



Der Beitrag der Wasserstoff-Technologie zu einer künftigen Energieversorgung

Jürgen Garche

Symposium der Wasserstoff-Gesellschaft Hamburg e.V.
07.06.2011, Hamburg

Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW)
Baden-Württemberg, Germany

Inhalt

- Einführung
- H2-Ausgangssituation
- Energetische Anwendungen
 - *Verkehr*
 - *Netzstabilisierung*
- Zusammenfassung

SYMPOSIUM

Der altgriechische Ausdruck συμπόσιον *sympósiōn* steht sinngemäß für „**gemeinsames, geselliges Trinken**“.

Für die Griechen der Antike stand aber die gemeinsame gottverbundene und entsprechend ritualisierte Geselligkeit im Mittelpunkt.



Griechisches Symposium, Fresko von 475 v. Chr

Antoine Laurent de Lavoisier

1743 - 1794

Entdeckte 1787 Wasserstoff

Zuerst nannte er H_2 „brennbare Luft“. Später als er aus dem H_2 -Gas Wasser erzeugte, taufte er es **hydro-gène** (gr. *hydro* = Wasser; *genes* = erzeugend) also „Wasserbildner“.



Trends zur Cebit +++ Trends zur Cebit +++ Trends zur Cebit +++ Trends zur Cebit +++ Trends zur Cebit +++ Trends zur Cebit +++ Trends zur Cebit +++

Volle Wasserkraft für Organizer

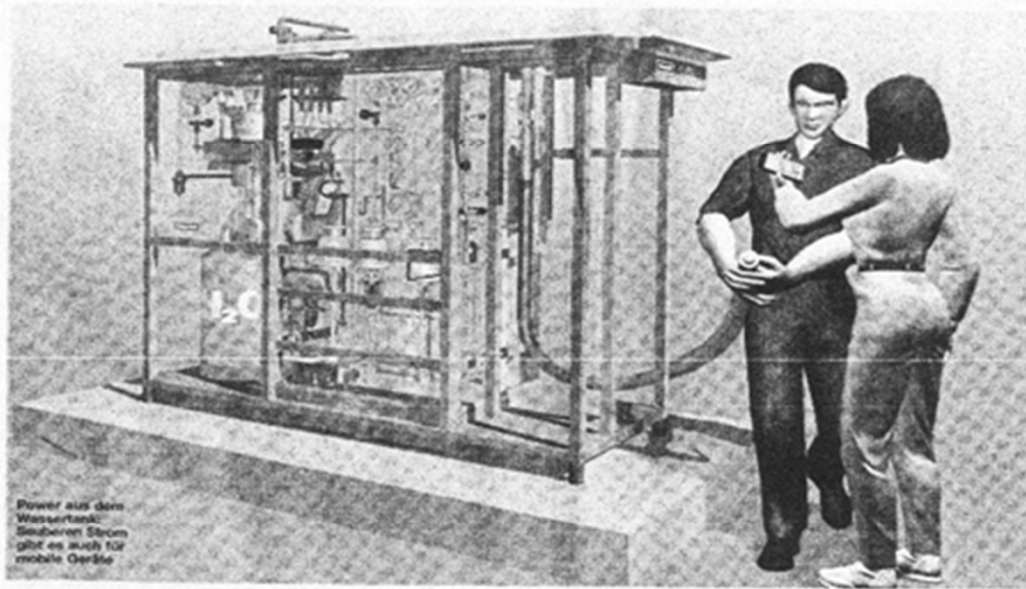
Handys und Notebooks im Dauerbetrieb:

Brennstoffzellen liefern reichlich Energie und müssen nicht mühsam aufgeladen werden

Von Stefanie Gaffron

Die herkömmlichen Lithium-Ionen-Akkus sind sensible Gegenstände, die akkurat nach Anleitung aufgeladen sind. Nur dann funktionieren sie wirklich einwandfrei. Sind die Stromspeicher und -spender leer geladen, braucht es keine Zeit, bis sie wieder ausreichend Energie bereitstellen. Und nach wenigen Jahren liefern sie kaum noch Strom – dann hilft nur noch ein Austausch der Akkus. Diese Note für Besitzer von Notebooks und Organizer-Besitzer wollen Hersteller hinwegjagen: mit Wasserkraft, genauer: mit Brennstoffzellen. Diese Konkurrenz ist leicht und ergiebig, steckt aber noch in der Entwicklung, um auf dem Massenmarkt zu kommen, wie die Cebit zeigen wird.

Seit mehr als fünf Jahren forschen vor allem japanische Firmen wie Hitachi, NEC und Toshiba an Brennstoffzellen für kleine elektronische Geräte wie Notebooks, Organizer und künftig auch Handys. Sechs bis acht Stunden hält eine von Hitachi entwickelte mobile Brennstoffzelle einen Organizer am Laufen. Nicht größer als eine Mignon(AA)-Batterie soll das mit einer 20-prozentigen Metha-



Power aus dem Wasserstrom: Sauberen Strom gibt es auch für mobile Geräte

ANZEIGE

Falsch gedacht?
Sie finden Ihren Spezialisten für Dicht- und Facheinführung.
www.schiefer.de

not-Mischung gespeiste Energiedichte sein, die im Jahr 2003 Serienreife erreichen soll.

NEC hat eine sehr kompakte Direkt-Methanol-Brennstoffzelle für Notebooks vorgestellt. Bei 50 Milli-

watt pro Quadratmeter verfügt die Zelle über eine der höchsten Leistungsdichten. Mit einer 200 Gramm schweren Methanol-Patrone lässt sich der Computer mindestens fünf Stunden betreiben; nach dem Wechsel der Patrone ist das Gerät sofort wieder einsatzbereit. Für 2005 hat NEC ein System für 40-stündigen Dauerbetrieb angekündigt.

In herkömmlichen Brennstoffzellen kommt flüssige Platin als elektrolytisches Material zum Einsatz. Ein Nachteil dieser festen Elektrolyte ist, dass sie das Methanol zu schnell aufzunehmen und dabei wertvoller Brennstoff verlieren geht. Mit dem MEA-Synchem-Membran-Elektrode-Assembliert hat Fujitsu jetzt ein

neues Material entwickelt. Damit ist es möglich, Methanol mit einer Konzentration von 30 Prozent zu verwenden. Als Elektrolyt wird ein fester Polymer-Wasserstoff eingesetzt, der dafür sorgen soll, dass auch höhere Methanolkonzentrationen ohne Brennstoffverlust genutzt werden können. Der so genannte Methanol-Crossover-Prozess reduziert sich auf diese Weise um etwa ein Zehntel.

Das Unternehmen verspricht sich von dieser neuen Entwicklung Brennstoffzellen mit hoher Kapazität und potentiell eine erste Version. Mit nur 300 Milliliter Methanol soll ein Notebook ohne Benzinstopf acht bis zehn Stunden volle Leistung bringen. Der vorgestellte Prototyp ist nur 15

Millimeter dünn und liefert bis zu 15 Watt Energie.

Auch Toshiba zeigt einen neuen Brennstoffzellen-Prototyp für Notebooks. Die 120 Gramm leichte Brennstoffzelle hat eine durchschnittliche Leistung von zwölf Watt (maximal 20 Watt) und hält etwa fünf Stunden durch. Eines der größten Probleme von Methanol-Brennstoffzellen für tragbare Geräte hat das Unternehmen nach eigenen Angaben gelöst. Statt einer Methanol-Konzentration von drei bis sechs Prozent, die einen zu großen Vorratsbehälter benötigt, nutzt Toshiba eine höhere Konzentration, ohne dabei Abstriche an die Energieeffizienz machen zu müssen. Der Methanol-Konsum muss dabei nur

ein Zehntel der normalerweise notwendigen Größe.

Auch Deutschland kommt bei der Forschung mit Brennstoffzellen voran, unter anderem durch Entwicklungen des Forschungsinstituts. Die deutsche Firma Sinoert Fuel Cell (www.sinoert-fuelcell.de) hat schon fertige Produkte im Angebot. Das C25 leistet 140 Wattstunden mit einer Tankpatrone und reicht für mindestens sieben Stunden Mobilität über einen durchschnittlichen Verbrauch von 20 Watt. Die entsprechende Kartusche hat die Größe einer Zigarettenschale und ein Gewicht von 150 Gramm. Lange Zeiten zum Aufladen eines Akkus sind passé: Der Prototypenwechsel dauert nur wenige Sekunden.

Stromquelle und Elektrolyse (1800)



Alessandro Volta (1745 – 1827)



William Nicholson (1753 1815)



Johann Wilhelm Ritter (1776–1810)

Alessandro VOLTA (1745-1827)



Michael Faraday (1791-1867)

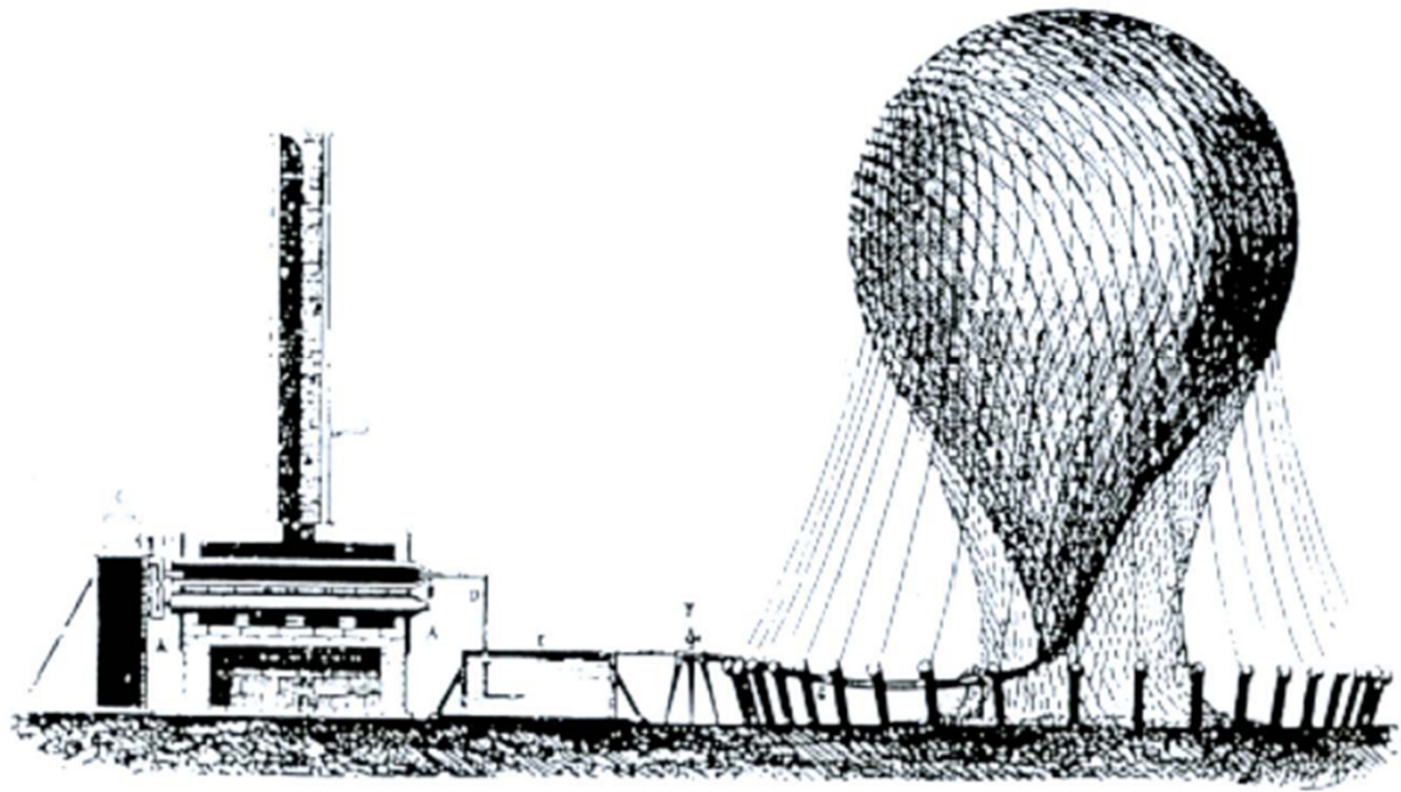




Johann Wilhelm Ritter (1776–1810)

