
WASSERSTOFFBEREITSTELLUNG MITTELS WASSER-ELEKTROLYSE: STAND DER TECHNIK UND PERSPEKTIVEN

Impulsvortrag zum Thema „Wasserstoff – Schwergewicht für die Energiewende!“



Tom Smolinka

Fraunhofer-Institut für Solare
Energiesysteme ISE

12. Niedersächsische Energietage
Altes Rathaus Hannover
05. November 2019

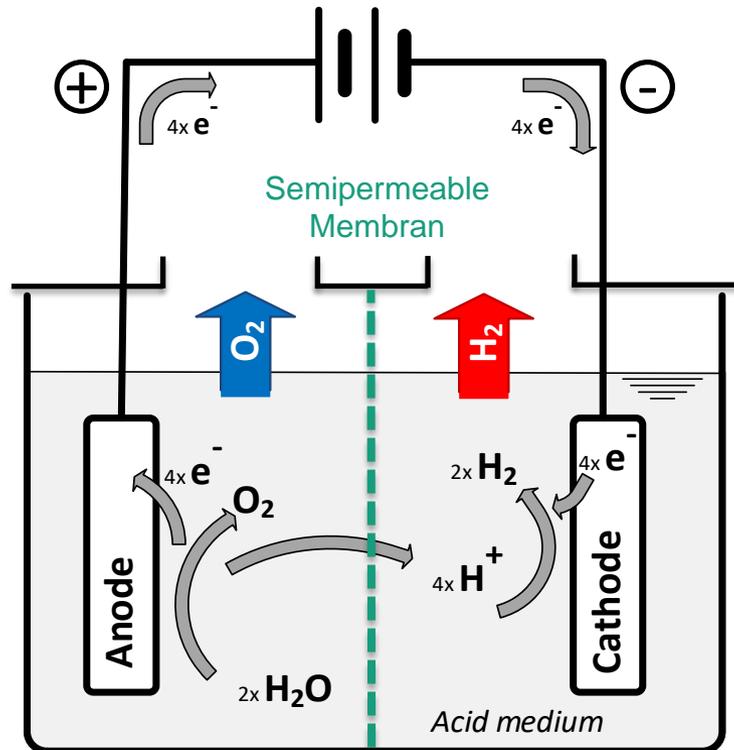
GLIEDERUNG DES VORTRAGS

- Einführung in die Wasserelektrolyse
- Vergleich der drei wesentlichen Verfahren
- Zukünftige Herausforderungen für die Wasserelektrolyse
- Aktueller Stand der Elektrolyse in PtX-Anwendungen in Deutschland
- Zusammenfassung und Schlussfolgerungen



Es gibt heute drei wesentliche Verfahren der Wasserelektrolyse.

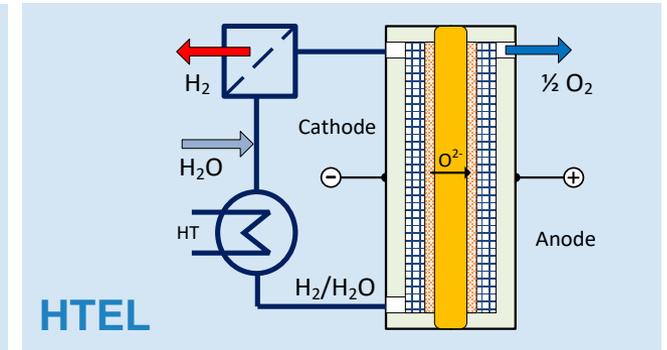
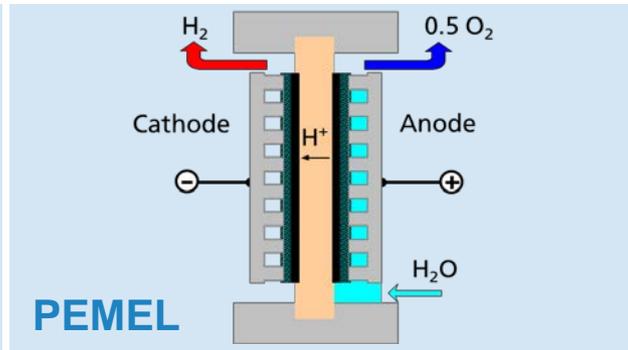
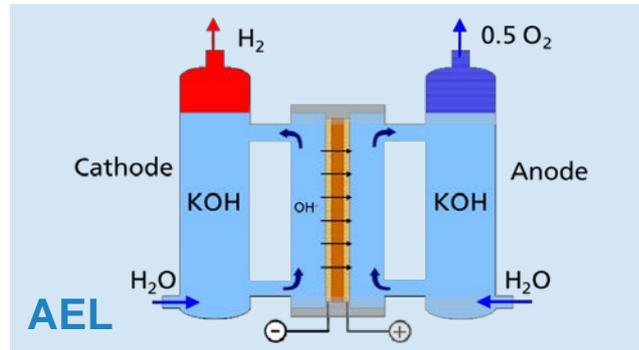
Zur Einführung: Prinzipieller Aufbau einer Elektrolysezelle



