

Elektrolyse

André Weber

Institut für Angewandte Materialien – Elektrochemische Technologien (IAM-ET)

Adenauerring 20b, Geb. 50.40 (FZU), Raum 314

phone: 0721/608-7572, fax: 0721/608-7492

andre.weber@kit.edu

www.iam.kit.edu/et



- Grundlagen Elektrolyse
- Hoch- und Niedertemperaturelektrolyse
- Alkalische Elektrolyse
- PEM-Elektrolyse
- Hochtemperaturelektrolyse

1789: Entdeckung des Elektrolysephänomens von den Holländern Peats van Troostwijk und Johan Rudolf

1800: Voltasäule von Alesssandro Volta

1820: Wissenschaftliche Auseinandersetzung Michael Faradays mit der Elektrolyse

1834: Erste Anwendung des Wortes „Elektrolyse“ von Michael Faraday

1900: Vorstellung des ersten industriellen Elektrolyseurs von O. Schmidt in Zürich

1902: ~ 400 Elektrolyse Anlagen in Betrieb

1920: Elektrolyseboom (H_2 für NH_3 -Synthese)

1924: Jacob Emil Noeggenrath patentiert Druckelektrolyseur (bis ~100 atm)

1948: Industrielle Design des Druckelektrolyseurs von Ewald Arno Zdansky in der Schweiz

1951: Lurgi Druckelektrolyseur für bis zu 30 bar Druck

1962:

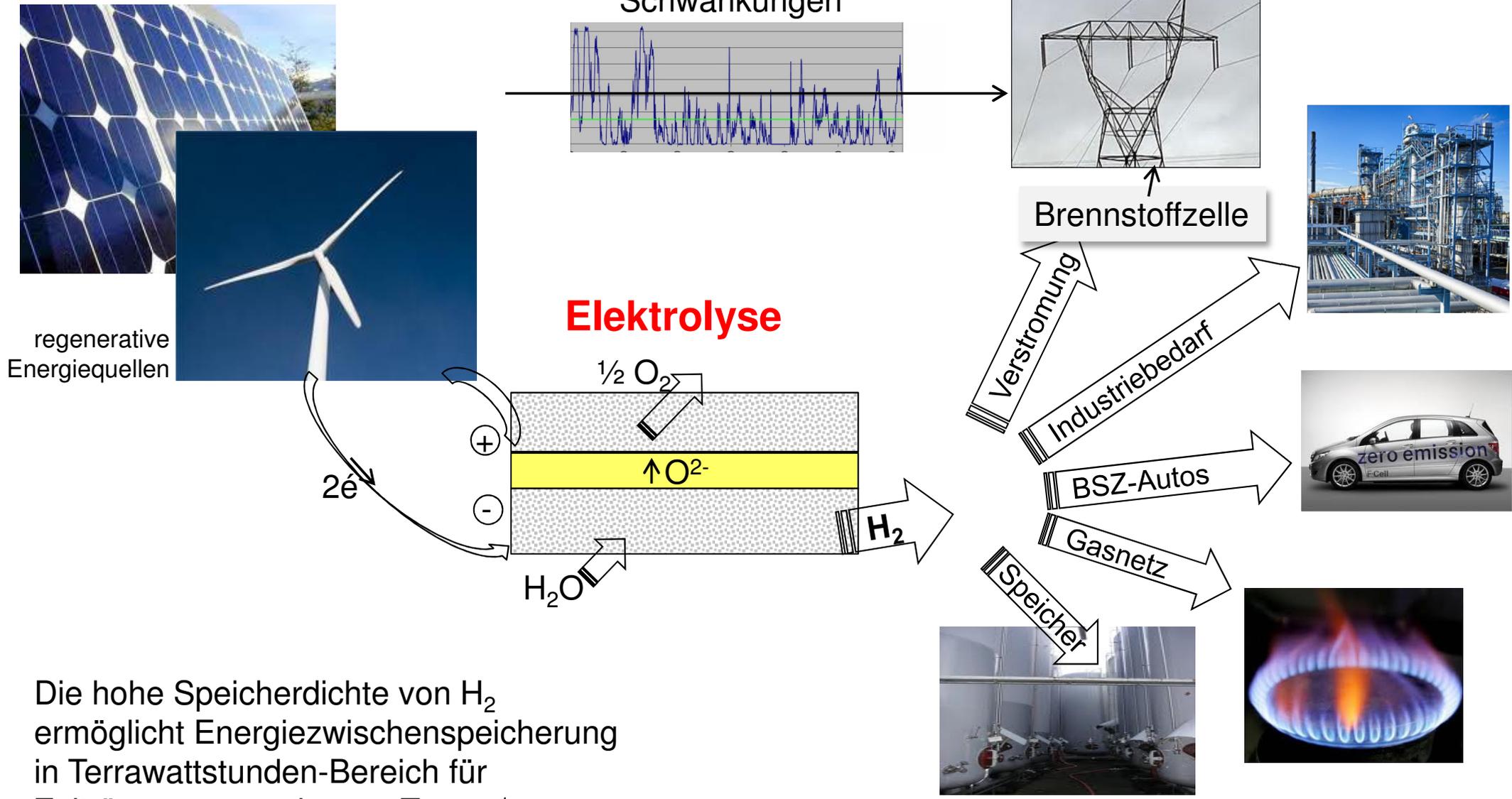


Einsatz PEMFC im Gemini-Programm

1966:

