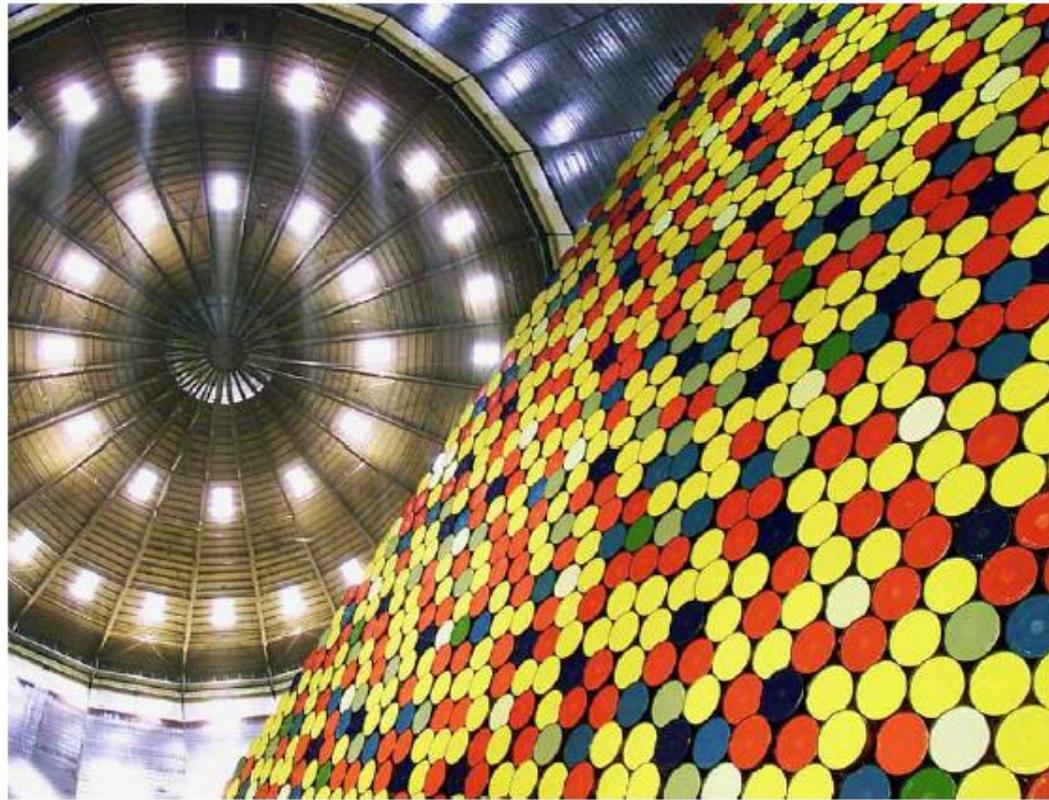


Juni 2010



Ende
Wie sie

el:
ukunft



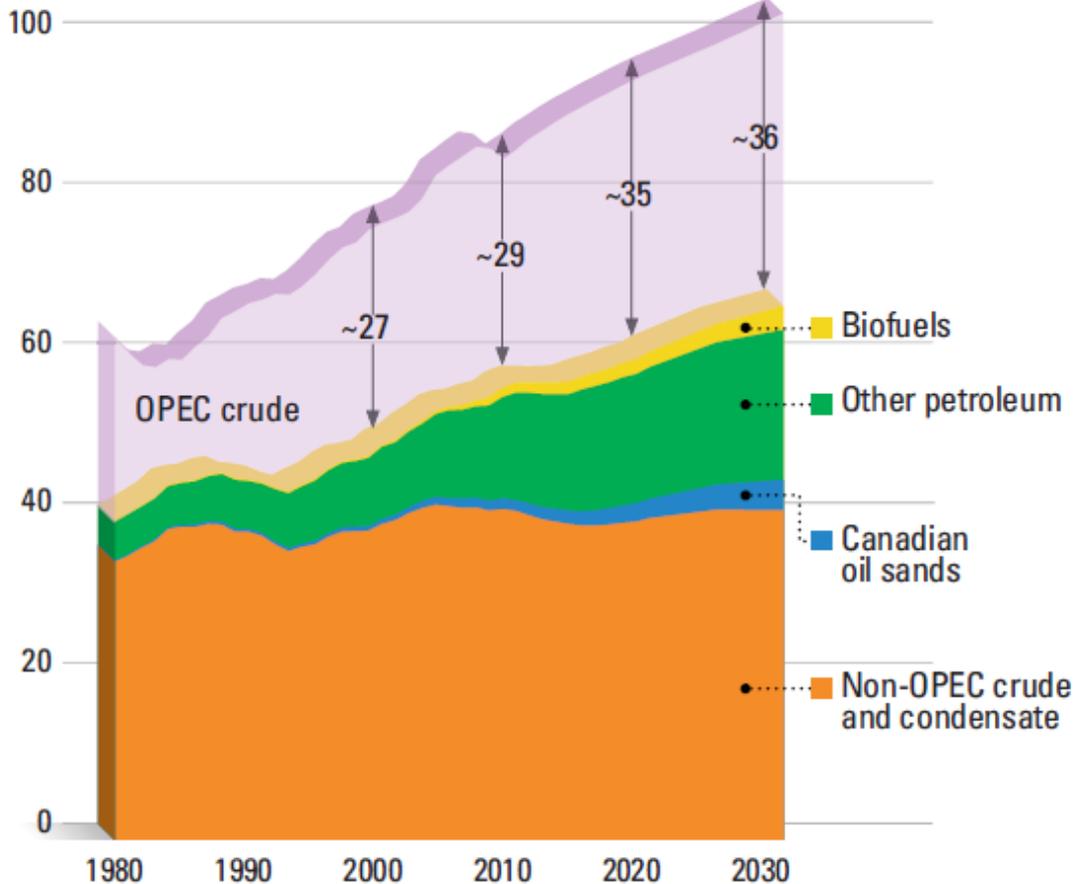
Energiewende: Herausforderung für die Menschheit | Klimawandel: Missachtete Gewissheit | Werkstoffe: Feuerfest und schadstoffarm | Elektroautos: Mit dem Akku auf die Überholspur | Fotovoltaik: Sonnige Aussichten | Energiespeicher: Die Gasometer von morgen | Stoffwechsel: Der selbstsüchtige Energiefresser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

Peak Oil?

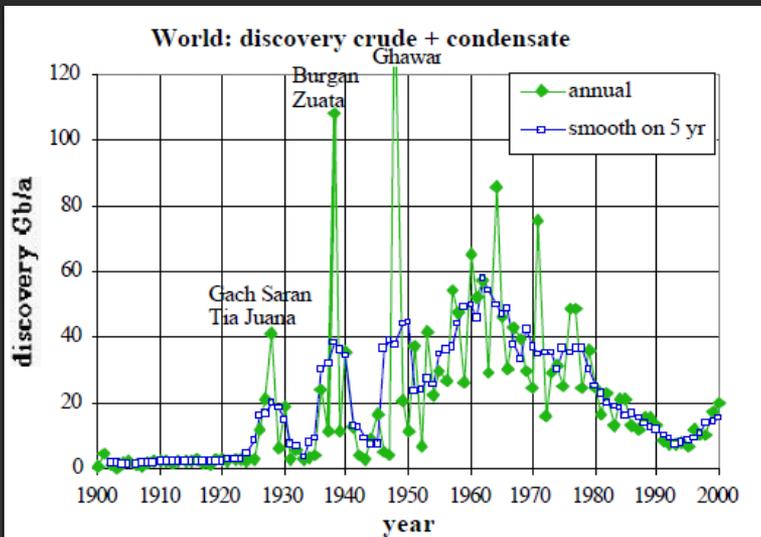
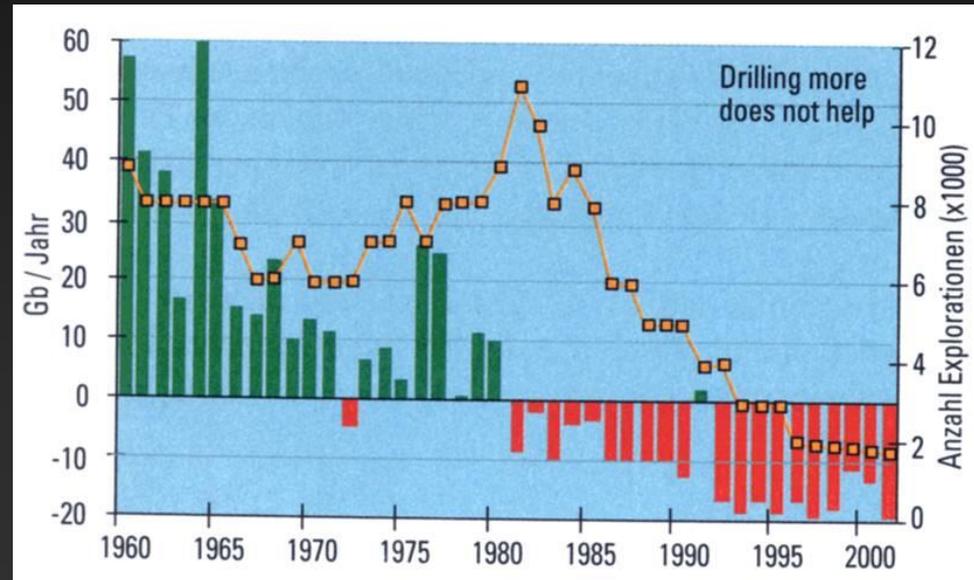
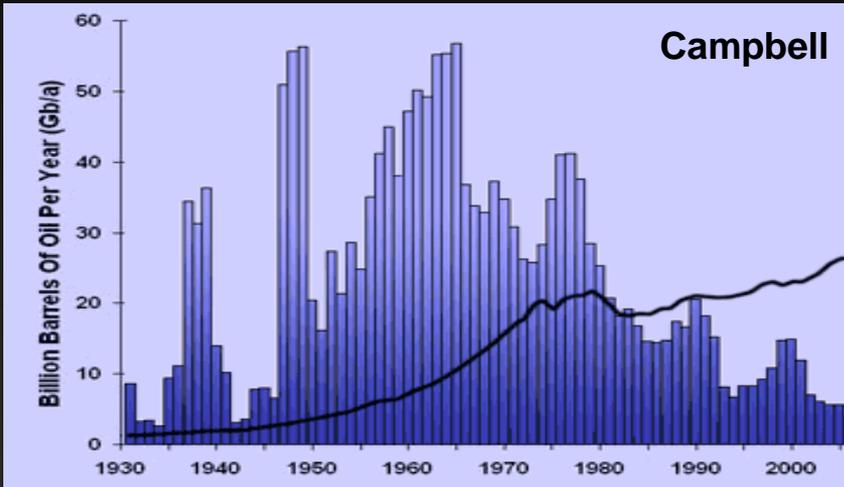


Liquids supply

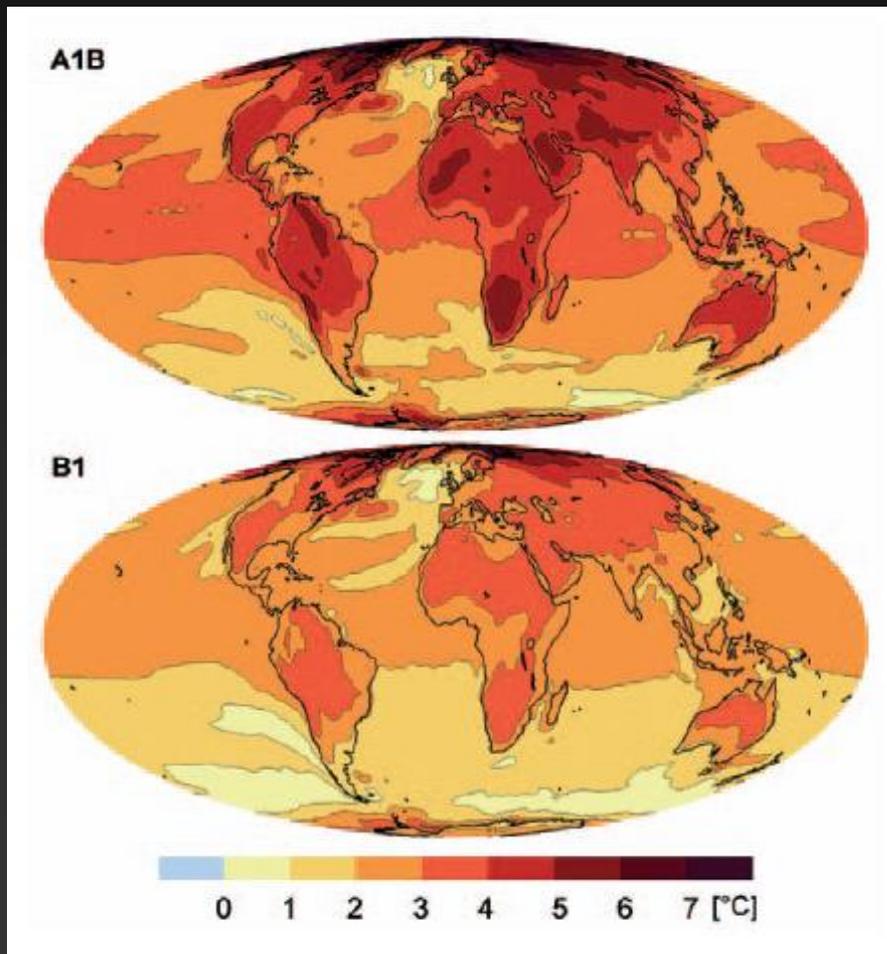
Millions of oil-equivalent barrels per day



Ölfunde gehen zurück



Zusätzliche Herausforderung: Klimawandel



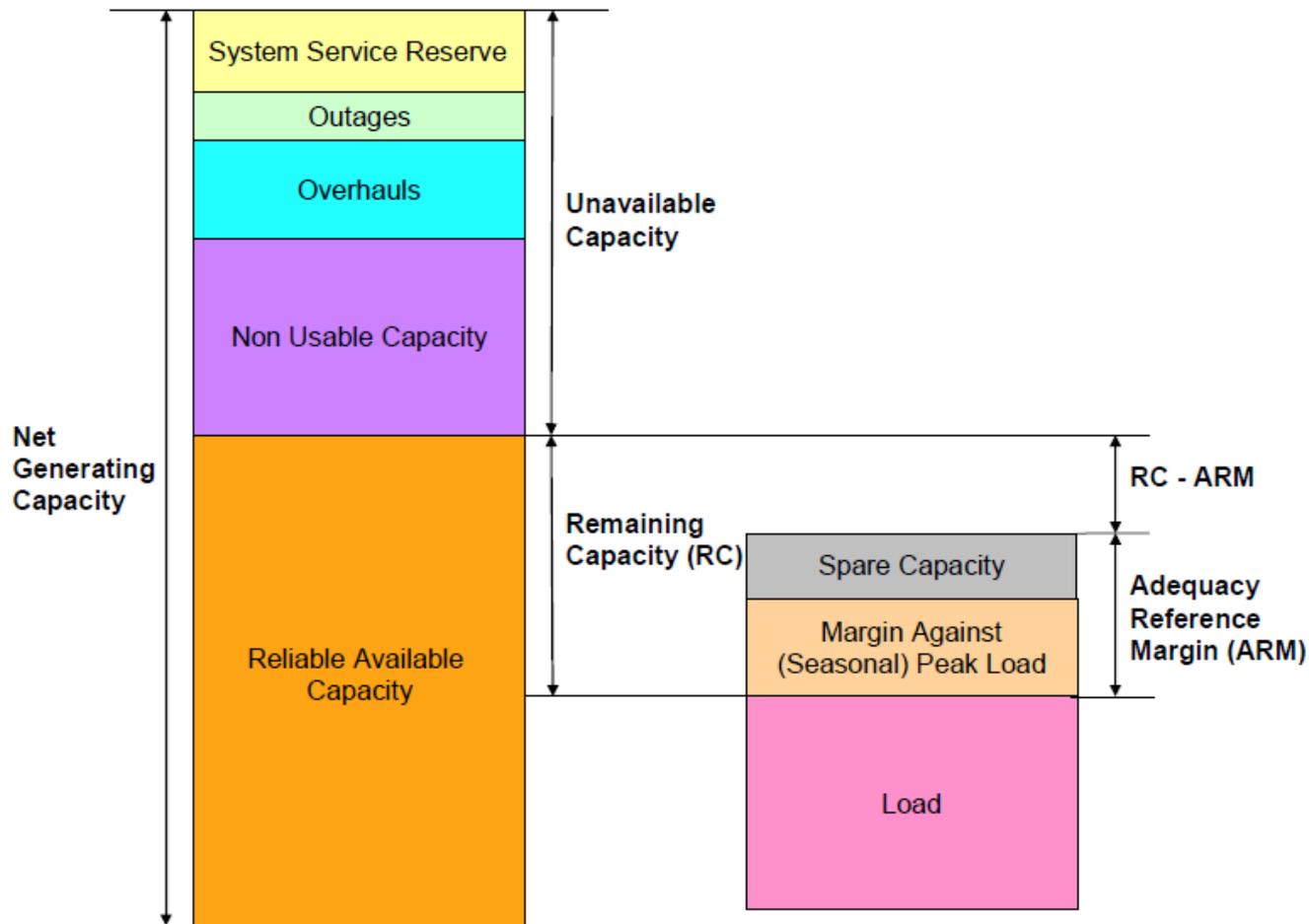
Errechnete Temperaturdifferenz
zwischen 2071-2100 und 1961-
1990 für zwei unterschiedliche
Szenarien (Quelle: MPI für
Meteorologie)

