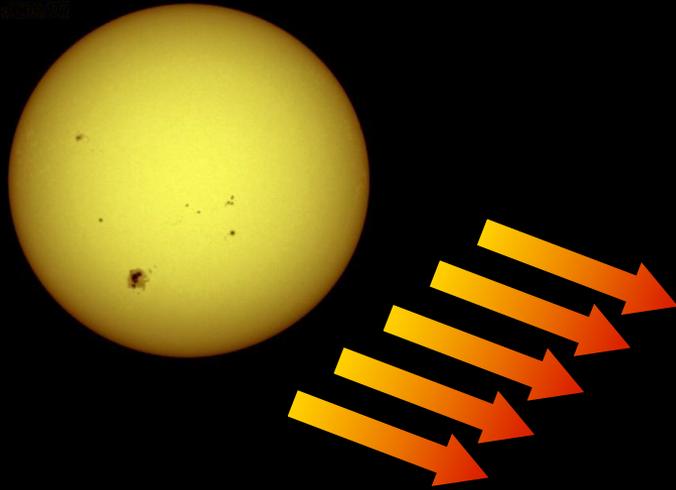


Herausforderung Energiewende - Physikalische Grundlagen einer Energieversorgung der Zukunft



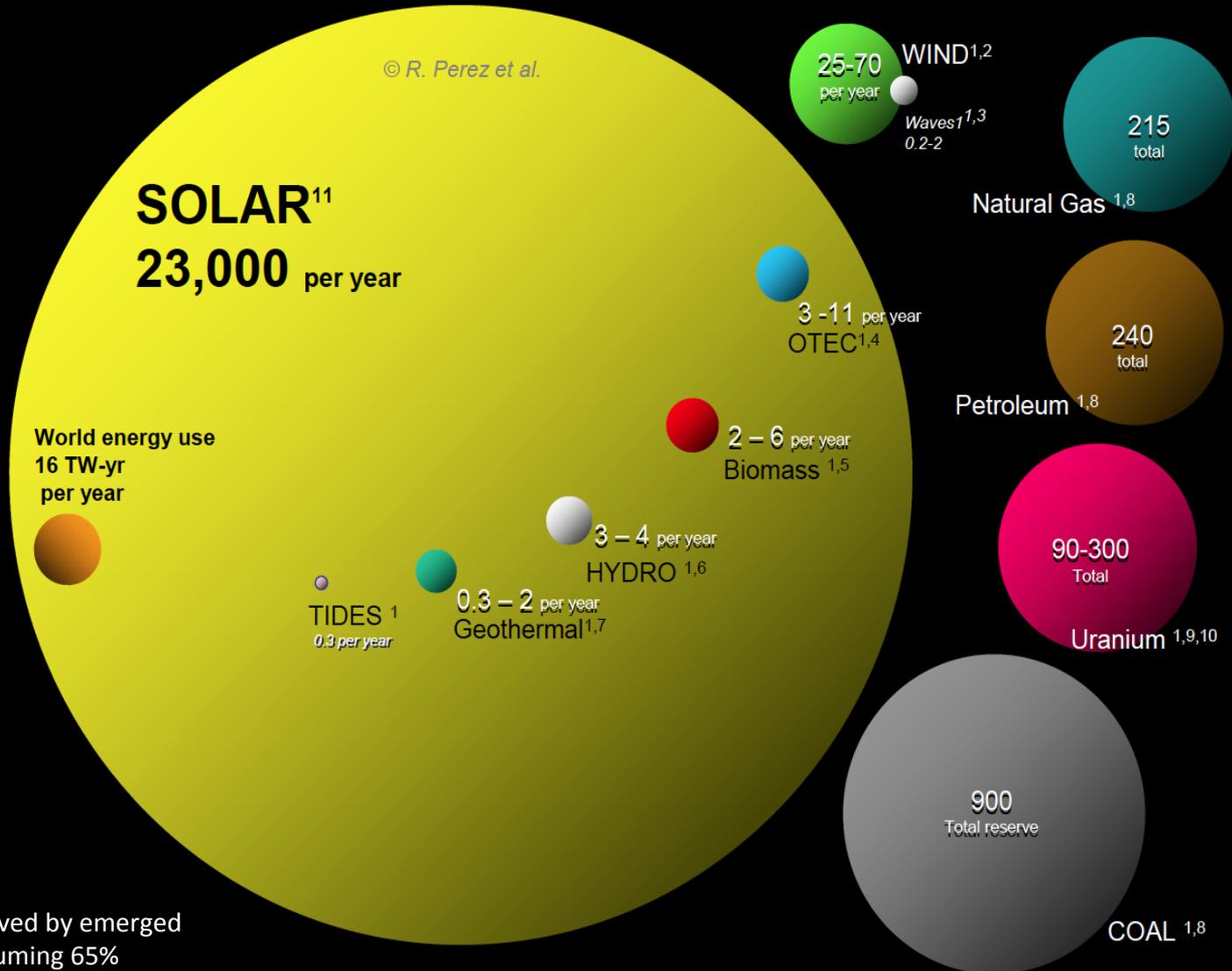
Die Erde



Solarkonstante
 $E_0 = 1367 \text{ W/m}^2$

davon kommen aber nur $740\text{-}340 \text{ W/m}^2$ auf der Erdoberfläche an

(Potentielle) Primärenergie



¹¹ Solar energy received by emerged continents only, assuming 65% losses by atmosphere and clouds

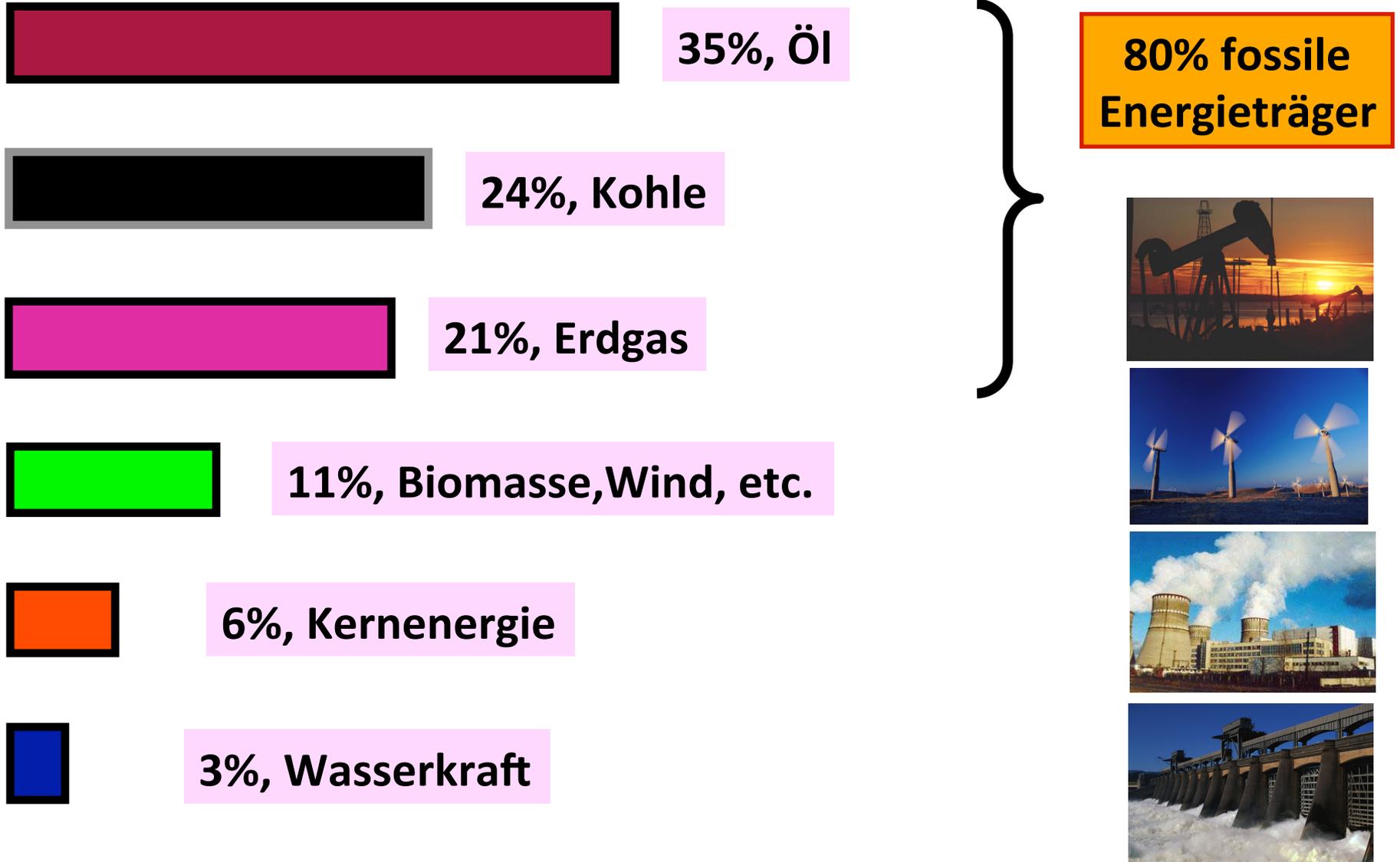
Das geringste Problem der Nutzung der Sonnenenergie