Allgemeines Funktionsprinzip einer Wasserelektrolysezelle im sauren Medium

- Anode: Oxygen Evolution Reaction (OER)
$$\text{H}_2\text{O} \rightarrow 0,5 \text{O}_2 + 2 \text{H}^+ + 2 \text{e}^-$$
- Kathode: Hydrogen Evolution Reaction (HER)
$$2 \text{H}^+ + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$$
- EL-Zelle: Gesamtreaktion
$$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + 0,5 \text{O}_2$$
- Endotherme Reaktion: $\Delta H^0 = 285,6 \text{ kJ/mol}$ (Energiebedarf)
- Reversible Zellspannung $V_{\text{rev}}^0 = 1,23 \text{ V}$
- Offene Zelle: Knallgas!
- Semipermeable Membran → getrennte Gase

Es gibt heute drei wesentliche Verfahren der Wasserelektrolyse. Der Elektrolyt macht den Unterschied!



	Alkalische Elektrolyse	Membran- / PEM-Elektrolyse	Hochtemperatur-Elektrolyse
Elektrolyt und Ladungsträger	Flüssigelektrolyt KOH OH ⁻	Saure Polymermembran H ⁺	Feststoffelektrolyt Zirkonkeramik O ²⁻
Elektroden	Nickel / Eisen (Raney)	Edelmetalle (Platin, Iridium)	Zirkonia, Ni-Cermet, Perovskite
Temperaturbereich	60 - 90 °C	50 - 80 °C	700 - 900 °C
Reversibler Betrieb	✘	✘	✔
Typische Stromdichte	0,2 - 0,6 A/cm ²	1,0 - 2,5 A/cm ²	0,5 - 1,0 A/cm ²

Es gibt heute drei wesentliche Verfahren der Wasserelektrolyse. Jede Technologie hat ihre Stärken und Schwächen ... und ihre Berechtigung.



	Alkalische Elektrolyse	Membran- / PEM-Elektrolyse	Hochtemperatur-Elektrolyse
Technologischer Reifegrad (TRL)	8-9 (industriell etabliert)	7-8 (kommerziell verfügbar)	4-6 (Labor- und Demobetrieb)
Typischer Druck	atm. - 30 bar	atm. - 50 bar (350 bar)	atm.
Stack-/ Modulgröße	< 1.000 Nm ³ H ₂ /h 0,5 - 5 MW _{el}	< 500 Nm ³ H ₂ /h 0,1 - 1,5 MW _{el}	< 10 Nm ³ H ₂ /h kW-Bereich
Spez. Energiebedarf	4,2 - 5,8 kWh/Nm ³ H ₂	4,5 - 6,8 kWh/Nm ³ H ₂	3,6 - 4,0 kWh/Nm ³ H ₂ + Dampf > 200 °C