Energie und Leistung

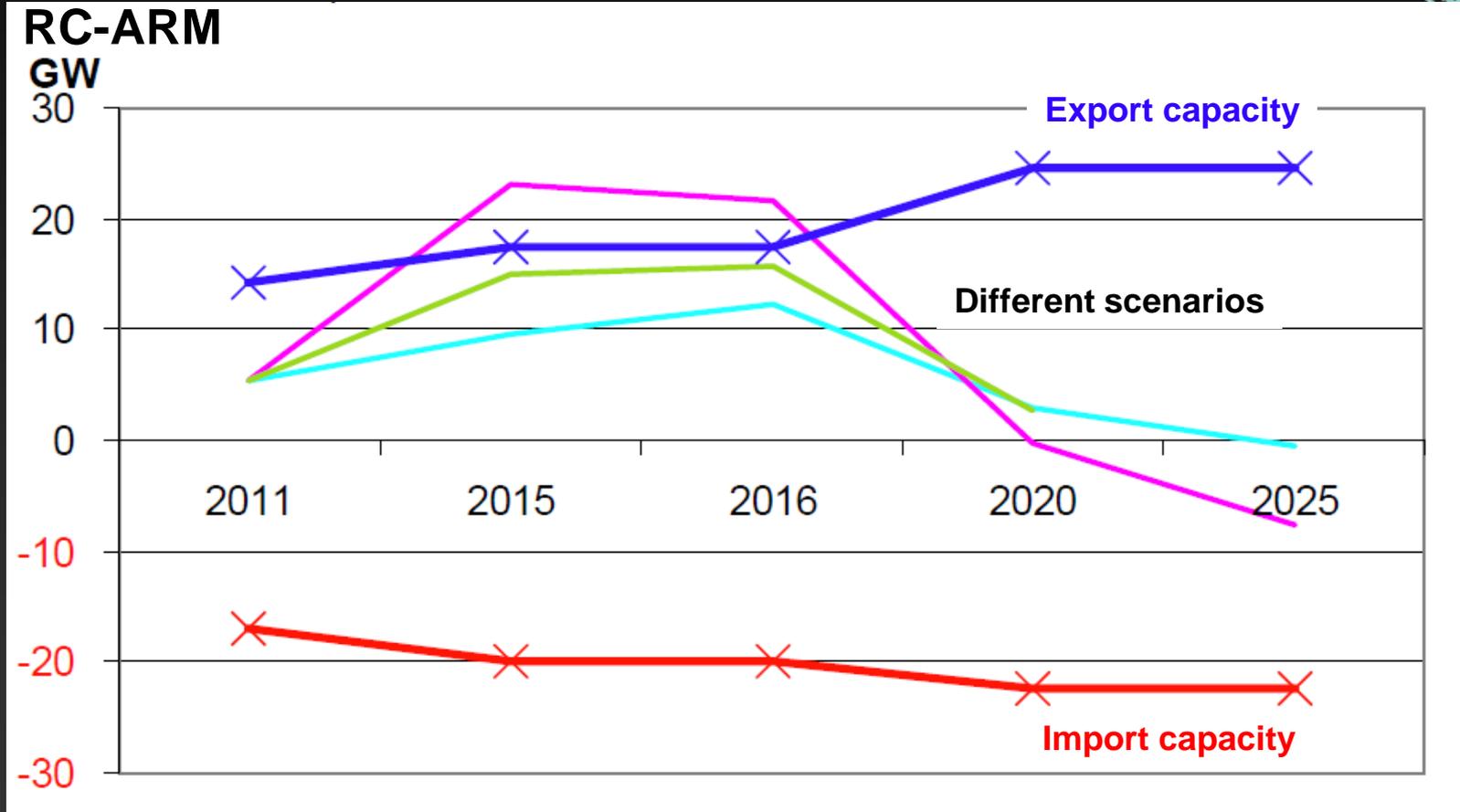


- **Leistung gemessen in Watt, „W“
(kW = 1000 W, MW = 1 Mio. W, GW = 1 Mrd. W)**
- **Energie gemessen in Kilowattstunden, „kWh“, oder Joule, „J“
(1 kWh = 3 600 000 J)**
- **1 J erhitzt zehn Liter Wasser um etwa 0.000024 °C**
- **1 kWh erhitzt zehn Liter Wasser um etwa 86 °C**
- **Ein AKW-Kraftwerksblock (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

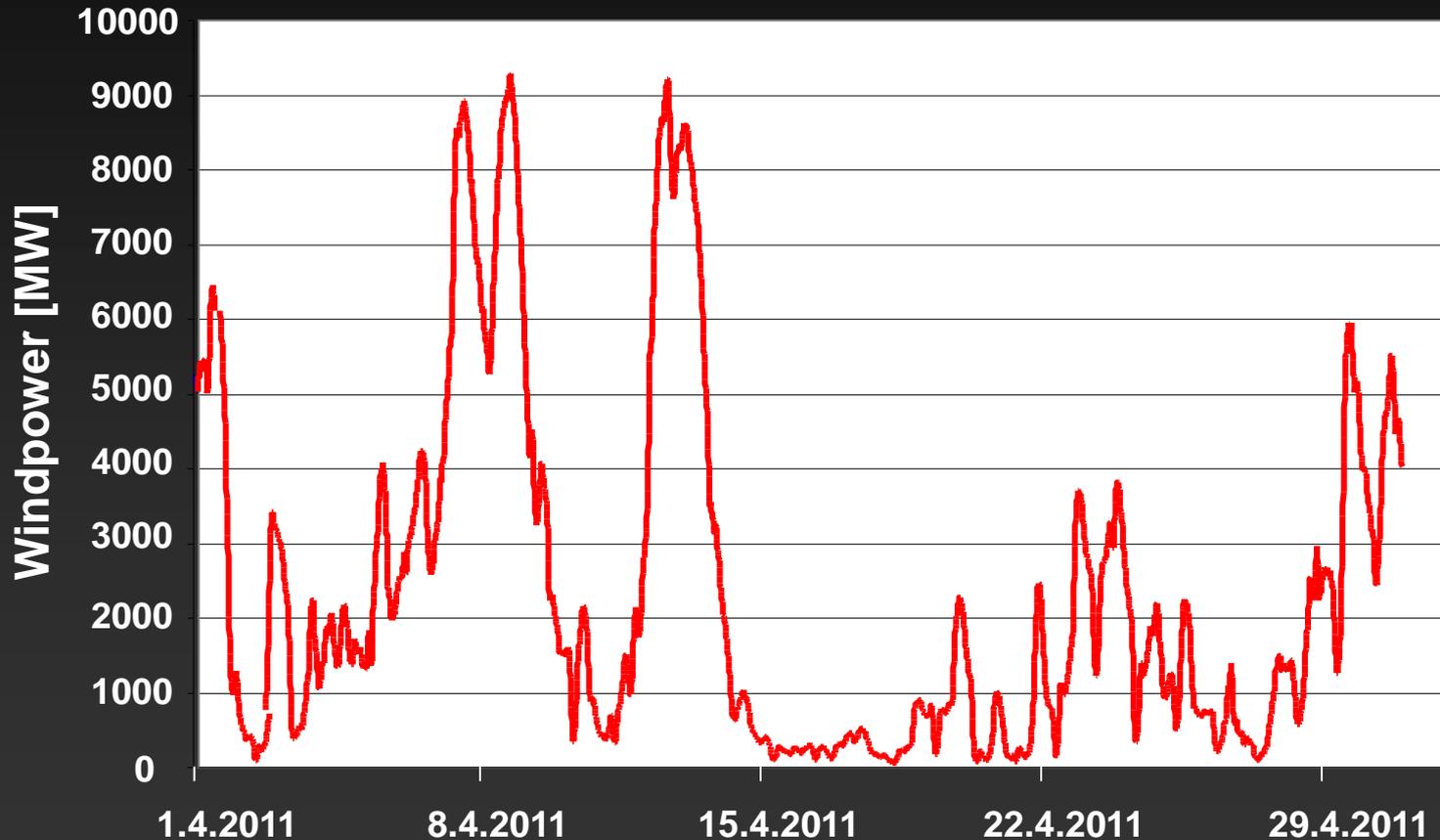


Resultat: RC-ARM winter + 1.4 GW, summer + 0.4 GW

Deutschlands Regelzonen

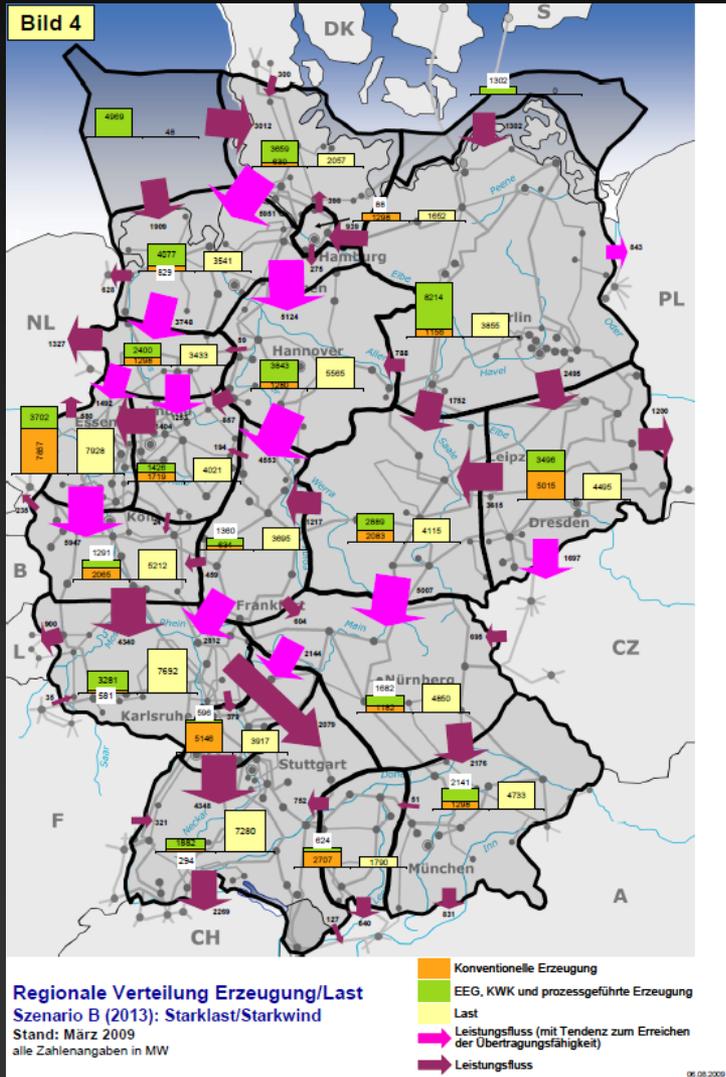


Windenergiefluktuationen in der 50 Hertz Regelzone



Windpower in 50 Hertz control area April 2011

Netzstabilität

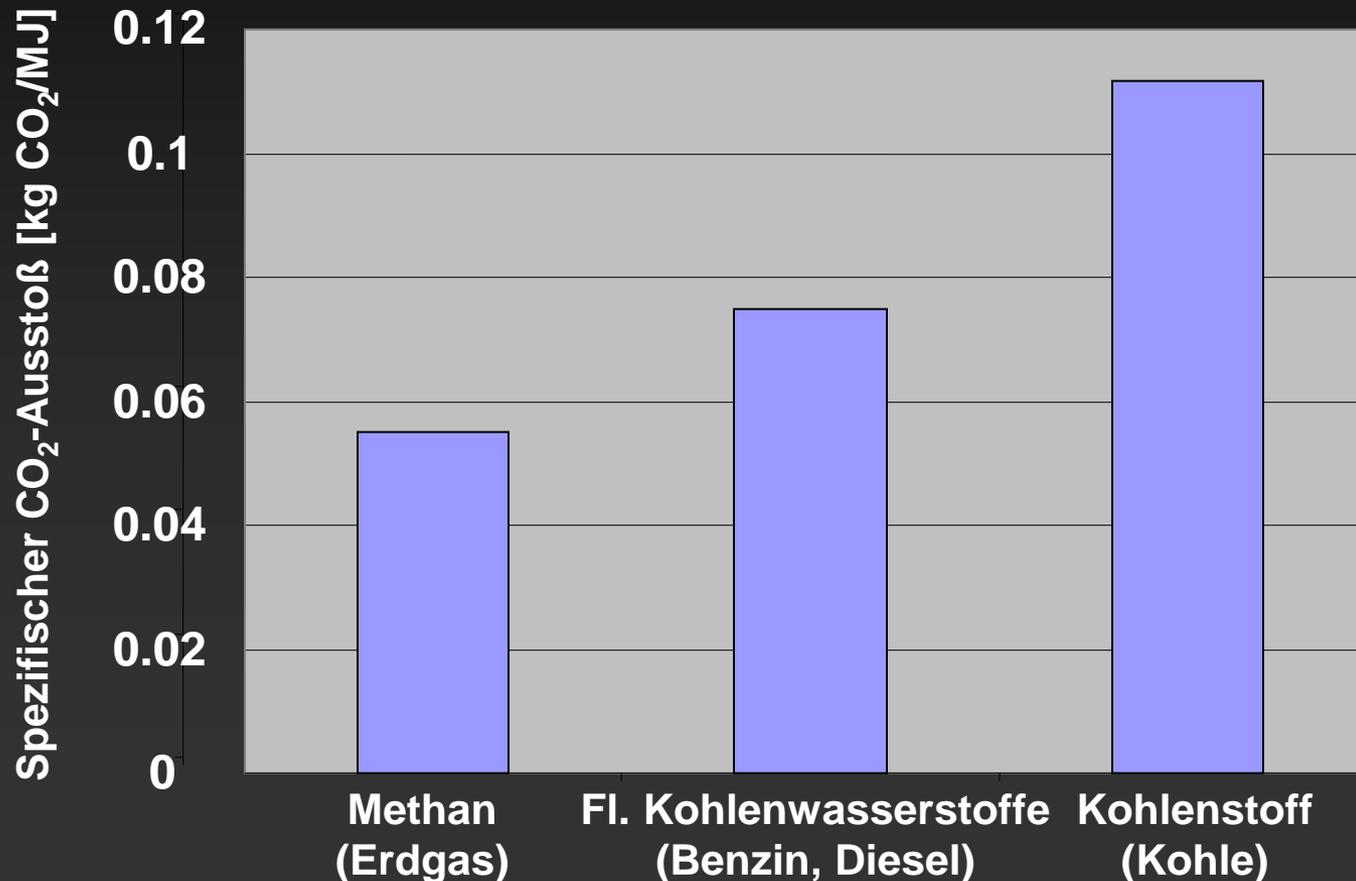


- Stromleitungen für regional nicht balancierte Produktion und Verbrauch elektrischer Energie fehlen
- Große Kraftwerke fehlen für Blindleistungsregelung
- Detailanalyse der Bundesnetzagentur zeigt, dass ein „außergewöhnliches Fehlerereignis“ und gleichzeitig Ausfall von entweder Brokdorf oder Philippsburg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

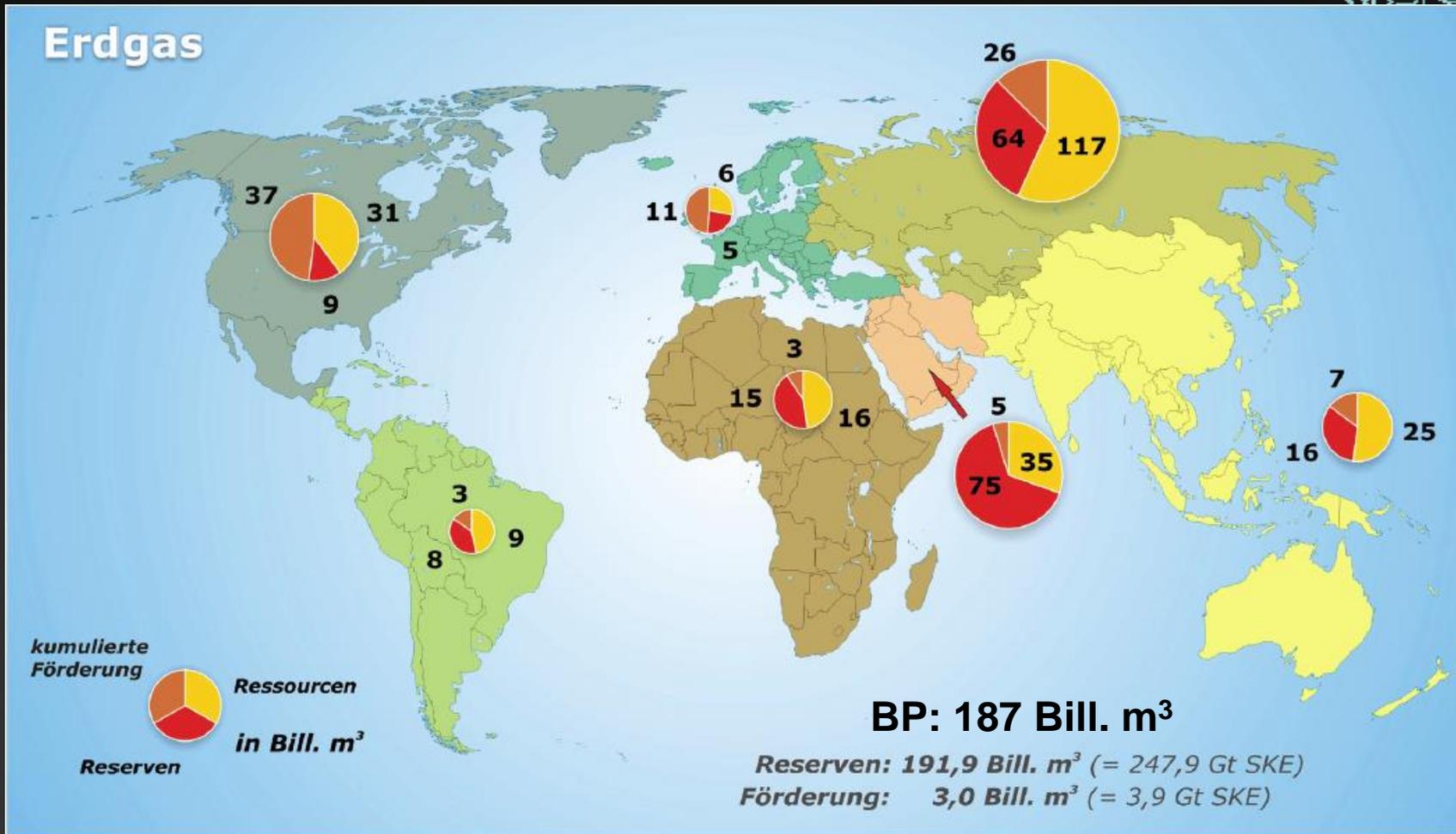
Schon noch einige Jahrzehnte: Fossile Energieträger



