



## PEM – Elektrolyseur Grüne Wasserstoffproduktion

**Kurzbeschreibung:** Die **PEM-Elektrolyse** (Protonenaustausch-Membran-Elektrolyse) ist ein Verfahren zur Erzeugung von Wasserstoff, durch die elektrochemische Spaltung von Wasser. Sie nutzt eine Protonenaustausch-Membran als festen Elektrolyt und zeichnet sich durch hohe Dynamik und gute Koppelbarkeit mit intermittierenden Stromquellen aus.

### Grundprinzip der Elektrolyse

Elektrolyse bezeichnet die Spaltung von Wasser ( $H_2O$ ) in Wasserstoff ( $H_2$ ) und Sauerstoff ( $O_2$ ) durch elektrische Energie. Dabei verbindet eine Gleichstromquelle zwei Elektroden in einem wässrigen Medium. Ein Elektrolyt ermöglicht den Ionentransport zwischen den Elektroden. Wasserstoff entsteht an der negativ geladenen Kathode und Sauerstoff an der positiv geladenen Anode [1,2]. Die Haupttechnologien der Wasserelektrolyse sind die alkalische Elektrolyse (AEC), die Protonenaustausch-Membran-Elektrolyse (PEMEC), Anionenaustausch-Membran-Elektrolyse (AEMEC) und die Festoxid-Elektrolyse (SOEC) [2]. Während AEC und die PEMEC bereits kommerziell etabliert sind und SOEC vor allem aufgrund ihres Hochtemperaturbetriebs hohe Wirkungsgrade ermöglicht, gilt die AEM-Elektrolyse als vielversprechende Option, insbesondere für modulare und dezentrale Anlagen [3].

### PEM-Elektrolyse

Bei der PEM-Elektrolyse dient eine Protonenaustausch-Membran als Elektrolyt, die nur für Protonen ( $H^+$ ) durchgängig ist. Dies ermöglicht die Erzeugung von hochreinem Wasserstoff bei hoher Effizienz [1,2].

### Reaktionsgleichungen:

- Anode:  $H_2O \rightarrow \frac{1}{2} O_2 + 2 H^+ + 2 e^-$
- Kathode:  $2 H^+ + 2 e^- \rightarrow H_2$

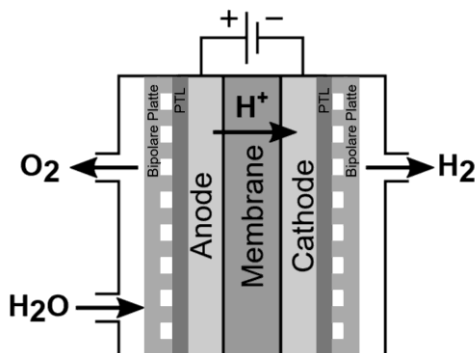


Abb. 1: Schematische Darstellung der PEM-Elektrolyse [4].

### Aufbau eines PEM-Elektrolyseurs

Die zentrale Komponente ist die **Membran-Elektroden-Einheit (MEA)**, die aus der **Protonenaustausch-Membran** (z. B. Nafion®) und mit **Edelmetall** (z. B. Platin, Iridium) als **Katalysator** beschichteten **Elektroden** besteht [5]. Das saure Milieu innerhalb der Membran erfordert Katalysatoren mit hoher elektrokatalytischer

Aktivität und Selektivität sowie ausreichender chemischer Stabilität, weshalb überwiegend Edelmetalle eingesetzt werden [3,6]. Auf beiden Seiten der MEA befinden sich **poröse Transportschichten (PTL)**, die den Gas- und Wassertransport unterstützen. **Bipolare Platten (BPP)** sorgen für den Zu- und Abfluss der Reaktionsstoffe und Produkte sowie für die mechanische Stabilität der Zelle. Eine wesentliche Aufgabe der bipolaren Platten ist zudem die Herstellung der elektrischen Verbindung zwischen den Zellen, indem sie die Anode und Kathode benachbarter Zellen elektrisch miteinander verbinden. Mehrere dieser Zellen werden zu einem **Stack** übereinandergestapelt [5]. Auf Systemebene umfasst ein PEM-Elektrolyseur zusätzliche Komponenten wie Gleichrichter, Transformator, Kühlsysteme und Wasseraufbereitungssysteme [7].

