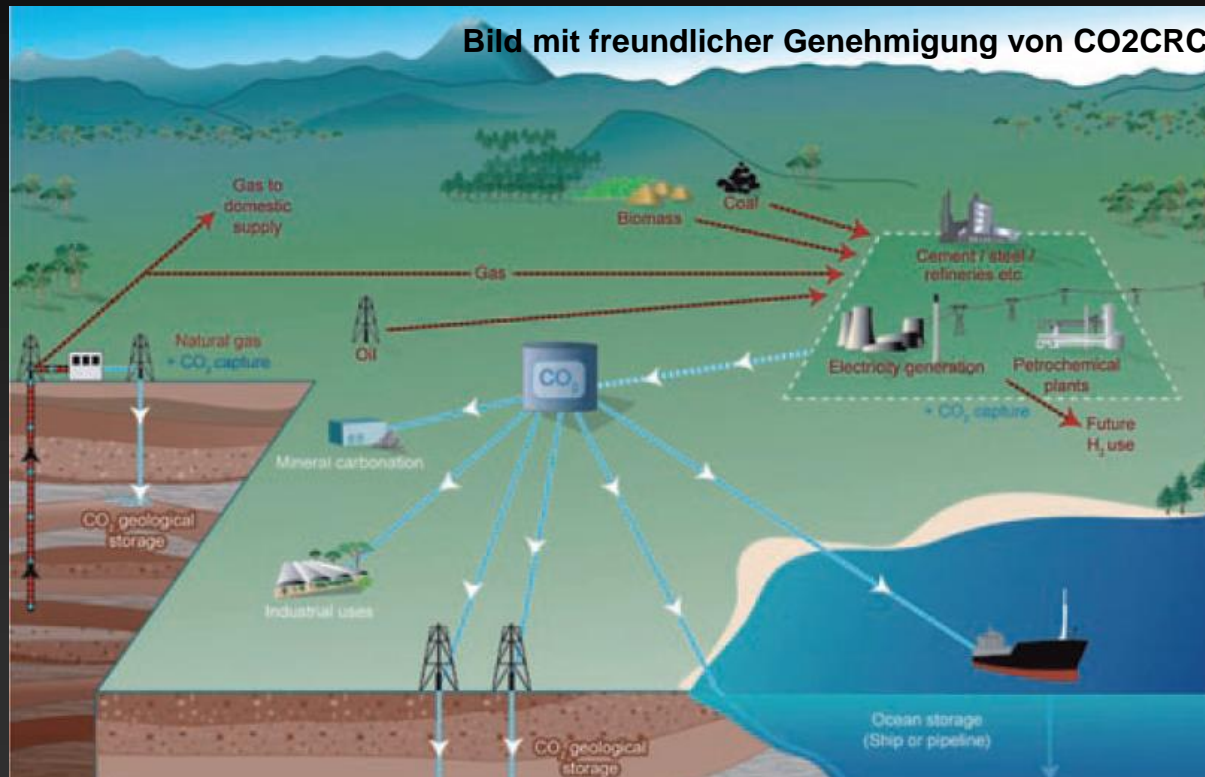
**In Permafrostböden und auf dem Ozeanboden**

# Zusätzliche Herausforderung: Klimawandel



Errechnete Temperaturdifferenz  
zwischen 2071-2100 und 1961-  
1990 für zwei unterschiedliche  
Szenarien (Quelle: MPI für  
Meteorologie)

# Carbon dioxide capture und sequestration (CCS) als Lösung?



Drei Projekte  $> 10^6$  t:

Norwegen (saliner Aquifer), Kanada (EOR), Algerien (Gasfeld)

Abtrennung durch Aminwäsche oder Adsorption

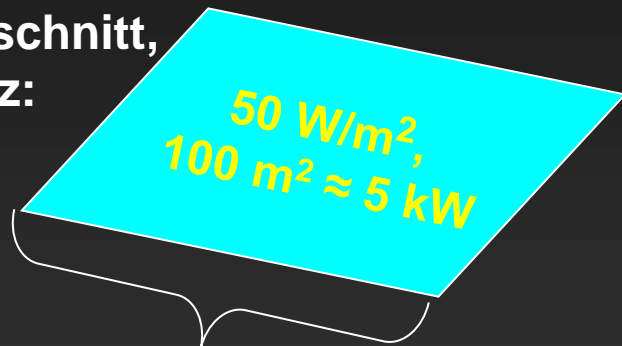
Neue Kraftwerkstypen (Oxyfuel, IGCC) und Abtrennung



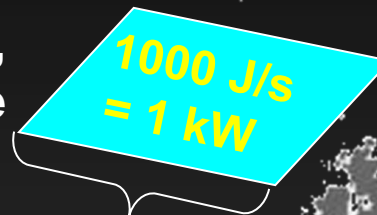
# Im Prinzip haben wir weltweit ausreichend Energie...



Sahara Tag und Nacht Durchschnitt, 10 % Effizienz:



Sahara-Tag, Sonne



10 m

ca. 835 km

1 m



L-B-Systemtechnik

Quelle: LBST

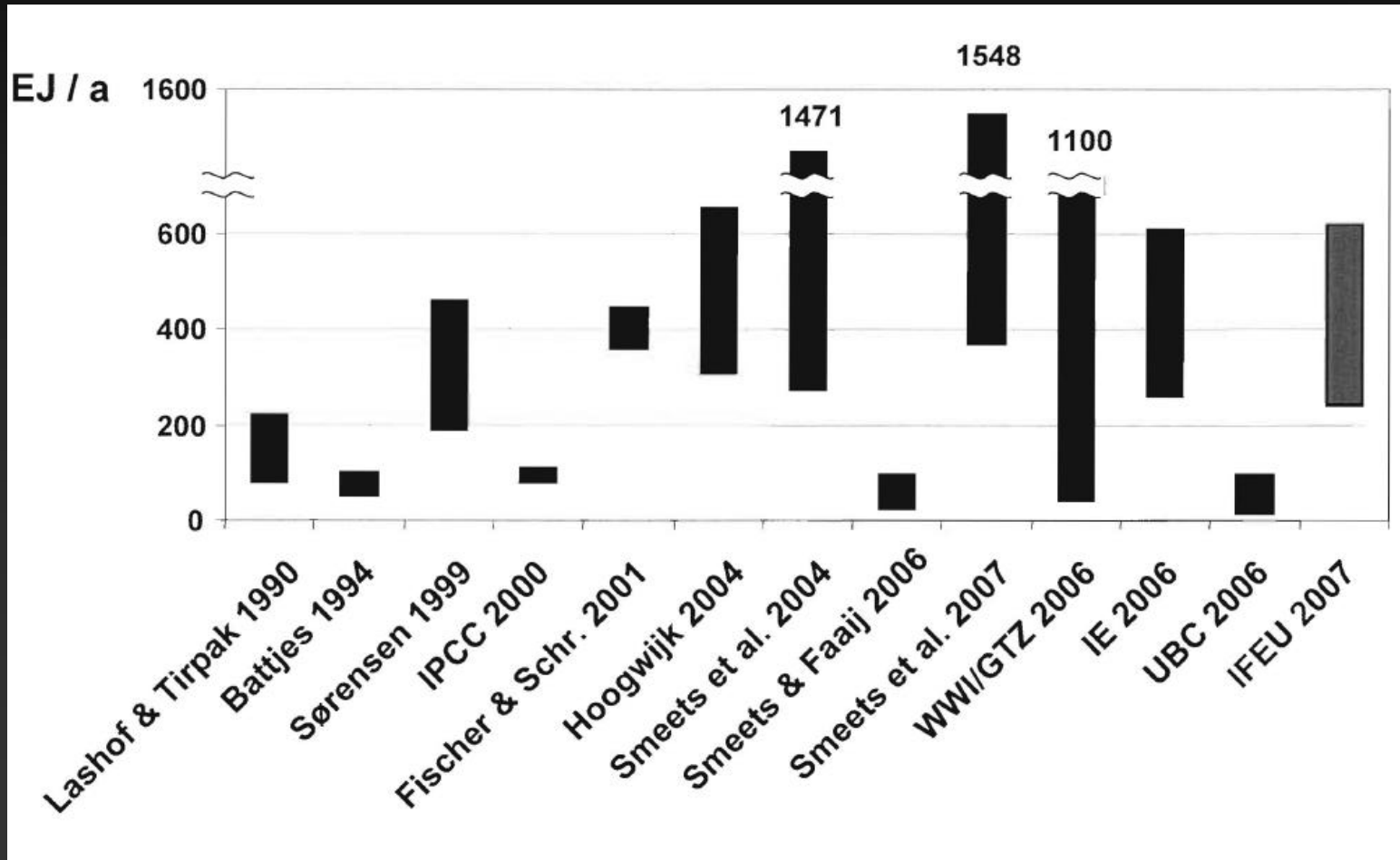
700.000 km<sup>2</sup> Wüstenfläche (Deutschland: 360.000 km<sup>2</sup>) reichen, um 7 Milliarden Menschen auf den EU-Energiestandard zu bringen (Primärenergie)

# ...und wo ist dann das Problem?



- **Unsere Infrastruktur muss völlig umgestellt werden**
- **Solarenergie ist relativ „verdünnt“**
- **Regenerative Energie fließt unständig**
- **Regenerative Energie wird primär als elektrische Energie „geerntet“**
- **Elektrische Energie lässt sich schlecht speichern**
- **Die Kosten sind zu hoch**

# Verfügbarkeit von Biomasse für energetische Zwecke



# Kraftstoffe aus Biomasse



- **Biokraftstoffe der 1. Generation**

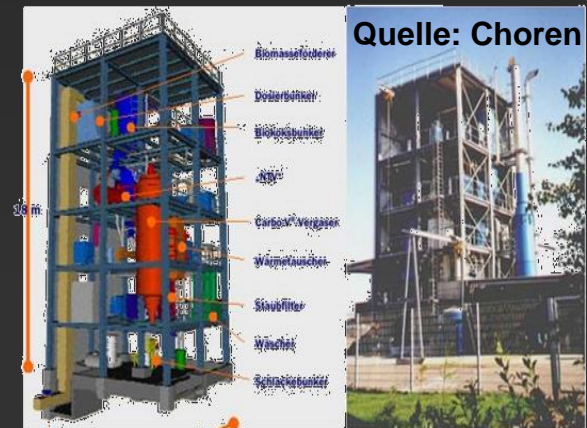
- » Zweifelhafte CO<sub>2</sub> Bilanz
- » Konkurrenz zu Nahrungs- und Futtermitteln



Foto: Ch. Pagenkopf

- **Biokraftstoffe der 2. Generation**

- » Hochtemperaturprozesse zur Erzeugung von „Synthesegas“, anschließend Fischer-Tropsch-Synthese oder Methanolsynthese
- » Depolymerisation von Cellulose zu Zucker, dann Vergärung



# Lignocellulose als Quelle für Energie und Rohstoffe

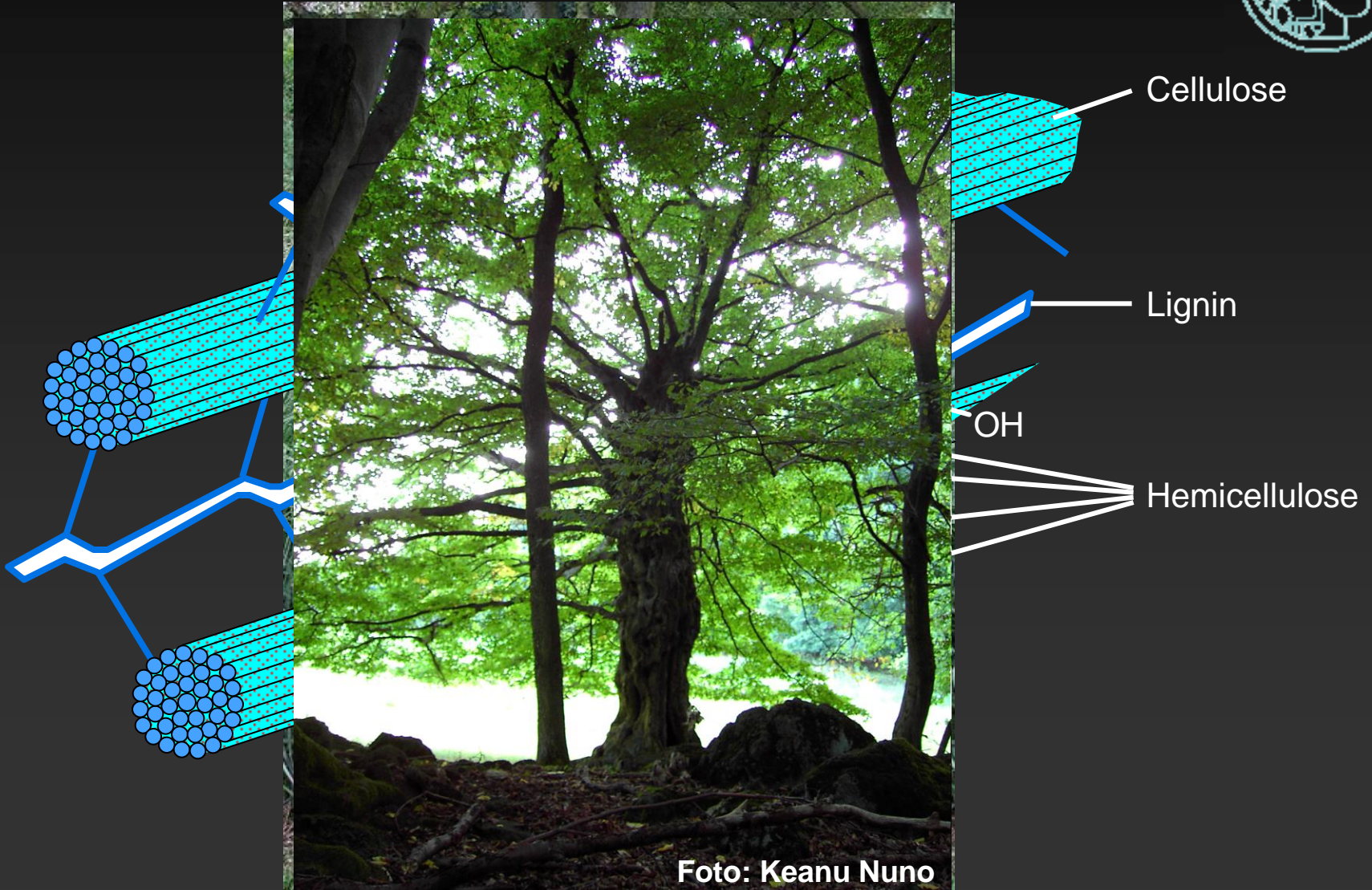
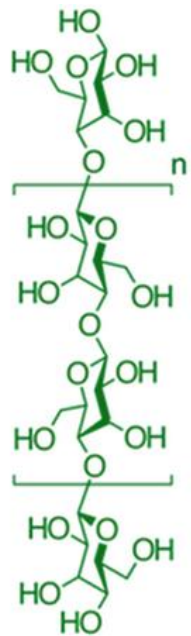
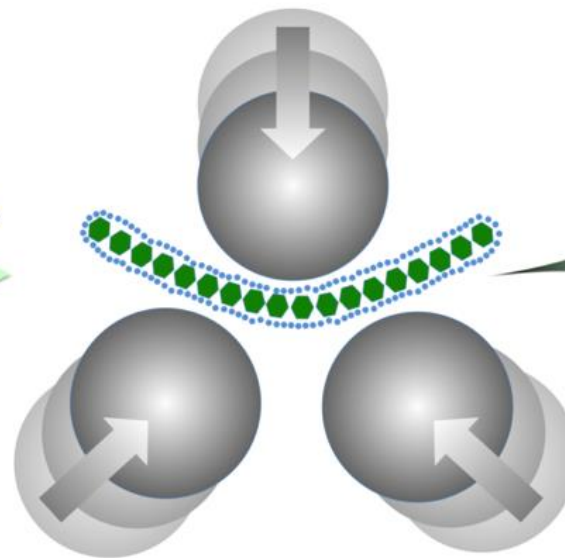


