

Wasserstoffherzeugung mittels PEM-Elektrolyse:

Unterbrechungsfreie Versorgung mit
ultrareinem Wasserstoff aus Wasser
und Strom

© 2007

Franz E. Leichtfried

Biovest GmbH

Wasserstoffherzeugung und – verwendung heute

- Schon heute gibt es eine etablierte Wasserstoffindustrie
- Jährlich werden weltweit 500 Milliarden m³ Wasserstoff erzeugt
- und folgendermaßen verwendet:

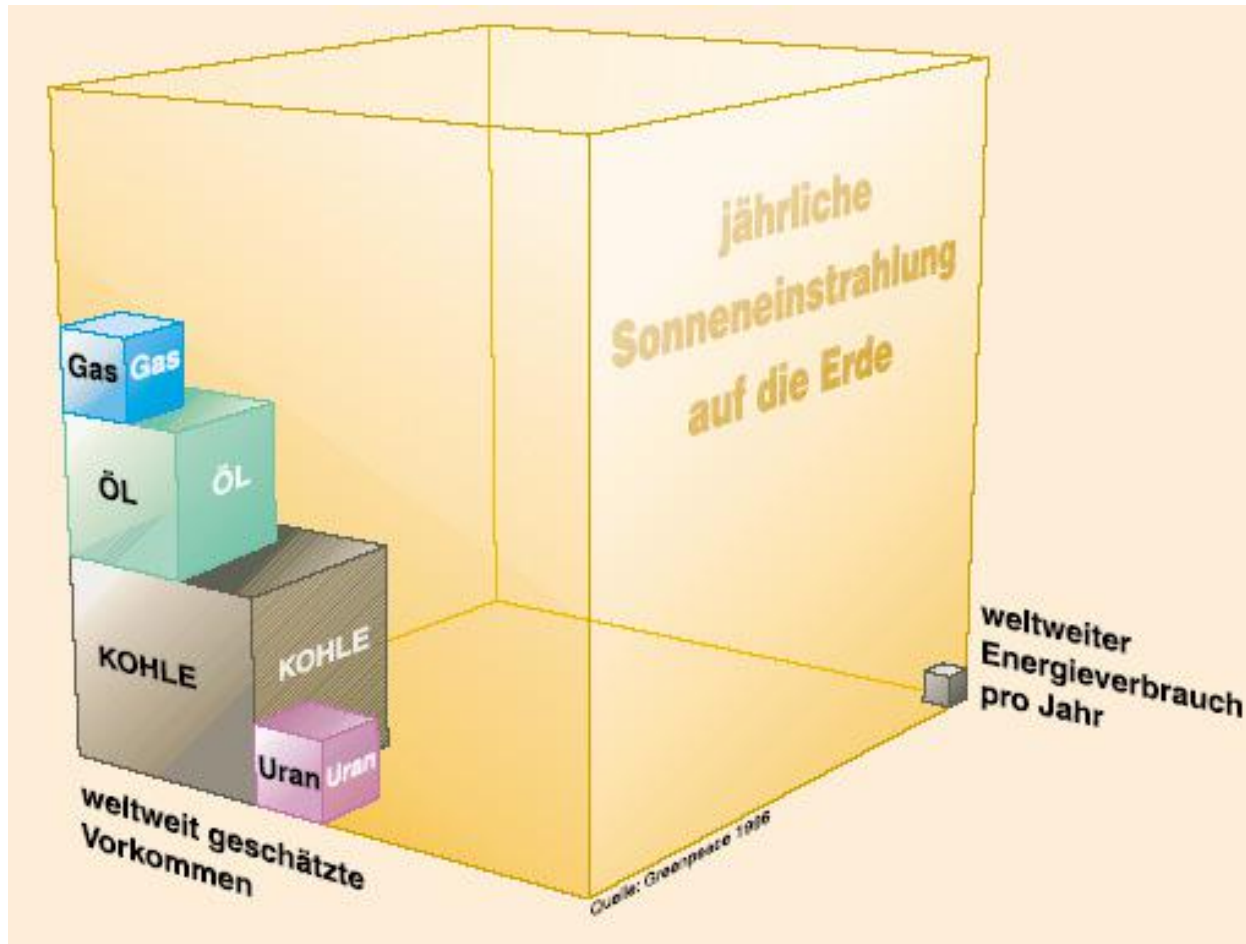
H₂ – Verwendung heute (Beispiel: USA 2002)

Marktsegment	% Gesamtmarkt
Erdöl Raffinieren	66,8
Petrochemische Industrie	26,2
Metallindustrie	2,7
Elektronische Industrie	1,5
Regierung (NASA)	1,2
Lebensmittelindustrie (Fetthärtung)	0,7
Optisches Glas	0,3
Generatorkühlung in Kraftwerken	0,2
Verschiedene Anwendungen	0,4

Künftige Einsatzmöglichkeiten

- Wasserstoff als Energiespeicher für Ökostrom
- Besonders geeignet für Speicherung elektrischer Energie aus Photovoltaik und Windkraft
(WG: 50% elektrisch, bis zu 40 % therm.)
- Rückumwandlung in elektrische und thermische Energie mittels Brennstoffzelle
(WG: 50% elektrisch, bis zu 40 % therm.)
- Direktverwendung als Treibstoff derzeit ökonomisch am aussichtsreichsten:
- H₂ aus Windstrom: 2 Euro pro Liter Benzinäquivalent
(inkl. Abschreibungen + Betriebskosten)

Öko-Wasserstoff ist unerschöpflich



Wie wird H₂ am günstigsten erzeugt ?

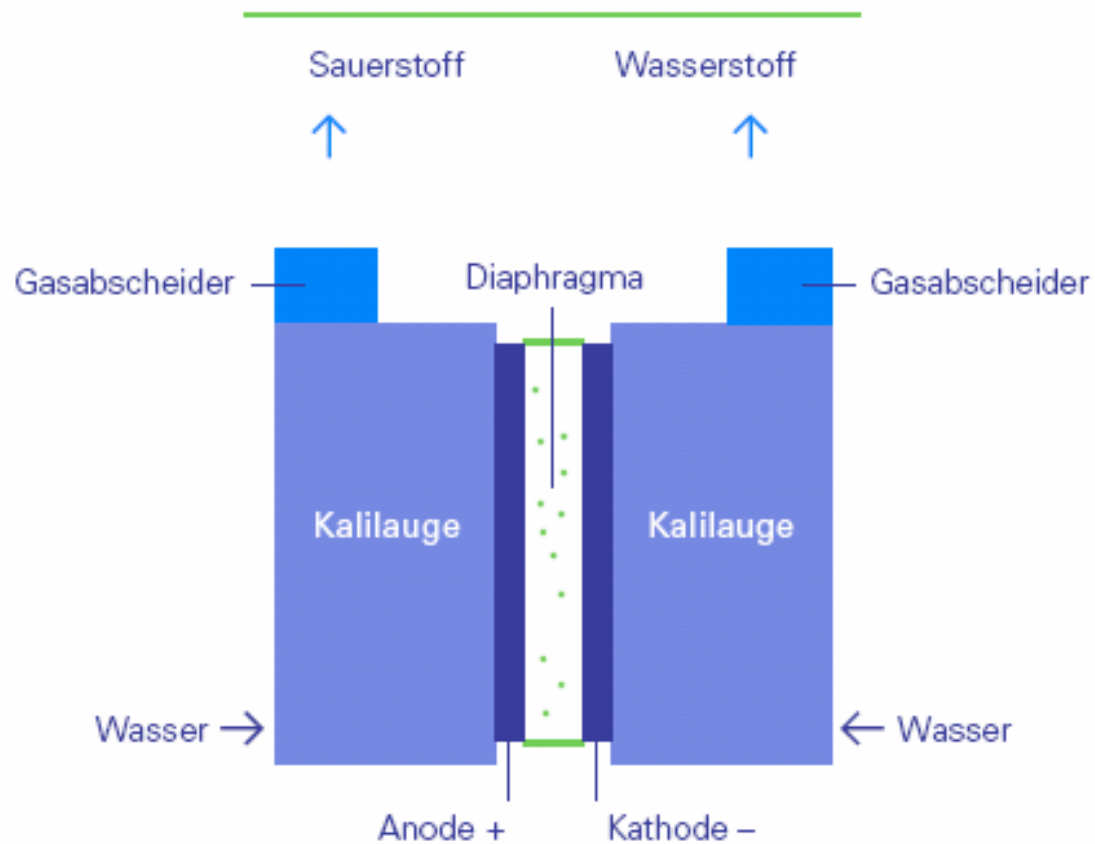
Erzeugung (dezentral oder zentral):

