

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.

Von **Gerald Friederici** · März 2026

TECHNOLOGIE I	TECHNOLOGIE II
PEM-Brennstoffzelle Proton-Exchange-Membrane. Kompakt, schnell startend, empfindlich gegenüber Verunreinigungen. Weltmarktführer im Schwerlastverkehr und der grünen Wasserstoffelektrolyse.	SOFC / Festoxidzelle Solid Oxide Fuel Cell. Hochtemperaturbetrieb, brennstoffflexibel, kein Platin. Der stille Champion für Grundlaststrom, Rechenzentren und die Industrie.

Die Erzählung klang lange Zeit einfach: Die PEM-Brennstoffzelle würde Millionen von Wasserstoff-PKW antreiben und die Mobilität revolutionieren. Heute, im Jahr 2026, ist diese Vision weitgehend verblasst – der batterieelektrische Antrieb hat das Segment nahezu vollständig übernommen. Was bleibt, ist keine gescheiterte Technologie, sondern eine, die ihren wahren Platz gefunden hat: in der Schwerlastlogistik, auf den Weltmeeren und als Herzstück der grünen Wasserstoffelektrolyse.

Gleichzeitig rückt eine Technologie ins Rampenlicht, die lange im Schatten der schnellen PEM-Zelle stand: die Festoxidzelle (SOFC). Mit Wirkungsgraden jenseits aller Maßstäbe und einer Brennstoffflexibilität, die sie zum Brückentechnologie-Champion der Energiewende macht, besetzt die SOFC heute Räume, die kein Akkumulator und keine PEM-Zelle je ausfüllen könnte – Rechenzentren, Industrieanlagen, die chemische Grundstoffindustrie.

Dieser Artikel beleuchtet beide Technologien ohne Mythen: ihre physikalischen Stärken, die Marktdynamik und die strategische Arbeitsteilung, die sich für die kommenden Jahrzehnte abzeichnet.

~55 % Max. el. Wirkungsgrad PEM-Elektrolyseur	> 85 % SOFC Gesamtwirkungsgrad (KWK)	38 % CAGR Elektrolyseurmarkt 2025-2031
---	---	--

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. Diese Eigenschaften machten sie zur einzigen sinnvollen Wahl für Fahrzeuge.

Die SOFC hingegen betreibt ihren elektrochemischen Prozess bei 650 bis 1.000 Grad Celsius. Zirkondioxid-Keramik ersetzt die Polymermembran, Nickel ersetzt Platin. Der entscheidende Vorteil: 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. Das senkt die Anforderungen an die Wasserstoffinfrastruktur dramatisch.

„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 – ein Wert, den kein Verbrennungsmotor und kein herkömmliches Gaskraftwerk auch nur annähernd erreicht.

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 Autoindustrie	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; die modularen Silyzer-Systeme sind inzwischen das Rückgrat mehrerer Großprojekte. 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 einer anderen Strategie: statt PEM setzt das Dortmunder Unternehmen auf alkalische 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. Das AWE-Verfahren ist im Großmaßstab heute das günstigste – ein entscheidender Vorteil für kapitalintensive Projekte.

Siemens Energy – Elyzer	thyssenkrupp nucera – scalum®
Modulare PEM-Elektrolyseur-familie, seit über 30 Jahren entwickelt. 1,25-MW-Module für dezentrale Anwendungen. Gigawatt-Fabrik in Berlin im Gemeinschaftsunternehmen mit Air Liquide. <i>Flaggschiff-Projekt:</i> 54 MW bei BASF Ludwigshafen – weltweite Premiere in der chemischen Großindustrie.	Standardisierte alkalische 20-MW-Module für den Gigawatt-Maßstab. Weltmarktführer bei industriellen Elektrolyseanlagen. Über 600 Projekte mit mehr als 10 GW installiert. <i>Flaggschiff-Projekt:</i> 700 MW für H2 Green Steel (Schweden), >2 GW Neom (Saudi-Arabien).

SOFC-Seite: Bloom Energy, Sunfire & Elcogen

Auf der SOFC-Seite sind die Marktanteile konzentrierter, die Anwendungen aber noch 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 wie Walmart, AT&T und Coca-Cola sowie Rechenzentren-betreiber.

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. Um diese Nachfrage zu bedienen, plant Bloom, seine Fertigungskapazitäten bis 2026 von 1 auf 2 GW jährlich zu verdoppeln.