Foto: Keanu Nuno

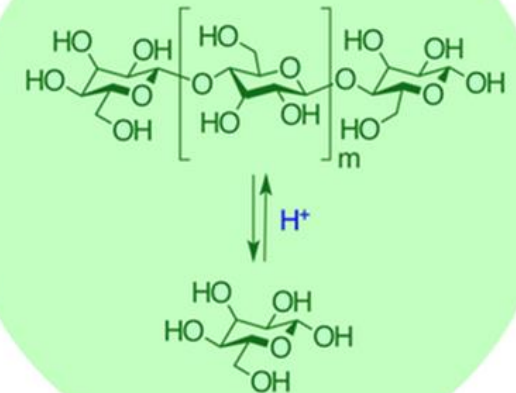
# Mechanisch unterstützte katalytische Depolymerisation von Cellulose



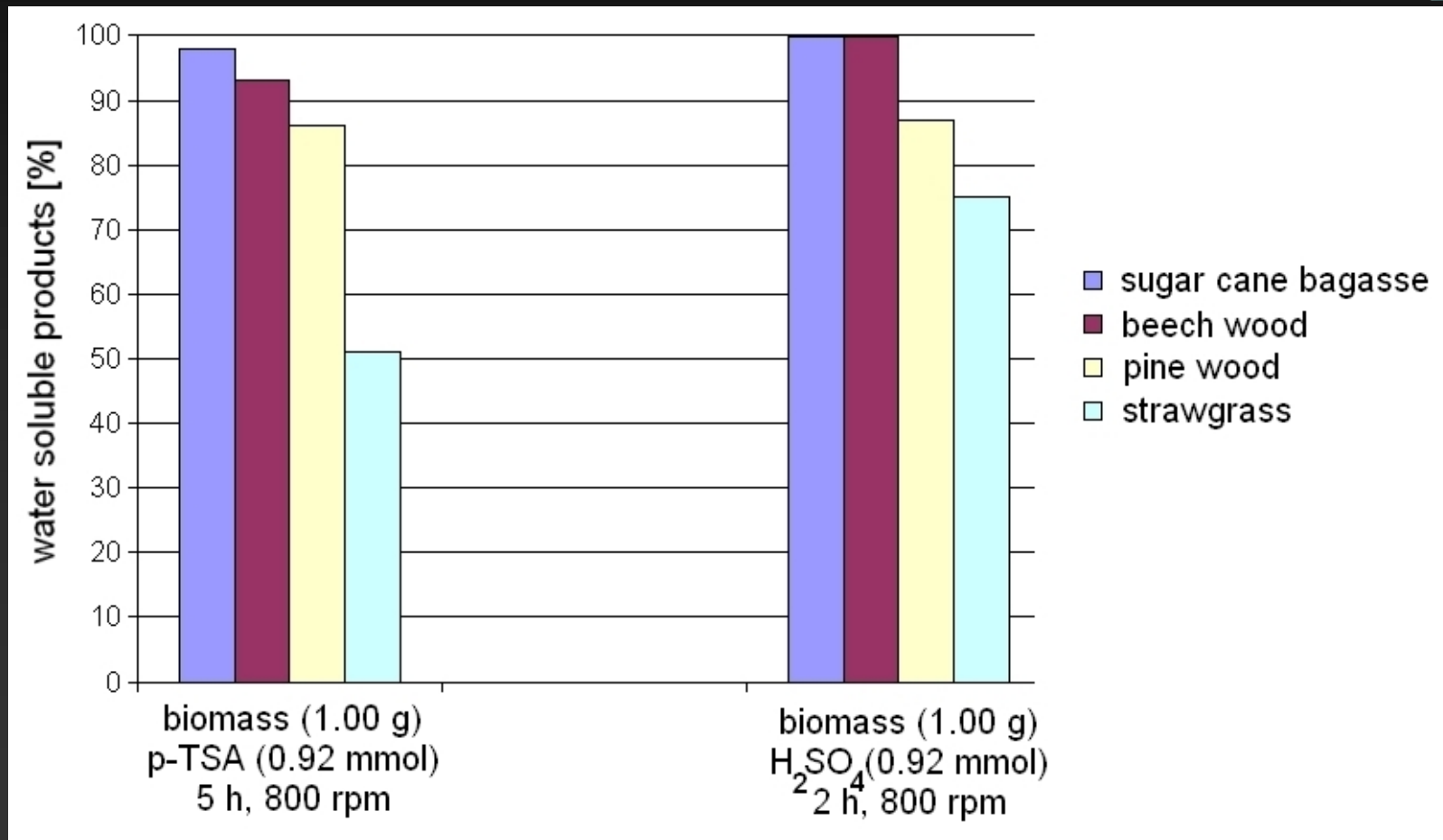
Impregnation



Ball mill



# Lignocellulose wird direkt zu wasserlöslichen Produkten



# Ein wichtiges Ziel: Solarzellen zu niedrigen Kosten



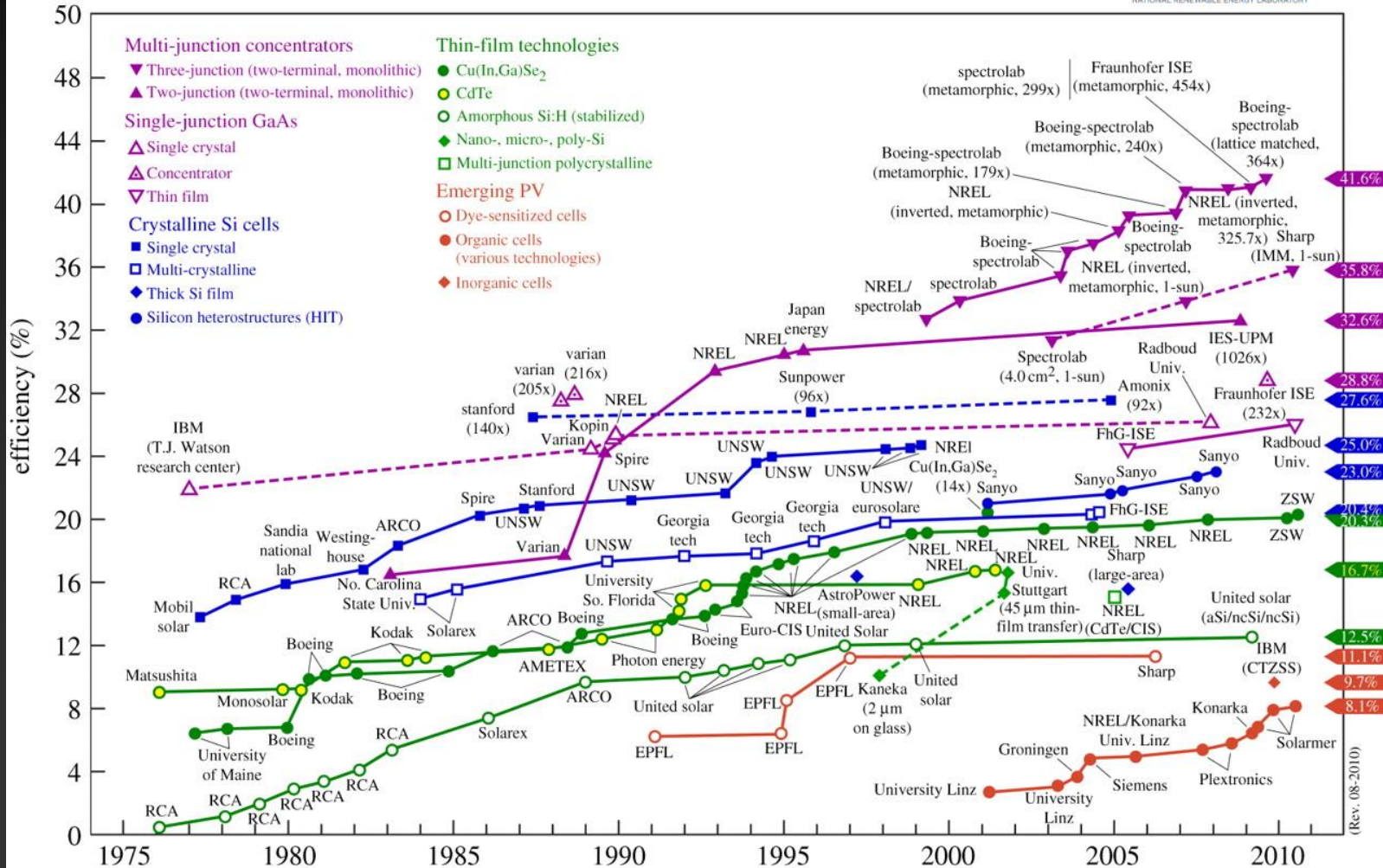
- Wesentliches Hindernis für den großflächigen Einsatz von Solarzellen sind die Kosten
- Multilayer Zellen mit adaptierten Bandgaps werden die Effizienz verbessern
- Entwicklung von kostengünstigen Zellen hängt von einfach prozessierbaren organischen Materialien ab