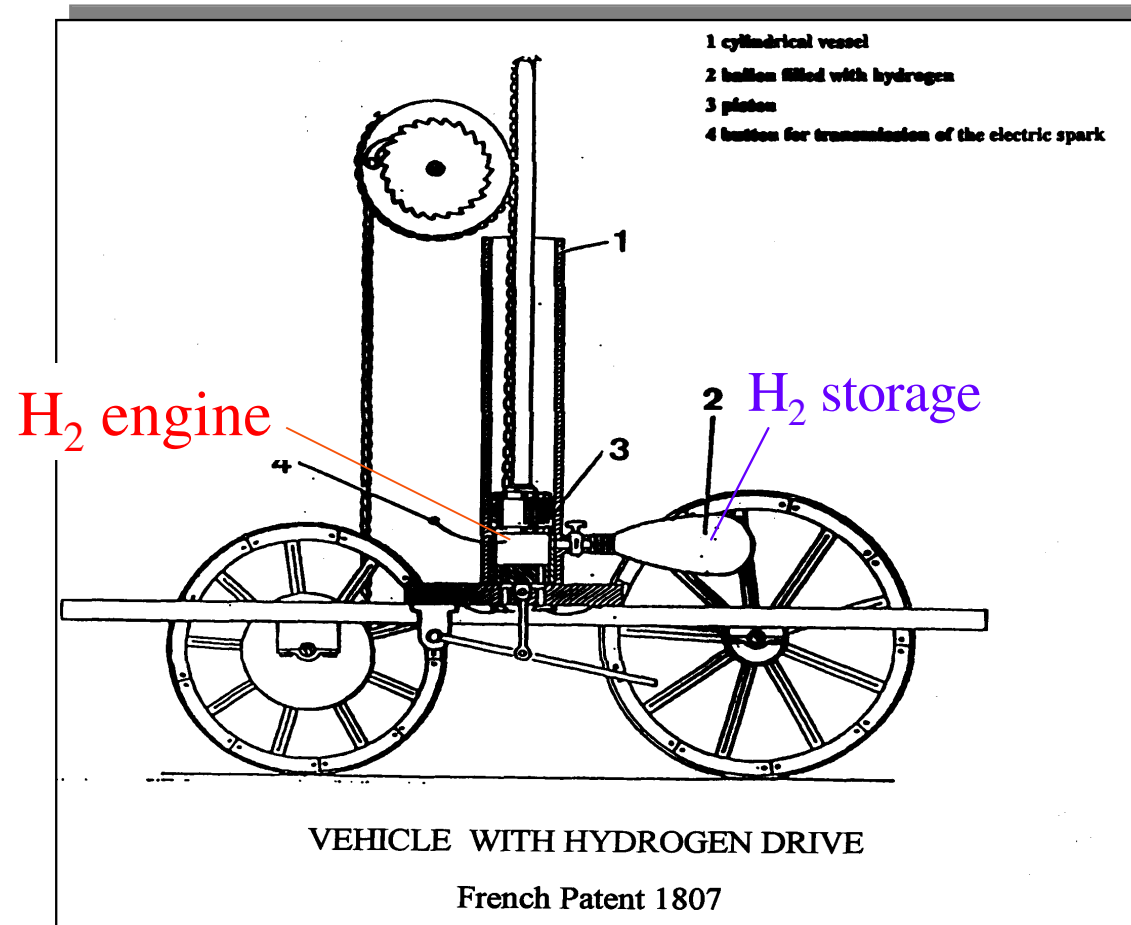
Performing self-experiments,
Ritter touched the poles of a Voltaic-Pile on his eyes,
ears, tongue, nose, hand, and other organs until the
maximum of his pain limit!

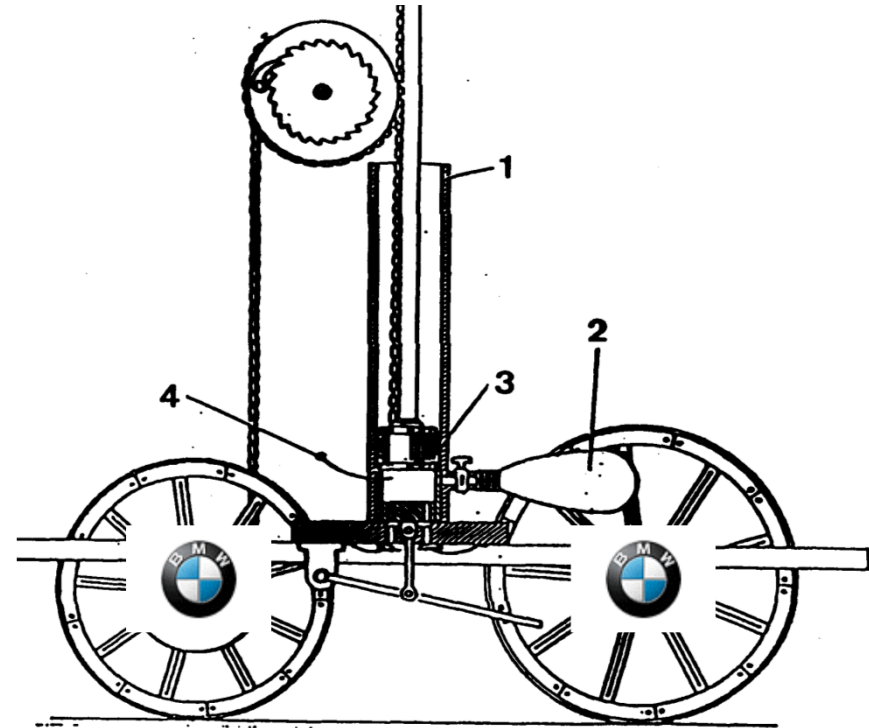
	on the cathode	on the anode
Eyes	flash + blue light Picture decreases	flash + red light picture increases
Ears	lower tone	higher tone
Tongue	acid	basic
Nose	smell decreases	sneeze
Hand	stiffens	loosening



H₂-Balloon of Napoleon
during Egypt Campaign 1798

Hydrogen vehicle - 1807





Ausgangssituation

- **Produktion ca. 600 Mrd. Nm³ Wasserstoff/a**
 - Dampfreformierung von Erdgas,
 - partieller Oxidation von Mineralöl
 - Kohlevergasung
 - Alternative Technologien < 1%

Alternative Technologien



thermisch > 2.700 °C

thermisch – chemisch ca. 800 °C

photobiochemisch

photoelektrochemisch

elektrochemisch

Ausgangssituation

- Produktion ca. 600 Mrd. Nm³ Wasserstoff/a
 - Dampfreformierung von Erdgas,
 - partieller Oxidation von Mineralöl
 - Kohlevergasung
 - Alternative Technologien < 1%
- Verbrauch hauptsächlich in der chemischen Industrie
- **Praktisch keine energetische Nutzung**

Energetische Nutzung

- Verkehr
- Netzstabilisierung

Energetische Nutzung - Netzstabilisierung

Treiber:

Nutzung Regenerativer Energien

- Emissionen
- Ressourcen
- Arbeitsplätze

Energetische Nutzung - Verkehr

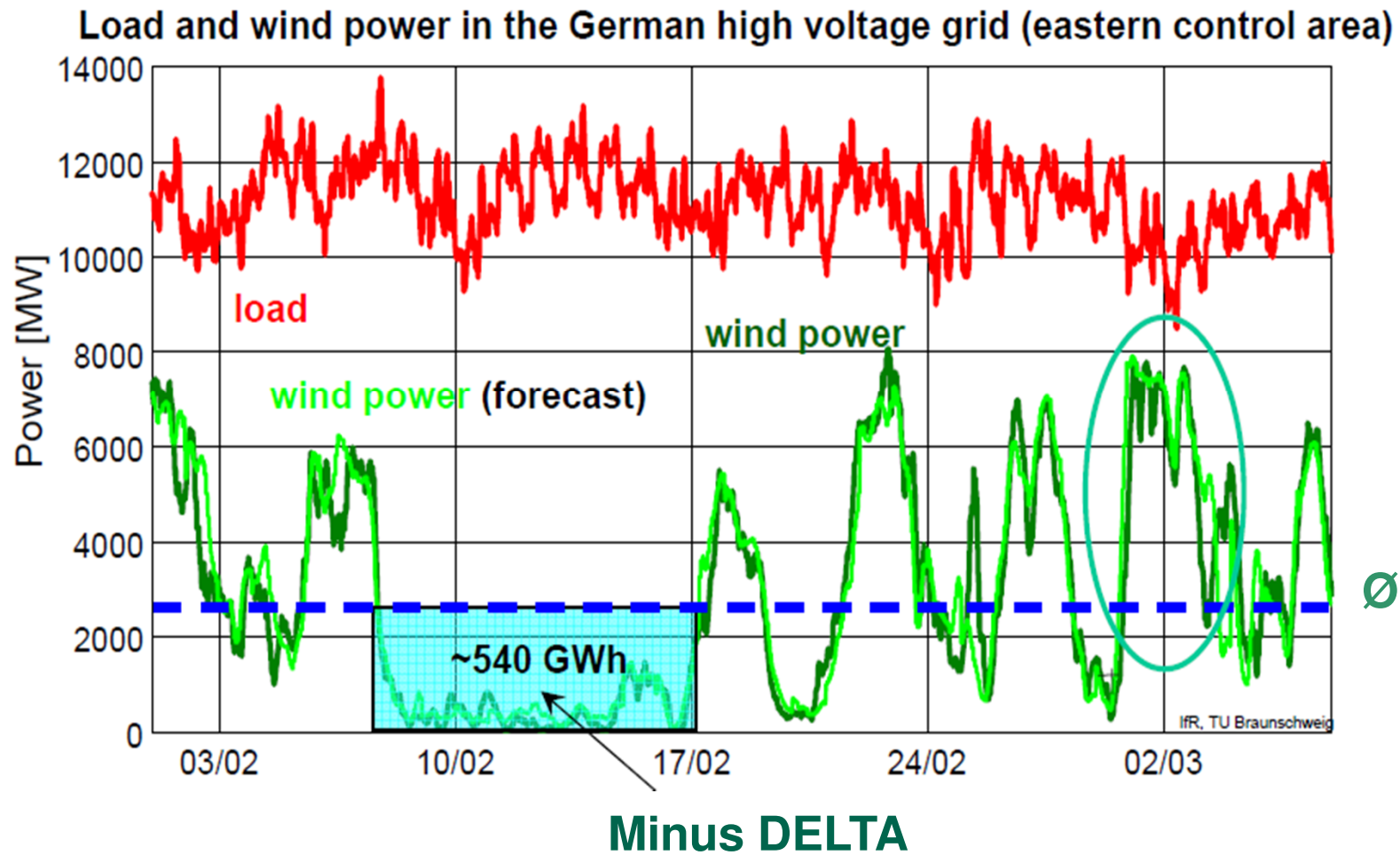
Treiber:

- Emissionen
- Ressourcen
- Arbeitsplätze
- Treibstoff-Diversifizierung

Aufgaben

- Wasserstoffherzeugung
- Wasserstoffinfrastruktur (Speicherung, Verteilung)
- Wasserstoffnutzung (Brennstoffzelle, H₂-ICE)

Load and Wind Power



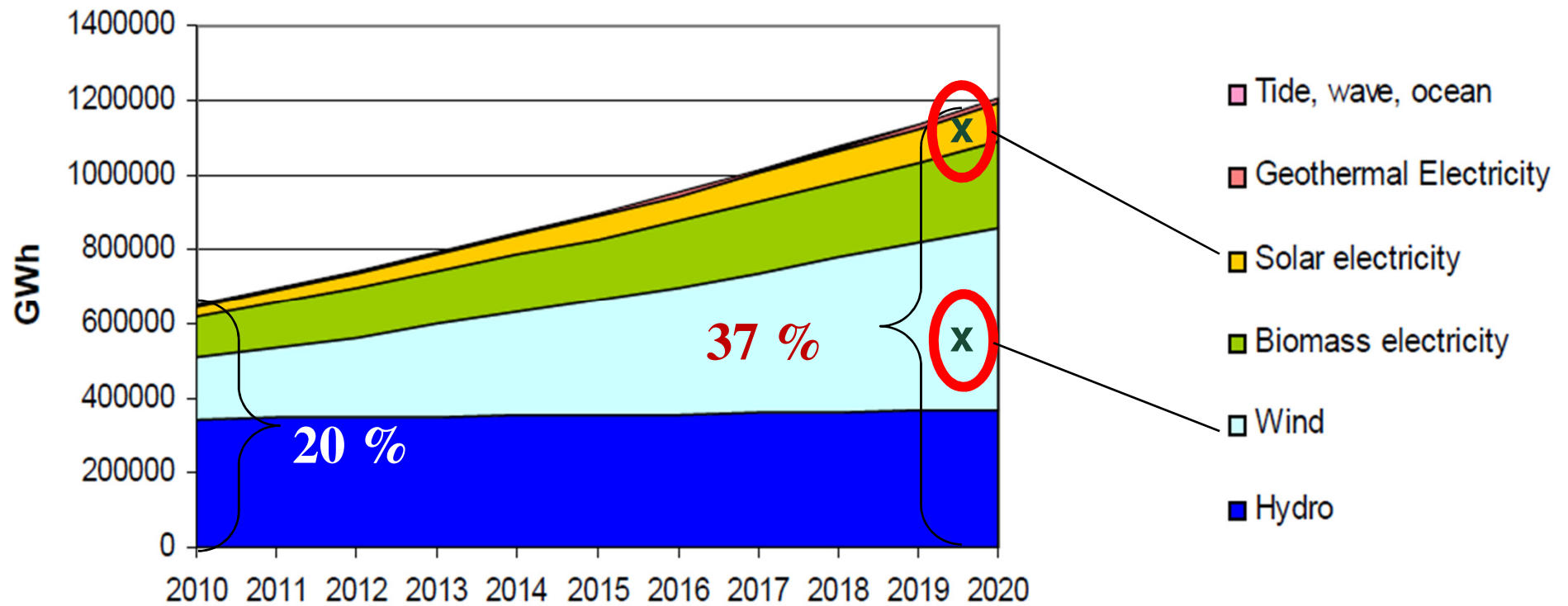
DELTA - Was tun?

- Reservekraftwerke
fossil, nicht ökonomisch

DELTA - Was tun?