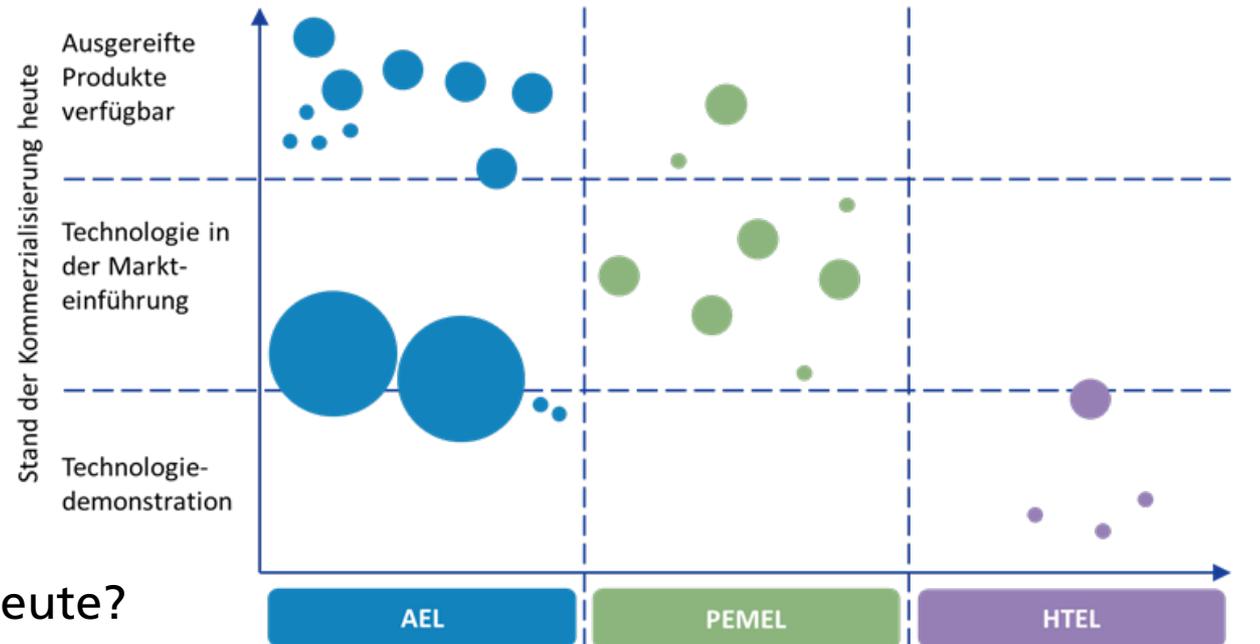
Welche zukünftige Herausforderungen bestehen für die Wasserelektrolyse? Beschreibung der Akteurslandschaft (Umfrage 2017)¹

Hauptmerkmale (2016/17):

- Verkaufte EL-Kapazität: ~ 100 MW/a
- Weltweiter Umsatz: ~ 100-150 Mio.€/a
- Direkte Mitarbeiter: ~ 1.000
- Möglicher Ausbau der Fertigungskapazität bis 2020: ~ 2 GW

Wie arbeiten Hersteller von Elektrolysesystemen heute?

- Standardisierte Stack-Plattformen
- Einzelauftragsproduktion im Werkstättenprinzip
- Projekt-zu-Projekt-Geschäft ohne Lagerhaltung



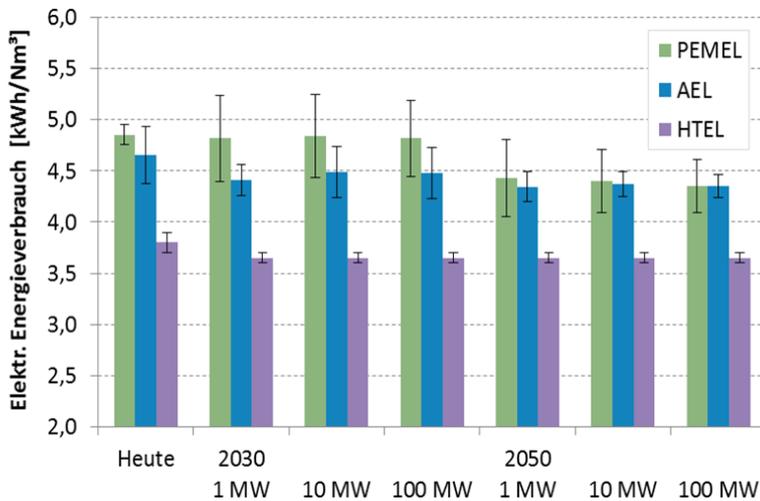
Mögliches Produktionsvolumen in 2020 je Hersteller (anonymisiert). Vorausgesetzt entsprechender Nachfrageentwicklung am Markt.