Foto: Georg Slickers



# Photovoltaik: Rekorderffizienzen

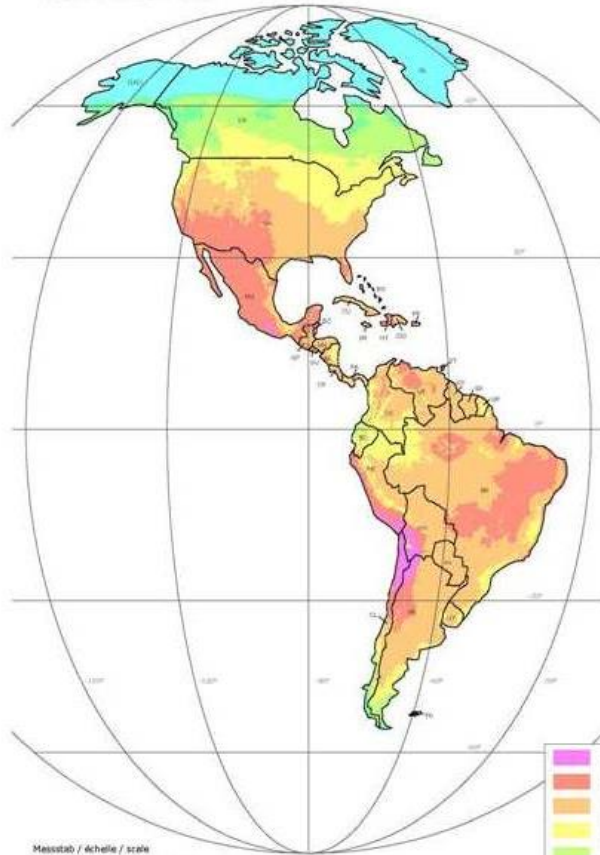


# Deutschland kein optimaler Standort



Jährliche solare Globalstrahlung

Mittelwerte 1981-2000



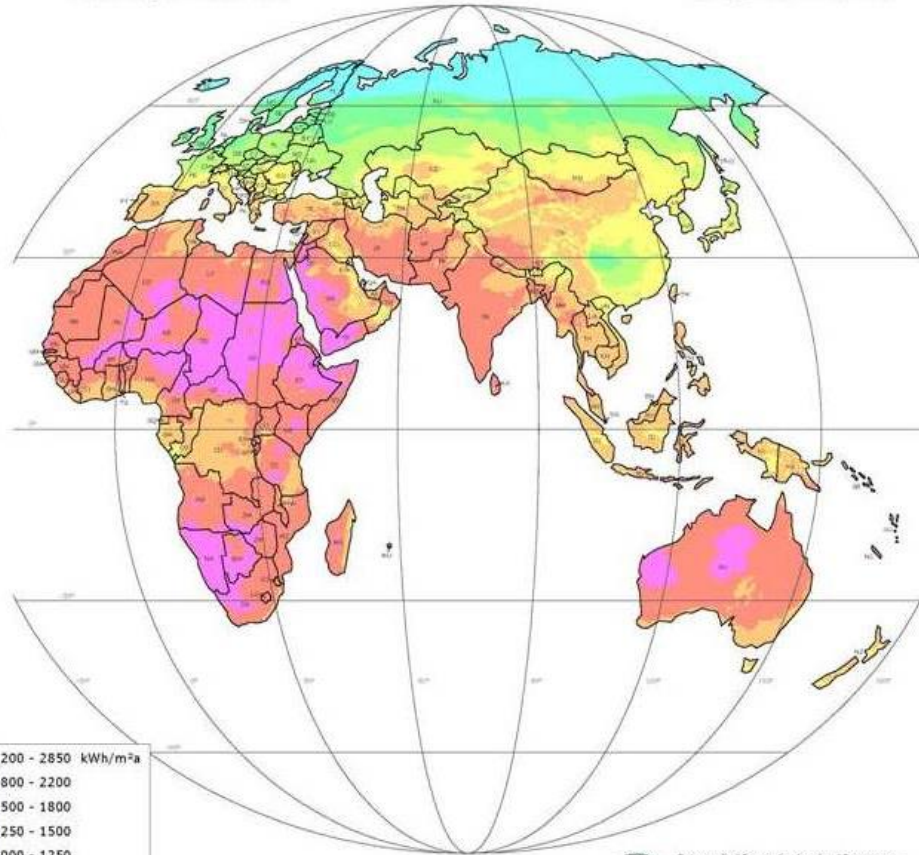
Massstab / échelle / scale

1000 0 1000 2000 3000 4000 5000 km

Mollweide-Projektionen / projections Mollweide / Mollweide projections  
Zentrale Meridiane / méridiens centraux / central meridians: 90° W / 75° E

Rayonnement global solaire annuel

Valeurs moyennes 1981-2000



Yearly solar global radiation

Average values 1981-2000



Datenquelle / Source des données / Data source:  
Meteonorm Version 6.0  
Used with permission of Meteotest, CH-3003 Bern  
© Copyright 2007/10: Max Boller, dipl. Ing. ETH  
Energie-Atlas Verlag, CH-5620 Bremgarten  
Schweiz / Suisse / Switzerland

# Dennoch...

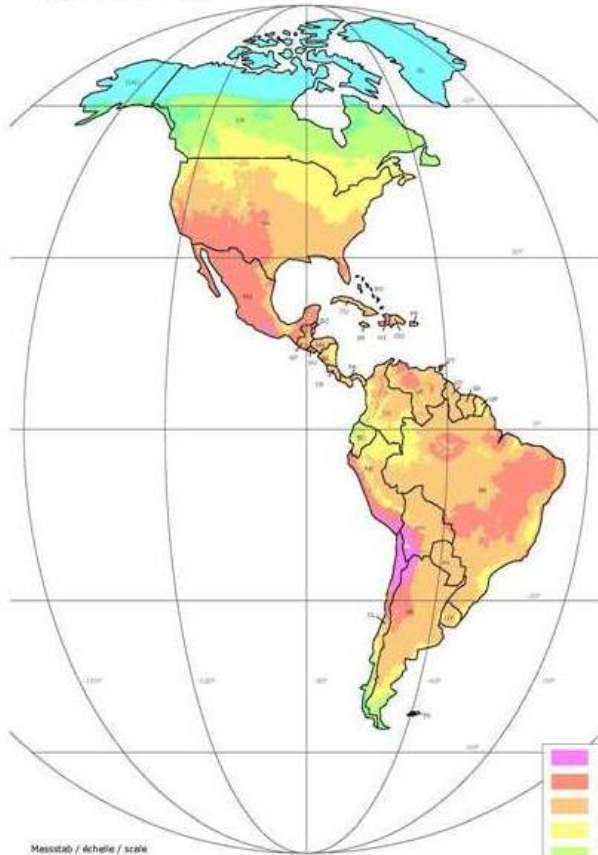


- **Installierte Leistung 2010 17.3 GW, 2011 ca. 25 GW**
- **Prognose 2015 knapp 40 GW**
- **Schwierig vorhersehbar aufgrund politischer Rahmenbedingungen**
- **Aber: Netzparität in Sicht**
- **Berücksichtigen: Nicht gesicherte Leistung Photovoltaik 90%!**

# Deutschland kein optimaler Standort



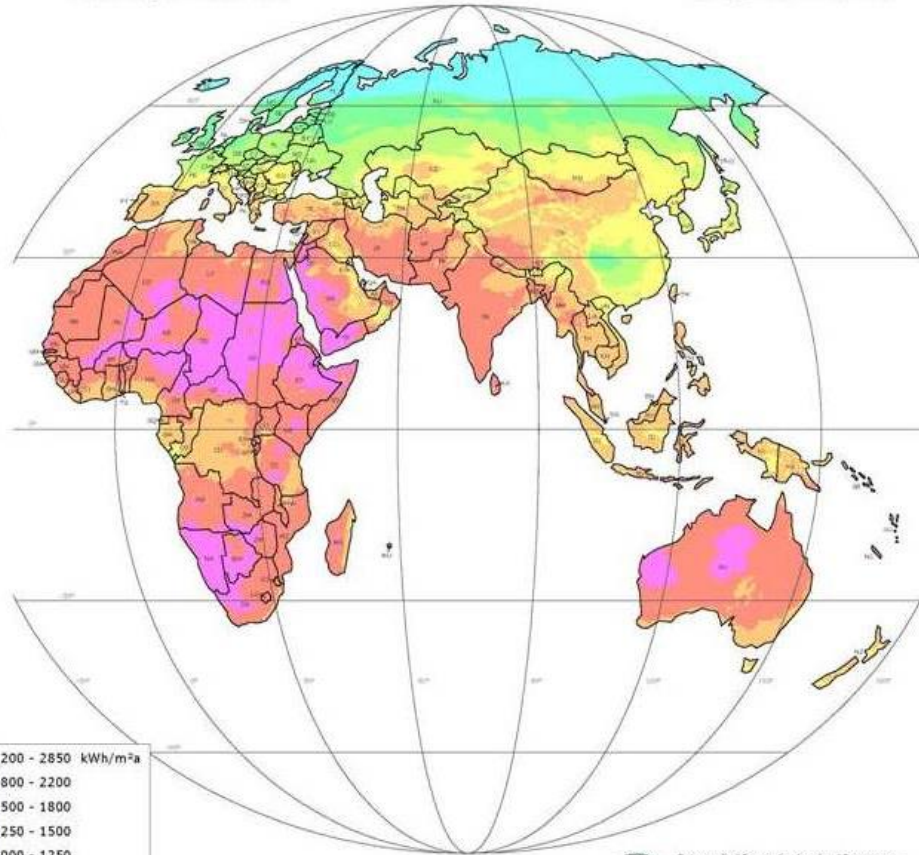
Jährliche solare Globalstrahlung  
Mittelwerte 1981-2000



Massstab / échelle / scale  
1000 0 1000 2000 3000 4000 5000 km

Mollweide-Projektionen / projections Mollweide / Mollweide projections  
Zentrale Meridiane / méridiens centraux / central meridians: 90° W / 75° E

Rayonnement global solaire annuel  
Valeurs moyennes 1981-2000



Yearly solar global radiation  
Average values 1981-2000



Datenquelle / Source des données / Data source:  
Meteonorm Version 6.0  
Used with permission of Meteotest, CH-3003 Bern  
© Copyright 2007/10: Max Boller, dipl. Ing. ETH  
Energie-Albis Verlag, CH-5620 Bremgarten  
Schweiz / Suisse / Switzerland

# Solarthermische Kraftwerke



Nicht-gesicherte Leistung PV: 90% → Solarthermische Kraftwerke



Parabolrinnenkraftwerk Andasol I

27 500 t 60%  $\text{NaNO}_3$ /40%  $\text{KNO}_3$  für Wärmespeicherung zwischen 386°C und 292°C  
1010 MWh thermisch, 7.5 h Betrieb einer 50 MW Turbine



**Needs 2000 Andasol-units, i.e. about 50 Mio. t of salt**

# Windturbinen



- **Onshore: bis 7.5 MW, Rotordurchmesser 127 m (Enercon E 126)**
- **Offshore: alpha-ventus**
  - » RePower 5 M
  - » 5 MW
  - » 126 m rotor diam.
  - » 3.5– 30 m/s wind
  
  - » Multibrid M5000
  - » 5 MW
  - » 116 m rotor diam.
  - » 3.5 – 25 m/s wind



© Hans Hillewaert / [CC-BY-SA-3.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/)

**Offshore park Thornton Banks**

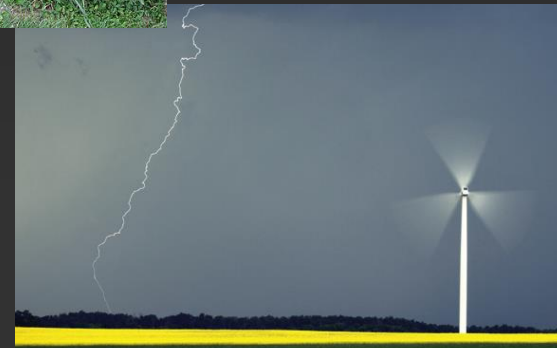
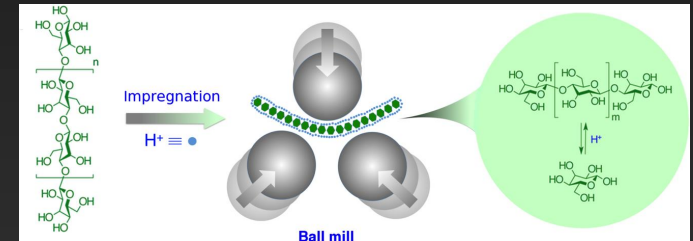
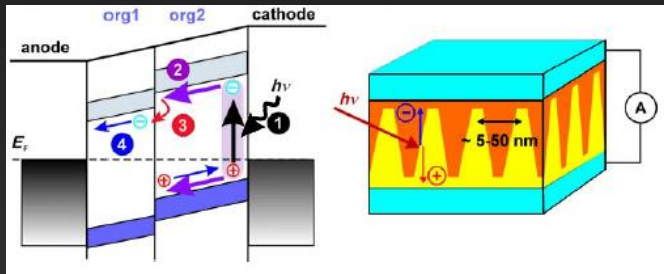
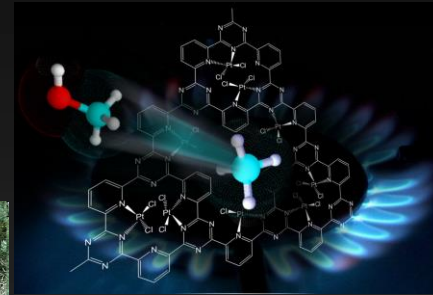
# Wie viele große Turbinen benötigen wir?



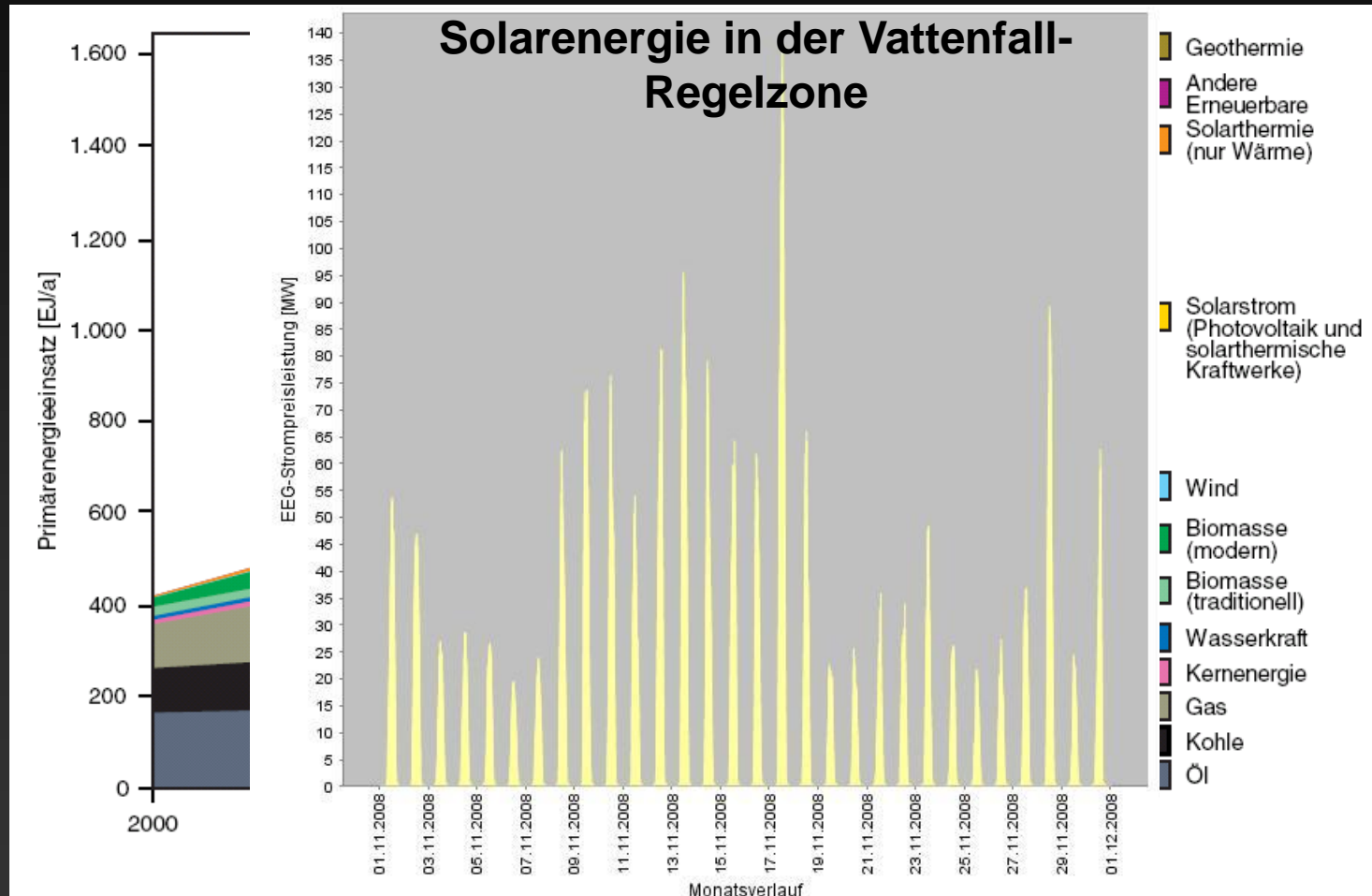
- **Installierte Leistung derzeit etwa 30 GW**
- **Zielgröße 2020 etwa 50 GW**
- **Erfordert 4000 Turbinen der 5 MW-Klasse**
- **Flächenbedarf etwa 7 ha/MW**
  - ➔ **1 400 km<sup>2</sup> (Deutschland 360 000 km<sup>2</sup>)**
- **Kosten etwa 1 M€/MW (Land, offshore etwa x3)**
  - ➔ **20-40 Mrd. €**
- **Berücksichtigen: Nicht gesicherte Leistung Wind 94 %!**