- Reservekraftwerke
fossil, nicht ökonomisch
- Netzverbund
regelt 20-25 % Regenerative im Netz

EU development of RE in Electricity

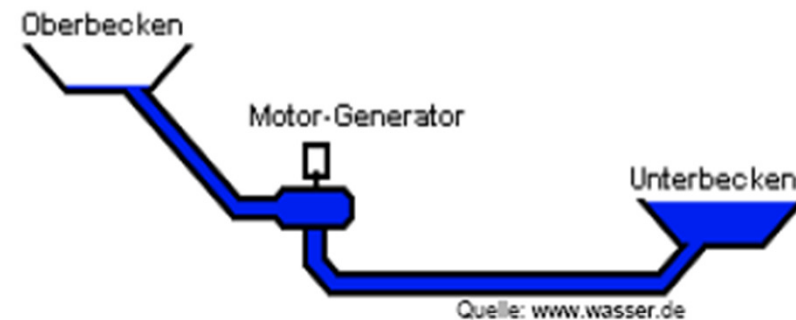


DELTA - Was tun?

- Reservekraftwerke
fossil, nicht ökonomisch
- Netzverbund
kann Regenerative regeln bis 20-25 % im Netz
- **Zentrale Speicherung**
 - *Pumpspeicher*
 - *Druckluft*
 - *Druckwasserstoff*
 - *Thermische Speicher*
 - *Chemische Speicher (z.B. Methan)*

Pumpspeicherwerk

$\eta \sim 80 \%$

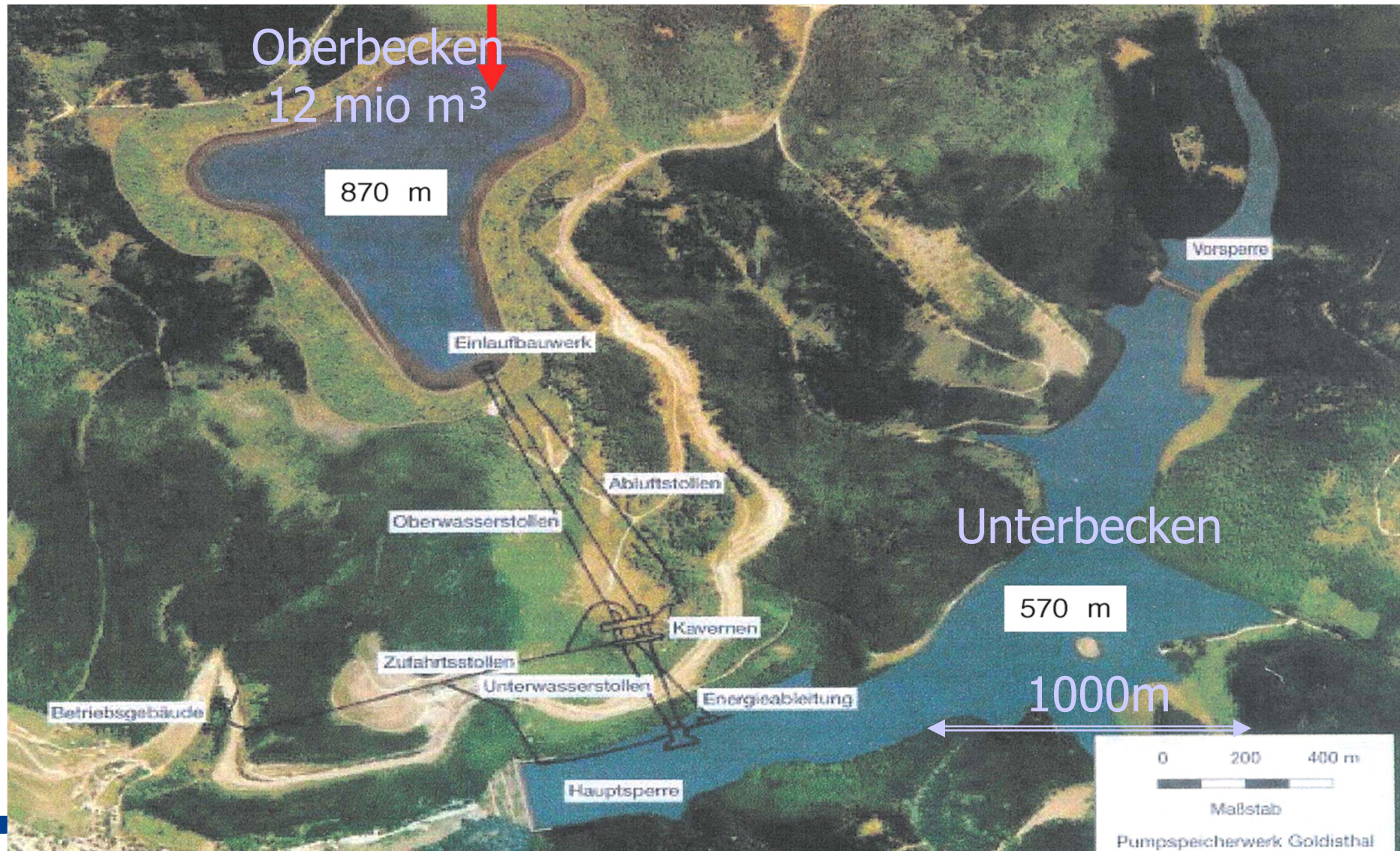


Ort	Name	Inbetriebnahme	Höhendifferenz [m]	Max. Leistung [MW]	Entladedauer [h]	Anlagekosten [Mio €]
Deutschland	Schluchsee	1932	620	512	314	
Österreich	Lünersee	1958	974	231	788	
Wales/GB	Dinorwig	1984	545	1890	5	310
USA / CA	Helms	1984	520	1212	153	416
USA / VA	Bath County	1985	380	2700	11	1650
Japan	Kazunogowa	2001	714	1600	8,2	3200
Deutschland	Goldisthal	2002	302	1060	8	700
Austria	Kops II	2008	798	450	48 I+II	370

Quelle: EAS, veag

Pumpspeicher-Kraftwerk Goldisthal

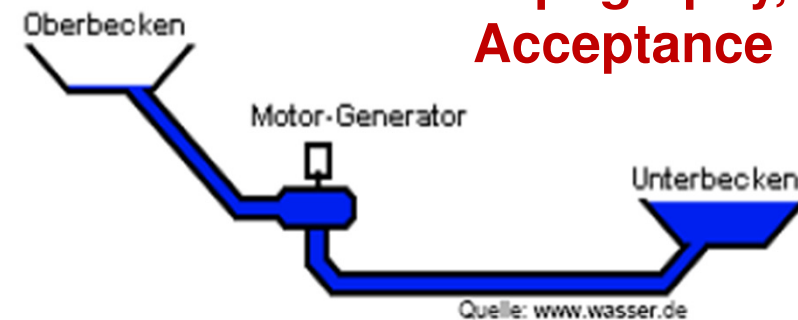
$8h * 1.060 \text{ MW} / \eta > 80\%$



Pumpspeicherwerk

$\eta \sim 80 \%$

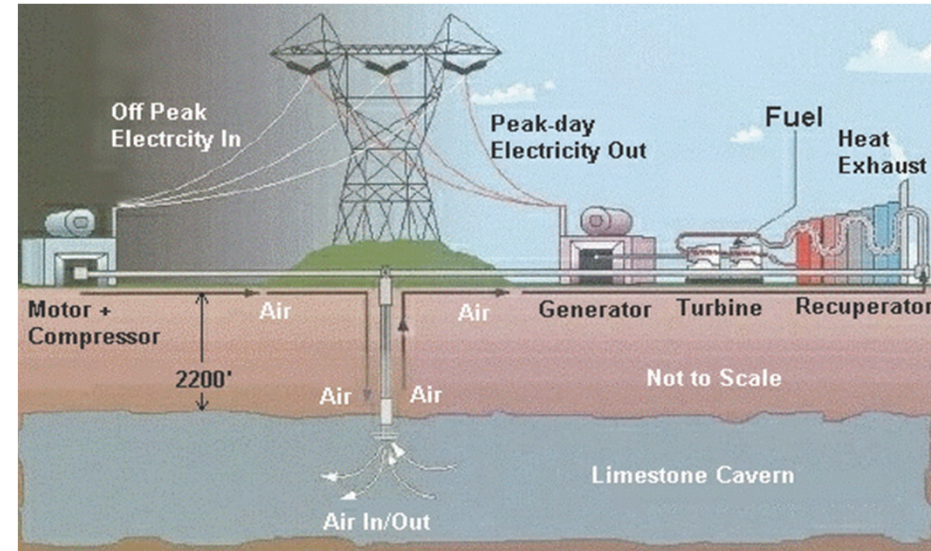
Conditions:
Topography,
Acceptance



Ort	Name	Inbetrieb- nahme	Höhendif- ferenz [m]	Max. Leist- ung [MW]	Entlade- dauer [h]	Anlagekost- en [Mio €]
Deutschland	Schluchsee	1932	620	512	314	
Österreich	Lünersee	1958	974	231	788	
Wales/GB	Dinorwig	1984	545	1890	5	310
USA / CA	Helms	1984	520	1212	153	416
USA / VA	Bath County	1985	380	2700	11	1650
Japan	Kazunogowa	2001	714	1600	8,2	3200
Deutschland	Goldisthal	2002	302	1060	8	700
Austria	Kops II	2008	798	450	48 I+II	370

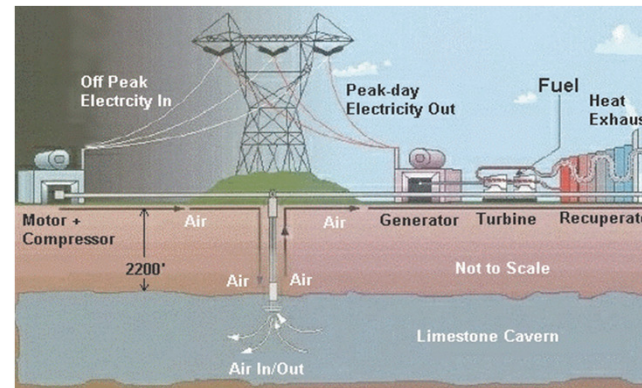
Quelle: EAS, veag

Compressed Air Energy Storage (CAES)



Location	Huntorf, Germany	McIntosh, USA
Commissioned	1978	1991
Store	Two cylindrical salt caverns, each with 150,000 m ³ at a depth of 600 m – 800 m (height 200 m, diameter: 30 m)	Salt cavern, 538,000 m ³ at a depth of 450 m – 750 m
Output	290 MW over 2 hours	110 MW over 26 hours
Energy required for 1 kWh el	0.8 kWh electricity	0.69 kWh electricity
	1.6 kWh gas	1.17 kWh gas
Pressure tolerance	50 – 70 bar	45 – 76 bar
Remark	World's first CAES plant	First CAES plant with recuperator

Compressed Air Energy Storage (CAES)