Durchschnittlicher Energiebedarf der Erde pro Jahr: 16 TW (= $1,4 \times 10^{14}$ kWh)
Energiefluß von der Sonne auf die Kontinente: 23.000 TW



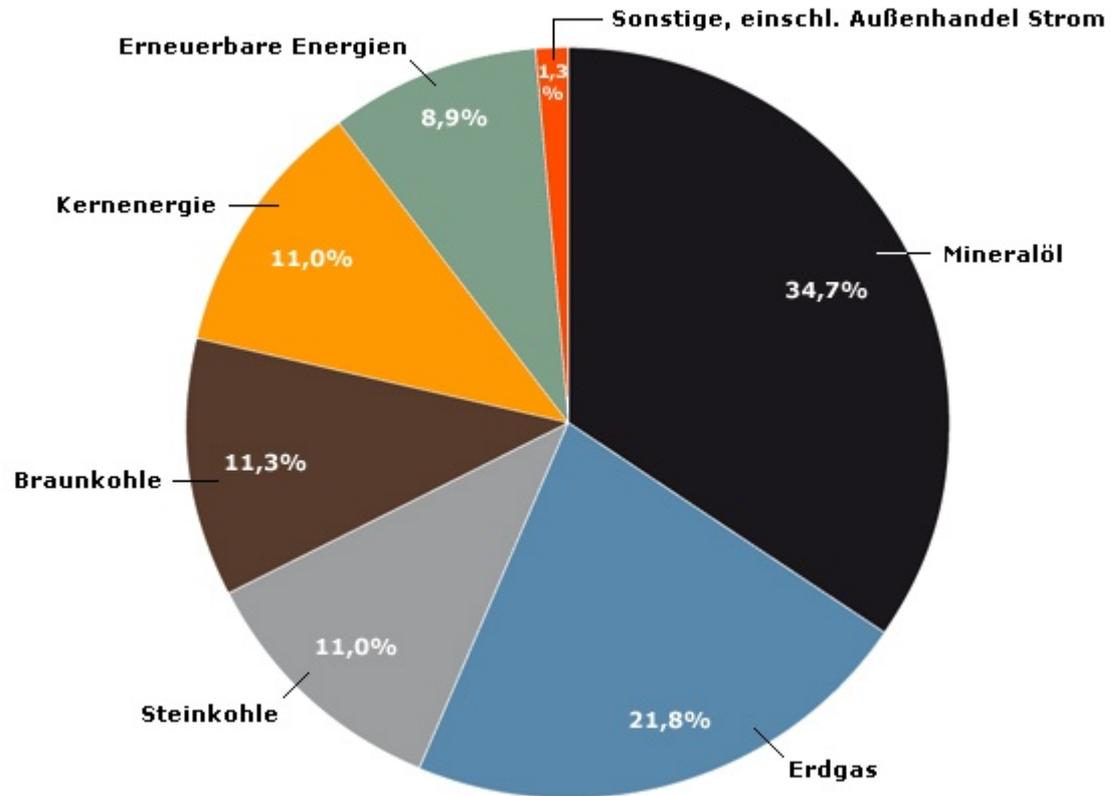
Global need. This map shows the amount of land needed to generate 20TW with 10% efficient solar cells.

Erzeugung von Primärenergie*



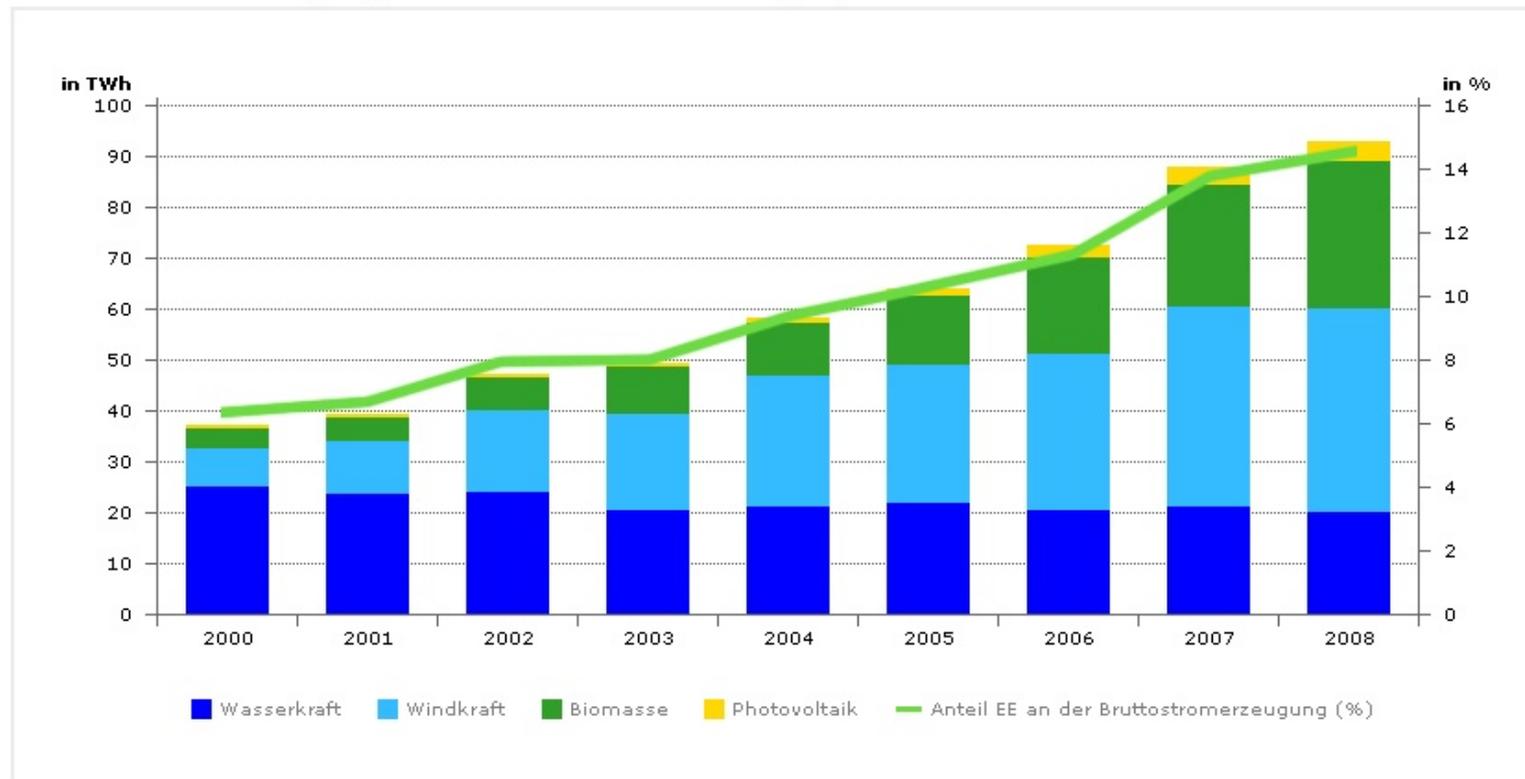
*International Energy Agency (IEA), 2005

Primärenergieverbrauch in Deutschland 2009



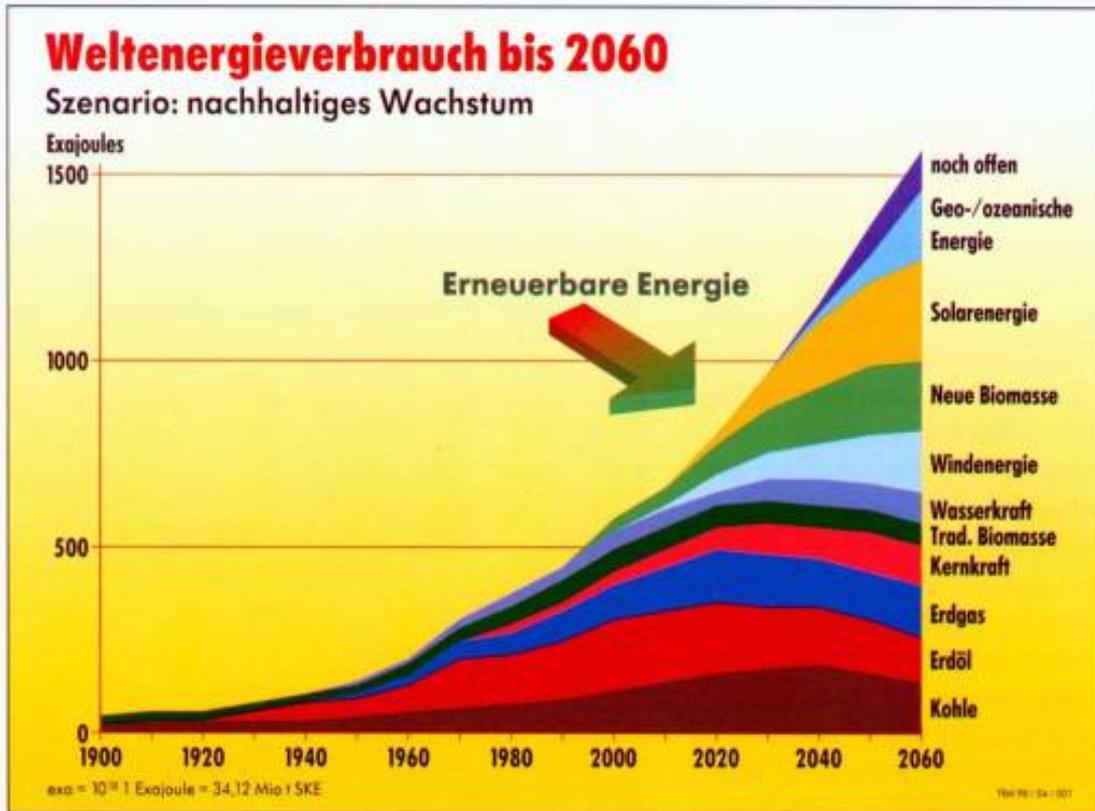
Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen

Bruttostromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen 2000 – 2008



Quelle: AGEB

Energieverbrauch: Shell-Studie 2000



Shell schätzt für 2060:

- Weltbevölkerung wächst von 6,7 auf 9,0 Mrd. Menschen
- das globale Bruttosozialprodukt vervierfacht sich
- der Energieverbrauch verdreifacht sich



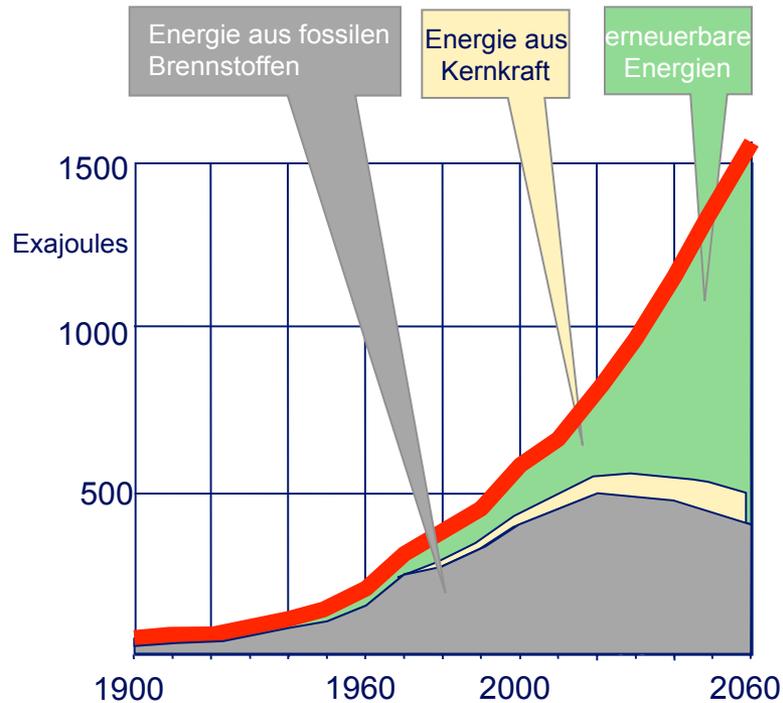
Weltenergiebedarf: Entwicklung 1995-2005

TABLE 1: Primary energy consumption (TW-yr) and 1995-2005 growth trends for selected countries/regions of the world

	1995	2005	1995-2005 growth (%)	
World	12.21	15.48	27%	
USA	3.05	3.37	10%	
China	1.17	2.24	93%	
Europe	2.57	2.89	12%	
Eurasia	1.42	1.53	8%	
Asia & Oceania	3.18	4.95	56%	
Africa	0.36	0.48	36%	
South & Central America	0.59	0.78	33%	
North America	3.64	4.08	12%	
Middle East	0.46	0.76	66%	

SOURCE: US ENERGY INFORMATION AGENCY (2005): INTERNATIONAL ENERGY ANNUAL REPORT

Weltenergiebedarf: Analyse der Shell-Studie



- Die Ölförderung stagniert bis 2020 und sinkt danach. 2060 trägt Öl zu weniger als 10 % des Energiebedarfs bei.
- Kohle und Gas haben ein geringes Wachstum bis 2020, danach ebenfalls Leistungsabfall.
- Das Leistungsvermögen von Kohle, Öl und Gas ist 2060 niedriger als 2000, sodaß diese Sparte der Energieversorgung dann nur noch 35 % des Energiebedarfs decken kann.
- Der spezifische Energiebedarf müsste deshalb im Durchschnitt um 30 % gesenkt werden.
- Das Geschäftsfeld solare Stoff- und Energiewirtschaft wird gegenüber Kohle, Öl, Gas bis 2060 das doppelte Leistungsvermögen erreichen.



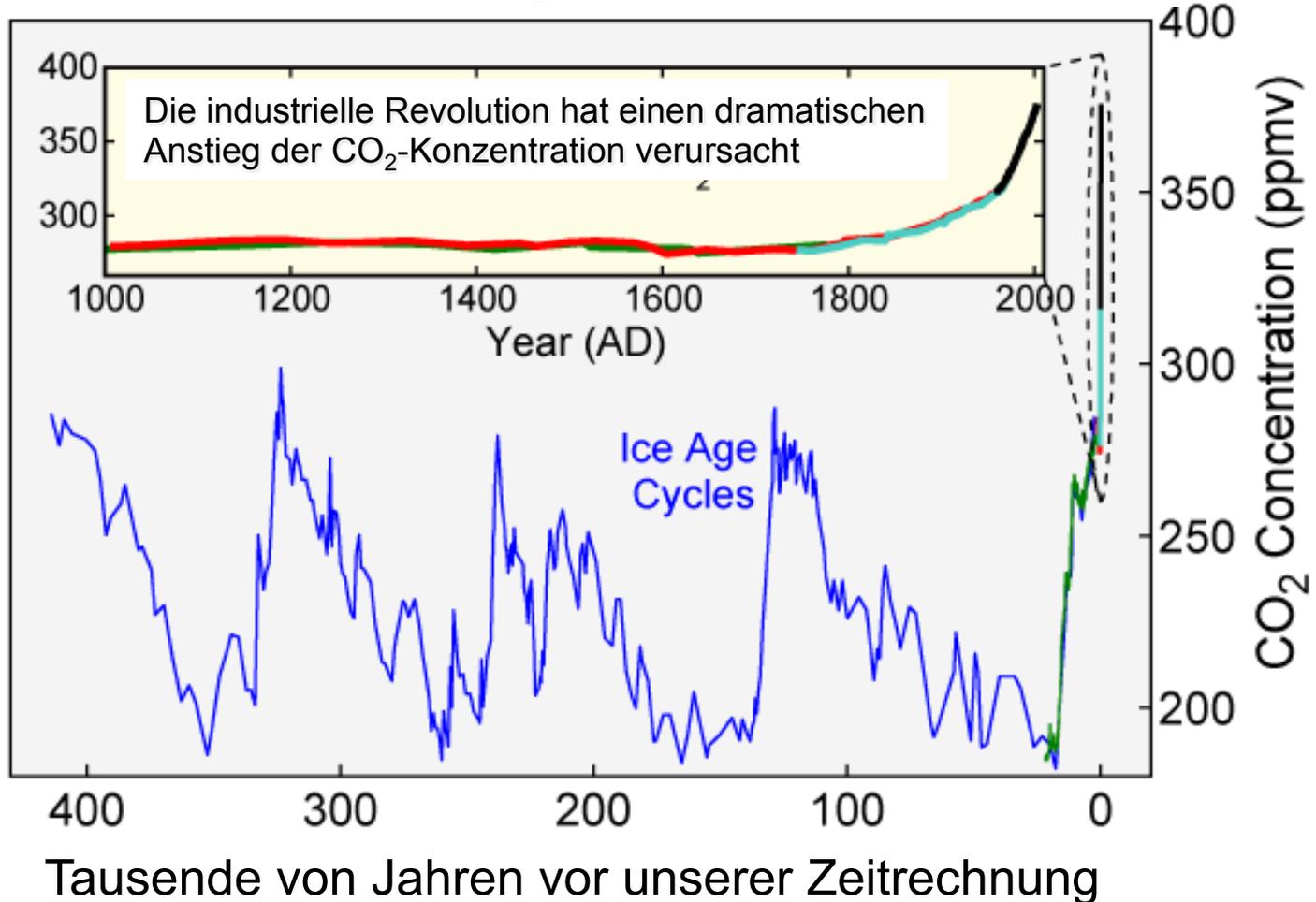
Erneuerbare Energiequellen: Wie schnell brauchen wir sie?