# Genügend Energie scheint gewinnbar...



# ... aber: wir haben ein Speicherproblem



**Abbildung 1**  
Die Veränderung des globalen Energiemix im exemplarischen Pfad bis 2050/2100.

(Quelle: WBCU)

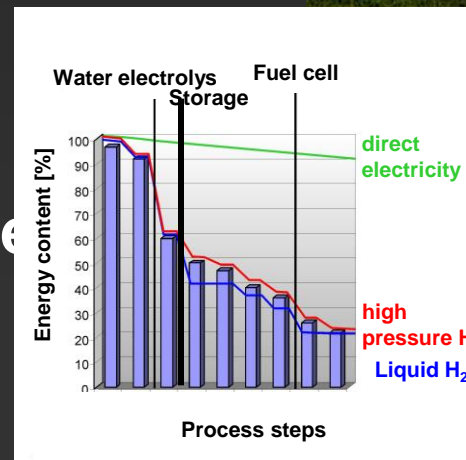
bau,

Reservekapazität, Demand Side Management und Speicherung

# Optionen für Energiespeicherung



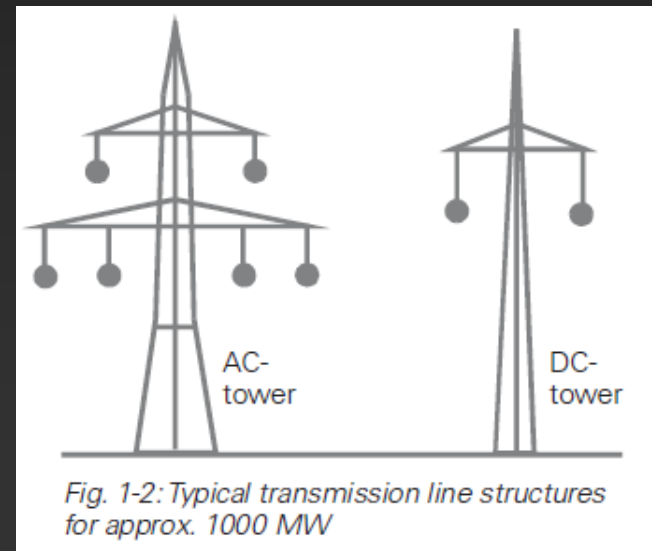
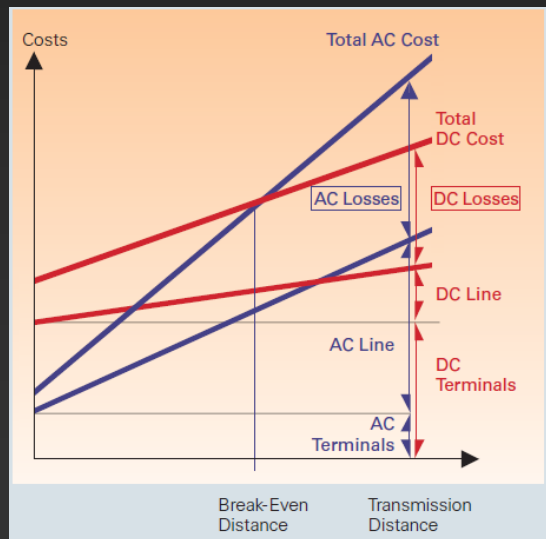
- **Pumpspeicher**
  - » Effizient
  - » Relativ günstig
  - » Niedrige Kapazität
- **Druckluftspeicher**
  - » Mittlere Effizienz
  - » Mittlere Kosten
  - » Mäßige Kapazität
- **Batterien**
  - » Effizienz
  - » Derzeit teuer
  - » Mittlere Kapazität
- **Chemische Speicher**
  - » Niedrige Effizienz
  - » Sehr hohe Kapazität
  - » Teuer



# Norwegen als Europas Batterie: Verbindung mit Hochspannungs-Gleichstromleitung



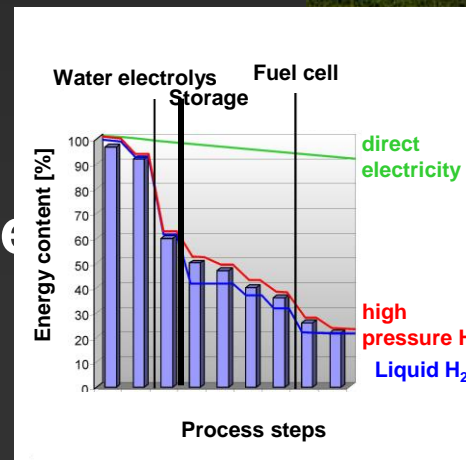
- Norwegen erzeugt etwa 130 TWh Hydroelektrizität
- Potential vermutlich etwa doppelt so hoch
- Pumpspeicherkapazität etwa 10-20 GW
- Transport nach Europa mittels HVDC Leitungen
- Relativ verlustarm (typisch 2-3 % / 1000 km)



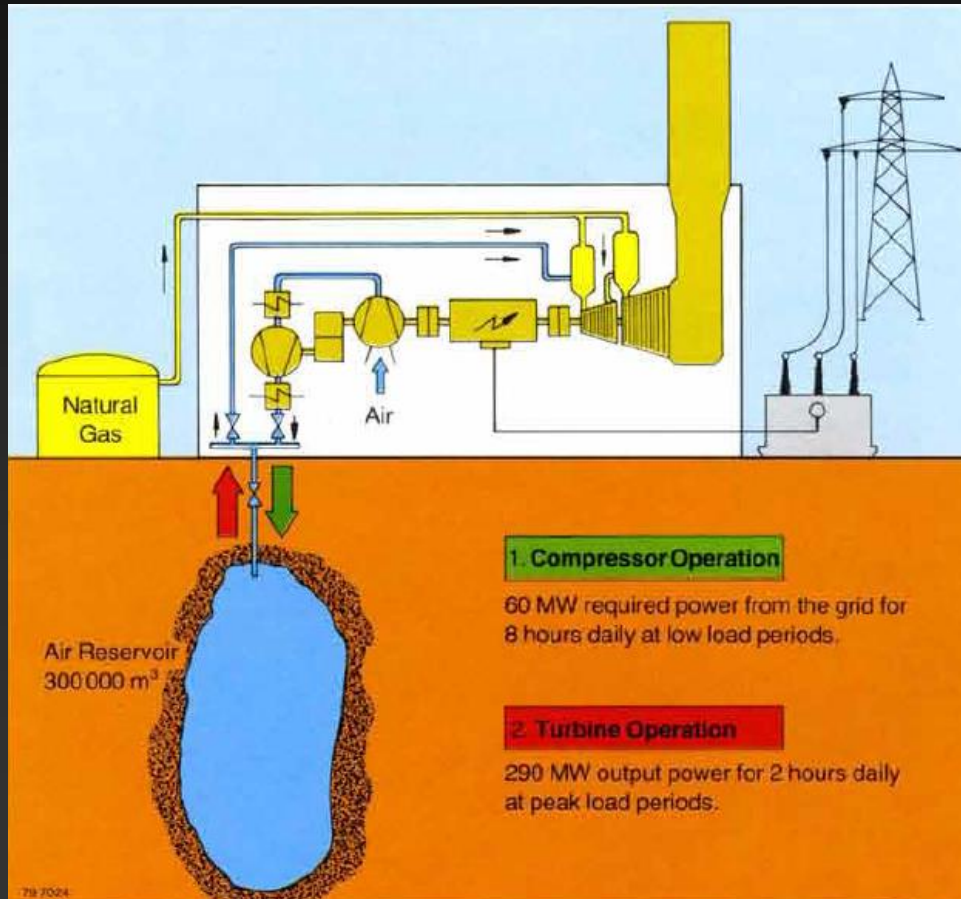
# Optionen für Energiespeicherung



- **Pumpspeicher**
  - » Effizient
  - » Relativ günstig
  - » Niedrige Kapazität
- **Druckluftspeicher**
  - » Mittlere Effizienz
  - » Mittlere Kosten
  - » Mäßige Kapazität
- **Batterien**
  - » Effizienz
  - » Derzeit teuer
  - » Mittlere Kapazität
- **Chemische Speicher**
  - » Niedrige Effizienz
  - » Sehr hohe Kapazität
  - » Teuer



# Druckluftspeicher Compressed air energy storage (CAES)



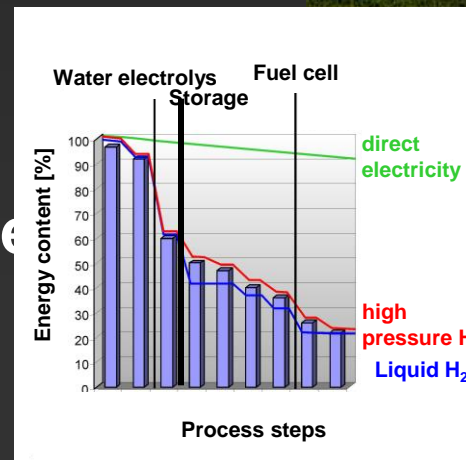
Energieeffizienz etwa 50 %

Adiabatischer Betrieb bis 70 %

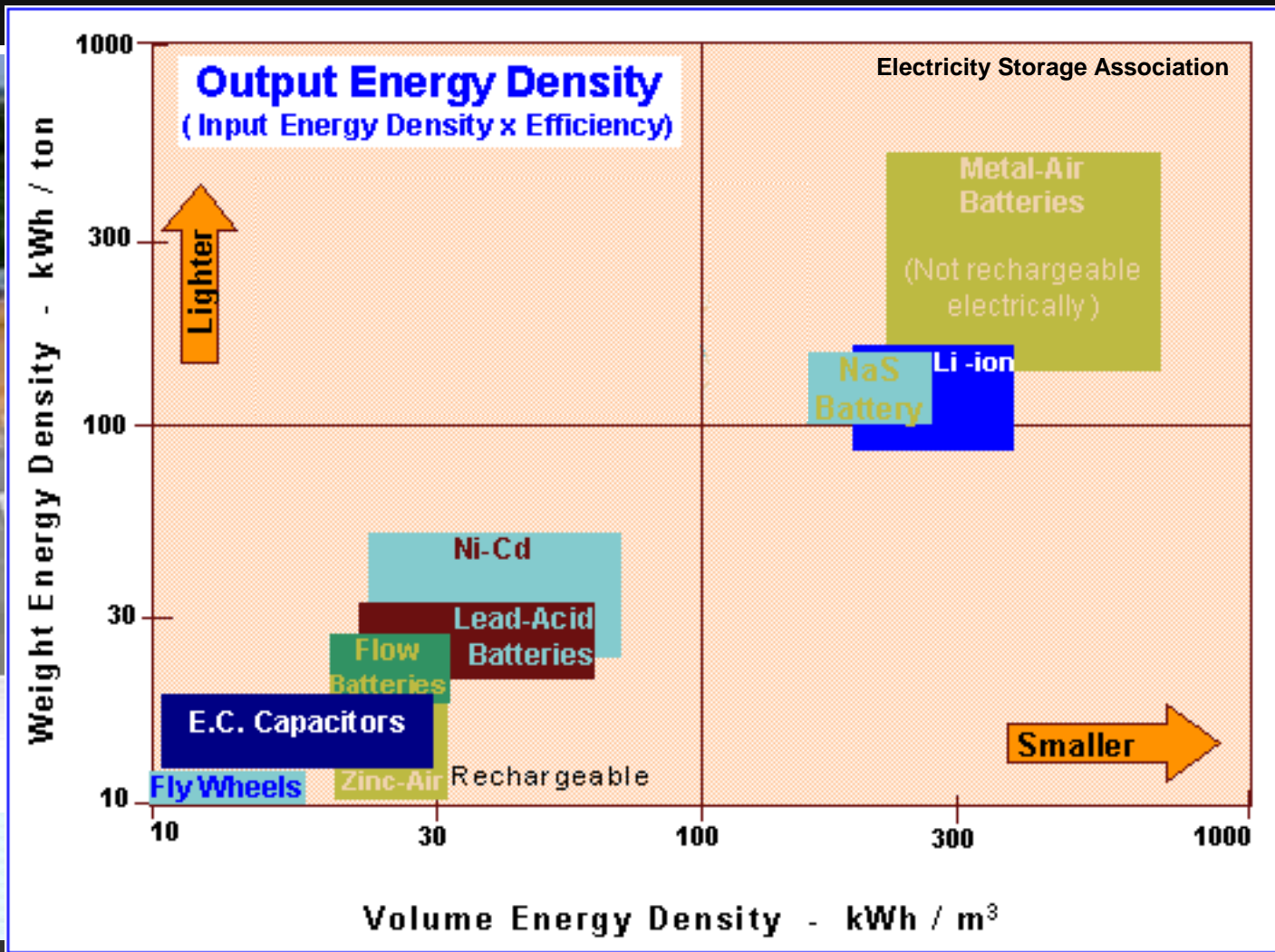
# Optionen für Energiespeicherung



- **Pumpspeicher**
  - » Effizient
  - » Relativ günstig
  - » Niedrige Kapazität
- **Druckluftspeicher**
  - » Mittlere Effizienz
  - » Mittlere Kosten
  - » Mäßige Kapazität
- **Batterien**
  - » Effizienz
  - » Derzeit teuer
  - » Mittlere Kapazität
- **Chemische Speicher**
  - » Niedrige Effizienz
  - » Sehr hohe Kapazität
  - » Teuer