1987: Erster 100kW PEM-Elektrolyseur von BBC

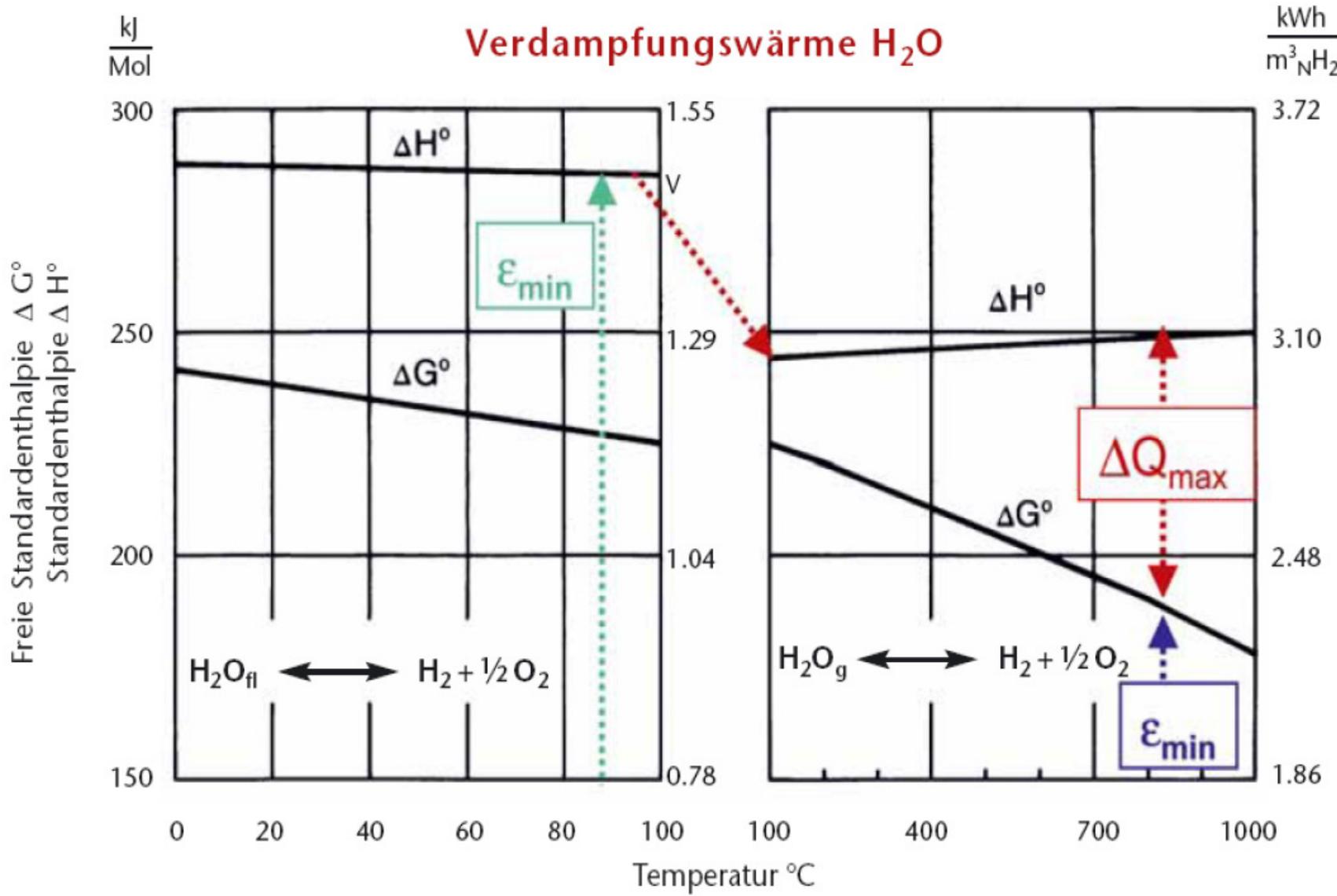
Potential von H2

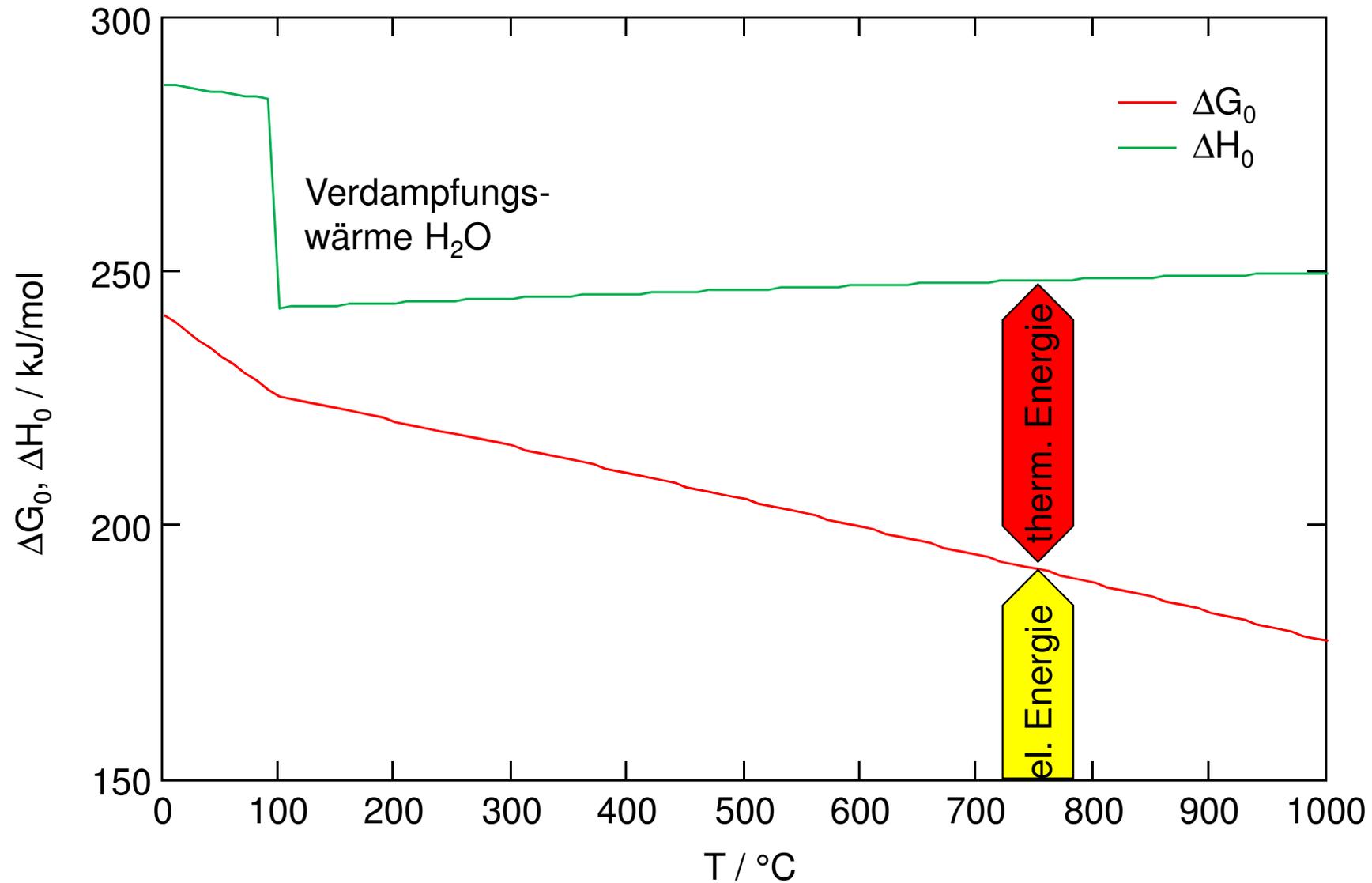


Die hohe Speicherdichte von H₂ ermöglicht Energiewischenspeicherung im Terrawattstunden-Bereich für Zeiträume von mehreren Tagen.¹

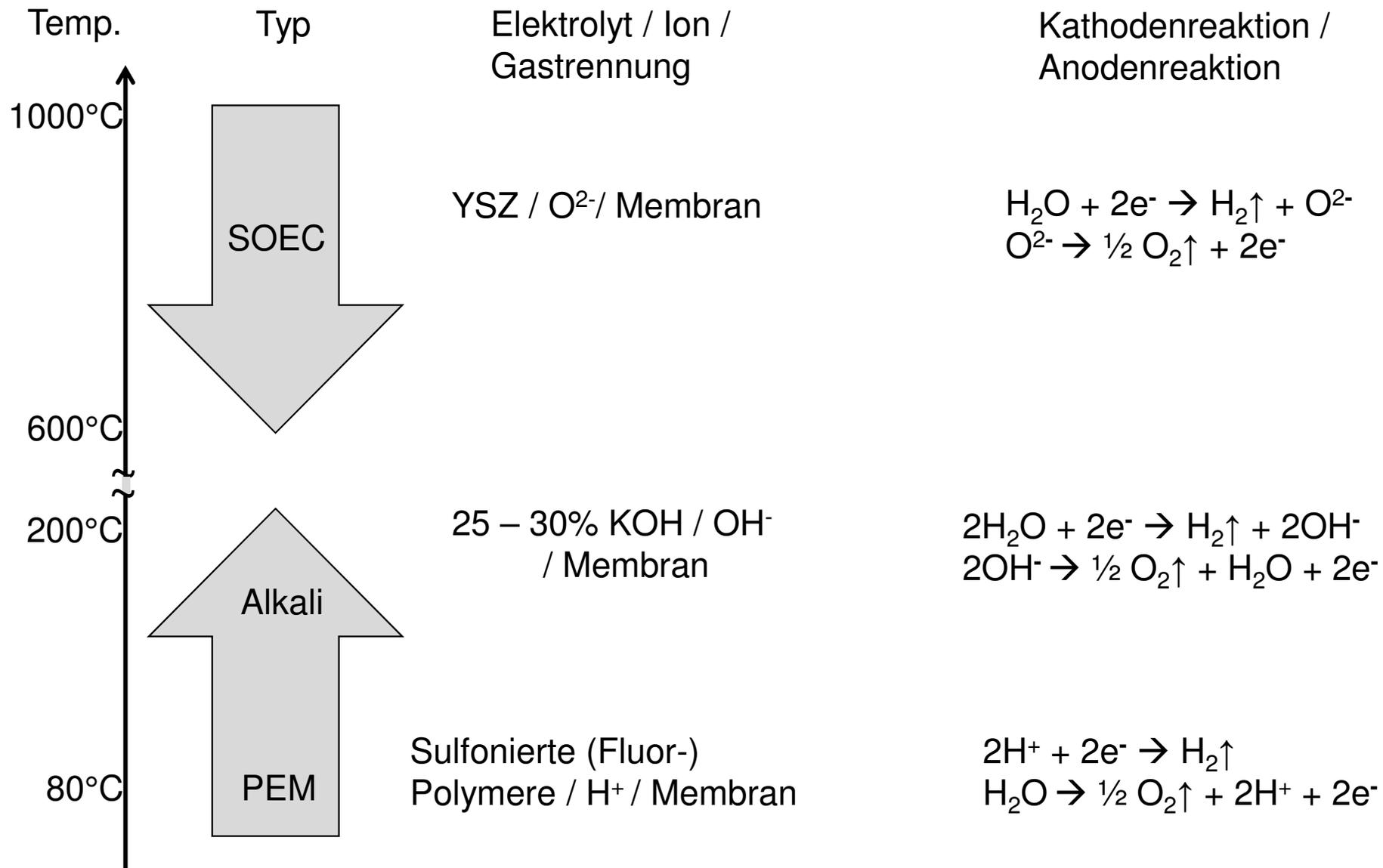
¹ Nationale Organisation für Wasserstoff und Brennstoffzellen Technologie, NOW