- Aus billigem Nachtstrom (Wasserkraft) mittels **Elektrolyse:**
- 1,5 Euro pro Liter Benzinäquivalent
- Außerhalb der Spitzenlastzeiten bleibt signifikante Wasserkraftkapazität ungenutzt
- Außerhalb der Spitzenlastzeiten Wasserkraft nur um 3 Eurocent oder weniger am SpotMarkt verkaufbar

Typen von Elektrolyseuren

- Alkalische (KOH) Elektrolyseure
- „Polymer-Elektrolyt-Membran“ (PEM) oder „proton exchange membrane“ (PEM) Elektrolyseure

Funktionsschema alkalischer Elektrolyseur



Vor- und Nachteile KOH Elektrolyseure

Vorteile:

- Seit langem praktizierte Technik

Nachteile:

- Elektrolyt: KOH (Kalilauge)
- 35 % bei 70°C: extrem ätzender Gefahrenstoff
- KOH muss ständig umgewälzt werden
- H₂ muss aufwändig nachgereinigt werden
- Wartungsintensiv
- Oft Einzelanfertigung (Anlagenbau)

Vor- und Nachteile PEM Elektrolyseure

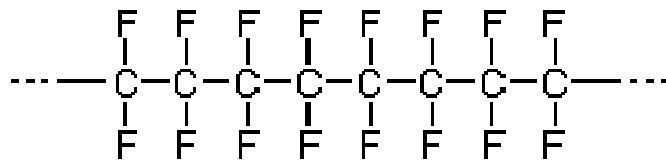
Vorteile:

- Keine Gefahrenstoffe
- Elektrolyt ist Feststoffmembran, keine Flüssigkeit involviert
- Weitgehend wartungsfrei
- Kompaktere Bauweise
- Erzeugt hochreinen H₂:
- 99,999 % reiner H₂ ohne aufwendige Nach-Reinigung (Reinheitsstandard für Halbleitererzeugung)
- < 5 ppm Wasser (Taupunkt: < - 65°C)
- N₂ < 2 ppm, O₂ < 1 ppm, andere nicht meßbar

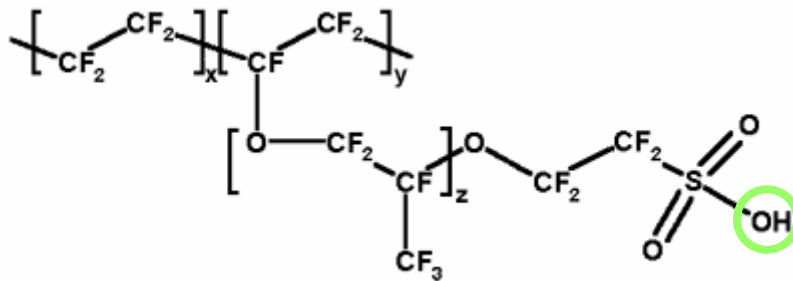
Nachteile:

- Anlagen über 100 kW pro Zellblock selten gebaut

Wie funktioniert der Feststoffelektrolyt?

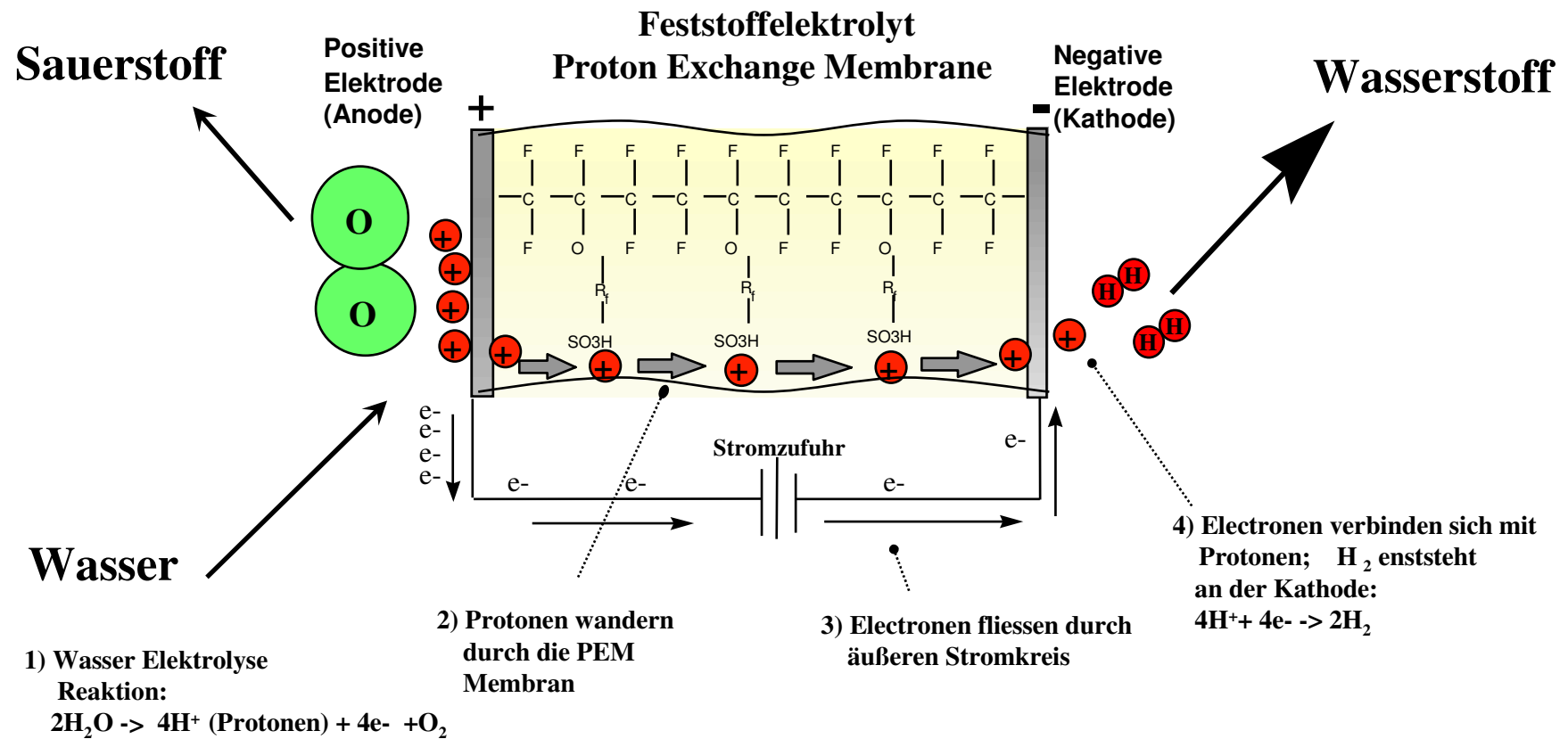


Polytetrafluorethen (Teflon)