Spezifischer CO₂-Ausstoß unterschiedlicher fossiler Energieträger, Heizwert, ohne Umwandlungsverluste



Verfügbare Energie: Erdgas



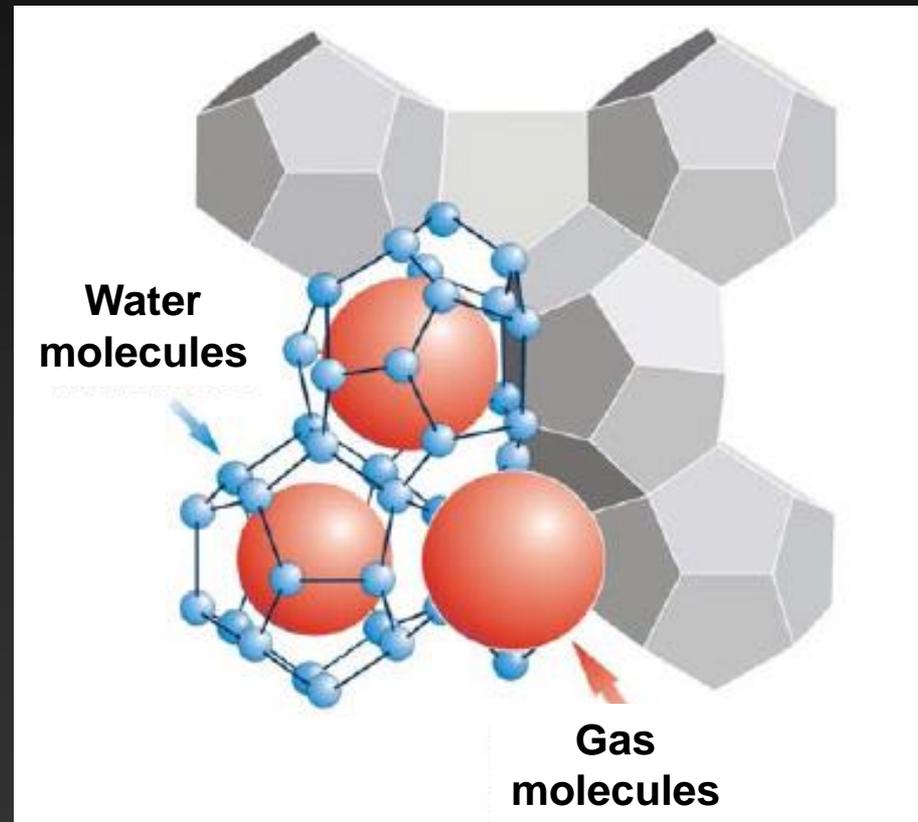
Unkonventionelles Gas



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

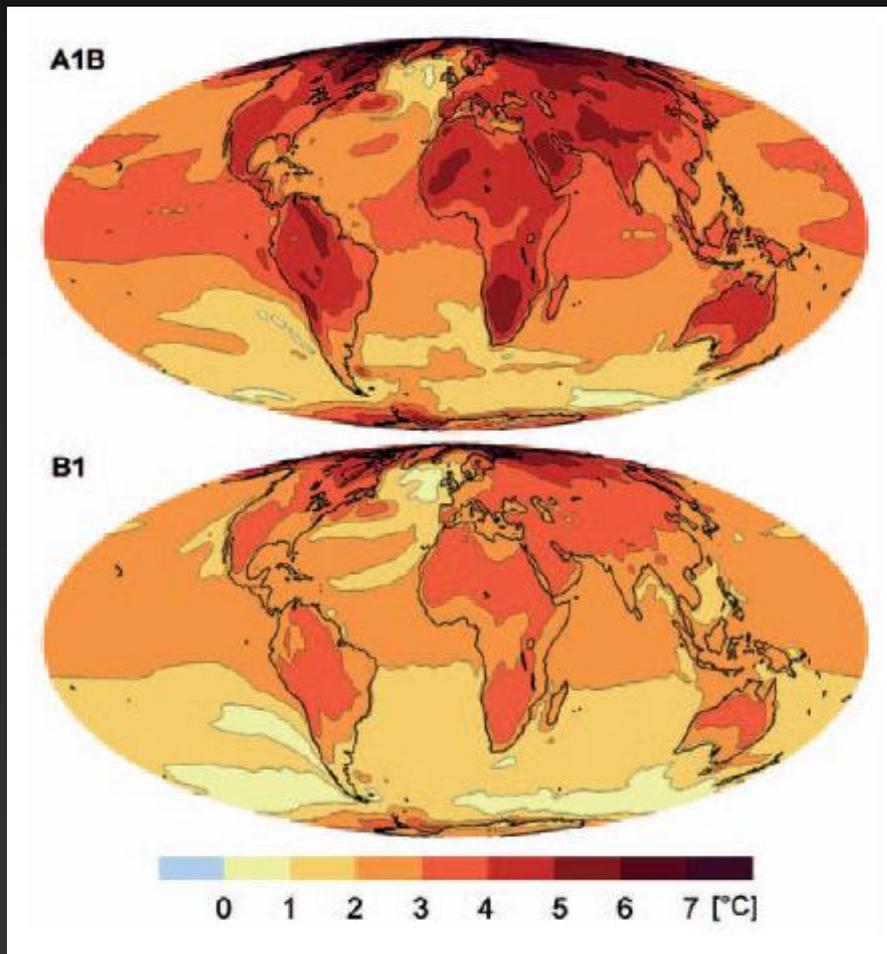
Energieträger	Maßeinheit	Reserven (s. linke Spalte)	EJ	Ressourcen (s. linke Spalte)	EJ
Shale Gas	Bill. m ³	1,7 ⁵⁾	65 ⁵⁾	456 ⁶⁾	17 329 ⁶⁾
Tight Gas	Bill. m ³	1 ⁵⁾	46 ⁵⁾	210 ⁶⁾	7 970 ⁶⁾
Kohleflözgas	Bill. m ³	2	80	254	9 652
Erdgas in Aquiferen	Bill. m ³	–	–	800	30 400
Gashydrat	Bill. m ³	–	–	1 000	38 000

Eine große Ressource: Gashydrate



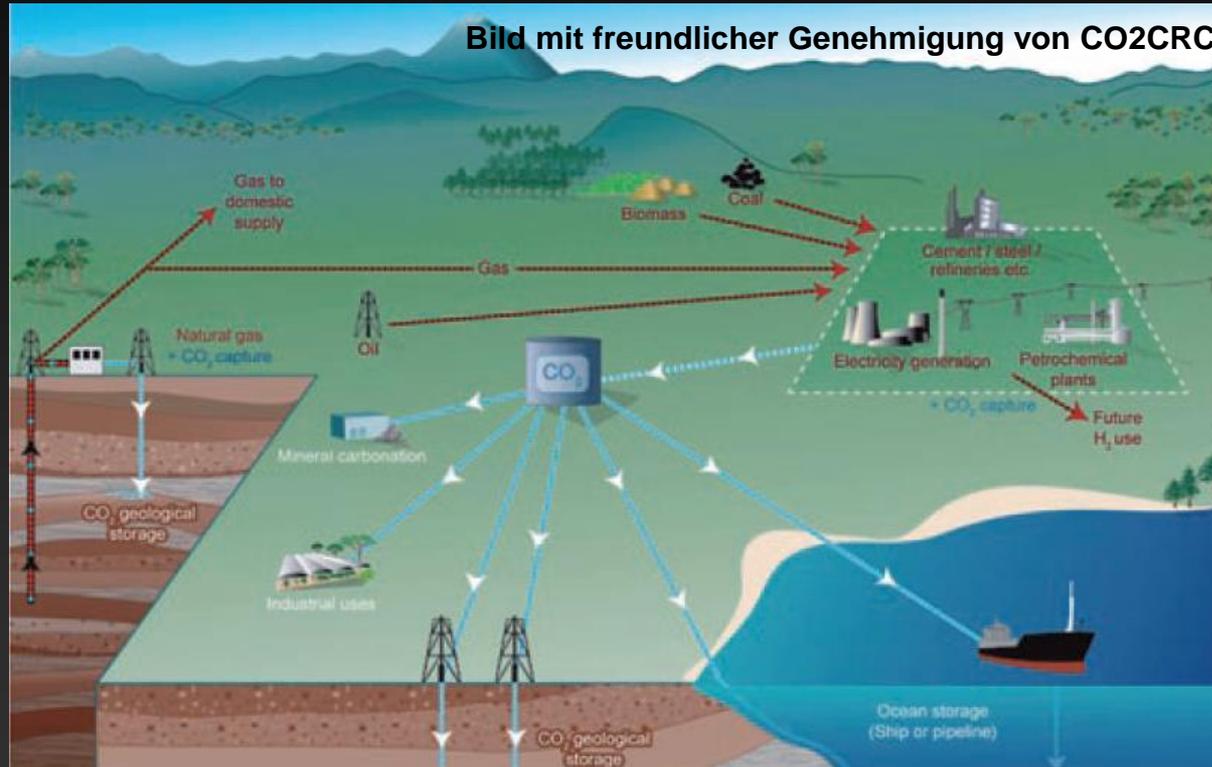
In Permafrostböden und auf dem Ozeanboden

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 > 10⁶ t:

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

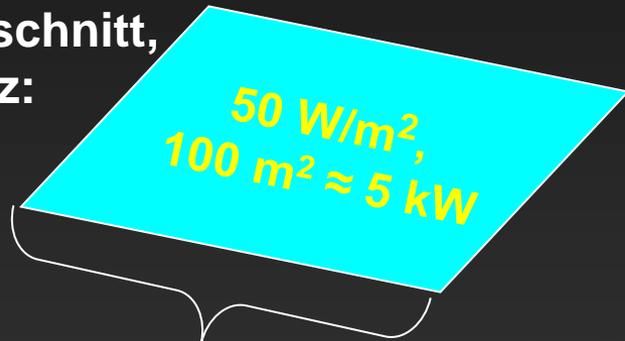
Abtrennung durch Aminwäsche oder Adsorption

Neue Kraftwerkstypen (Oxyfuel, IGCC) und Abtrennung

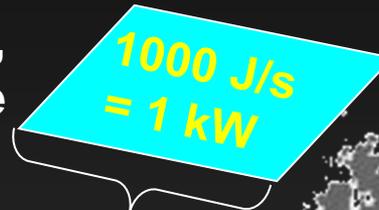
Im Prinzip haben wir weltweit ausreichend Energie...



Sahara Tag und Nacht Durchschnitt, 10 % Effizienz:



Sahara-Tag, Sonne



1 m

ca. 835 km



700.000 km² Wüstenfläche (Deutschland: 360.000 km²) reichen, um 7 Milliarden Menschen auf den EU-Energiestandard zu bringen (Primärenergie)



L-B-Systemtechnik

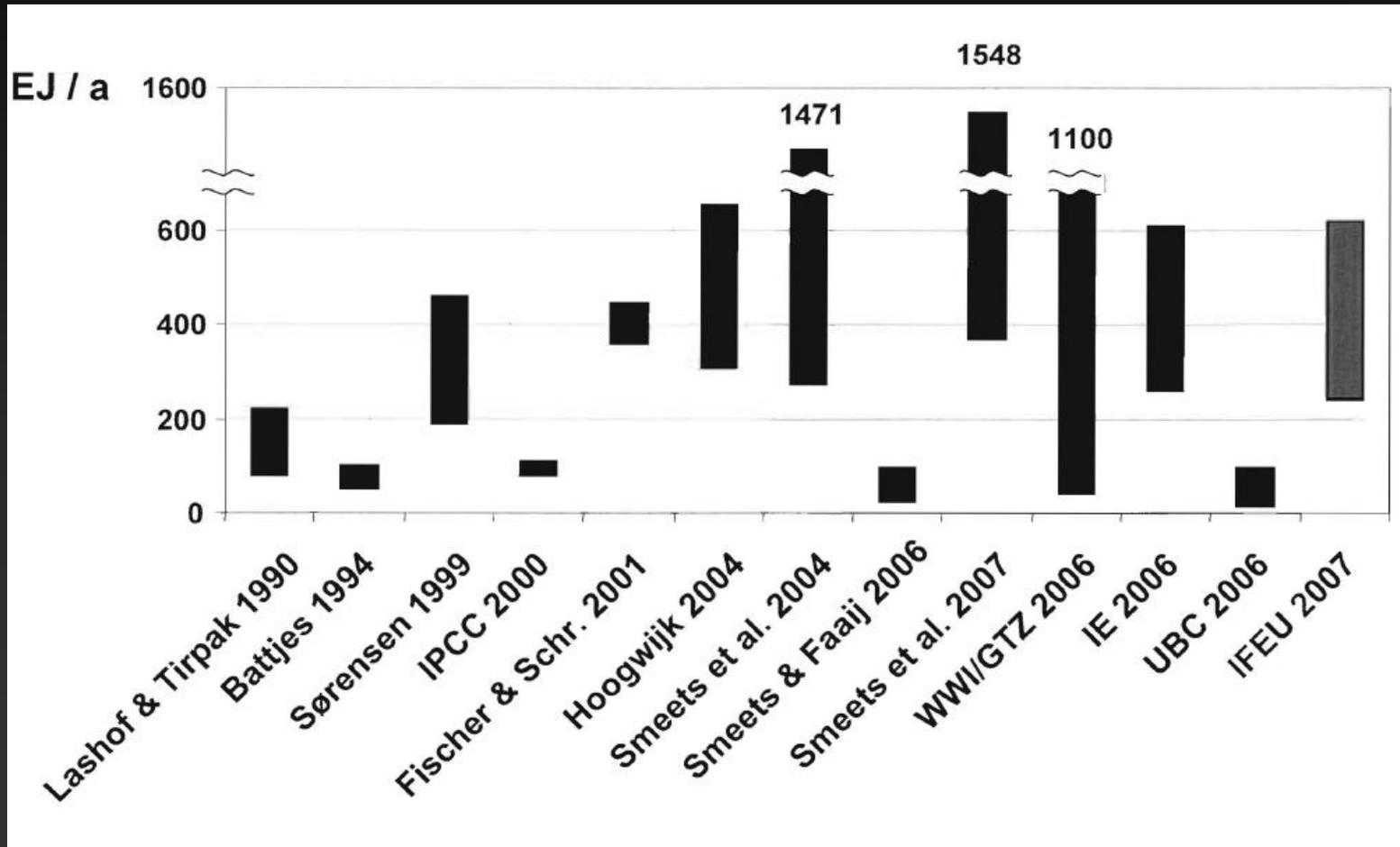
Quelle: LBST

...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 CO₂ 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