Elektrolyse Thermodynamik

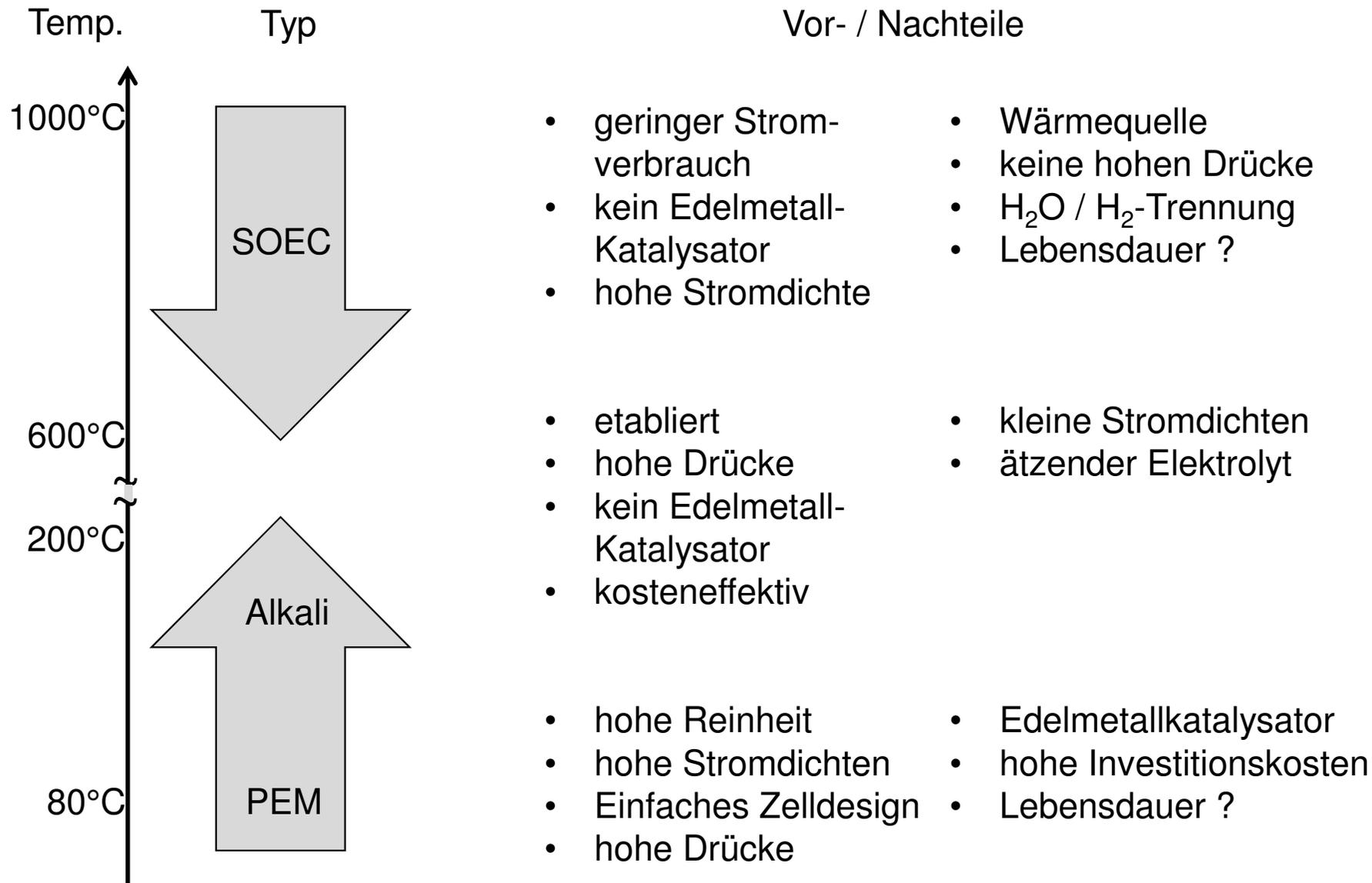




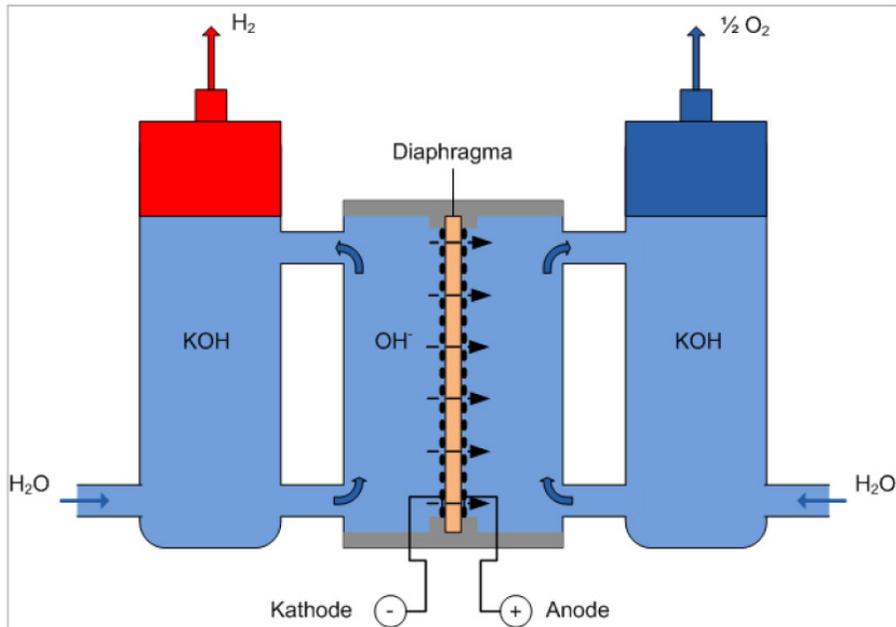
Hoch- und Niedertemperaturelektrolyse



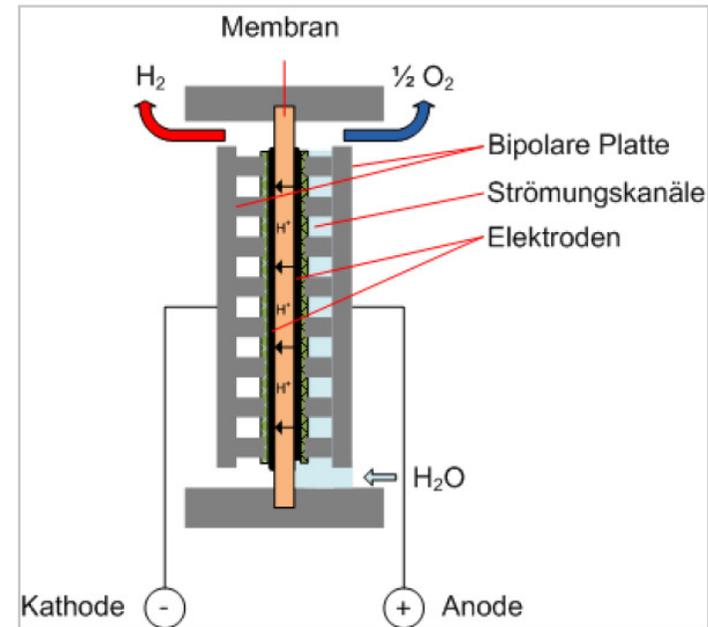
Arten der Elektrolyse



Alkalische und PEM-Elektrolyse



- Kathode: $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$
- Anode: $2\text{OH}^- \rightarrow \frac{1}{2} \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$
- Gesamtreaktion: $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$

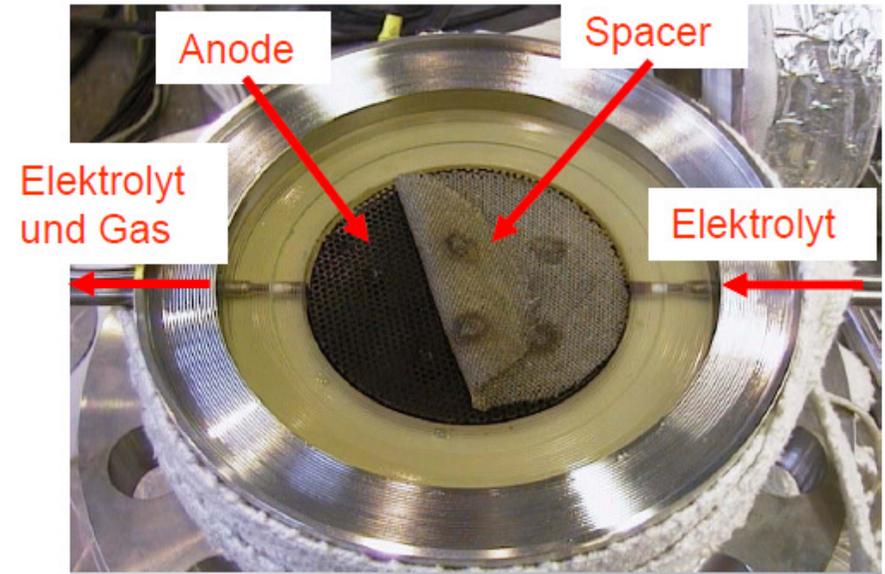
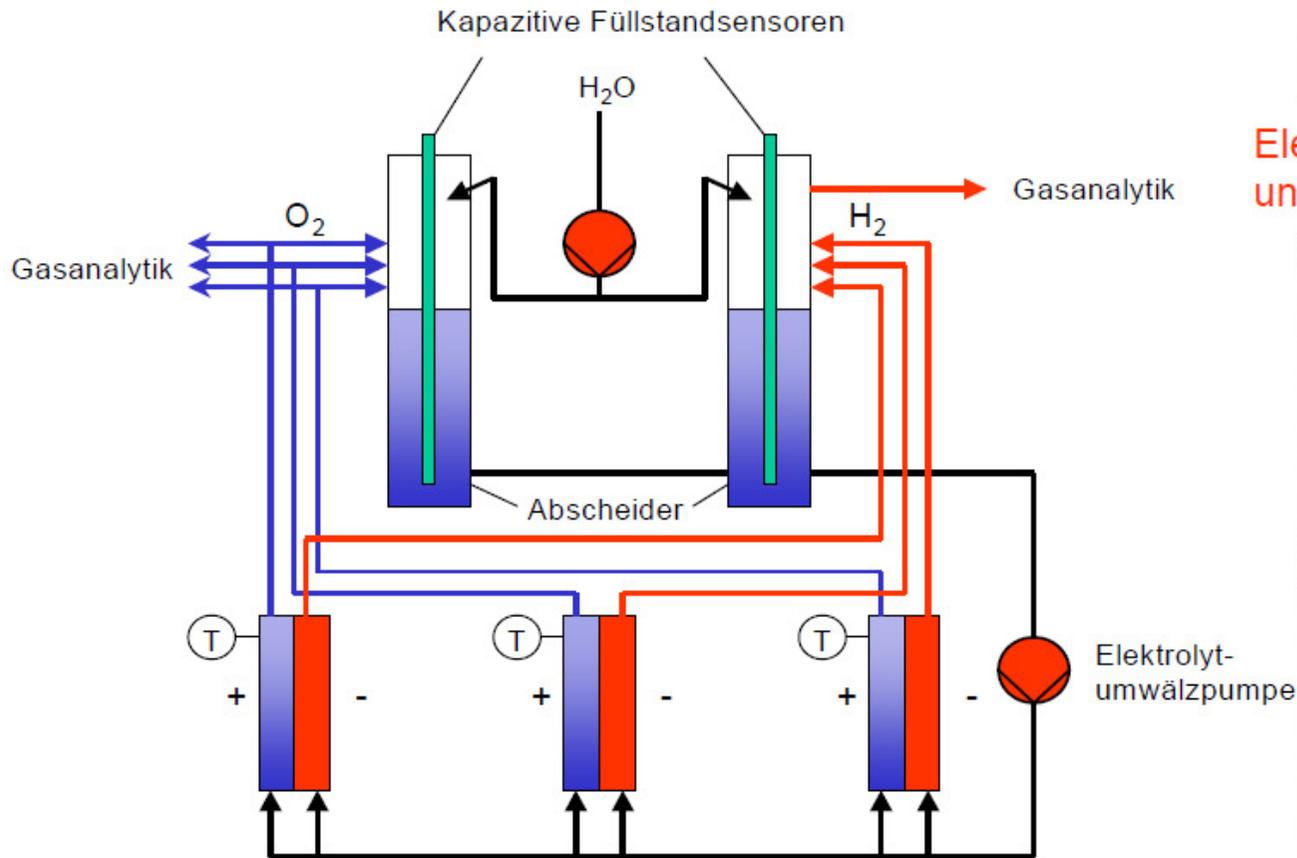


- Kathode: $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$
- Anode: $\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}^+ + \frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{e}^-$
- Gesamtreaktion: $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$

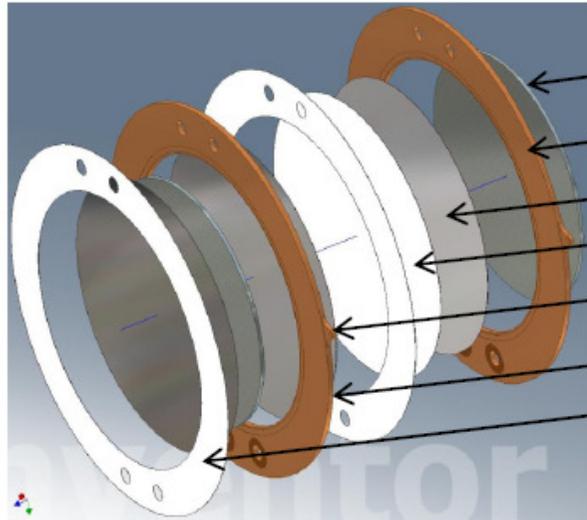
alkalischer Elektrolyt (KOH-Lauge, Konzentration: 20 - 40 %)
 Elektroden werden von Lauge durchströmt
 Bevorratung in separaten Tanks → auch Gas-Flüssig-Separator
 Betriebstemperatur: 50 °C - 80 °C
 Stromdichte: 200 - 400 mA/cm²