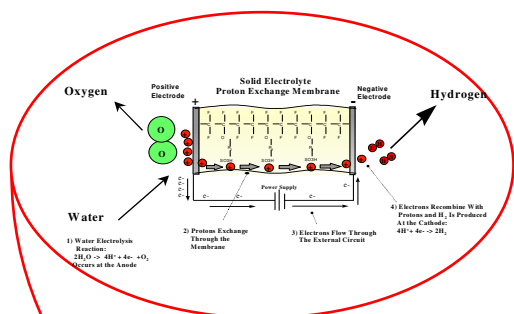


- „Proton Exchange membrane“ aus Nafion® von Dupont
- Tetrafluoräthylen ([Teflon](#)) mit sulfonierten Seitengruppen
- Ausgezeichnete thermische und mechanische Stabilität
- H⁺-Ionen (Protonen) springen von einer Sulfonylgruppe zur anderen
- Membranporen erlauben Bewegung von H⁺-Ionen, aber nicht Anionen oder Elektronen
- <http://en.wikipedia.org/wiki/Nafion>

Polymerelektrolytmembran - Elektrolyse (PEM; proton exchange membrane)



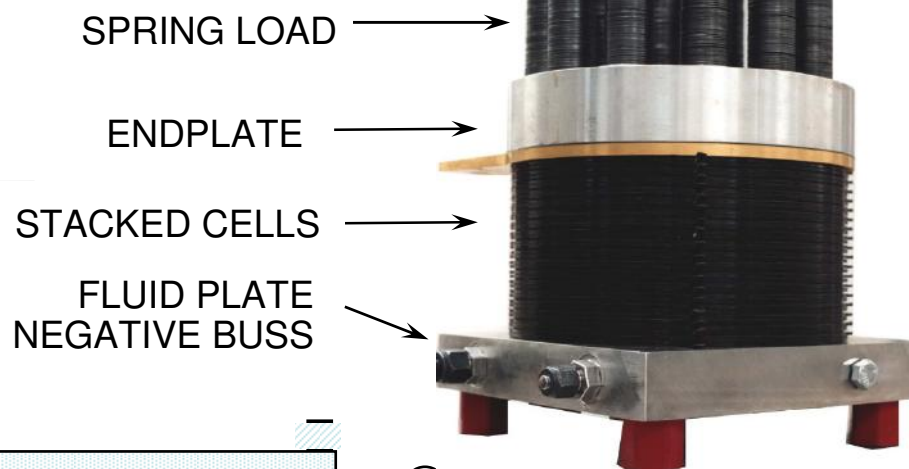
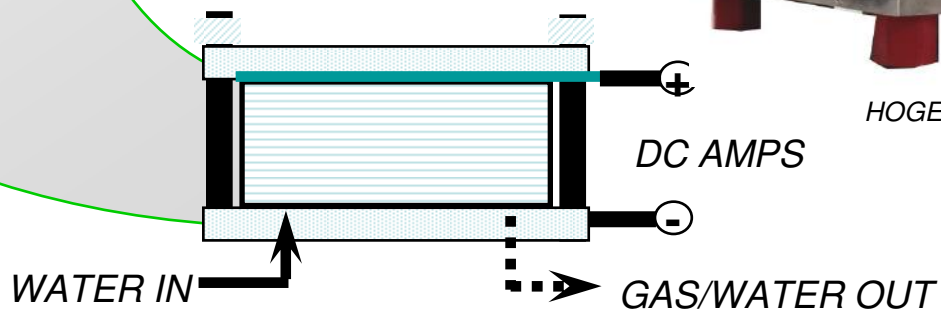
PEM Membranen ("Zellen" oder "MEA's") bilden einen Zellstapel ("cell stack")



"MEMBRANE EXCHANGE ASSEMBLY"

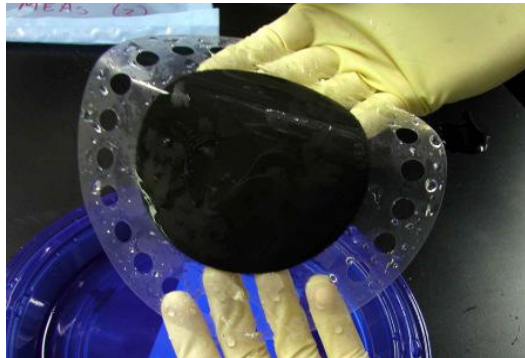


CELL STACK:
 CELLS STACKED
 ONE ON THE OTHER
 FLUIDS PARALLEL
 ELECTRICAL SERIES



HOGEN 40 CELL STACK

Aufbau eines Elektrolyseurs



**Membrane Exchange
Assembly (MEA)**



Zellstapel

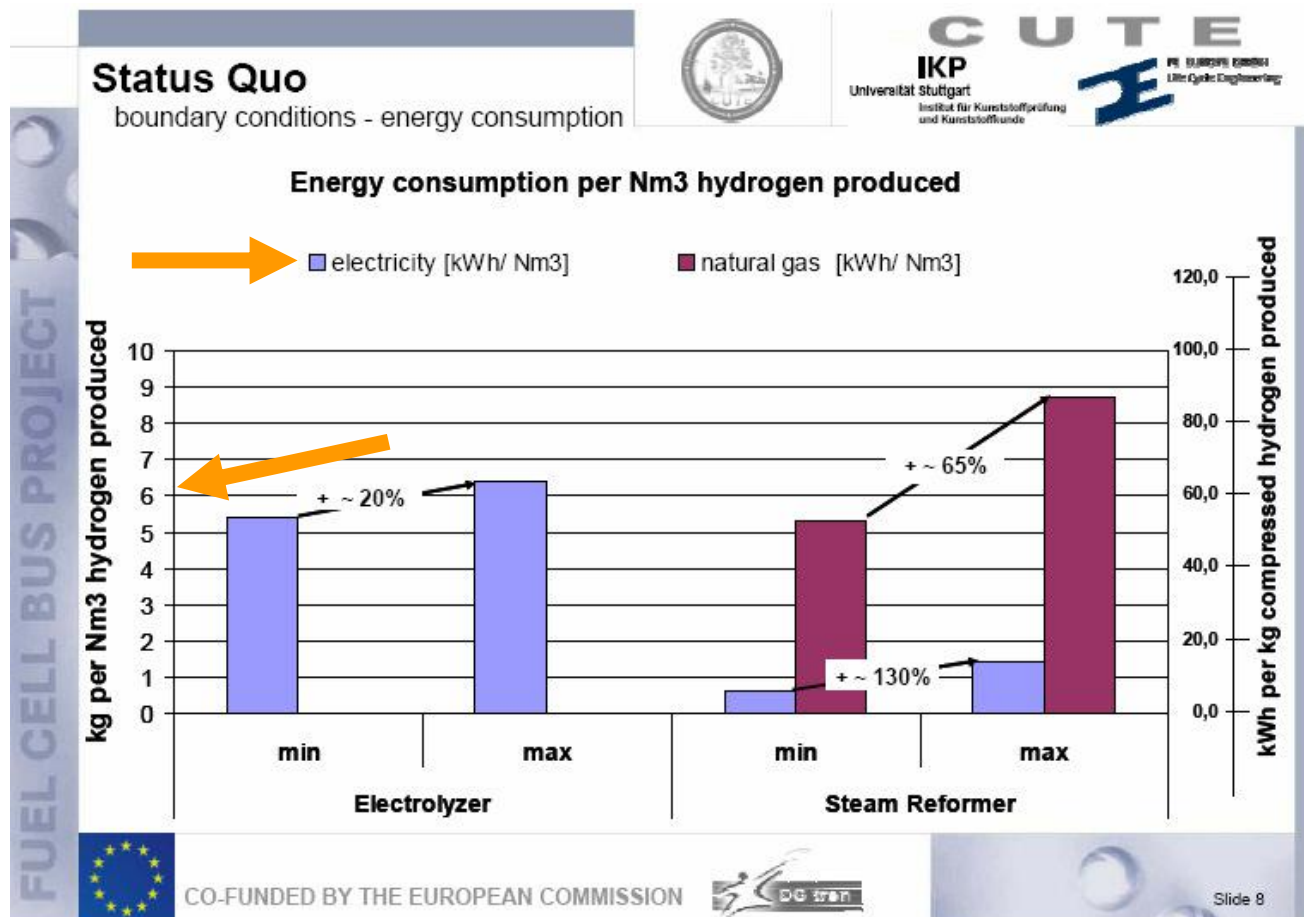


H₂ Generator

Voll-Last-Betriebsdaten und Wirkungsgrad

- Hogen S40 Elektrolyseur bei Fronius vermessen; Betriebsdaten bestätigt:
- Spannung: 2,2 V pro Zelle; 54 V bei 25 Zellen
- Stromstärke: 113 Amp bei Voll – Last
- Leistung: 6,1 kW
- Strom-Verbrauch: 5.9 kWh/Nm³ H₂
- Bei Teillast weniger
- Wirkungsgrad inkl. „parasitic load“: 52 %
(1 Nm³ H₂ enthält 3 kWh Energie (Heizwert))

