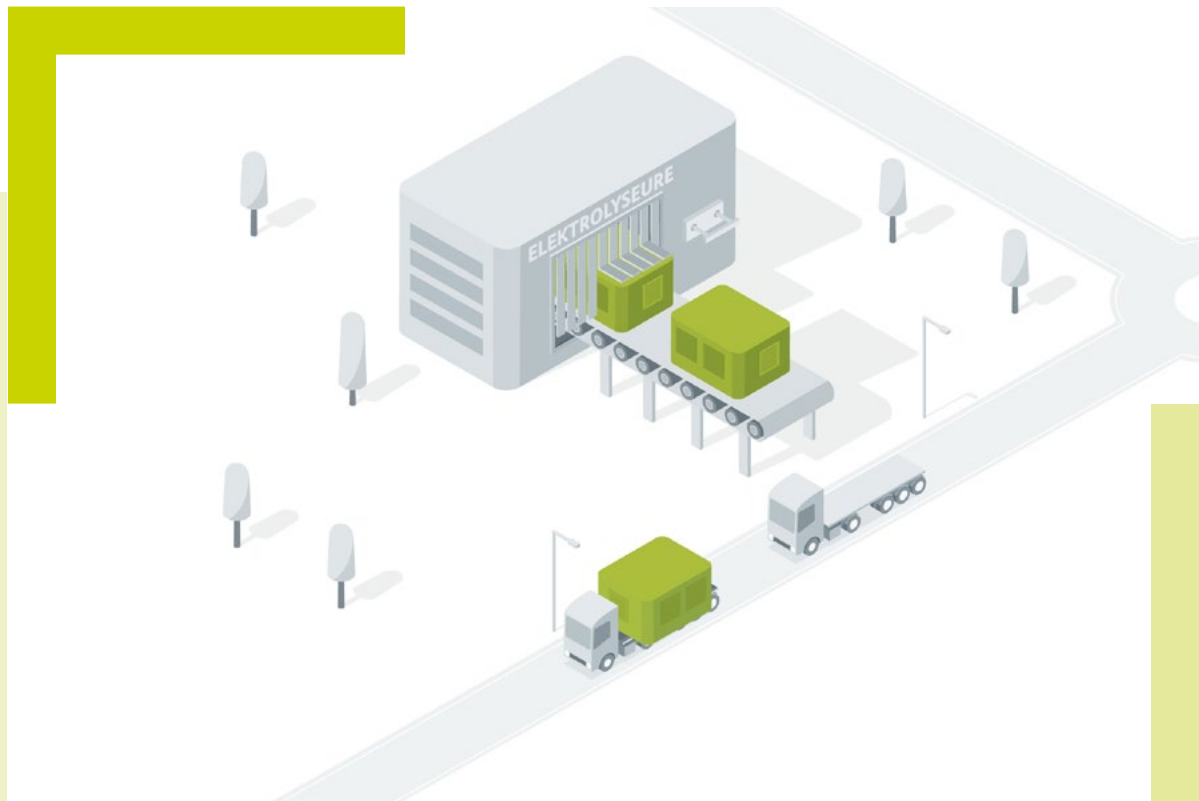




Technologie- und Innovations-Roadmap Elektrolyse

Industrialisierung und
Hochskalierung der
Wasserelektrolyse
in Deutschland

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt



Finanziert von der
Europäischen Union
NextGenerationEU



Inhaltsverzeichnis

01	Zusammenfassung	03
02	Einleitung	07
02.1	Die Rolle von Grünem Wasserstoff in der Energiewende	07
02.2	Das Wasserstoff-Leitprojekt H ₂ Giga	09
02.3	Die Technologien der Wasserelektrolyse	10
02.4	Ziel und Umfang	15
03	Ergebnisse aus dem Wasserstoff-Leitprojekt H ₂ Giga	16
04	Stand der Industrialisierung der Wasserelektrolyse	21
04.1	Industrielle Fertigung von Elektrolyseuren MADE IN GERMANY	21
04.2	Globale Wettbewerbslandschaft	27
04.3	Nicht-technische Hemmnisse für den Markthochlauf von Elektrolyseuren im GW-Maßstab	38
05	Stand der Technik und technische Ziele	41
06	Forschungs- und Entwicklungsbedarfe	47
06.1	F&E-Bedarfe: Alkalische Elektrolyse	49
06.2	F&E-Bedarfe: PEM-Elektrolyse	51
06.3	F&E-Bedarfe: Hochtemperatur-Elektrolyse	53
06.4	F&E-Bedarfe: AEM-Elektrolyse	54
06.5	F&E-Bedarfe: Übergreifende Themen	55
06.6	F&E-Bedarfe: PFAS-freie Elektrolyse	57
07	Technologie-Roadmap: Handlungsempfehlungen für die Weiterentwicklung der Wasserelektrolyse für den GW-Maßstab	59
08	Literaturverzeichnis	69
09	Anhang	75
09.1	Methodik	75
09.1.1	Datenerhebung durch Experteninterviews	75
09.1.2	Datenerhebung und Konsolidierung der Forschungs- und Entwicklungsbedarfe	76
09.1.3	Erläuterungen zu den KPIs	77
09.2	Abbildungsverzeichnis	79
09.3	Tabellenverzeichnis	79
09.4	Abkürzungsverzeichnis	81
10	Impressum	82

Zusammenfassung

Grüner Wasserstoff ist aus dem Energiesystem der Zukunft nicht wegzudenken. Selbst wenn Wasserstoff nur die Bereiche versorgt, die sich mit direkter Elektrifizierung nicht oder nur schwer dekarbonisieren lassen, wird der zukünftige Mengenbedarf im industriell relevanten Maßstab sein. Für das Ziel, diese Mengen Grünen Wasserstoffs zu erzeugen, braucht es – neben dem Strom aus Erneuerbaren Energien (EE) – Elektrolysekapazitäten im Gigawatt-Maßstab. In der Nationalen Wasserstoffstrategie (NWS) hat die Bundesregierung die Leitplanken für den Wasserstoff-Hochlauf gesetzt. Um den Einstieg in eine industrielle Großserienfertigung von Wasserelektrolyseuren bei signifikanten Fortschritten hinsichtlich Lebensdauer und Kosten zu ermöglichen, hat das Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) das Wasserstoff-Leitprojekt H₂Giga ins Leben gerufen. Dort wurden erfolgreich die entsprechenden technologischen Voraussetzungen erforscht und entwickelt.

Die vorliegende Studie ist im Rahmen von H₂Giga entstanden. Der erste Teil beschreibt den **aktuellen Stand der Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland** und stellt diesen in einen internationalen Vergleich. Im zweiten Teil, der **Technologie-Roadmap Elektrolyse**, zeigt sie – über H₂Giga hinaus – die unter der Mitwirkung der H₂Giga-Partner ausgearbeiteten nächsten Schritte zur notwendigen Weiterentwicklung der Elektrolysetechnologien entlang von Technologiepfaden und Zeitskalen.

Innerhalb des Wasserstoff-Leitprojekts H₂Giga erzielten Hochschulen, Forschungseinrichtungen und die Industrie (u.a. Elektrolyseurhersteller und Zulieferindustrie) in den letzten fünf Jahren große technologische Fortschritte (siehe Kapitel 3). So entwickelten sie beispielsweise serielle und automatisierte Fertigungstechnologien für Elektrolyseure und deren Komponenten und bauten umfangreiche Forschungsinfrastruktur auf, insbesondere auch zur Untersuchung von grundlegenden Mechanismen in großen Stacks und Systemen. Diese Erfolge gewährleisteten eine Übertragbarkeit auf den industriellen Maßstab. Auch an neuen Membranen, Katalysatoren und Stackdesigns hat H₂Giga erfolgreich gearbeitet, immer mit dem Blick auf die Eignung für eine zukünftige serienmäßige Produktion. Diese Ergebnisse aus Wissenschaft und industrieller Forschung tragen wesentlich dazu bei, die Ziele der Nationalen Wasserstoffstrategie zu erreichen und eine Wasserstoffwirtschaft aufzubauen.

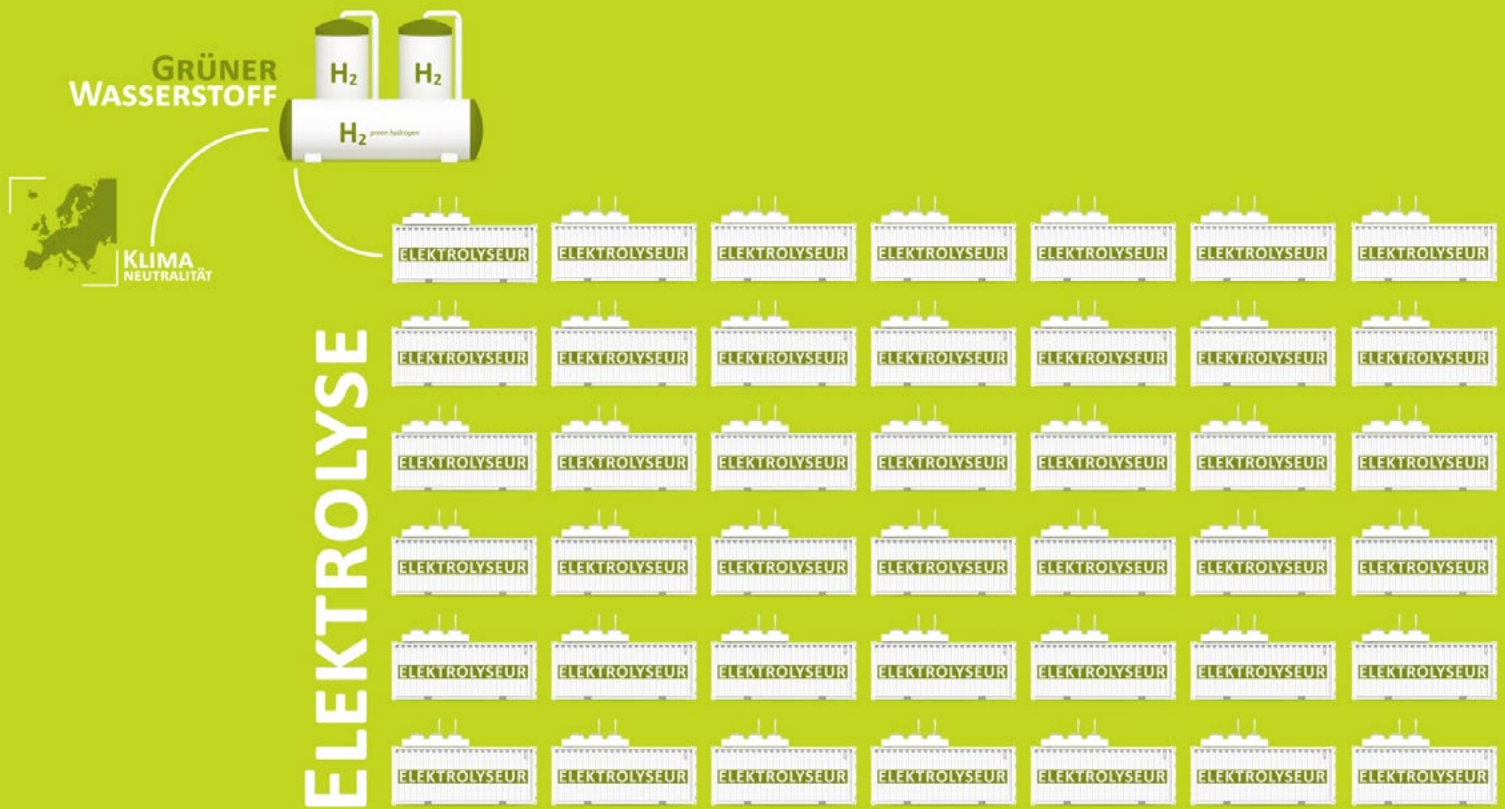
Mehrere von Herstellern koordinierte Forschungsprojekte haben Technologien für die perspektivische Serienfertigung erfolgreich entwickelt und teilweise bereits in Produktionslinien integriert. Einige deutsche Elektrolyseurhersteller errichteten während der Laufzeit von H₂Giga erste Anlagen zur Forschung an der automatisierten Fertigung von Stacks mit jährlichen Erzeugungskapazitäten im Gigawatt-Bereich, sodass bis 2030 eine Fertigungskapazität von

insgesamt mehr als 20 Gigawatt pro Jahr zur Verfügung stehen wird (siehe Abschnitt 4.1). Begleitet ist der nationale Wasserstoffhochlauf auch von einem dynamischen, zunehmend international geprägten Wettbewerbsumfeld (siehe Abschnitt 4.2). Eine Herausforderung ist dabei der Kostenvorteil chinesischer Konkurrenzprodukte, der deutsche Anbieter unter Preisdruck setzt. Aber auch unabhängig davon ist Grüner Wasserstoff gegenüber fossilen Energieträgern heute noch im Wettbewerbsnachteil (siehe Abschnitt 4.3), sodass diese Mehrkosten zum einen technologisch gesenkt werden müssen, aber die Transformation auch durch nicht-technische Rahmenbedingungen unterstützt werden muss. Zum heutigen Zeitpunkt sind angestrebte – international vergleichbare – Ziele, insbesondere mit Bezug auf Kosten, Effizienz, Skalierung und Lebensdauer, noch nicht vollständig erreicht (siehe Kapitel 5). Trade-offs stellen bei der Optimierung eine große Herausforderung dar, da sich Faktoren beeinflussen und teilweise auch miteinander konkurrieren.

Im vorliegenden Dokument sind die wichtigsten **Forschungs- und Entwicklungsbedarfe für die Wasserelektrolyse** zusammengestellt (siehe Kapitel 6), die über H₂Giga hinaus für die Umsetzung der Nationalen Wasserstoffstrategie notwendig sind. Diese wurden in einer einheitlichen Struktur bei allen 120 Partnern des Wasserstoff-Leitprojekts H₂Giga abgefragt, ergänzt um Informationen weiterer Hersteller, und mit Kernteams von Fachexperten im Konsens geclustert und konsolidiert. Das Ergebnis wurde dem Nationalen Wasserstoffrat (NWR) vorgestellt und mit Vertretern aus dem NWR diskutiert. Die ermittelten Forschungsbedarfe sind in diesem Dokument für die verschiedenen Elektrolysetechnologien und für übergreifende Themen separat aufgeführt. Wichtige Themen und Ziele für die nächsten Schritte der Forschung sind Kostensenkung, Steigerung der Effizienz und insbesondere Verlängerung der Lebensdauer und Verbesserung der Betriebsstabilität. Das beinhaltet auch ein fundamentales Verständnis der degradationsrelevanten Prozesse im Elektrolyseur, insbesondere in großen Systemen und unter realen Einsatzbedingungen. Auch neue Anforderungen, wie eine Eignung für den netz- und systemdienlichen Betrieb, sind hier relevant und erfordern gezielte Untersuchungen, um Parameterfenster zu definieren und die Einbindung des Elektrolyseurs in das umgebende (Energie-)System zu optimieren.

Das Fundament und die Inhalte für die **Technologie-Roadmap Elektrolyse** (siehe Kapitel 7) stammen aus den genannten Kapiteln 3 bis 6. Die wichtigsten Inhalte der Roadmap sind:

Für die beiden reiferen Technologien, die alkalische Elektrolyse (AEL) und die Protonenaustauschmembran-Elektrolyse (PEM-Elektrolyse), ist der nächste Entwicklungsschritt die Erforschung des Betriebs unter realen Bedingungen im industriellen Maßstab,



© Ahnen und Enkel

begleitet von weiteren Untersuchungen zum Degradationsverhalten, Einfluss von realen Umgebungsbedingungen und Verständnis wichtiger Parameter für den netz- und systemdienlichen Betrieb. Forschung kann hier durch fundiertes Verständnis maßgeblich unterstützen und so zum Markterfolg deutscher Hersteller im internationalen Wettbewerb beitragen. Weiterhin sollen Methoden zur automatisierten Inline-Qualitätskontrolle entwickelt und implementiert werden. Sie sollen in die Herstellungsprozesse digital integriert werden und ein Tracking der Komponenten und Prozessschritte ermöglichen. So werden Fehlermechanismen bei der Herstellung besser verstanden und Ausschuss wird idealerweise im Vorfeld verhindert.

Für die beiden neueren Technologien, die Hochtemperatur-Elektrolyse (HTEL) und Anionenaustauschmembran-Elektrolyse (AEM-Elektrolyse), stehen zunächst noch weitere Materialentwicklung, Hochskalierung zu größeren Zellflächen, Verlängerung der Lebensdauer und Robustheit im Betrieb im Vordergrund. Hier sollten Forschung und Industrie weiterhin die Chance nutzen, diese Technologien für Anwendungen, bei denen sie spezifische Vorteile bieten, im industriellen Maßstab verfügbar zu machen.

Alle Elektrolysetechnologien sind von den geplanten regulatorischen Einschränkungen für perfluorierte Materialien (PFAS) betroffen. Das trifft besonders auf die PEM-Elektrolyse zu, die als Membran fluoridierte Polymere nutzt (PFSA-Membran aus Perfluorsulfonsäure wie Nafion®). Dieses Thema muss daher in Zukunft weiterhin adressiert werden. Im ersten Schritt muss der potenzielle Austrag von PFAS-Materialien aus dem Elektrolyseur untersucht und Gegenmaßnahmen gefunden werden. Das Ziel ist in diesem

Fall, trotz Verwendung von PFAS-haltigen Materialien einen Eintrag in die Umwelt vollständig zu unterbinden. Ein Fernziel ist es, diese fluoridierten Materialien weniger oder gar nicht mehr nutzen zu müssen. Dafür sollen insbesondere für die PEM-Membranen und -Ionomere alternative fluorfreie Materialien erforscht und entwickelt werden. Vielversprechende Ergebnisse dazu hat ein H₂Giga-Projekt bereits erzielt. Die Arbeiten auf diesem Feld sollten weitergeführt und gegebenenfalls auf andere Polymere ausgeweitet werden.

Technische Handlungsempfehlungen:

- › Auf H₂Giga aufbauende Elektrolyse-Forschungsprojekte in Deutschland, die den Elektrolyseurbetrieb unter realen Bedingungen untersuchen und die Grundlagen für lebensdauerrelevante Parameter erforschen. Einbeziehung der Analytik- und Testinfrastruktur, die in den vergangenen Jahren aufgebaut wurde. Ziel: Betriebsstabilität verbessern und damit technische Risiken des Betriebs im großen Maßstab minimieren.
- › Forschung zur Integration von Elektrolyseuren in einem auf volatile Energiequellen basierenden Energiesystem (netz- und systemdienlicher Betrieb), sowohl in Bezug auf den Stack als auch auf Systemkomponenten und Steuerung bzw. Orchestrierung mit dem umgebenden Energiesystem (Strom, Wärme, Gas). Großskalige Elektrolyseure im dynamischen Betrieb grundlegend in Hinblick auf Langzeitstabilität untersuchen. Digitale Monitoring- und Steuerungskonzepte zur Erhöhung von Betriebssicherheit und Anlagenverfügbarkeit weiterentwickeln.