Alkalische Elektrolyse

Teststand am FZJ



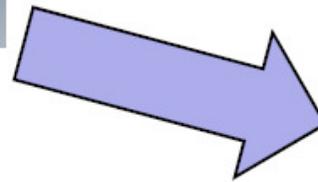
Alkalischer Elektrolyseur - Stack



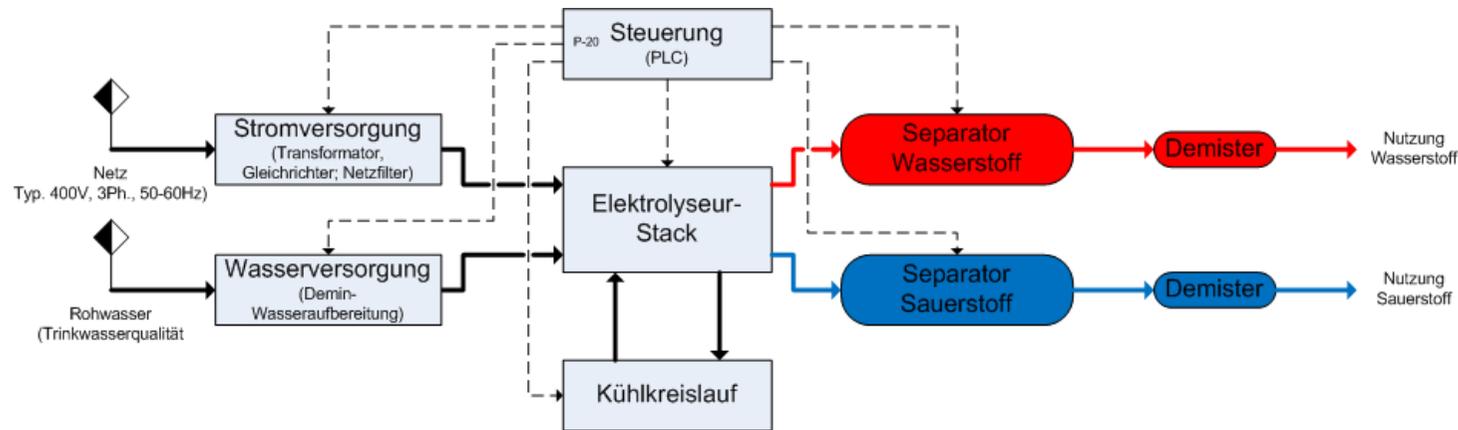
- Bipolarblech (Trennblech)
- Zellenrahmen (Anode)
- Elektrode (Anode)
- Diaphragma
- Elektrode (Kathode)
- Zellenrahmen (Kathode)
- Dichtung Zellenrahmen

3D-Darstellung einer Zelle

Quelle: HYDROGENICS



Kompletter Elektrolyseurstack



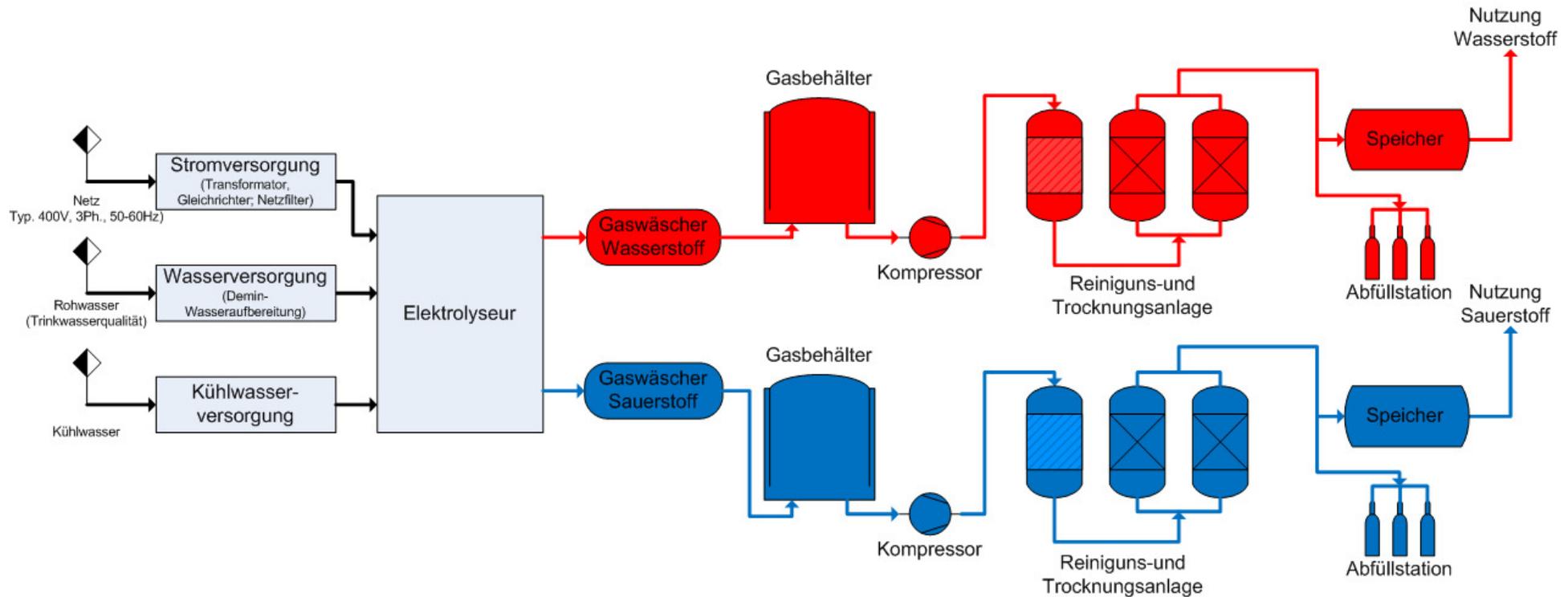
Hauptbestandteile

- Elektrolyseur-Stack
- Separatoren (Wasserstoff und Sauerstoff)
- Demister (Wasserstoff und Sauerstoff)
- Elektrolytkreislauf
- Stromversorgung (Transformator, Gleichrichter)
- Steuerung

Periphere Anlagenkomponenten

- Kühlkreislauf (geschlossen/offen)
- Speisewasseraufbereitung (Umkehrosmose, Ionentauscher)

Atmosphärische alkalische Elektrolyseanlagen



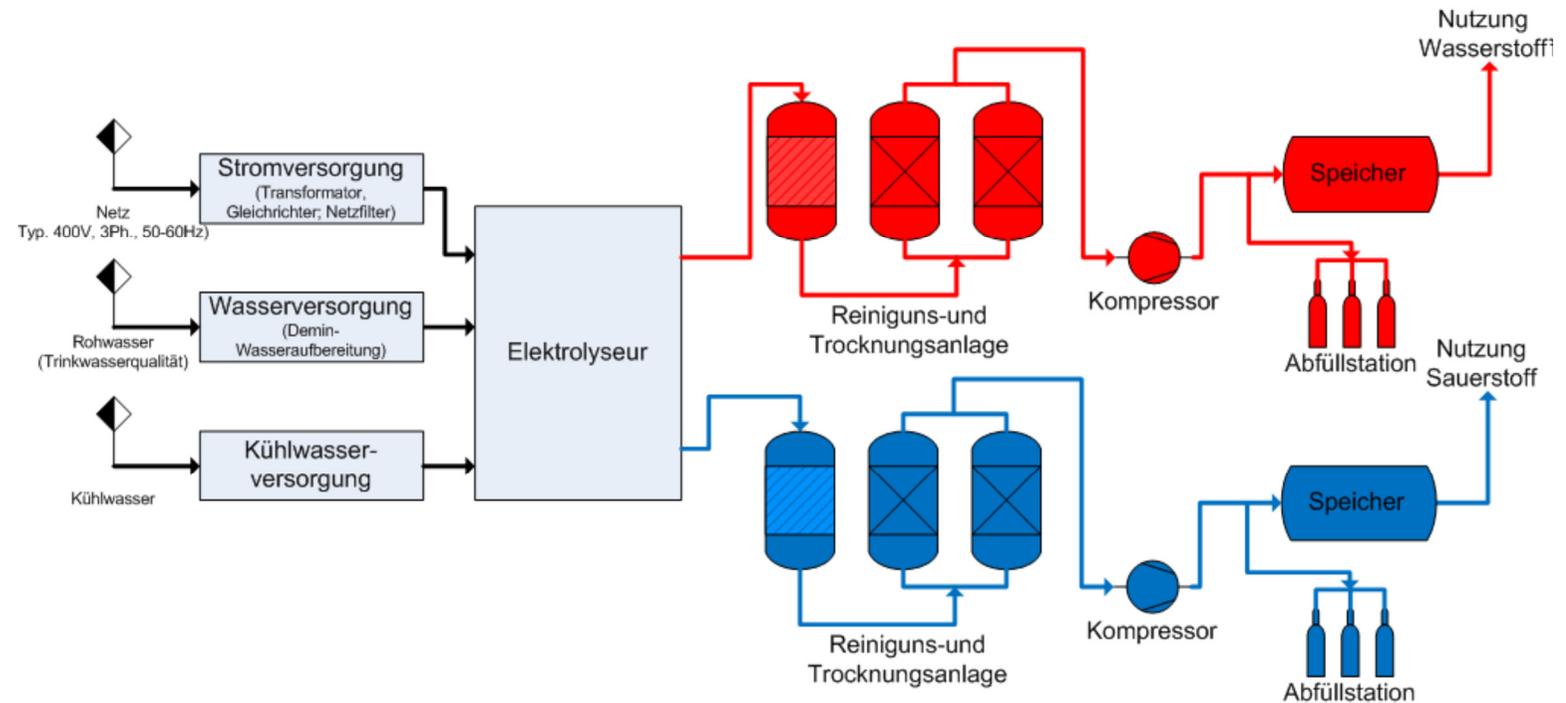
Hauptbestandteile

Elektrolyseur + Versorgungssysteme

Periphere Anlagenkomponenten zur Gasaufbereitung i.d. Reihenfolge:

- Gasbehälter (atmosphärisch für Wasserstoff, optional Sauerstoff)
- Kompressor (Wasserstoff, optional Sauerstoff)
- Gasreinigung- und Trocknung (Wasserstoff, optional Sauerstoff)
- Speichersystem (Wasserstoff, optional Sauerstoff)

Alkalische Druckelektrolyseanlagen



Hauptbestandteile

Elektrolyseur + Versorgungssysteme

Periphere Anlagenkomponenten zur Gasaufbereitung i.d. Reihenfolge:

- Gasreinigung- und Trocknung (Wasserstoff, optional Sauerstoff)
- Kompressor (Wasserstoff, optional Sauerstoff)
- Speichersystem (Wasserstoff, optional Sauerstoff)

Atmosphärische Elektrolyse

Vorteile

- einfaches, robustes Anlagendesign
- einfache Steuerung
- geringe Ansprüche an Bedienpersonal
- größerer Lastbereich (<20% .. 100%) unterliegt keiner Ex-Zoneneinteilung
- Investitionskosten teilw. bis zu 20..30% niedriger als bei Druckelektrolyseuren
- zuverlässige, langjährige Betriebserfahrungen

Nachteile

- größerer Platzbedarf als bei Druckelektrolyseuren
- aufwendigere Gastrocknung
- höhere Kosten durch zusätzliche 1.Kompressorstufe
- Stack-Kapazität begrenzt durch maximal
- sinnvolle Stromdichte im atmosphärischem Betrieb