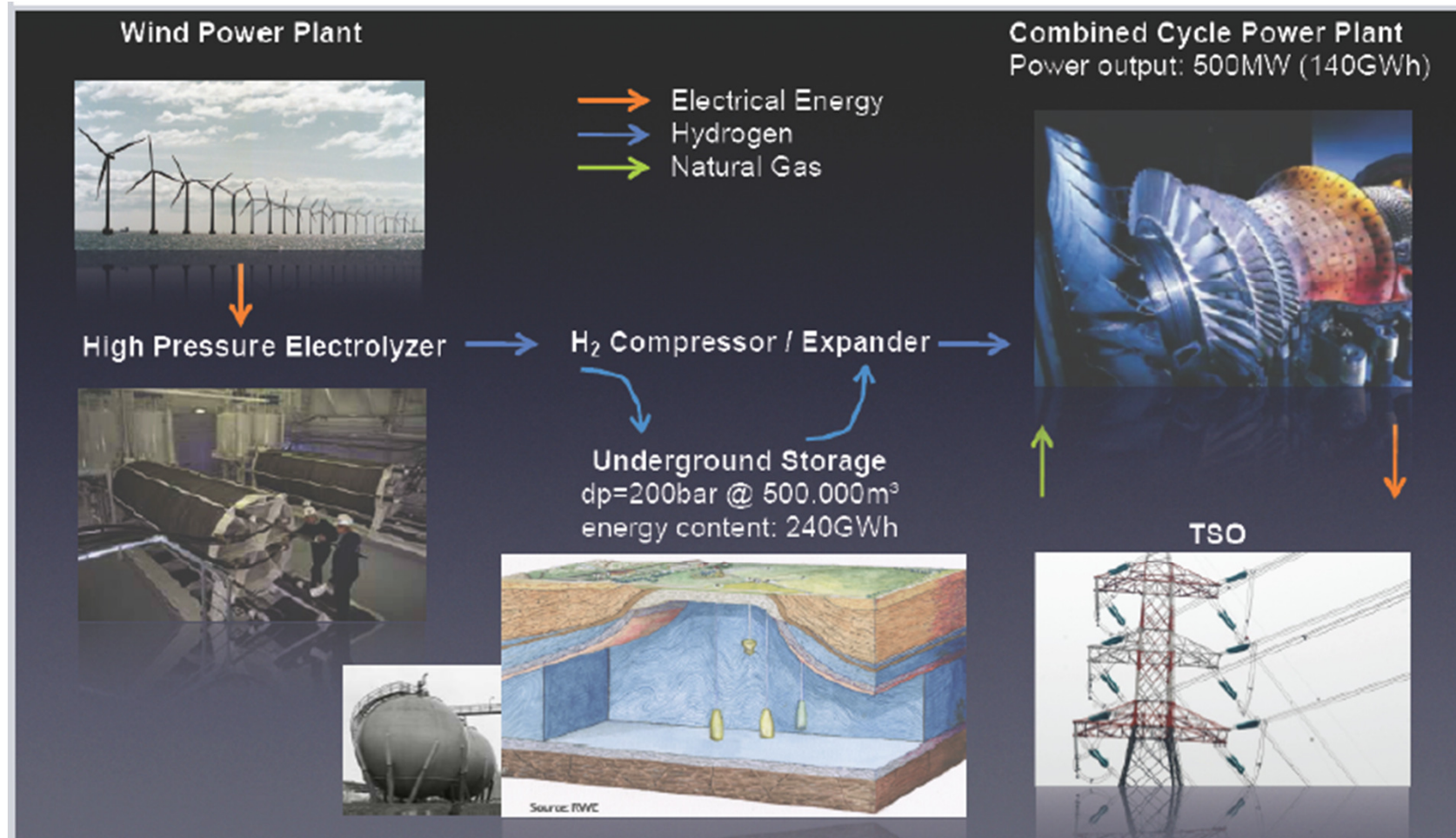


$\eta \sim 50 \%$

Conditions:
Salt caverns

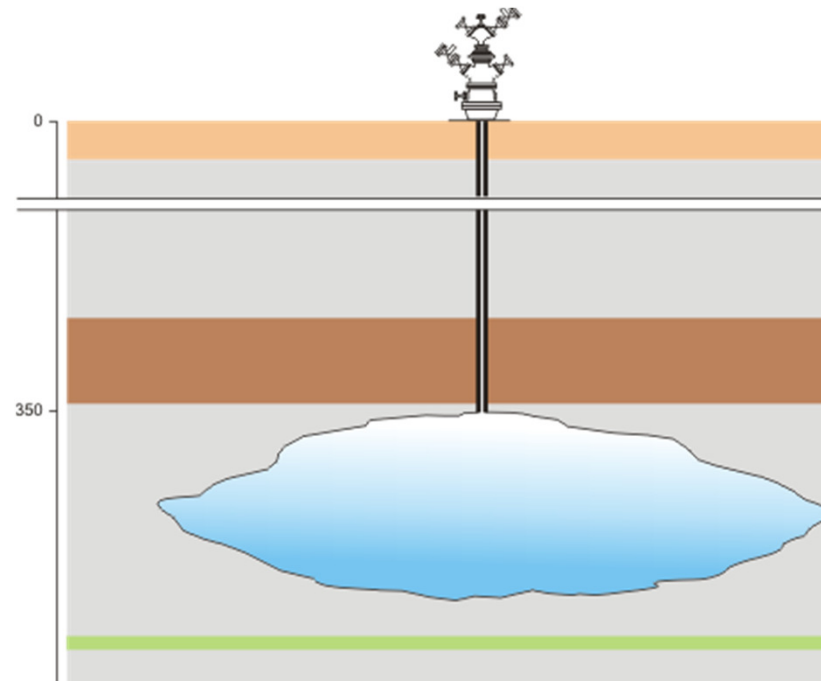
Location	Huntorf, Germany	McIntosh, USA
Commissioned	1978	1991
Store	Two cylindrical salt caverns, each with 150,000 m ³ at a depth of 600 m – 800 m (height 200 m, diameter: 30 m)	Salt cavern, 538,000 m ³ at a depth of 450 m – 750 m
Output	290 MW over 2 hours	110 MW over 26 hours
Energy required for 1 kWh el	0.8 kWh electricity	0.69 kWh electricity
	1.6 kWh gas	1.17 kWh gas
Pressure tolerance	50 – 70 bar	45 – 76 bar
Remark	World's first CAES plant	First CAES plant with recuperator

Hydrogen Storage

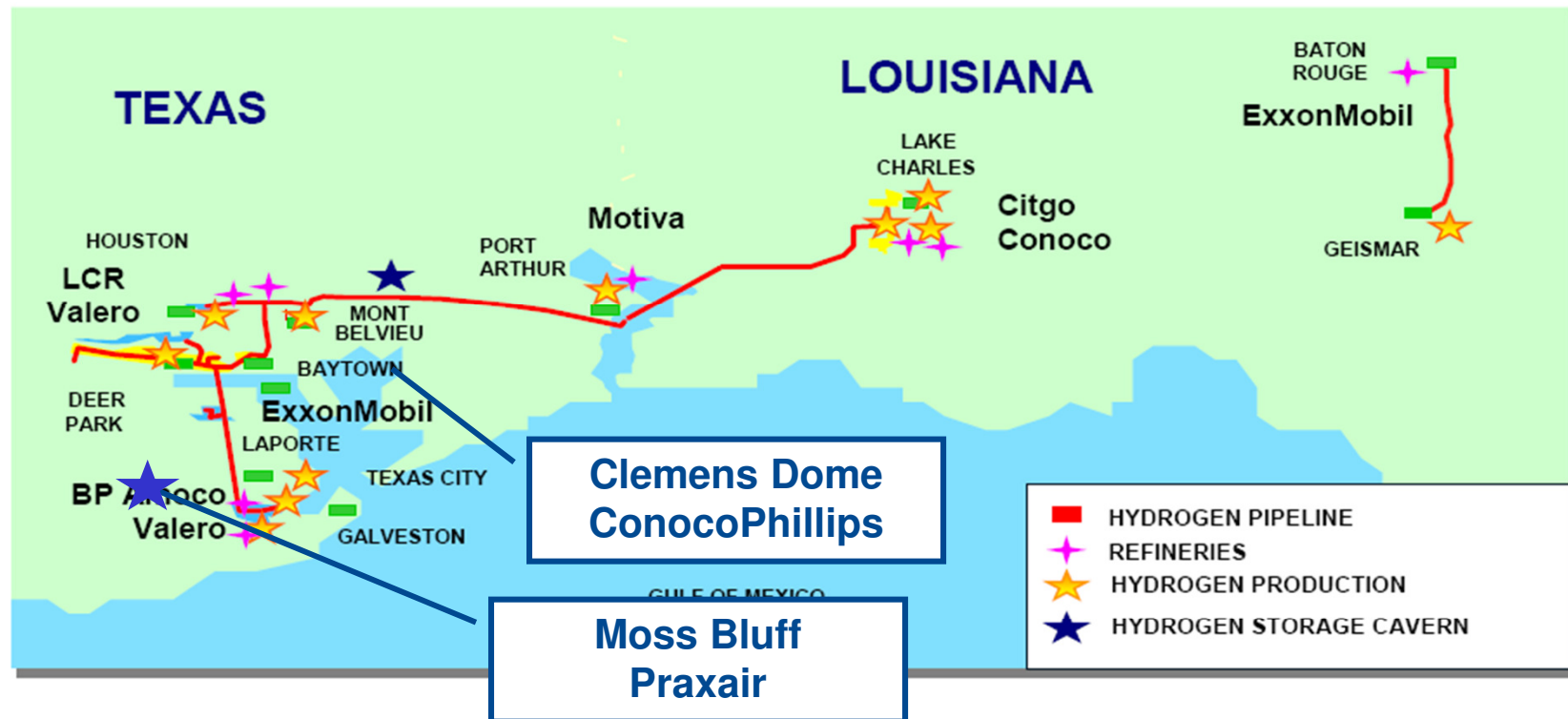


H2 Speicher der Sabic Petrochemicals in Teesside, UK

3 Kavernen à 70 000 m³
p = 45 bar konstant
Teufe ca. 370 m



H2 Pipelines und H2 Speicher am Golf von Mexiko, USA

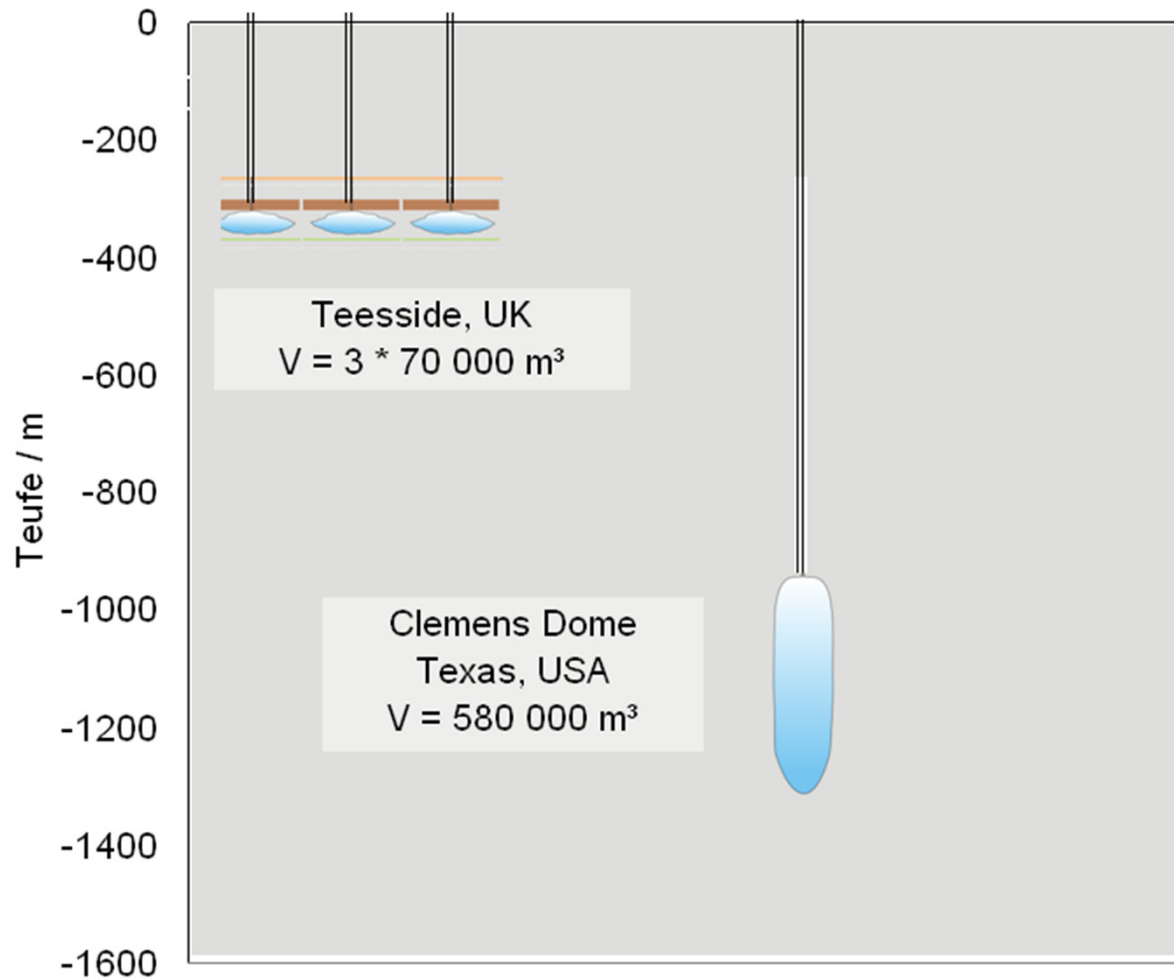


- ◆ 310 miles of pipeline; 12 sources / 700 MMSCFD; Connected to 85% of refining capacity
- ◆ Competitive alternative to refinery investment
- ◆ Pipeline system provides very positive economics for high PX returns