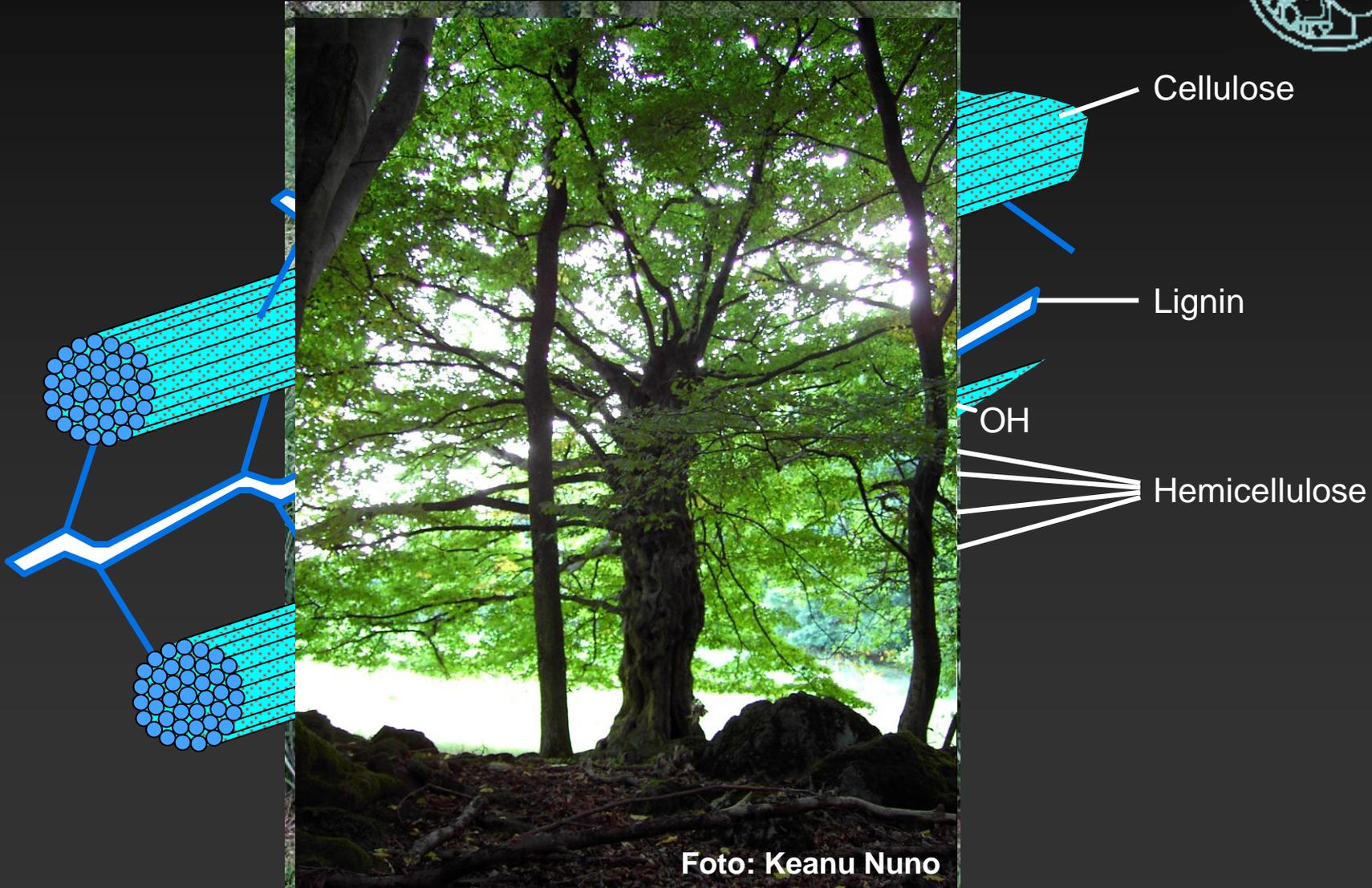
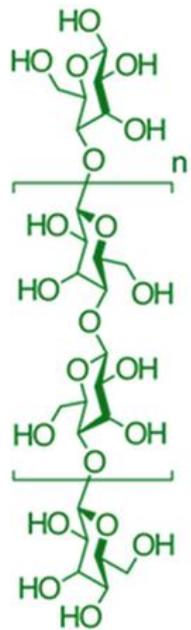
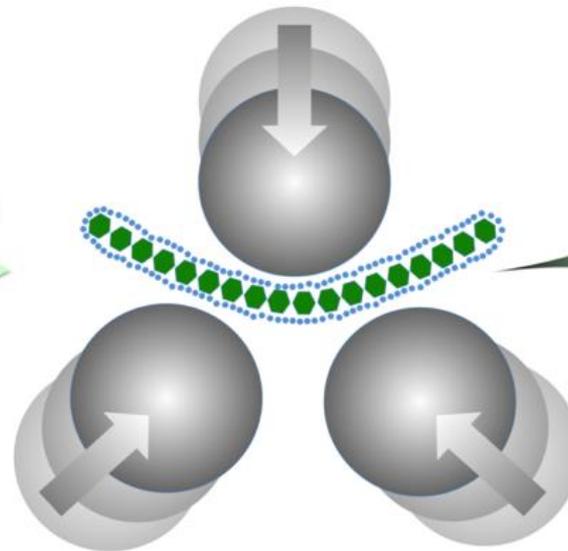
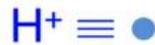


Foto: Keanu Nuno

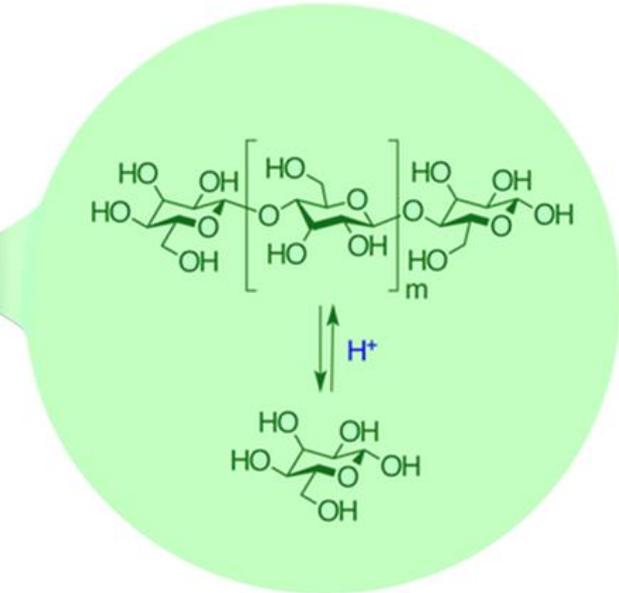
Mechanisch unterstützte katalytische Depolymerisation von Cellulose



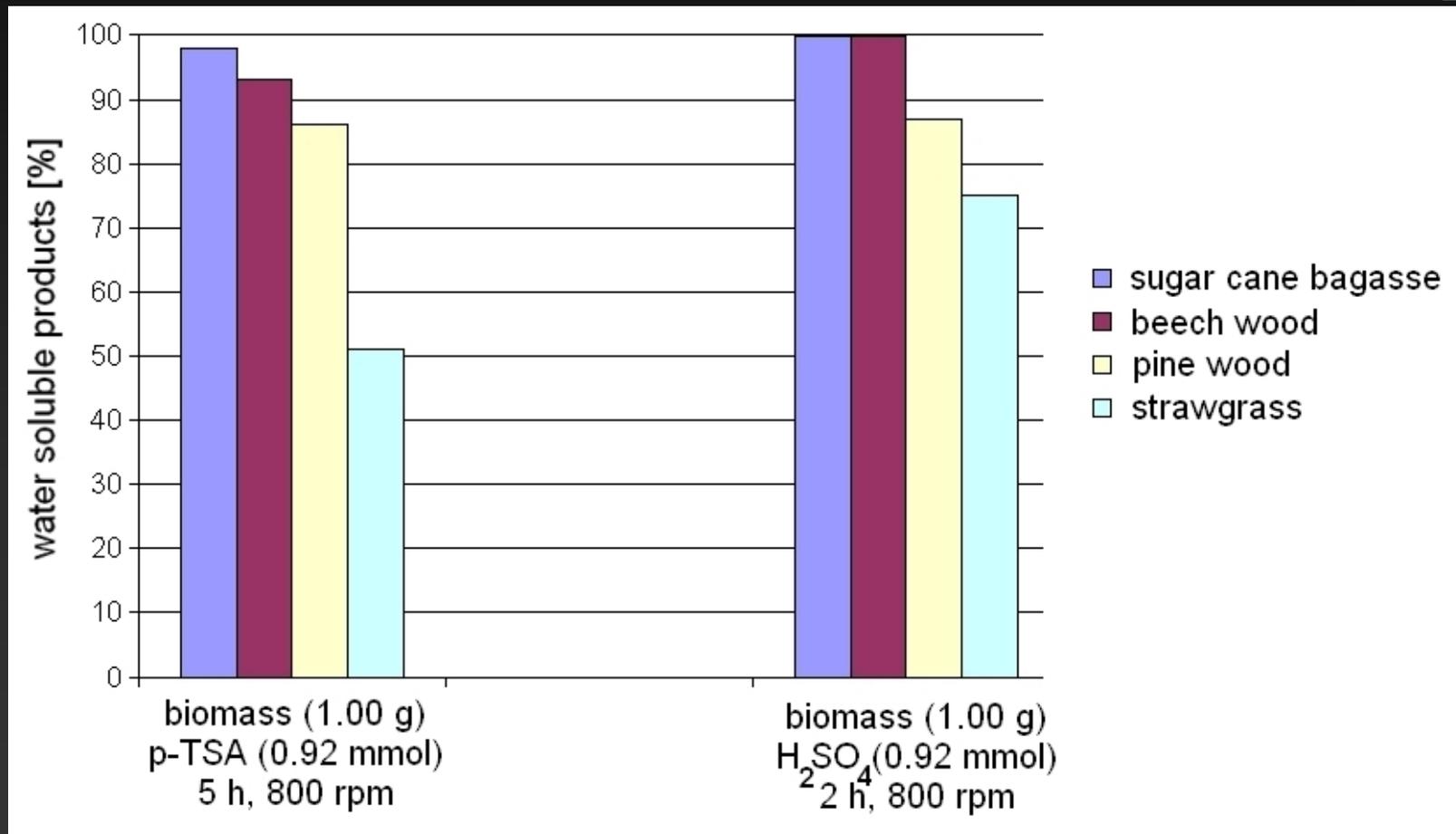
Impregnation



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



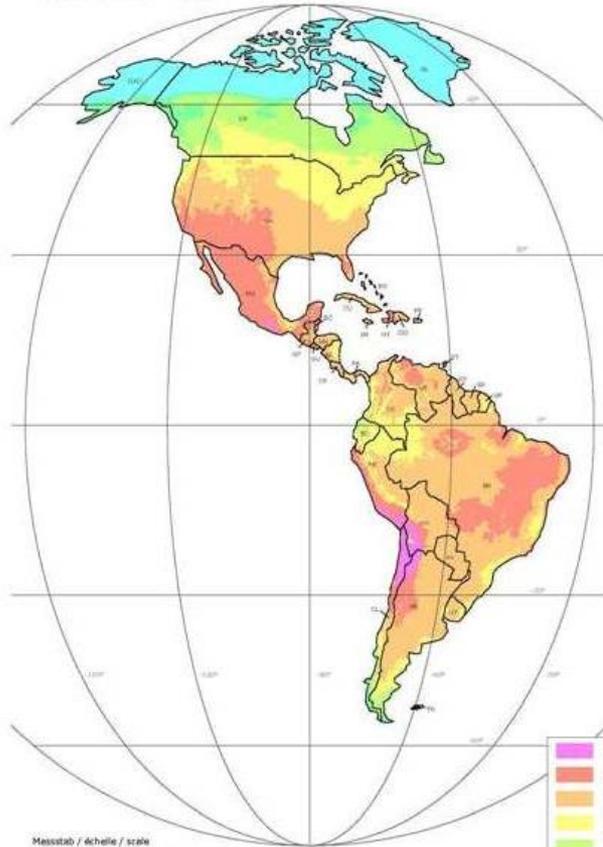
Foto: Georg Slickers

Deutschland kein optimaler Standort



Jährliche solare Globalstrahlung

Mittelwerte 1981-2000



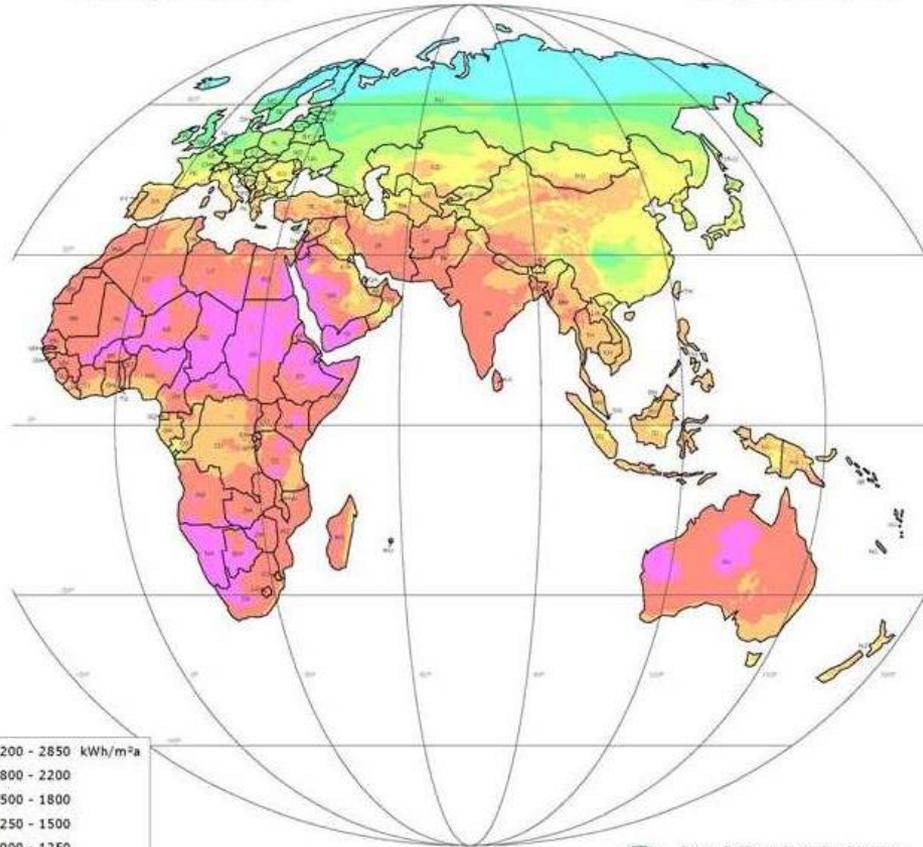
Massstab / échelle / scale

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...

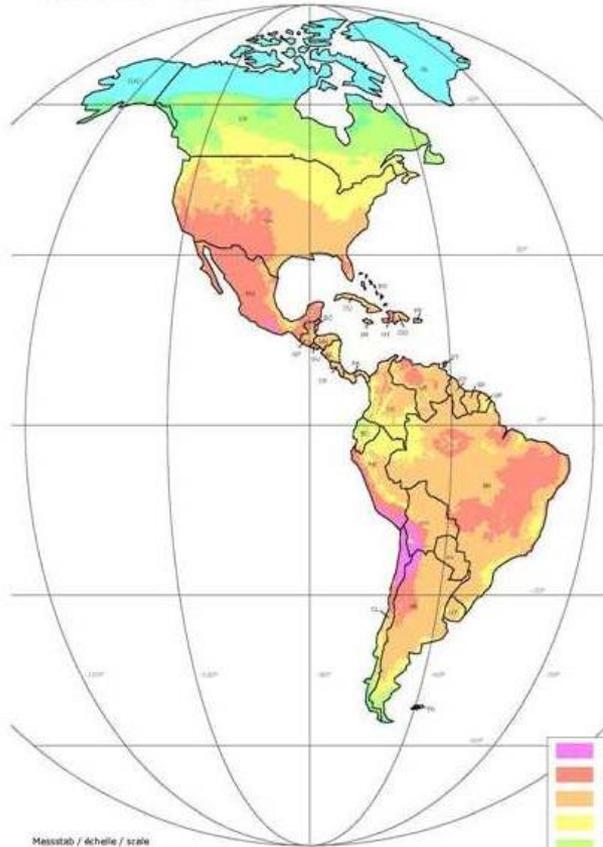


- **Installierte Leistung 2010 17.3 GW, 2011 ca. 25 GW**
- **Prognose 2015 knapp 40 GW**
- **Schwierig vorhersehbar aufgrund politischer Rahmenbedingungen**
- **Aber: Netzparität in Sicht**
- **Berücksichtigen: Nicht gesicherte Leistung Photovoltaik 90%!**

Deutschland kein optimaler Standort



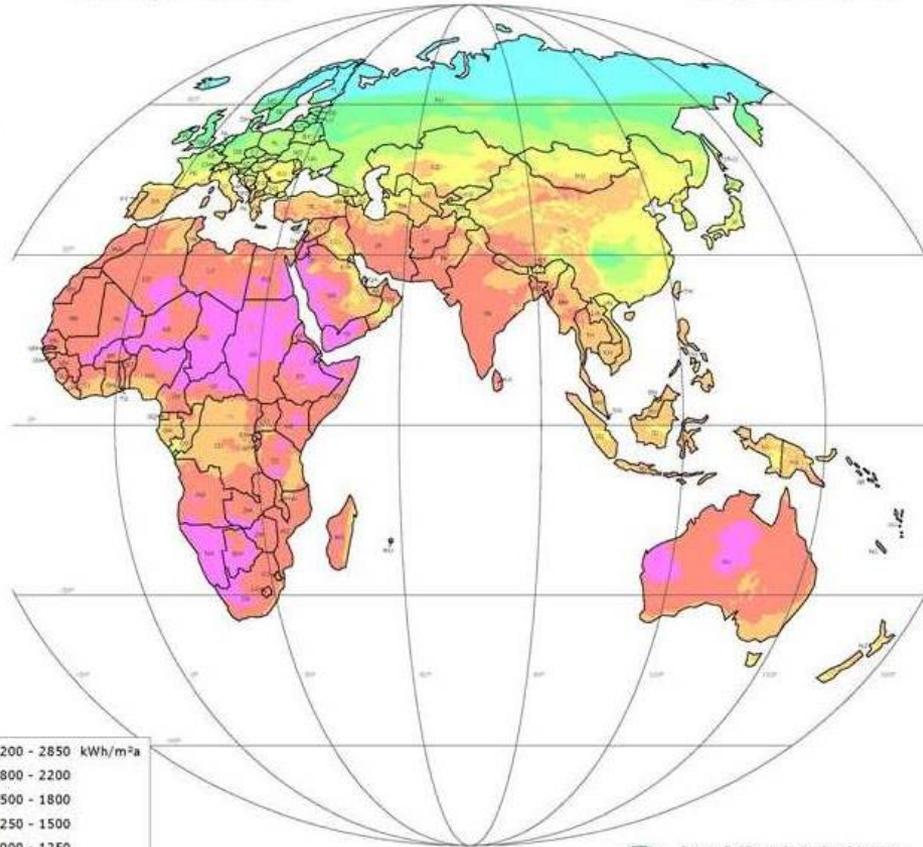
Jährliche solare Globalstrahlung
Mittelwerte 1981-2000



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-Atlas Verlag, CH-5620 Bremgarten
Schweiz / Suisse / Switzerland

Solarthermische Kraftwerke



Nicht-gesicherte Leistung PV: 90% → Solarthermische Kraftwerke



Parabolrinnenkraftwerk Andasol I

27 500 t 60% NaNO_3 /40% 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/)

