

PEM-Brennstoffzelle vs. Festoxidzelle: Wer gewinnt das Rennen um die Dekarbonisierung?

Zwei Technologien, zwei Missionen – wie PEM und SOFC die Wasserstoffwirtschaft aufteilen und warum der wahre Sieger noch nicht feststeht.

TECHNOLOGIE I

PEM-Brennstoffzelle

Proton-Exchange-Membrane. Kompakt, schnell startend, empfindlich gegenüber Verunreinigungen. Weltmarktführer im Schwerlastverkehr und der grünen Wasserstoffelektrolyse.

TECHNOLOGIE II

SOFC / Festoxidzelle

Solid Oxide Fuel Cell. Hochtemperaturbetrieb, brennstoffflexibel, kein Platin. Der stille Champion für Grundlaststrom, Rechenzentren und die Industrie.

Die Physik entscheidet – warum Betriebstemperatur alles ist

Der fundamentale Unterschied zwischen beiden Zelltypen liegt in der Betriebstemperatur – und diese Differenz zieht eine Trennlinie durch fast jede Eigenschaft, die im Markt zählt.

Die PEM-Brennstoffzelle arbeitet bei 60 bis 80 Grad Celsius. Ihre Polymermembran leitet Protonen, benötigt aber hochreinen Wasserstoff (Reinheit 5.0, also 99,999 Prozent). Platin dient als Katalysator – unverzichtbar bei Niedrigtemperatur, aber ein dauerhafter Kostentreiber und eine Abhängigkeit von volatilen Edelmetallmärkten. Das Positive: Die PEM ist innerhalb von Sekunden betriebsbereit, reagiert dynamisch auf Lastwechsel und ist kompakt verbaubar.

Die SOFC hingegen betreibt ihren elektrochemischen Prozess bei 650 bis 1.000 Grad Celsius. Zirkondioxid-Keramik ersetzt die Polymermembran, Nickel ersetzt Platin. Bei diesen Temperaturen können Kohlenwasserstoffe wie Erdgas, Biogas, Ammoniak oder E-Fuels direkt *intern reformiert* werden – die SOFC erzeugt ihren Wasserstoff also selbst aus dem zugeführten Brennstoff.

"Die Festoxid-Technologie ist auf dem besten Weg, schon bald die Kostenparität von PEM- und Alkali-Systemen zu erreichen – und sobald dies geschafft ist, wird sie einen noch höheren Mehrwert bieten."

MIKAEL JANSEN, DIRECTOR BUSINESS DEVELOPMENT, ELCOGEN

Die entstehende Hochtemperatur-Abwärme der SOFC ist kein Nachteil, sondern ein Aktivposten: In der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) steigt der Gesamtwirkungsgrad von rund 60 Prozent elektrisch auf über 85 Prozent. Bloom Energy gibt an, dass durch die Integration von Brennstoffzellen mit Absorptionskältemaschinen der Gesamtwirkungsgrad auf über 90 Prozent steigen kann.

~55 % MAX. EL. WIRKUNGSGRAD PEM- ELEKTROLYSEUR	> 85 % SOFC GESAMTWIRKUNGSGRAD (KWK)	38 % CAGR ELEKTROLYSEURMARKT 2025–2031
---	--	---

Technologievergleich: Die wichtigsten Parameter

Merkmal	PEM-Brennstoffzelle / Elektrolyseur	SOFC / SOEC
Betriebstemperatur	60–80 °C [Schnellstart]	650–1.000 °C [Kein Kaltstart]
El. Wirkungsgrad	50–60 % (Elektrolyseur: ~55 %)	55–65 % (KWK-Gesamt > 85 %)
Katalysator	Platin [Edelmetall]	Nickel / Keramik [Kein Platin]
Brennstoff	Nur H ₂ (Reinheit ≥ 99,99 %)	H ₂ , Erdgas, Biogas, Ammoniak, E-Fuels [Flexibel]
Anwendung	Schwerlast-LKW, Schiene, maritime, grüne Elektrolyse	Stationär, Rechenzentren, Industrie, KWK
Startverhalten	Sekunden bis Minuten [Ideal mobil]	Stunden [Grundlast]
CAPEX	Mittel – profitiert von Skaleneffekten der Automobilindustrie	Hoch – Keramikfertigung komplex, Kosten fallen durch Scale-up
Marktreife	Hoch – GW-Fabriken von Siemens Energy, Nucera	Mittel-Hoch – kommerzielle Skalierung beginnt jetzt
Reversibel	PEM-Elektrolyseur separat erhältlich	RSOC / SOEC: Zelle läuft reversibel als Elektrolyseur [Joker]

Die Schwergewichte – wer treibt die Kommerzialisierung?