- › Für PEM-Elektrolyseure (Fernziel): Forschung und Entwicklung an fluorfreien Membranen und Ionomeren aufgrund zunehmender regulatorischer Nutzungseinschränkungen. Ziel: Verbesserung der Langzeitstabilität auf das Niveau der aktuell verwendeten fluorhaltigen PFSA-Membranen (z.B. Nafion®).
- › Für PEM-Elektrolyseure (kurzfristiges Ziel): Untersuchung eines eventuellen Austrags von PFAS-Komponenten im Betrieb inklusive Entwicklung geeigneter Analytik für das Prozesswasser. Erforschung von Mitigationmethoden, beispielsweise Filtertechnologien, mit dem Ziel, einen PFAS-Austrag vollständig zu vermeiden.
- › Für alle Elektrolyseur-Arten: Ziel ist die Vermeidung von PFAS-Austrag. Dies betrifft Komponenten wie Dichtungen, Verbindungsstücke, Schläuche oder Beschichtungen. Forschung an Prozesswasseranalytik und ggf. Filtermethoden, um einen Austrag vollständig zu unterbinden.
- › Für die neueren Technologien (HTEL, AEM-Elektrolyse): Weitere Forschung und Entwicklung zu Lebensdauer, Skalierung und Kostensenkung.
- › Für die Technologien mit hohem Reifegrad (AEL, PEM-Elektrolyse): Weitere Produktionsskalierung (auf Komponenten- und Systemebene, wo noch nicht erfolgt) und Weiterentwicklung von Qualitätssicherungsmaßnahmen, inklusive Inline-Qualitätskontrolle, zur Vorbereitung auf den Massenmarkt.

Über die technischen F&E-Bedarfe hinaus gibt es **nicht-technische Handlungsbedarfe**, bei denen sich durch entsprechende Maßnahmen aktuelle Hemmnisse des Wasserstoffhochlaufs vermindern lassen. Der hohe Anteil der Stromkosten an den Wasserstoffgestehungskosten erfordert hier Handlungsbedarf. Neben höherer Effizienz kann vor allem eine pragmatische Regulatorik für den Strombezug und die Nachhaltigkeitskriterien den Hochlauf unterstützen. Wegen der hohen Stromkosten in Deutschland liegt es nahe, die Wasserstoffherstellung internationaler zu denken und stärker auf den Wasserstoff-Import zu setzen. So lassen sich Standorte mit hohem Potenzial an Erneuerbarer Energie nutzen. Weiterhin muss eine Ausweitung der Zuliefererstruktur stattfinden, sodass sich Single Source-Abhängigkeiten minimieren und Liefersicherheit garantieren lassen. Auch ein Aufbau internationaler Beziehungen für den Wasserstoff- bzw. Energieimport wird empfohlen. International gedachte gemeinsame Forschungsprojekte könnten dazu befähigen, das nötige Know-how für einen sicheren und störungsfreien Betrieb aufzubauen.

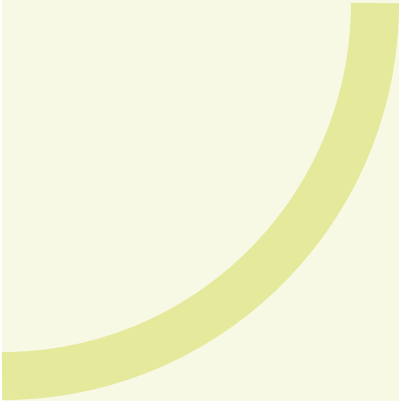
Nicht-technische Handlungsempfehlungen:

- › Angepasste, pragmatische politische Rahmenbedingungen für den Strombezug (inklusive RFNBO-Kriterien) zur Verbesserung der Planbarkeit und wirtschaftlichen Risikominimierung, flankiert durch geeignete Fördermechanismen (Abschnitt 4.3).
- › Reduktion von bürokratischen Hürden bei der Genehmigung von Elektrolyseanlagen, insbesondere durch Schaffung von bundesweit einheitlichen und digitalisierten Genehmigungsverfahren (Abschnitt 4.3).
- › Stärkung und Diversifizierung der Zuliefererstruktur. Ziel ist die Reduktion von Single Source-Abhängigkeiten, die Erhöhung der Liefersicherheit und die langfristige Absicherung der industriellen Hochskalierung (Abschnitt 4.3).
- › Aufbau von internationalen Netzwerken zur Vorbereitung von Energieimportstrukturen und einer diversifizierten und resilienten Importstruktur. Hintergrund: die Verfügbarkeit von günstigem erneuerbarem Strom ist ein wichtiger Kostenfaktor für Grünen Wasserstoff.
- › Aufbau von Know-how zum Betrieb von Elektrolyseuren über gemeinsame Forschungsprojekte mit Partnern an sweet spots für Strom aus erneuerbaren Quellen. Das Ziel ist der Export deutscher Wasserstoff-Technologien für Erzeugung und den Import erneuerbarer Energieträger (Wasserstoff oder seiner Derivate) nach Deutschland (Abschnitt 4.3).

Insgesamt konnten die Technologien der Wasserelektrolyse durch das Leitprojekt H₂Giga in den letzten fünf Jahren erhebliche Fortschritte erzielen. Es wurden wichtige Voraussetzungen für den Gigawatt-Maßstab geschaffen. Auch das Zusammenspiel von Wissenschaft, Herstellern und Zulieferern wurde maßgeblich unterstützt und verbessert. Darauf aufbauend sollte die heute starke Position von Wissenschaft und Industrie durch geeignete Maßnahmen weiter gestärkt werden, um deutsche Technologien zur Herstellung von Grünem Wasserstoff national und vor allem auch international weiterzuentwickeln und zu implementieren. So kann die Transformation langfristig Wirtschaftskraft und Arbeitsplätze sichern.



**Grüner Wasserstoff als
wesentlicher Bestandteil
des erneuerbaren Energie-
systems der Zukunft.**



Einleitung

Um Deutschlands Bedarf an Grünem Wasserstoff zu decken, ist sowohl ein heimischer Ausbau von Elektrolysekapazitäten als auch der Import von Wasserstoff und Wasserstoffderivaten nach Deutschland erforderlich. Vor einigen Jahren hat der Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft in Deutschland an Fahrt aufgenommen [1]. Der Ausbau von Elektrolysekapazitäten scheint jedoch durch einige Herausforderungen behindert [2].

Die vorliegende Studie macht eine Bestandsaufnahme zur Industrialisierung und Hochskalierung der Wasserelektrolyse in Deutschland (Stand: 2025). Sie liefert eine Antwort auf die Frage, welche technologischen Fortschritte erreicht werden müssen, um die weitere Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland zu unterstützen. Darüber hinaus werden auf Basis eines erweiterten Blicks auf Markt und Regulatorik ergänzende nicht-technologische Handlungsempfehlungen abgeleitet. Die Studie entstand im Rahmen des H₂Giga-Projekts „Technologieplattform Elektrolyse“, gefördert vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR), mit Informationen und aktiver Unterstützung aus den weiteren H₂Giga-Projekten.

Die folgenden Abschnitte geben eine Einführung in die Rolle von Grünem Wasserstoff in der Energiewende (Abschnitt 2.1) und in das Wasserstoff-Leitprojekt H₂Giga (Abschnitt 2.2), das 2021 startete, um Wasserelektrolyse-Technologien serienreif zu machen. In Abschnitt 2.3 werden wesentliche Bestandteile und Parameter der vier Technologien der Wasserelektrolyse beschrieben, die in H₂Giga vertreten sind: die alkalische Elektrolyse (AEL), die PEM-Elektrolyse (PEM: Protonenaustauschmembran), die Hochtemperatur-Elektrolyse (HTEL) und die AEM-Elektrolyse (AEM: Anionenaustauschmembran). Das Ziel und der Umfang des Dokuments werden in Abschnitt 2.4 ausführlicher erklärt.

2.1 Die Rolle von Grünem Wasserstoff in der Energiewende

Um die Folgen des anthropogenen Klimawandels abzumildern und das Überschreiten kritischer Kippunkte zu verhindern, einigten sich 2015 im Pariser Klimaabkommen 195 Staaten darauf, den globalen Temperaturanstieg auf unter 1,5 bzw. 2 °C zu begrenzen [3]. Deutschland setzte diese Ziele mit dem Klimaschutzplan 2050 [4] und dem späteren Bundes-Klimaschutzgesetz national um [5].

Die EU legte sich ebenfalls auf eine Reduktion der Treibhausgasemissionen fest und strebt Klimaneutralität bis 2050 an [6]. Infolge eines Verfassungsgerichtsurteils und verschärfter EU-Vorgaben erhöhte Deutschland sein Reduktionsziel bis 2030 auf 60 % und zog das Ziel der Treibhausgasneutralität auf 2045 vor [7]. Des Weiteren ist Deutschland abhängig von dem Import fossiler Energieträger.

Somit ist das Ersetzen fossiler Energieträger durch Alternativen unumgänglich. Das klimaneutrale Energiesystem der Zukunft wird zu einem großen Anteil auf Erneuerbaren Energien basieren. Wo möglich und sinnvoll, werden Prozesse elektrifiziert werden, um den Strom aus Erneuerbaren Energien direkt zu nutzen. Es gibt aber auch Bereiche, die auf diesem Wege nicht oder nur schwer dekarbonisierbar bzw. defossilisierbar sind. Zudem ist die Speicherung von Strom aufwändig und Angebot und Bedarf stehen nicht immer zeitlich und örtlich im Einklang. In beiden Fällen kommt Grüner Wasserstoff ins Spiel, der durch Elektrolyse von Wasser mit Erneuerbaren Energien hergestellt wird: Er ist speicherbar, transportierbar und kann zudem direkt als chemisches Reduktionsmittel eingesetzt werden, beispielsweise in der Chemischen Industrie oder in der Stahlherstellung. Darüber hinaus ist er Ausgangsprodukt für die Herstellung von Plattformchemikalien, wie Methanol und Ammoniak, oder von synthetischen Kraftstoffen (E-Fuels) mit Power-to-X-Technologien. Unter Nutzung von Wasserstoff lässt sich in Brennstoffzellen oder in Wasserstoffkraftwerken Strom oder durch konventionelle Verbrennung Wärme erzeugen.

Neben der Emissionsreduktion spielen Energieträger auf Basis von Erneuerbaren Energien eine entscheidende Rolle dabei, dass Deutschland unabhängiger von einzelnen Ländern mit fossilen Rohstoffen wird. Daher hat das Interesse an Wasserstoff als Energieträger weltweit über die letzten Jahre zugenommen. Viele Länder setzen auf den Ausbau einer eigenen nationalen Wasserstoffwirtschaft [8]. Wasserstoffstrategien in Deutschland und Europa haben das Ziel, den Markthochlauf dieser Technologie zu beschleunigen und eine Grüne Wasserstoffwirtschaft zu etablieren. Im Jahr 2020 veröffentlichte die Bundesregierung die erste Fassung der Nationalen Wasserstoff-Strategie (NWS) mit 38 Maßnahmen [9]. Als Sofortinitiative zur Umsetzung der NWS rief das damalige Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF, seit 2025 BMFTR) den „Ideenwettbewerb Wasserstoffrepublik Deutschland“ für Leitprojekte und Grundlagenforschung zu Grünem Wasserstoff aus [10].

GRÜNER WASSERSTOFF



**KLIMA
NEUTRALITÄT**



© Ahnen und Enkel

Daraus entstanden die drei Wasserstoff-Leitprojekte H₂Giga (Technologien für die Industrialisierung und Hochskalierung der Wasserelektrolyse), H₂Mare (Wasserstoff-Herstellung und Power-to-X auf hoher See) und TransHyDE (Technologien für Transport und Speicherung von Wasserstoff) [11]. Die Wasserstoff-Leitprojekte bildeten die bisher größte Initiative des BMFTR zur Energieforschung.

Die Bundesregierung hat die Nationale Wasserstoff-Strategie im Juli 2023 fortgeschrieben und erhöhte das Zielniveau für die heimische Elektrolysekapazität im Jahr 2030 von 5 GW auf mindestens 10 GW [12]. Den restlichen Bedarf sollten Importe decken. Die dafür entwickelte gesonderte Importstrategie erschien im Juni 2024 [12], [13]. Neben der Verfügbarkeit von Wasserstoff standen auch die Handlungsfelder Wasserstoffinfrastruktur und Wasserstoffanwendungen sowie die dafür nötigen Rahmenbedingungen im Fokus. Die seit 2025 amtierende Bundesregierung fordert einen pragmatischeren Wasserstoffhochlauf, bei dem Marktmechanismen im Fokus stehen und überkomplexe Vorgaben abgebaut werden. Der Hochlauf soll damit realistischer und kosteneffizienter werden [14].

Auf dem Weg in Richtung Wasserstoffhochlauf erforschte und entwickelte das Wasserstoff-Leitprojekt H₂Giga Technologien für die Serienfertigung und Hochskalierung von Elektrolyseuren. Die Verfügbarkeit von effizienten, langlebigen und kostengünstigen Elektrolyseuren ist eine notwendige Bedingung, um in naher Zukunft mit Strom aus Erneuerbaren Energien Grünen Wasserstoff im Gigawatt-Maßstab herzustellen.

2.2 Das Wasserstoff-Leitprojekt H₂Giga

Das vom BMFTR geförderte Wasserstoff-Leitprojekt H₂Giga umfasste 32 eigenständige Projekte mit insgesamt über 120 Partnern. Darunter waren führende Elektrolyseurhersteller, Anlagenbauer, Maschinenbauunternehmen, Edelmetallhersteller, Start-ups sowie zahlreiche Forschungsinstitute und Universitäten. Ziel war es, die alkalische, die PEM- und die Hochtemperatur-Elektrolyse reif für die Serienfertigung zu machen. Die Technologie der AEM-Elektrolyse wurde begleitend weiterentwickelt. H₂Giga war bewusst technologieoffen gestaltet, da die Wahl der Elektrolysetechnologie von den spezifischen Anforderungen der jeweiligen Anwendung, den verfügbaren Ressourcen und den ökonomischen und technischen Rahmenbedingungen abhängt. Somit stellte das Leitprojekt die gesamte Bandbreite an technologischen Möglichkeiten bereit, um eine Wasserstoffproduktion im Gigawatt-Maßstab zu erreichen.

Grob skizziert forschten die H₂Giga-Projekte an folgenden Themen:

- › Entwicklung moderner Fertigungstechnologien für die Serienfertigung von Elektrolyseuren und deren Komponenten
- › Technologien zur Automatisierung und Robotik
- › Untersuchung von Degradationsmechanismen, Erforschung von Mitigations- und Betriebsstrategien für eine höhere Lebensdauer des Stacks, sowohl an Zellen im Labormaßstab als auch an Systemen im industriellen Maßstab
- › Digitalisierung auf allen Prozessebenen bis hin zur Anlagenplanung, Systemschnittstellen
- › Anlagenintegration und sektorenübergreifende Verwertung der Elektrolysebenenprodukte
- › Materialforschung und Komponentenentwicklung, unter anderem mit dem Ziel der besseren Produzierbarkeit
- › Forschung an Testverfahren und Methoden zur Qualitätskontrolle
- › Forschung an Themen, die zur Einsparung von Rohstoffen und Kosten beitragen: Katalysatoren und Elektroden mit vermindertem Iridium-Gehalt
- › Forschung an fluorfreien Membranen und Membran-Elektroden-Einheiten für die PEM-Elektrolyse (Ziel: PFAS-freie Elektrolyse)
- › Entwicklung von Recycling-Konzepten für Elektrolyseure und deren Komponenten
- › Begleitung mit flankierenden, nicht-technischen Maßnahmen, beispielsweise die Beschleunigung von Genehmigungsverfahren
- › Netzwerkbildung und Wissenstransfer, insbesondere zwischen Wissenschaft und Industrie
- › Zwei Partner-Projekte erforschten die Integration von Groß-Elektrolyseuren in das Stromnetz und die Auswirkungen des Betriebs in einer Produktionsanlage der chemischen Industrie.

Die H₂Giga-Projekte lassen sich in drei Gruppen aufteilen: Scale-up-, Next Generation Scale-up- und Innovationspool-Projekte (Abbildung 2.1). In den Scale-up-Projekten arbeiteten führende deutsche Elektrolyseurhersteller jeweils gemeinsam mit ihren Forschungspartnern an der Hochskalierung ihrer jeweiligen Elektrolysetechnologie. In den Next Generation Scale-up-Projekten entwickelten die Projektpartner die Technologien für morgen. Sie arbeiteten an neuen Kernkomponenten oder an hochinnovativen Elektrolysetechnologien (AEM-Elektrolyse). Die Projekte im wissenschaftsnahen Innovationspool forschten an zukünftigen Technologiegenerationen und übergreifenden Themen rund um die Elektrolyse, beispielsweise an neuen Materialien, Lebensdauer und Fertigungstechniken.

Das Netzwerkprojekt „Technologieplattform Elektrolyse“ (TPE) war das verbindende Element in H₂Giga. Es organisierte Veranstaltungen zum fachlichen Austausch zwischen den Projekten und unterstützte den Dialog zwischen Wissenschaft und Industrie. So konnten Partner ihnen noch unbekannte Wissenslücken schließen und bei Forschungsthemen die spätere Anwendbarkeit von Anfang an mitdenken. Auch übergreifende Themen, wie die Beschleunigung von Genehmigungsverfahren von Elektrolyseanlagen oder die Entwicklung von Formaten zur Aus- und Weiterbildung im Bereich der Elektrolyse wurden hier bearbeitet.

Eine ausführliche Beschreibung der Projekte samt der Auflistung der Projektpartner ist in der Projektbroschüre [15] sowie auf der Webseite [16] zu finden.