Größenordnung:
5 MW/a 50 MW/a 500 MW/a

Welche zukünftige Herausforderungen bestehen für die Wasserelektrolyse? Die Verfahren sind heute verfügbar – aber noch lange nicht ausentwickelt.

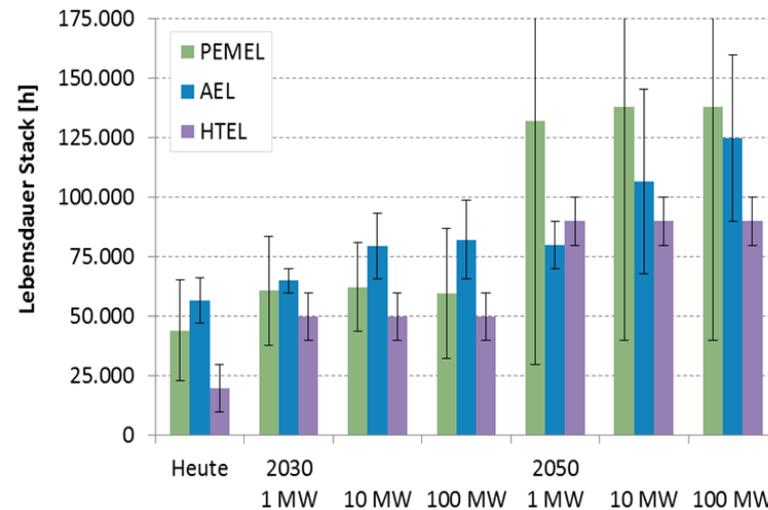
Elektrischer Energiebedarf

- Langfristig (2030/50) nimmt die Effizienz nur unwesentlich zu.



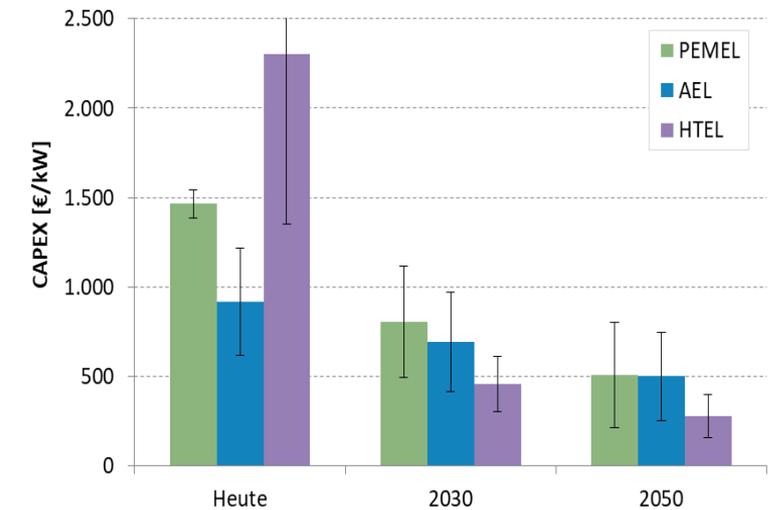
(Technische) Lebensdauer Stack

- Das Potenzial ist für alle drei Technologien noch nicht ausgereizt.



Investitionskosten

- Bereits heute ermöglichen Skaleneffekte erhebliche CAPEX-Reduktionen.



Schwarze Balken geben die Standardabweichung an.

Welche zukünftige Herausforderungen bestehen für die Wasserelektrolyse? Auf europäischer Ebene gibt es klare Anforderungen!