PEM-SEITE: SIEMENS ENERGY & NUCERA

Im PEM-Bereich dominieren zwei europäische Industriegiganten die Großprojekt-Pipeline. Siemens Energy entwickelt PEM-Elektrolyseure seit 30 Jahren und betreibt kommerzielle Anlagen seit über einem Jahrzehnt. Jüngst haben Siemens Energy und BASF gemeinsam einen 54-MW-PEM-Elektrolyseur am BASF-Standort Ludwigshafen in Betrieb genommen – den derzeit größten PEM-Elektrolyseur Deutschlands –, der bis zu eine Tonne CO₂-freien Wasserstoff pro Stunde erzeugen kann.

thyssenkrupp nucera baut auf alkalischer Wasserelektrolyse in industrieller Gigawatt-Dimension. Nucera hat bereits über 3 GW Elektrolyseurkapazität kontrahiert, darunter eine mehr als 2-GW-Anlage für Air Products in Saudi-Arabien sowie 700 MW für das erste kommerzielle Grünstahlwerk H₂ Green Steel in Schweden.

<p>Siemens Energy – Elyzer</p> <p>Modulare PEM-Elektrolyseur-Familie, seit über 30 Jahren entwickelt. 1,25-MW-Module für dezentrale Anwendungen.</p> <p>Flaggschiff: 54 MW bei BASF Ludwigshafen.</p>	<p>thyssenkrupp nucera – scalum®</p> <p>Standardisierte alkalische 20-MW-Module für den Gigawatt-Maßstab. Weltmarktführer bei industriellen Elektrolyseanlagen. Über 600 Projekte mit mehr als 10 GW installiert.</p> <p>Flaggschiff: 700 MW für H₂ Green Steel (Schweden), >2 GW Neom (Saudi-Arabien).</p>
---	---

SOFC-SEITE: BLOOM ENERGY, SUNFIRE & ELCOGEN

Auf der SOFC-Seite sind die Marktanteile konzentrierter, die Anwendungen aber spezifischer. Bloom Energy aus dem Silicon Valley ist der unbestrittene Weltmarktführer bei stationären Festoxidzellen. Das Unternehmen hat bereits über 1,5 GW seiner Systeme weltweit installiert und beliefert Fortune-500-Unternehmen sowie Rechenzentrumsbetreiber.

Das Wachstum beschleunigt sich dramatisch: Bloom Energy schloss eine 5-Milliarden-Dollar-Partnerschaft mit Brookfield Asset Management, um SOFC-Technologie in KI-Rechenzentren weltweit zu skalieren. Gleichzeitig unterzeichnete das Unternehmen einen Vertrag mit dem US-Energieversorger AEP über bis zu 1 GW Festoxidzellen – die größte kommerzielle Beschaffung von Brennstoffzellen in der Geschichte.

SOFC-MARKTFÜHRER IM ÜBERBLICK

- Bloom Energy (USA): Weltmarktführer stationäre SOFC. > 1,5 GW installiert. Fokus KI-Rechenzentren & US-Industrie.
- Ceres Power (Großbritannien): Technologielizenzgeber. Lizenznehmer: Bosch, Doosan, Weichai. Bosch baut Großserienfertigung in Deutschland.
- Elcogen (Estland/Finnland): Einer der effizientesten Stack-Hersteller Europas. Kooperation mit Casale für grünes Ammoniak (SOEC).
- Sunfire (Deutschland): Spezialist für reversible RSOC-Systeme. Pilot SOEC mit 84 % LHV-Wirkungsgrad. Fokus: grüner Wasserstoff & Power-to-X.
- Kyocera / Mitsubishi Power (Japan): Mikro-KWK-Anlagen für Wohnhäuser bis industrielle Kraftwerke.

Der Joker: reversible Festoxidtechnologie und grünes Ammoniak

Der vielleicht bedeutendste technologische Schachzug der SOFC-Welt liegt nicht in der Stromerzeugung, sondern in ihrer Umkehrung. Reversible Festoxidsysteme (RSOC) können dieselbe Zelle sowohl als Brennstoffzelle (Strom aus Wasserstoff) als auch als Elektrolyseur (Wasserstoff aus Strom) betreiben. Die SOEC-Variante nutzt dabei die außerordentliche thermische Effizienz der Hochtemperaturkinetik.

Besonders brisant ist die Verbindung zur Ammoniakbranche. Ammoniak ist der Grundstoff für Düngemittel und damit für die Ernährung von über vier Milliarden Menschen – hergestellt mit fossilen Brennstoffen nach dem mehr als 100 Jahre alten Haber-Bosch-Verfahren. Elcogen und der Schweizer Prozesschemie-Konzern Casale arbeiten an einer

radikalen Neugestaltung: Die SOEC-Technologie nutzt industrielle Prozessabwärme aus der Ammoniakproduktion, um Dampf zu erzeugen und damit den Stromverbrauch der Wasserelektrolyse deutlich zu reduzieren.

"Die Festoxid-Technologie ist ideal für die Einbindung in industrielle Prozesse geeignet, da der Wasserstoff direkt am Bedarfsort als Ausgangsstoff produziert wird."