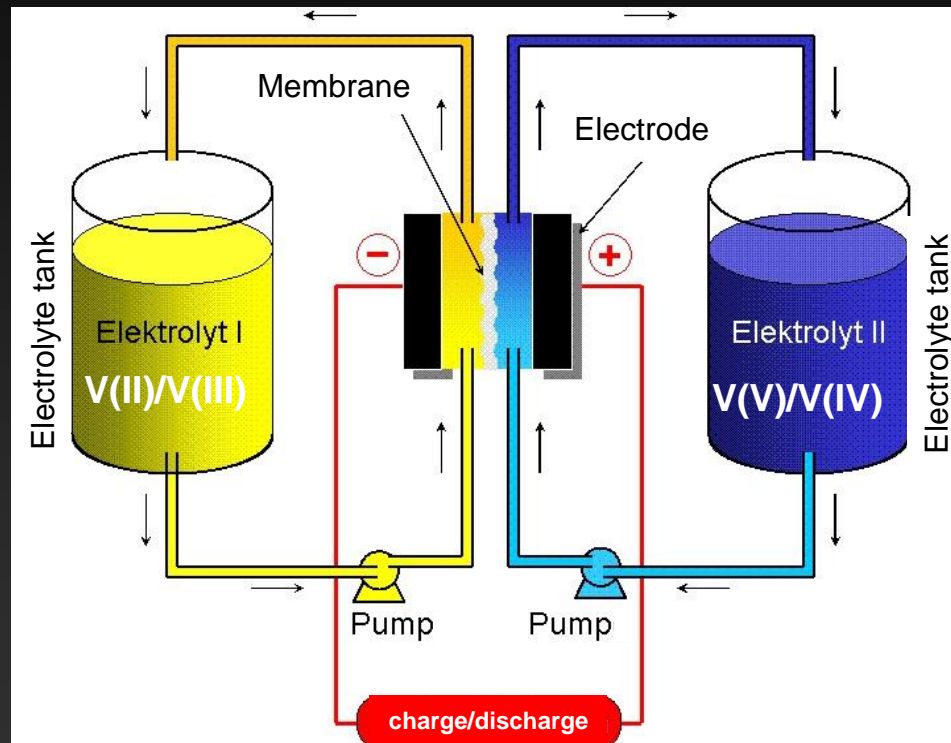


# Natrium-Schwefel-Batterie





# Redox-flow Batterien: Vanadium als Beispiel

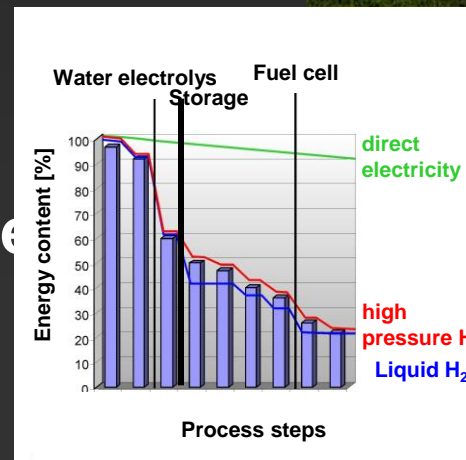


8 MWh entspricht 600 t Elektrolyt, 28 t stack  
und einem Flächenbedarf von 240 m<sup>2</sup>  
d.h. Energiedichte ist niedriger als 1/10 von Li-Ionenbatterien

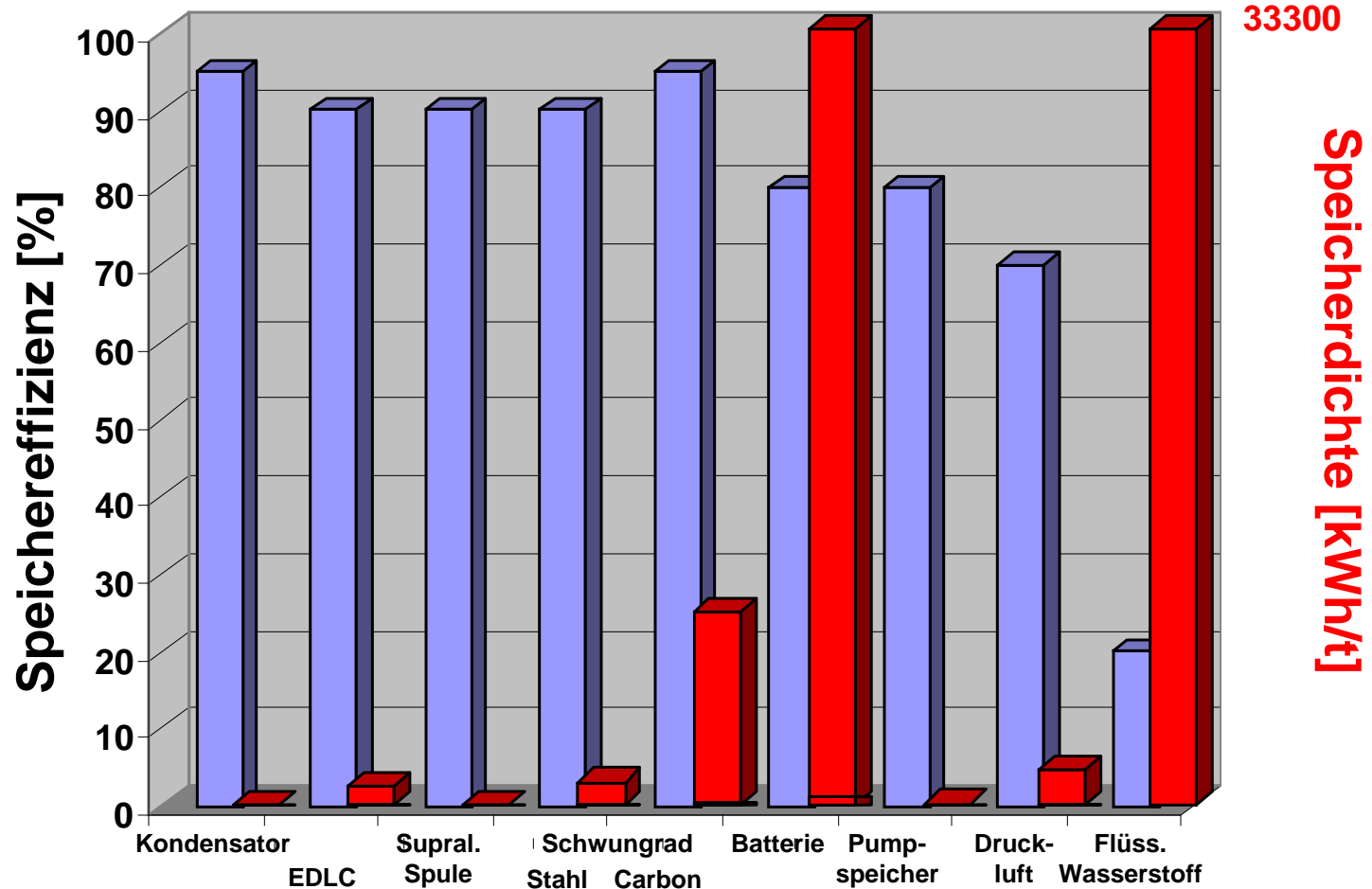
# Optionen für Energiespeicherung



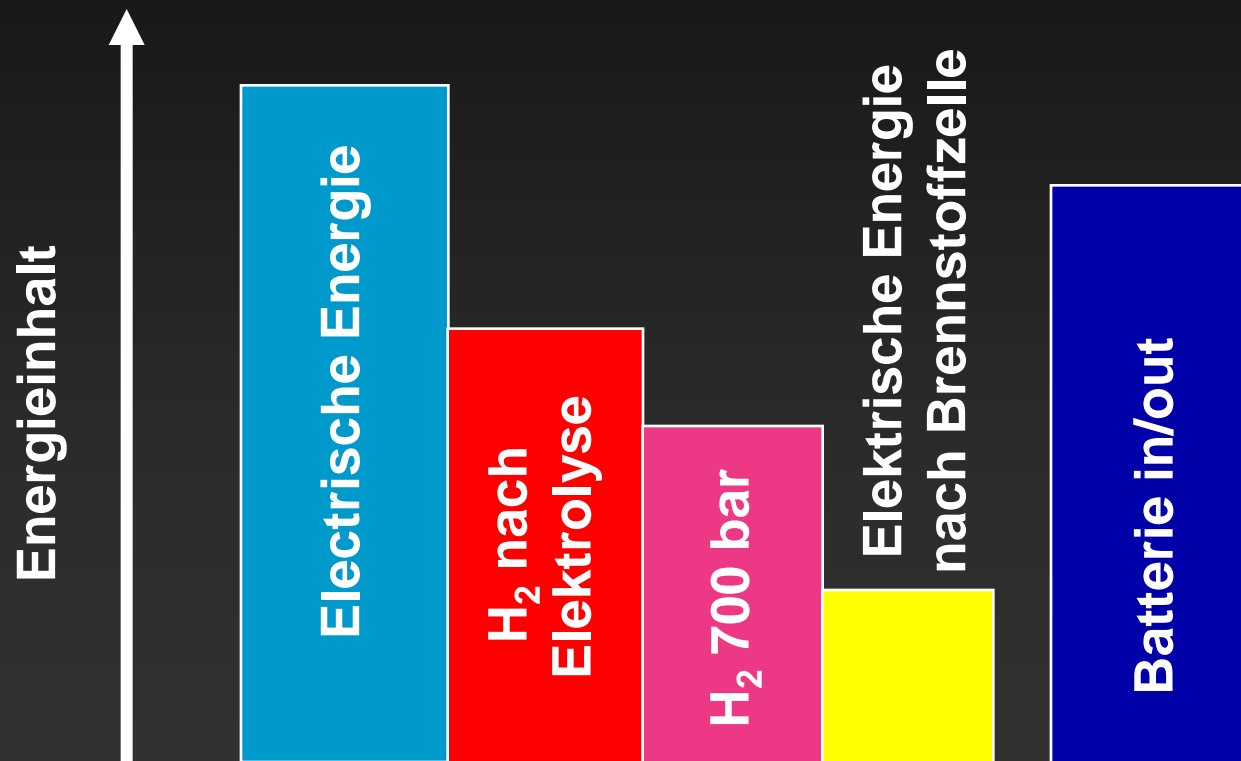
- **Pumpspeicher**
  - » Effizient
  - » Relativ günstig
  - » Niedrige Kapazität
- **Druckluftspeicher**
  - » Mittlere Effizienz
  - » Mittlere Kosten
  - » Mäßige Kapazität
- **Batterien**
  - » Effizienz
  - » Derzeit teuer
  - » Mittlere Kapazität
- **Chemische Speicher**
  - » Niedrige Effizienz
  - » Sehr hohe Kapazität
  - » Teuer