Wirkungsgrad CUTE inkl. Kompressor



Future scenario

boundary conditions infrastructure



	Electrolyzer	Steam Reformer
Time of operation	20 years	20 years
Usage (total filling station)		
electricity [kWh/ Nm ³]	CUTE Ø: 5,8 [kWh/ Nm ³] Future scenario: 5,5 [kWh/ Nm³]	CUTE Ø: 1,0 [kWh/ Nm ³] Future scenario: 0,6 [kWh/ Nm³]
natural gas [kWh/ Nm ³]	----	CUTE Ø: 7,0 [kWh/ Nm ³] CUTE (full load): 4,7 [kWh/ Nm ³] Future scenario: 4,2 [kWh/ Nm³]
nitrogen [Nm ³ / Nm ³]	0,015 [Nm ³ / Nm ³]	0,12 [Nm ³ / Nm ³]
average utilization [capacity]	95%	95%
down days per year	10 days	10 days
Maintenance		replacement
Reformer modul	----	once during lifetime
Electrolyser modul	once during lifetime	----
Mol Sieve	once during lifetime	once during lifetime
Catalyst of reformer module	----	every 5 years
Activated carbon	----	depends on sulphur content
Deoxo catalyst	every 3 years	----
Compressor	service intervals between 4 month (min) to 2 years (max), dependend on compressor type and input pressure	



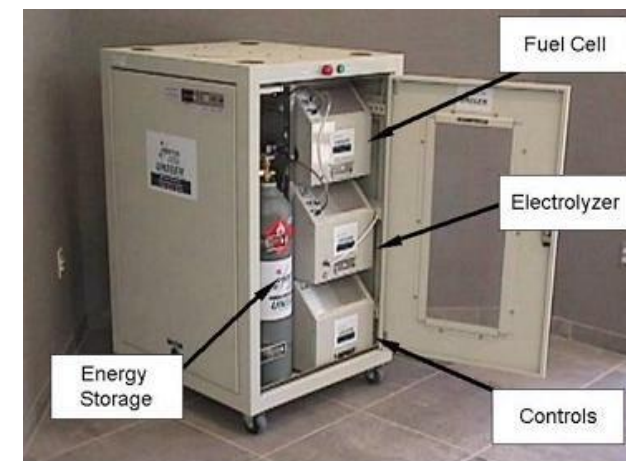
Gesamtwirkungsgrad – kompletter Kreislauf Strom- \rightarrow H₂- \rightarrow Strom

- Speicherung elektrischer Energie aus Photovoltaik und Windkraft als Wasserstoff
(WG: 50% elektrisch, bis zu 40 % therm.)
- Rückumwandlung von H₂ in elektrische und thermische Energie mittels Brennstoffzelle
(WG: 50% elektrisch, bis zu 40 % therm.)
- Gesamtwirkungsgrad elektr.: 25 %
- Gesamtwirkungsgrad: 80 %

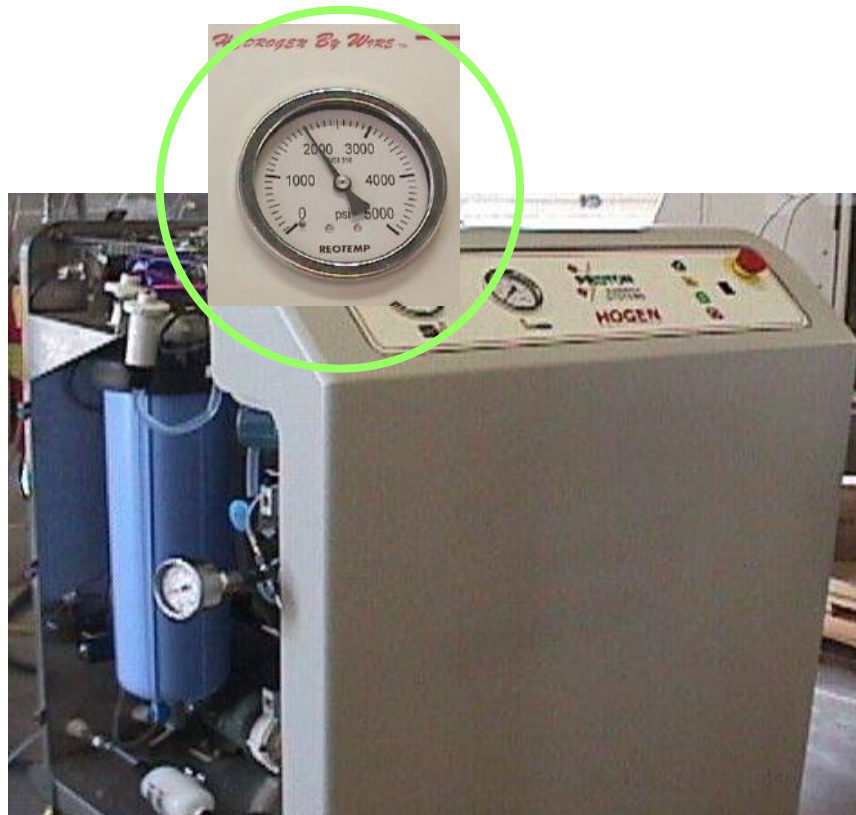
Proton's UNIGEN[®] : kompletter Kreislauf Strom -> H₂ -> Strom für USV Anwendungen



- mehrere Prototypen
- 1-10 kW, bis zu 70 kWh
- Demos mit Telecom Firmen in U.S.A. und Japan
- Modulares Design



Hochdruck PEM Elektrolyse



- **Standard Druck: 14 bar**
- **Prototyp (Proton Energy): 13.8 MPa = 138 bar**
- **Leicht erhöhte Zellspannung (Nernst Gleichung)**
- **Theoretisch die effizienteste Verdichtungsmethode – entspricht isothermischer Kompression**
- **Direktes Hochdruckspeichern**
- **Probleme:**
 - **Drucksichere Zellkonstruktion**
 - **H₂ Membrandiffusion**