- Entwicklungsziele des Fuel Cell and Hydrogen 2 Joint Undertaking für die Wasserelektrolyse (2018)¹

Kenngroße	Einheit	2017 Status AEL ²	2030 Ziele AEL ²	2017 Status PEMEL ²	2030 Ziele PEMEL ²	2017 Status HTEL ³	2030 Ziele HTEL ³
Elektrischer Energiebedarf	kWh/kg	51	48	58	50	41	37
Investkosten (System)	€/(kg/d)	1.600	800	2.900	1.000	12.000	1.500
	€/kW	750	400	1.200	480	7.000	970
Stromdichte	A/cm ²	0,5	0,8	2,0	2,5	--	--
Degradation	%/1000h	0,13	0,10	0,250	0,120	2,8	0,5
Einsatz kritischer Katalysator-Materialien	mg/W	7,3 (Cobalt)	0,7 (Cobalt)	5,0 (Pt und Ir)	0,4 (Pt und Ir)	--	--

1: http://www.fch.europa.eu/sites/default/files/MAWP%20final%20version_endorsed%20GB%2015062018%20%28ID%203712421%29.pdf

2: Output of hydrogen meeting ISO 14687-2 at pressure of 30 bar

3: Output of hydrogen meeting ISO 14687-2 at atmospheric pressure

Welche zukünftige Herausforderungen bestehen für die Wasserelektrolyse?

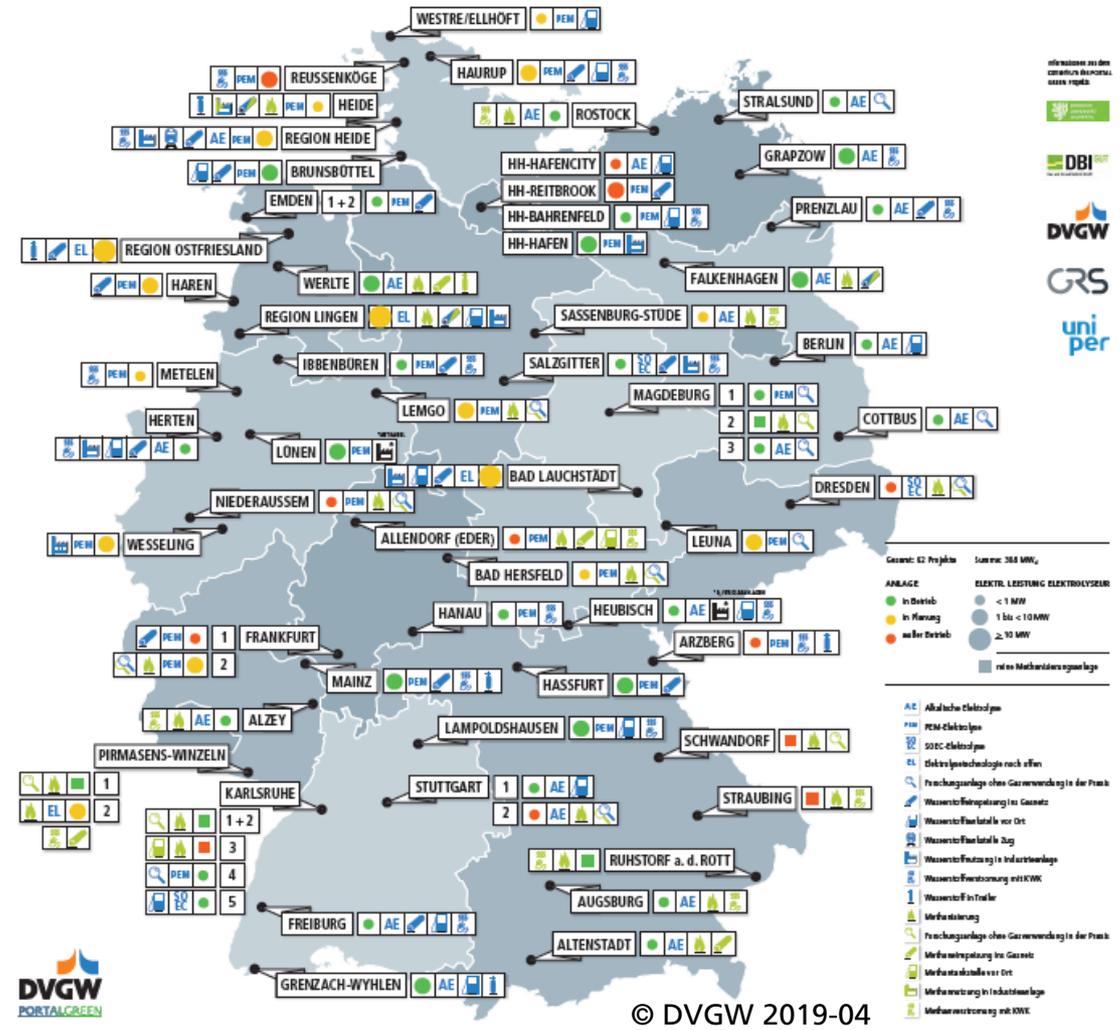
Zwischenfazit: Kontinuierliche FuE ist notwendig zur Erreichung der Zielwerte.