- Beim gegenwärtigen Verbrauch sind die Vorräte erschöpft nach:
 - Kohle: 230 Jahre
 - Öl: 45 Jahre
 - Erdgas: 60 Jahre
 - Uran: 55 Jahre
- Der Weltenergieverbrauch wird mit der wachsenden Bevölkerung und der zunehmenden Industrialisierung der Entwicklungsländer voraussichtlich um das 2-3-fache ansteigen in den kommenden 50 Jahren.
- laut konservativen Schätzungen sind die Vorräte erschöpft nach:
 - Kohle: 100 Jahre
 - Öl: 20 Jahre
 - Erdgas: 40 Jahre
 - Uran: 30 Jahre
- Das Ansteigen der CO₂-Emissionen wird den Verbrauch an fossilen Brennstoffen drosseln lange bevor diese aufgebraucht sein werden.

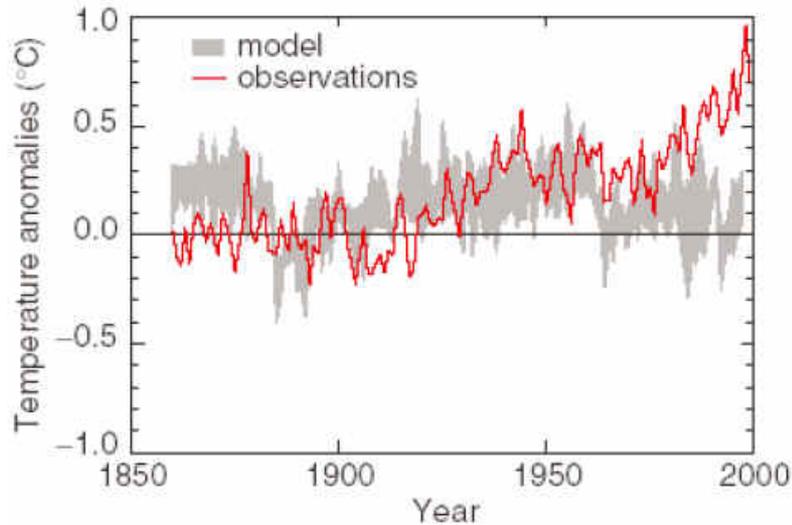
Globale Erwärmung (Treibhauseffekt)



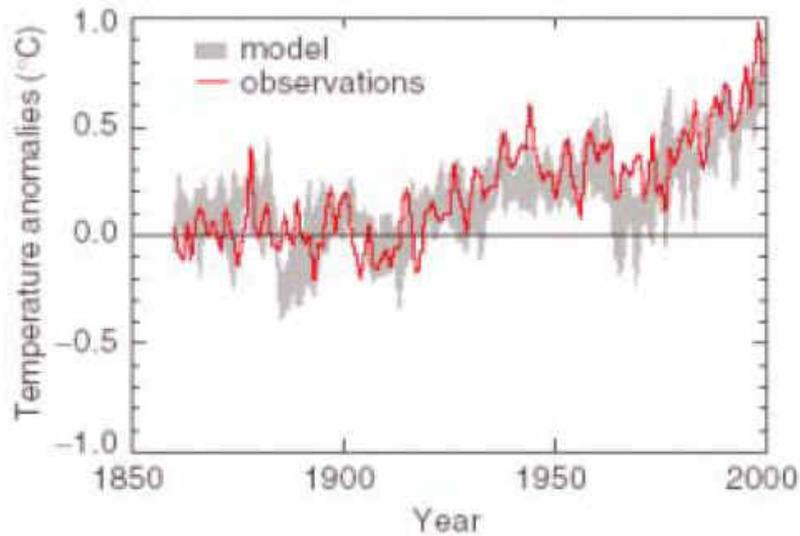
Schwankungen des CO₂-Gehalts in der Atmosphäre



Klimamodelle



natürlich verursachte Klimaänderungen
(solare Variationen, Vulkanausbrüche,
etc.)



natürlich verursachte Klimaänderungen
plus anthropogene Treibhausgase

Globale Erwärmung

Vernagtferner, Öztaler Alpen



Abdecken des Gletschers (Gemsstock Andermatt, Schweiz)



Nur zwei Arten von “Energie” können auf lange Sicht unsere Versorgung sichern

Solarenergie



Elektrizität und Brennstoff

Kernenergie



Nur Elektrizität !

Können wir unser Energieproblem durch Kernkraftwerke lösen?

Energieverbrauch in 2000:	11 TW
voraussichtlich in 2050:	30 TW
zusätzlicher Bedarf in 50 Jahren:	19 TW
1 Kernkraftwerk produziert:	1.0 – 1.6 GW

Um die zusätzliche Energie aufzubringen, müsste man:

- 10.000 neue Kernkraftwerke bis 2050 bauen ! (ggw. gibt es nur ca. 450 AKW's weltweit)
- 1 Kernkraftwerk alle 2 Tage innerhalb der nächsten 40 Jahre errichten!



Das in Finnland (nahe Olkiluoto) ggw. gebaute Kernkraftwerk ist das erste AKW, das in Europa seit 15 Jahren gebaut wird!
Geplante Fertigstellung in 2020

Können wir unser Energieproblem durch Kernfusion lösen?

Die Fusionsprojekte ITER and JET, die seit 25 Jahren mit ca. 850 Mio. €/Jahr unterstützt wurden, werden frühestens 2050 (Netto-) Energie liefern.



ITER (lateinisch *der Weg, die Reise*) soll die großtechnische Nutzung der kontrollierten Kernfusion zur Stromerzeugung vorbereiten. Der Reaktor wird ggw. in Cadarache (Südfrankreich) gebaut.

ITER = International Thermonuclear Experimental Reactor
in Zusammenarbeit von EU, Japan, Rußland, USA, Kanada.

Kosten: 3.5 Mrd Euro (geschätzt)

The Long Road to Fusion

1951

Lyman Spitzer founds Princeton Plasma Physics Laboratory and begins working on stellarator.

1958

Research declassified as part of Atoms for Peace conference in Geneva.

1968

Soviet T-3 tokamak, designed by Igor Tamm and Andrei Sakharov, makes huge improvements in confinement.



1985

Urged by Soviet physicists, Mikhail Gorbachev proposes international fusion project to Ronald Reagan at Geneva summit.



1950

Early 1950s

U.S., Soviet, and British doughnut-shaped fusion devices, such as ZETA at Harwell, U.K., fail to generate fusion. Most work classified.



ZETA

1970

1976

Joint European Torus (JET) design work begins.

1978

JET given the go ahead.



JET

1980

1983

JET achieves first plasma.

1990

1988

ITER conceptual design work begins.

1997

JET achieves 16 megawatts of fusion power.

1992

ITER engineering design work begins.

25, 2007

2001

Revised ITER design completed. Canada joins.

1999

U.S. withdraws from ITER.

2006

ITER implementation agreement signed.

2007

ITER construction begins.

2016

ITER completed and first plasma achieved.

2032

DEMO begins operation.



ASDEX Upgrade

2000

2003

China, South Korea, and U.S. join ITER. Canada withdraws. Stalemate over site.

2005

Cadarache chosen as ITER site. India joins.



Cadarache

1998

ITER engineering design completed, but partners ask for a 50% cost cut.

2022

Construction of DEMO, prototype power plant, begins.

2050

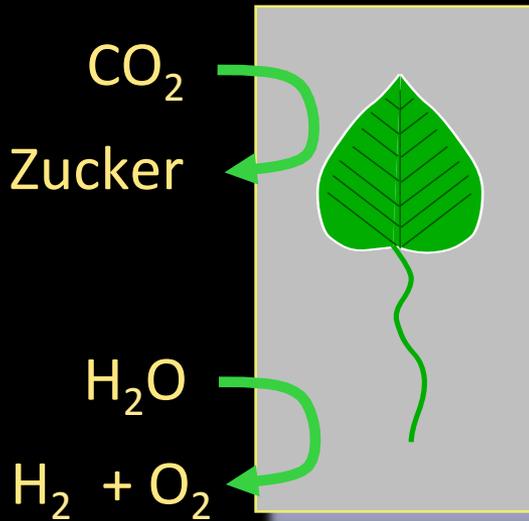
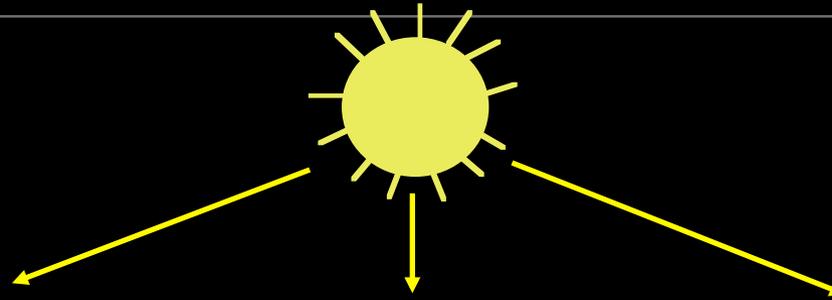
First commercial fusion power plant begins operation.