SOFC-MARKTFÜHRER IM ÜBERBLICK

- **Bloom Energy (USA):** Weltmarktführer stationäre SOFC. > 1,5 GW installiert. Fokus KI-Rechenzentren & US-Industrie.
- **Ceres Power (Großbritannien):** Technologielizenz-geber. Lizenznehmer: Bosch, Doosan, Weichai. Bosch baut Großserienfertigung in Deutschland.
- **Elcogen (Estland/Finnland):** Einer der effizientesten Stack-Hersteller Europas. Investiert 2025/26 massiv in Kapazitätsausbau. 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 – Solid Oxide Electrolysis Cell – nutzt dabei die außerordentliche thermische Effizienz der Hochtemperaturkinetik.

Besonders brisant ist die Verbindung zur Ammoniakindustrie. Ammoniak ist heute 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.

Das Ergebnis ist ein geschlossener Effizienzkreislauf: Abwärme senkt den Strombedarf, geringerer Strombedarf senkt die Wasserstoffgestehungskosten, und günstigerer grüner Wasserstoff macht grünes Ammoniak erstmals wirtschaftlich wettbewerbsfähig.

„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 Bericht zufolge planen immer mehr Rechenzentren, ihre Abhängigkeit vom Netz zu verringern – bis 2030 soll ein Drittel der Rechenzentren vollständig netzunabhängig sein. Die SOFC bietet hier entscheidende Vorteile, die herkömmliche Lösungen nicht erfüllen können: SOFCs haben heute eine vergleichbare Investitionskostenposition mit Gasturbinen, verbrauchen dabei 15 bis 20 Prozent weniger Brennstoff und erfordern aufgrund ihrer deutlich reduzierten Emissionen einfachere Genehmigungsverfahren.

Bloom-Brennstoffzellen können auf einem Acre doppelt so viel Leistung liefern wie Gasturbinen oder Kolbenmotoren – bis zu 100 MW pro Acre –, was ihre Flächeneffizienz zu einem entscheidenden Vorteil für Rechenzentren in urbanen Räumen macht.

Sunfire meldete einen LHV-Wirkungsgrad von 84 Prozent in einer SOEC-Einheit mit mehreren Megawatt – ein Wert, der PEM-Konkurrenten weit hinter sich lässt. Diese Zahlen sind kein Laborversprechen mehr, sondern industriell verifiziert.

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 – ideal für 24/7-Rechenzentren, ungeeignet für alles mit diskontinuierlichem Betrieb.

Hohe Anfangsinvestition: Die Fertigung von Hochleistungskeramiken ist technisch anspruchsvoll und derzeit noch kapitalintensiver als die Polymermembranherstellung. Erst jetzt entstehen durch Unternehmen wie Bosch (Lizenzpartner Ceres Power) oder Sunfire erste automatisierte Produktionsstraßen, die durch Skaleneffekte die Kosten drücken sollen.

Fehlende Skaleneffekte: Während die PEM früh von der Automobilindustrie profitierte – Toyota, Hyundai und Honda investierten Milliarden in die Technologiereife –, 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. Für Schiene oder Schifffahrt käme sie nur in Frage, wenn die Anlage dauerhaft im Betrieb bleibt.

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 Nachfrage nach PEM-Elektrolyseuren wächst schnell, vor allem wegen ihrer Fähigkeit, auf volatile erneuerbare Energiequellen zu reagieren und Wasserstoff mit hoher Reinheit zu erzeugen.

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.

Was noch vor fünf Jahren als akademischer Wettbewerb galt, hat sich zu einer klaren Marktstruktur herausgebildet: Siemens Energy und thyssenkrupp nucera adressieren die grüne Elektrolyse im Gigawatt-Maßstab; Bloom Energy, Sunfire und Elcogen skalieren die stationäre SOFC für Industrie und Rechenzentren. Die Energiewende braucht keine Entscheidung – sie braucht beide.

PEM: Stärken & Zukunftsfelder

Schnellstart, Kompaktheit, gut integrierbar mit volatilen Erneuerbaren. Unverzichtbar für grüne Wasserstoffherzeugung im Netzverbund.

SOFC: Stärken & Zukunftsfelder

Höchster Wirkungsgrad, Brennstoffflexibilität, kein Platin. Der stille Champion für alle Systeme, die 24/7 laufen.

Wachstumsfelder: Schwerlast-LKW, Schiene, maritime Anwendungen, Industrieelektrolyse.

Wachstumsfelder: KI-Rechenzentren, Chemieindustrie, grünes Ammoniak (SOEC), industrielle KWK.

Quellen: 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).

Hinweis: Angaben zu Wirkungsgraden und Projekten beruhen auf Herstelleraussagen und öffentlichen Berichten.