# Vergleich unterschiedlicher Speicheroptionen

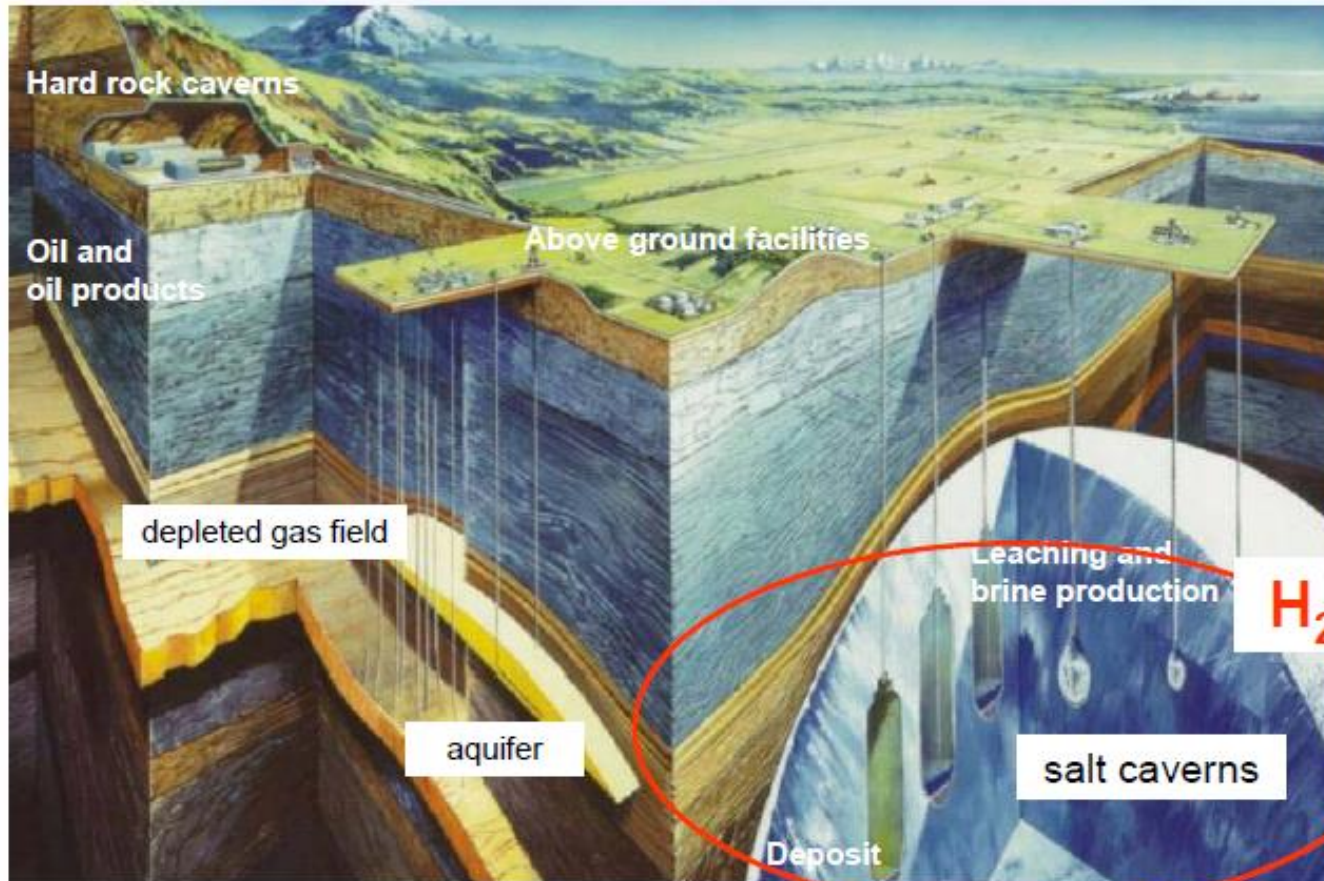


# Hydrogen economy: Wasserstoff aus elektrischer Energie?



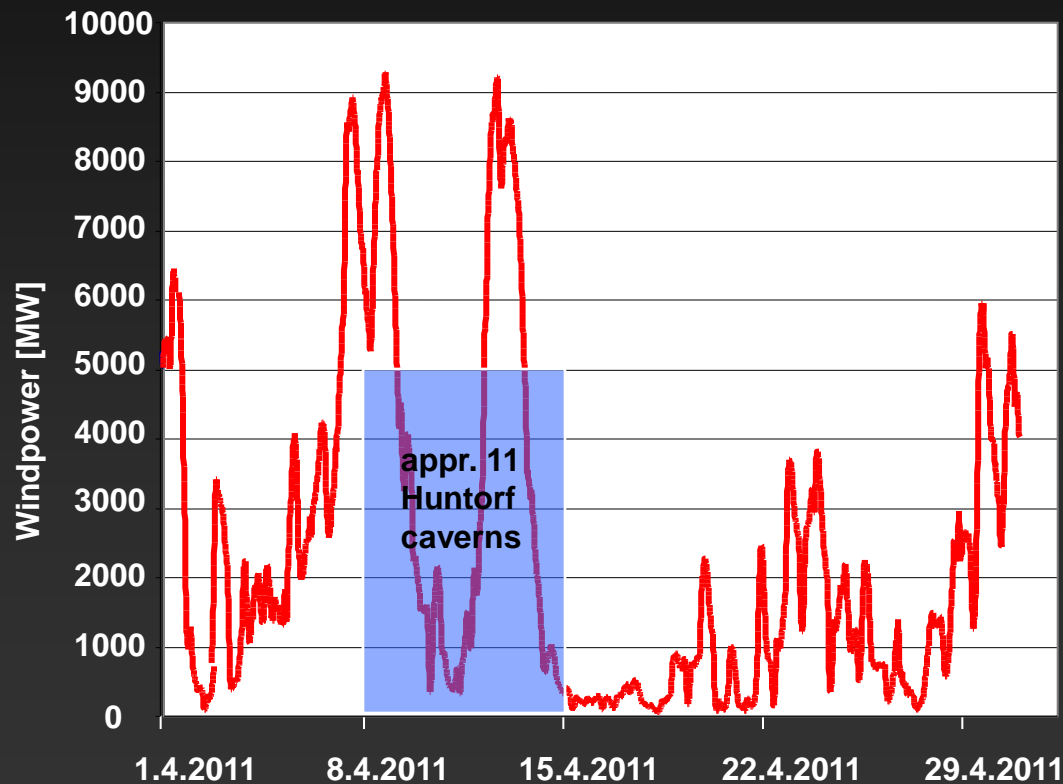
Deutliche Verbesserungen in allen Elementen der Wasserstoffkette erforderlich

# Speicherung in Salzkavernen



Ludwig bölkow  
systemtechnik

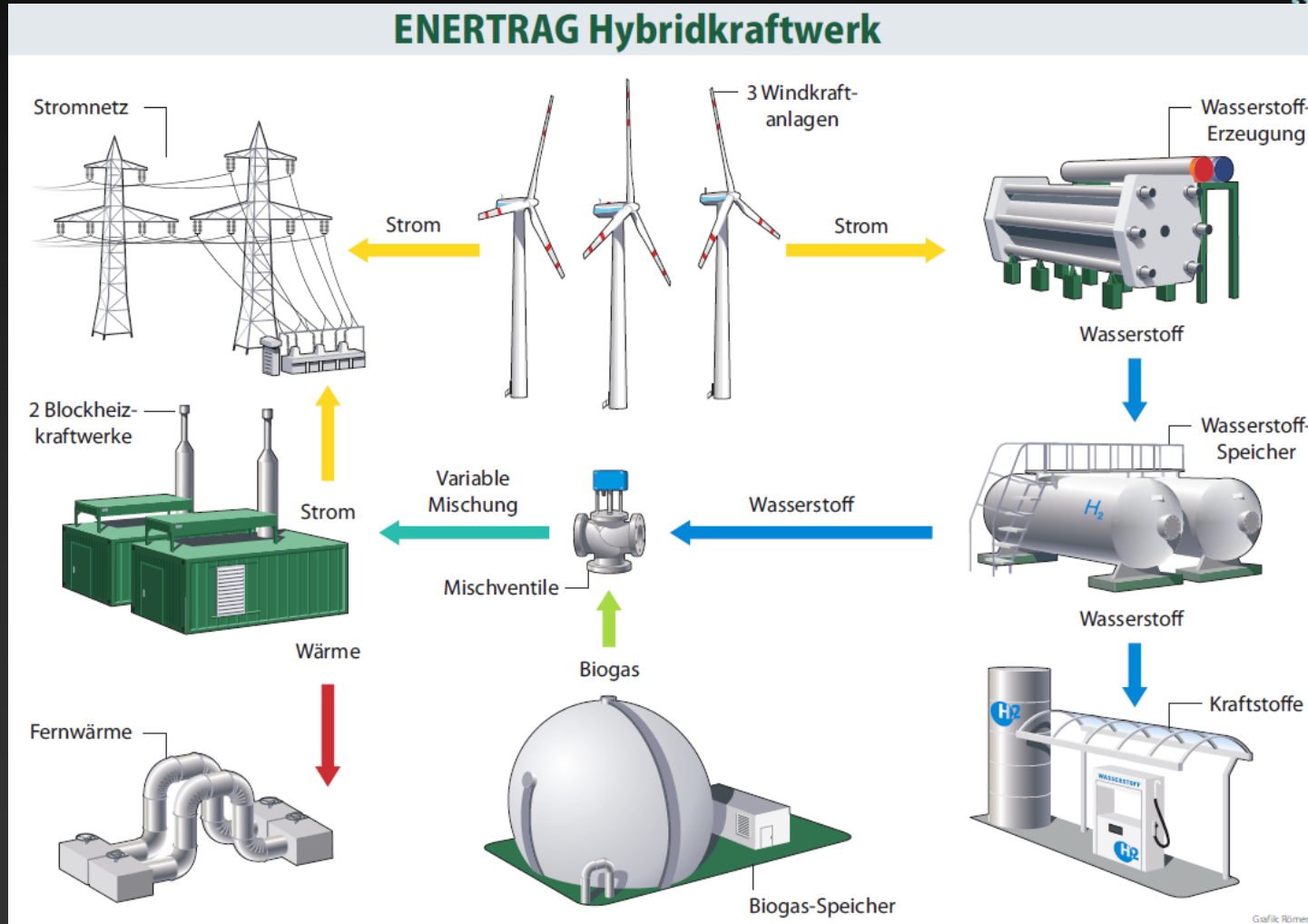
# Speicherkapazität Wasserstoff in Kavernen



**Huntorf 300 000 m<sup>3</sup>**  
**150 bar Druck**  
**45 000 000 Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>**  
**12 MJ/m<sup>3</sup> = 3.3 kWh/m<sup>3</sup>**  
**50 % Effizienz: 74250 MWh**