- Für alle drei Technologien konnten in den letzten 5-10 Jahren erhebliche Fortschritte erzielt werden
 - KPI-Ziele sind einzeln erreichbar, müssen jedoch in Summe betrachtet werden (z.B. geringere Systemkosten bei verbesserter Effizienz und höherer Lebensdauer)
- Alkalische Wasserelektrolyse (TRL 8-9)
 - Verbesserte Elektrodenaktivität für höhere Stromdichten
 - (Vereinfachte verfahrenstechnische Prozessführung)
- PEM-Wasserelektrolyse (TRL 7-8)
 - Vergrößerung der Zellfläche und höhere Stromdichten
 - Starke Reduzierung der PGM-Beladung und gleichzeitige Erhöhung der Lebensdauer
- Hochtemperatur-Dampfelektrolyse (TRL 4-6)
 - Deutliche Erhöhung der Lebensdauer und Zyklenfestigkeit
 - Übertragung der hohen Effizienz von Zell- auf Systemebene (Systemintegration)

Aktueller Stand der Elektrolyse in PtX-Anwendungen in Deutschland

Industrielle Anlagen sind immer noch die Ausnahme.

- Seit 2010 diverse PtX-Installationen
 - kW und kleiner einstelliger MW-Bereich
 - Erste zweistellige MW-Anlagen im Bau
 - Gesamtleistung von **55 MW** in Betrieb/Planung
- Verschiedene Anwendungen
 - Direkte H₂-Einspeisung ins Erdgasnetz
 - Methanisierung und SNG-Einspeisung
 - Bereitstellung von Regelleistung
 - Brennstoffzellen-Mobilität
 - Industrieller Einsatz und PtX
- Demonstrationsvorhaben mit öffentlicher Förderung



Aktueller Stand der Elektrolyse in PtX-Anwendungen in Deutschland

Erfreulich: Hohe technologische Vielfalt in vielen Anwendungen

Carbon2Chem®

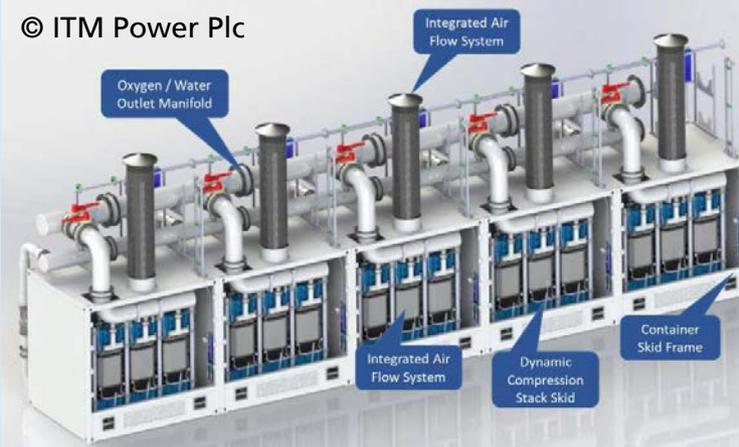
- AEL-System von Thyssenkrupp UCE
 - Atmosphärisch
 - 2 MW / 440 Nm³/h H₂
 - „short stack“ für 5MW-Block
- Methanolproduktion aus Hüttenabgasen