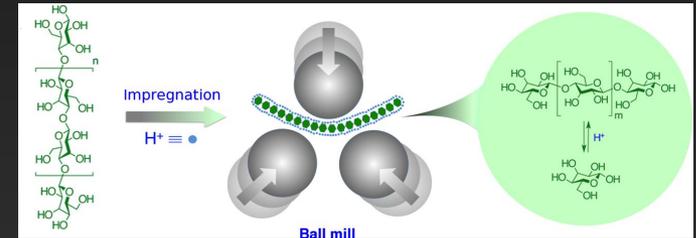
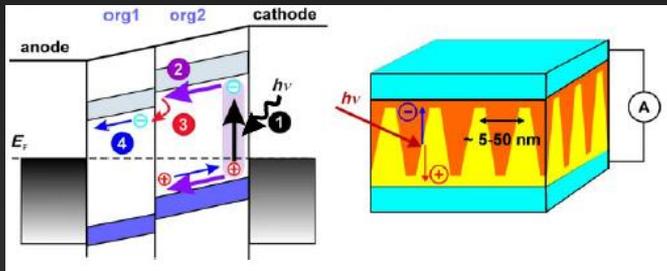
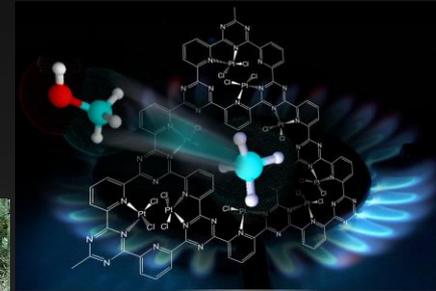
Offshore park Thornton Banks

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 km² (Deutschland 360 000 km²)**
- **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

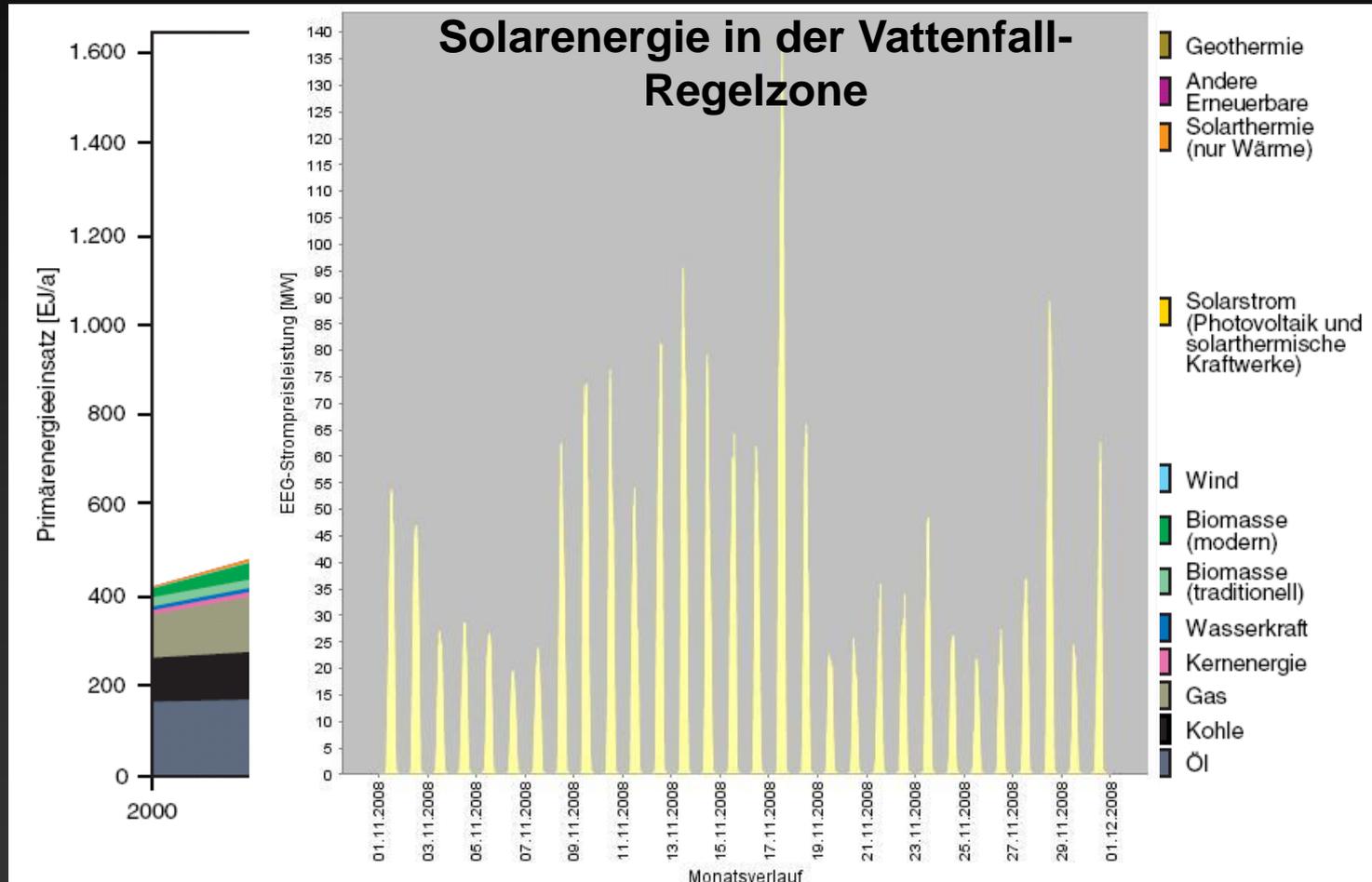


Abbildung 1

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

(Quelle: WBCU)

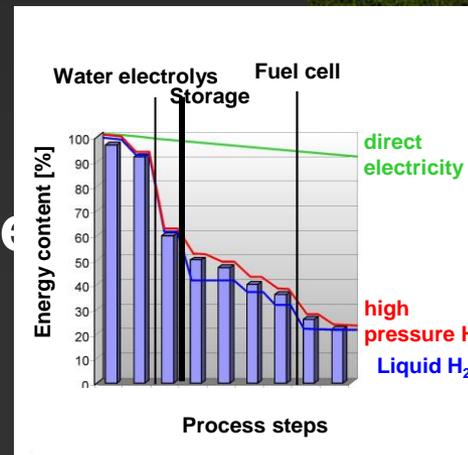
bau,

Reservekapazität, Demand Side Management und Speicherung

Optionen für Energiespeicherung



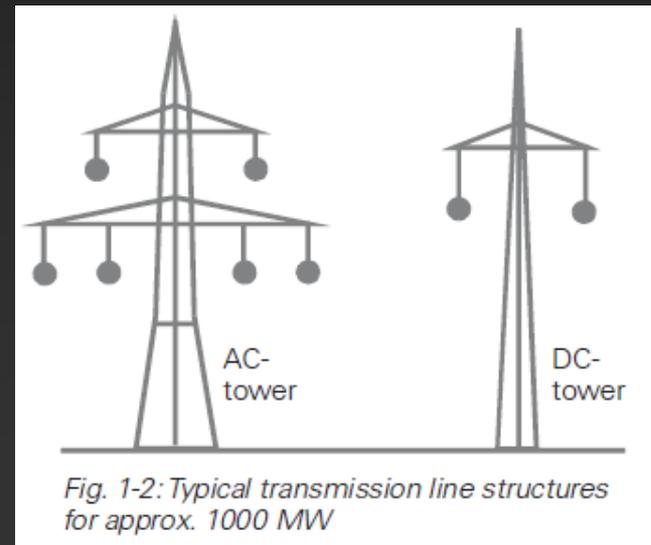
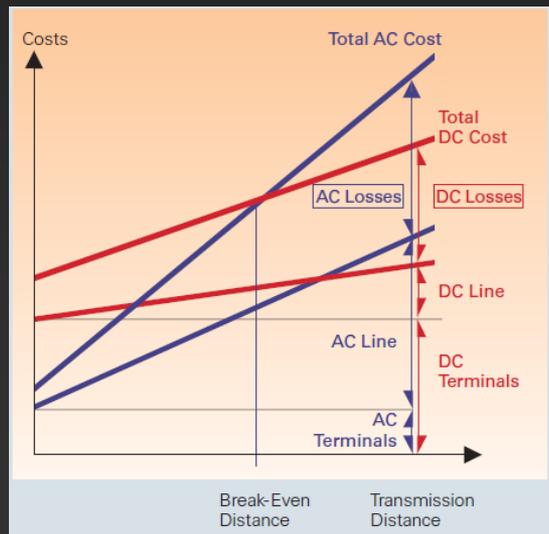
- **Pumpspeicher**
 - » Effizient
 - » Relativ günstig
 - » Niedrige Kapazität
- **Druckluftspeicher**
 - » Mittlere Effizienz
 - » Mittlere Kosten
 - » Mäßige Kapazität
- **Batterien**
 - » Effizienz
 - » Derzeit teuer
 - » Mittlere Kapazität
- **Chemische Speicher**
 - » Niedrige Effizienz
 - » Sehr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



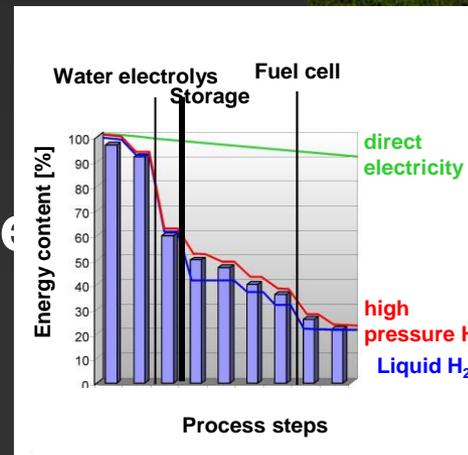
High Voltage Direct Current Transmission, Siemens AG, 2008

http://www.siemens.co.in/pool/about_us/our_business_segments/hvdc_proven_technology.pdf

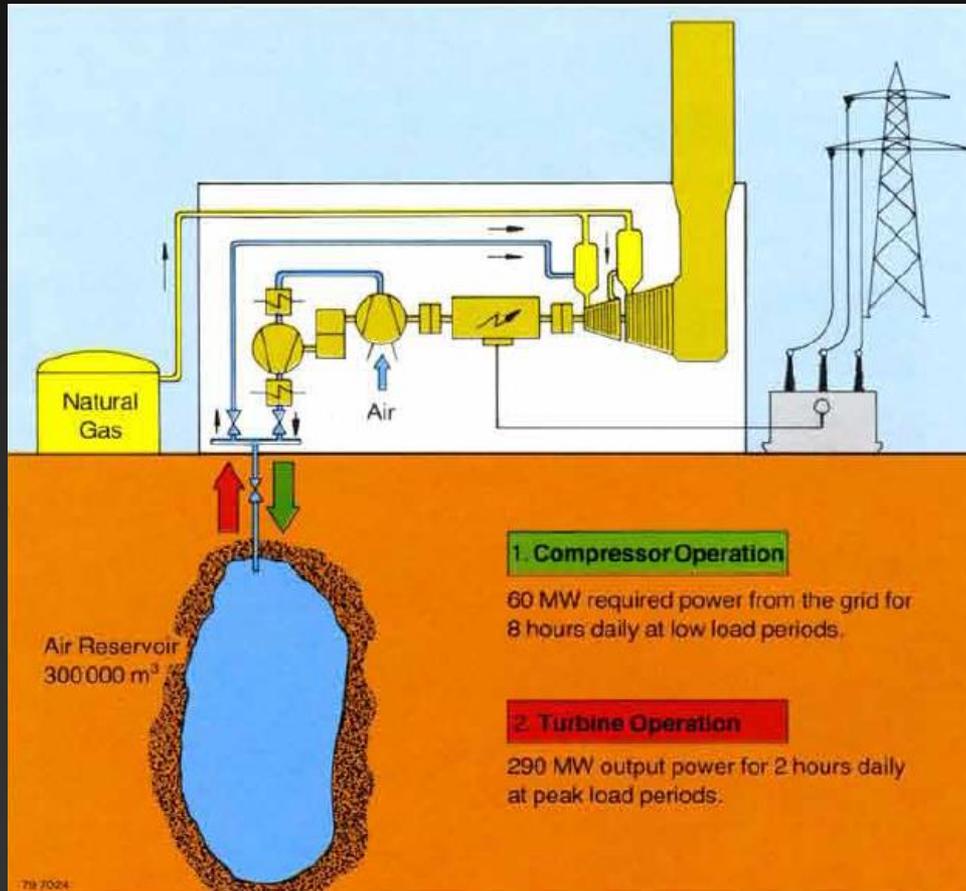
Optionen für Energiespeicherung



- **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)



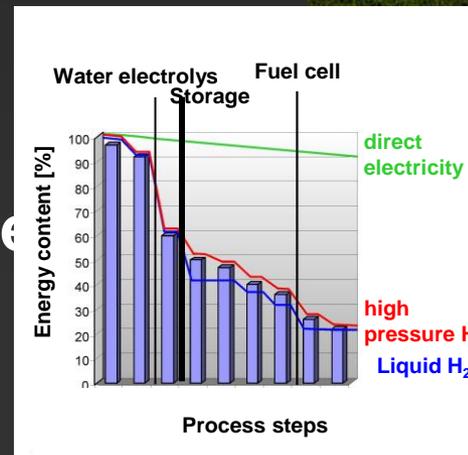
Energieeffizienz etwa 50 %

Adiabatischer Betrieb bis 70 %

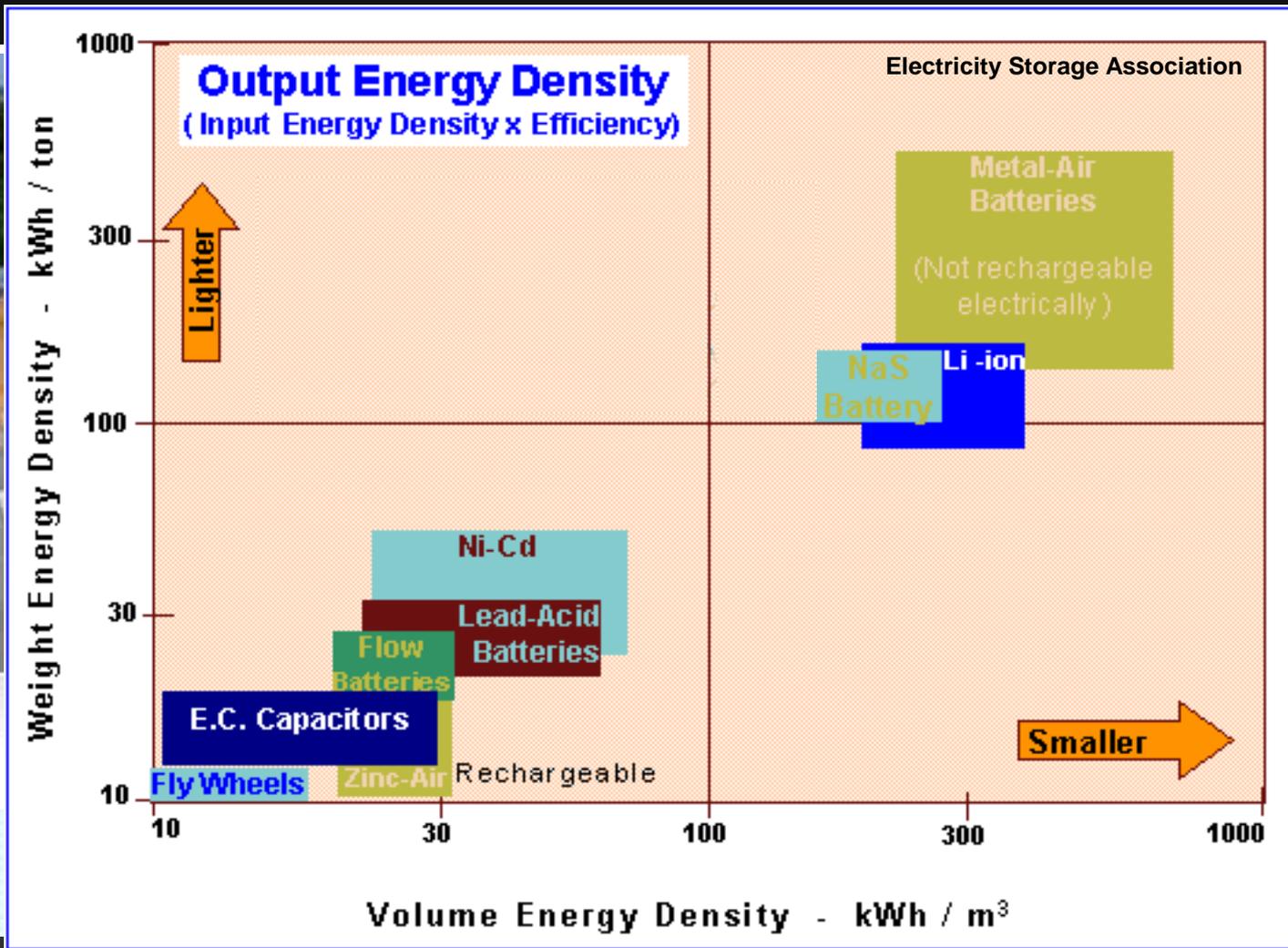
Optionen für Energiespeicherung



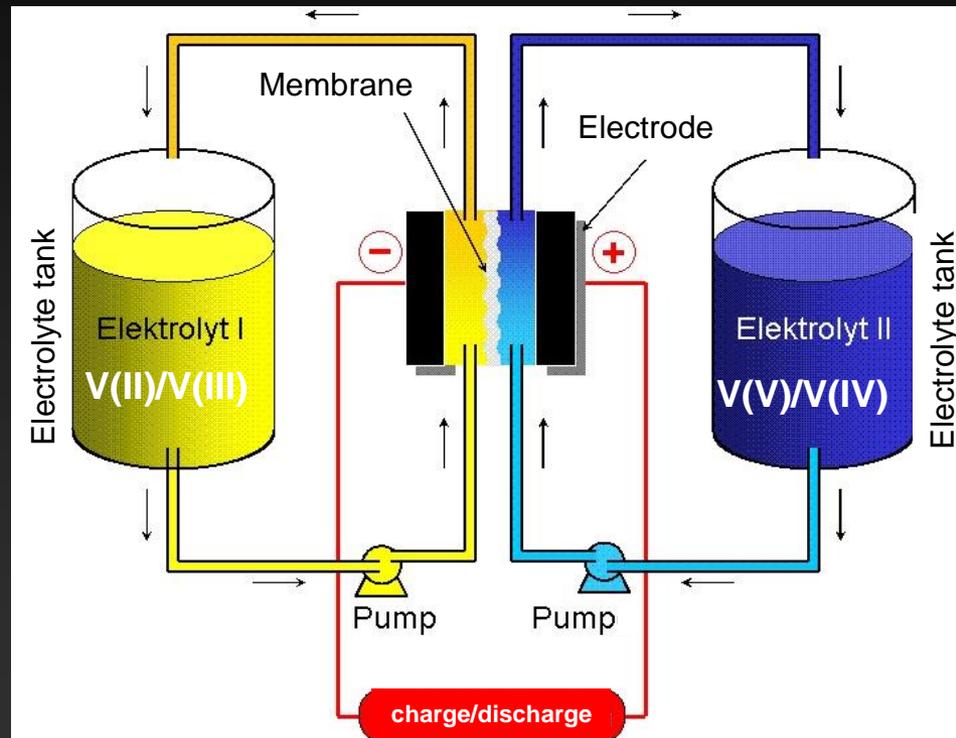
- **Pumpspeicher**
 - » Effizient
 - » Relativ günstig
 - » Niedrige Kapazität
- **Druckluftspeicher**
 - » Mittlere Effizienz
 - » Mittlere Kosten
 - » Mäßige Kapazität
- **Batterien**
 - » Effizienz
 - » Derzeit teuer
 - » Mittlere Kapazität
- **Chemische Speicher**
 - » Niedrige Effizienz
 - » Sehr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