Druckelektrolyse

Vorteile

- sehr kompakte Bauweise möglich (geringere Rohrleitungsquerschnitte und kleinere Anlagenkomponenten)
- größeres Entwicklungspotential in Richtung der Verbesserung des Verhältnisses der Stack-Kapazität zur Anzahl der Zellen durch
- höhere Stromdichten
- direkte Ankopplung an viele industrielle Applikationen die verfahrenstechnisch Drücke unter 30 bar benötigen

Nachteile

- höhere Investitionskosten (Elektrolyseur)
- höherer MSR-Aufwand und kompliziertere Steuerung
- höherer sicherheitstechnischer Aufwand
- bei höheren Drücken (>10 bar) verringert sich der nutzbare Lastbereich (30 .. 100%)
- höherer Wartungsaufwand

Alkalische Elektrolyseanlagen

Hydrogenics HySTAT(TM) 10 Electrolyzer

Technical specifications

MODEL	HySTAT®-10-10	HySTAT®-15-10	HySTAT®-10-25
Operating Pressure	10 barg		25 barg
Max. Nominal Hydrogen Flow	10 Nm ³ /h	15 Nm ³ /h	10 Nm ³ /h
Hydrogen Flow range	40 - 100% (25 - 100% as an option)		
Hydrogen Purity (before HPS)	99,9%; H ₂ O saturated, O ₂ < 1,000 ppm		
Hydrogen Purity (after HPS)	99,998% (99,999% as an option); O ₂ < 2ppm; N ₂ < 12ppm; Atm. Dew point: -60°C or -76°F (-75°C or -103°F as an option)		
Nr. of cell stacks	1		
Estimated AC power consumption (all included)	4,9 kWh/Nm ³ at full load		
Voltage	3 x 400 VAC ± 3% (3 x 480 or 575 VAC ± 3% as an option)		
Frequency	50 Hz ± 3% (60 Hz ± 3% as an option)		
Installed power	100 KVA	120 KVA	100 KVA
Max. cooling water t* (electrolyte)	40°C	40°C	30°C
Design flow cooling water (electrolyte)	2 m ³ /h		
Max. cooling water t* (gas cooling)	15°C		
Design flow cooling water (gas cooling)	0,15 m ³ /h		
Demineralized water consumption	< 1 liter/Nm ³ H ₂		
Electrolyte	H ₂ O + 30% wt. KOH		
Approx. Electrolyte Quantity	300 L		
Installation Area	Indoor, in dedicated building		
Ambient Temperature Range	+5°C to +40°C		
Dimensions Process Part (LxWxH)**	1,7m x 1,85m x 2,6m		
Dimensions Power Rack (LxWxH)	0,9m x 0,9m x 2,3m		
Dimensions Control Panel (LxWxH)	1,0m x 0,5m x 2,1m		
Approx. empty Weight Process Part	1.350 kg	1.500 kg	1.400 kg
Weight Power Rack	750 kg		
Weight Control Panel	400 kg		

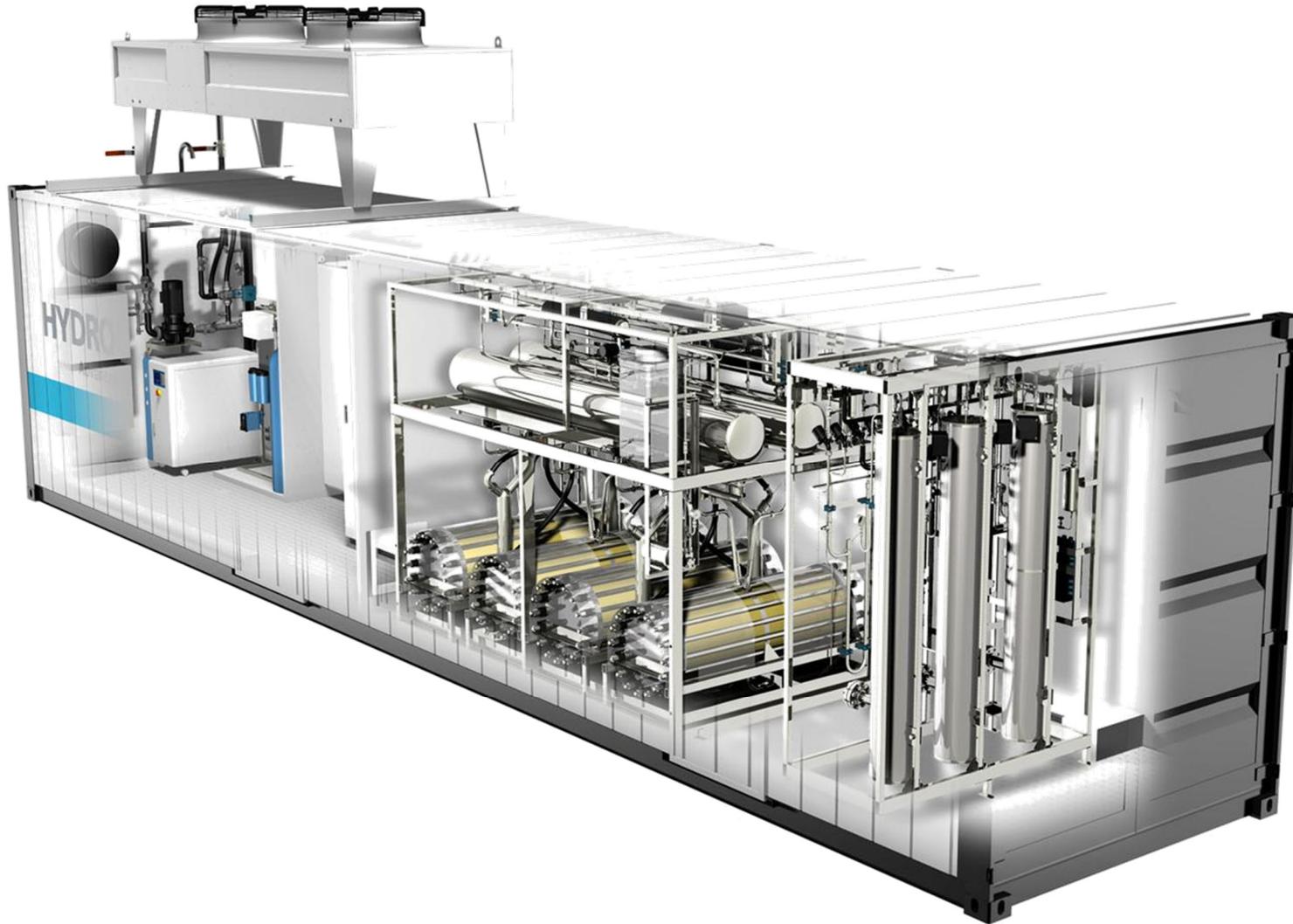
(*) HPS = hydrogen purification system
 (**) including 'ATEX' enclosure