2 MW pilot plant in the C2C project

REFHYNE

- PEMEL-System von ITM Power
 - Shell Rheinland Raffinerie
 - 10 MW / 1.800 Nm³/h H₂
 - 15 Stacks à 670 kW
- Lastmanagement und Ersatz von grauem Wasserstoff



Standardised 10 MW stack skid

GrInHy

- HTEL-System von Sunfire
 - 150/30 kW RSOC-System
 - 40 Nm³/h im EL-Betrieb
 - 30 kW im BZ-Betrieb
- CO₂-arme Stahlerzeugung und onsite Stromerzeugung

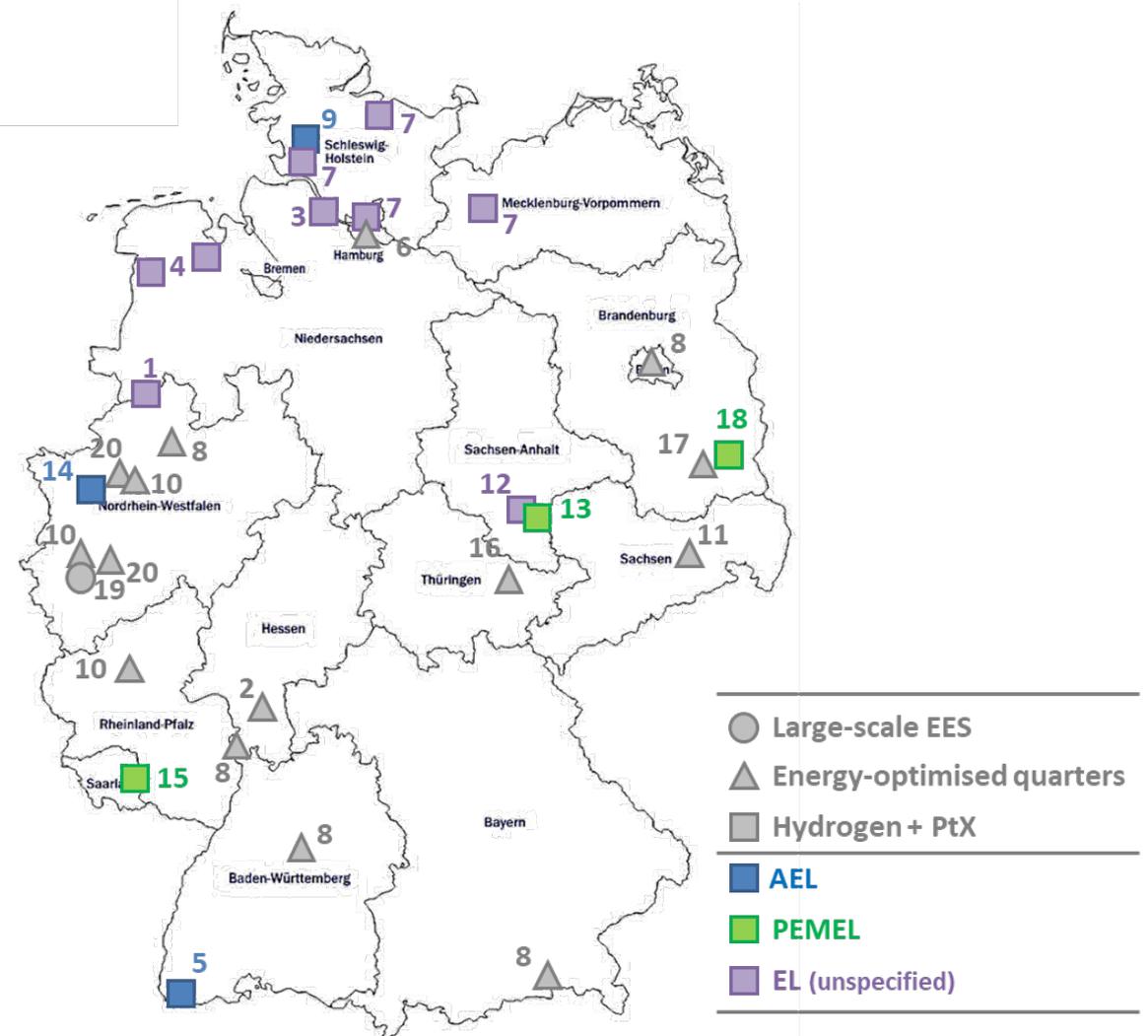


HyLink Gen. 0 in Salzgitter

Aktueller Stand der Elektrolyse in PtX-Anwendungen in Deutschland

Die "Reallabore für die Energiewende" leiten die nächste Phase ein.