Are we there yet? Political as well as technical trials have dogged the footsteps of fusion. This largest of international collaborations will likely hit some more bumps before it is done.

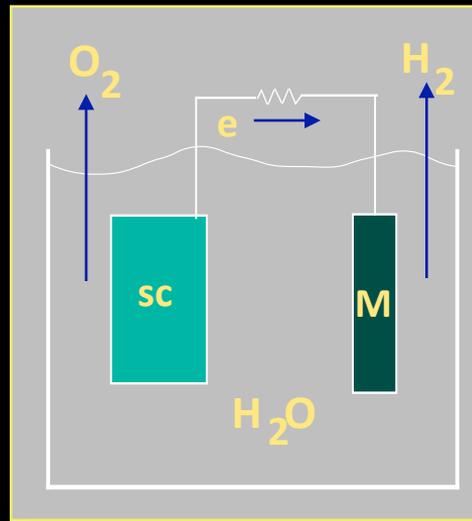
Alternativen ?



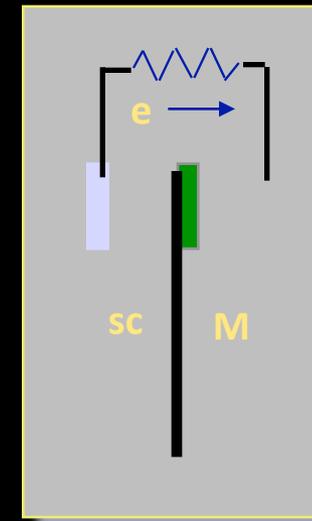
Wandlung von Sonnenenergie in elektrische bzw. chemische Energie



Photosynthese
Biomasse
Primäre und sekundäre
Biobrennstoffe
Biowasserstoff



Halbleiter/Flüssigkeit-
Verbindung
Hybridsysteme
chemische Systeme



Photovoltaik
⇒ Elektrizität

Wir beschwerten uns über zu hohe Energiekosten !

Öl-Preis:
100 \$/bbl



0.50 €/l

billiger als ...



Benzin-Preis ca. 1.50 €/l
(~ 60% Steuern!)



*immer noch billiger als ein
gutes Mineralwasser in
ihrem Lieblingsrestaurant*



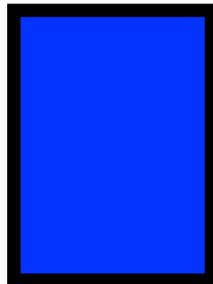
Warum Wasserstoff als Energieträger?

Unsere globale Gesellschaft benötigt:

Elektrizität



~ 25 %



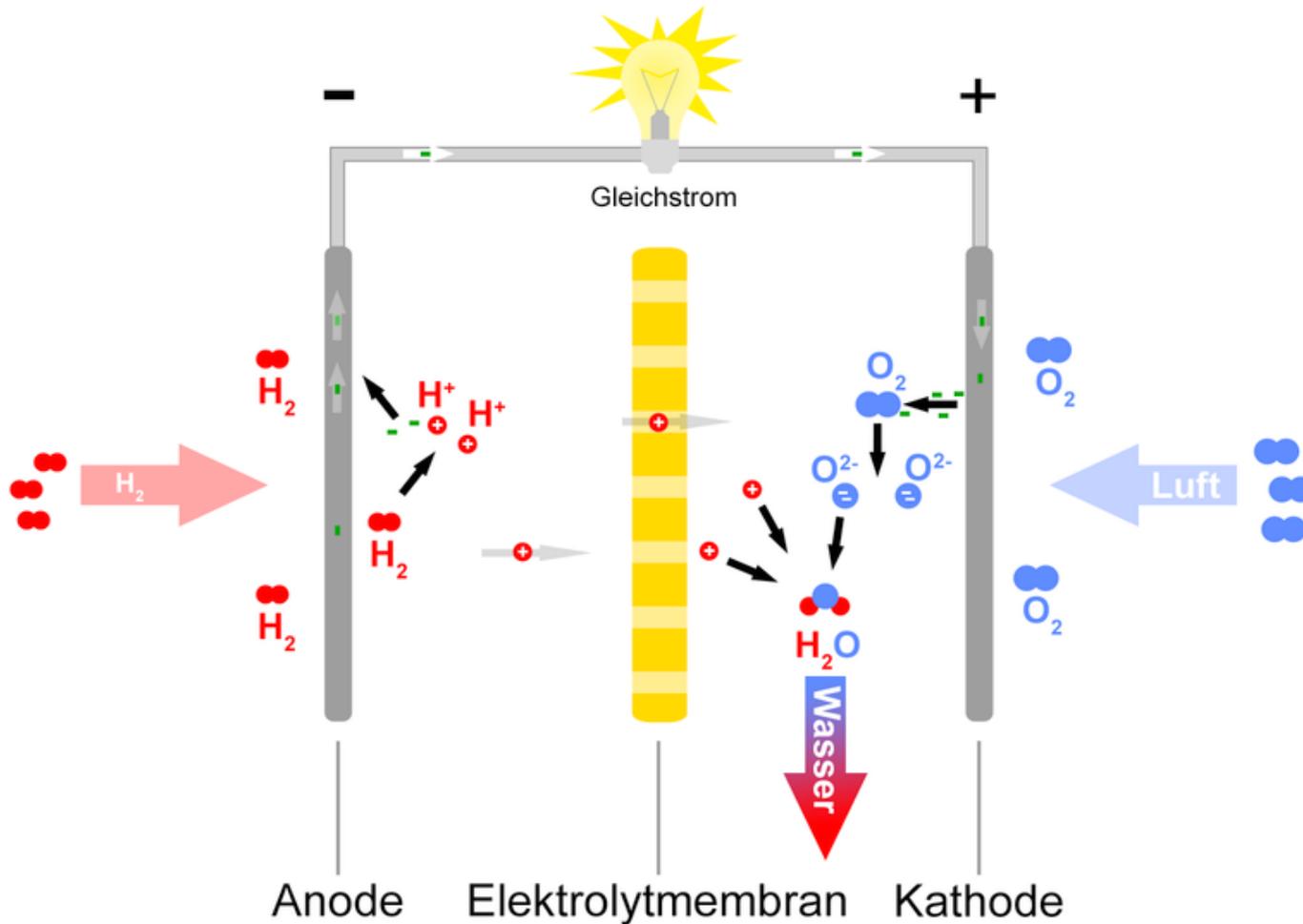
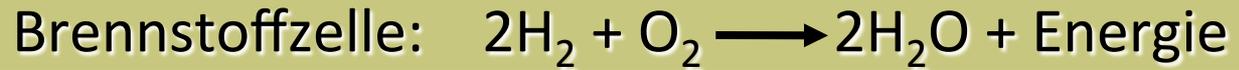
Brennstoff



~75 %



Warum Wasserstoff als Energieträger?



Wasserstoff-Erzeugung (am BER)