Die Größe und Anzahl der Zellen in einem Stack, die Anzahl der Stacks in einem System und zusätzlich notwendige periphere Komponenten des Systems können je nach Konfiguration variieren.

**Vorteile:** Hohe Leistungsdichten; schnelle Dynamik, gut geeignet für variable erneuerbare Energien; kompakte Bauweise; hohe Wasserstoffreinheit; Betrieb unter Druck möglich; gute Skalierbarkeit [3].

**Herausforderungen:** Hohe Investitionskosten insbesondere durch Edelmetall-Katalysatoren, bipolare Platten und Systemkomponenten; hohe Anforderungen an Wasserreinheit; begrenzte Lebensdauer der Stacks [2,3,8].

### Wirtschaftliche und ökologische Aspekte

Die Lebensdauer bzw. Austauschintervalle der Stacks sind zwei der wichtigsten Kostentreiber von PEM-Elektrolyseuren. Die in den Stacks verwendeten Materialien machen einen erheblichen Anteil der Gesamtinvestitionskosten (CAPEX) aus und der Austausch der Stacks verursacht zusätzliche Betriebskosten (OPEX). Die Abhängigkeit von seltenen Edelmetallen ist mit wirtschaftlichen Risiken verbunden, da deren Verfügbarkeit begrenzt ist und die Preise hoch sind. Ökologisch relevant sind vor allem die Protonenaustausch-Membranen auf Basis von fluorierten Polymeren. Zukünftige Fortschritte in der Membrantechnik, Katalysatorentwicklung und Systemintegration können zur Kostensenkung beitragen [3,5].

**Anwendung:** PEM-Elektrolyseure eignen sich besonders für die Erzeugung von grünem Wasserstoff aus erneuerbaren Energien (Wind, PV). Sie liefern Wasserstoff hoher Reinheit, eignen sich für industrielle Anwendungen mit hohen Gasqualitätsanforderungen und reagieren schnell auf schwankende Stromzufuhr. Durch ihre kompakte, modulare Bauweise sind sie zudem für raumbegrenzte Anlagen und zur Stabilisierung von Energiesystemen gut geeignet [3,9].

### Beispielprojekte

#### H2Future

**Projektstandort:** voestalpine Stahl GmbH, Linz

**Inbetriebnahme:** 2019

**Projektpartner:** voestalpine, Siemens, VERBUND, Austrian Power Grid, TNO, K1-MET

**Ziel:** Demonstration einer großtechnischen PEM-Elektrolyse zur Erzeugung von erneuerbarem H<sub>2</sub>

**Anschlussleistung:** 6 MW (12 Stacks á 500 kW - Silyzer 300 von Siemens)

**H<sub>2</sub>-Produktion:** ca. 1.200 Nm<sup>3</sup>/h

**Fokus:** Anbindung ans Stromnetz für Systemdienstleistungen + Integration in Hochofenprozess

### ZEUS (Zero Emission through Sectorcoupling)

Im Projekt ZEUS wird der PEM-Elektrolyser der voestalpine durch zusätzliche Anlagekomponenten zur Produktion von hochreinem Wasserstoff (Reinheit 5.0) erweitert. Dies umfasst drei Verdichterstufen, eine Reinigungseinheit (< 1 ppm Sauerstoff und Wasser), einen Zwischenspeicher, sowie eine Trailerabfüllung bei variablen Drücken von 300, 380 und 500 bar.