FEDERICO ZARDI, CEO, CASALE SA

KI-Rechenzentren: Die neue Domäne der Festoxidzelle

Der dramatischste Treiber für die SOFC-Skalierung ist ein auf den ersten Blick überraschender: Künstliche Intelligenz. Während KI-Modelle immer leistungsfähiger werden, explodiert der Strombedarf der Rechenzentren, die sie betreiben. Das US-Stromnetz hinkt dieser Nachfrage hinterher.

Blooms Berichten zufolge planen immer mehr Rechenzentren, ihre Abhängigkeit vom Netz zu verringern – bis 2030 soll ein Drittel vollständig netzunabhängig sein. Die SOFC bietet dabei entscheidende Vorteile: Sie hat eine vergleichbare Investitionskostenposition mit Gasturbinen, verbraucht dabei 15 bis 20 Prozent weniger Brennstoff und erfordert aufgrund deutlich reduzierter Emissionen einfachere Genehmigungsverfahren.

Bloom-Brennstoffzellen können auf einem Acre doppelt so viel Leistung liefern wie Gasturbinen oder Kolbenmotoren – bis zu 100 MW pro Acre. Sunfire meldete einen LHV-Wirkungsgrad von 84 Prozent in einer SOEC-Einheit mit mehreren Megawatt – industriell verifiziert, kein Laborversprechen.

Die Hürden: Was die SOFC noch zurückhält

Die technischen Vorzüge der Festoxidzelle sind real – aber sie haben ihren Preis. Vier strukturelle Herausforderungen bestimmen, wie schnell die Technologie skalieren kann.

- **Thermischer Stress und Betriebszyklus:** Bei 800 bis 1.000 Grad Celsius entstehen beim Aufheizen und Abkühlen extreme thermische Spannungen in den Keramikkomponenten. Ein häufiger Wechsel zwischen An- und Aus-Zustand verkürzt die Lebensdauer drastisch. Die SOFC ist konstruktiv ein Grundlastwerkzeug.
- **Hohe Anfangsinvestition:** Die Fertigung von Hochleistungskeramiken ist technisch anspruchsvoll und derzeit noch kapitalintensiver als die Polymermembranherstellung.
- **Fehlende Skaleneffekte:** Während die PEM früh von der Automobilindustrie profitierte, fehlte der SOFC dieser Massenmarkt. Der Markt holt dies nun nach, aber mit einem Jahrzehnt Verzögerung.
- **Kein Schnellstart:** Das stundenlange Hochfahren macht die SOFC für jede dynamische Anwendung unbrauchbar. Im PKW ist sie schlicht nicht einsetzbar.

Strategische Arbeitsteilung: keine Konkurrenten, sondern Komplemente

Die entscheidende Erkenntnis dieses Vergleichs ist, dass PEM-Brennstoffzelle und SOFC keine Konkurrenten sind, die denselben Markt umkämpfen. Sie sind physikalisch optimiert für grundverschiedene Aufgaben – und das Energiesystem der Zukunft braucht beide.

Die PEM-Zelle und ihr Elektrolyseur-Pendant bleiben unverzichtbar für alle Anwendungen, die Flexibilität und schnelle Reaktion erfordern: Grüner Wasserstoff aus erneuerbaren Quellen, Schwerlast-LKW auf langen Strecken, Züge auf nicht elektrifizierten Strecken, maritime Systeme.

Die SOFC übernimmt dort, wo Effizienz und Dauerläuferbetrieb zählen: Stationäre Kraft-Wärme-Kopplung, Grundlaststrom für KI-Rechenzentren, industrielle Prozessintegration und – als SOEC – die Produktion von grünem Wasserstoff und Ammoniak unter Nutzung industrieller Abwärme.

Die Energiewende braucht keine Entscheidung zwischen beiden – sie braucht beide.

<p>PEM: Stärken & Zukunftsfelder</p> <p>Schnellstart, Kompaktheit, gut integrierbar mit volatilen Erneuerbaren. Unverzichtbar für grüne Wasserstoffherzeugung im Netzverbund.</p> <p>Wachstumsfelder: Schwerlast-LKW, Schiene, maritime Anwendungen, Industrielektrolyse.</p>	<p>SOFC: Stärken & Zukunftsfelder</p> <p>Höchster Wirkungsgrad, Brennstoffflexibilität, kein Platin. Der stille Champion für alle Systeme, die 24/7 laufen.</p> <p>Wachstumsfelder: KI-Rechenzentren, Chemieindustrie, grünes Ammoniak (SOEC), industrielle KWK.</p>
---	--

QUELLEN & HINWEISE

Bloom Energy (Data Center Power Reports 2025/2026, Pressemitteilungen), thyssenkrupp nucera (Projektankündigungen), Siemens Energy (Produktdokumentation), Elcogen / Casale (Partnerschaftsmemorandum), MarketsandMarkets Electrolyzer Market Report 2026, IEA Hydrogen Reports, Ceres Power / Sunfire Pressemitteilungen. Alle Zahlenangaben basieren auf öffentlich verfügbaren Quellen (Stand: März 2026).

Dieser Artikel dient der Information und stellt keine Investitionsempfehlung dar.