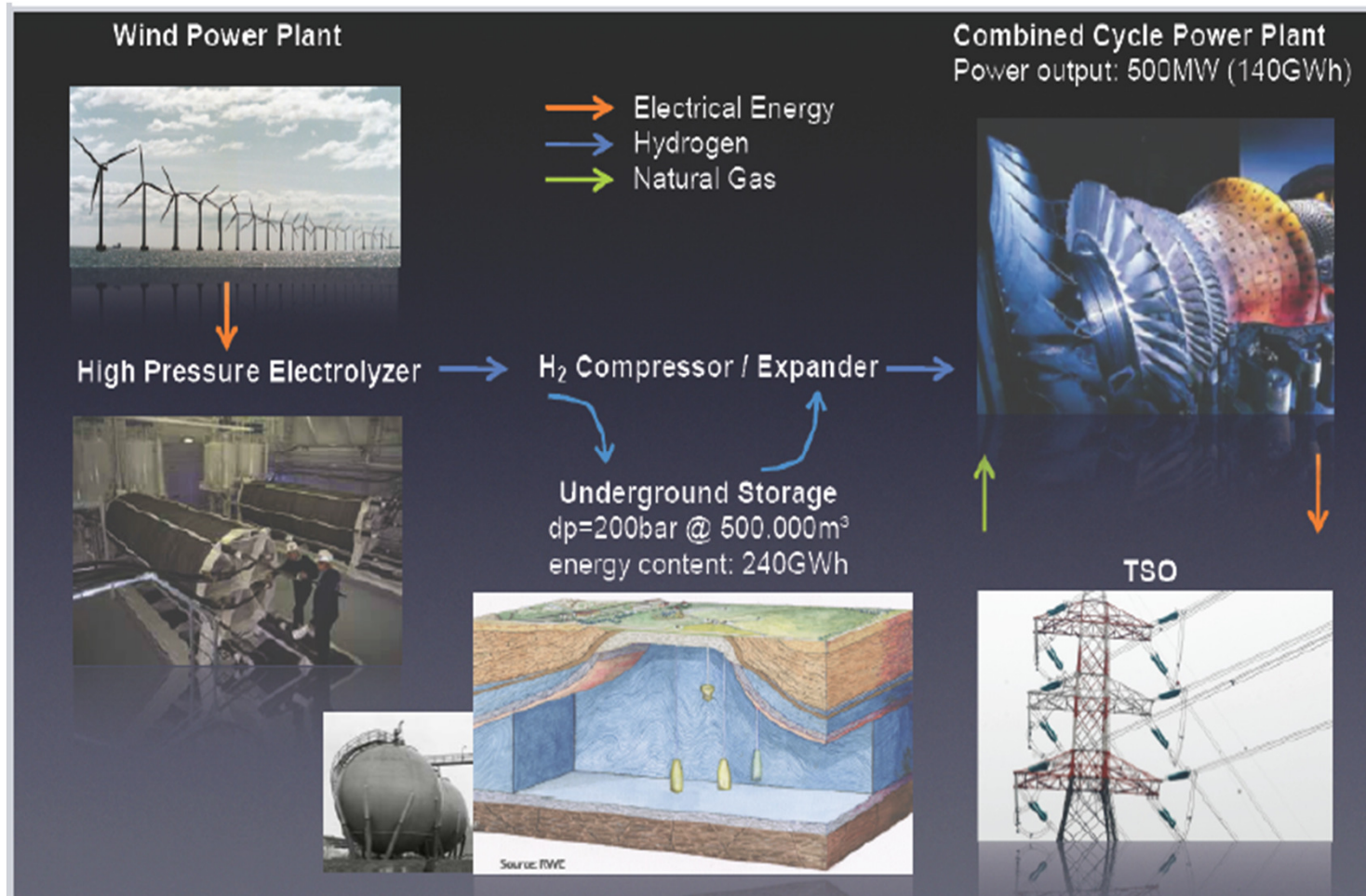
Kopf der H₂-Kaverne der ConocoPhillips



Geometrie und Lage der H2 Kavernen im Vergleich



Compressed Hydrogen Energy Storage (CHES)



$\eta \sim 40 \%$

Conditions:
Salt caverns,
(Acceptance)

Storage Capacity (TWh) and Volume (km³) for 2 % Storage

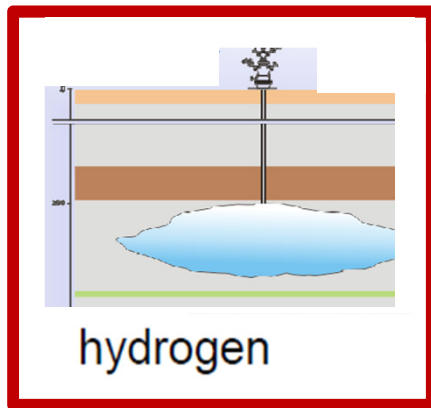
Technologie	Speicherkapazität in TWh für 2%	Speicherkapazität in km ³ für 2%
Hydrogen	100	0,28
Pump hydro	67	81,30
AA-CAES	80	14,71

↗
Effizienz

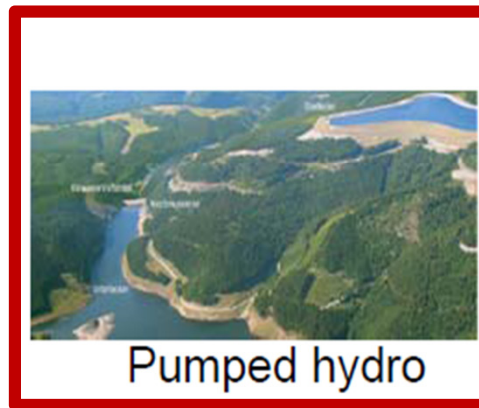
↗
Speicherdichte

Centralized Storage Power Stations

- For economic operation typically only large units necessary
- Mainly located at special location (e.g. compressed air, pumped hydro)



e.g. Germany

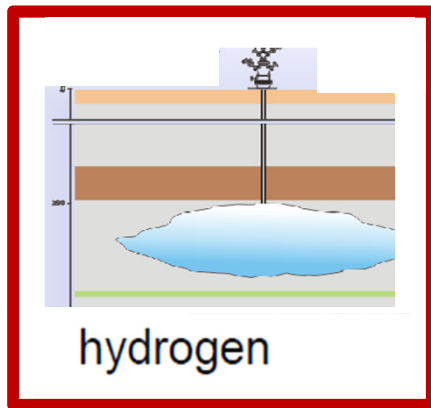


e.g. Norway, Austria,
Switzerland



Centralized Storage Power Stations

- For economic operation typically only large units necessary
- Mainly located at special location (e.g. compressed air, pumped hydro)



Pumped hydro



compressed air



e.g. Germany

Aber - Noch keine technologische Erfahrung!

Energetische Nutzung - Netzstabilisierung

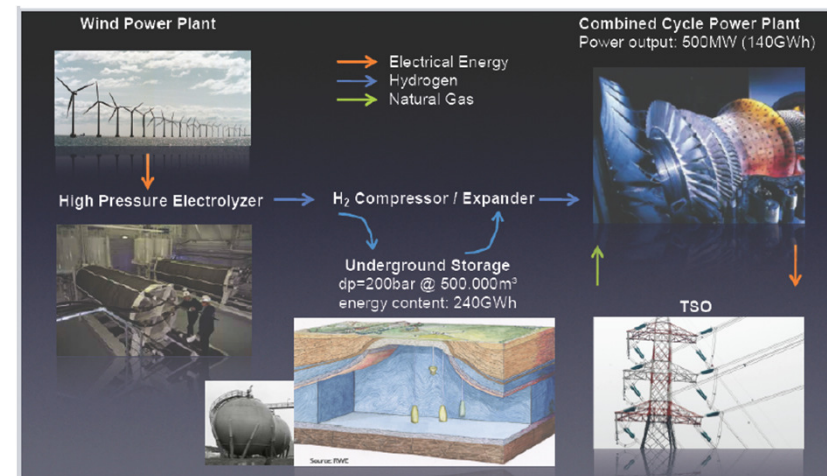
Treiber:

Nutzung Regenerativer Energien

- Emissionen
- Ressourcen
- Arbeitsplätze

Aufgaben

- Wasserstofferzeugung
- Wasserstoffspeicherung
- Wasserstoffverstromung (BZ, Gasturbine)



Energetische Nutzung - Vergleiche

- Netzstabilisierung, Verkehr -

- **Wasserstoffherzeugung**

- **Wasserstoffinfrastruktur**

Speicherung

Netz: große Speicher

Verkehr: on-board Speicher

Transport, Verteilung (Verkehr)

- **Wasserstoffverstromung**

Brennstoffzelle:

Netz: SOFC, MCFC

Verkehr: PEMFC

CARNOT-Technologien

Netz: Gasturbine

Verkehr: ICE

Energetische Nutzung

- Netzstabilisierung, Verkehr -

- Wasserstoffherzeugung

- Wasserstoffinfrastruktur

Speicherung

Netz: große Speicher

Verkehr: on-board Speicher

Transport, Verteilung (Verkehr)

- Wasserstoffverstromung

Brennstoffzelle:

Netz: SOFC, MCFC

Verkehr: PEMFC

CARNOT-Technologien

Netz: Gasturbine

Verkehr: ICE

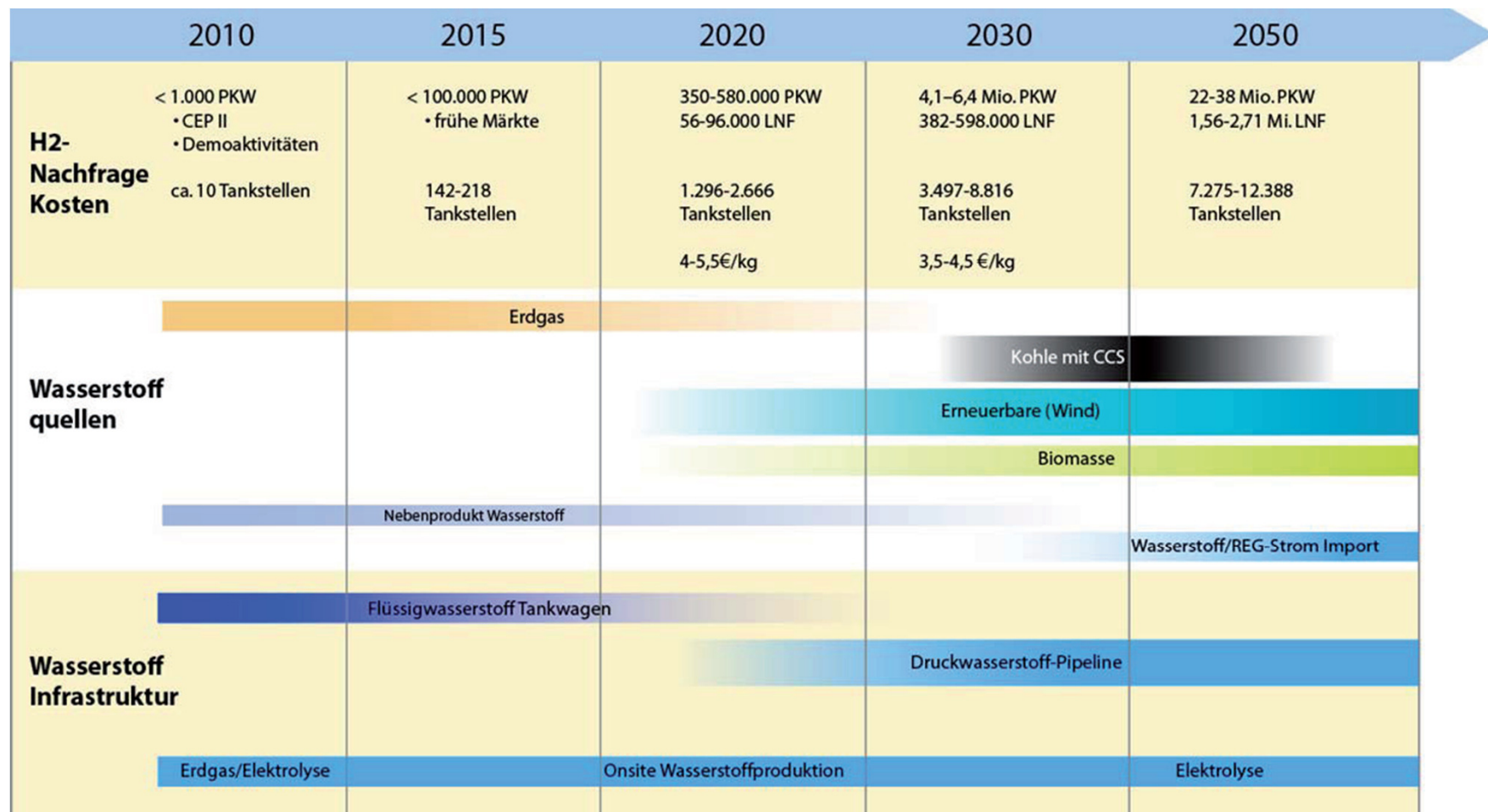


Studie zur Frage

„Woher kommt der Wasserstoff in Deutschland bis 2050?“

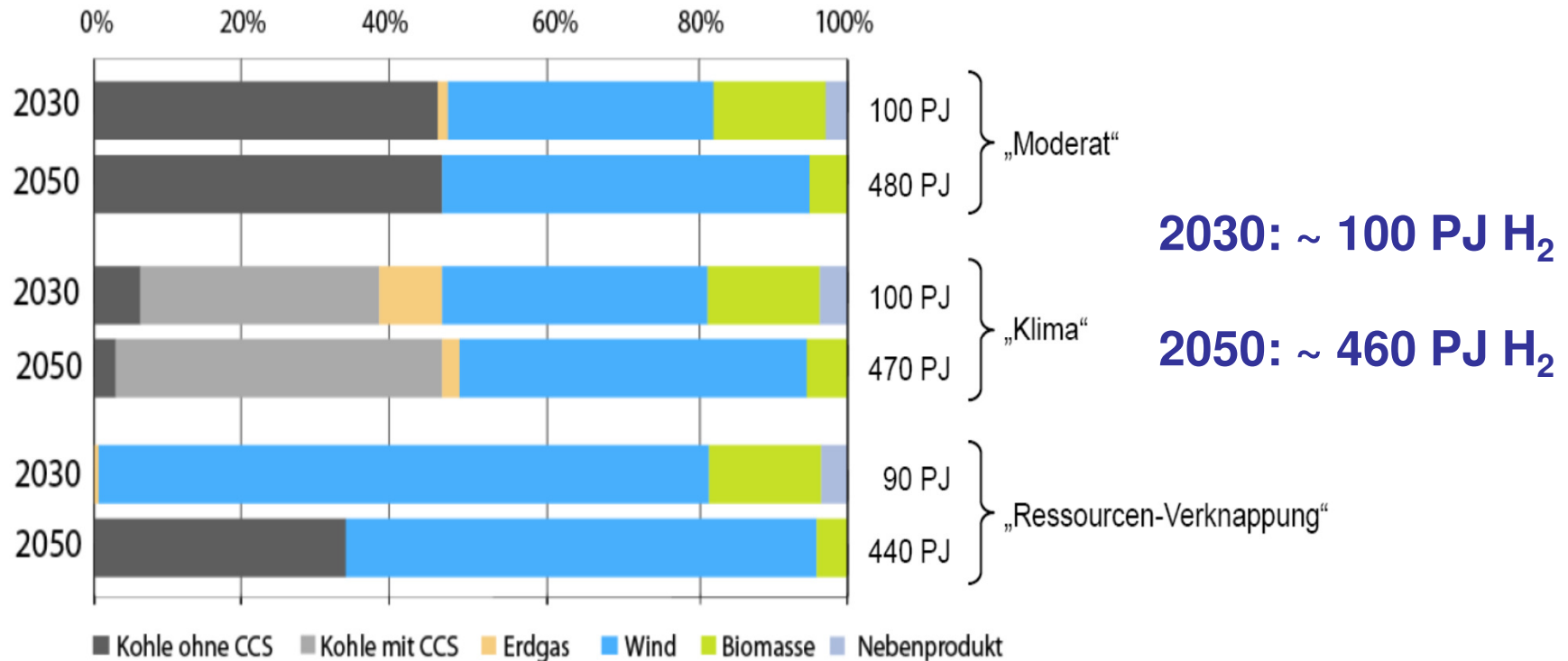
Für den
Verkehr

Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und
Stadtentwicklung (BMVBS) und in Abstimmung mit der Nationalen
Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW).