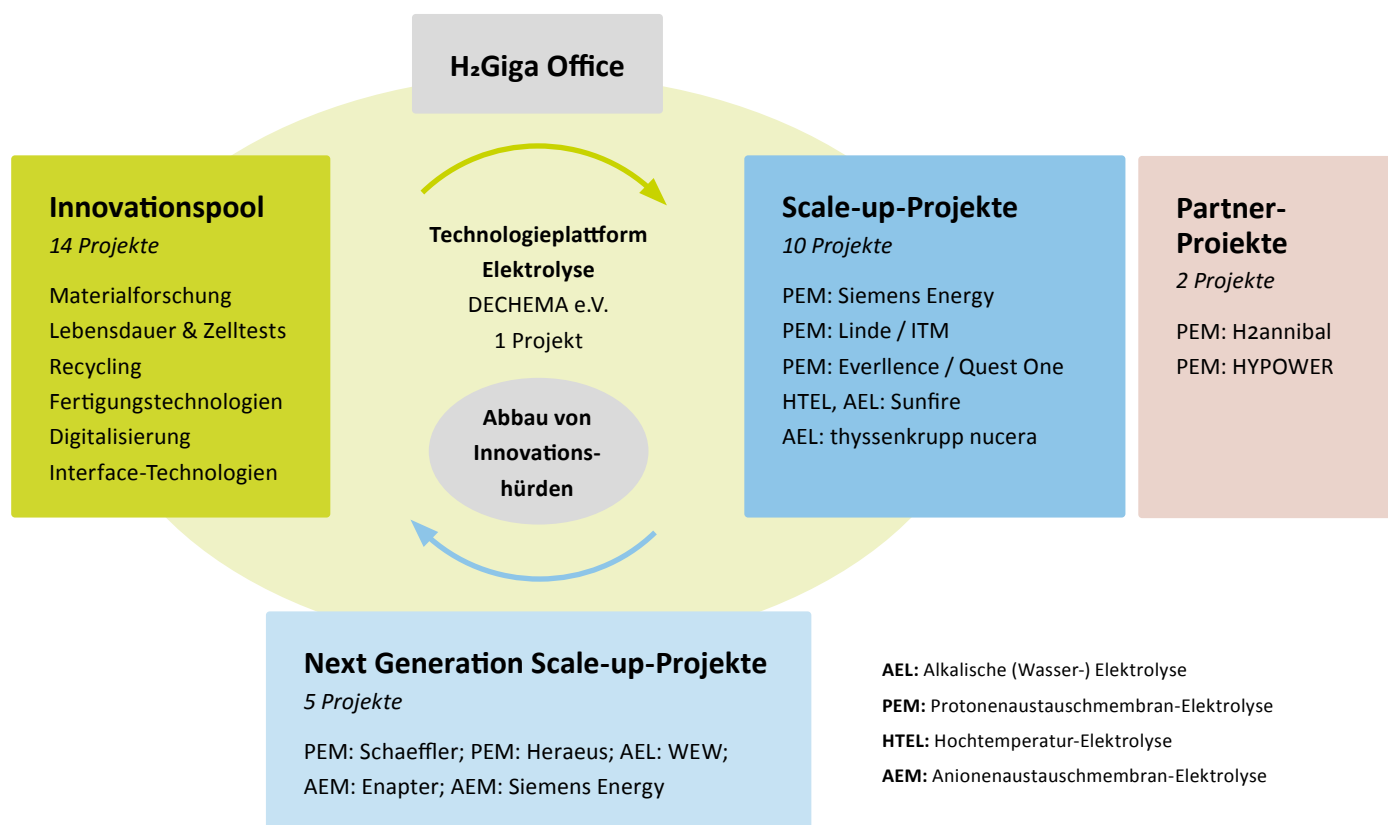


Abbildung 2.1: Struktur des Wasserstoff-Leitprojekts H2Giga

2.3 Die Technologien der Wasserelektrolyse

Mittels der Wasserelektrolyse wird Wasser unter Einsatz von Strom in Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt. Dies geschieht im Kernstück eines Elektrolyseurs, dem Stack. Er besteht aus einer Vielzahl an elektrochemischen Zellen, die elektrisch in Reihe geschaltet sind. Jede Zelle enthält Anode, Kathode und eine spezielle Membran oder ein Diaphragma. Als Trennelemente zwischen den Zellen fungieren Bipolar- bzw. Separatorplatten. Sie sorgen für mechanische Stabilität, führen die Gase und leiten den Strom. Die Stacks und weitere für deren Betrieb notwendige Komponenten stellen die Moduleinheit dar. Hinzu kommen noch Balance of Plant (BoP)-Komponenten, wie Wärmeübertrager, Pumpen, Ventile, Sensoren usw., sowie die Schnittstellen zur Versorgung mit Strom und Wasser und zur Abgabe des Wasserstoffs, gegebenenfalls des Sauerstoffs und der Wärme (siehe Abbildung 2.2). Alles zusammen bildet den Elektrolyseur auf Systemlevel, der dann in eine Einsatzumgebung integriert wird.

Die Prozesskette beginnt bei den Rohstoffen für den Bau des Elektrolyseurs und endet beim Recycling der Elektrolyseanlage, wie in Abbildung 2.3 am Beispiel eines PEM-Elektrolyseurs dargestellt.

Die vier Verfahren der Wasserelektrolyse unterscheiden sich grundsätzlich in den verwendeten Elektrolyten, in den verwendeten Materialien sowie der Prozesstemperatur. Ein Vergleich ihrer wesentlichen Bestandteile und Parameter ist in Tabelle 2.1 dargestellt. Die technischen Eckdaten auf Systemlevel für die vier Technologien sind in Tabelle 2.2 gelistet.

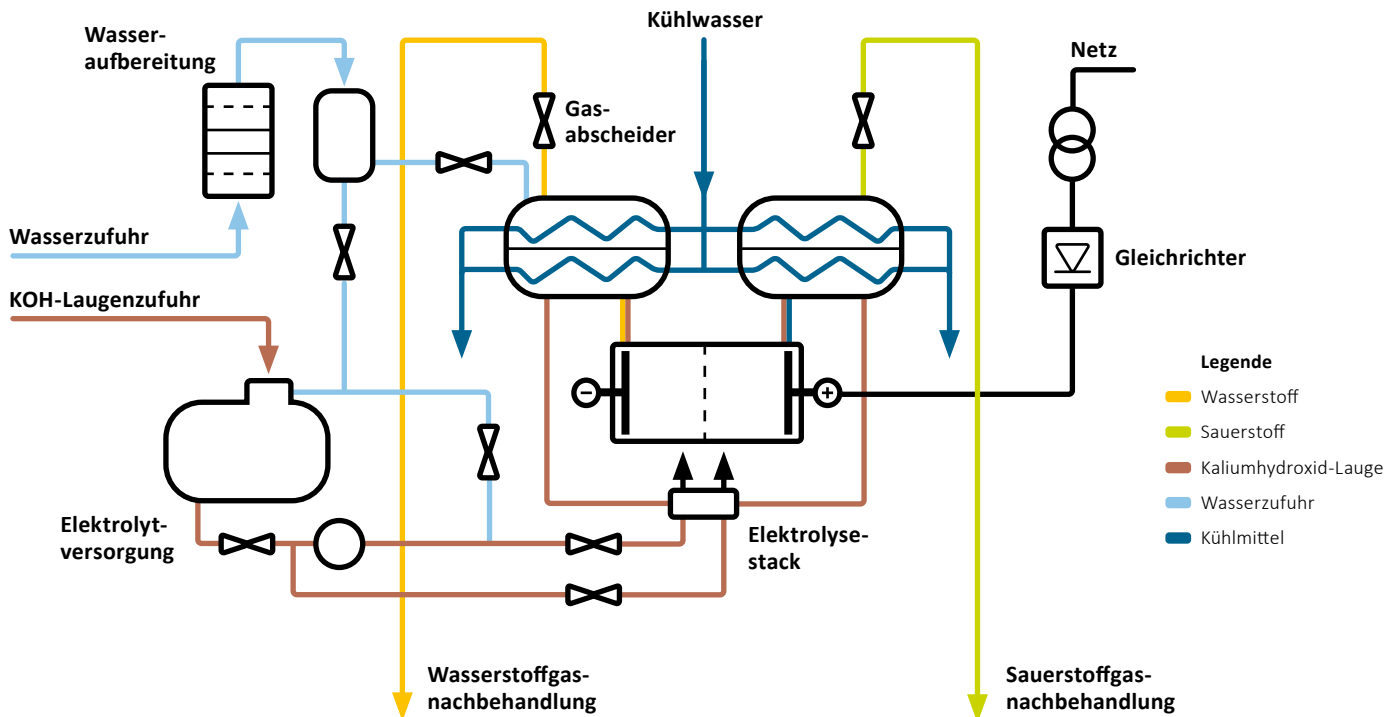


Abbildung 2.2: Layout eines AEL-Systems; angepasst von [17]; Original [18]

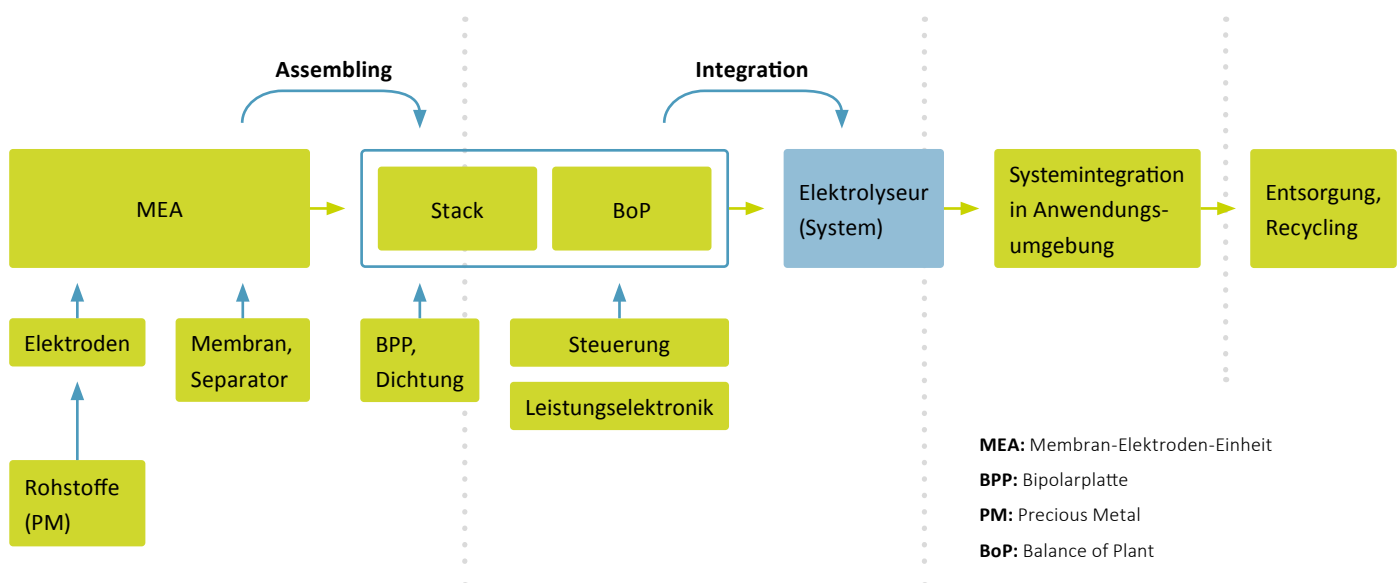


Abbildung 2.3: Prozesskette der wichtigsten Schritte zu Aufbau und Einsatz eines Elektrolyseurs, hier am Beispiel eines PEM-Elektrolyseurs.

	Alkalische Elektrolyse (AEL, AWE)	PEM-Elektrolyse	Hochtemperatur-Elektrolyse (HTEL)	AEM-Elektrolyse
Elektrolyt	Flüssigelektrolyt KOH-Lösung	Polymermembran mit Sulfonsäuregruppen/ Wasser	Feststoffelektrolyt (i.e. Zirkoniumoxid-keramik)	Anionenaustausch-membran mit KOH-Lösung
Ionische Ladungsträger	OH ⁻	H ⁺	O ₂ ⁻ (SOEC) H ⁺ (PCC)	OH ⁻
Katalysator Anode (exemplarisch)	Ni-Fe-X Oxide, Ni-Co-X Oxide	IrO ₂	LSCF, LSM	Ni-X Oxide *)
Katalysator Kathode (exemplarisch)	Raney Ni-X, Ni-RuO ₂	Pt/C	Ni/YSZ	Pt/C, Ni-X **)
Elektrodensubstrat	Nickel, Stahl (Netze, perforierte Bleche, Schäume)	Katalysatorschichten auf Membran oder MPL (Ti, Stahl und Kohlenstoff) möglich	Zirkoniumoxid (YSZ), Ni-Cermet, Perovskite	Katalysatorschichten auf Membran oder MPL (Stahl, Ni und Kohlenstoff möglich)
Separator	Diaphragma: ZrO ₂ /Polysulfon-Matrix	Protonenaustausch-Membran auf PFSA-Basis	Feststoffelektrolyt YSZ [21]	Anionenaustausch-Membran (verschiedene Grundpolymere möglich)
Bereich der Betriebstemperatur [°C]	70–90	50–80	600–850 (SOEC) 400–600 (PCC)	40–60

Tabelle 2.1: Vergleich von wesentlichen Bestandteilen und Parametern der vier Technologien der Wasserelektrolyse [19], [20].

LSCF = Lanthan-Strontium-Kobalt-Ferriit, LSM = Lanthan-Strontium-Manganit, MPL = Microporous layer, PCC = Proton Conducting Ceramic Cell, SOEC = Solid Oxide Electrolysis Cell, YSZ = Yttrium-stabilisiertes Zirkoniumdioxid. *) hauptsächlich Ni-Fe-Verbindungen und teilweise andere Übergangsmetallverbindungen **) Pt/C findet Anwendung auf Technikumsmaßstab, Ni-X hauptsächlich noch auf Laborebene

	Alkalische Elektrolyse (AEL, AWE)	PEM-Elektrolyse	Hochtemperatur-Elektrolyse (HTEL) [25], [26]	AEM-Elektrolyse [23], [24]
Technologischer Reifegrad des Systems (nicht der Produktionstechnik)	TRL 9 (industriell etabliert)	TRL 8–9 (kommerziell verfügbar)	TRL 7 (Demonstration)	TRL 6 (Prototyp in Einsatzumgebung)
Typischer Betriebsdruck [bar absolut]	1–30	1–30	1	2–36
Typische Stromdichte [A/cm²]	0,25–0,7	1,5–2,5	0,5–1,0	0,8
Leistungsaufnahme Stack [MW_{el}]	0,5–5	0,1–2	0,06	0,02
Leistungsaufnahme Modul [MW_{el}]	1–20	2–10	10	1
Elektrischer Energieverbrauch (System) [kWh/Nm³ H₂]	4,4–5,8	4,5–6,8	3,6–4,0 (+ Dampf > 200 °C)	4,8
Lebensdauer Stack in Betriebsstunden [h]	80.000–90.000	50.000–80.000	20.000–40.000	Systeme im kW-Bereich bis zu 35.000 h, größere Systeme noch nicht bekannt

Tabelle 2.2: Vergleich der Elektrolysetechnologien auf Systemlevel [19], [20], [22].

Diese Tabelle gibt allgemeine Literatur- und öffentlich verfügbare Herstellerangaben wieder.

Alkalische Elektrolyse

Die AEL, teilweise auch als AWE (Alkalische Wasserelektrolyse) abgekürzt, ist die älteste und eine besonders umfangreich angewendete Elektrolysetechnologie (TRL 9) [19]. Der Stack eines AEL-Elektrolyseurs ist aufgebaut aus elektrochemischen Zellen mit bis zu ca. 3 m² aktiver Zellfläche, die wässrige Kalilauge (Kaliumhydroxid-Lösung, KOH-Lösung) als Elektrolyt nutzen. Der Separator zwischen dem Kathoden- und Anodenraum ist ein Diaphragma, das den Transport von Hydroxid-Ionen ermöglicht, aber die entstehenden Produktgase, Wasserstoff und Sauerstoff, voneinander getrennt hält. Das Diaphragma besteht im Allgemeinen aus einem Komposit, einem hydrophoben Polymer (Polysulfon) mit einer hydrophilen mineralischen Komponente, die die Benetzbarkeit der porösen Matrix mit dem Elektrolyten ermöglicht [27]. Die AEL wird bei Normaldruck betrieben. Zusätzlich gibt es aber auch Druckelektrolyseure, die bei einem Druck von 15 bis 30 bar operieren und bei denen der Wasserstoff vorkomprimiert produziert wird. Druckbetriebene Elektrolyseanlagen können in Bezug auf Effizienz und Anwendungsvielfalt vorteilhaft sein, insbesondere im Hinblick auf die Integration in bestehende industrielle Prozesse und der Nutzung des dann unter Druck stehenden Sauerstoffs. Die AEL wird gewöhnlich bei gleichem H₂- und O₂- Ausgangsdruck betrieben.

Eines der Hauptmerkmale der AEL ist ihre robuste Bau- und Betriebsweise. Diese wurde über die letzten Jahrzehnte im großskaligen Betrieb immer weiter optimiert. Trotz ihrer einfachen Konstruktion werden hohe Umwandlungs-Wirkungsgrade von 60 bis 70 % erzielt [28]. Die im Vergleich zur PEM-Elektrolyse weniger korrosiven Umgebungen bei pH = 14 machen es dem Grunde nach möglich, auf Edelmetalle (kritische Rohstoffe) als Katalysatoren zu verzichten. Die AEL zeichnet sich durch eine äußerst hohe Langzeitstabilität aus, die mit bis zu 80.000 Betriebsstunden verifiziert wurde [29]. Besondere Herausforderung bei der Skalierung von Komponenten und des Systems ist die Größe und das Gewicht der Module (bis zu 1,6 m Elektrodendurchmesser). Die Entwicklung von deutlich kompakteren Systemen mit einer höheren Leistungsdichte (Stromdichte > 0,5 A/cm²) ist ein notwendiger Schritt, dem mit einem konsequenten Transfer der Ergebnisse von Laborebene auf Industrieebene begegnet werden muss.

PEM-Elektrolyse

Die PEM-Elektrolyse gehört zu den bereits weit entwickelten Elektrolysetechnologien mit einem etwas geringeren Reifegrad als die alkalische Elektrolyse (Tabelle 2.2) [19]. Kernstück der PEM-Elektrolyse ist die namensgebende Protonenaustauschmembran (engl. *proton exchange membrane*), die entweder als beidseitig beschichtete Membran (*catalyst coated membrane*, CCM) eingesetzt oder mit beschichteten Gasdiffusionselektroden kombiniert wird. Die Kombination der protonenleitenden Membran mit Katalysatorschichten und Gasdiffusionslagen werden als Membran-Elektroden-Einheit (*membrane electrode assembly*, MEA) bezeichnet.

Die Membran leitet die Protonen von der Anode zur Kathode, an der sie zu Wasserstoff reduziert werden. Für die Produktgase, Wasserstoff und Sauerstoff, ist die Membran nicht durchlässig. Aktuell werden als Membran in ausgereiften PEM-Elektrolyseuren perfluorierte Polymere mit sulfonsäurehaltigen Seitenketten verwendet, sogenannte PFSA-Membranen (z.B. Nafion®). Sie halten den korrosiven Bedingungen in der Zelle stand und quellen mit Wasser, sodass die erforderliche ionisch leitfähige Struktur entsteht. Alternative, nicht fluorierte Materialien als Membran und Ionomer werden intensiv erforscht.

Als Katalysatoren kommen in der Regel Platin und Iridium sowie deren Legierungen zum Einsatz. Dabei werden meist für die Kathode auf kohlenstoffgeträgerte Platin-Nanopartikel und für die Anode ebenfalls geträgerte Iridium/Iridiumoxid-Nanopartikel verwendet, z.B. auf Titandioxid. Da Iridium eines der seltensten Materialien der Erde ist, wird im Sinne der Ressourcenknappheit und der Reduktion von Investitionskosten (*capital expenditures*, CAPEX) kontinuierlich daran geforscht, wie die Nutzung des Edelmetalls optimiert werden kann, um möglichst wenig davon einsetzen zu müssen. Eine breit ausgelegte Implementierung der PEM-Elektrolyse mit infolgedessen steigender Nachfrage (> 20 GW/a global) würde höchstwahrscheinlich zu einem Iridiumbedarf führen, der eine Verschärfung der Versorgungslage zur Folge haben wird. Die Langzeitstabilität der PEM-Elektrolyse wurde nach Literaturangaben bereits mit 50.000 bis 80.000 Betriebsstunden erfolgreich gezeigt [19]. Diese Technologie ist auch im Teillastbetrieb effizient, flexibel im Betrieb und langlebig, und somit auch gut geeignet für den Einsatz im industriellen Maßstab, auch in einem Stromnetz, das durch Erneuerbare Energie eine gewisse Volatilität aufweist.