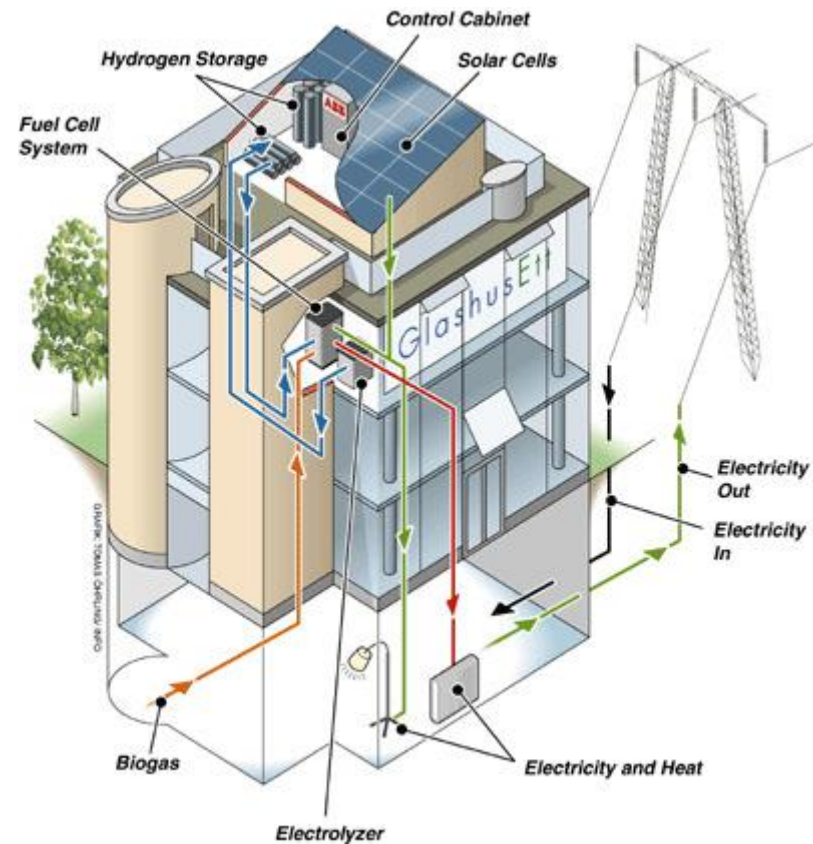
Vorteile der H₂-Erzeugung vor Ort mittels PEM-Elektrolyseur

- Keine heißen und hochkonzentrierten Alkalikreisläufe
- Vernachlässigbare Sauerstoffdiffusion durch PEM-Membran (Sauerstoffseite drucklos)
- Deswegen muss keine Sockelspannung zur Vermeidung der Querdiffusion angelegt werden (alkalische Elektrolyseure können wegen Querdiffusion durch Asbestmembran erst ab ca. 35 % der Voll-Last betrieben werden)
- PEM Elektrolyseure laufen von 0 – 100 % Last stufenlos und erzeugen automatisch und nachfragegeführt hochreinen Wasserstoff bei 13 - 15 bar; reagieren in Sekundenbruchteilen auf Lastanforderung
- Daher die einzig sinnvolle Variante für PV- oder Windkraft - Inselfsysteme

Demonstrationsprojekte

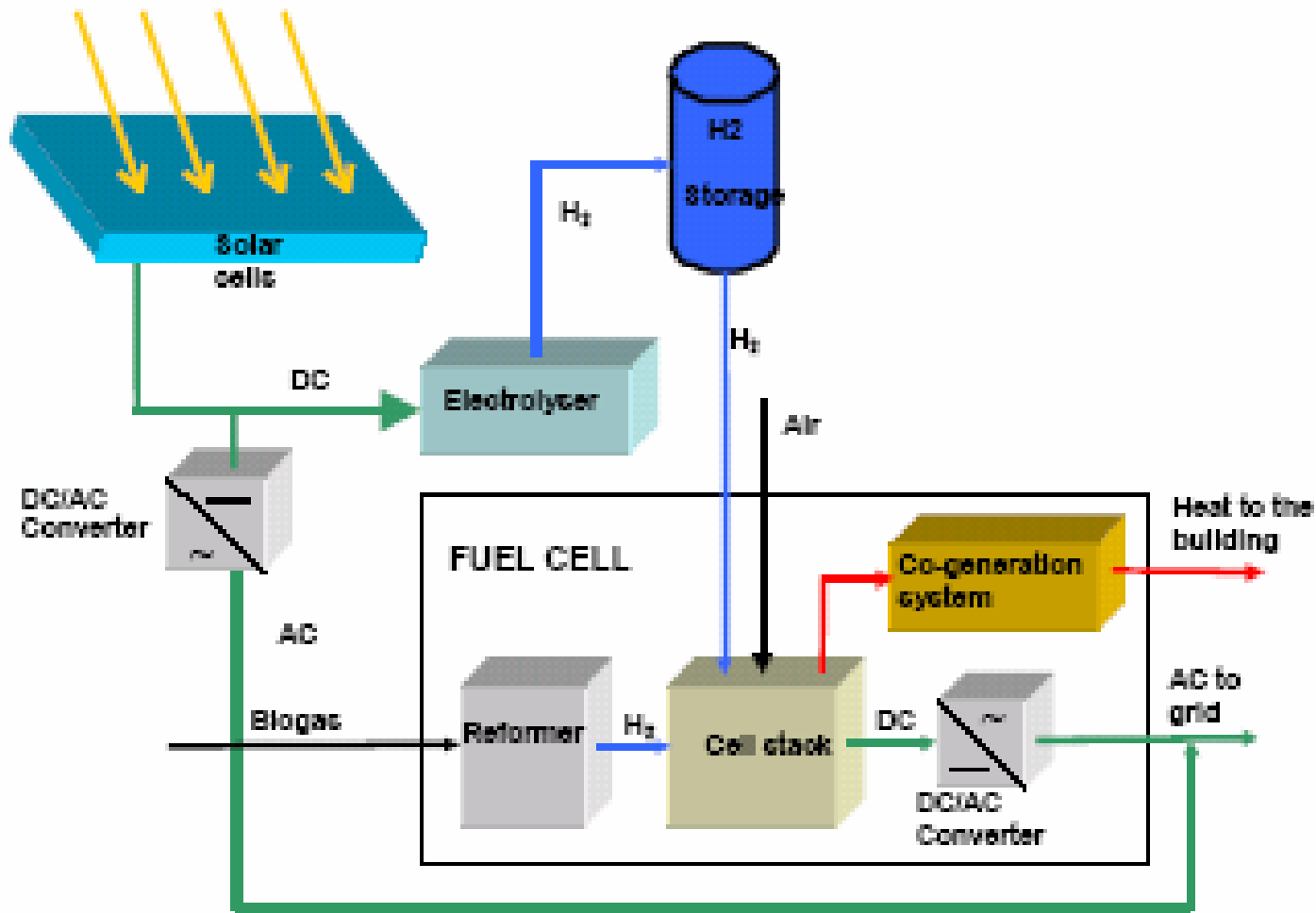
- Wasserstoff als Speichermedium für erneuerbare Energie
- Wasserstoff als Treibstoff

PEM-Elektrolyseur (Proton Energy) im GlasHusEtt (The Clever Building)