- Ideenwettbewerb des Bundeswirtschaftsministeriums "Reallabore der Energiewende"
- Themen
 - Sektorkopplung und Wasserstofftechnologien
 - Energie optimierte Quartiere
- Auswahl von 20 Skizzen aus 90 Einreichungen
 - Berücksichtigung von Strukturwandelregionen
 - Dominanz norddeutscher Projekte



Aktueller Stand der Elektrolyse in PtX-Anwendungen in Deutschland

Die "Reallabore für die Energiewende" leiten die nächste Phase ein.

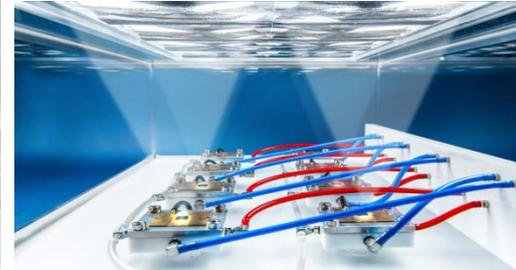
	Akronym	PtX	CO2 source	Main applications	Electrolysis
1	CCU P2C Salzbergen	PtCH ₄	CCU waste incineration	SNG Einspeisung	??
3	DOW Stade-Green MeOH	PtL	CCU GT power plant	MeOH	??
4	Element Eins	PtH	--	H2 injection	100 MW (wind)
5	H2 Wyhlen	PtH	--	H2 for trade + heat	10 MW AEL (hydro)
7	Norddt. Reallabor	PtH + PtCH ₄	CCU refinery	SNG injection + H2 for mobility	77 MW
9	ReWest100	PtH + PtC	CCU cement plant	H2 (cavern/grid) for chemicals	30 MW AEL (wind)
12	EnergieparkBL	PtH	--	H2 (cavern/grid): mobility + chemicals	35 MW (wind)
13	GreenHydroChem	PtH	--	H2 for refinery	50 MW PEMEL
14	H2Stahl	PtH	--	H2 for steel	50 MW AEL
15	HydroHub Fenne	PtH	--	H2 for steel + injection + mobility + heat	17.5 MW PEMEL
18	RefLau	PtH	--	H2 for mobility + injection + trade	10 MW PEMEL

Schlussfolgerungen und Fazit

- Für alle drei Technologien konnten in den letzten 5-10 Jahren erhebliche Fortschritte erzielt werden
 - Die Wasserelektrolyse ist auch für große Leistungen bereits heute prinzipiell verfügbar
 - Aber Erreichung der 2030er Zielwerte ist anspruchsvoll und erfordert kontinuierliche FuE
- Wasserelektrolyse und PtX-Technologien sind Schlüsselemente für die Sektorenkopplung
 - In Deutschland sind mehr als 35 PtX-Projekte (insgesamt 55 MW) derzeit im Betrieb oder im Bau.
 - Durch den Ideenwettbewerb „Reallabore für die Energiewende“ wird es in den nächsten Jahren zu einer Neuinstallation von über 300 MW kommen.
 - Die Verwendung von grünem Wasserstoff in der Industrie (Stahl und Rohstoffe) gewinnt an Bedeutung
- Weltweit ist die Elektrolyseindustrie eher kleinteilig und fragmentiert, Deutschland verfügt aber über eine vergleichsweise breite Hersteller- und Zulieferindustrie in allen relevanten Technologien
 - Diese gute Ausgangsbasis sollte in dem stark wachsenden Markt gehalten werden!

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Fotos © Fraunhofer ISE



Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE

Dr. Tom Smolinka

www.ise.fraunhofer.de

www.pem-electrolysis.de

tom.smolinka@ise.fraunhofer.de