Hochtemperatur-Elektrolyse

Die Hochtemperatur-Elektrolyse wird bei Temperaturen von 400–850 °C betrieben. Sie befindet sich damit im Vergleich zu den anderen drei Technologien in einem höheren Temperaturbereich. Der Elektrolyt ist ein gasdichter keramischer Werkstoff. Grundsätzlich wird zwischen der oxidionenleitenden Zelle (*Solid Oxide Electrolysis Cell*, SOEC) und der protonenleitenden Festoxidzelle (*Proton Conducting Ceramic*, PCC) unterschieden [30]. Die SOEC wird mit einem technischen Reifegrad von TRL 7 bis 8 in Entwicklungsumgebungen erprobt und in einem Temperaturbereich von 600 bis 850 °C betrieben [22]. Dagegen ist die PCC, die bei niedrigeren Temperaturen von 400 bis 600 °C betrieben wird, aktuell bei TRL 3 einzuordnen und somit noch in der Forschungsphase. Im Folgenden wird sich in diesem Dokument bei HTEL nur auf die SOEC bezogen. Ein oxidischer Elektrolyt leitet bei den hohen Betriebstemperaturen Sauerstoffionen. Das hohe Temperaturniveau ist eine Herausforderung für die eingesetzten Materialien und das Zellkonzept. Als Dichtung können keine Polymere oder Elastomere eingesetzt werden, sondern es werden Gläser mit niedriger Erweichungstemperatur, wie Glaslot, oder Kompressionsdichtungen (bei < 700 °C) verwendet.

Das thermische Ausdehnungsverhalten der Zellkomponenten beim Erwärmen auf Betriebstemperatur darf nicht zu Schädigung in der Zelle führen. Im Gegenzug bietet die hohe Betriebstemperatur folgende Vorteile: Als Katalysatoren können Nicht-Edelmetalle verwendet werden und die Empfindlichkeit gegen Verunreinigungen ist bei diesen Temperaturen besonders gering.

Zudem ermöglicht die SOEC durch Co-Elektrolyse von CO_2 und Wasser die direkte Herstellung von Synthesegas, einer Mischung aus Wasserstoff und Kohlenmonoxid. Dieses kann als Basis für die Erzeugung von Methanol oder Kohlenwasserstoffen, z.B. synthetischer Kraftstoffe, dienen [31], [32]. Ein weiterer Vorteil der hohen Betriebstemperaturen ist die Möglichkeit, Wärme einzukoppeln und zusätzlich zum Elektrolysestrom als Energiequelle zu nutzen. So kann durch die Nutzung industrieller Abwärme eine sehr hohe elektrische Umwandlungseffizienz bei der Herstellung von Wasserstoff erzielt werden. Das macht die SOEC für die Anwendung in industriellen Umgebungen, in denen Wärme auf hohem Temperaturniveau ausgekoppelt werden kann und als Wasserdampf der Elektrolyse zugeführt wird, wie beispielsweise in einem Stahlwerk, besonders attraktiv.

AEM-Elektrolyse

Die Anionenaustauschmembran-Elektrolyse (AEM-Elektrolyse) entspricht in ihren chemischen Abläufen weitgehend der alkalischen Elektrolyse, aber verwendet als Separator eine anionenleitende Membran anstelle eines mit KOH-Lösung getränkten Diaphragmas. Wegen des alkalischen Mediums kann die AEM-Elektrolyse, wie die AEL, dem Grunde nach auch ohne Edelmetalle als Katalysatoren betrieben werden. Dennoch wird je nach Hersteller aktuell noch beispielsweise ein Pt/C-Katalysator auf der Kathode eingesetzt. Bei der Herstellung der flexiblen Polymermembran und der Weiterverarbeitung zur MEA können Methoden ähnlich wie bei der PEM-Elektrolyse eingesetzt werden.

Die AEM-Elektrolyse findet in einer mildalkalischen Umgebung ($0,1 - 1 \text{ M KOH}$, K_2CO_3) statt, wobei die ionischen Ladungsträger (OH^-) durch die für Anionen permeable Membran wandern [33]. Im Gegensatz zur AEL ist es möglich, den Elektrolyten nur im Anodenraum zirkulieren zu lassen, analog zur PEM-Elektrolyse. Der auf der Kathode entstehende Wasserstoff ist in diesem Fall relativ trocken und die Anode, auf der wegen der naturgemäß vorhandenen Überspannung unerwünscht viel Wärme entsteht, wird gekühlt.

Im Idealfall, bei entsprechender Leistung und technischer Reife, könnte die AEM-Elektrolyse in Zukunft die Vorteile der PEM-Elektrolyse und der AEL miteinander kombinieren. Dafür sind aber noch erhebliche Fortschritte in Leistung, Effizienz, Langzeitstabilität und dadurch auch in der Kostenstruktur der AEM-Elektrolyse erforderlich, sodass nach heutigem Stand der Technik auf breiter Ebene noch die AEL und die PEM-Elektrolyse eingesetzt werden.

Dennoch ist die AEM-Elektrolyse wegen ihres Potenzials Gegenstand intensiver Forschung und es wurden erste Arbeiten zu ihrer Hochskalierung durchgeführt. Die AEM-Elektrolyse Technologie hat derzeit einen TRL von 6 [19]. Eine der Herausforderungen ist die chemische Beständigkeit und damit die Langzeitstabilität der eingesetzten Membranmaterialien, da die alkalischen Bedingungen der Elektrolyse, insbesondere bei bis zu 1 M KOH und $> 60^\circ\text{C}$, bei vielen Polymeren zur Degradation führen. Wie bei der PEM-Elektrolyse ist zu erwarten, dass dies erheblichen Einfluss auf Leistung und Stabilität hat.

Hinsichtlich der Herstellmethoden für die alkalische MEA werden zwei Ansätze verfolgt: der Weg über die mit Katalysator beschichtete Membran (CCM) oder über ein jeweils mit Katalysator beschichtetes Substrat (*catalyst coated substrate*, CCS) für beide Seiten, welche im Anschluss mit der Membran assembliert werden. Methoden für beide Ansätze wurden in den vergangenen Jahren entwickelt und verbessert. Insbesondere die Direktbeschichtung der Membran ist bei der AEM-Elektrolyse besonders anspruchsvoll. Im Vergleich zur PEM ist die Materialklasse der AEM, die zu einem hohen Quellverhalten mit bestimmten Lösungsmitteln und Medien führt, eine besondere Herausforderung für die Direktbeschichtung. Weiterhin sollte die Entwicklung und die Skalierung von MEAs mit edelmetallfreien Katalysatoren angegangen werden.

2.4 Ziel und Umfang

Die vorliegende Studie setzt sich mit der Frage auseinander, welche technologischen Entwicklungsschritte und Forschungsmaßnahmen für eine erfolgreiche Industrialisierung der Wasserelektrolyse im Weiteren erforderlich sind. Die Erarbeitung erfolgte während der Projektlaufzeit von H₂Giga zwischen den Jahren 2021 und 2025 im Austausch mit den Projektpartnern und weiteren ausgewählten Stakeholdern und ist in zwei Teile aufgeteilt. Ausgehend von einer Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse des Wasserstoff-Leitprojekts H₂Giga (Kapitel 3) wird im ersten Teil der aktuelle Stand der Industrialisierung der Wasserelektrolyse (Kapitel 4) beschrieben. Abschnitt 4.1 liefert dafür konkret den Stand der industriellen Fertigung von Elektrolyseuren MADE IN GERMANY. Um den Stand der Technik der deutschen Elektrolyseindustrie in den internationalen Kontext einzuordnen, wird die globale Wettbewerbslandschaft in Abschnitt 4.2 skizziert. Eine Einschätzung über nicht-technische Hemmnisse für den Markthochlauf von Elektrolyseuren (Abschnitt 4.3) lieferten Experteninterviews mit Akteuren der Elektrolyse-landschaft. Anschließend wird der Stand der Technik den technologischen Zielen gegenübergestellt (Kapitel 5) und auf Basis von *Key Performance Indicators* Forschungs- und Entwicklungsbedarfe abgeleitet. Um konkrete Wege der technologischen Entwicklung zum Erreichen der mittel- und langfristigen Ziele der Nationalen Wasserstoffstrategie zu ermitteln, wurden zusätzlich im Rahmen von H₂Giga Forschungs- und Entwicklungsbedarfe (Kapitel 6) gesammelt, konsolidiert und priorisiert.

Die Ergebnisse der Kapitel 3 bis 6 liefern zusammen das Fundament und die Inhalte für die Technologie-Roadmap sowie ergänzend nicht-technische Handlungsempfehlungen (Kapitel 7). Es werden konkrete Schritte zur Umsetzung der Technologien im Gigawattmaßstab entlang von Technologiepfaden und Zeitskalen abgeleitet. Sie fasst damit für Industrie und Wissenschaft technische Handlungsempfehlungen für die Weiterentwicklung der Elektrolyse zusammen, die durch erforderliche nicht-technische Handlungsmaßnahmen auf Basis der Randbedingungen (u.a. Markt, Regulatorik, Supply Chain) ergänzt werden. Eine Beschreibung der Methodik der vorliegenden Studie ist im Anhang zu finden.

Ergebnisse aus dem Wasserstoff-Leitprojekt H₂Giga



© WEW GmbH

Die Projektpartner des Wasserstoff-Leitprojekts H₂Giga haben in den Jahren 2021 bis 2025 große technologische Fortschritte erarbeitet und legten somit die technischen Voraussetzungen, um die Hochskalierung der Wasserelektrolyse in den Gigawattmaßstab zu beschleunigen. Im Folgenden sind einige Ergebnisse aus den industriegeführten Scale-up- und Next Generation Scale-up-Projekten exemplarisch dargestellt. Die Auflistung ist nicht vollständig. Darüber hinaus haben die Innovationspool-Projekte an verschiedenen Themenbereichen geforscht und Wissen generiert, das in zukünftige Elektrolyseurgenerationen eingehen kann. Die Ergebnisse aus allen H₂Giga-Projekten sind in einer Broschüre zusammengefasst, die auf der Projektwebseite zugänglich ist [16] (verfügbar ab April 2026).

Alkalische Elektrolyse

Der Elektrolyseurhersteller thyssenkrupp nucera entwickelte mit seinen Partnern im Rahmen der Projekte INSTALL AWE und NCALab **Automatisierungsmethoden für das Stack-Assembling** sowie ein komplett **neues Zell- und Stackdesign**. Dieses Design soll Grundlage für die nächste Technologiegeneration der alkalischen Elektrolyse sein. Das neue Zelldesign wurde speziell auf seine Produzierbarkeit hin optimiert. Auf Basis dessen wurde ein Stack-Muster der nächsten Generation konstruiert, mit dem eine **Senkung der CAPEX um 30 %** erzielt werden kann. Für die Herstellung der Elektroden wurde außerdem der Nickelverbrauch um 30 % gesenkt. Weiterhin wurden **Methoden zur automatisierten Serienfertigung der Komponenten und Halbzellen** erfolgreich erforscht und entwickelt. Das umfasste den Zuschnitt, die Handhabung und die Zellmontage mit den großflächigen, empfindlichen und teils biegeschlaffen Bauteilen, die mit hoher Präzision assembliert werden müssen, was eine besondere Herausforderung darstellt. Durch diese Ergebnisse wurden die Herstellprozesse genauer und reproduzierbarer.

Ebenfalls aktiv in der alkalischen Elektrolyse ist der Hersteller Sunfire, der seine AEL-Technologie im Projekt AEL4GW mit seinen Partnern umfassend überarbeitete. Konkretes Ziel war es, mit einer neuen Stack-Generation die Herstellkosten um 30 % zu reduzieren. Hierfür wurde der alkalische Elektrolyseur für die Nutzung im

industriellen Maßstab weiterentwickelt. Es wurde ein **neues Stack-design** entwickelt, bei dem auf die **Eignung für das Scale-up** und die industrielle Fertigung hin optimiert wurde (*Design for Manufacturing*). Als Teil der Forschungsarbeiten wurden zudem **Testkapazitäten** aufgebaut, einschließlich eines 450 kW-Stackprüfstands, und **neue Formulierungen für die Beschichtung der Elektroden** erforscht.

Diese Ergebnisse wurden u.a. in einem Druck-Alkali-Elektrolyseur der neuen Generation eingebracht, der eine verbesserte Leistungsfähigkeit bei erhöhtem Betriebsdruck von 30 bar aufweist. Ein solcher Elektrolyseur mit einer Leistungsaufnahme von 20 MW wurde im Frühjahr 2024 im finnischen Harjavalta installiert. Bis zu 400 kg/h Grüner Wasserstoff kann der Druck-Alkali-Elektrolyseur mit Erneuerbarer Energie aus Windkraft dort herstellen [34].

Das Projekt StaR unter der Koordination des Start-ups WEW hatte sich zusammen mit seinen Partnern das Ziel gesetzt, die Investitionskosten für den Stack durch ein **neuartiges Stack-Design, Verwendung kostengünstiger Materialien** und **hochautomatisierter Fertigungsverfahren** drastisch zu reduzieren. Um die entwickelten und produzierten Short-Stacks experimentell zu untersuchen, wurde im Oktober 2022 ein **150 kW-AEL-Stack-Testfeld** an der TU Clausthal in Goslar aufgebaut [35]. Dort können Short-Stacks im Maßstab 1:1 eingebaut und bei Drücken bis zu 1,4 bara, Temperaturen bis zu 90 °C und einer maximalen Last von 150 kW untersucht werden. Die Stacks wurden unter anwendungsnahen Bedingungen getestet, welche auch alltägliche Störfaktoren und dynamischen Betrieb einbeziehen. Die Partner arbeiteten auch intensiv an der Automatisierung der Stackmontage. So konnte WEW im April 2024 eine Musterfertigung zur halbautomatisierten Herstellung von Stacks mit Zellflächen, die dem industriellen Maßstab entsprechen, einweihen und in Betrieb nehmen [36].

Im Forschungsprojekt PrometH₂eus entwickelten Partner aus akademischer und industrieller Forschung neue Sauerstoffelektroden für die AEL.

Zum Einsatz kamen **neue Katalysatormaterialien, skalierbare Synthesemethoden** und **modernste Analytik- und Simulationsmethoden**. Optimierte Vorbehandlungsstrategien [37], [38], [39] steigerten zusätzlich die Materialleistung. Ein zentrales Ergebnis ist ein neu entwickeltes **Benchmarking-Verfahren** [40], das eine systematische Bewertung und gezielte Auswahl der vielversprechendsten Materialkonfigurationen für eine anschließende Hochskalierung und Testung bei den Industriepartnern ermöglicht. Darüber hinaus werden die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse der wissenschaftlichen Gemeinschaft in Form eines Leitfadens zugänglich gemacht, um zukünftige Entwicklungen zu beschleunigen.

PEM-Elektrolyse

Im Projekt DERIEL, koordiniert von Siemens Energy, arbeiteten Partner aus Wissenschaft und Industrie zusammen und schafften ein erstes Verständnis über **Degradations- und Versagensmechanismen** in PEM-Elektrolyseuren im industriellen Maßstab. Am Forschungszentrum Jülich wurde dafür ein **Teststand für ein PEM-Elektrolyseurmodul im Industriemaßstab** in Betrieb genommen. Der Einzelmoldteststand im Megawattmaßstab enthält modernste Sensorik und komplexe Messtechnik, sodass jede einzelne Zelle charakterisiert und beobachtet werden kann. Die Partner untersuchten damit Degradationsmechanismen im druckbehafteten Elektrolyseurbetrieb, insbesondere den Einfluss der Betriebsweise auf die Langzeitstabilität. Industrieller Maßstab und Grundlagenforschung trafen hier direkt aufeinander, und das gewonnene grundlegende Verständnis trug zum De-Risking des Betriebs und zur Verbesserung kommender Elektrolyseurgenerationen bei. Flankiert wurden diese Untersuchungen durch umfangreiche Post-Mortem Analysen von Komponenten (z.B. MEAs). Durch das Zusammenspiel der Analysemethoden wurde ein erstes Verständnis zugrundeliegender degradationsbestimmender Mechanismen aufgebaut. Digitale Zwillinge simulierten zudem den kompletten Prozess, von der elektrochemischen Reaktion im Innern über Strömungen und Temperaturen bis hin zur Gesamtanlage [41]. Experimentell wurden beispielsweise die (unerwünschte)

Bildung von Iridium-Filamenten in der MEA nachgewiesen, Strategien zur Mitigation vorgeschlagen und der Einfluss von Betriebsprofilen auf die Aktivität des Katalysators untersucht. Diese und weitere Ergebnisse haben die Partner von DERIEL publiziert [42].

Ein weiteres von Siemens Energy koordiniertes H₂Giga-Projekt war SEGIWA, in dem die Automatisierung und Verknüpfung von Fertigungsprozessen sowie die digitale Abbildung und Analyse von Produktions- und Betriebsdaten erforscht wurde. Anhand der entwickelten Prozesse und digitalen Werkzeuge konnte skalierte Produktionskonzepte effektiv dargestellt und analysiert werden. Darüber hinaus wurden in dem Projekt auch alternative Materialien und verbesserte Recyclingtechnologien im Kontext der Serienproduktion erforscht. Die Forschungsergebnisse flossen in die 2023 eröffnete Gigawatt-Fabrik von Siemens Energy und Air Liquide ein [43]. Heute wird hier die Silyzer® 300-Elektrolyseur-Plattform (jetzt: Elyzer P-300) hochautomatisiert mit einer Produktionskapazität im GW-Bereich gefertigt.

Auch im von Everllence (ehemals MAN-ES) koordinierten Projekt PEP.IN wurden Technologien für ein **automatisiertes Stack-Assembling** entwickelt und kommen im Gigahub von Quest One (ehemals H-TEC SYSTEMS) zum Einsatz. Der Gigahub wurde im September 2024 in Hamburg-Rahlstedt eröffnet. Durch die beteiligten Automobilzulieferer und -hersteller flossen auch Erkenntnisse aus dem Bereich der PEM-Brennstoffzelle ein, sodass Synergien genutzt werden konnten. Der Elektrolysestack wurde wesentlich überarbeitet und auf die besonderen Anforderungen der **Produzierbarkeit** hin angepasst (*Design for Production*). Parallel dazu wurde von den Partnern an einem **Stack of the Future** geforscht, der als Basis für spätere Elektrolyseurgenerationen dienen soll. Auch die spätere Wartung wurde hier mitgedacht. In Zukunft sollen intelligente Systeme zur Predictive Maintenance eingesetzt werden, um die Effizienz der Wartungsarbeiten zu maximieren und eine lange Stacklebensdauer ohne kostenintensives Over-Engineering zu ermöglichen [44].



Teststand für
Elektrolyseur zur Produktion
von Grünem Wasserstoff

© Forschungszentrum Jülich/
Bernd Nörig



Laboranlage Sektorenggekoppelte Verwertung der PEM-Elektrolyseprodukte

© Fraunhofer IEG/Paul Glaser

Das von Linde koordinierte Projekt SineWave konzentrierte sich auf die Verbesserung der **Systemperipherie** von PEM-Elektrolyseuren mit dem Ziel, Investitions- und Betriebskosten (*Operational expenditures*, OPEX) einzusparen. Die Partner haben die **Gas-Flüssig-Trennung** [45] und die **Wasserstoff-Aufreinigung** erheblich vereinfacht, wodurch Kosten gespart werden. Das Gesamtsystem wurde auch auf seine **Eignung zur Serienfertigung** hin optimiert und innovative Technologien eingesetzt, wie zum Beispiel Additive Fertigung.