Wasserstoff-Tankstellen

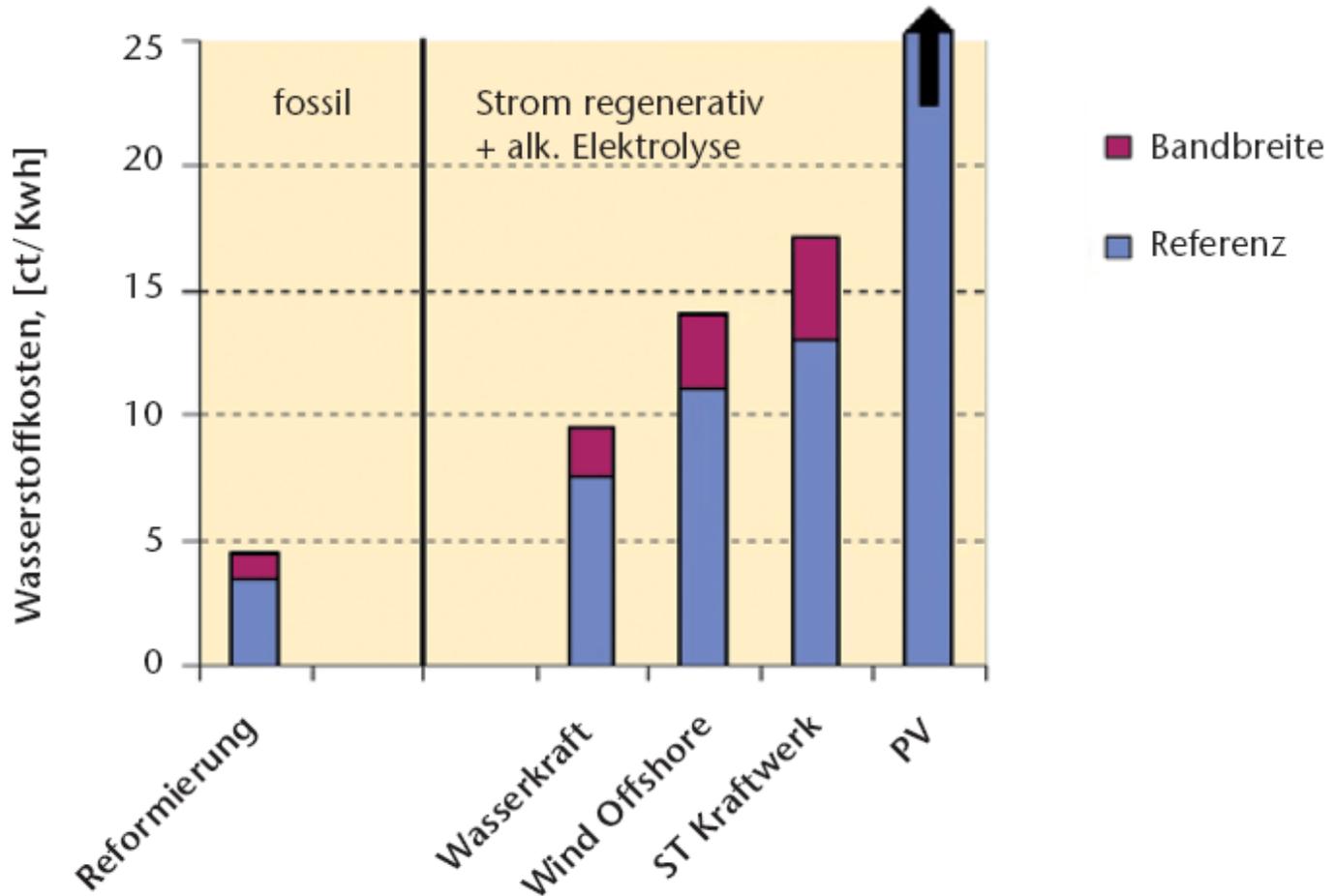


in Berlin



33 H₂-Tankstellen bundesweit
(Stand: März 2013)

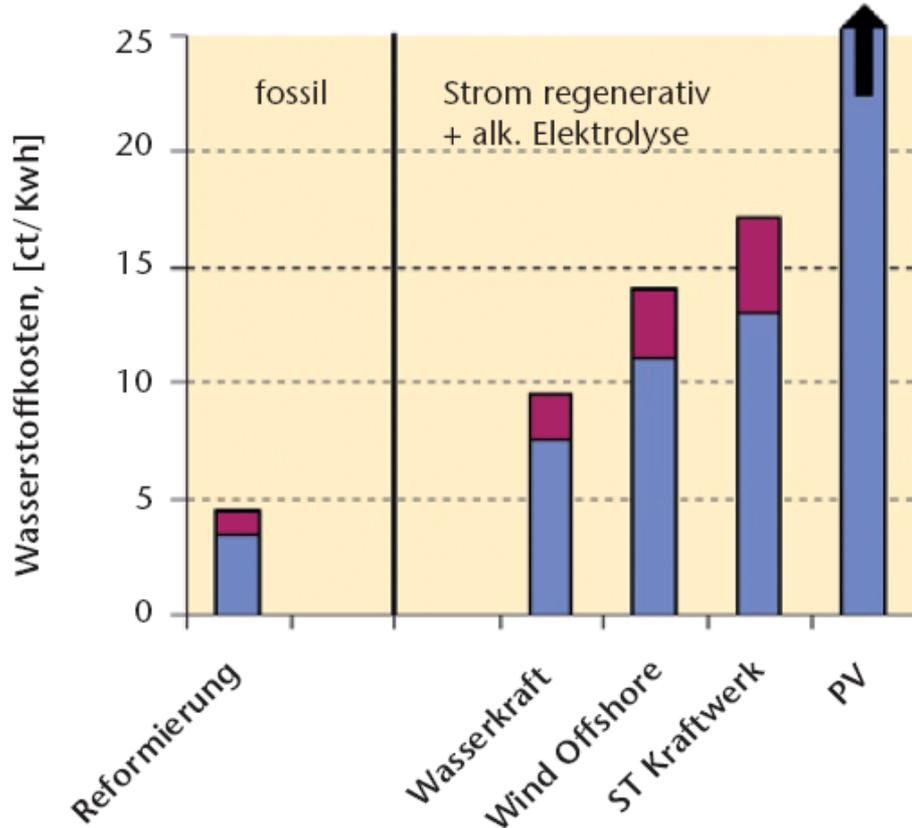
Woher kommt der Wasserstoff und wieviel kostet seine Erzeugung ?



ST = Solarthermie

PV= Photovoltaik

Woher kommt der Wasserstoff und wieviel kostet seine Erzeugung ?



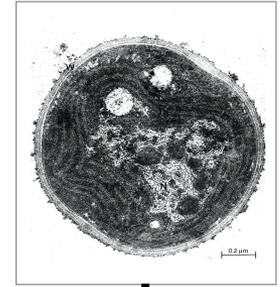
Der Einsatz von Wasserstoff als zukünftiger Brenn- und Kraftstoff macht energetisch und ökologisch allerdings nur dann Sinn, wenn seine Erzeugung mit regenerativen Energien oder zumindest mit deutlich reduziertem Einsatz fossiler Energie erfolgen kann.

Quelle: www.fv-sonnenenergie.de

Biologische Wasserstoffherzeugung

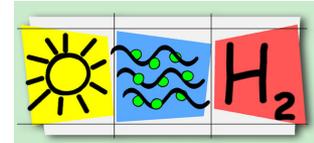
Vorteile des biologischen Systems:

- Autonom (wg. Photosynthese)
- Repliziert sich selbst
- Repariert sich selbst
- Energiespeicher und -wandler
- Einfach zu "designen" (mol. Genetik)

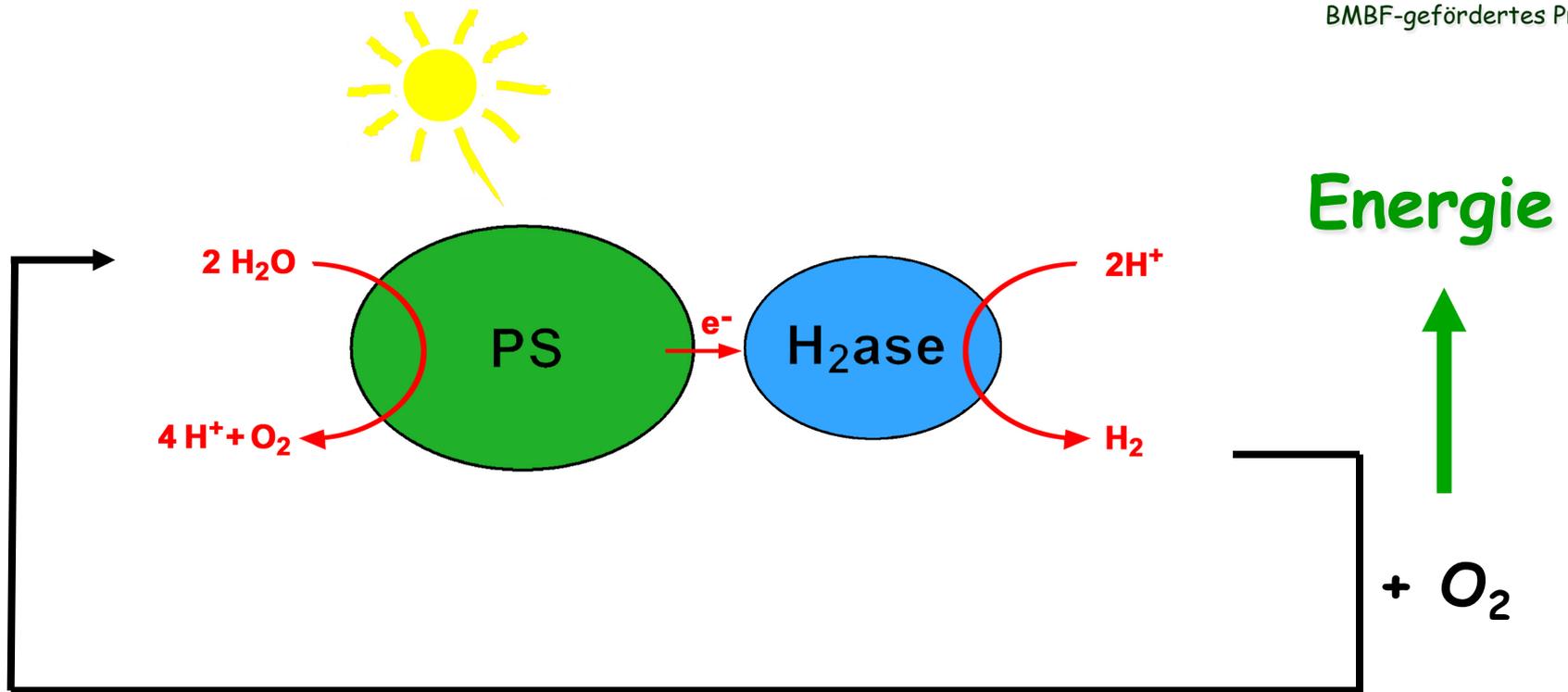


Synechocystis 6803 (Cyanobakterium)