HYDROGENICS
 Advanced Hydrogen Solutions



Alkalische Elektrolyseanlagen

Hydrogenics HySTAT(TM) 60 Electrolyzer

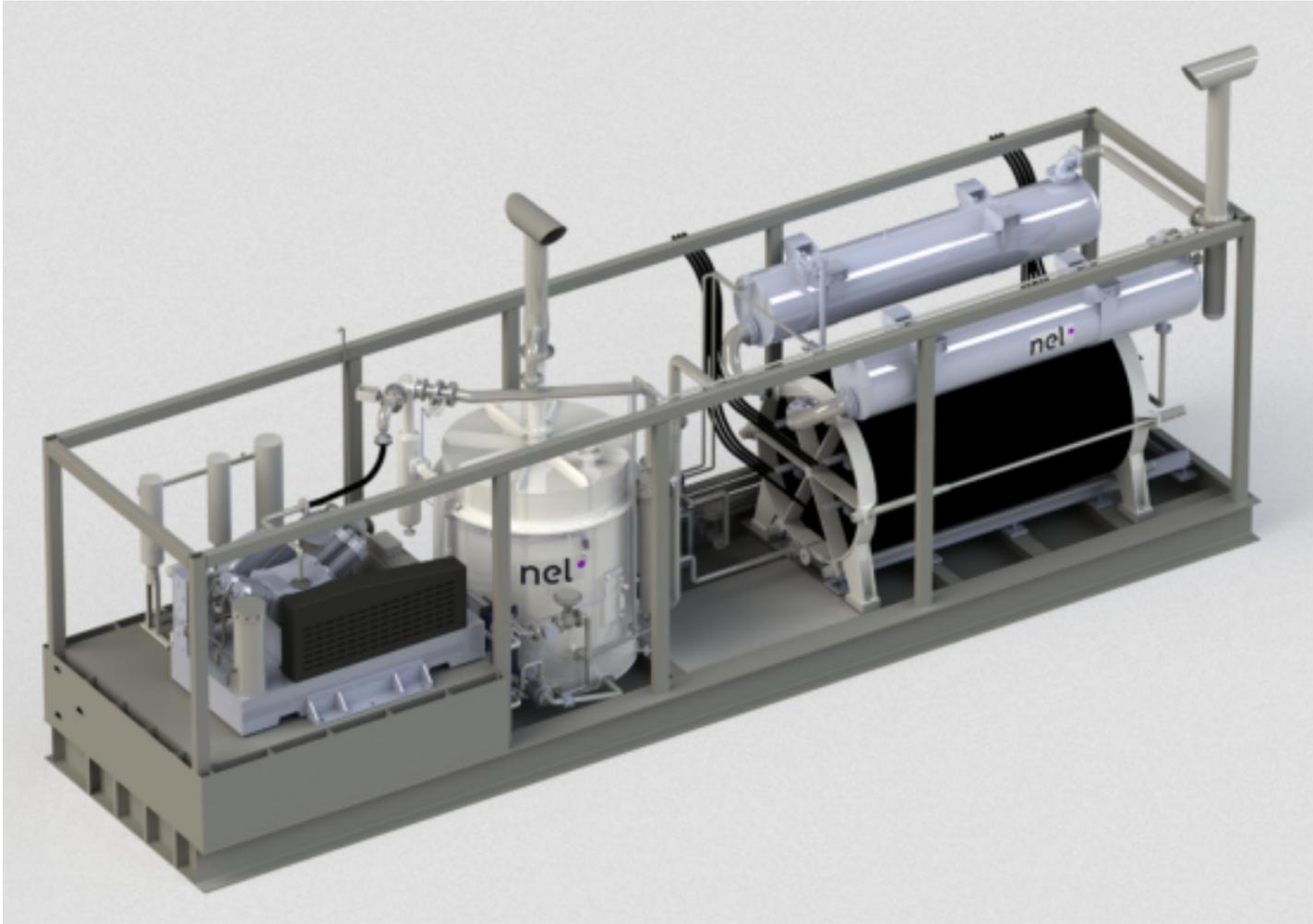


Alkalische Elektrolyseanlagen Hydrogenics

MODEL	HySTAT®-10-10	HySTAT®-15-10	HySTAT®-30-10	HySTAT®-45-10	HySTAT®-60-10
Operating Pressure	10 barg				
Nominal hydrogen Flow	10 Nm ³ /h	15 Nm ³ /h	30 Nm ³ /h	45 Nm ³ /h	60 Nm ³ /h
Nr. of cell stacks	1	1	2	3	4
Hydrogen flow range	40 - 100% (25 - 100% as an option)				
Hydrogen Purity (before HPS)*	99,9%; H ₂ O saturated, O ₂ < 1,000 ppm				
Hydrogen Purity (after HPS)	99,998% (99,999% as an option); O ₂ < 2ppm; N ₂ < 12ppm; Atm. Dew point: -60°C or -76°F (-75°C or -103°F as an option)				
Estimated AC power consumption (all included)	5,4 kWh/Nm ³ at full capacity		5,2 kWh/Nm ³ at full capacity		
Voltage	3 x 400 VAC ± 3% (3 x 480 or 575 VAC ± 3% as an option)				
Frequency	50 Hz ± 3 % / 60 Hz ± 3 % (option)				
Installed power	100 + 35KVA	120 + 35KVA	240 + 35KVA	120 + 240 + 35KVA	2 x 240 + 35KVA
Max. cooling water temperature (electrolyte)	Closed loop cooling circuit installed				
Design flow cooling water (electrolyte)					
Max. cooling water temperature (gas cooling)	Chiller gas cooling circuit installed				
Design flow cooling water (gas cooling)					
Demineralized water consumption	Feed water purification system installed				
Tap water consumption	1,5 - 2 liters/Nm ³ H ₂				
Electrolyte	H ₂ O + 30% wt. KOH				
Electrolyte Quantity	220 L	240 L	360 L	480 L	610 L
Installation area	Outdoor, general purpose area (optional indoor)				
Ambient Temperature Range	-20°C to +40°C (-40°C or +50°C as an option)				
Dimensions (L X W X H)	6,10m x 2,44m x 2,90m (+1,60m with dry cooler)				
Empty weight	Approx. 16 Tons				

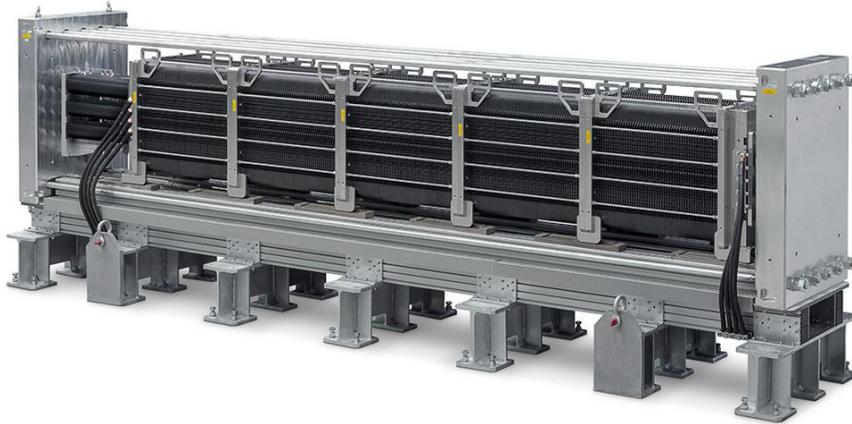
Alkalische Elektrolyseanlagen

Nel Electrolysers



Specifications	Nel C-150	Nel C-300
Capacity range per unit (Nm ³ H ₂ /hr)	150	300
Production capacity dynamic range	15 – 100% of flow range	15 – 100% of flow range
DC power consumption	3.8 – 4.4 kWh/Nm ³	3.8 – 4.4 kWh/Nm ³
H ₂ purity (%)	99.9 ± 0.1	99.9 ± 0.1
After purification		
O ₂ -content in H ₂	< 2 ppm v	< 2 ppm v
H ₂ O-content in H ₂	< 2 ppm v	< 2 ppm v
O ₂ purity (%)	99.5 ± 0.2	99.5 ± 0.2
H ₂ outlet pressure	30 bar g / 200 bar g	30 bar g / 200 bar g
Dimensions		
Container 1	12m x 2,9m x 3,6m	12m x 2,9m x 3,6m
Container 2	9m x 2,9m x 3,2m	9m x 2,9m x 3,2m
Container 3		9m x 2,9m x 3,2m
Operating temperature	80°C	80°C
Electrolyte	25% KOH aqueous solution	25% KOH aqueous solution
Feed water consumption	0.9 litre / Nm ³ H ₂	0.9 litre / Nm ³ H ₂

Siemens PEM-Elektrolyseur Sylizer 200 / 300



SILYZER 200 Basissystem

Elektrolyse-Typ / -Prinzip: PEM (Protonen-Austausch-Membran)

Nennleistung Stack: 1,25 MW

Maße: 6,30 m x 3,10 m x 3,00 m

Anlaufzeit: < 10 sec

Abgabedruck: bis 35 bar

Wasserstoffreinheit: 99,5 % – 99,9 % (abh. vom Betriebspunkt)

Wasserstoffqualität 5.0: DeOxo-Dryer Option

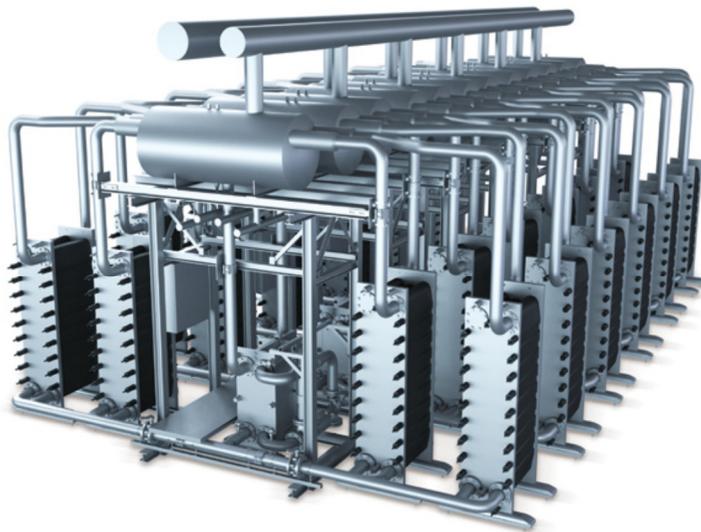
Wasserstoffproduktion bei Nennlast: 225 Nm³/h

Design Lebensdauer: > 80.000 h

Gewicht: 17 t

CE-Konformität: ja

Frischwasserbedarf: 1,5 l / Nm³ H₂



SILYZER 300

Wasserstoffproduktion: 100 – 2.000 kg pro Stunde

Anlageneffizienz: ~ 75%

Anlaufzeit: < 1 Minute

Dynamik: 0 – 100% in 10% / s

Minimallast: ≥ 5%

Wasserbedarf (VE): 10 l pro kg Wasserstoff

Wasserstoffqualität: Industriestandard 5.0

H₂: 11.2 n/g



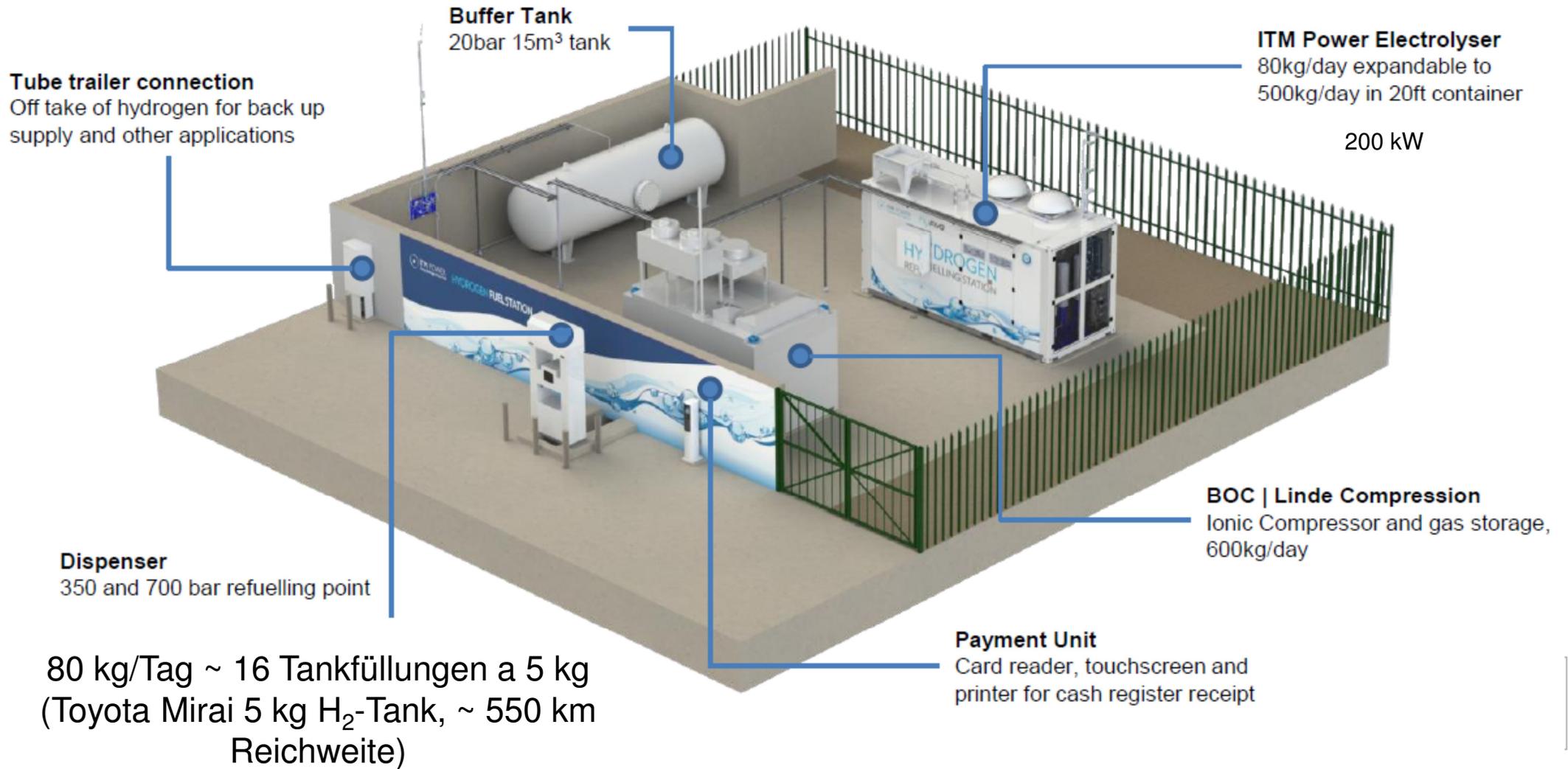
ITM Power PEM-Elektrolyseur HGas

HGas	Specification
System power	0.1 – 100MW
Hydrogen Pressure (bar)	20 (50 optional)
Hydrogen production rate (kW)	45 – 40,000kg/24h
Hydrogen purity	99.5 – 99.999%
Packaging	ISO containers or indoor installation