Im Projekt IntegrH2ate unter Koordination von Linde und seinem Partner Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geotechnologien (IEG) wurde ein Konzept entwickelt, mit dem die **Abwärme des Elektrolyseurs nutzbar** gemacht wird, indem sie mit einer Wärmepumpe auf ein höheres Temperaturniveau gehoben wird (*high-grade heat*). Die „**Laboranlage Sektorenggekoppelte Verwertung der PEM-Elektrolyseprodukte**“ (La-SeVe) wurde auf dem Gelände der Stadtwerke Zittau aufgebaut [46] und im September 2025 eingeweiht [47]. Sie umfasst einen PEM-Elektrolyseur in einem Containerraum sowie eine Wärmepumpe in einer bestehenden Halle. Die Abwärme aus der Elektrolyse kann durch eine Wärmepumpe auf ein höheres Temperaturniveau gebracht und somit als Fernwärme genutzt werden. Den entstehenden Sauerstoff untersuchten die Projektbeteiligten in Hinblick auf seine Nutzungspotenziale. Die genehmigte Versuchsanlage dient primär der Betriebsoptimierung des innovativen Anlagenkonzepts. Die Anlage in Zittau ermöglicht es, die in den vergangenen Jahren entwickelten Konzepte in der Praxis zu testen und weiterzuentwickeln. Mittelfristig wird dies die Umsetzung von Elektrolyseprojekten mit Sektorenkopplung vorantreiben, welche einen wesentlichen Baustein zur nachhaltigen Nutzung der Elektrolyse Nebenprodukte sowie zur Stabilisierung eines auf Erneuerbaren Energien basierenden Energiesystems darstellt [48].

Als Zulieferer von Stacks forschte und entwickelte Schaeffler im Projekt StacIE mit seinen Partnern an **neuen Stack-Designs** und verbesserten Kombinationen von Membran-Elektroden-Einheiten und Bipolarplatten. Im Rahmen des Projekts wurden Komponenten und drei neue Stack-Designs entwickelt, die sehr gute Leistungsdaten zeigen.

Ein Teil der Ergebnisse floss in die aktuelle Stack-Serienplattform mit einer Leistungsaufnahme von bis zu einem Megawatt ein (Wasserstoffproduktion von bis zu 20 kg/h). Für die **Bipolarplatten** wurde eine serientaugliche Schutzbeschichtung entwickelt. Gemeinsam mit den Forschungspartnern wurden Degradationsmechanismen grundlegend analysiert und kritische Parameter für den stabilen Betrieb identifiziert. Die von Schaeffler entwickelten Technologien können in einem breiten Anwendungsspektrum von 50 kW bis in den Multi-Megawatt-Bereich eingesetzt werden.

Ebenso Zulieferer von Kernkomponenten für PEM-Elektrolyseure sind Partner des Projekts IRIDIOS unter Leitung von Heraeus Precious Metals, die **Katalysatoren und MEAs** entwickeln, hochskalieren und herstellen. Das Projekt brachte damit erfolgreiche Arbeiten aus dem von BMFTR geförderten Kopernikus-Projekt P2X in H₂Giga ein. In den ersten Phasen von Kopernikus P2X entwickelten die Partner die Membran-Elektroden-Einheit so weiter, dass sie erstens effizienter ist und zweitens achtmal weniger des teuren Edelmetalls Iridium benötigt als eine Referenz-MEA, die mit dem damaligen Stand der Technik (2023) vergleichbar war. Die Weiterführung dieses Projekts im Rahmen von H₂Giga zielte darauf ab, dies auf großskaliger Skala zu realisieren. Dazu entwickelten die Projektpartner MEAs mit reduziertem Iridium-Gehalt und untersuchten diese auf ihre Wechselwirkung mit den angrenzenden Stack-Komponenten. Der nächste Schritt war im Jahr 2025 die Erprobung der neuen Materialien auf Stack-Ebene unter anwendungsnahen Bedingungen.

Das Innovationspool-Projekt IREKA unter Koordination des Leibniz-Instituts für Katalyse widmete sich der Erforschung korrosionsstabiler, elektrisch leitfähiger und katalytisch aktiver Anodenkatalysatoren, in denen der Iridium-Gehalt stark reduziert wurde. Dabei wurde ein vielversprechender neuartiger Katalysator entwickelt, der **< 48 % wt. anstelle von 83 % wt. Iridium** wie in kommerziell erhältlichen Anodenkatalysatoren aufweist. Er zeigte eine vergleichbare katalytische Aktivität und qualifizierte sich auch im Langzeittest in Form einer MEA.



Megawatt Stack von Schaeffler auf der AICHEMA
© Gunnar Mitzner Fotodesign 2024

Ein weiteres Beispiel aus den Forschungsprojekten des Innovationspools ist die Methodenentwicklung für ein besonders schnelles und effizientes **Screening von Materialien und Komponenten**, z.B. Elektroden, CCMs und Einzelzellen (Projekt HyThroughGen, Koordinator Helmholtz-Institut Erlangen-Nürnberg). Insbesondere für das Alterungsverhalten unter anwendungsnahen Bedingungen wurden **Hochdurchsatz-Testmethoden** entwickelt und validiert [49], [50], durch die die zukünftige Entwicklung beschleunigt werden kann.

In dem Projekt Fluorfreie-MEA, koordiniert vom Hahn-Schickard-Institut, wurden Membranen auf Basis von sulfoniertem Polyphenylsulfon entwickelt, die vielversprechende Ergebnisse aufweisen. Es konnte eine vollständig **fluorfreie Membran** demonstriert werden, die im Dauertest über 2000 Stunden eine mit konventionellen PFSA-Membranen vergleichbare Leistung zeigte – und dies ohne wesentliche Degradation. Damit liegt eine wichtige Ausgangsbasis für weitere Entwicklungen vor, um mittel- bis langfristig eine PEM-Elektrolyse ohne fluoridierte Polymere betreiben zu können. Gerade im Hinblick auf die während der Projektlaufzeit aufgekommene PFAS-Debatte ist dies ein besonders wertvolles Projektergebnis.

Hochtemperatur-Elektrolyse

Für die Hochtemperatur-Elektrolyse (HTEL) hat Sunfire mit seinen Partnern im Rahmen von H₂Giga in den Projekten HTEL-Stacks und HTEL-Module zusammengearbeitet. Als Ergebnis haben die Partner neue **Zell- und Stackdesigns** entwickelt und die damit kompatiblen Prozesse für die Zell- und Stackfertigung erforscht. Neue HTEL-Stacks wurden erfolgreich über 10.000 h Dauerbetrieb getestet und zeigten verbesserte Leistung bei niedriger Degradation [51]. Zudem steht jetzt das Konzept für die neueste Generation des HTEL-Moduls mit 10 MW, das mit besonders hohem Wirkungsgrad in Industrieanlagen Wasserstoff herstellen kann.

AEM-Elektrolyse

Im H₂Giga-Projekt HY-Core haben der Elektrolyseur-Hersteller Enapter und die Fachhochschule Münster den technischen Grundstein für den Schritt in den Megawatt-Bereich gelegt. Im April 2023 installierte Enapter erstmals einen AEM-Elektrolyseur im Megawatt-Bereich. Seitdem befindet sich die Anlage im Testbetrieb. Mit der **Inbetriebnahme des „AEM Multicore“** wurde eine innovative Technologie in die nächstgrößere Leistungsklasse gebracht. Der modulare Aufbau aus 420 Stacks sorgt für einen besonders flexiblen Betrieb. Für einen Teillastbetrieb können die Stacks einzeln abgeschaltet werden. So ist der Elektrolyseur besonders geeignet, sich jederzeit an fluktuierende Erneuerbare Stromquellen anzupassen [52].

Ebenso der AEM-Elektrolyse gewidmet war das Projekt AEM-Direkt, in dem Siemens Energy mit seinen Partnern **Beschichtungstechnologien mit neuartigen Katalysatoren** verglich, um auf Basis der Duraion®-Membran von Evonik eine **großvolumenfähige Membran-Elektroden-Einheit** herzustellen. In AEM-Direkt wurde die Eignung einer direkten Beschichtung auf der Membran nachgewiesen, um später auf großen Zellflächen Elektroden herzustellen. Eine besondere Herausforderung ist dabei das Quellverhalten der Membran in Kontakt mit der aufgetragenen Katalysatorsuspension. Optimierte wurde in diesem Projekt in Hinblick auf ein ganzes Set an wichtigen Parametern, wie z.B. Beschichtbarkeit, Zellwiderstand und chemische Stabilität. So konnten gegen Ende des Projekts Zelltests mit deutlicher Verbesserung der Leistung und ein bis dato stabiler, über 800 Stunden dauernder Betrieb eines 6 kW AEM-Elektrolyse Stacks gezeigt werden [53].

AEMDirekt 25cm² und 300cm² © Siemens Energy



Querschnittsthemen

Eines der Querschnittsthemen war das Recycling, das im H₂Giga-Projekt ReNaRe bearbeitet wurde. Kombiniert wurden dabei technologische Ansätze aus den Bereichen automatisierte Demontage, mechanisches Recycling und Metallurgie. Die Partner entwickelten Technologien zum Recycling und verknüpften diese zu einem Verfahrensschema für den Recyclingprozess.

Zu den weiteren gemeinsamen Schwerpunktthemen gehörten die Automatisierung und Robotik, Systemschnittstellen, Anlagenplanung und Prozessführungskonzepte sowie eine Vereinheitlichung von Genehmigungsverfahren und die Erarbeitung von Weiterbildungsprogrammen.

In den Jahren 2021 bis 2025 haben die Forschungsprojekte des Wasserstoff-Leitprojekts H₂Giga die vier Elektrolysetechnologien substanziell vorangebracht. Technologien für die Serienfertigung und Hochskalierung wurden erforscht und entwickelt und in einigen Fällen bereits in Fertigungsanlagen bei den Herstellern aufgenommen. Zell- und Stackdesigns wurden in Zusammenarbeit von Wissenschaft und Industrie auf die Eignung für Scale-up und ein Design for Manufacturing hin optimiert. Neue Stack-Generationen zeigen in Bezug auf Kosten, Performance und Lebensdauer signifikante Fortschritte. Gleichzeitig wurden Forschungsinfrastrukturen und Analysekapazitäten aufgebaut, mit denen Mechanismen in großen Systemen grundlegend untersucht werden können.

Die Herstellung von AEL-Stacks wurde bei zwei Herstellern mittels der Forschungsergebnisse aus H₂Giga zu einem erheblichen Anteil automatisiert. Ein AEL-Hersteller und zwei PEM-Elektrolyseurhersteller bauten GW-Fabriken für Stacks auf, in denen in H₂Giga erforschte Fertigungstechnologien zur Anwendung kamen. Die HTEL hat einen deutlichen Schritt in Richtung Scale-up und Langzeitanwendung gemacht. Die AEM-Elektrolyse wurde erstmals in den MW-Maßstab gebracht und wird weiter in Richtung Hochskalierung entwickelt. Zudem entstanden neue Konzepte und Erkenntnisse zur Anlagen- und Systemeinbindung. Forschungsseitig gab es deutliche Fortschritte in der Entwicklung umwelt- und ressourcenschonender Materialien, einschließlich beschleunigten Entwicklungsverfahren und beim Verständnis von Degradationsmechanismen. Außerdem wurde ein vollständiges Recyclingkonzept für den Stack entwickelt.

Stand der Industrialisierung der Wasserelektrolyse

Um die Ziele der Nationalen Wasserstoffstrategie zu erreichen, braucht es effiziente, langlebige, robuste, günstige und skalierbare Elektrolyseure, die serienmäßig hergestellt werden. In diesem Kapitel wird der aktuelle Stand der Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland dargestellt. Abschnitt 4.1 liefert Einblicke in die industrielle Fertigung von Elektrolyseuren MADE IN GERMANY, gefolgt von einer Einordnung in das internationale Umfeld in Abschnitt 4.2. Zuletzt werden in Abschnitt 4.3 nicht-technische Hemmnisse beschrieben, die den Hochlauf von Elektrolyseuren aktuell noch ausbremsen.

4.1 Industrielle Fertigung von Elektrolyseuren MADE IN GERMANY

Bis zum Jahr 2020 wurden Elektrolyseure und deren Komponenten noch zum großen Teil in Manufakturarbeit gefertigt. Das führte zu hohen Kosten und geringer Fertigungskapazität. Zudem ist bei Handarbeit immer ein individueller Faktor enthalten, der die Reproduzierbarkeit einschränken kann. Daher wurden im Wasserstoff-Leitprojekt H₂Giga Technologien entwickelt, mit denen Elektrolyseure im industriellen Maßstab und in automatisierter Fertigung hergestellt werden können. Das umfasst neben Automatisierung und Robotik auch davor liegende Schritte, wie eine Überarbeitung des Designs im Hinblick auf Eigenschaften, die für den industriellen Maßstab wichtig sind, wie z.B. Fertigung, Wartung und Recycling. Auch das Scale-up, also die Entwicklung größerer Zellflächen, Stacks und Peripheriekomponenten, wurde vorangebracht, bis hin zur Anlagenplanung und Integration in eine Einsatzumgebung oder in ein Energiesystem.

Um den Stand der Industrialisierung übergreifend zu skizzieren, wurden die Hersteller aus H₂Giga mit einheitlicher Struktur nach ihrer erwarteten Fertigungskapazität und dem Stand der Industrialisierung ihrer jeweiligen Technologie befragt.

Die Ergebnisse dieser Datenerhebung sind im Folgenden teilweise herstellerspezifisch und teilweise technologiescharf zusammengefasst.

Fertigungskapazitäten deutscher Elektrolyseurhersteller

In den H₂Giga-Projekten INSTALL-AWE und NCAlab hat Thyssenkrupp nucera gemeinsam mit seinen Partnern die kostenoptimierte Serienfertigung der Komponenten und Halbzellen als auch die Vollautomatisierung der Montage der Elektrolysezellen durch den Einsatz von Robotik vorangetrieben. Insgesamt ermöglichten die Projektergebnisse eine Produktionssteigerung auf 2 GW/a, sodass eine potentielle jährliche Fertigungskapazität im GW-Maßstab bis 2025 erreicht wurde (Ziel: 5 GW/a bis 2030) [54]. Als weiterer AEL-Hersteller hat die WEW im Rahmen des Projekts StaR im April 2024 in Dortmund eine Musterfertigung für Elektrolyse-Stacks in Betrieb genommen. In der vollen Ausbaustufe würde die Musterfertigung jetzt schon eine jährliche Kapazität von circa. 80 MW jährlich erlauben.

Als Hersteller der PEM-Elektrolyse eröffnete Siemens Energy zusammen mit seinem Joint-Venture-Partner Air Liquide im November 2023 eine Giga-Factory mit einer Fertigungskapazität von 1 GW/a für PEM-Elektrolyse-Stacks [56], in der auch in H₂Giga erforschte Technologien zur Anwendung kamen. Auf 2.000 Quadratmetern wurden neue Produktionslinien zur automatisierten Stack-Herstellung errichtet, die eine Fertigungskapazität von mindestens 3 GW/a bis Ende 2025 sicherstellen sollen. Eine weitere automatisierte PEM-Elektrolyse-Stack-Herstellung mit Technologien aus H₂Giga ist der im September 2024 eröffnete Gigahub von Quest One. Im Vollausbau können dort vor Ort jährlich PEM-Stacks mit einer Fertigungskapazität von voraussichtlich mehr als 5 GW/a produziert werden [57]. Eine Übersicht über öffentlich verfügbare Angaben zu Fertigungskapazitäten deutscher Hersteller ist in Tabelle 4.1 zu finden.

Hersteller	Technologie	Kapazität (Jahr)	Ziel Kapazität (Jahr)	Ref.
Thyssenkrupp nucera	AEL	2 GW/a (2025)	5 GW/a (2030)	[54]
Sunfire	AEL	Bis zu 1 GW/a		[58]
WEW	AEL	50 MW/a (2024)		[55]
Siemens Energy	PEM-Elektrolyse	1 GW/a (2023)	Mind. 3 GW/a (2025)	[56]
Quest One	PEM-Elektrolyse		5 GW/a (keine Angabe)	[57]

Tabelle 4.1: Fertigungskapazitäten deutscher Elektrolyseurhersteller (laut öffentlich verfügbarer Informationen)



© Thyssenkrupp nucera AG & Co. KGaA

Um zusätzliche Angaben zu angestrebten Produktionskapazitäten von Elektrolyseuren zu erhalten, wurden deutsche Elektrolyseur- und Stackhersteller im Rahmen der Experteninterviews im Jahr 2023 (siehe Anhang Abschnitt 9.1.1) zu geplanten Fertigungskapazitäten für die Zeithorizonte 2025, 2030 und 2050 befragt. Die Hersteller haben aufgrund der volatilen Rahmenbedingungen keine verlässlichen Aussagen für das Jahr 2050 gemacht.

Für die PEM-Elektrolysetechnologie ergibt sich bis 2030 eine aufsummierte Produktionskapazität verschiedener Hersteller von mindestens 12 GW/a. Die Fertigungskapazität von AEL-Elektrolyseuren soll in Deutschland auf mehr als 7 GW/a erhöht werden. Eine Produktionskapazität von HT-Elektrolyseuren wird bis 2030 für den dreistelligen MW-Bereich angestrebt. Ambitioniert ist auch das Ziel für die AEM-Elektrolyse, bei der eine Hochskalierung der Produktionsvolumina bis 2030 bis in den GW-Maßstab angestrebt wird. Für alle Technologien gilt, dass der Hochlauf der Produktion auch stark mit einem entsprechenden Absatz korreliert. Aufsummiert über alle Elektrolysetechnologien ergibt dies eine kumulierte prognostizierte Fertigungskapazität von insgesamt mindestens 20 GW/a für das Jahr 2030. Im Sinne eines nationalen Aufbaus der Elektrolysekapazität von bis zu 10 GW wären entsprechende Fertigungskapazitäten vorhanden. Allerdings muss der Export von Elektrolyseanlagen MADE IN GERMANY mitberücksichtigt werden, der zusätzliche Fertigungskapazität erforderlich macht.

Stand der Industrialisierung der Fertigungstechnologien

Um eine Einschätzung zum Stand der Industrialisierung der einzelnen Komponenten und Fertigungsabläufe zu erhalten, wurden deutsche Stack- und Elektrolyseurhersteller dazu Mitte 2024 befragt. Die Prozesse sollten gemäß der folgenden Klassifizierung in Tabelle 4.2 beurteilt werden.