GermanHy

Primärenergieträger - Wasserstoffproduktion 2030 und 2050



1 **Moderate Entwicklung**

2 **Klimaschutz**

3 **Ressourcen-
verknappung**

Konservative
Trendfortschreibung

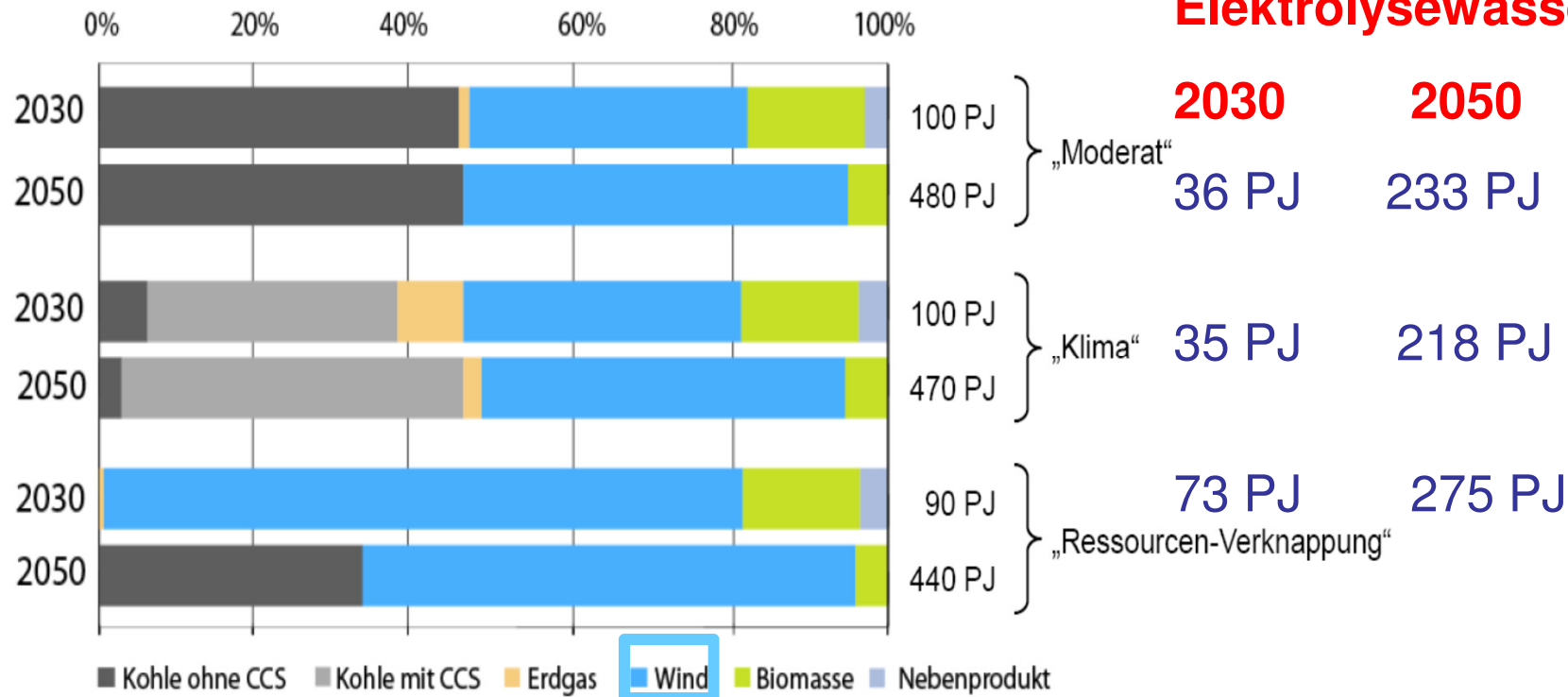
Ambitionierte
Klimaschutzpolitik

Massive Knappheit
fossiler Ressourcen

GermanHy

Primärenergieträger - Wasserstoffproduktion 2030 und 2050

**Wind
Elektrolysewasserstoff**



H₂

Wieviele Elektrolyseure müssen installiert werden?

groß: 890 Nm³ h⁻¹

klein: 220 Nm³ h⁻¹

Anzahl der benötigten Elektrolyseure:

Technologie	2030		2050	
	Bedarf H ₂	Anzahl Ely	Bedarf H ₂	Anzahl Ely
Szenario „Moderat“	14.000 GWh 4,67 Mrd. Nm ³	749 x groß 3.500 x klein	90.000 GWh 30,0 Mrd. Nm ³	4.812 x groß 22.500 x klein
Szenario „Klima“	14.000 GWh 4,67 Mrd. Nm ³	749 x groß 3.500 x klein	77.000 GWh 25,7 Mrd. Nm ³	4.118 x groß 19.250 x klein
Szenario „Ressourcen“	32.000 GWh 10,67 Mrd. Nm ³	1.711 x groß 8.000 x klein	115.000 GWh 38,3 Mrd. Nm ³	6.150 x groß 28.750 x klein

Zum Vergleich Produktionsvolumen seit Einführung der Technik vor 90 Jahren:

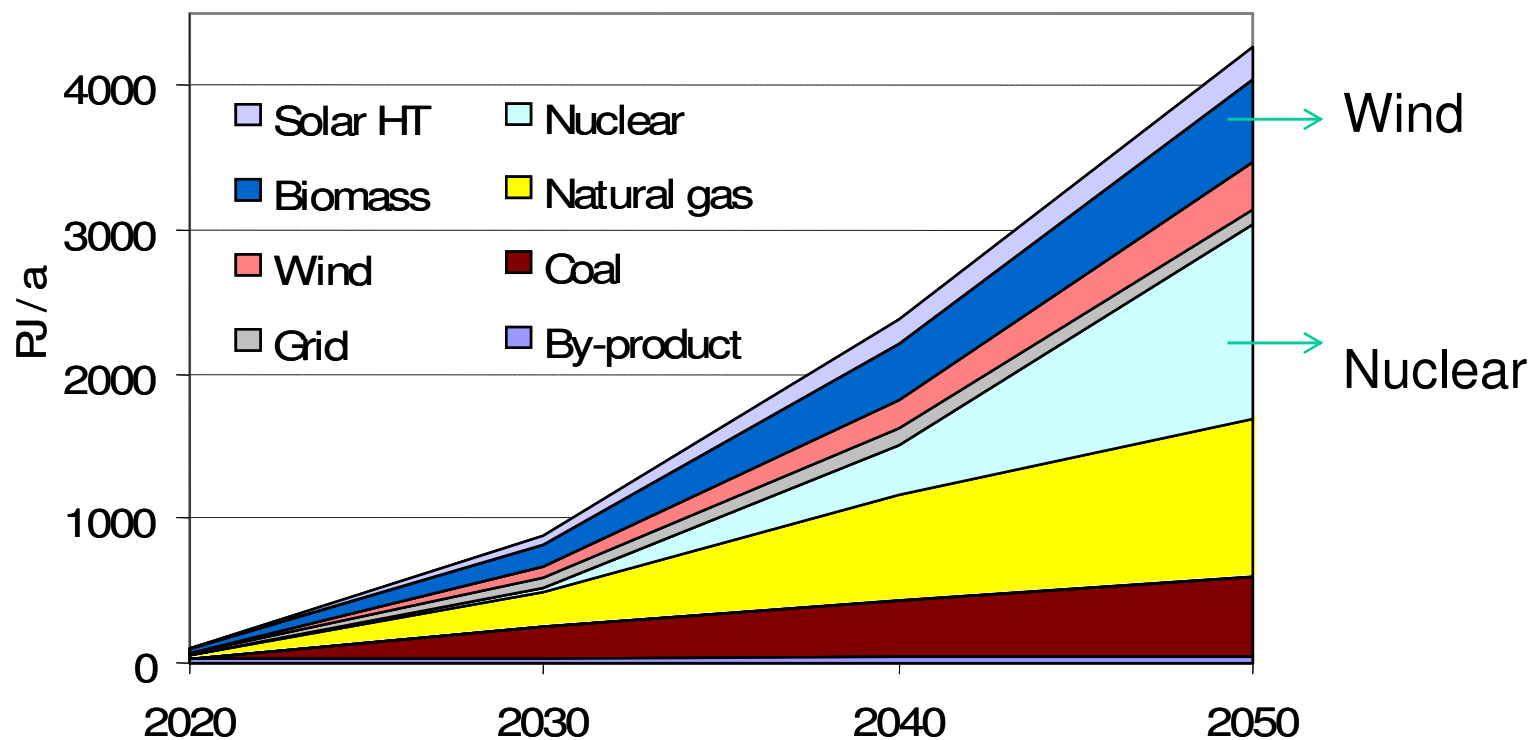
- 100 x System Lurgi (bis 760 Nm³ h⁻¹)
- 400 x System BAMAG (bis 330 Nm³ h⁻¹)
- 500 x System Norsk Hydro (bis 485 Nm³ h⁻¹)
- 500 x System Demag (bis 150 Nm³ h⁻¹)

**Problem – Elektrolyseindustrie muss
aufgebaut werden**



HyWays

Primärenergieträger - Wasserstoffproduktion



Source: HyWays

Primärenergieträgervergleich – Europa - Deutschland



Primärenergie- träger	2030 EU*	2030 Deutschland**	2050 EU*	2050 Deutschland**
Gesamt	800 PJ/a	100 PJ/a	4.250 PJ/a	480 PJ/a
Bio	3 %	15 %	15 %	5 %
Wind	1 %	50 %	7 %	48 %
Nuklear	0,5 %	0 %	32 %	0 %
Wind + Nuklear	1,5 %	50 %	39 %	48 %
	120 PJ/a	50 PJ/a	1.650 PJ/a	230 PJ/a

* Die EU-Werte enthalten auch den deutschen Bedarf.

** Die Werte für Deutschland wurden als Durchschnitt der drei Szenarien berechnet.

Primärenergieträgervergleich – Europa - Deutschland



Primärenergie- träger	2030 EU*	2030 Deutschland**	2050 EU*	2050 Deutschland**
Gesamt	800 PJ/a	100 PJ/a	4.250 PJ/a	480 PJ/a
Bio	3 %	15 %	15 %	5 %
Wind	1 %	50 %	7 %	48 %
Nuklear	0,5 %	0 %	32 %	0 %
Wind + Nuklear	1,5 %	50 %	39 %	48 %
	120 PJ/a	50 PJ/a	1.650 PJ/a	230 PJ/a

* Die EU-Werte enthalten auch den deutschen Bedarf.