**Siemens: 2012 Demonstrator Elektrolyseur 300 kW**

# Enertrag Hybridkraftwerk



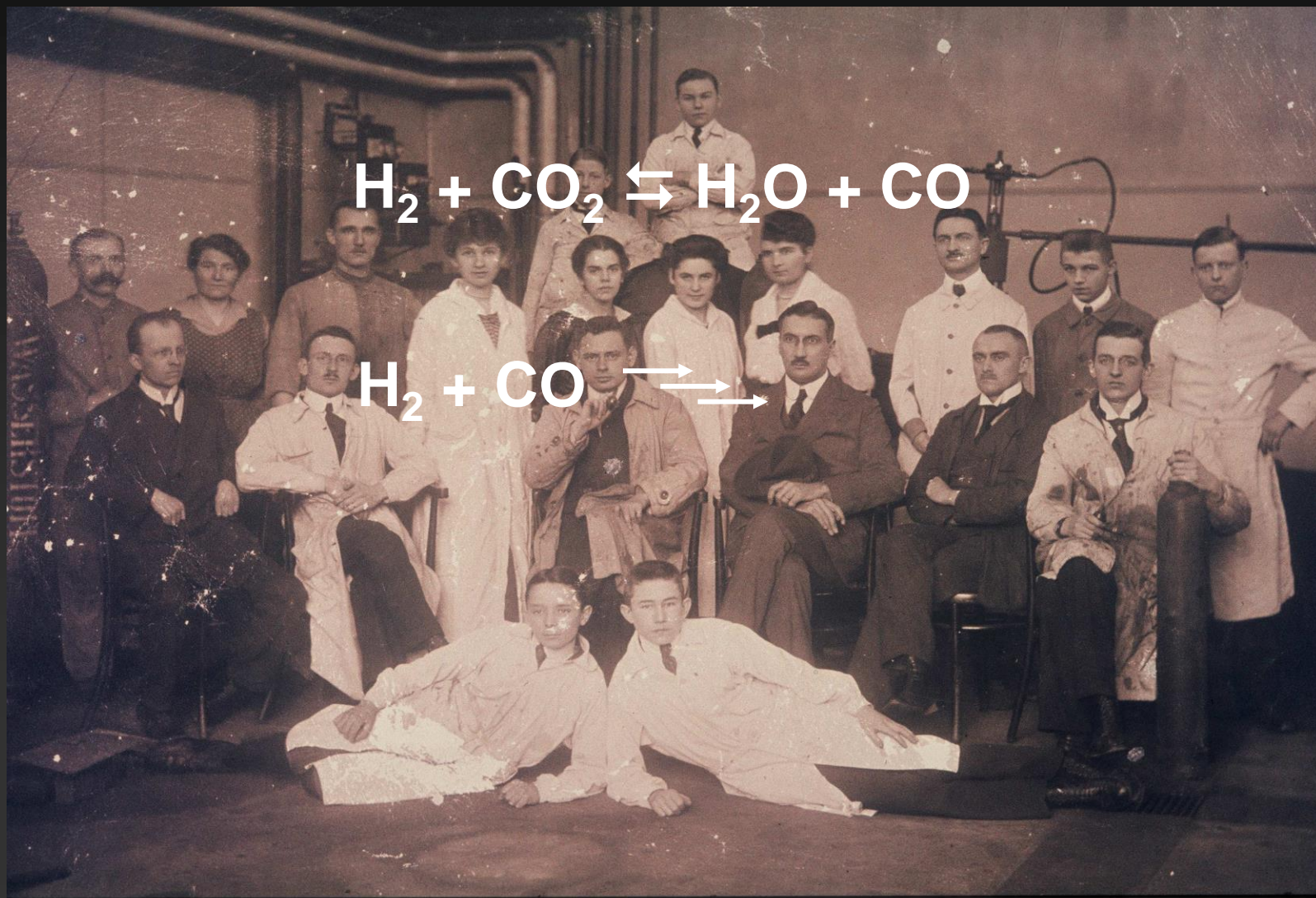
# Ein Schritt weiter: Methanisierung



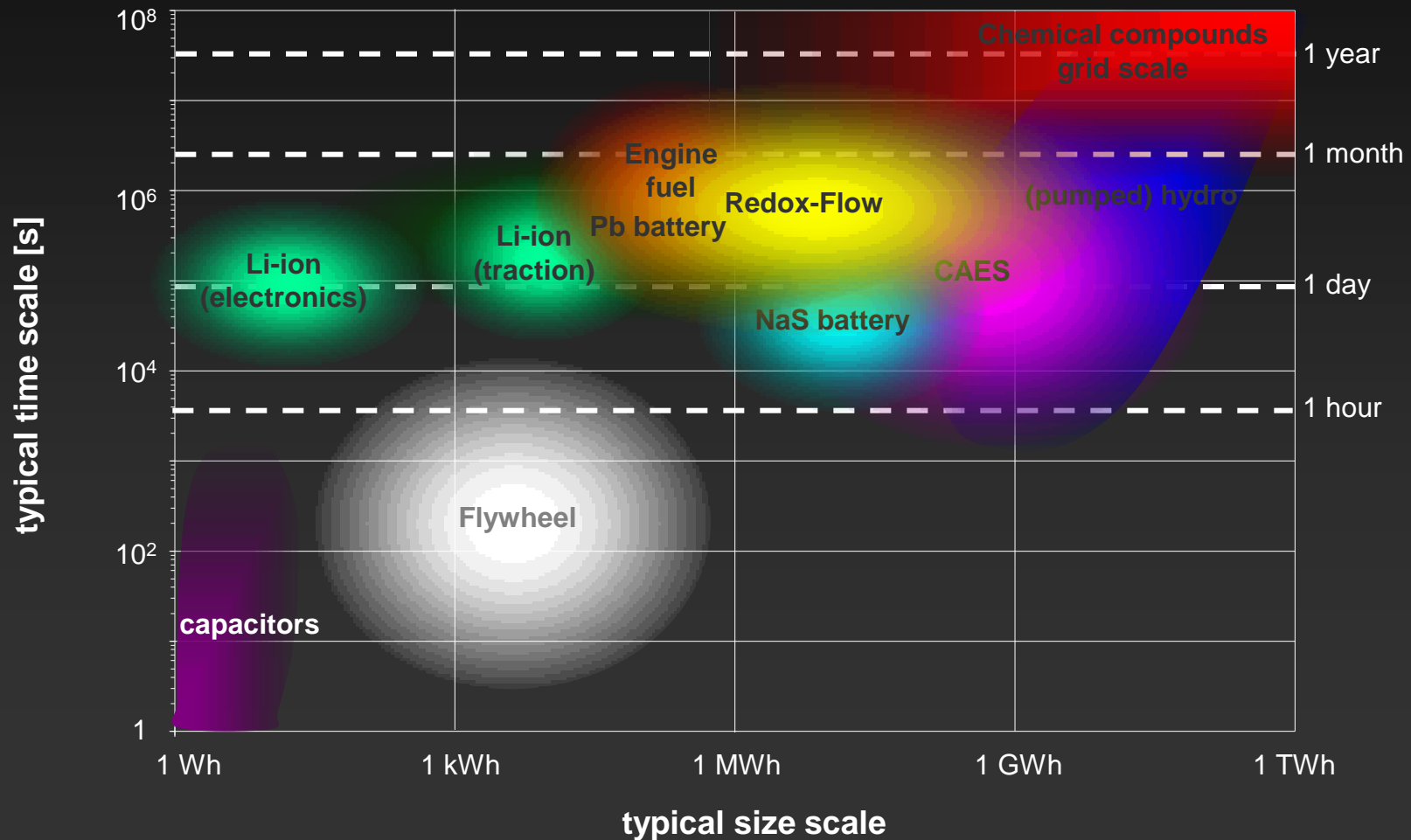
- Gasspeicher in Deutschland: 20 bln. m<sup>3</sup> + pipelines
- Entspricht etwa 200 TWh (thermisch)  
Speicherkapazität
- $\text{CO}_2 + 4 \text{H}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$  (Sabatier Prozeß)
- Zusätzliche Energieverluste über die Wasserstoffbereitstellung hinaus
- CO<sub>2</sub> Abtrennung benötigt ebenfalls Energie
- Möglicherweise sinnvoll an Biogasanlagen
  
- **Aber: vorhergesagte „dumped energy“ 2032 = 2.3 TWh = 500 Mio. m<sup>3</sup> hydrogen = 2.5 % im Gasnetz**



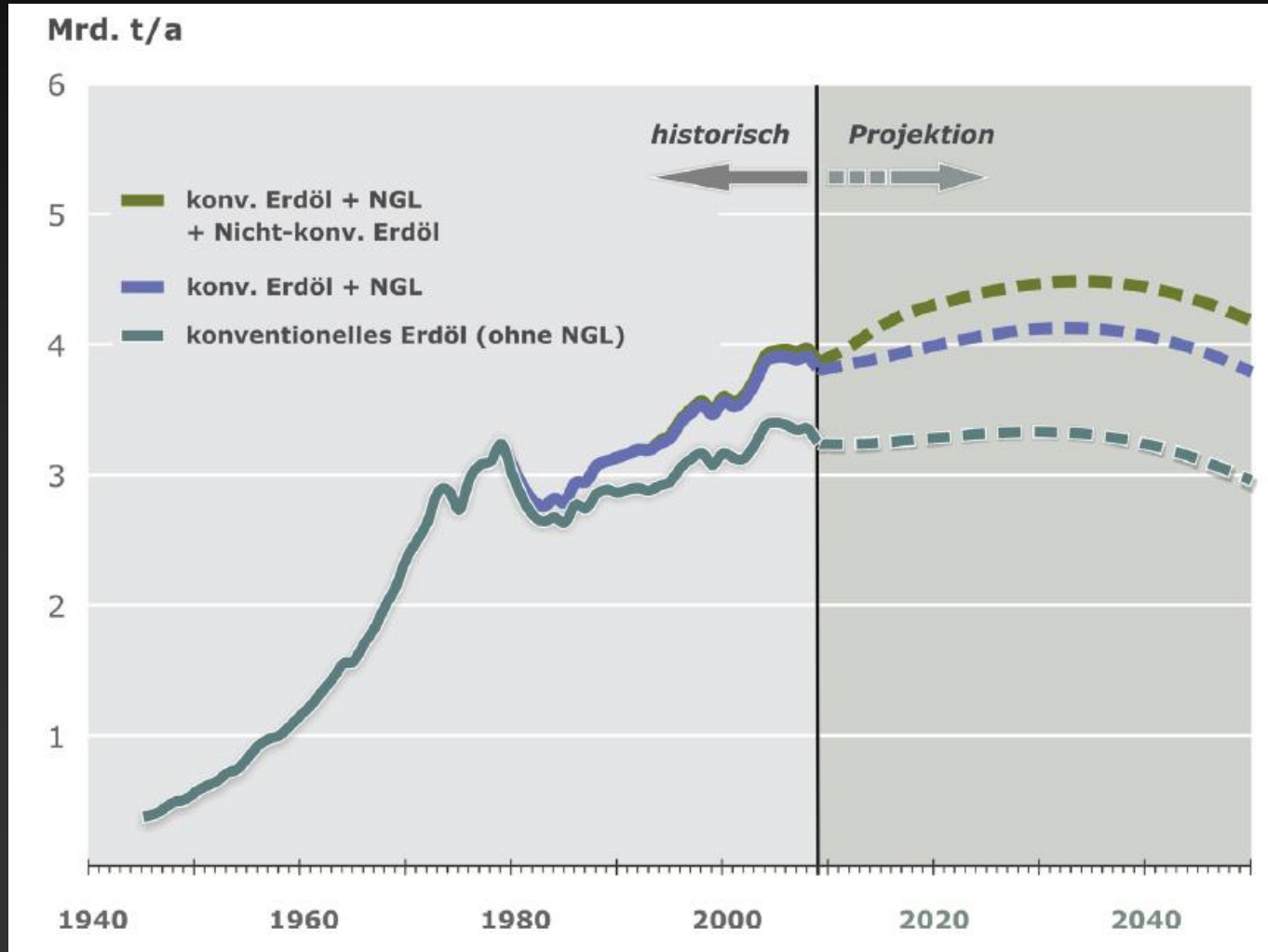
# Synthesis gas based chemistry



# Size and time scales of storage options



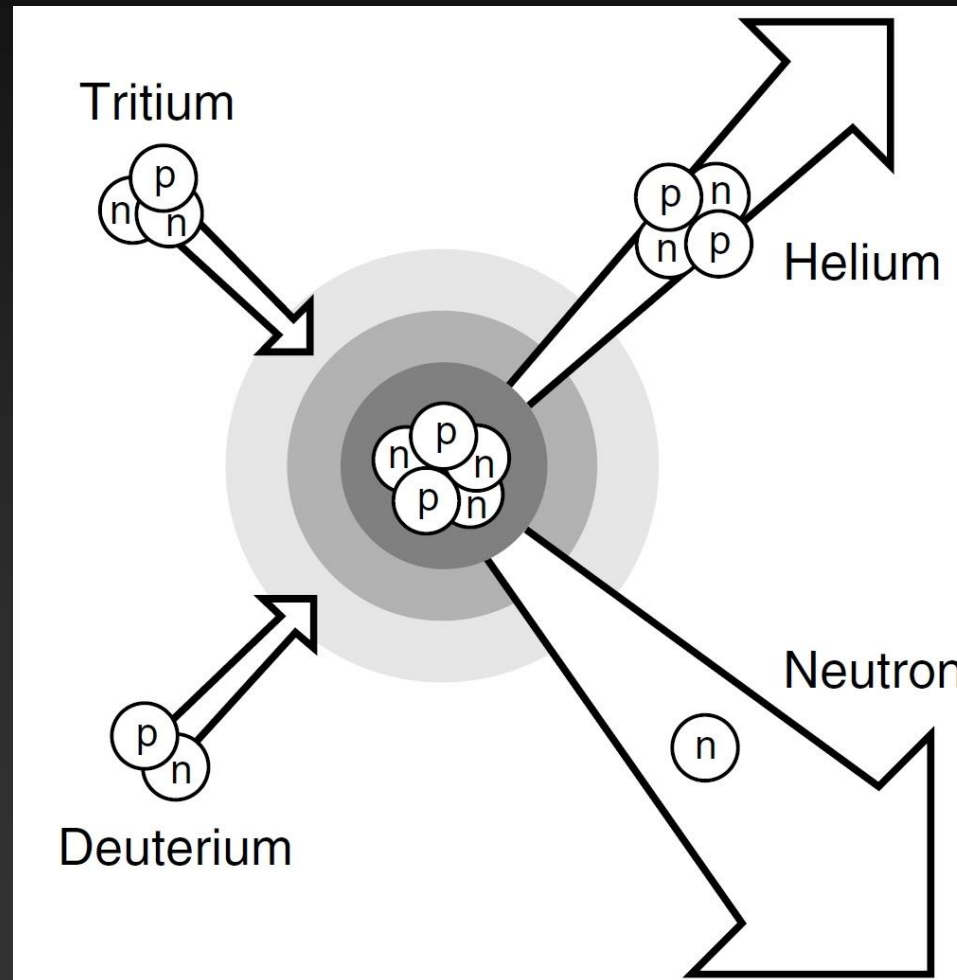
# ...und dann war da noch Peak Oil



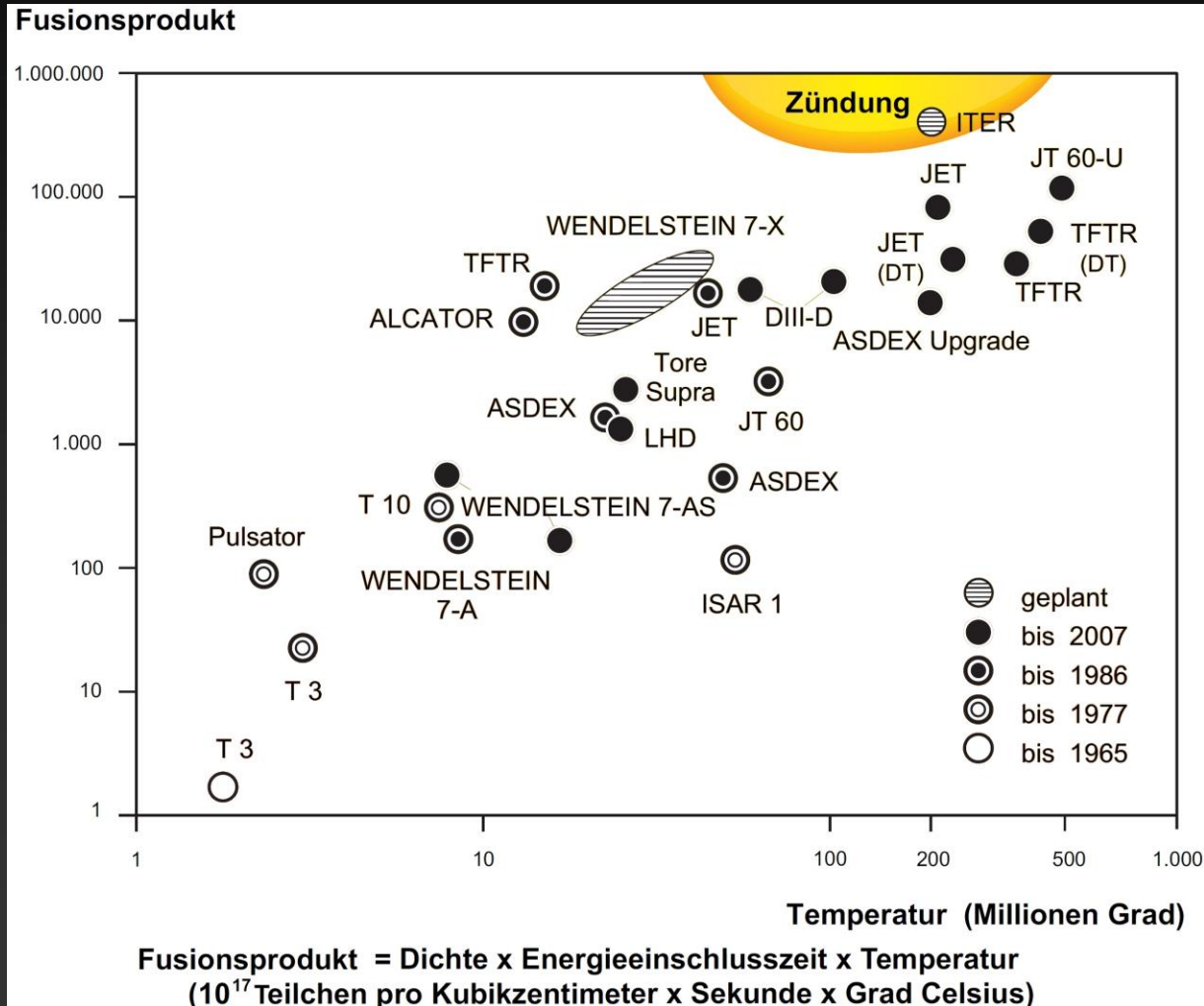
# Wie treiben wir dann Autos an?