Klassifizierung	Prozessstabilität
+++	Stabiler Prozess nahezu ohne Ausschuss
++	Stabiler Prozess, händische Operationen notwendig, fehleranfällig
+	kein stabiler Prozess, sehr fehleranfällig trotz/ wegen händischer Operation
#	Weltweite kritische Monopolstellung/ Single Source Problematik
0	kein Prozess vorhanden

Tabelle 4.2: Klassifizierung der Prozessstabilität zur Einordnung der Fertigungstechnologien für Elektrolyseure

Die Prozessstabilität, sozusagen der Reifegrad des jeweiligen Prozesses, wurde entsprechend Tabelle 4.2 eingeordnet von 0 für ‚nicht vorhanden‘ bis +++ für ‚ausgereift‘. Dies wurde separat für die drei Stufen ‚Labormaßstab‘, ‚Pilotmaßstab‘ und ‚industrieller Maßstab‘ abgefragt. In den meisten Fällen wird ein Prozess zunächst im Labor entwickelt, bis er zuverlässig läuft, und dann weiter hochskaliert.

Es gibt aber auch Prozesse, die im Labormaßstab inhärent nicht vollständig kontrollierbar sind, da sie erst im automatisierten Ablauf wirklich reproduzierbar werden (z.B. Elektrodenherstellung). In diesem Fall ist der Labormaßstab mit weniger Punkten bewertet als der industrielle Maßstab. Ebenso gibt es Technologien, die man erst im industriellen Maßstab in hochwertiger oder speziell angepasster Version installiert, sodass auch hier der Labormaßstab geringer bewertet wird (z.B. Qualitätskontrolle). Im Folgenden wird die Einordnung des Stands der Technik entsprechend dieses Systems für die verschiedenen Elektrolyseurtechnologien beschrieben.

Alkalische Elektrolyse

Die AEL ist technologisch der seit Jahrzehnten etablierten und im industriellen Maßstab betriebenen Chlor-Alkali Elektrolyse ähnlich. Daraus ergibt sich, dass bereits Erfahrungen mit der Herstellung und dem Betrieb großskaliger, ähnlicher Systeme vorhanden sind. Dennoch umfasst das Scale-up der AEL-Wasserelektrolyse auch Themen, die spezifisch für diese Technologie sind und daher neu erforscht werden müssen. Insbesondere die Automatisierung der Prozessschritte und die Skalierung der Komponenten und des gesamten Systems waren in H₂Giga wichtige Entwicklungsziele. Eine Einschätzung zum Stand der Industrialisierung ist in Tabelle 4.3 zu finden.

Insgesamt zeigt die Tabelle den Fortschritt in Konstruktion und Beschichtung. Einige Punkte, wie der Assembling-Prozess und die Qualitätskontrolle, werden durch den Wechsel auf industrielle Technologien konsistenter und sind daher höher bewertet als für die Handarbeit im Labor. Darüber hinaus haben die AEL-Hersteller für den Separator auf eine Single Source Problematik hingewiesen, da Agfa aktuell der einzige Hersteller des Diaphragmas ZrO₂-Poly-sulfonmembran Zirfon®-Perl ist.

Bei der AEL-Zellmontage stellen die großen Einzelzellgrößen von bis zu 3 m² eine besonders große Herausforderung dar, da einzelne Bauteile neben ihrer Großflächigkeit zusätzlich empfindlich und biegeschlaff sind. Ein hoher manueller Inspektions- und Montageaufwand ist notwendig. Ebenfalls ist die Aufbringung des Dichtungssystems mit Einhaltung der erforderlichen Toleranzen ein Prozess mit hohen Anforderungen.

Das Inbetriebnahmeprozedere der alkalischen Elektrolyseanlagen wird, auch wegen deren Größe, als komplex beschrieben. Aufgrund der Anlagengrößen und der global unterschiedlichen Anforderungen ist das Verfahren meist als Einzelinbetriebnahme zu bewerten. Dies erfordert eine sorgfältige Planung und Anpassung an die spezifischen Gegebenheiten des jeweiligen Standorts.

Thyssenkrupp nucera trieb im Rahmen der Projekte INSTALL AWE und NCALab die Automatisierung der Montage der alkalischen Elektrolysezellen durch den Einsatz von Robotik voran. Dabei sind nicht alle Schritte gleich ‚einfach‘ automatisierbar. Bei der Umsetzung einer zentralisierten und automatisierten Zellmontage ist eine der Herausforderungen das beschädigungsfreie Greifen der Gitterbauteile. Im Rahmen der Projektarbeiten wurden verschiedene mechanische Greifertechnologien für die Handhabung der Mesh-Bauteile untersucht und bewertet [59]. Bei der Elementarfertigung konnte die Schweißgeschwindigkeit bei gleichbleibender Nahtqualität verdreifacht werden. Zusätzlich wurde ein Konzept zur Fehlstellendetektion bei Schweißnähten durch Inline-Prozessüberwachung erfolgreich validiert. Zudem arbeiteten die Partner mit Thyssenkrupp-nucera und dessen Joint-Venture-Partner De Nora eine Lieferkette aus, die die Anforderungen an eine industrielle Serienfertigung erfüllt.

Im Rahmen des Projekts StaR unter der Koordination der WEW wurden hochautomatisierte Fertigungsverfahren entwickelt und Realdaten aus der Produktion mit einem digitalen Zwilling verknüpft. Konkret wurde hier die Senkung der Produktionskosten, die weltweite Vermarktung des Stacks und die Erhöhung der Kosteneffizienz der Grünen Wasserstoffproduktion angestrebt [36].

Stand der Industrialisierung der Fertigungstechnologien AEL			
Bereich	Labormaßstab	Pilotmaßstab	Industrieller Maßstab
Metallische Konstruktionsmaterialien	+++	+++	+ - ++
Separator	+++	+++	+++ *)
Elektrodenbeschichtung	+++	++	++
Halbschale/BPP	++	++	++
Dichtung	+	++	++
Assembling-Prozess	+	+	+ - ++
Inbetriebnahme	+	+	++
Qualitätskontrolle	+	+	++

Tabelle 4.3: Qualitative Einordnung des Stands der Industrialisierung der Fertigungstechnologien für die AEL (Referenzjahr: 2025). *) Single Source

Aktuell läuft die Produktion teilautomatisiert mit Mensch-Maschinen-Interaktionen. Weitere Automatisierungsschritte werden kontinuierlich evaluiert. Insgesamt wurden wichtige Prozessschritte der AEL-Technologie voll- oder teilautomatisiert und damit ein wichtiger Schritt in Richtung Serienfertigung gemacht. Nicht nur der höhere Durchsatz, sondern auch die erhöhte Reproduzierbarkeit und die besseren Möglichkeiten und Methoden zur Qualitätskontrolle zeigen die erfolgreiche Weiterentwicklung dieser Technologie. Damit wurden wichtige Fortschritte erzielt, um auch eine Nachfrage im industriellen Maßstab bedienen zu können.

PEM-Elektrolyse

Die Hochskalierung der PEM-Elektrolyse macht eine Skalierung der Grundmaterialien, z.B. Herstellung der Katalysatoren, der MEA und des Stacks sowie des kompletten Elektrolysemoduls erforderlich. Die Branche arbeitet daher – wie auch für die AEL – an einer (Voll-) Automatisierung der einzelnen Schritte der Elektrolyseurproduktion. In H₂Giga wurden Technologien dafür erforscht und entwickelt. Der Stand der Industrialisierung der Fertigungsverfahren wird von den Partnern nach Tabelle 4.4 eingeschätzt. Er ist bei verschiedenen Herstellern unterschiedlich, sodass die Bewertung lediglich eine Orientierung geben kann.

Teilprozesse der Fertigung von MEA und der Stack-Montage wurden im Rahmen des H₂Giga-Projekt SEGIWA erfolgreich automatisiert. Hier wurde auch ein System entwickelt, das die Fertigungsdaten mit den späteren Abnahmetests der Stacks korreliert, sodass diese Informationen für das Qualitätsmanagement nutzbar werden. Ausführliche Details zum Aufbau der Giga-Factory samt der einzelnen Produktionsschritte, von der Herstellung der CCM bis zur



Modulmontage und deren Automatisierungsgrad, sind in Locci et al. [60] beschrieben. Um zukünftige Stackdesigns und -konzepte berücksichtigen zu können, wurde die Fabrik so konzipiert, dass nicht nur die Automatisierung eine wichtige Rolle spielte, sondern auch die Maschinen flexibel und schnell umgestellt werden können. Einer der vollautomatisierten Schritte ist die Zellmontage. Dabei nehmen zwei Roboterarme kontinuierlich Zellkomponenten auf und bauen diese zusammen. Insgesamt wurde der Automatisierungsgrad mit 80 % angegeben.

Im Gigahub der Quest One wurde eine der beiden Fertigungslinien für das PEM-Stack-Assembling im Rahmen des Projekts PEP.IN von den Partnern konzipiert, insbesondere mit Forschungsarbeiten zur Auswahl der zu nutzenden Greifwerkzeuge für unterschiedliche Komponenten.

Stand der Industrialisierung der Fertigungstechnologien PEM-Elektrolyse			
Bereich	Labormaßstab	Pilotmaßstab	Industrieller Maßstab
Membran (hier nur auf PFSA-Basis)	++(+)	+++	+++ *)
Katalysatoren (Pulver)	+++	+++	+++
Elektroden, Katalysatorschichten (Beschichtung)	++(+)	++	+++
MEA-Assembling	+++	+++	++ bis +++
Dichtung	+++	++	++
Stack Assembling	+++	++	+ bis ++
Inbetriebnahme	++	++	++
Qualitätskontrolle	++	+	+

Tabelle 4.4: Qualitative Einordnung des Stands der Industrialisierung der Fertigungstechnologien für die PEM-Elektrolyse (Referenzjahr: 2024).

Bewertung bei Labormaßstab mit ++(+): in Labor inhärent keine stabilen Prozesse möglich, eingeschränkte Reproduzierbarkeit wegen Handarbeit.

*) Membran auf Basis von PFSA: Oligopol-Situation der Lieferanten, Diversifizierung der Zulieferer gewünscht



PEM-Elektrolyse Gigahub Quest One © Quest One GmbH

Die neue, automatisierte Fertigung reduziert die Produktionszeit um etwa 75 % und steigert damit die Wirtschaftlichkeit und auch die Fertigungsqualität erheblich. Das H₂Giga-Projekt PEP.IN erforschte weiterhin Möglichkeiten der Automatisierung des gesamten Produktionsprozesses und entwickelte Logistikkonzepte, um eine qualifizierte und massenfertigungsgerechte Lieferkette sicherzustellen [61].

Ein weiteres Beispiel für den Aufbau einer automatisierten Serienfertigung von PEM-Elektrolyse Stacks ist das Projekt StacIE. Hier wurde die Grundlage geschaffen, Kernkomponenten und Stackdesigns in den MW-Maßstab zu skalieren. Für Komponenten des Stacks wurden Produktionstechnologien erforscht und entwickelt, wobei Schaeffler von seiner langjährigen Industrialisierungskompetenz als Automobil- und Industrielieferer profitiert [62].

Aufbauend auf den Ergebnissen von H₂Giga wird eine weitere Automatisierung von Produktionsschritten nötig sein, entsprechend dem Entwicklungsstand beim jeweiligen Hersteller. Zudem gewinnt die Qualitätssicherung von Komponenten und Stacks an Bedeutung. Für die Qualitätssicherung müssen teilweise neue Methoden entwickelt werden und teilweise vorhandene Messtechniken in die Produktionsabläufe integriert werden. Auch die Rohstoffverfügbarkeit von Iridium ist ein wichtiges Thema und erfordert die Ausarbeitung robuster und zuverlässiger Lieferketten [60].

Hochtemperatur-Elektrolyse

Der Stand der Industrialisierung der Fertigungsverfahren (konkret für Stack-Fertigung) ist in Tabelle 4.5 dargestellt. Die Fertigung von HT-Elektrolyseuren in Deutschland befindet sich aktuell auf dem Weg vom Pilotmaßstab zum industriellen Maßstab. In den H₂Giga-Projekten HTEL-Stacks und HTEL-Module, koordiniert von Sunfire, wurden Produktionsanlagen für die Hochtemperatur-Elektrolyse konzeptioniert sowie Fabrik- und Lieferantenkonzepte erstellt. Eine neue Modul-Generation wurde auf bis zu 10 MW erfolgreich hochskaliert, der Wirkungsgrad perspektivisch auf 89 % erhöht und die Herstellkosten pro kW Leistungsaufnahme deutlich gesenkt. Die angestrebte Produktionskapazität beträgt etwa 200 MW pro Jahr. Dies erscheint im Vergleich zur AEL und PEM-Elektrolyse zwar wenig, ist aber dennoch erheblich und bedient vor allem Spezialanwendungen, in denen Wärme zur Verfügung steht.

Aus technischer Sicht sind wichtige Themen für Forschung und Innovation der HTEL der Stackfügeprozess und auch das Hochskalieren der Zellgrößen, die derzeit typischerweise bei einer aktiven Fläche im Bereich von 100–200 cm² angesiedelt ist. Für deutlich größere Flächen muss das Wärmemanagement des Stacks besonders ausgereift sein, damit Materialschäden durch Temperatur-

Stand der Industrialisierung der Fertigungstechnologien HTEL			
Bereich	Labormaßstab	Pilotmaßstab	Industrieller Maßstab
Materialien	+++	+++	++
MEA	++	++	++
BPP	++	++	++
Dichtung	+++	+	++
Assembling-Prozess	+++	++	++
Inbetriebnahme	+++	++	++
Qualitätskontrolle	+++	++	++

Tabelle 4.5: Qualitative Einordnung des Stands der Industrialisierung der Fertigungstechnologien für HTEL (Stack) (Referenzjahr: 2025).

gradienten vermieden werden [22]. Weitere Forschungsbedarfe liegen auch in der Qualitätssicherheit im Stackfertigungsprozess, u.a. zum Ausrichten beim Stapeln, Qualifizierung des Stapelergebnisses, Fertigung größerer Stacks (mehr Ebenen), sowie in der Steigerung des Automatisierungsgrades und Verbesserung des fertigungsoptimierten Moduldesigns.

AEM-Elektrolyse

Die AEM-Elektrolysetechnologie wird von den Herstellern und Forschenden auf TRL 6 eingeschätzt und befindet sich somit in einer frühen Entwicklungsphase. Die in Tabelle 4.6 dargestellten Daten zu Leistung und Stabilität beziehen sich auf kleine Stacks und Systeme im kW-Bereich. Für Systeme im industriellen Maßstab liegen noch keine entsprechenden Daten vor und auch die Herstelltechniken für AEM-Elektrolyse sind noch nicht in diesen Bereich vorgedrungen. AEM-Elektrolysestacks werden heute noch manuell assembliert. Aktuelle Forschung und Entwicklung konzentriert sich auf Materialien und Beschichtungsverfahren der Membranen, Katalysatoren und CCM, um Leistung und Lebensdauer weiter zu erhöhen [63]. Verschiedene Herstellmethoden der CCM werden getestet, darunter Abscheidung, Beschichtung oder Einbettungsverfahren. Ziel ist es, geeignete Kombinationen von Elektrokatalysatoren, Ionomeren und Membranen zu optimieren, um die Ionenleitfähigkeit durch die Elektroden zu verbessern und so die Katalysatornutzung zu optimieren. Als Membranen werden verschiedene Basispolymere getestet, die bisher als Forschungsprodukt oder im kleineren Maßstab kommerziell erhältlich sind. Hersteller sind z.B. Fumatech (Fumasep®), Ionomr Innovations (Aemion®), Dioxide Materials (SUSTAINION®), Versogen (PiperION®) und Orion Polymer (Orion TM1®). Diese Membranen sind aufgrund ihres geringen Produktionsmaßstabs derzeit noch kostenintensiv [63].

Ein weiterer erforderlicher Entwicklungsschritt ist die Entwicklung größerer Zellflächen, die von der aktuellen Größenordnung eines A4-Blatts in Richtung 0,5 m² skaliert werden sollen. Sowohl Funktionalität als auch Langzeitstabilität dieser größeren Zellen müssen zudem noch dargestellt werden. Der Stand der Industrialisierung der Fertigungsverfahren für die AEM-Elektrolyse ist in Tabelle 4.6 abgebildet.

Den ersten Schritt in Richtung eines industriellen Maßstabs hat das H₂Giga-Projekt HyCore, koordiniert von Enapter, gemacht und den weltweit ersten AEM-Elektrolyseur im MW-Maßstab aufgebaut und in Betrieb genommen. Er basiert auf einem numbering-up kleiner kW-Stacks, die flexibel hinzugeschaltet und dem Stromangebot angepasst werden können. Im nächsten Schritt sollen auch hier die Zellen hochskaliert werden, sodass weniger größere Stacks ein solches MW-System bilden [52].

Näher an der Materialentwicklung hat das H₂Giga-Projekt AEM-Direkt gearbeitet, koordiniert von Siemens Energy. Hier wurden Direktbeschichtungsverfahren für die Abscheidung von iridiumfreien bzw. edelmetallfreien Elektrokatalysatoren auf der AEM erforscht und entwickelt, wobei neben wichtigen Zielparametern, wie z.B. Leistung, Lebensdauer, Zellwiderstand, Quellverhalten der Membran, auch die Produzierbarkeit und eine Eignung für Rolle-zu-Rolle-Prozess untersucht werden. Die verschiedenen Verfahren wurden auf Basis einer identischen Zellplattform miteinander verglichen und es konnten mit diesen Daten Korrelationen zwischen dem Herstellprozess und bestimmten Zielparametern gefunden werden. Insgesamt wurde (mindestens) ein Verfahren gefunden, mit dem die Leistungsziele in einem kW-Stack erreicht wurden und das dem Grunde nach für ein Scale-up hin zu großen Zellflächen geeignet ist.

Stand der Industrialisierung der Fertigungstechnologien AEM-Elektrolyse			
Bereich	Labormaßstab	Pilotmaßstab	Industrieller Maßstab
Materialien	+ bis ++ (Pilot)	++	+ Pilotproduktion
MEA	+	+	0
CCM	+	+	0
BPP	++	+	0
Dichtung	+	+	0
Assembling-Prozess	+	0	0
Inbetriebnahme	+	0	0
Qualitätskontrolle	+	0	0

Tabelle 4.6: Qualitative Einordnung des Stands der Industrialisierung der Fertigungstechnologien für die AEM-Elektrolyse (Referenzjahr: 2024).

Deutsche Elektrolyseurhersteller haben im Zeitraum 2021 bis 2025 erheblich in Fertigungstechnologien investiert, um die Wasserelektrolyse zu industrialisieren. Die Technologieentwicklung im Rahmen von Förderprojekten hat einen großen Beitrag geleistet. Nach Angaben der Hersteller (Stand 2023) kann in Deutschland mithilfe industrieller Automatisierung und Robotik bis 2030 eine Fertigungskapazität von mehr als 20 GW/a sichergestellt werden. Eine erfolgreiche (Teil-)Automatisierung des Stack-Assembling wurde bei zwei Herstellern von AEL-Elektrolyseuren erreicht, sodass Prozesse stabil und reproduzierbar laufen. Für die PEM-Elektrolyse wurden automatisierte Technologien zur CCM-Herstellung und für das Stack-Assembling entwickelt, die ein fundamentaler Schritt für das Ramp-up sind. Bei den neueren Technologien befindet sich die HTEL, ebenfalls nach deutlichen Fortschritten, in einem Übergang zum industriellen Maßstab, sodass Fabrik- und Logistikkonzepte entwickelt wurden. In Bezug auf die noch junge Technologie der AEM-Elektrolyse wurden Herstellmethoden für die CCM getestet, die auf größere Zellflächen hochskalierbar sind.