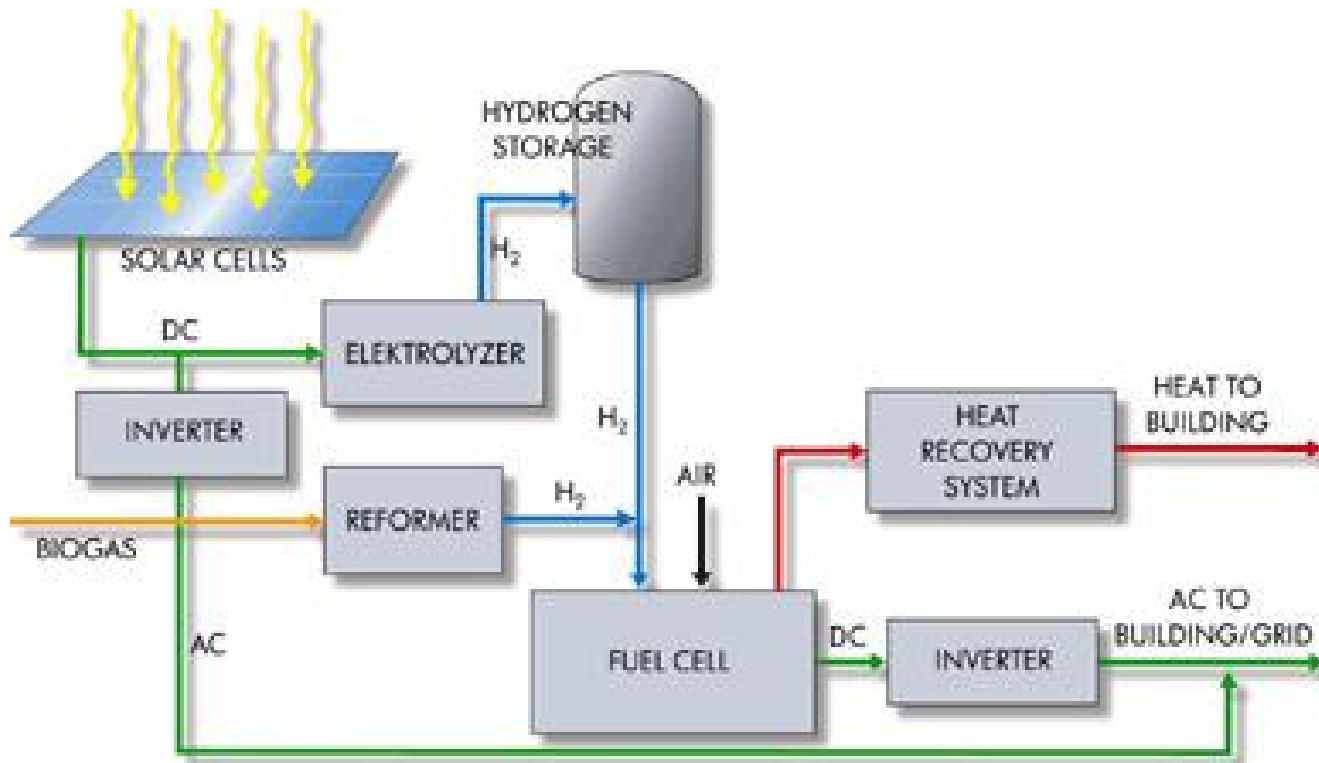


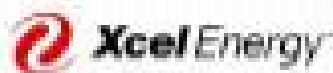
H-Power
5 kW PEM-system

GlashusETT
ABB and Fortum

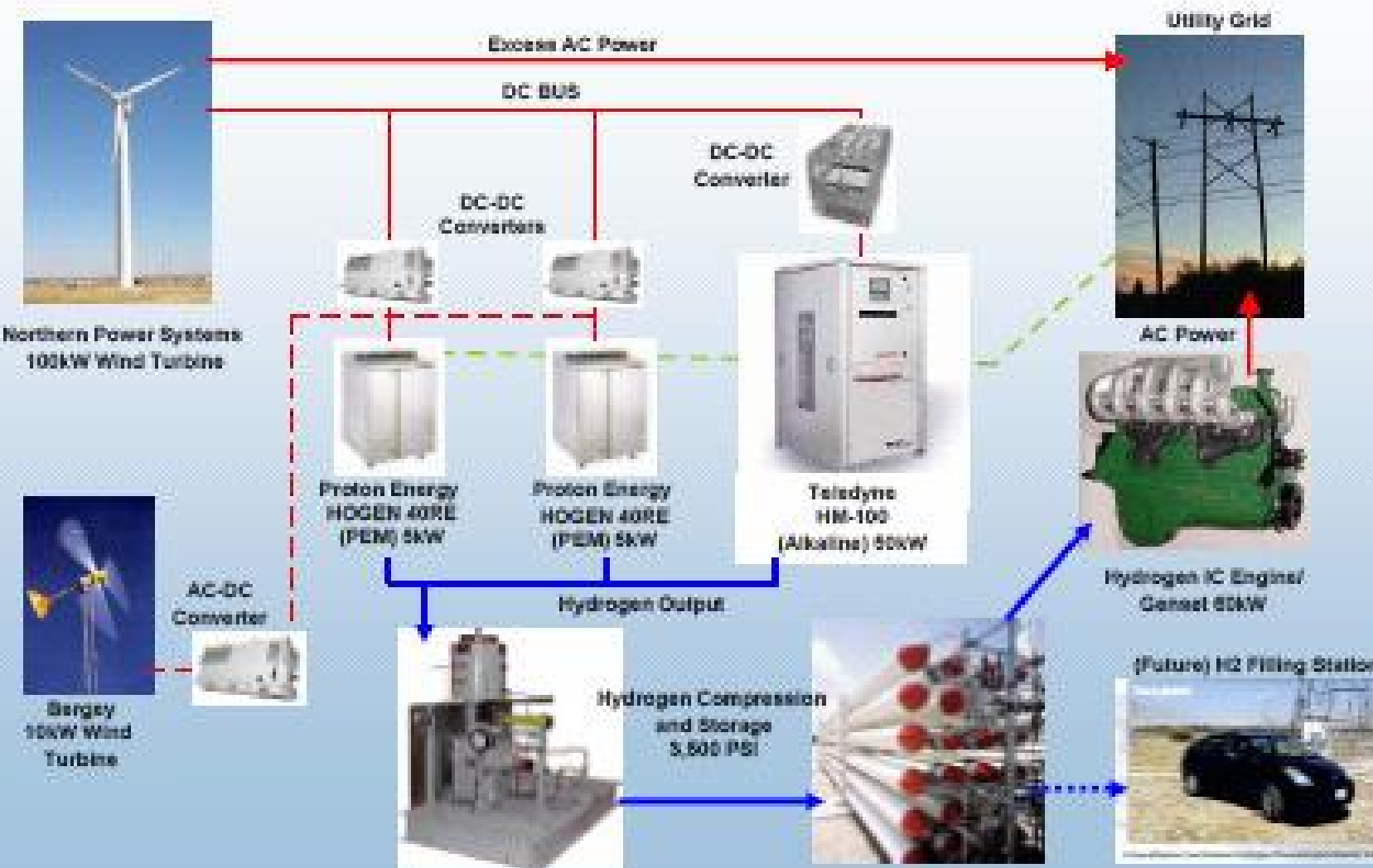


GlasHusEtt - Funktionsweise





Xcel-NREL Wind2H2 Project



Solar angetriebene PEM-Elektrolyseure

Beispiele Proton Energy:

- APS Solar-Tankstelle Arizona:
http://avt.inl.gov/pdf/hydrogen/nha_presentation_2005.pdf
<http://avt.inl.gov/pdf/hydrogen/h2factsheet.pdf>
<http://avt.inl.gov/hydrogen.shtml>
<http://avt.inl.gov/pdf/hydrogen/h2stationreport.pdf>
- Proyecto Aeropila von BESEL, Spanien
- Solartankstelle bei VW in Isenbüttel:
http://www.volkswagen-media-services.com/medias_publish/ms/content/de/pressemitteilungen/2005/06/29/sonnenlicht_und_wasserstoff_standard.gid-oeffentlichkeit.html



Werkstankstelle bei Volkswagen im Technologiezentrum Isenbüttel

- Elektrolyseur Hogen S40
von Proton Energy Systems
- gespeist aus 50 m² Solarpaneelen
- Die Anlage erzeugt pro Tag etwa 25 Kubikmeter Wasserstoff, was ausreicht, um mit einem Brennstoffzellenfahrzeug etwa 200 Kilometer weit zu fahren

Demoprojekt Hydrogen Village Burgenland

- Null- oder Plusenergiehaus-Kleinsiedlung
- 4 -5 Passiv-Häuser,
Wohnblock mit zentralem H₂-BHKW oder
mehreren kleineren H₂-BHKWs
- PV am Dach installiert; Windturbine in der Nähe
- Elektrolyse direkt am Windrad mit H₂-Transport

Demoprojekt Ökowasserstoffproduktion Burgenland (mehrere Varianten)

© Biovest 2006

Proton Energy PEM - Elektrolyseanlage
(0,18 kg H₂/h, 15 bar Ausgangsdruck)
unmittelbar neben PV oder Windturbine



Linde Verdichter - station 430 bar



Zapfsäule



Verdichter

TANKSTELLE

Gasleitung
(bis einige km)



Befüllung kleiner Metallhydridflaschen ohne Verdichter (15 bar von Elektrolyse)