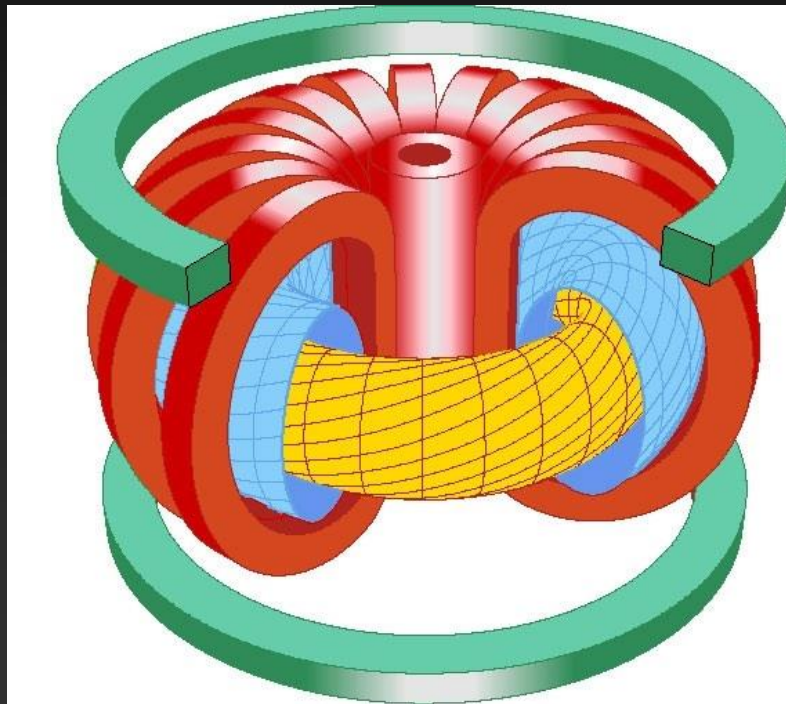
# Langfristige Hoffnung: Fusionsenergie



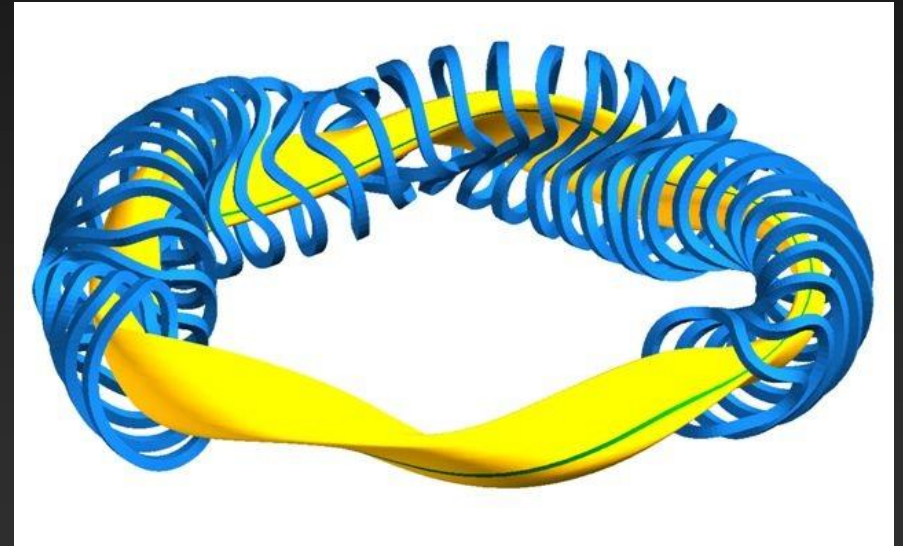
# ...noch immer in 40 Jahren?



# Entscheidend: Der magnetische Einschluß

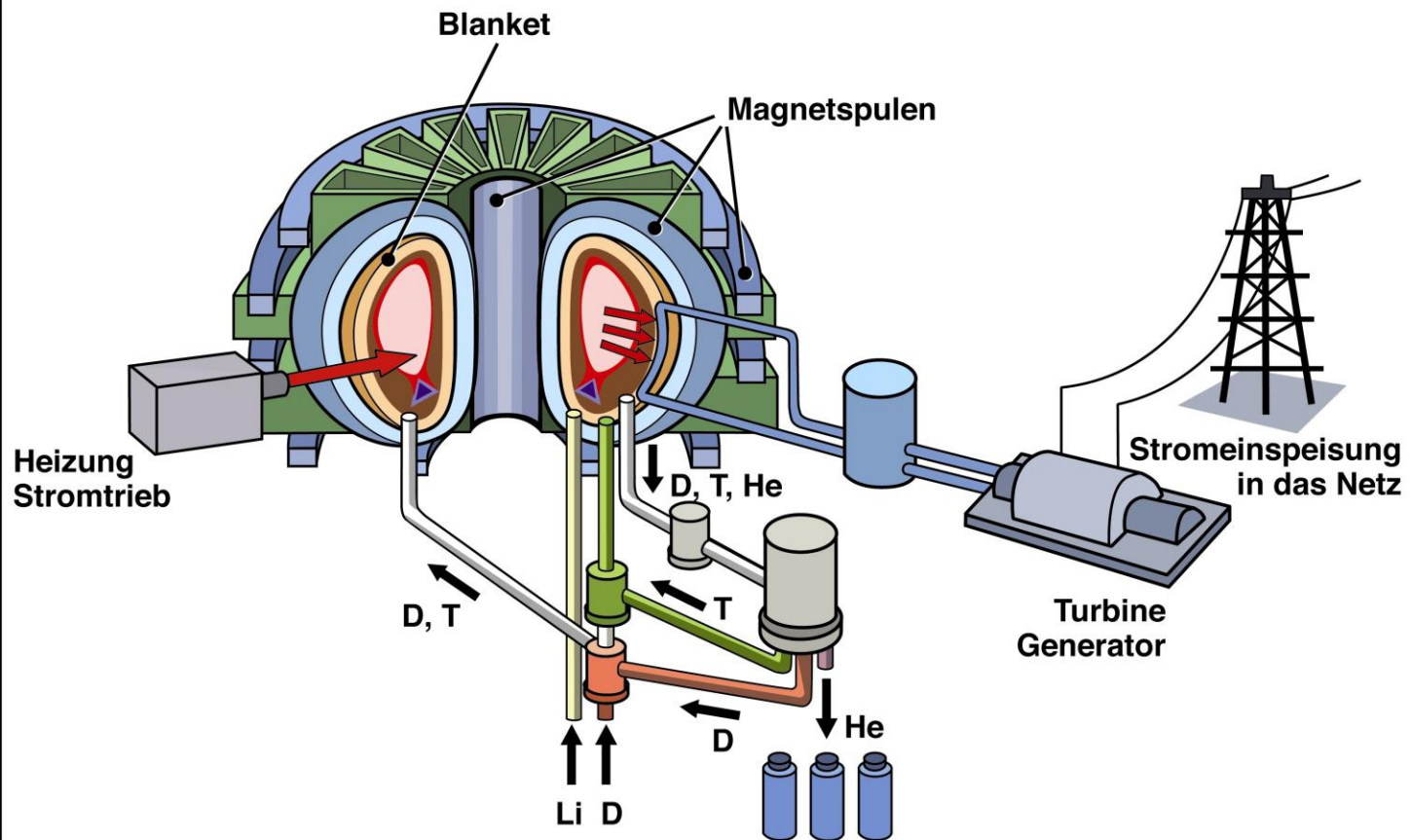


Tokamak-Prinzip



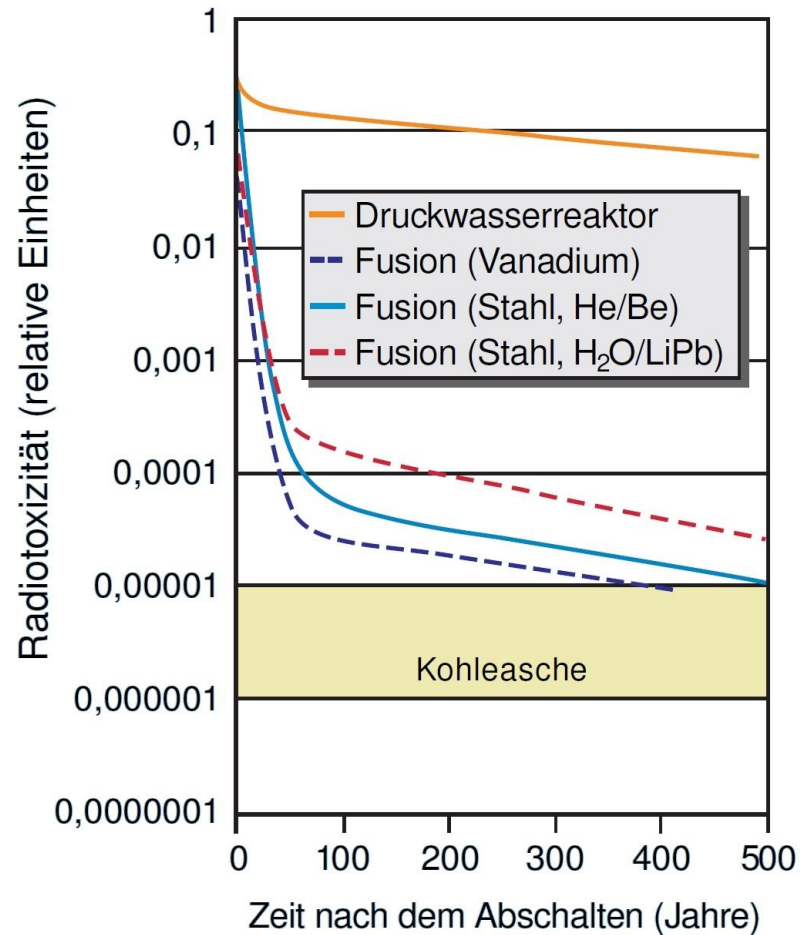
Stellarator

# So könnte ein Kraftwerk aussehen





# Die Radioaktivität



# Elemente eines neuen Energiesystems

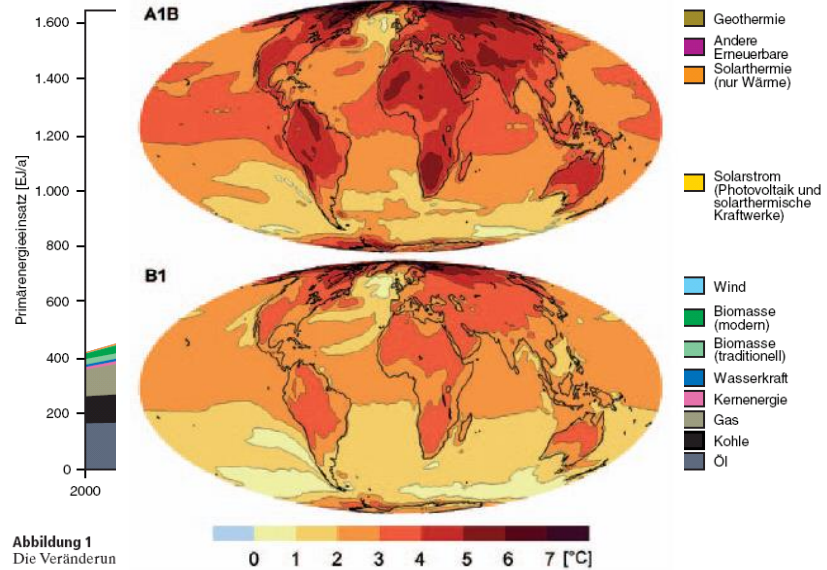
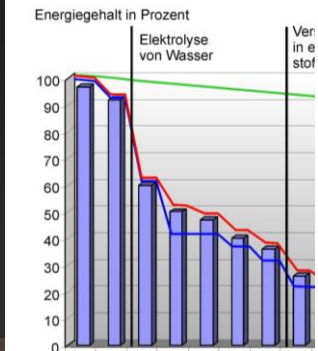
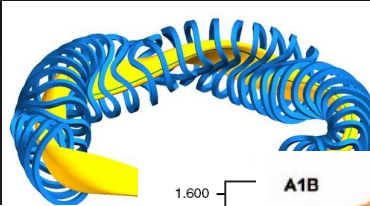


Abbildung 1  
Die Veränderung  
Quelle: WBGU



Japan Wind Development Co., Ltd.