Natrium-Schwefel-Batterie



Redox-flow Batterien: Vanadium als Beispiel

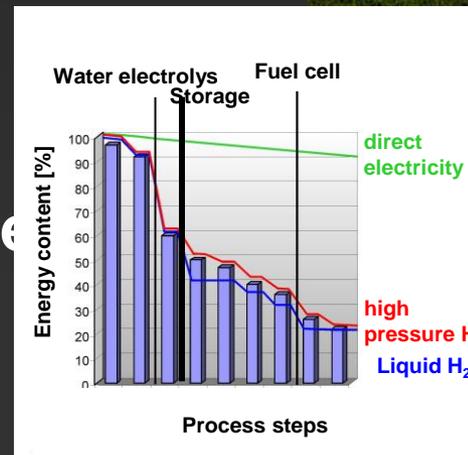


8 MWh entspricht 600 t Elektrolyt, 28 t stack
und einem Flächenbedarf von 240 m²
d.h. Energiedichte ist niedriger als 1/10 von Li-Ionenbatterien

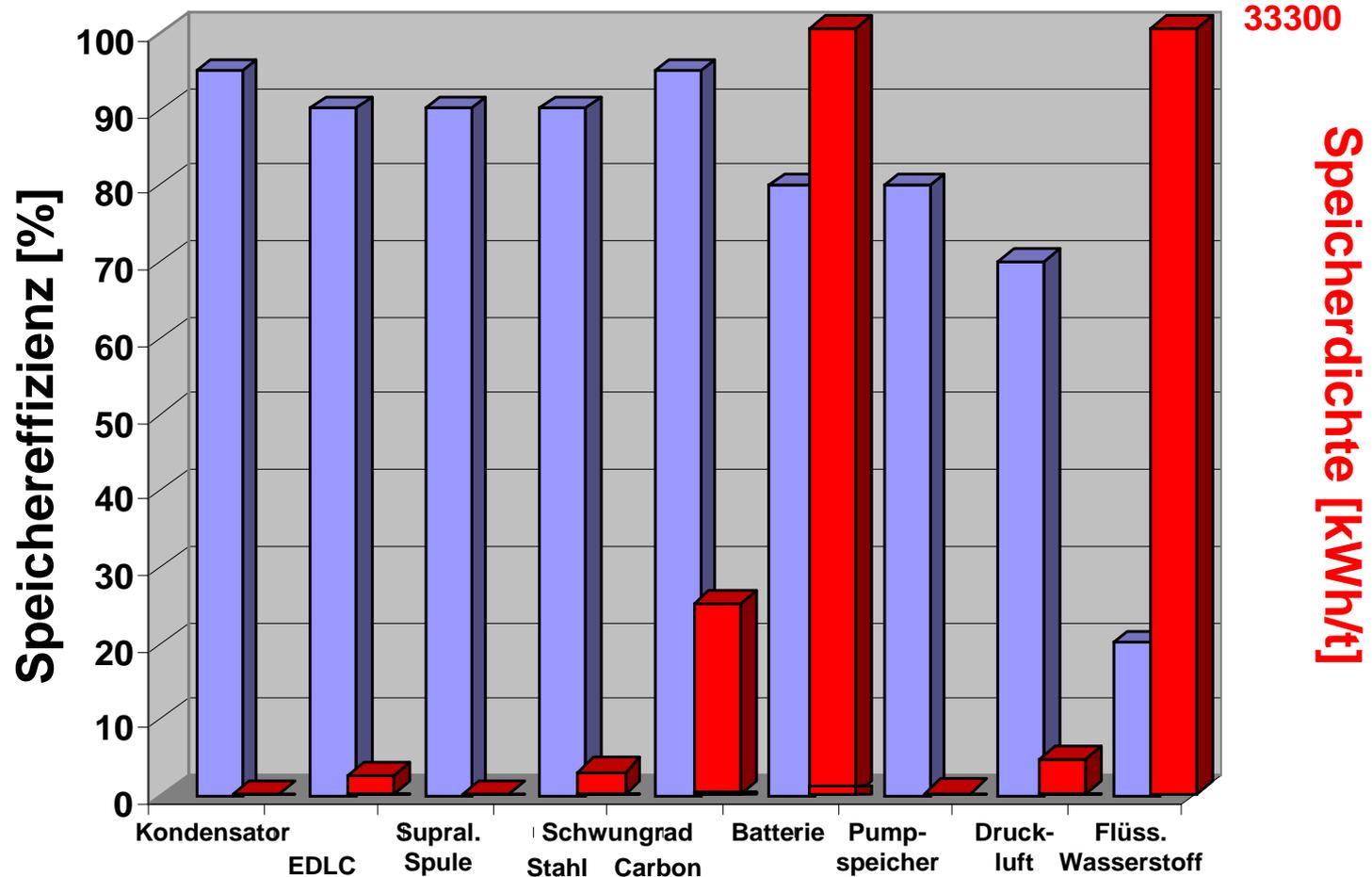
Optionen für Energiespeicherung



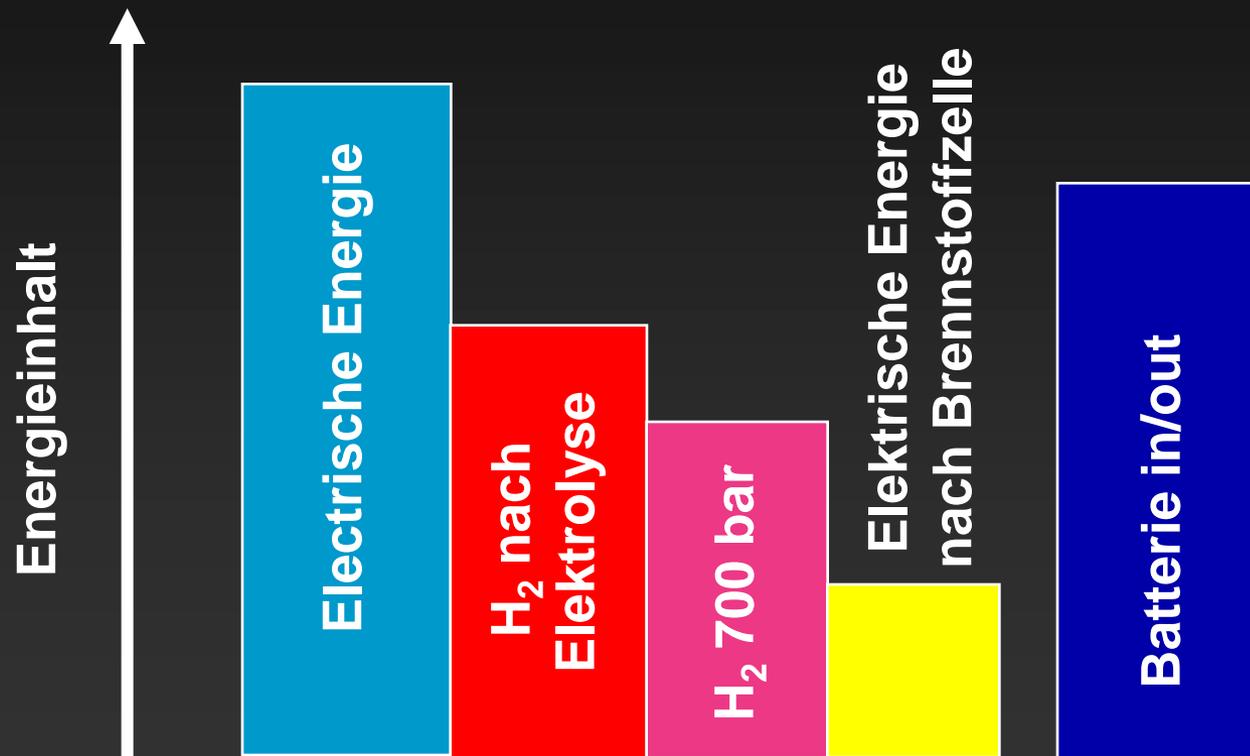
- **Pumpspeicher**
 - » Effizient
 - » Relativ günstig
 - » Niedrige Kapazität
- **Druckluftspeicher**
 - » Mittlere Effizienz
 - » Mittlere Kosten
 - » Mäßige Kapazität
- **Batterien**
 - » Effizienz
 - » Derzeit teuer
 - » Mittlere Kapazität
- **Chemische Speicher**
 - » Niedrige Effizienz
 - » Sehr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



Vergleich unterschiedlicher Speicheroptionen

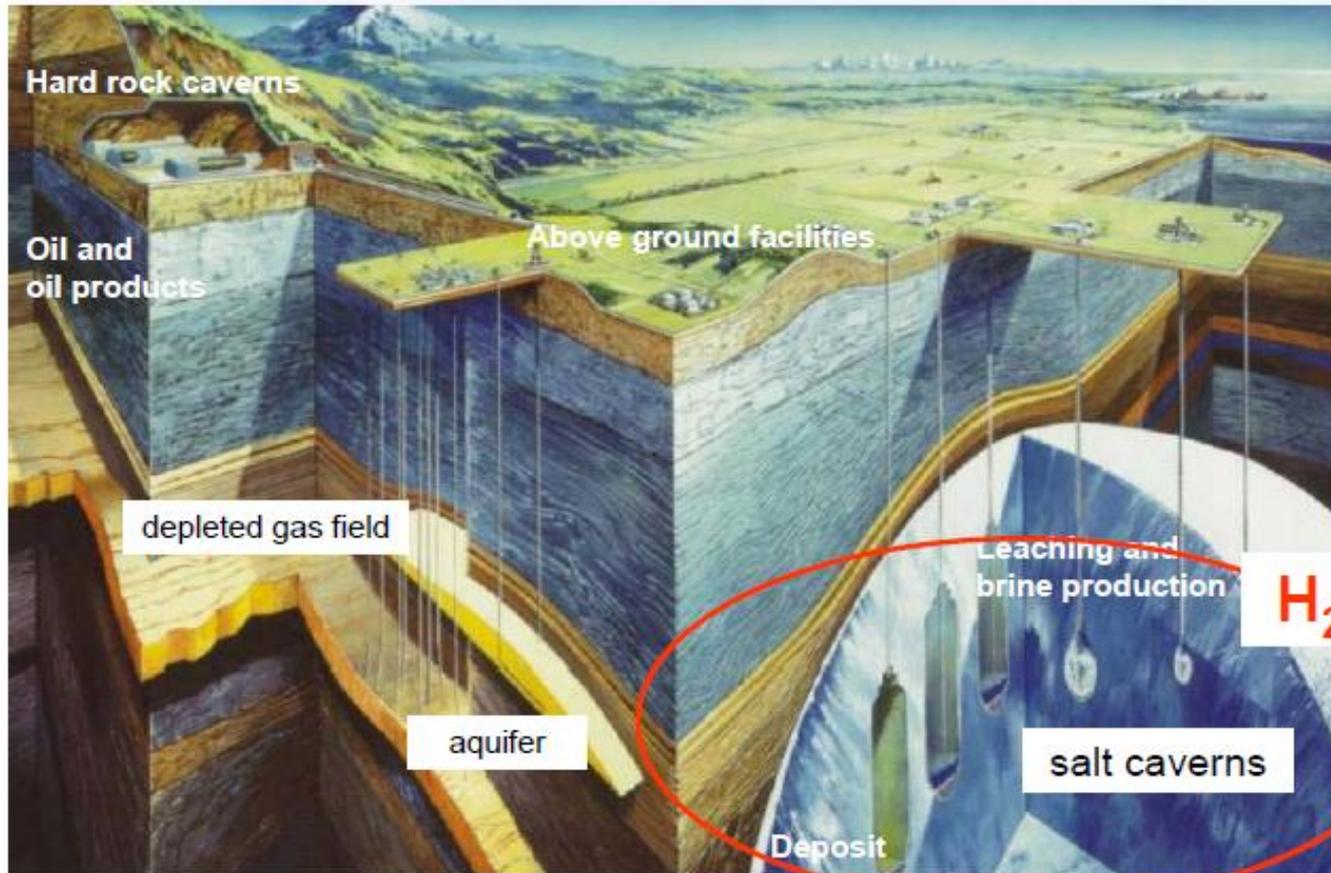


Hydrogen economy: Wasserstoff aus elektrischer Energie?



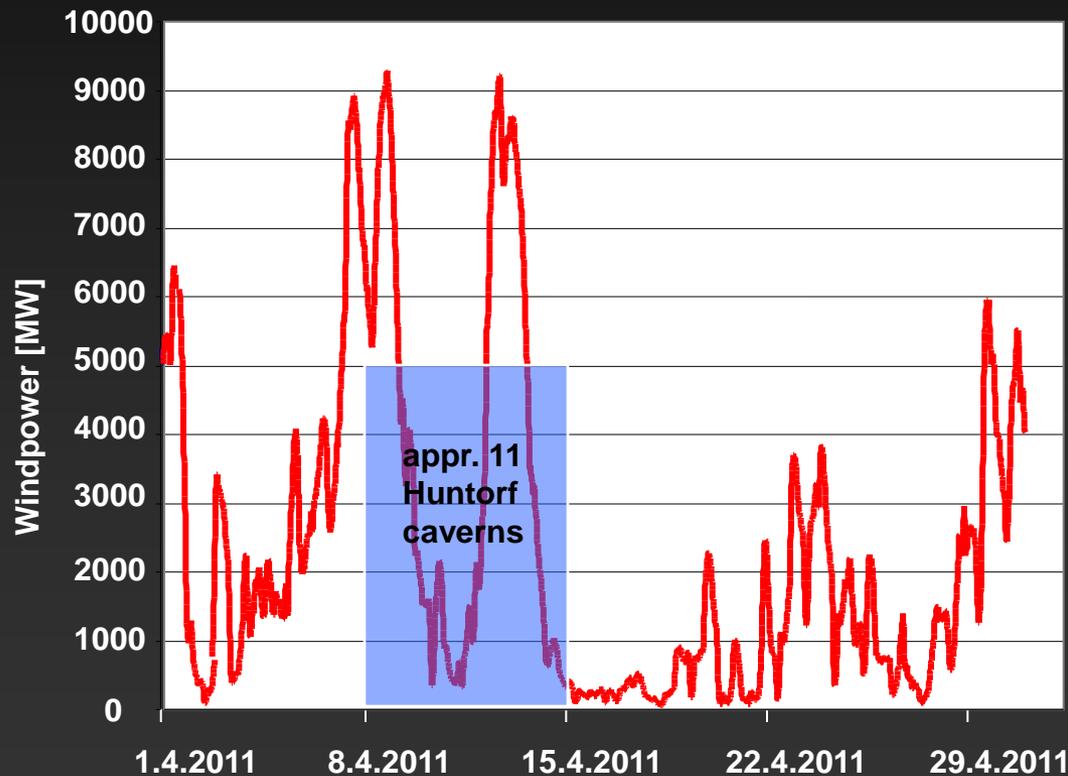
Deutliche Verbesserungen in allen Elementen der Wasserstoffkette erforderlich