** Die Werte für Deutschland wurden als Durchschnitt der drei Szenarien berechnet.

**Nuclear wird in Europa und in der Welt bedeutenden
Beitrag zur CO2-freien Wasserstofferzeugung liefern**

Energetische Nutzung

- Netzstabilisierung, Verkehr -

- Wasserstofferzeugung

- **Wasserstoffinfrastruktur**

Speicherung

Netz: große Speicher

Verkehr: on-board Speicher

Transport, Verteilung (Verkehr)

- **Wasserstoffverstromung**

Brennstoffzelle:

Netz: SOFC, MCFC

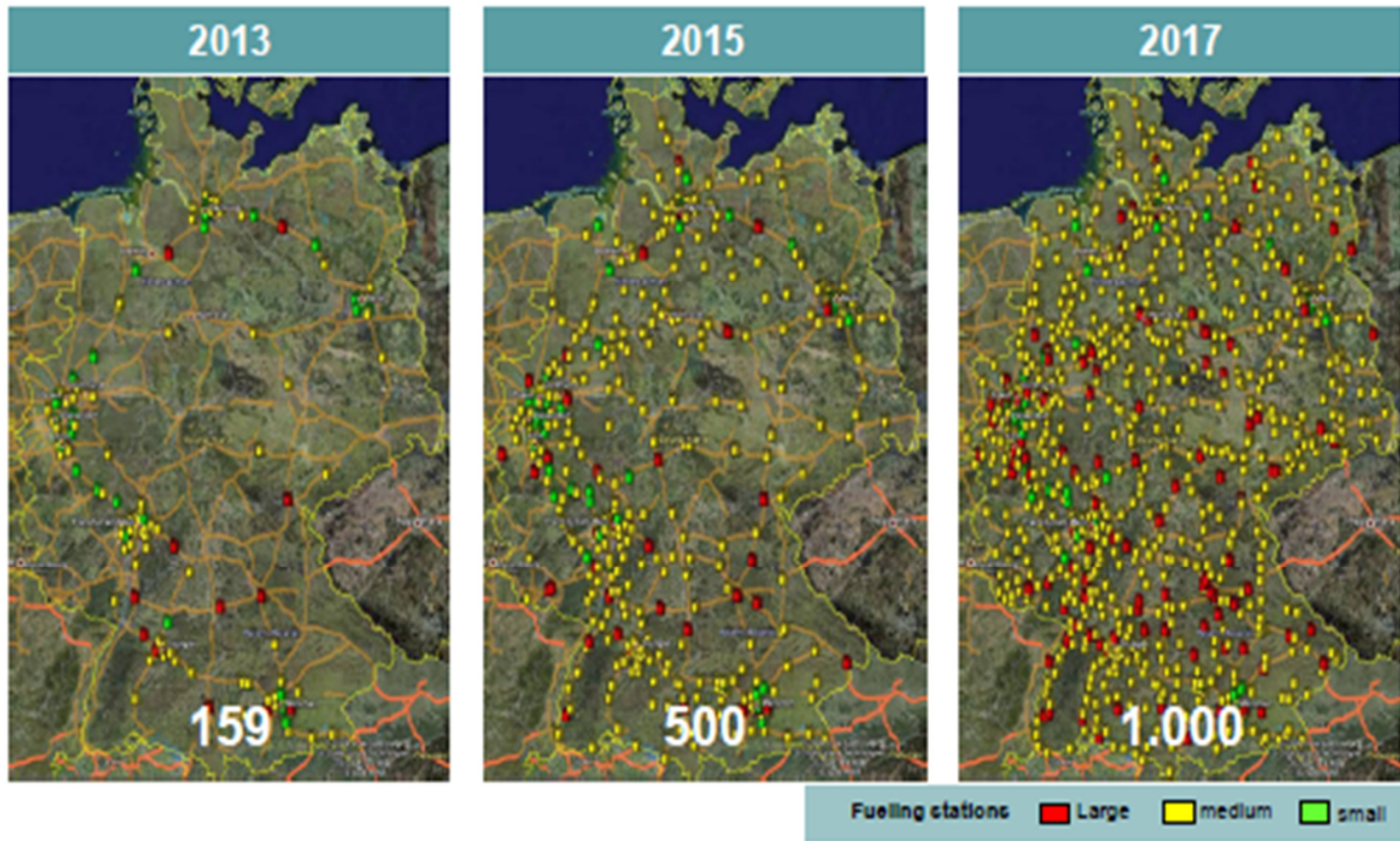
Verkehr: PEMFC

CARNOT-Technologien

Netz: Gasturbine

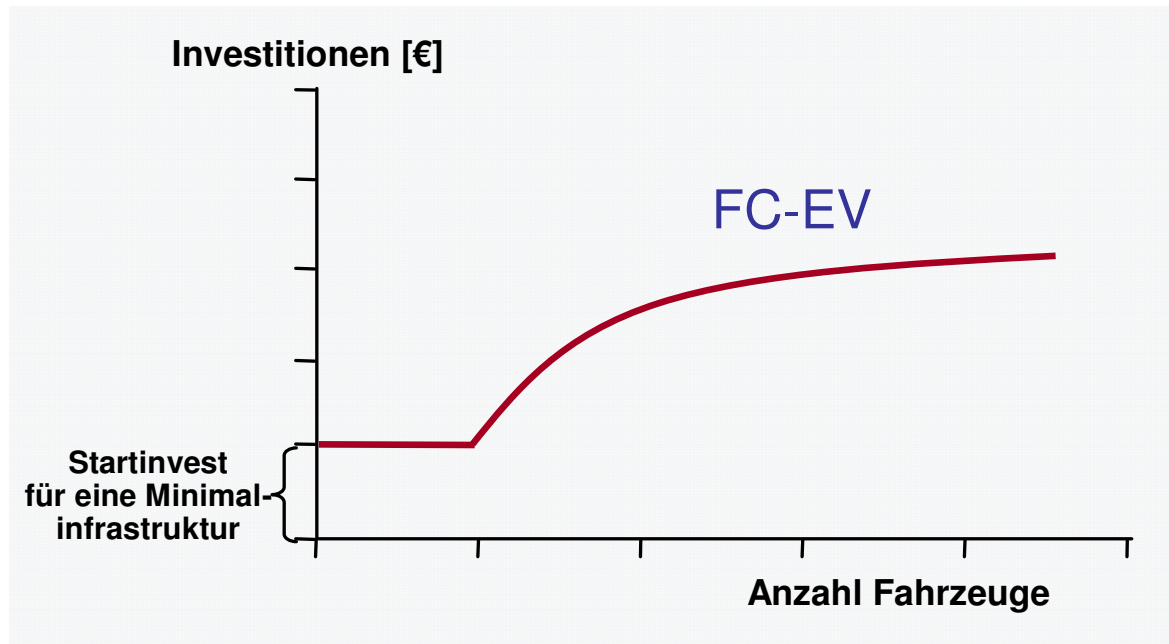
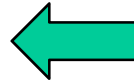
Verkehr: ICE

H2-Stations in Germany



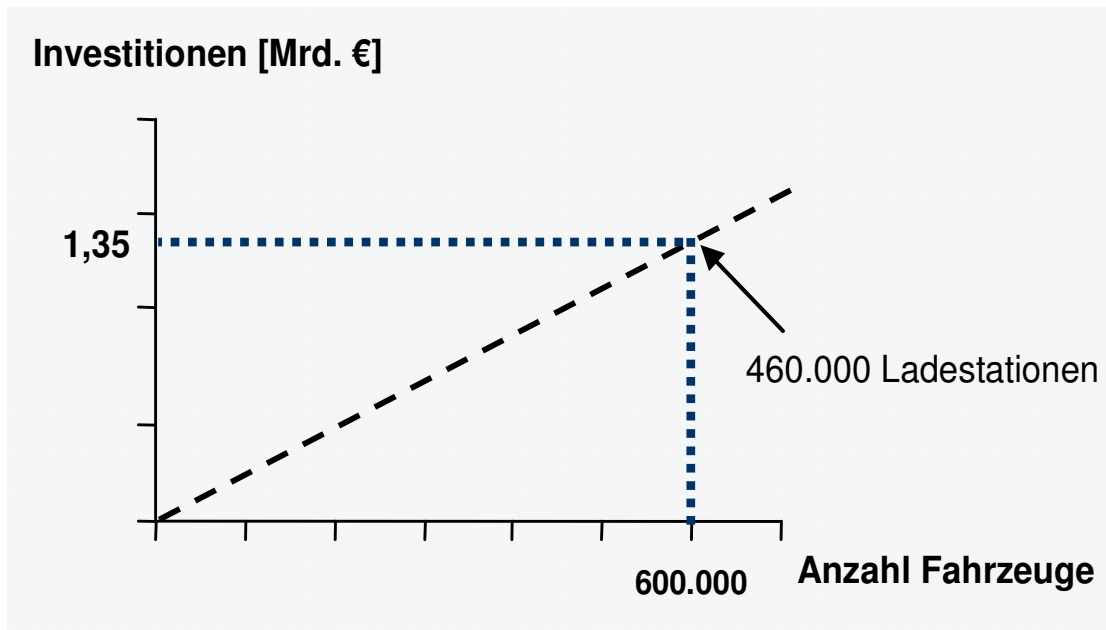
H2 - Infrastructure (Germany)

Ca. 2 Mrd. €
für 1.000 H2-
Tankstellen



1 H2 station $\equiv$ many FC-cars
1 H2 station $\equiv$ 2 Mio. €

EV Battery Infrastructure



1 charge station $\equiv$ 1.3 EVs
1 charge station $\equiv$ 3 T€

1 Mill. EVs (D - 2020) = 770.000 charge stations $\Rightarrow$ 2,3 Mrd. €
50 Mill. EVs (D - total) = 38.5 Mill. charge station $\Rightarrow$ 115 Mrd. €

**Finanzierung der Wasserstofftankstellen ist
überschaubar – aber nicht gesichert!**

***Automobilhersteller ⇔ Mineralölproduzenten
⇔ Gashersteller ⇔ Staat***

Energetische Nutzung

- Netzstabilisierung, Verkehr -

- **Wasserstofferzeugung**

- **Wasserstoffinfrastruktur**

Speicherung

Netz: große Speicher

Verkehr: on-board Speicher

Transport, Verteilung (Verkehr)

- **Wasserstoffverstromung**

Brennstoffzelle:

Netz: SOFC, MCFC

Verkehr: PEMFC

CARNOT-Technologien

Netz: Gasturbine

Verkehr: ICE

Entwicklungsintensität



Schönbein, Grove



Markt
2004

Zeit

1839

1960 - 1970

1996

Entwicklungsintensität



Schönbein, Grove

1839

1960 -1970

1996

Zeit

Barrieren

- Kosten ($\leq 30\$/kW$)
- Lebensdauer ($\geq 5.000\text{ h}$)
- H₂-Speicher ($\geq 400\text{ km}$)



Markt
2015

Entwicklungsintensität



Schönbein, Grove

1839

1960 -1970

1996

Zeit

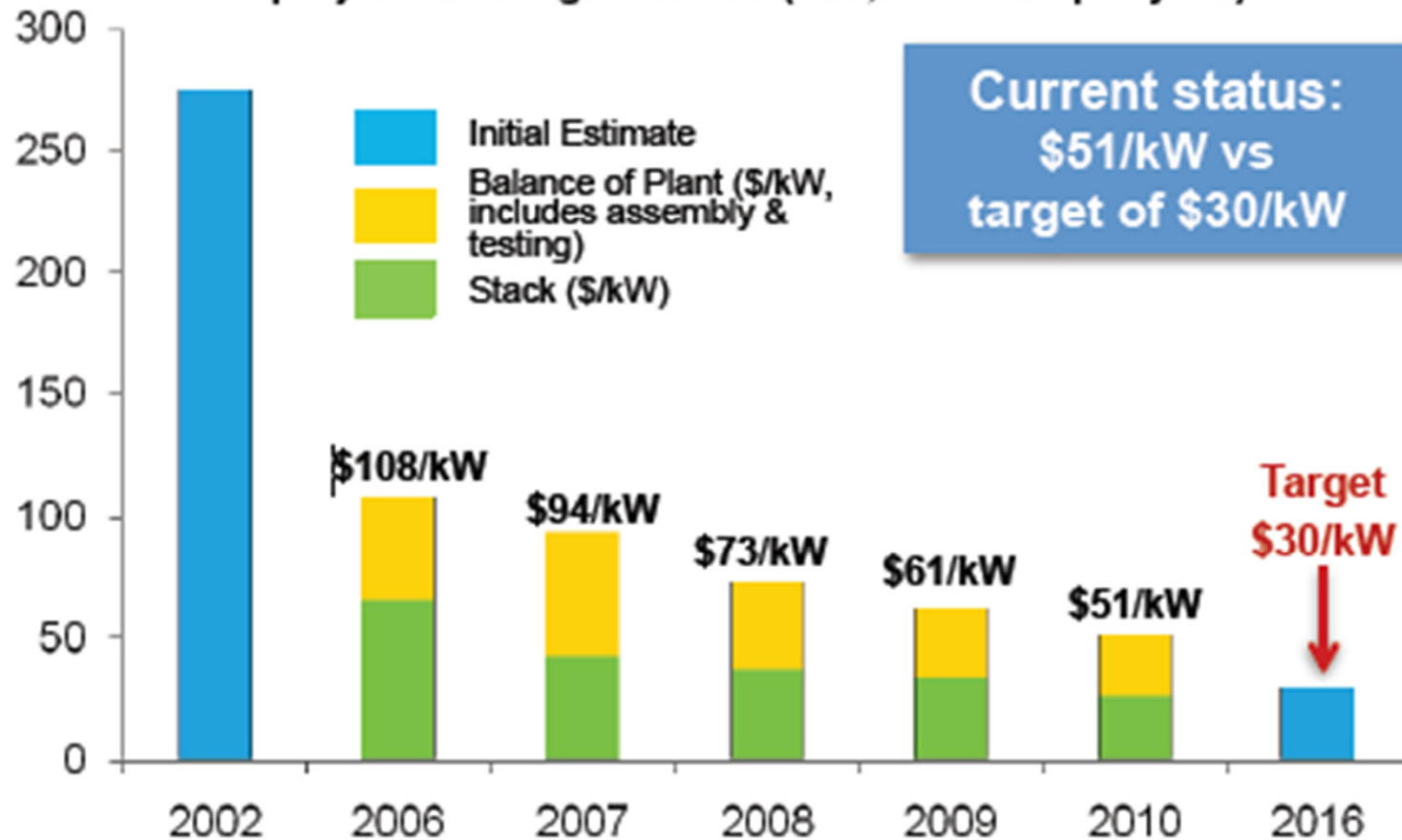
Barrieren

- Kosten ($\leq 30\$/kW$)
- Lebensdauer ($\geq 5.000\text{ h}$)
- H₂-Speicher ($\geq 400\text{ km}$)