#### Technische Daten PEM-Elektrolyser Silyzer 300 [1].

Parameter	Wert
Elektr. Nennleistung	6 MW <sub>el</sub>
H <sub>2</sub> -Produktionskapazität	~ 1200 Nm <sup>3</sup> /h
Gesamtwirkungsgrad (HHV)	> 75 %
Anfahrzeit (heiß)	< 1 min
Dynamik (ramp rate)	10 %/s
Minimallast	20 % (Einzelstack)
Lebensdauer Stack	~ 10 Jahre
Lebensdauer Gesamtanlage	~ 20 Jahre
H <sub>2</sub> Reinheit	99,999 % (mit DeOxo)

### Charakteristische Daten PEM-Elektrolyse [2,3,5,10,11]

Parameter	Typischer Wert	Anmerkung	Quelle
Elektrolyt	Polymer-Membran	z. B. Nafion®	[5]
Elektroden/Katalysatoren	Edelmetalle (Platin, Iridium)	-	[5]
Technologiestatus	kommerziell verfügbar	TRL 8	[7]
Lastbereich	0–100 %	% der Nennlast	[6]
Gesamtwirkungsgrad (LHV)	60–70 %	hängt von Reinheit/Druck ab	[6]
Temperatur	50–80 °C	Abwärmtemperatur (Ausgang Wärmetauscher): 40–70 °C	[6]
Anfahrzeit (heiß)	< 10 s	-	[6]
Anfahrzeit (kalt)	5–10 min	-	[6]
Dynamik (ramp rate)	> 10 %/s	% der Nennleistung pro Sekunde	[11]
Lebensdauer Stack	40.000–60.000 h	-	[3]
H <sub>2</sub> -Reinheit	99,999 %	Inkl. DeOxo	[10]

#### Quellen:

- [1] Siemens ENergy NEB. Overview of the PEM Silyzer Family - 2020-09-30 GIZ Workshop 2020.
- [2] Gerloff N. Comparative Life-Cycle-Assessment analysis of three major water electrolysis technologies while applying various energy scenarios for a greener hydrogen production. Journal of Energy Storage 2021;43:102759. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102759>.
- [3] Aminaho EN, Aminaho NS, Aminaho F. Techno-economic assessments of electrolyzers for hydrogen production. Applied Energy 2025;399:126515. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.126515>.
- [4] Böhm H. Techno-economic assessment of emerging power-to-gas technologies using advanced generic methods. Doctoral Thesis. Montanuniversität Leoben, 2022.
- [5] Staudacher M, Goes D, Ahn S, Vrucak D, Gießmann T, Bauer-Siebenlist B, et al. Conceptual Recycling Chain for Proton Exchange Membrane Water Electrolyzers—Case Study Involving Review-Derived Model Stack. Recycling 2025;10:121. <https://doi.org/10.3390/recycling10030121>.
- [6] Buttler A, Spliethoff H. Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2018;82:2440–54. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.003>.
- [7] Holst M, Aschbrenner S, Smolinka T, Voglstätter C, Grimm G. Cost Forecast for Low Temperature Electrolysis - Technology Driven Bottom-Up Prognosis for PEM and Alkaline Water Electrolysis Systems 2021.
- [8] IRENA. Green hydrogen cost reduction: Scaling up electrolyzers to meet the 1.5C climate goal. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency; 2020.
- [9] Zhao G, Kraglund MR, Frandsen HL, Wulff AC, Jensen SH, Chen M, et al. Life cycle assessment of H<sub>2</sub>O electrolysis technologies. International Journal of Hydrogen Energy 2020;45:23765–81. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.05.282>.
- [10] Iyer RK, Prosser JH, Kelly JC, James BD, Elgowainy A. Life-cycle analysis of hydrogen production from water electrolyzers. International Journal of Hydrogen Energy 2024;81:1467–78. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.06.355>.
- [11] Wang J, Wen J, Wang J, Yang B, Jiang L. Water electrolyzer operation scheduling for green hydrogen production: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2024;203:114779. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114779>.