Speicherung in Salzkavernen



ludwig bölkow
systemtechnik

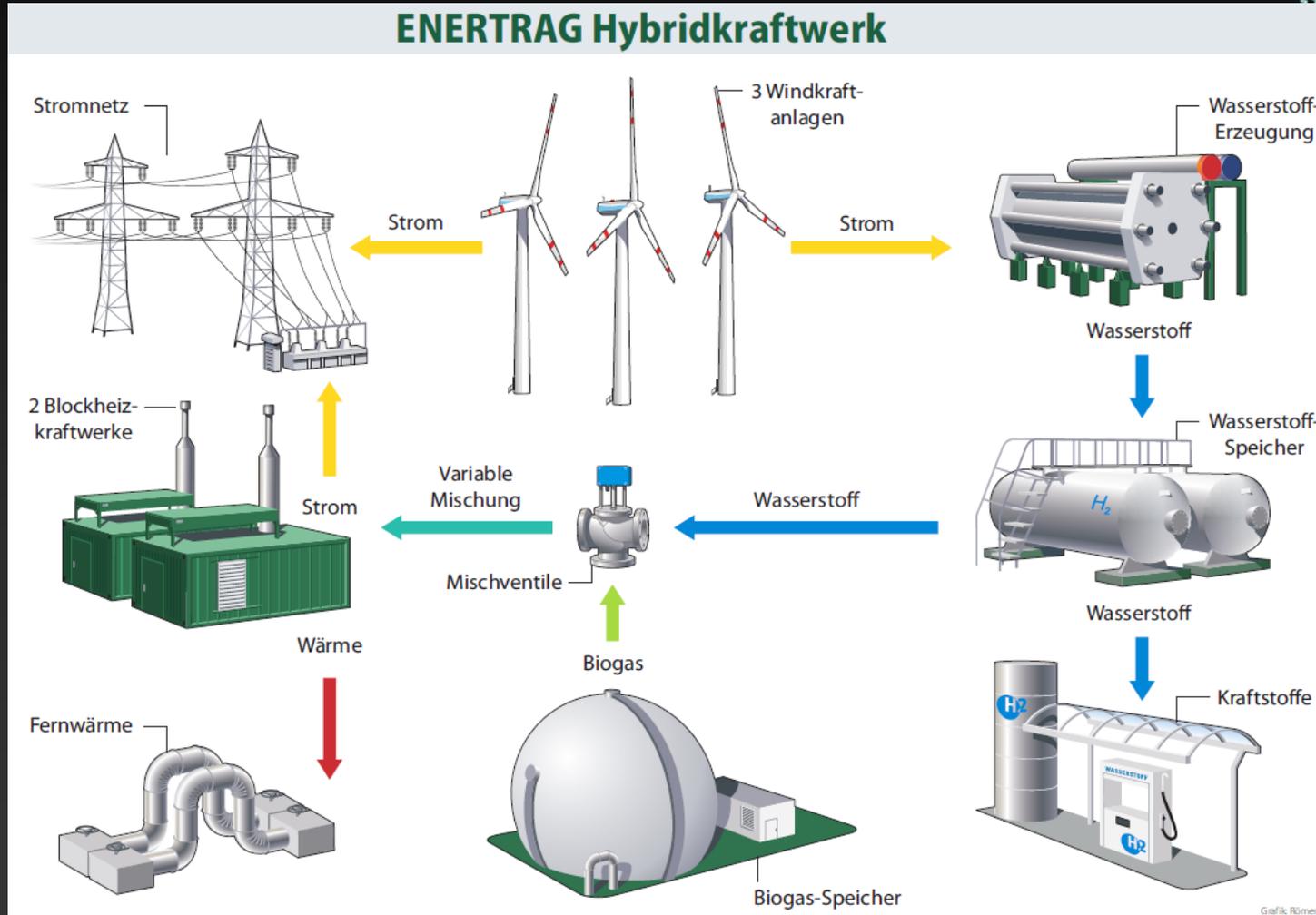
Speicherkapazität Wasserstoff in Kavernen



Huntorf 300 000 m³
150 bar Druck
45 000 000 Nm³ H₂
12 MJ/m³ = 3.3 kWh/m³
50 % Effizienz: 74250 MWh

Siemens: 2012 Demonstrator Elektrolyseur 300 kW

Enertrag Hybridkraftwerk



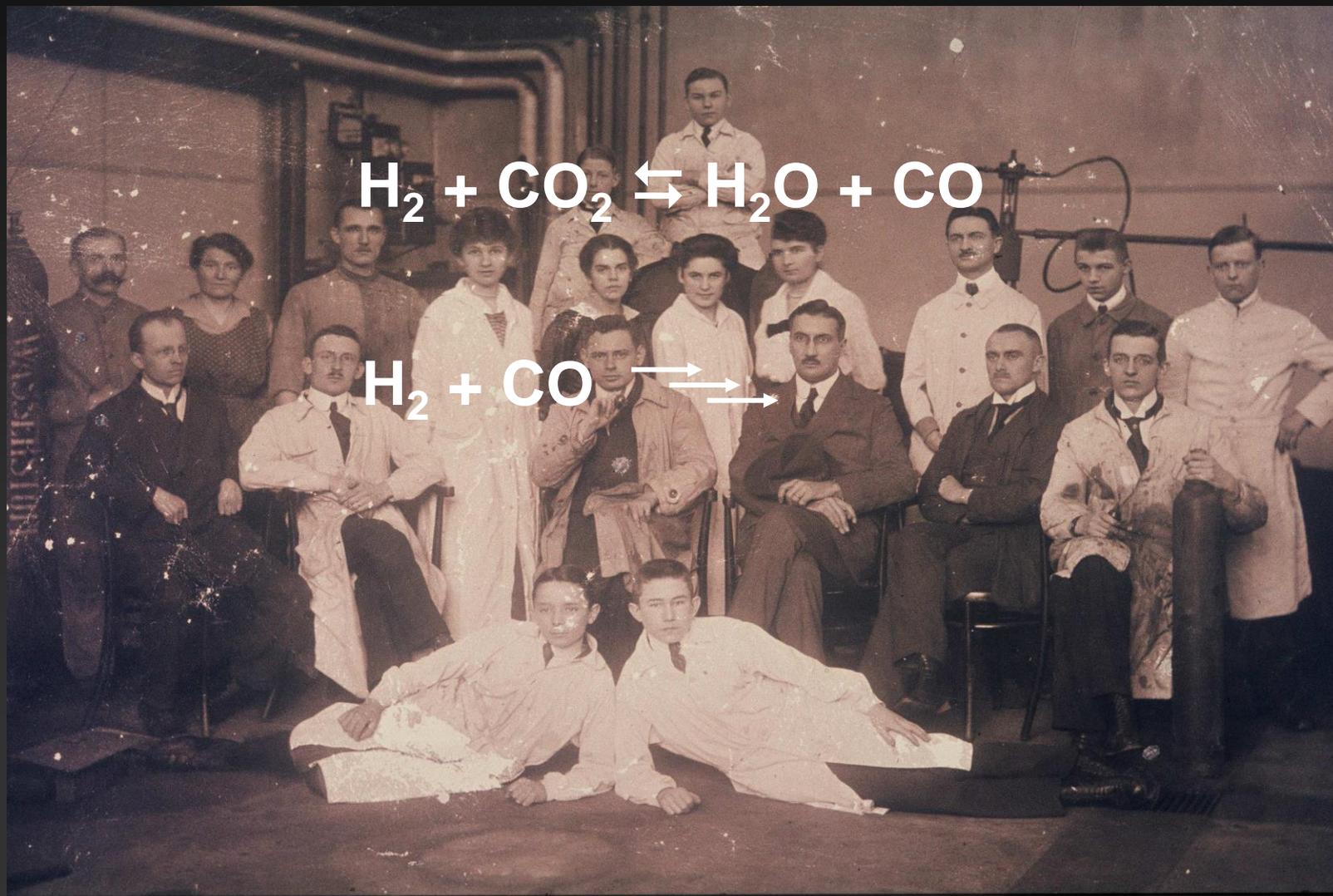
Ein Schritt weiter: Methanisierung



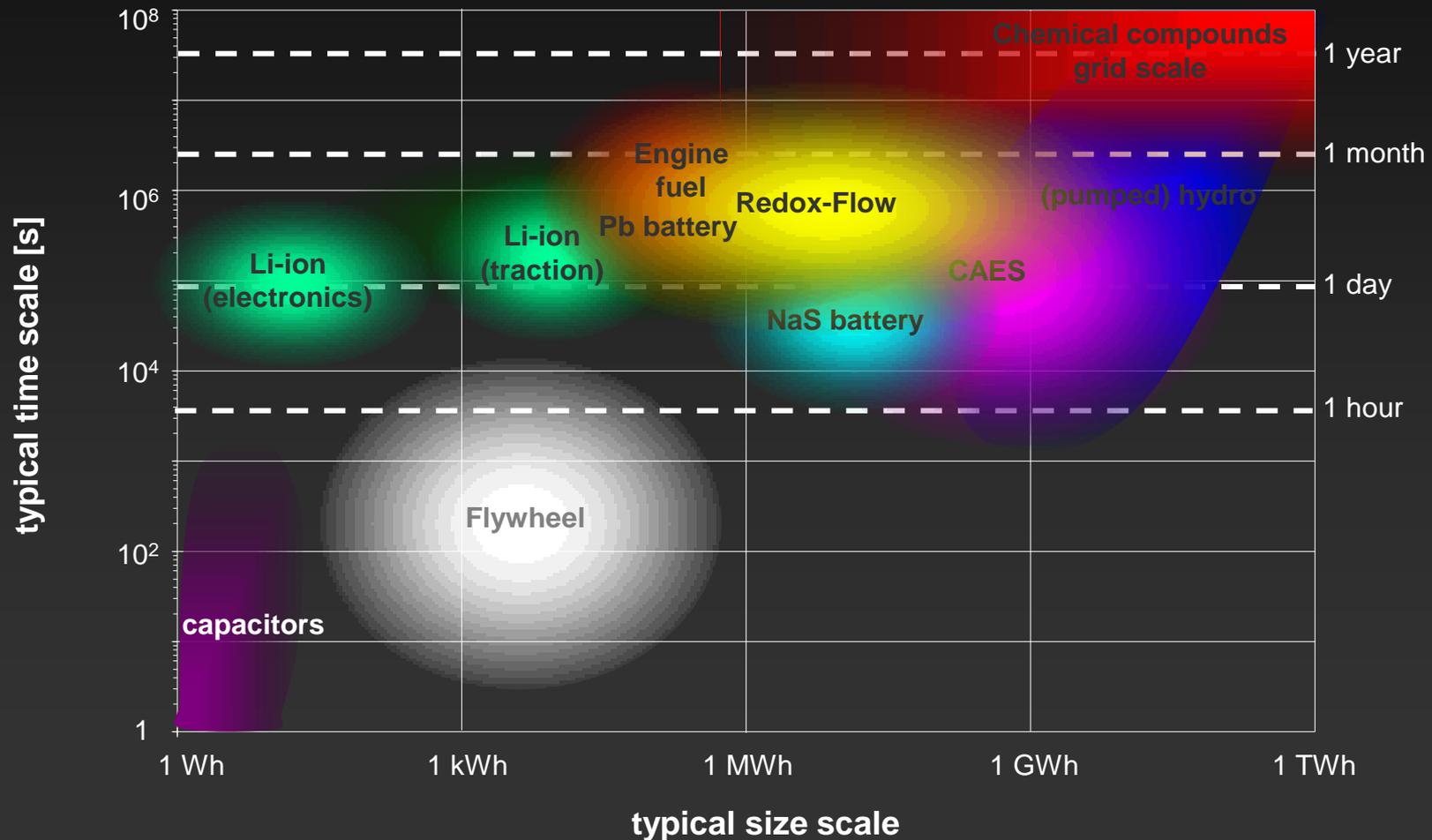
- Gasspeicher in Deutschland: 20 bln. m³ + pipelines
- Entspricht etwa 200 TWh (thermisch)
Speicherkapazität
- $\text{CO}_2 + 4 \text{H}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$ (Sabatier Prozeß)
- Zusätzliche Energieverluste über die Wasserstoffbereitstellung hinaus
- CO₂ Abtrennung benötigt ebenfalls Energie
- Möglicherweise sinnvoll an Biogasanlagen

- **Aber: vorhergesagte „dumped energy“ 2032 = 2.3 TWh = 500 Mio. m³ hydrogen = 2.5 % im Gasnetz**