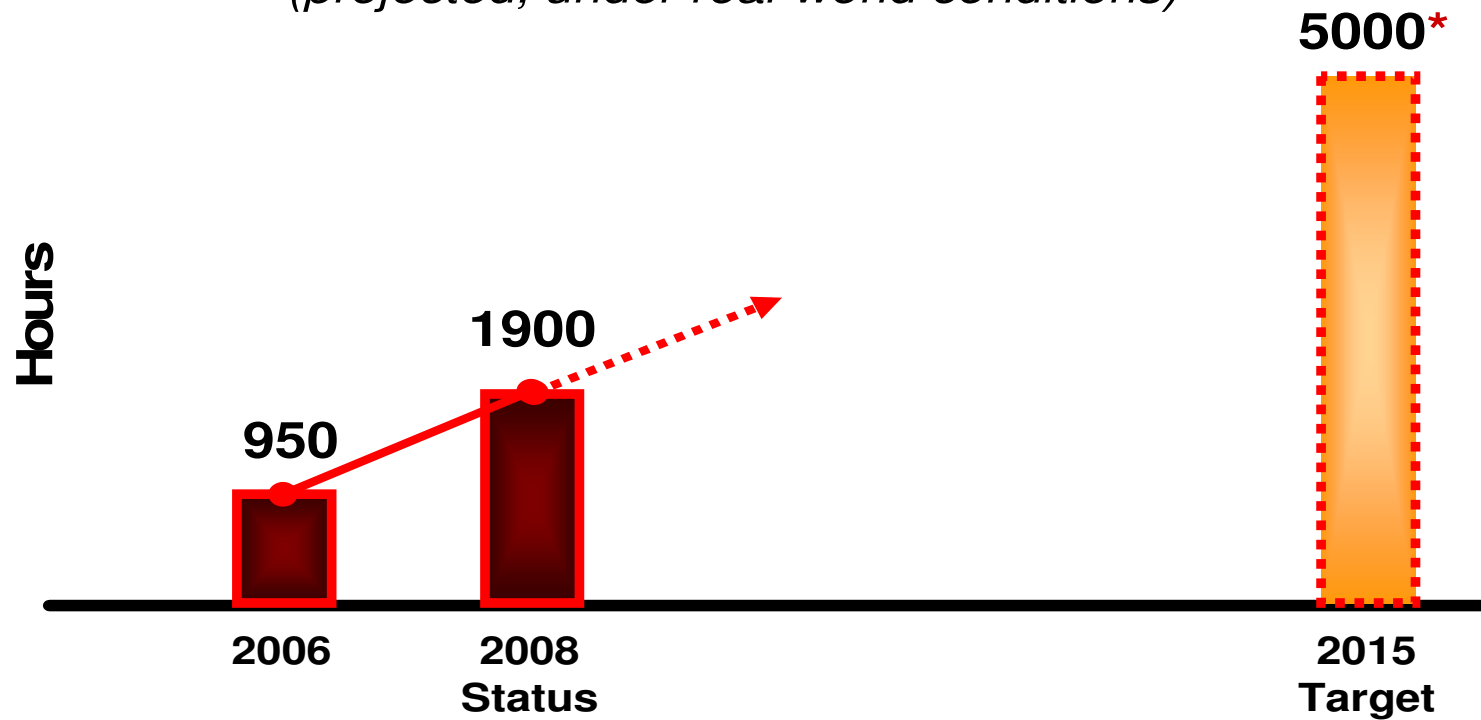
Markt
2015

Projected Transportation Fuel Cell System Cost -projected to high-volume (500,000 units per year)-



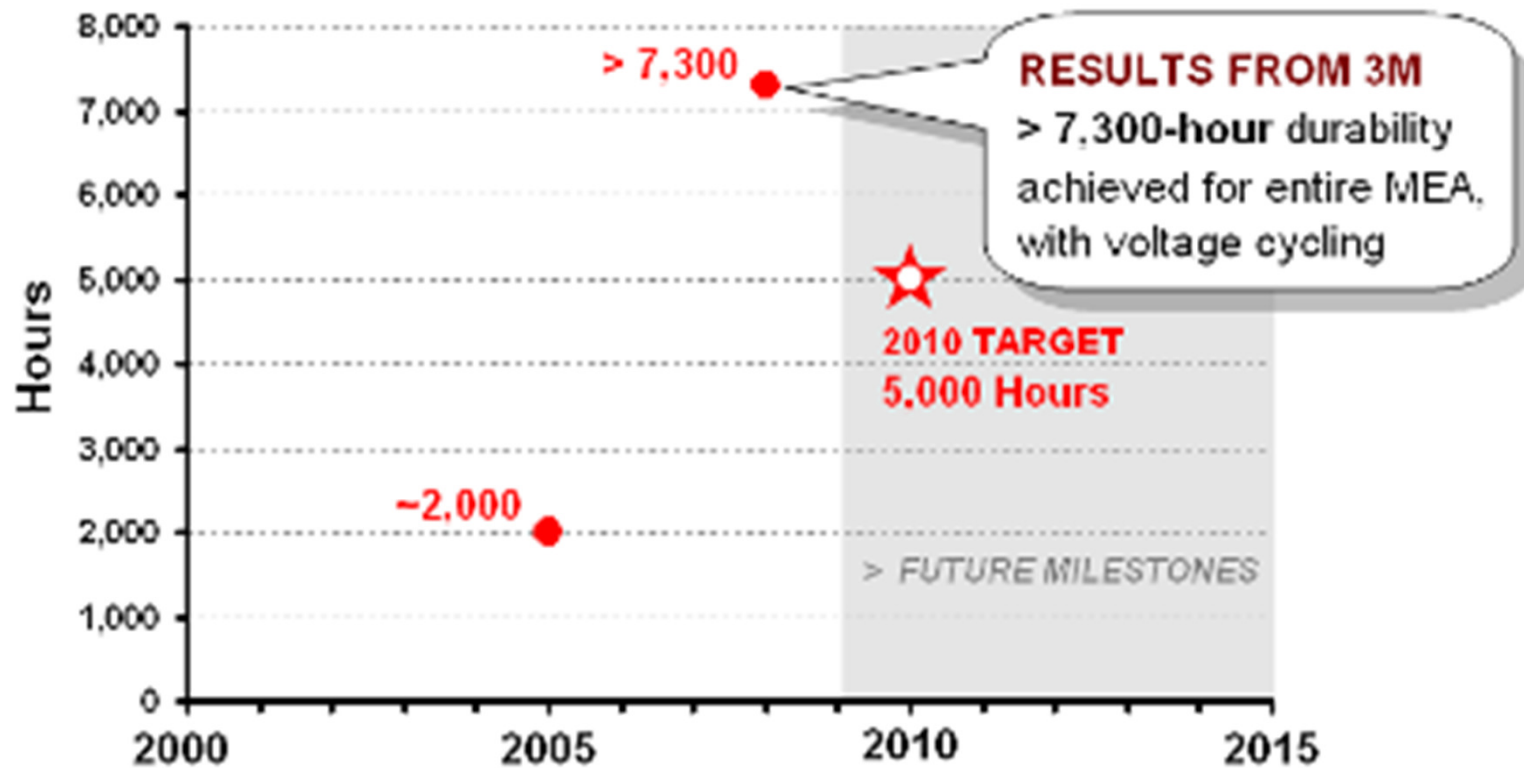
Automotive Fuel Cell System Durability

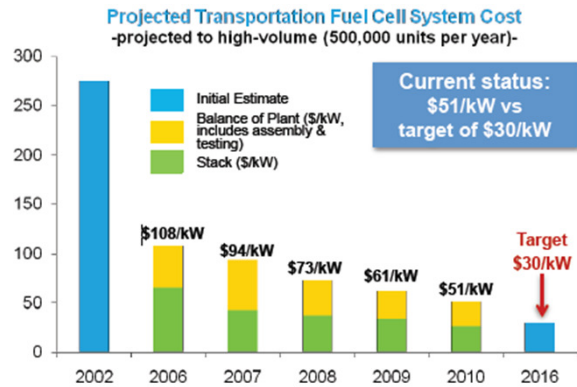
(projected, under real-world conditions)



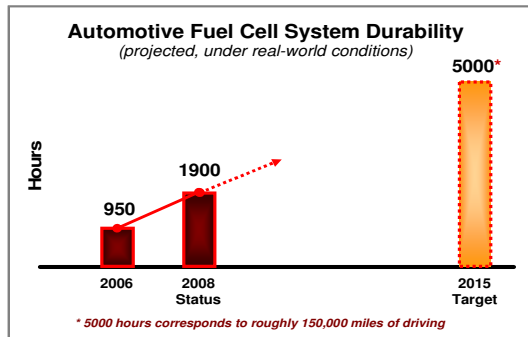
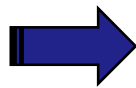
** 5000 hours corresponds to roughly 150,000 miles of driving*

Durability of Automotive Membrane Electrode Assembly (MEA) (in the lab)





cost



life time

**Letter of Understanding on electric vehicles
with fuel cell development and market
introduction starting 2015**
8 September 2009

- Daimler AG,
- Ford Motor Company,
- General Motors Corporation/Opel,
- Honda Motor Co., Ltd.,
- Hyundai Motor Company,
- Kia Motors Corporation,
- Renault SA and Nissan Motor Co., Ltd.
- Toyota Motor Corporation.

DAIMLER



HONDA



RENAULT NISSAN

TOYOTA

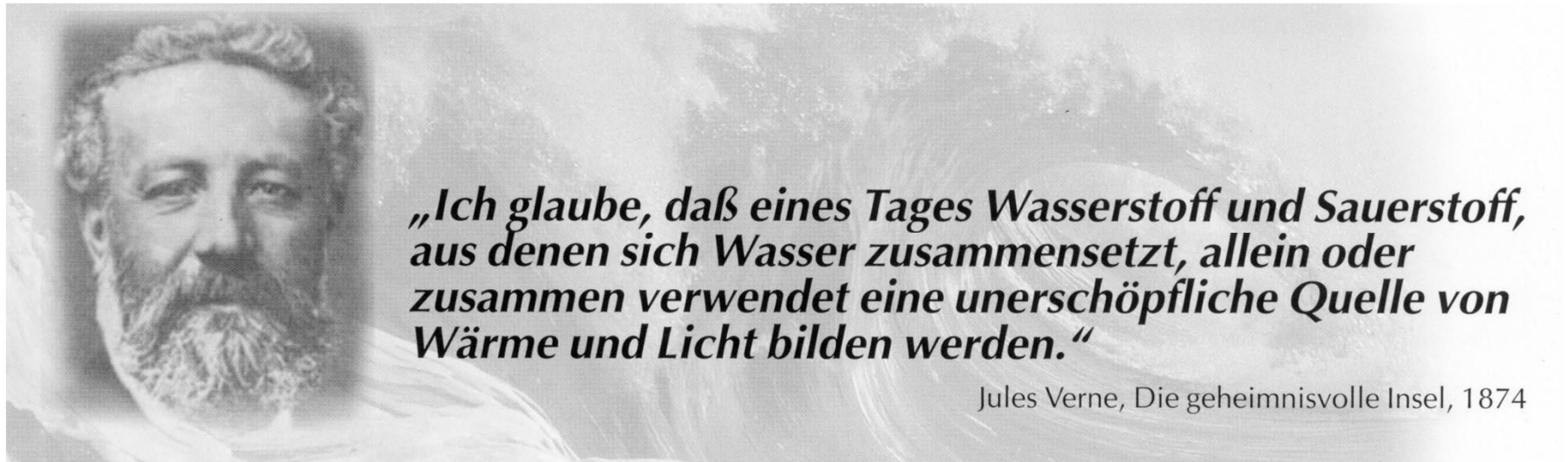


Energetische H2-Nutzung

In der Einführung

- **Verkehr**
 - starke Kostenreduktion des BZ-Systems
 - Kleinserien ab 2015
 - 2 Mrd. € für minimal Tankstellennetz;
wer finanziert?
- **Netzstabilisierung**
 - Elektrolysetechnologie muss ausgebaut werden
 - Know-how in H2-Speichertechnologie muss erworben werden

Statt eines Schlusswortes



Anzahl von Elektrolyseanlagen - Energiewirtschaft (2025)

Szenario	Leistungsanteil	Positive Regel- /Reserveleistung	Negative Regel- /Reserveleistung	H ₂ -Speicher- kraftwerk	Anzahl Elektrolyseure @ 890 Nm ³ /h
		[GW]	[GW]		
1	10 %	1,05 - 0,8	0,86 - 0,68	1 - 2	125 - 250
2	25 %	2,63 - 2,0	2,15 - 1,7	4 - 5	500 - 625
3	50 %	5,25 - 4,0	4,3 - 3,4	8 - 10	1000 - 1250

Quelle: Smolinka, T., Nicolai, St., Krüger, S. (2009) Stand und Entwicklungspotenzial der Speichertechniken für Elektroenergie – Ableitung von Anforderungen an und Auswirkungen auf die Investitionsgüterindustrie. Auftragsstudie des BMWi,