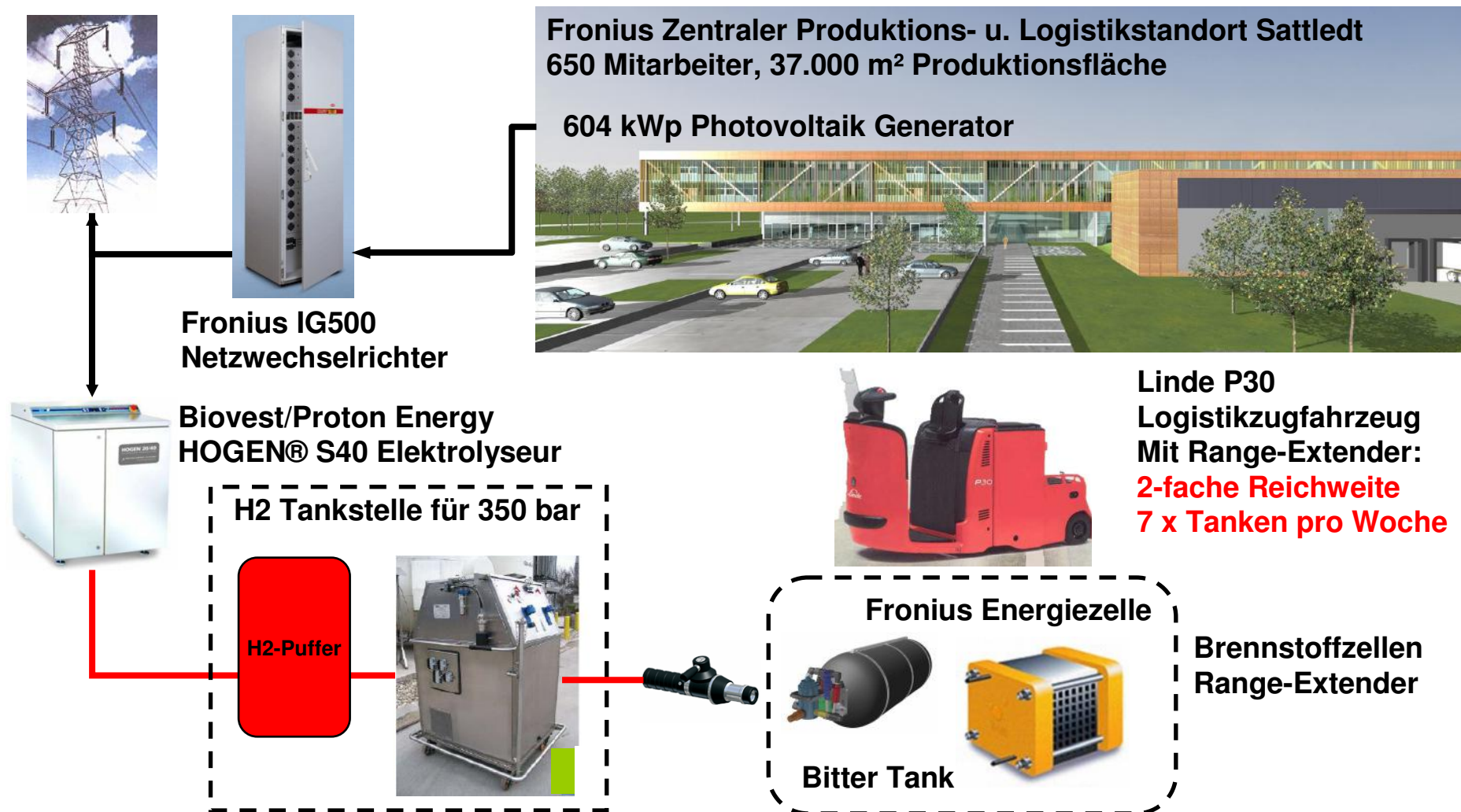


Befüllung von Druckflaschenbündeln und kleinen Druckkanistern direkt bei Windturbine oder Photovoltaik

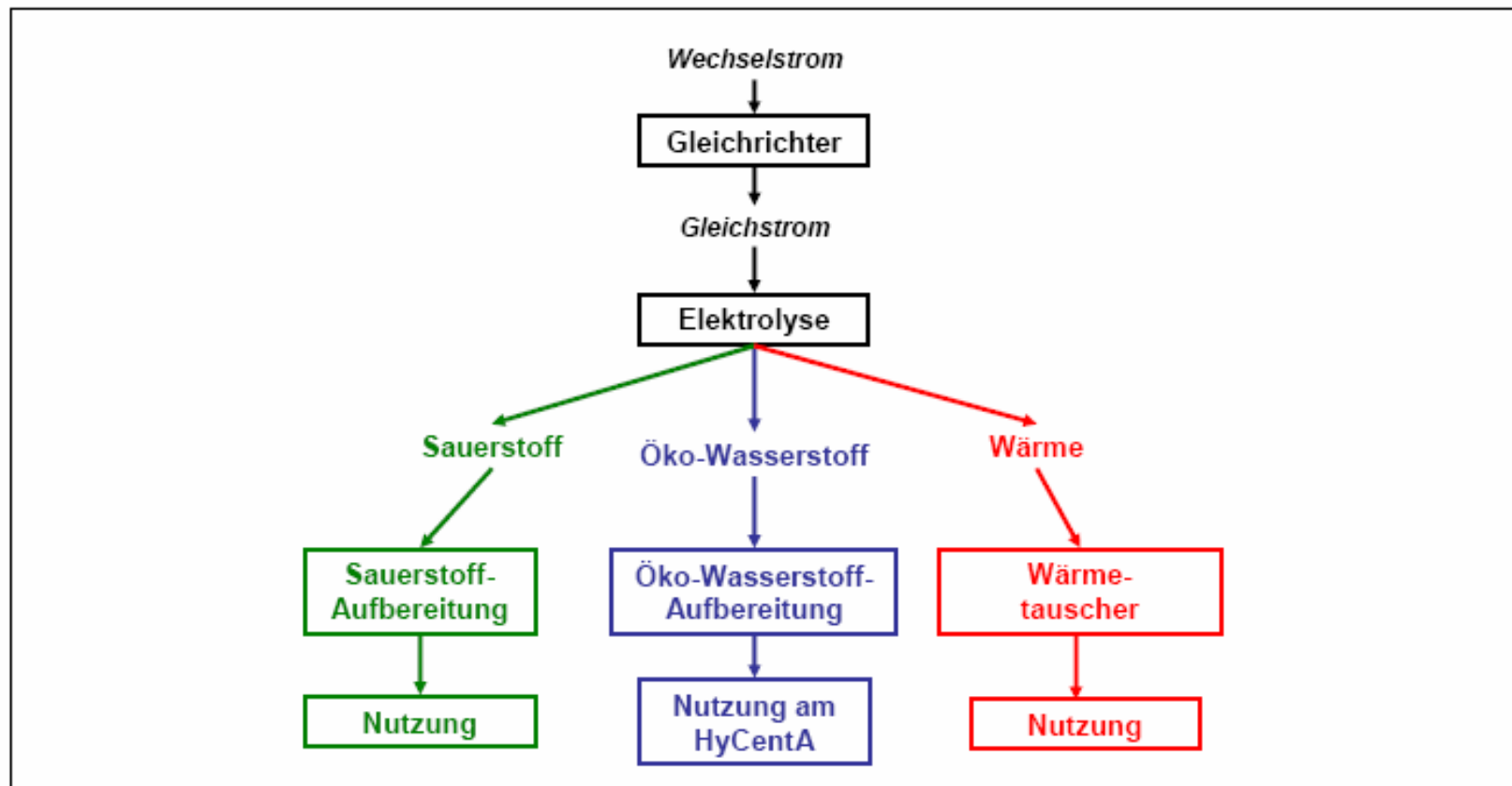


Niederdruckspeicher zwischen Elektrolyse und Verdichter nicht eingezeichnet

HyLog Projekt Fronius



Öko-Wasserstoff-Tankstelle der Zukunft





HOGEN H Serie: 2 – 6 Nm³/h

HOGEN H Serie: Anschluss für Wärmetauscher



Figure 31 Coolant Water Interfaces

- Wärmeabgabe (pro Modell):
8,1 kW; 16,1 kW; 23,7 kW
- Durchfluss: 900 to 5225 l/hr
- 35° C