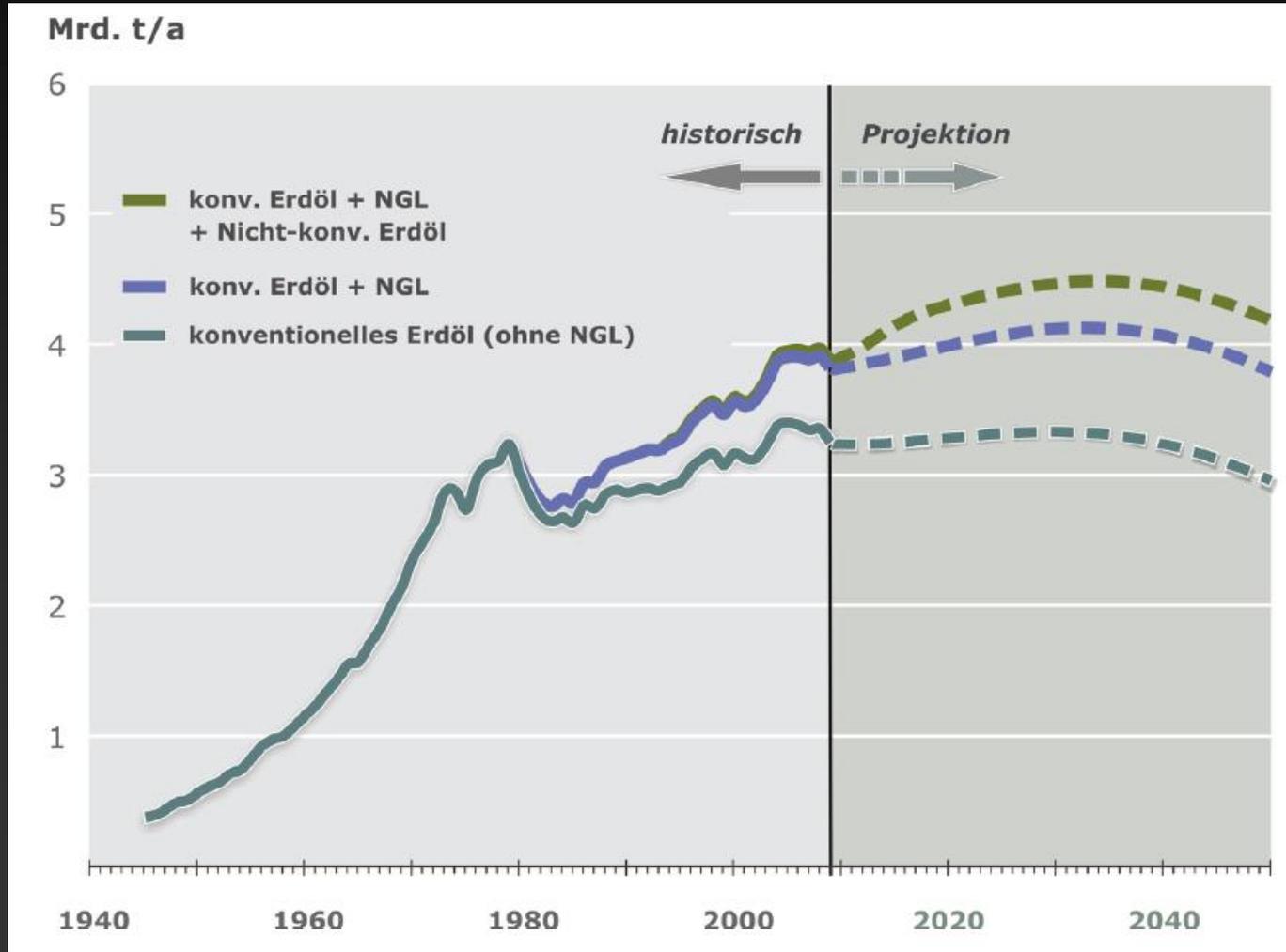
Synthesis gas based chemistry



Size and time scales of storage options



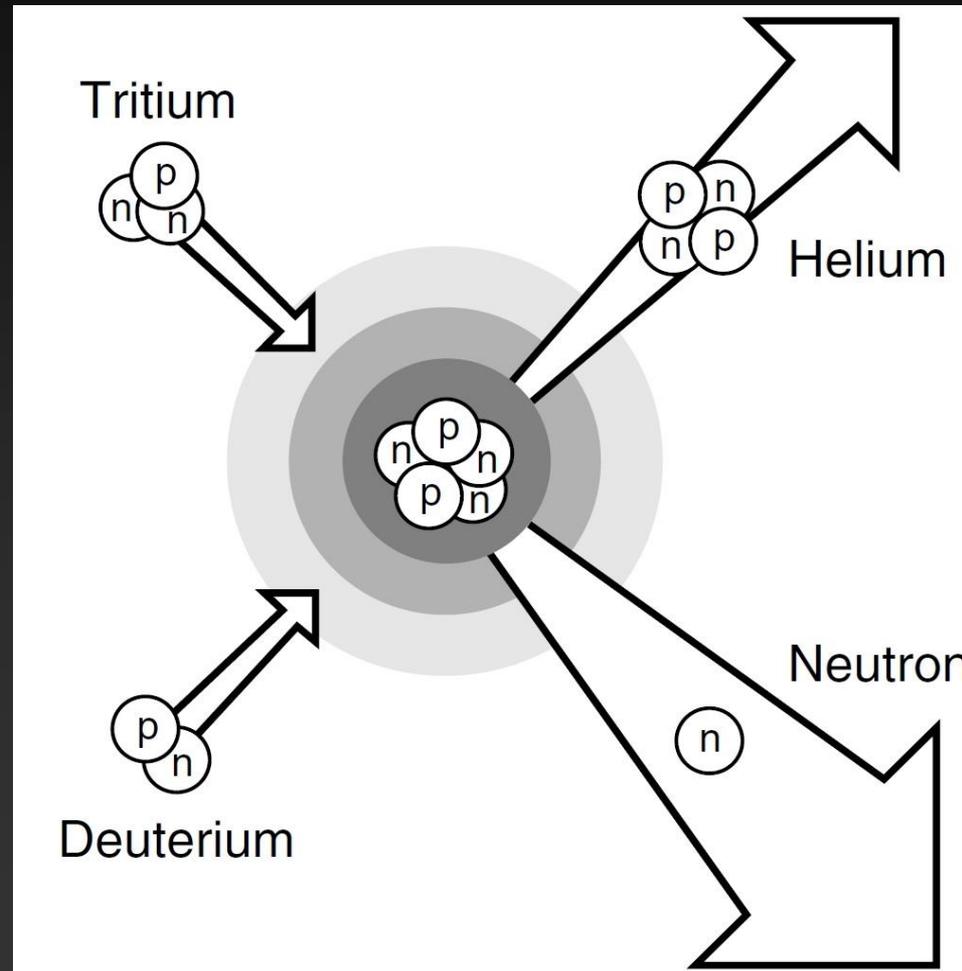
...und dann war da noch Peak Oil



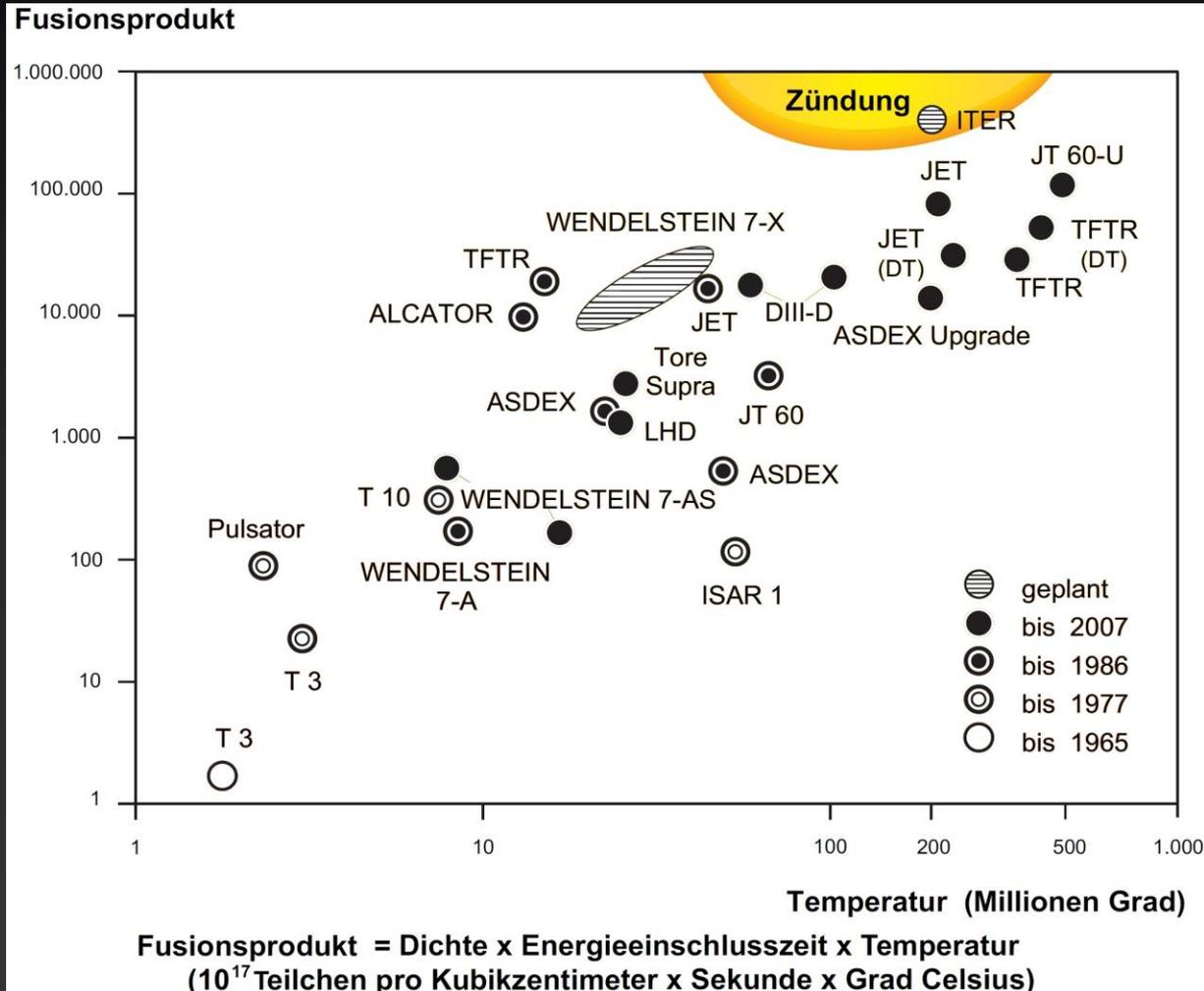
Wie treiben wir dann Autos an?



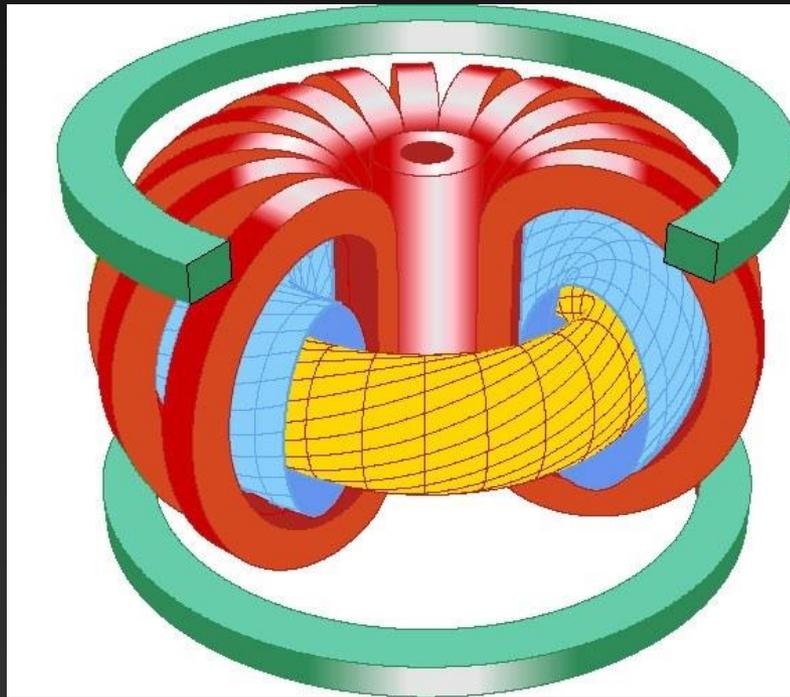
Langfristige Hoffnung: Fusionsenergie



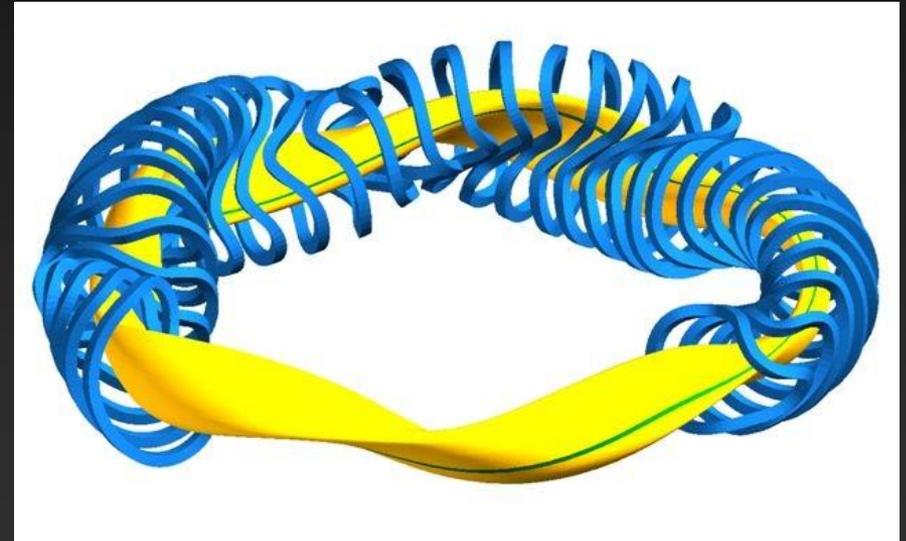
...noch immer in 40 Jahren?



Entscheidend: Der magnetische Einschluß

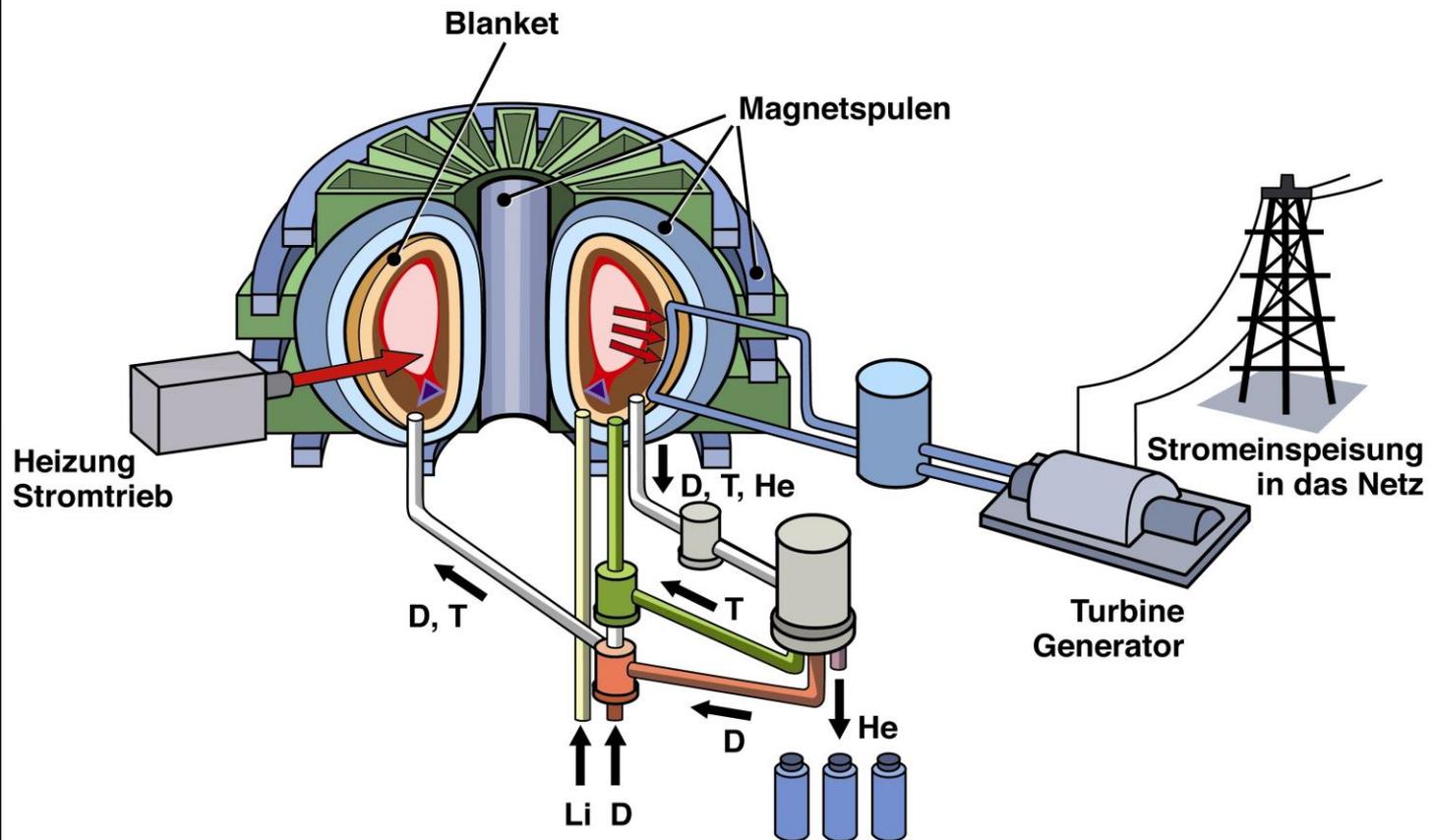


Tokamak-Prinzip

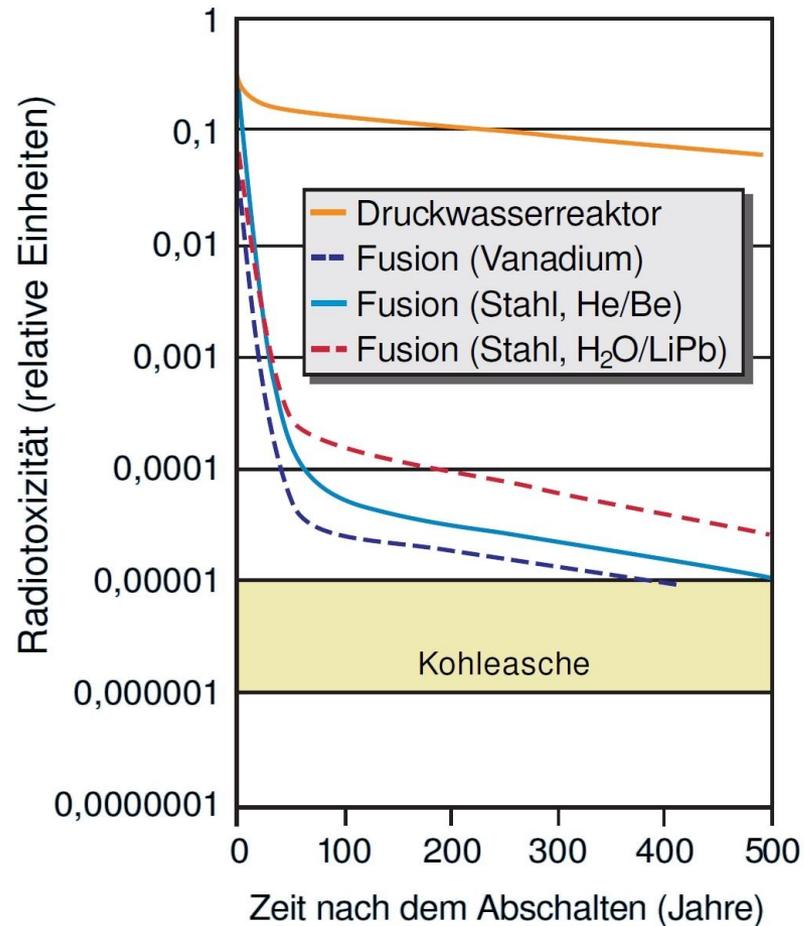


Stellarator

So könnte ein Kraftwerk aussehen



Die Radioaktivität



Elemente eines neuen Energiesystems

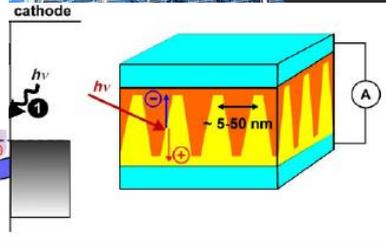
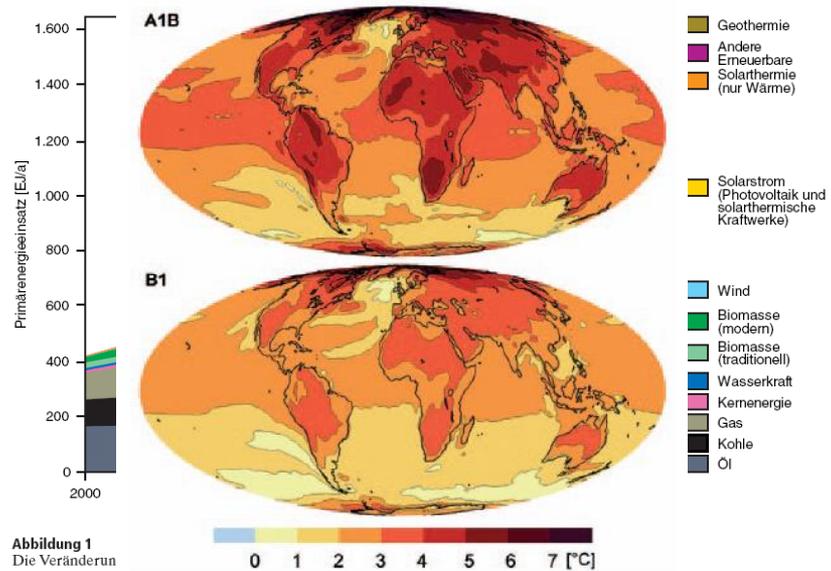
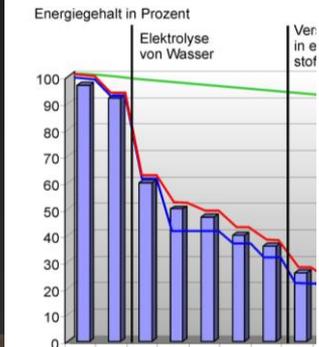
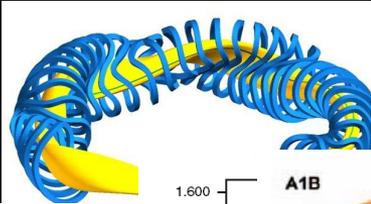


Abbildung 1
Die Veränderung
Quelle: WBGU