4.2 Globale Wettbewerbslandschaft

Über die letzten Jahre fand ein enormes Wachstum im Bereich der Wasserstofftechnologien und eine zunehmende Internationalisierung der Wettbewerbslandschaft statt. Zahlreiche Länder rückten Wasserstoff in den Fokus der Energiewende. Während in 2020 weltweit weniger als 0,5 GW Elektrolysekapazität und 2023 ca. 1,4 GW installiert war, ist die installierte Elektrolysekapazität im Jahr 2024 um ca. 600 MW auf insgesamt 2 GW gestiegen. Laut IEA [64] soll die installierte Kapazität in 2025 noch deutlich stärker, auf knapp 5 GW, wachsen. Basierend auf den aktuellen Projektankündigungen und Marktanalysen zeichnet sich daher für die Zukunft ein starker, wenn auch unsicherer Ausbau der Elektrolysekapazitäten ab. Weltweit wurden bis 2025 Projekte für Elektrolyseure mit einer Gesamtkapazität von rund 440 GW angekündigt, die bis 2030 oder kurz danach in Betrieb gehen sollen [64]. Während die Anzahl der Projektankündigungen seit 2020 massiv auf über 1.700 gestiegen ist, findet derzeit eine Bereinigung der Pipeline statt, bei der nur Projekte mit soliden Geschäftsmodellen und gesicherter Abnahme voranschreiten [65]. Hohe Erwartungen an den Markthochlauf ließen zahlreiche Hersteller von Wasserstofftechnologien, darunter auch Elektrolyseure, entstehen. Aktuell gibt es weltweit mehr als 200 große und kleine Hersteller von Elektrolysesystemen oder deren Kernkomponente, dem Stack, und die Zahl steigt tendenziell. Dabei hatte die AEL 2023 weltweit den größten Anteil mit mehr als 60 % installierter Elektrolysekapazität, gefolgt von der PEM-Elektrolyse mit 22 % [66]. Die interaktive Weltkarte mit Wasserstoffherstellungsprojekten wird von der IEA kontinuierlich aktualisiert [67]. China ist nicht nur bei der Installation von Elektrolyseuren weit vorne, sondern deckte 2024 auch selbst 60 % der weltweiten

Produktionskapazität für Elektrolyseure. Dies erzeugt einen hohen Kostendruck für Hersteller aus Europa und Nordamerika. Fertigungskapazitäten wurden in den vergangenen Jahren erheblich ausgebaut, allerdings bleiben die Fabriken stark unterausgelastet, da sich die Nachfrage für Grünen Wasserstoff deutlich langsamer entwickelt als vorhergesagt.

Marktentwicklungen in Deutschland

In Deutschland waren zahlreiche Elektrolyseprojekte angekündigt bzw. in der Planung und Umsetzung [1]. Auch das Leibniz Institut für Länderkunde führt eine Karte mit grünen Wasserstoffprojekten in Planung und Bestand in Deutschland [68]. Eine Vielzahl der Wasserstoffherstellungsprojekte ist auf nationale oder europäische Fördermittel angewiesen, wozu die deutschen Vorhaben im Rahmen der wasserstoffbezogenen wichtigen Projekte von gemeinsamem europäischem Interesse, IPCEI-Projekte (*Important Projects of Common European Interest*) [69] und die Reallabore der Energiewende [70] gehören. Als weiteres Finanzierungsinstrument etablierte die EU im Jahr 2022 die Europäische Wasserstoffbank. Um aus Erneuerbaren Energiequellen hergestellten Wasserstoff wettbewerbsfähig zu machen, wird die Preisdifferenz zwischen den Produktionskosten und dem Marktpreis für Wasserstoff mittels direkter Zuschüsse ausgeglichen. In Deutschland wird mit dem Wasserstoffbeschleunigungsgesetz [71] der rechtliche Rahmen für den schnellen Auf- und Ausbau der Erzeugungs- und Versorgungskapazitäten geschaffen. Ein weiteres Werkzeug zur Steigerung des H₂-Markthochlaufs ist das Programm H2Global [72]. Das Doppelauktionsmodell, das Kernelement von H2Global, verbessert die Planungssicherheit und soll wirtschaftliche Preise ermöglichen. Trotz der finanziellen Anreize häufen sich in den vergangenen Jahren die Nachrichten zu abgesagten Projekten, sodass ein Ausbauziel von 10 GW bis 2030 vorläufig unwahrscheinlich erscheint. Gleichzeitig gibt es auch vereinzelt positive Meldungen, wie der Baustart einer 320 MW-Erzeugungsanlage in Emden [73] oder die Grundsteinlegung für die Produktion von Grünem Wasserstoff in Moorborg [74]. Die Studie des Energiewirtschaftlichen Instituts (EWI) an der Universität Köln fasst zusammen, dass die Bereitstellungskosten für Grünen Wasserstoff nicht der aktuellen Zahlungsbereitschaft entsprechen [2]. Ein wichtiger Faktor für die Umsetzung heimischer Elektrolyseprojekte ist auch der Standort. Seit Mai 2025 werden potenziell geeignete Standortoptionen von Elektrolyseuren in einem Online-Atlas [75] frei zugänglich gemacht. Ein Standortkompass für großskalige Elektrolyseanlagen [76] wurde in den H₂Giga-Projekten HyPLANT100 und SYSTOGEN100 sowie dem Reallabor WESTKUESTE100 entwickelt.

Entwicklungen der weltweiten Wasserstoffwirtschaft

Weltweit haben zahlreiche Länder und Regionen Wasserstoff-Roadmaps entwickelt, um den Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft zu unterstützen [8], [77]. Diese Strategien unterscheiden sich erheblich und spiegeln nationale Besonderheiten wie Energiestrukturen, Ressourcenverfügbarkeit und zukünftigen Energiebedarf wider.



Installation eines 20-Megawatt-Elektrolyseurs für die Produktion von Wasserstoff und anderen Power-to-X-Produkten

© Sunfire SE

Entsprechend setzen die Regionen unterschiedliche Schwerpunkte bei Zielsektoren, Übergangspfaden und Fördermechanismen. Regulatorische Maßnahmen adressieren dabei unter anderem die Nachfragestimulierung, die Reduzierung von Investitionsrisiken, den Aufbau heimischer Produktionskapazitäten sowie Forschung und Innovation. Auch die eingesetzten Förderinstrumente – etwa Zuschüsse, Auktionen, Differenzverträge oder steuerliche Anreize – variieren stark zwischen den Regionen [66].

Die Europäische Union legte 2020 ihre Wasserstoffstrategie mit klarem Fokus auf Grünen Wasserstoff vor. Bis 2030 sollen 40 GW Elektrolysekapazität innerhalb der EU installiert werden, ergänzt durch weitere 40 GW in Nachbarregionen [78]. Diese Ziele werden durch nationale Strategien der Mitgliedstaaten flankiert. Die EU setzt primär auf regulatorische Instrumente zur Nachfragestimulierung und Kostensenkung. Mit der Einführung der *Renewable Fuels of Non-Biological Origin*-Definition (RFNBO) und der Erneuerbare-Energien-Richtlinie RED III wurden verbindliche Quoten für Grünen Wasserstoff in Industrie und Verkehr festgelegt [79], [80]. Parallel adressiert RED III angebotsseitige Hemmnisse, etwa durch beschleunigte Genehmigungsverfahren. Auf der Förderseite prägen Programme wie IPCEIs, der Innovation Fund und die *Europea Hydrogen Bank* (EHB) den Markthochlauf. Über wettbewerbliche Auktionen fördert die EHB die Produktion von Grünem Wasserstoff, bislang jedoch primär angebotsseitig. Trotz detaillierter Ziele und umfangreicher Regulierung verläuft der Markthochlauf langsamer als geplant: Ende 2024 lag die installierte Elektrolysekapazität mit rund 340 MW deutlich unter dem ursprünglichen 6-GW-Ziel [64], [65].

Die USA verfolgen mit der *National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap* (2023) den Aufbau eines großskaligen Marktes für sauberen Wasserstoff. Die Strategie definiert Nachfrageziele von 10 Mio. Tonnen bis 2030 und setzt stark auf Kostensenkung, mit dem Ziel, die Produktionskosten bis 2026 auf USD 2/kg und langfristig auf USD 1/kg zu senken [81], [82]. Der US-Ansatz ist technologieoffen, wobei aufgrund niedriger Erdgaspreise aktuell blauer Wasserstoff dominiert. Zentrale Förderinstrumente waren seit 2023 das

Bipartisan Infrastructure Law (BIL) und der *Inflation Reduction Act* (IRA). Während das BIL den Aufbau regionaler Hydrogen Hubs fördert [83], setzt der IRA emissionsabhängige Steueranreize von bis zu USD 3/kg H₂ [84], [85]. Diese gelten als wesentlicher Investitionstreiber, sind jedoch mit Unsicherheiten verbunden, etwa hinsichtlich Emissionsnachweisen, Infrastrukturförderung und politischer Kontinuität [86]. Zusätzlich fördert das DOE Forschungs- und Entwicklungsprojekte, um die Wasserstoff- und Brennstoffzellenforschung voranzutreiben [87]. Strukturell ist der US-Markt stark angebotsseitig geprägt; rund 80 % der angekündigten Projekte entfallen auf blauen Wasserstoff, während die installierte Elektrolysekapazität Ende 2024 unter 0,1 GW lag [88]. Politische Unsicherheiten seit 2025 sowie eine bislang begrenzte Inlandsnachfrage stellen zentrale Risiken für den weiteren Markthochlauf dar.

Auch Japan ist an vorderster Front. Als erstes Land legte es bereits im Dezember 2017 seine Roadmap vor [89]. Um Betriebserfahrung an großskaligen Elektrolyseuren unter realen Betriebsbedingungen zu sammeln, wurde im Jahr 2020 eine 10 MW AEL-Demonstrationsanlage zur Herstellung von Wasserstoff aus Erneuerbaren Energien am Fukushima Hydrogen Energy Research Field (FH2R) eingeweiht [90]. In der Präfektur Yamanashi soll die gesamte Wasserstoff-Wertschöpfungskette regional abgebildet werden [91].

China verfolgt mit dem *Medium- and Long-term Plan for the Development of the Hydrogen Energy Industry* (2021–2035) einen schrittweisen Aufbau eines Marktes für grünen Wasserstoff. Bis 2025 sind 50.000 Brennstoffzellenfahrzeuge sowie 0,1–0,2 Mio. Tonnen grünen Wasserstoff pro Jahr vorgesehen. [92] Der Fokus liegt auf der Nachfragestimulierung im Verkehrssektor, um Investitionen und Kostensenkungen zu ermöglichen [82]. Kurzfristig wird ergänzend industrieller Nebenprodukt-Wasserstoff genutzt; CCUS ist nicht Bestandteil der Strategie [92]. Die Marktdynamik wird maßgeblich von den Provinzen getragen, die teils deutlich ambitioniertere Ziele verfolgen. So plant die Innere Mongolei bis 2025 rund 0,5 Mio. Tonnen grünen Wasserstoff jährlich, während sich die kumulierten regionalen Ziele auf bis zu 1,2 Mio. Tonnen belaufen [66], [93]. Der Markthochlauf basiert auf einem arbeitsteiligen Governance-Modell: Die Zentralregierung setzt strategische Leitplanken und fördert Demonstrationsprojekte, während die Regionen die Umsetzung übernehmen [66]. Die Produktion konzentriert sich auf westliche Provinzen mit hohem Erneuerbaren-Potenzial, die Nachfrage auf östliche Industriezentren, was den Ausbau von Wasserstoffpipelines erforderlich macht (über 150 km in Betrieb Ende 2023) [94], [95].

Die Marktcharakteristika von Europa, USA und China werden in Tabelle 4.7 zusammengefasst.

	Europäische Union	USA	China
Hauptziele der Roadmap	40 GW installierte Elektrolyseurkapazität bis 2030 zur Produktion von 10 Mio. t Grünem H ₂ [78]	10 Mio. t Nachfrage nach sauberem H ₂ bis 2030 und Senkung der Kosten für elektrolytischen Wasserstoff auf 2 USD/kg H ₂ bis 2026	0,1–0,2 Mio. t p.a. saubere H ₂ -Produktionskapazität und Einsatz von 50.000 Brennstoffzellenfahrzeugen (FCEV) bis 2025 [96]
Geförderte Wasserstoff-Produktionsmethoden	Grüner Wasserstoff	CO ₂ -armer Wasserstoff (technologieneutral)	Grüner Wasserstoff und Nebenprodukt-Wasserstoff
Zielsektoren für die Endnutzung (Nachfragehochlauf)	Industrie, Verkehr, Netzdienstleistung	Industrie, Stromerzeugung, Verkehr	Verkehr
Strategie für Marktentwicklung	Regulierungsgetrieben	Marktgetrieben	Staatsgetrieben
Zentrale regulatorische Treiber & Förderinstrumente	Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED) III, wichtige Projekte von gemeinsamem europäischem Interesse (IPCEIs), europäische Wasserstoffbank (EHB)	Bipartisan Infrastructure Law (BIL) Inflation Reduction Act (IRA)	Wasserstoffziele der Provinzen und Subventionsprogramme Demonstrationsprojekte
Zugesagte saubere H ₂ -Produktionskapazität (Stand: August 2025) [65]	≈ 0,7 Mt p.a (> 80 % erneuerbar)	≈ 1,6 Mt p.a (< 10 % erneuerbar *)	≈ 1,6 Mt p.a (> 95 % erneuerbar)
Installierte Elektrolyseurkapazität (Ende 2024) [65]	~ 0,3 GW	~ 0,1 GW	~ 1,1 GW

Tabelle 4.7: Zusammenfassung Vergleich Marktcharakteristika Europa, USA und China

*) Da der Bericht von 2025 lediglich aggregierte Kapazitäten für Nordamerika ausweist, wurde der US-Anteil anhand des in der vorherigen Ausgabe angegebenen Verhältnisses zwischen den USA und Kanada abgeleitet.

Entwicklungen der internationalen Wettbewerbslandschaft von Elektrolyseurherstellern

Die beschriebenen Rahmenbedingungen bilden den Kontext für die Entwicklung der Elektrolyseurindustrie. Sie beeinflussen Technologieauswahl, Investitionsentscheidungen und die Struktur des Herstellerfeldes. Der folgende Abschnitt widmet sich daher der Analyse der Elektrolyseurhersteller nach regionaler Verteilung und Technologie.

Die Anzahl der Hersteller für Elektrolyseure entwickelt sich seit 2022 sehr dynamisch. Im Jahr 2022 konnten insgesamt 39 Unternehmen identifiziert werden, die auf dem Markt aktiv waren oder den Markteintritt planten. Bis April 2025 stieg diese Zahl auf 214 Unternehmen. Neben diesem deutlichen Anstieg der Gesamtzahl der Unternehmen hat sich in den letzten Jahren auch die geographische Verteilung der identifizierten Unternehmen verändert. Tabelle 4.8 zeigt, dass in den letzten Jahren ein deutlicher Zuwachs an Herstellern in China und Indien zu verzeichnen ist.

Land/Region	Anzahl Hersteller (2022)	Anzahl Hersteller (04/2025)
China	6	74
Europa	19 (Dtl. 12)	62 (Dtl. 20)
Indien	-	27
Nordamerika	6	26
Japan	5	14
Sonstige	4	11
Gesamt	39	214

Tabelle 4.8: Vergleich Anzahl Hersteller nach Region (Headquarter) 2022 und 2025

Neben der Übersicht der Entwicklung der Anzahl der Hersteller nach Region ist ebenfalls eine Aufschlüsselung nach hergestellter Technologie interessant. Hierbei ist zu beachten, dass eine Reihe von Anbietern mehr als eine Technologie herstellen. Tabelle 4.9 zeigt die Informationen für das Jahr 2022 und Tabelle 4.10 für 04/2025. Im Jahr 2025 bieten fast die Hälfte der identifizierten Unternehmen AEL an, gefolgt von PEM-Elektrolyse (89 Unternehmen), HTEL (24 Unternehmen) und AEM-Elektrolyse (19 Unternehmen). Verglichen mit der Analyse aus dem Jahr 2022 übersteigt die Zahl der Unternehmen, die AEL-Technologie anbieten, inzwischen jene der PEM-Elektrolyse-Technologie. Bemerkenswert ist, dass die Zahl der Unternehmen, die HTEL- und AEM-Technologien anbieten, stark zugenommen hat. Aus geografischer Sicht liegt der Schwerpunkt der HTEL-Hersteller in Europa, für die AEM-Technologie hingegen in China und Nordamerika.

Internationale Wettbewerbslandschaft

Um einen Eindruck der internationalen Wettbewerbslandschaft zu erhalten, werden im Folgenden ausgewählte Anbieter technologiespezifisch gelistet und die von ihnen öffentlich verfügbaren technischen Spezifikationen tabellarisch dargestellt. Die Daten basieren auf einer Webrecherche und wurden mit weiteren ähnlichen Tabellen abgeglichen [8]. Aufgrund der hohen Dynamik besteht kein Anspruch auf Vollständigkeit. Der Vergleich der Stacks bzw. Systeme ist außerdem aufgrund teilweise fehlender oder ungenauer Daten nicht vollumfänglich gegeben. Gleichzeitig wird in den folgenden Abschnitten auf die Nachfragesituation der jeweiligen Technologie eingegangen. Entsprechende Informationen wurden aus den qualitativen Experteninterviews entnommen, die Mitte 2023 vornehmlich mit Akteuren der deutschen Elektrolyseindustrie geführt wurden.

Land/Region	AEL	PEM-Elektrolyse	HTEL	AEM-Elektrolyse
China	5	3		
Europe	8	10	3	1
Nordamerika	2	4		
Sonstige	1	3	1	
Gesamt	16	20	4	1

Tabelle 4.9: Anzahl Hersteller nach Region und Technologie 2022

Land/Region	AEL	PEM-Elektrolyse	HTEL	AEM-Elektrolyse	Andere
China	48	35	5	9	
Europe	26	29	9	6	5
India	20	7	2	3	1
Nordamerika	10	7	2	7	2
Sonstige	5	11	6	4	2
Gesamt	109	89	24	29	10

Tabelle 4.10: Anzahl Hersteller nach Region und Technologie 04/2025

Alkalische Elektrolyse

Nach Aussage deutscher Akteure gibt es eine weltweite Nachfrage nach alkalischen Elektrolyseuren. Dabei zeigen vor allem Länder mit geeigneten Standortbedingungen, z.B. Südwesteuropa, Nordeuropa, Australien und Chile, großes Interesse. Große Demonstrationsprojekte im Multi-MW-Bereich gibt es auch in China, wo bereits Pipelines im GW-Bereich zur Verfügung stehen. Aufgrund des IRA war zeitweise auch für deutsche Hersteller eine große Nachfrage in den USA spürbar.