Abbildung 2: HyCentA – Hydrogen Center Austria (www.hycenta.at)

Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit !

franz.leichtfried@biovest.at

Zusatzdias für Diskussion

Ertrag moderner Windturbinen

- 1,5 MW Turbine produziert 3,5 GWh
(3,500.000 kWh in 2.300 Voll-Last-Stunden)
- 5 MW Turbine produziert 17 – 18 GWh
(17,000.000 kWh in
3.400 – 3.600 Voll-Last-Stunden off-shore)

H₂-Produktion und Stromverbrauch

- Elektrolyseur Kapazität:
120 Nm³/Stunde = ca. 10,8 kg/h
- H₂-Erzeugung pro Jahr:
2.333 Stunden x 120 Nm³/h =
280.000 Nm³ (= ca. 25.180 kg) H₂
- 25.180 kg H₂/Jahr:
genug für Jahresbedarf von 190 PKW

H₂-Produktion und Stromverbrauch

- Stromverbrauch: 6 kWh Strom pro Nm³
- Stromverbrauch pro Jahr:
2.333 Wind-Stunden x 120 Nm³/h x 6 kWh/Nm³ =
ca. **1,680.000 kWh**
- = 48 % Ertrag einer 1,5 MW Turbine;
= ca. 10 % einer 5 MW off-shore Turbine
- 25.180 kg H₂/Jahr:
genug für Jahresbedarf von 190 PKW
(auf H₂-Betrieb umgerüsteter Toyota Prius;
12.000 km pro Jahr; 1,1 kg pro 100 km)

Optimale Größe des Elektrolyseurs

- 120 Nm³/Stunde:
2 Elektrolyseure für 1,5 MW Windturbine decken
Jahresbedarf von 380 PKWs
- 100 Nm³/Stunde:
ca. 3 Elektrolyseure für 2 MW Windturbine decken
Jahresbedarf von 475 PKWs
- 240 Nm³/Stunde:
ca. 5 Elektrolyseure für 5 MW off-shore Windturbine decken
Jahresbedarf von 1.900 PKWs
- 2.160 off-shore Windturbinen und 10.800 Elektrolyseure
decken Jahresbedarf aller österreichischen PKWs (4,1 Mio.)
- Stromverbrauch: 36,3 TWh = das 19-Fache des Ertrages der
derzeit in Österreich installierten Windkraft

Installierte Windkraft Österreich 2006

- Gesamtkapazität: 964,5 MW (607 Anlagen)
- Regelarbeitsvermögen
(realistische durchschnittliche Jahresproduktion):
1,93 Mrd. kWh (1,93 TWh)
- Ausreichend für 550.000 Haushalte
(17,5 % aller österreichischen Haushalte)

Installierte Windkraft Österreich 2006

Bundesland	Leistung	Anlagen
Niederösterreich	511,7 MW	333
Burgenland	369,2 MW	206
Steiermark	48,3 MW	32
Oberösterreich	28,4 MW	23
Wien	8,4 MW	12
Kärnten	0,5 MW	1
Österreich	964,5 MW	607

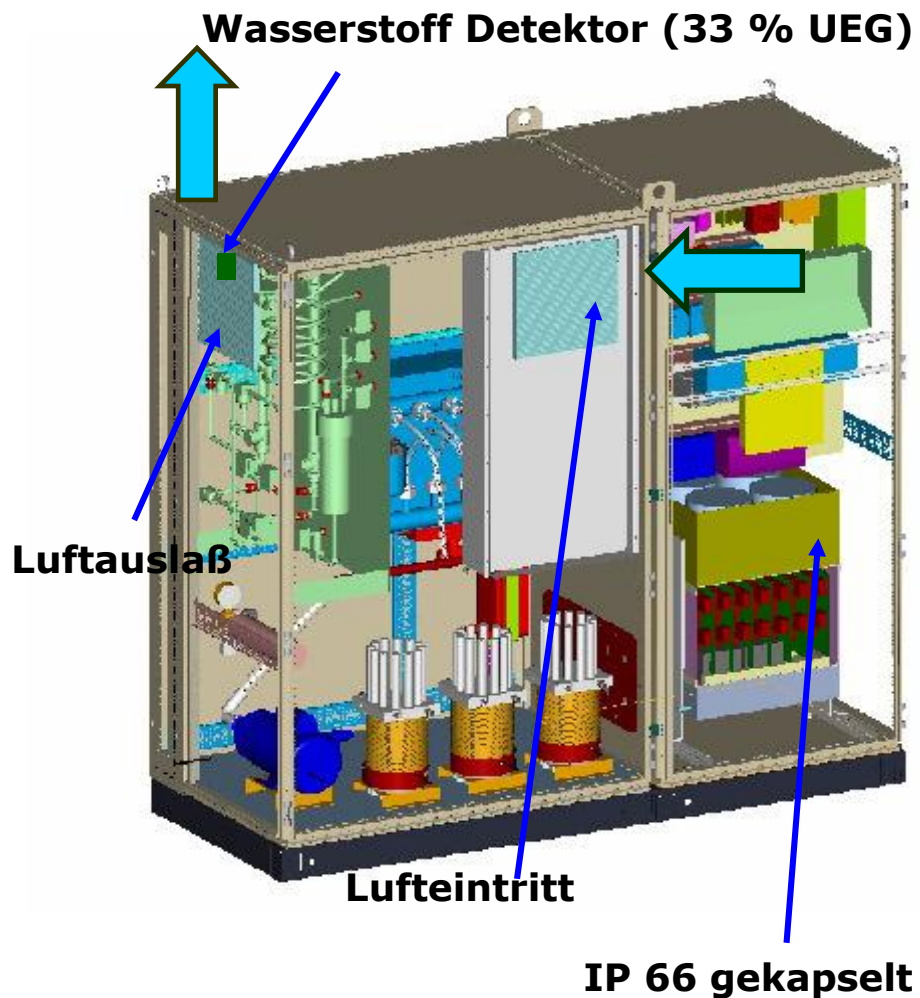
Sicherheit: reichhaltige Erfahrungen mit Wasserstoff im Stadtgas

- Stadtgas aus der Verkokung von Kohle
- ca. 50 % H₂ – Gehalt!
- für Gasherde, Gasheizung und Gaslicht verwendet
- In Österreich/Deutschland von ca. 1830 bis in 1970er Jahre
- In Osteuropa noch heute!
- Sicherheitsbestimmungen Stadtgas waren weniger stringent !

Sicherheit

- Alle Systeme TÜV-geprüft
- Eingebaute automatische Überwachung aller kritischen Sicherheitsparameter
 - Früherkennung von brennbarem Gas
 - Früherkennung von Lecks
 - Überdruckererkennung
 - Übertemperaturerkennung
 - Sicherheitsentlüftung
- Minimale H₂ – Menge im System: Nur 13 l H₂ bei Vollast
- Kein H₂ beim Runterfahren und im Ruhezustand;
Gas strömt durch im stromlosen Zustand offene Ventile über Entlüftungsrohr aus

Sicherheitsentlüftung



- Patentiertes Design
- Differenzdruck (Luftein- und auslaß) wird gemessen
- Differenzdruck Voraussetzung für Systemstart
- Luftstrom führt auch Spuren eventuell entweichenden Wasserstoffs am Detektor vorbei
- 25 % UEG Warnung
- 33 % UEG Abschaltung
- Entscheidend für ATEX
- H-Serie: Permanenter Luftstrom über Prozess-Seite (Schutzklasse IP 43)
- H-Serie: Elektroteil gekapselt (Schutzklasse IP 66)