PEM-Elektrolyse

Beispiel: H₂-Tankstelle

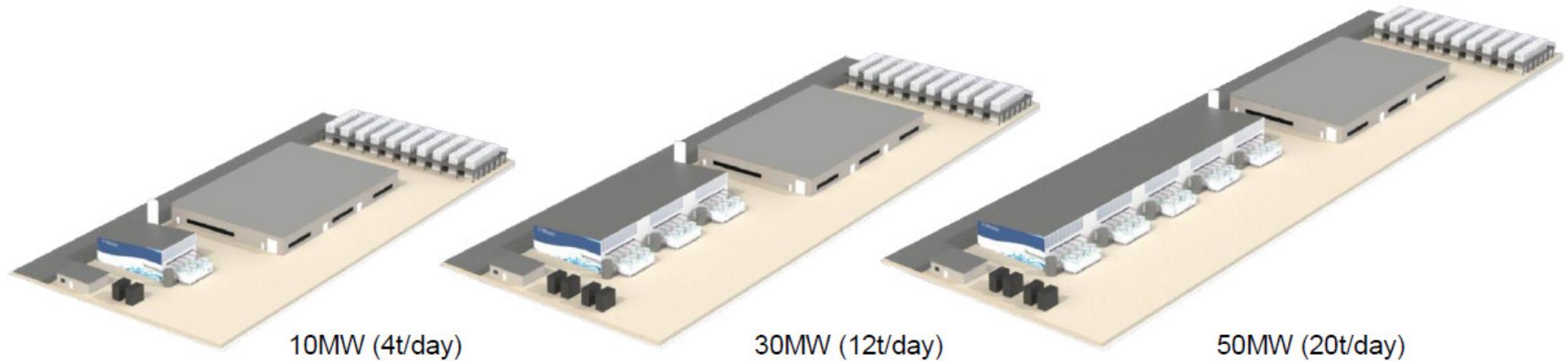


400 kg/Tag / 1 MW Elektrolyseleistung



PEM-Elektrolyse

Skalierung H2-Tankstellen



Vehicle	Capacity (kg)	Refuels/Day			
		5MW (2t/day)	10MW (4t/day)	30 MW (12t/day)	50MW (20 t/day)
Cars	4	500	1,000	3,000	5,000
Buses	30	67	134	402	670
Trucks	75	27	54	162	270
Trains	180	11	22	66	110
Ferries	500	4	8	24	40

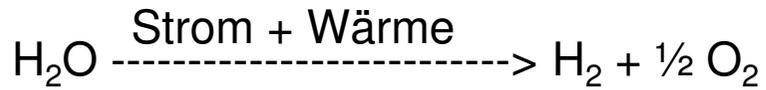
Energiepark Mainz (Demonstrationsprojekt)



Siemens PEM-Elektrolyseure
 Dauer-/Peaklast: 1.3 / 2 MW
 Ausgangsdruck 35 bar



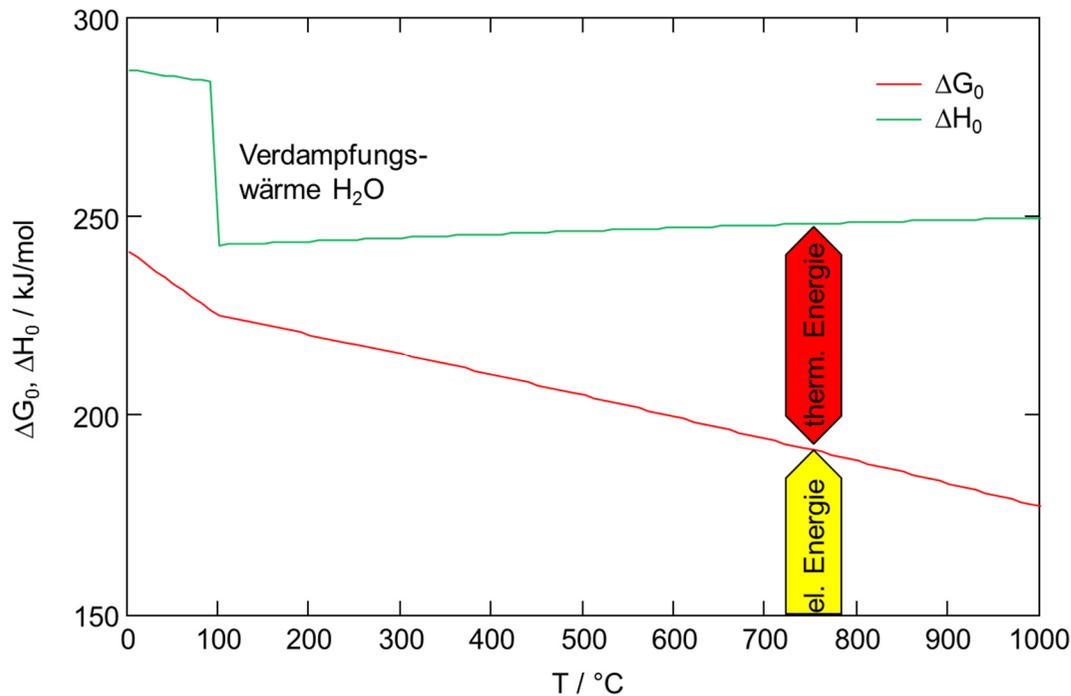
Hochtemperaturwasserelektrolyse



$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

$$U_N = -\frac{\Delta G_0(T)}{2F} - \frac{RT}{2F} \ln\left(\frac{p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{H}_2}\sqrt{p_{\text{O}_2}}}\right)$$

elektrischer-, thermischer-, und gesamter Energiebedarf der Wasserelektrolyse



- ΔG sinkt mit steigender Temperatur
von ~ 237 bei 25°C auf 183 kJ/mol bei 900°C
- $\Delta H \sim$ konstant
- Hohe Temperaturen reduzieren den elektrischen Energiebedarf
- $\eta_{\text{elektrisch-chemisch}} > 100\%$

Betriebsmodi

- endotherm: $\Delta G < \Delta H \rightarrow \eta > 100\%$
- thermoneutral: $\Delta G = \Delta H \rightarrow \eta = 100\%$
- exotherm: $\Delta G > \Delta H \rightarrow \eta < 100\%$

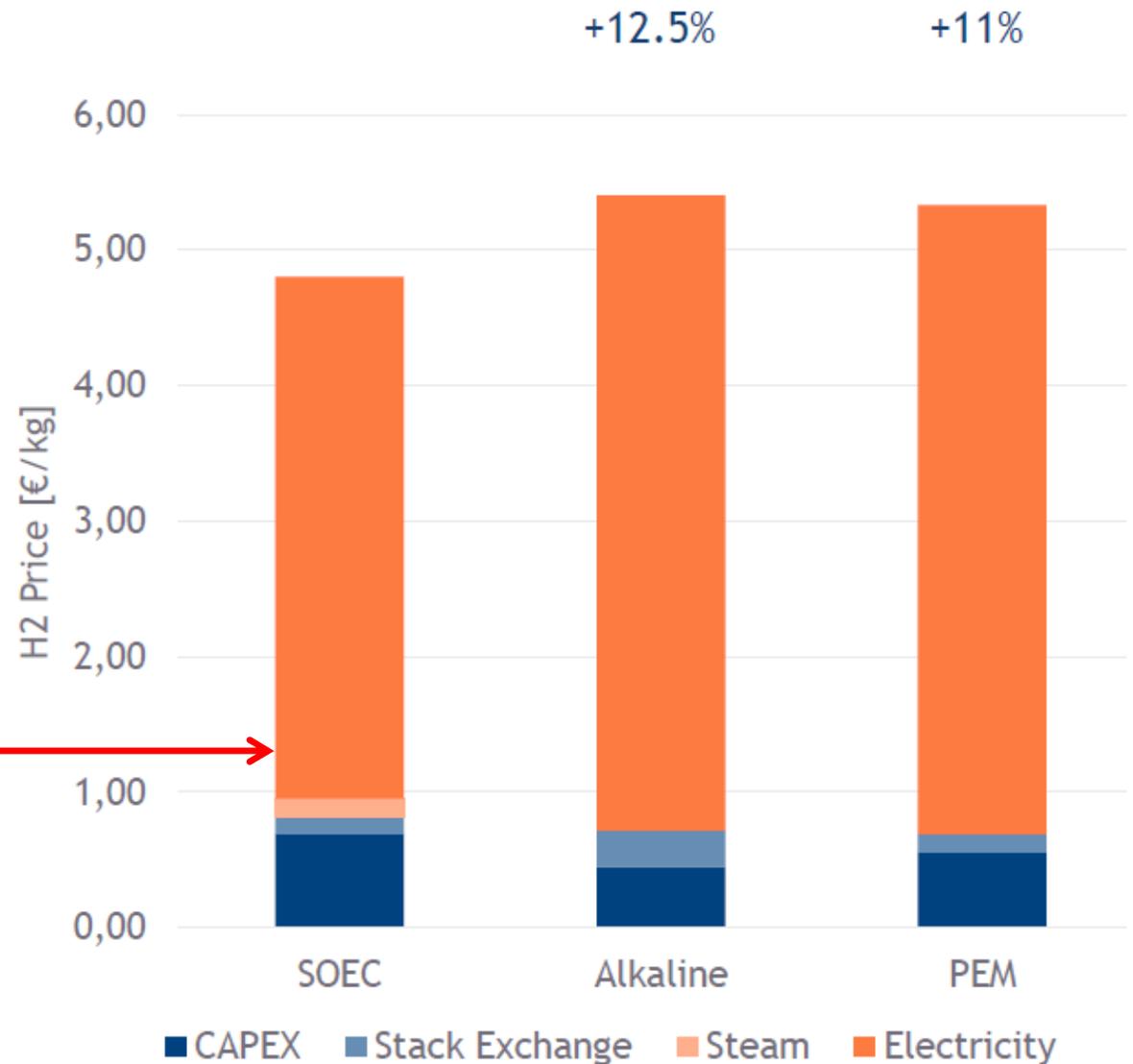
* Hydrogen and Fuel Cells, 2010 WILEY-VCH

Wasserstoff über Elektrolyse Kosten

Assumptions (2020 scenario):