Ziel: H_2 -Produktion durch photobiologische Spaltung von H_2O

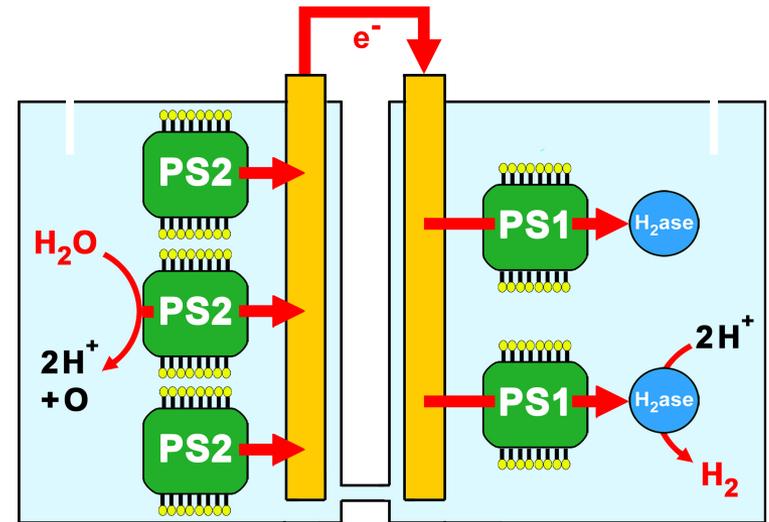
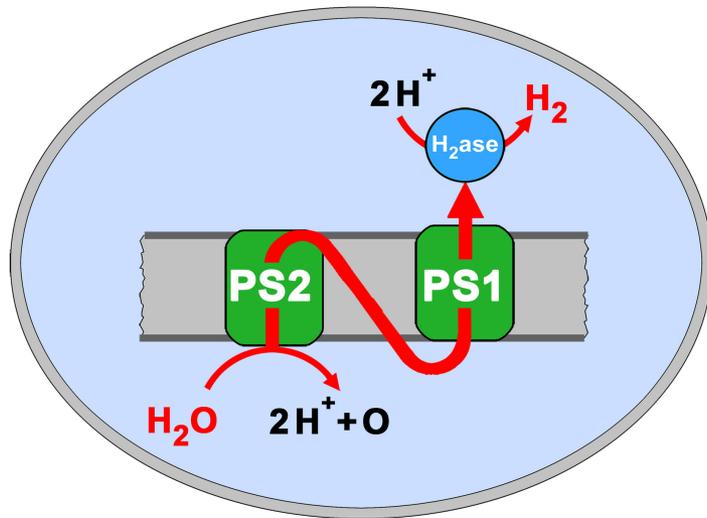


BMBF-gefördertes Projekt



Erneuerbare Energiequelle ohne CO_2 -Produktion !

2 unterschiedliche Ansätze



Modifiziertes natürliches System:

O_2 -tolerante H_2 -ase aus Algen

„top-down“

Semi-artifizielles System:

Isolierte Photosysteme + H_2 -ase
gebunden an Elektroden

„bottom-up“

Biotechnologie

Grünalge
(*Chlamydomonas
reinhardtii*)



5 l Flachbett-Fermenter

Großtechnische Beispiele



Kibuzz Kitura



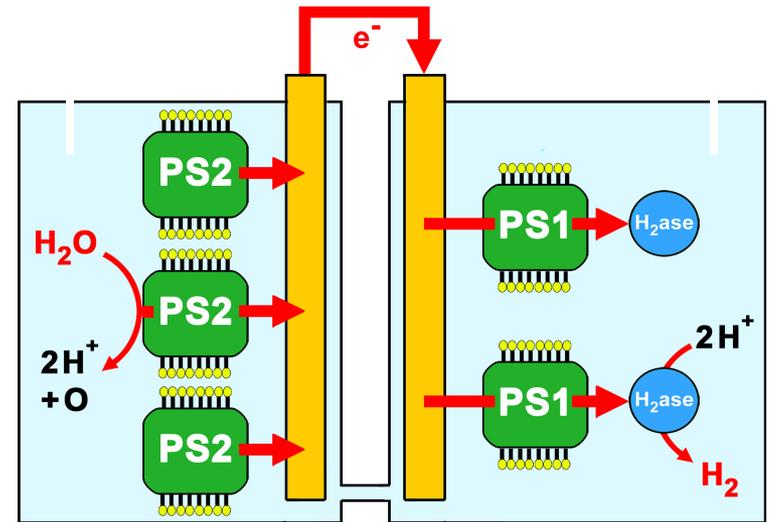
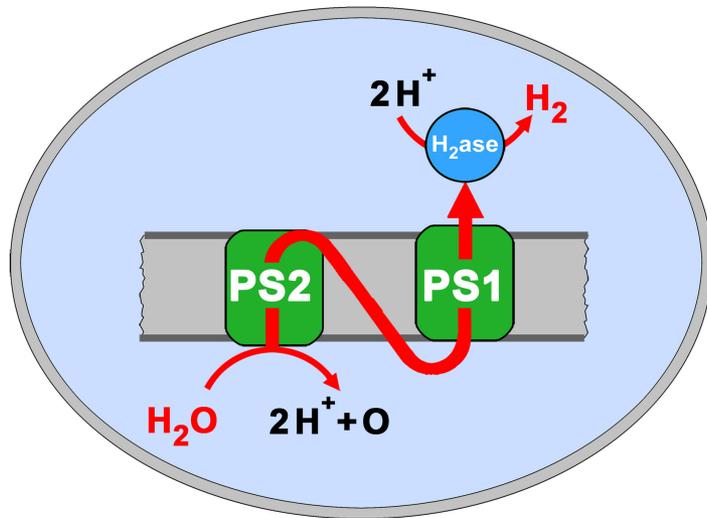
Flat Panel, Univ. of the Negev

Anlage in Klötze bei Wolfsburg



500 km Röhren
700 m³
100 t Algen p.a.

2 unterschiedliche Ansätze



Modifiziertes natürliches System:

O_2 -tolerante H_2 -ase aus Algen

„top-down“

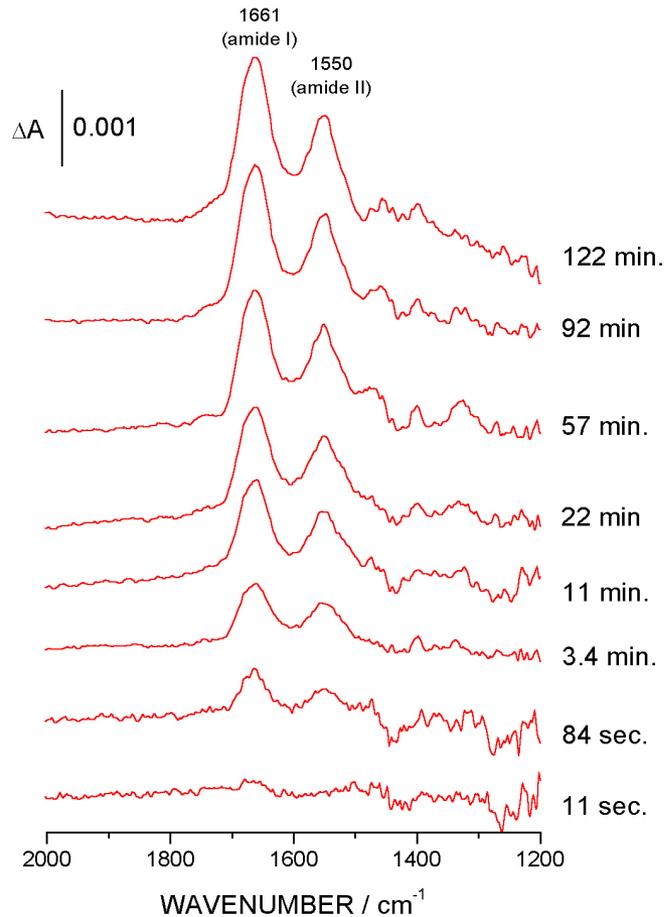
Semi-artifiziell System:

Isolierte Photosysteme + H_2 -ase
gebunden an Elektroden

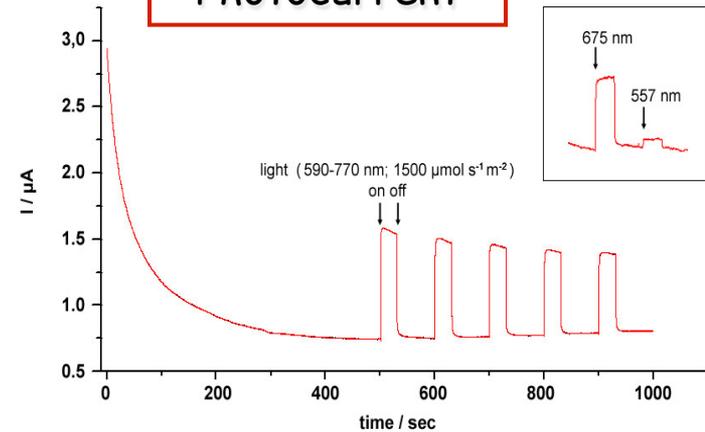
„bottom-up“

Immobilisation of photosystem 2

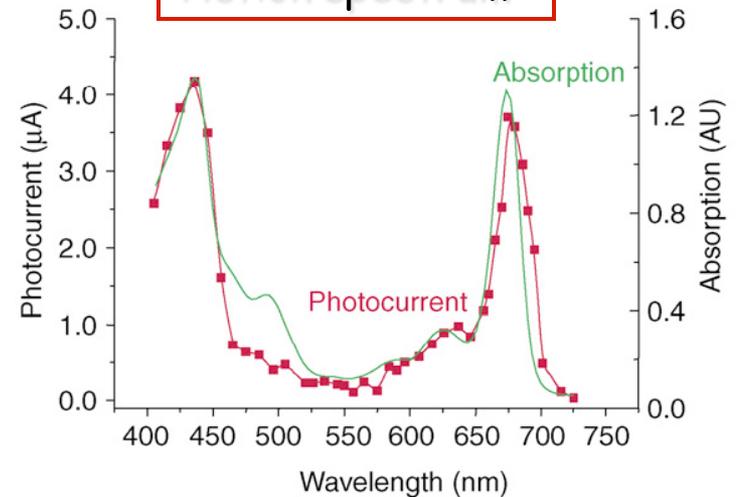
Adsorption kinetics monitored by SEIRAS



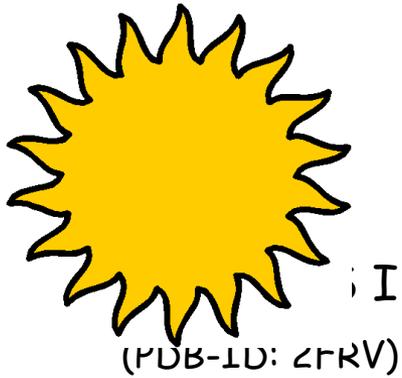
Photocurrent



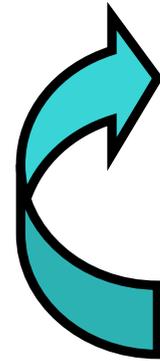
Action spectrum



Approach



Hydrogenase



(analog PDB-ID: 2FRV)

Photosystem I

Collaboration with:

Alexander Schwarze, Oliver Lenz

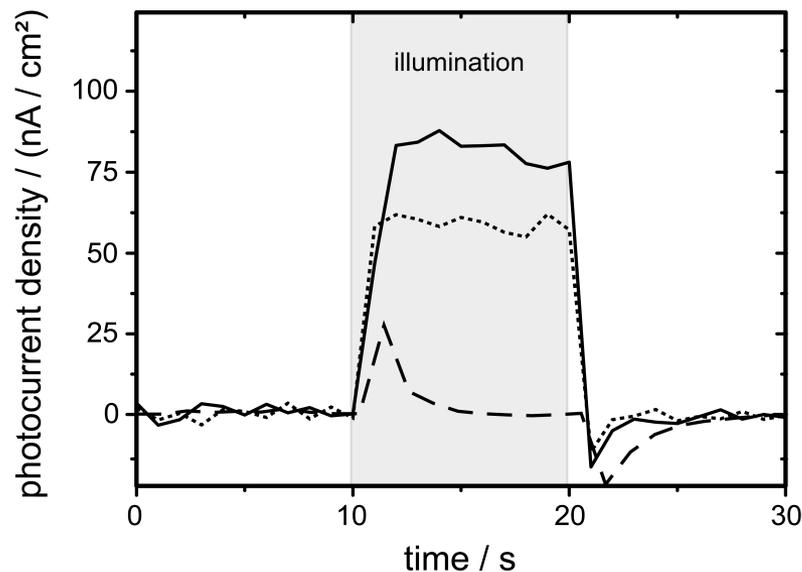
AG Bärbel Friedrich (HU Berlin)

Photocurrent



Data

photocurrent



PS I-MBH hybrid complex (solid trace)
sole PS I Δ PsaE (dotted trace)
bare gold electrode (dashed trace)

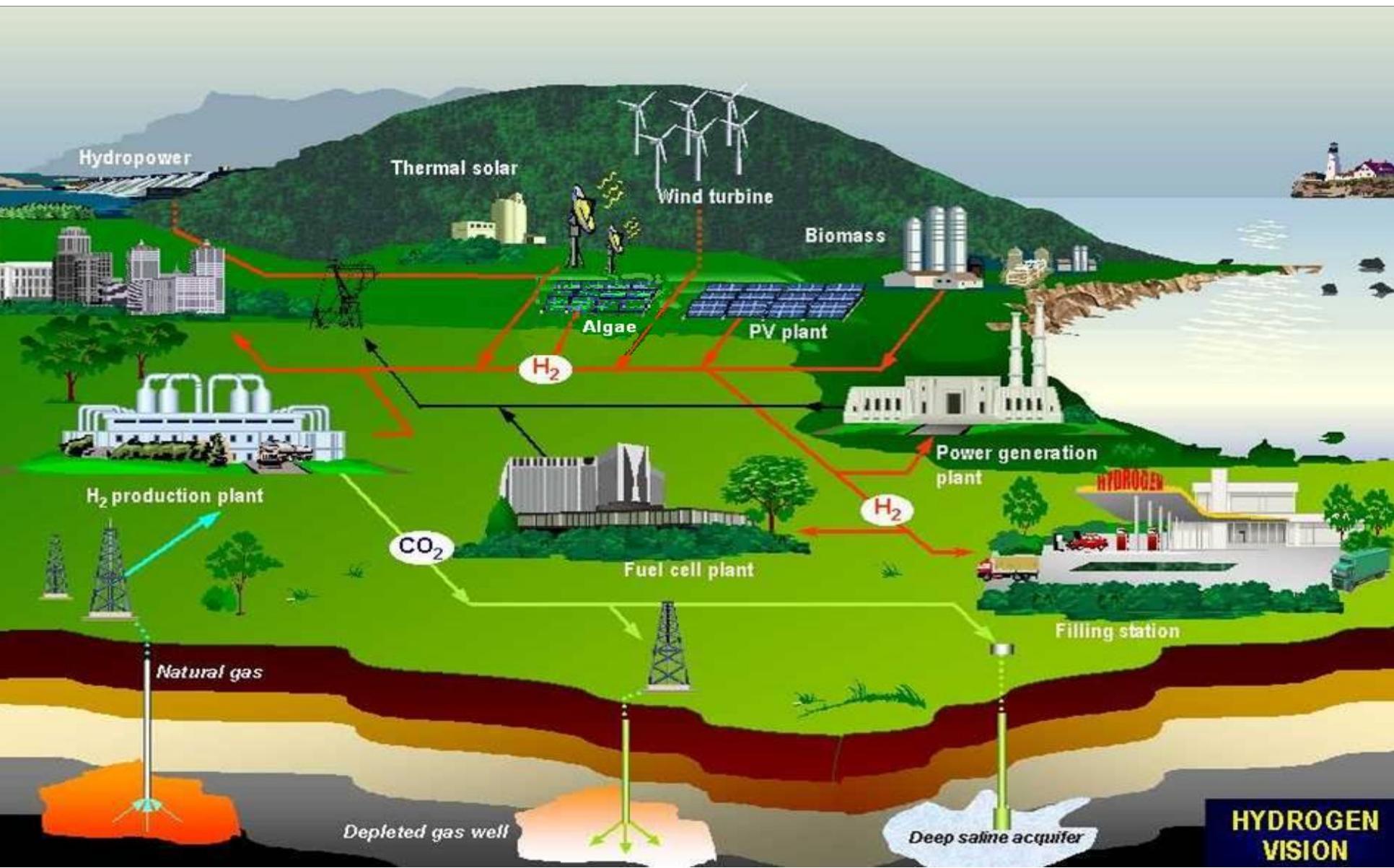
gas chromatography

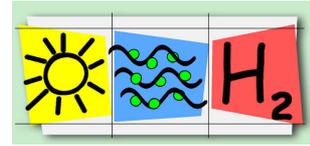
Table.1 Hydrogen evolution rates

Surface structure	Illumination	H ₂ production rate / (pmol H ₂ s ⁻¹ cm ⁻²)
PS I-MBH	Yes	120 ± 30
PS I-MBH	No	< 20
PS I Δ PsaE	Yes	31 ± 12
MBH	Yes	< 20
Bare gold	Yes	< 20

Krassen H, Schwarze A, Friedrich B, Ataka K, Lenz O, Heberle J. (2009), ACS Nano. 3, 4055-4061.

Vision: Hydrogen Society





Design of natural and biomimetic systems for light-driven hydrogen production: From molecular to mass fermentation systems ("H₂ design cells")