- + Electricity Costs:
80 €/MWh
- + Capacity Utilisation rate:
60 %
- + IRR 9 %
- + Reversible electrolysis
(SOEC) enables lowest
costs compared to legacy
technologies

Dampfreformierung von Erdgas
bei Erdgaspreisen von 20–28 €/MWh
und CO₂-Emissionszertifikatspreisen
von derzeit rund 10 €/tCO₂

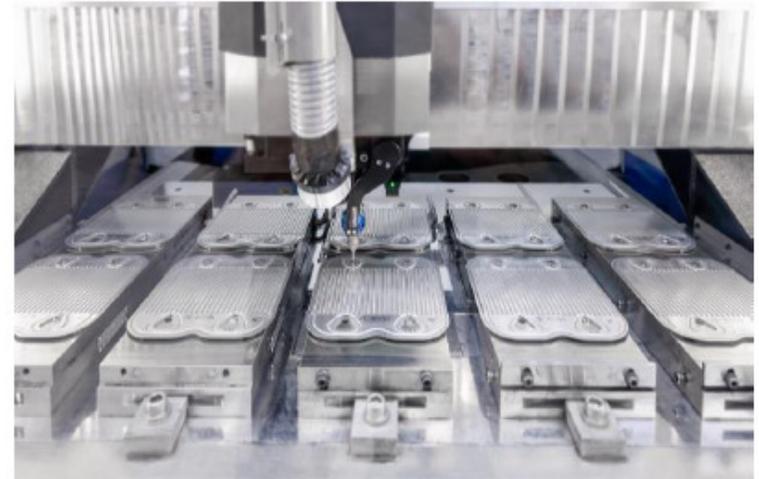


Verbrauch PEMFC-Fahrzeug: ~ 1 kg/100 km



- + **Highest efficiency** in hydrogen production ($82\%_{\text{LHV}}$ or 3.7 kWh/Nm^3) and power & heat production ($35\text{-}60\%_{\text{AC}}$ and $90\%_{\text{total}}$) compared to legacy technologies such as PEM and Alkaline
- + **Tolerance to carbon** in electrolysis mode via co-electrolysis of CO_2 and H_2O and in fuel cell mode via internal reforming of hydrocarbons (natural gas, LPG, diesel, etc.)
- + **Reversibility** using the same one unit for electrolysis and fuel cell (optional)

On top, Sunfire promises **low costs**, **high reliability** and **readiness to scale**.



Stack Production in Dresden



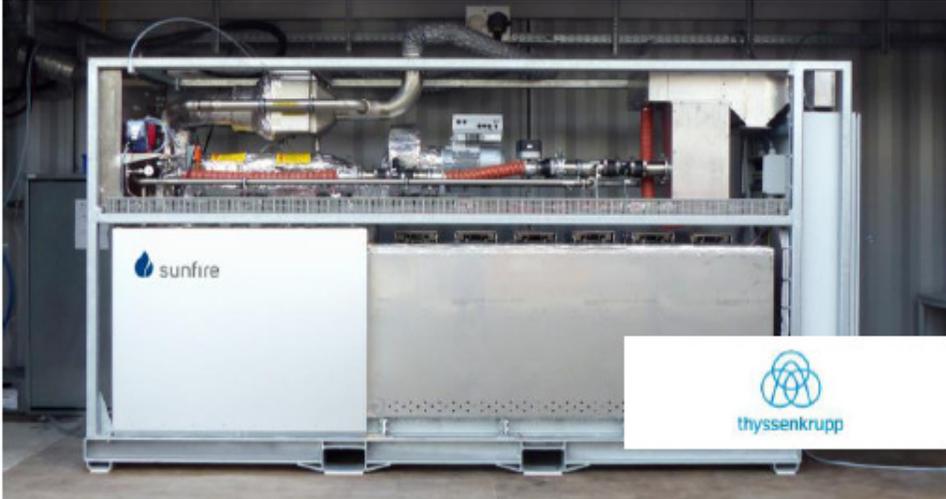
System testing in Dresden

Sunfire SOFC/SOEC-Systeme

+ Heat and Power for Households



+ Power and Heat for Commercial Buildings



+ Power for Remote Locations

+ Fuels and Gases for Mobility + Industry

Sunfire SOFC/SOEC-Systeme

Referenzanlagen



- + 1x 150 kW SOEC power input and 1x 30 kW SOFC power output
- + SOEC efficiency of >80 %LHV
- + Reaching a lifetime of greater 10,000 h with a degradation rate below 1 %/1,000 h
- + Meeting H₂ quality standards of steel industry



- + 2x 100 kW SOEC power input and 2x 20 kW SOFC power output
- + Roundtrip efficiency ca. 45%
- + Electricity storage for autonomous electricity supply during day and night (PV connected)



150 kW SOEC unit in Salzgitter, Germany



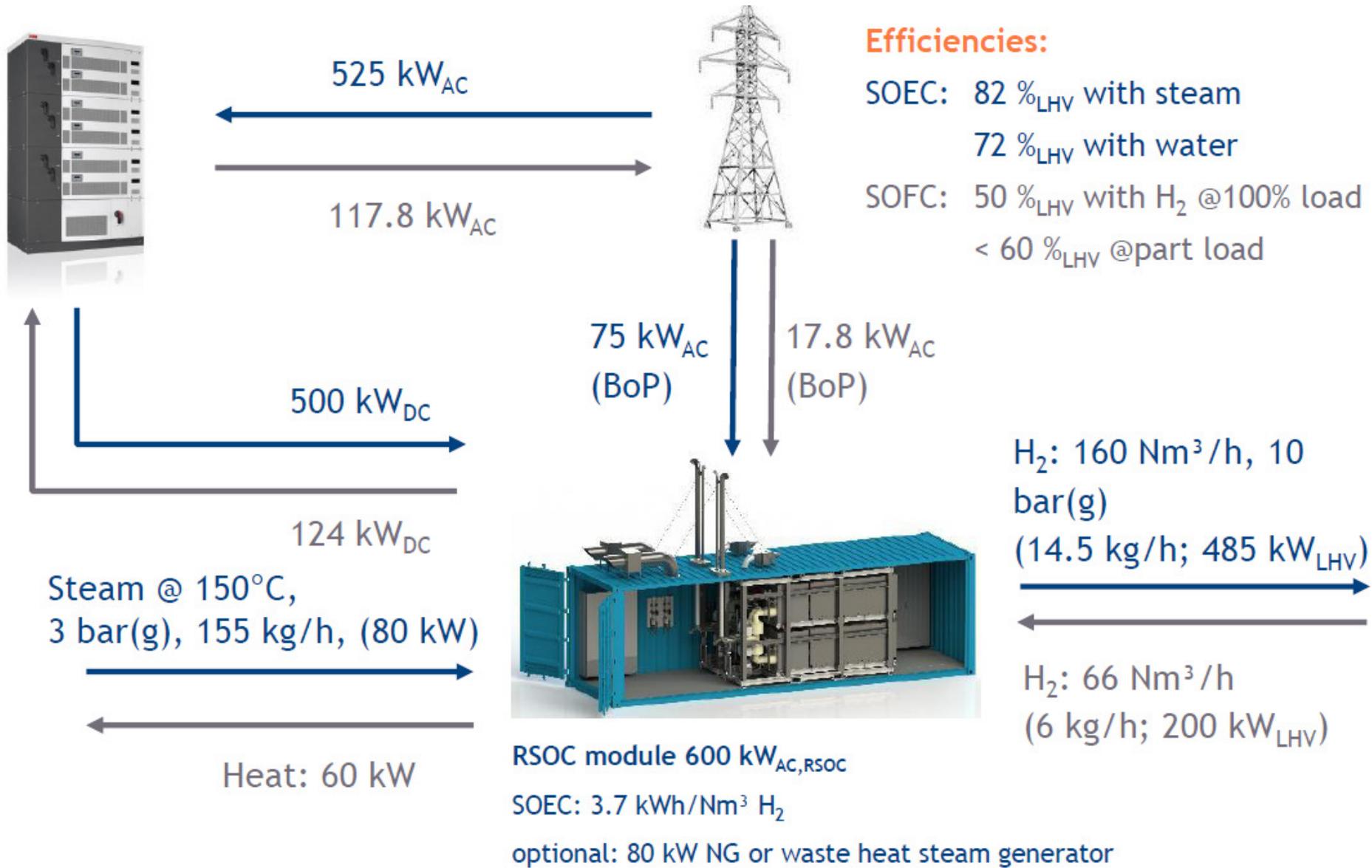
200 kW SOEC unit in Los Angeles, USA

Sunfire 30/150 kW SOFC/SOEC-System

Technische Daten

	Hydrogen generation	Power generation
Rated electrical power _{AC}	150 kW	30 kW
Load variation	-100 % ... 100 %	
Thermal output		25 kW _{th}
Electric efficiency _{AC} based on LHV	82 %	> 50 %
Total system efficiency		Up to 85 % LHV
Specific electric energy _{AC}	3.7 kWh/Nm ³	
H ₂ production	40 Nm ³ /h	
H ₂ pressure	10 bar(g)	
H ₂ purity (after gas cleaning)	99.999 % Atm. dew point: -60 °C	
O ₂	On request	
Gas input	Saturated steam	Hydrogen
Emissions		NO _x < 40 mg/kWh
Electric interface	3 phase, 380/400/480 V _{AC} , 50 Hz/60 Hz	
Noise	< 60 dB @ 3m distance	< 70 dB @ 3m distance
Ambient temperature	-20 °C ... +45 °C	
Communication	Communication for remote monitoring and control	

Zukünftige Sunfire SOFC/SOEC-Systeme Schnittstellen



- bis auf weiteres finden alle mündlichen Prüfungen als Onlineprüfung statt
- die Prüfungsdauer beträgt 20 min
- Anmeldung
 - bitte fragen Sie per Email bei mir (andre.weber@kit.edu) nach einem Prüfungstermin
 - bitte verwenden Sie ausschließlich ihre **student.kit.edu** Email
 - bitte geben Sie Ihren Wunschtermin / -zeitraum an (keine Prüfungen im August !)
 - Sie bekommen dann nach Verfügbarkeit einen Termin möglichst nahe am Wunschtermin
 - der Termin wird Ihnen als Outlook-Termin mit MS-Teams Link zugeschickt
- für die Prüfung benötigen Sie
 - einen Rechner mit installiertem MS-Teams, Mikrofon und Kamera
 - Ihren Studierendenausweis
 - ein Blatt Papier und einen Stift für Skizzen, diese müssen Sie während der Prüfung mit der Kamera zeigen, anschließend abfotografieren und per Mail an mich senden
- die Note wird direkt nach der Prüfung bekanntgegeben
- falls es während der Prüfung zu technischen Problemen kommt wird die Prüfung wiederholt