Der Wettbewerb alkalischer Elektrolysesysteme hat sich seit 2021 erheblich weiterentwickelt. Hersteller von AEL-Systemen sind global verteilt, wobei insbesondere aus dem chinesischen Raum in den letzten Jahren eine Vielzahl neuer Akteure hinzugekommen sind. Eine Übersicht ausgewählter Anbieter für alkalische Elektrolysesysteme ist in Tabelle 4.11 zu finden. Wie aus den technischen Spezifikationen zu entnehmen ist, werden Moduleinheiten von bis zu 20 MW (scalum® 20 MW unit von Thyssenkrupp-nucera) vermarktet. Bei einer weiteren Erhöhung der Stackgröße wären Aspekte der Handhabung, Logistik, Flexibilität und Wartung zu bedenken.

Eine große Anzahl der Firmen fokussiert sich auf druckbeaufschlagte Systeme mit einem H₂-Produktdruck am Elektrolyseurausgang zwischen 10 und 30 bar. Je nach Anwendungsfall kann dadurch nachgelagerter Kompressionsaufwand eingespart werden. Der dadurch verringerte CAPEX-Bedarf für die Kompression ist aber im Vergleich zu drucklosen Systemen mit höheren Investitionskosten für das Elektrolyse-Gesamtsystem verbunden. Die Betriebstemperatur der AEL-Systeme gehen bis zu 90 °C. Die angegebene minimale Teillastfähigkeit liegt zwischen 10 und 30 % der Nominallast. Insbesondere entwickelt sich eine immer größere Zulieferindustrie (z.B. Elektroden, Bipolarplatten, PTLs) als auch Dienstleister für das automatisierte Stack-Assembling. Auch im Bereich des Diaphragmas wird eine deutliche Aktivität weltweit wahrgenommen, die sich vom Entwicklungsstatus derzeit in die Kommerzialisierung befindet. Dies verdeutlicht, dass sich rundum die AEL eine Zulieferindustrie kultiviert, die der AEL-Technologie den nächsten Schritt hin zur GW-Kapazität ebnet.

PEM-Elektrolyse

In Europa ist eine hohe Nachfrage nach PEM-Elektrolyseuren an Standorten mit einem hohen Anteil an Erneuerbaren Energien zu spüren. Auch der Mittlere Osten und Australien zeigen Interesse an der Technologie, allerdings ist der Ausbau der Erneuerbaren Energien an diesen Standorten noch nicht weit genug fortgeschritten. Vor allem wegen des IRA war anfangs auch für die PEM-Elektrolyse eine erhöhte Nachfrage aus den USA zu verzeichnen.

Typische PEM-Elektrolyse-Projekte liegen aktuell in der Größenordnung von 50 bis 250 MW. Größere Projekte im GW-nahen Maßstab sind global angekündigt. Anwendungsmöglichkeiten von PEM-Elektrolyseuren reichen von mobilen, dezentralen Elektrolyseuren bis hin zu zentralisierten, industriellen Lösungen mit Leistungen von mehreren 100 MW. Angebotene Plug-and-Play-Lösungen lassen sich in einen 12 m-Standardcontainer unterbringen und sind einfach zu installieren und bedienen. Hersteller aus Deutschland, Großbritannien, USA, Norwegen und China bestimmen aktuell die industrielle Produktion von PEM-Elektrolyseuren.

Eine Übersicht ausgewählter Anbieter ist in Tabelle 4.12 abgebildet. Beispielsweise vermarktet Siemens Energy ein Array aus 24 Modulen mit einer elektrischen Gesamtleistung von 17,5 MW (Elyzer P-300 platform). Wie für AEL-Elektrolyseure gibt es auch bei der PEM-Elektrolyse einen Trend hin zu Druckelektrolyseuren mit bis zu 35–40 bar. Ein weiterer Parameter ist das Temperaturniveau, das typischerweise zwischen 30–80 °C liegt. Die minimale Teillastfähigkeit der Systeme liegt in einem Bereich von 5 bis 25 % der Nominallast.

Elektrolyseur © ITM Power Linde GmbH



Anbieter AEL	Headquarter	Produkt (Stack/ Modul/Anlage)	Wasserstoff- produktions- rate [Nm³/h *)	Stackgröße [MW]	Modulgröße [MW]	Anlagengröße [MW] **)	Betriebstem- peratur [°C]	Betriebsdruck [bar] ***)	Teillastfähig- keit [%]	Elektrischer Energieverbrauch [kWh/Nm³ H₂ ****)	Ref.
Ecoclean GmbH	Deutschland	A600	600	3			80-90	0,4; 30 bar (P400)	10-100	4,5 (Stack)	[29]
Sunfire SE (Übernahme des schweizerischen Unternehmens IHT)	Deutschland	Sunfire-HyLink Alkali- ne GEN 2	2.222	5	10	100 +	-	30 bar	25-100	4,14-4,51 (Stack, DC)	[97]
Thyssenkrupp nucera AG & Co. KGaA, (samt Erwerb wesentlicher Technologie-Assets des dänischen Unternehmens Green Hydrogen Systems)	Deutschland	scalum® 20 MW unit	4.000		20		-	~0,3 bar	10-100		[98]
WEW GmbH	Deutschland		100	0,5			90	1,4 bar	20-100	4,5 (Stack)	[99]
John Cockerill Group SA	Belgien	Clear100+	20.000	5	20	100	-	15 bar	15-100	4,6 (Anlage, mit P-Se- rie von John Cockerill Hydrogen)	[100]
Stangate Hydrogen Solutions OÜ	Estland	Starbase 5 MW Stack/ Aurora 10 MW System	1.000/2.000	5	10		80-90	16 bar	20-110	4,3 (Stack)/ 4,5 (System)	[101]
HYGear B.V.	Niederlande	HYGEN-E®	4.000		20		-	3-30 bar	50-100	5,2	[102]
HydrogenPro ASA	Norwegen	High-pressure alkaline electrolyzers	1.020 (Stack)/2.040 (Modul)	5	10		-	15 bar	40-100	4,6 (Stack, DC)	[103]
NEL ASA	Norwegen	A485/AWE 100	485/19.400 (0°C, 1 bar)	2,5		100	-	0,03 bar	15-100	4,5/4,7 (Stack/Anlage)	[104]
Hydrogen Optimized Inc.	Kanada	RuggedCell™ Module /OMNI	10.835		12,5-50	100	-	-	0-100	-	[105]
Next HydrogenSolutions Inc.	Kanada	NH-X 500 Series	500	2,4				10-30 bar	10-100	4,3/4,7	[106]
Mitsubishi Power Americas	USA	Hydaptive™ Production 220	42.000	5,5		220	50	15 bar	50-100	5,2 (Stack, DC)	[107]
GOUFUJEE	China	GFEL-1000/1.6	1.000	5			85-92	16; 32 (GFEL- 200/3.2)	50-100	4,1-4,4 (Stack, DC)	[108]
Hygreen Energy	China	HELA 2000	2.000		10		90 +/- 5	16	30-110	4,4	[109]
Longi Hydrogen Energy Technology Co., Ltd	China	G 3000	3.000				90 +/- 5	16	30-110	4,3-4,5 (DC)	[110]
PERIC Hydrogen Technologies Co., Ltd.	China	Skid-mounted H2 Generator	2.000				-		-	4,3 (Stack, DC)	[111]
Sungrow Hydrogen Sci.&Tech. Co., Ltd.	China	ALK Electrolyzer	1.000					16 bar	25-110	4,5/4,60 (Stack, DC/ System, AC)	[112]
Tianjin Mainland Hydrogen Equip- ment Co., Ltd.	China	FDQ3000 series	3.000				90	20	30-110	4,2-4,6 (DC)	[113]
Asahi Kasei K. K.	Japan	Aqualizer™	20.000	5	10	100	-	0,5 bar	15-100	4,4 (System, DC)	[114]

Tabelle 4.11: Übersicht der Spezifikationen ausgewählter Anbieter für alkalische Elektrolysestacks und -systeme (zuletzt geprüft am 23.02.2026).
Reihenfolge: Deutschland, Europa (sonstige Länder), Nordamerika und Asien. *) ohne Angabe der Norm- bzw. Standardbedingungen nicht eindeutig; Berechnungen von kg/h nach Nm³/h mit Normkubikmeter nach DIN 1343, Normalbedingungen (1,01325 bar und 273,15 K) **) laut Herstellerangaben; entspricht nicht Angabe bereits realisierter Projektgrößen ***) teilweise unspezifisch angegeben ****) laut Herstellerangaben; Energieverbrauch pro Volumeneinheit ohne Angabe der Norm-bzw. Standardbedingungen nicht eindeutig; Berechnungen mit Normkubikmeter nach DIN 1343, Normalbedingungen (1,01325 bar und 273,15 K); teilweise Stack und/oder System

Anbieter PEM-Elektrolyse	Headquarter	Produkt (Stack/ Modul/Anlage)	Wasserstoff- produktionsrate [Nm³/h] *)	Stackgröße [MW]	Modulgröße [MW]	Anlagengröße [MW] **)	Betriebstem- peratur [°C]	Betriebsdruck [bar] ***)	Teillastfähig- keit [%]	Elektrischer Energieverbrauch [kWh/Nm³ H₂ ****)	Ref.
Robert Bosch GmbH	Deutschland	Hybtron	255	1,25			20–70	34 bar	20–100	4,7 (Stack)	[115]
Fest GmbH	Deutschland	GreenElectrolyzer Serie gEL1000/5x g eL2000 R*(50 MW)	1.000/10.000		5	50		34,5 bar	20–100		[116]
IGas Energy GmbH	Deutschland	GREEN ELECTROLYZER gEL 320-1250 PEM MID	320	2,07				40 bar	10–100	5,3 (System)	[117]
Quest One GmbH	Deutschland	MHP: Modular Hydro- gen Plattform (10 MW Block)	2.130		10	100+		30 bar	10–100	4,6 (System)	[118]
Schaeffler AG	Deutschland	Vitesco PEM Elektro- lyse Stack K1000 G2	223	1				max. 35 bar			[119]
Siemens Energy AG	Deutschland	Elyzer P-300/100 MW reference plant	22.225		17,5–110	17,5–110		0,1	40–100		[120]
ITM Power PLC	Großbritannien	Alpha 50	10.001	0,625		50		30 bar	12,5–100	5,0 (System, AC)	[121]
NEL ASA	Norwegen	PEM 100	20.200 (0°C, 1 bar)	1,25	10	100		30	10–100	4,72 (Stack)/ 5,0 (Anlage)	[122]
Accelera by Cummins Inc.	USA	HYLYZER® 1000	1.000	2,5	5			30 bar	15–100	4,6 (Stack, DC)/ 4,7 (System)	[123]
Ohmium International, Inc.	USA	Ohmium® Lotus Mark 2 (E and P series)	695					10 bar (E-se- ries)/30 (P-series)		4,4 (E-series)/ 4,8 (P-series)	[124]
Plug Power Inc. Erwerb von Giner ELX)	USA	The Plug EX-4250D	2.000		10			40 bar		4,5 (Stack)	[125]
Guangdong Cawolo Hydrogen Technology Co., Ltd	China	Cawolo 2400KW CWLW500	500	2,4				30 bar			[126]
Hygreen Energy	China	HGPS 300	300	1,5			65		5–110	4,3 (DC)	[127]
PERIC Hydrogen Technologies Co., Ltd.	China	PEM-type H2 Generator SDQ- 0.01~200Nm³/h	300						0–100		[128]
Sungrow Hydrogen Sci.&Tech. Co., Ltd.	China	PEM Electrolyzer	500					30 bar	5–110	4,3 (Stack, DC)/ 4,5 (System, AC)	[129]

Tabelle 4.12: Übersicht der Spezifikationen ausgewählter Anbieter für PEM-Elektrolysestacks und -systeme (zuletzt geprüft am 23.02.2026).
Reihenfolge: Deutschland, Europa (sonstige Länder), Nordamerika und Asien. *) ohne Angabe der Norm- bzw. Standardbedingungen nicht eindeutig; Berechnungen von kg/h nach Nm³/h mit Normkubikmeter nach DIN 1343, Normalbedingungen (1,01325 bar und 273,15 K) **) laut Herstellerangaben; entspricht nicht Angabe bereits realisierter Projektgrößen ***) teilweise unspezifisch angegeben *****) laut Herstellerangaben; Energieverbrauch pro Volumeneinheit ohne Angabe der Norm-bzw. Standardbedingungen nicht eindeutig; Berechnungen mit Normkubikmeter nach DIN 1343, Normalbedingungen (1,01325 bar und 273,15 K); teilweise Stack und/oder System

Hochtemperatur-Elektrolyse

Nach Aussage deutscher Akteure gibt es Nachfrage nach der HTEL-Technologie in Nordeuropa, Südwesteuropa, Südamerika, Australien und Afrika. Grundvoraussetzung ist das Vorhandensein von Strom und Wärme. In Deutschland kommt die Nachfrage daher vermehrt aus der Stahlbranche und von Raffinerien. Wie auch für die anderen Technologien ist eine Nachfrage aus den USA spürbar, allerdings gibt es noch wenige konkrete Projekte. Die praktischen Anwendungen der HTEL-Technologie liegen hauptsächlich im Rahmen von Pilot- und Demonstrationsprojekten, die eine Leistung von weniger als 100 kW bis in den einstelligen MW-Bereich aufweisen. Diese Projekte dienen dazu, die Technologie unter realen Bedingungen zu testen und zu validieren. HTEL-Hersteller befinden sich in Europa, aber auch in den USA und dem asiatischen Raum (Tabelle 4.13). Im NASA's Ames Research Center in California wurde eine 4 MW große SOEC-Elektrolyseanlage von Bloom Energy in Betrieb genommen. Der Hersteller profitiert hier von seinem Know-How in Bezug auf *Solid Oxide Fuel Cells* (SOFC) [130]. Auch der deutsche Elektrolyseurhersteller Sunfire hat eine Vielzahl industrieller Demonstrationsprojekte umgesetzt, z.B. die 250 kW-Anlage am Standort Lingen [131] sowie eine 2,6 MW-Anlage in Rotterdam [132]. Durch die Ankündigung von geplanten Fertigungskapazitäten von bis zu 500 MW bis 2025 gehört auch Haldor Topsoe zu einem nennenswerten Schlüsselakteur der Branche [133]. Eine Übersicht ausgewählter Anbieter ist in Tabelle 4.13 zu finden.

Die HTEL-Betriebstemperaturen unterschiedlicher Hersteller liegen zwischen 650 und 850 °C. Entscheidender Faktor für die Effizienz der HTEL-Systeme ist das Vorhandensein eines Dampfangebots, das idealerweise auf einem Niveau von über 150 °C vorliegt. Unter diesen Bedingungen konnte in industrieller Umgebung ein Wirkungsgrad von 84 % $\eta_{H,V,AC}$ bewiesen werden. Perspektivisch wird ein Wirkungsgrad von 89 % $\eta_{H,V,AC}$ erwartet [97], was die wirtschaftliche Rentabilität und die Wettbewerbsfähigkeit dieser Technologie erheblich steigert. Sunfire bietet mit seinem HyLink SOEC ein 10 MW Modul, das bereits für Anwendungen im industriellen Maßstab geeignet ist. Im Gegensatz dazu liegen die meisten anderen verfügbaren HTEL-Stacks im zweistelligen kW-Bereich, die in sogenannten *Hot-Boxes* zu größeren Einheiten zusammen geschaltet werden.

Die Teillastfähigkeit der Module ist zwar auf etwa 50 % der Nominallast beschränkt, was die Flexibilität im Betrieb einschränkt, allerdings kann auf Anlagenebene auch < 50% erreicht werden. Auf Modulebene kann eine Lasterhöhung (*Ramp-up time*) von etwa 5-10 % pro Minute aus dem *Hot-Stand-by*-Modus realisiert werden, das für diejenige Anwendungen besonders relevant ist, die schnelle Anpassungen an variable Energiequellen erfordern. Im Gegensatz dazu beträgt die *Cold-Start-Up*-Zeit mehrere Stunden, was bei der Planung und dem Betrieb der Systeme berücksichtigt werden muss. Zu den spezifischen Werten der *Turn-Down*-Zeit sind gegenwärtig keine belastbaren Daten verfügbar.

SOEC Modul Gen2 © Sunfire SE



Anbieter HTEL	Headquarter	Produkt (Stack/ Modul/Anlage)	Wasserstoff- produktions- rate [Nm³/h])	Stackgröße [MW]	Modulgröße [MW]	Anlagengröße [MW] **)	Betriebstem- peratur [°C]	Betriebsdruck [bar] ***)	Teillastfähig- keit [%]	Elektrischer Energiever- brauch [kWh/ Nm³ H₂] ****)	Ref.
Sunfire SE	Deutschland	Sunfire-HyLink SOEC GEN3	3.234		10	100+	800	> 3 bar	50–100	3,4	[26]
Haldor Topsoe A/S	Dänemark	100 MW HYDRO- GEN SOEC ELEC- TROLIZER (with steam Import)	28.600			100	-		10–100 (auf Anlagen- ebene)		[25]
Ceres Power Holdings PLC	Großbritannien	Electrolyser module	2.778		9,1		-	-	-	3,3	[134]
Elcogen AS	Estland	elcoStack E3000/ elcoModule	3	0,009			650–720	-	-	3,0 (Stack)	[135]
Bloom Energy Corporation	USA	1,2 MW ELECTRO- LYZER BLOCK	356		1,2	1000		-	-	3,4 (System)	[136]
h2e Power Systems Pvt Ltd.	Indien						750–850	atm.	-	3,1 (Stack)	[137]
TOSHIBA Energy Systems & Solutions Corporation	Japan						-	-	-		[138]

Tabelle 4.13: Übersicht der Spezifikationen ausgewählter Anbieter für HTEL-Stacks und -Systeme (zuletzt geprüft am 23.02.2026) [22].

Reihenfolge: Deutschland, Europa (sonstige Länder), Nordamerika und Asien. *) ohne Angabe der Norm- bzw. Standardbedingungen nicht eindeutig; Berechnungen von kg/h nach Nm³/h mit Normkubikmeter nach DIN 1343, Normalbedingungen (1,01325 bar und 273,15 K) **) laut Herstellerangaben; entspricht nicht Angabe bereits realisierter Projektgrößen ***) teilweise unspezifisch angegeben *****) laut Herstellerangaben; Energieverbrauch pro Volumeneinheit ohne Angabe der Norm- bzw. Standardbedingungen nicht eindeutig; teilweise Stack und/oder System

AEM-Elektrolyse

Der Vorteil der AEM-Elektrolyse beruht auf den vergleichsweise niedrigen Investitionskosten, der kompakten Bauweise und der Verwendung von unkritischen Rohstoffen für den Stack. Um an Bedeutung für den globalen Markt zu gewinnen, bedarf es bei der AEM-Elektrolyse noch an erheblichem Entwicklungsaufwand. Gleichwohl gibt es für diese Technologie bereits Nachfrage in Europa, USA und Australien sowie dem Nahen Osten. Allerdings handelt es sich hierbei noch um Kleinsysteme, die entsprechenden Nischenanwendungen zuzuordnen sind.

Die Entwicklung und Herstellung von AEM-Elektrolyseuren finden weltweit statt, wie aus Tabelle 4.14 zu entnehmen ist. Insbesondere hat sich eine breite Anzahl an Unternehmen (meistens Start-ups) gefunden, die neue AEM-Elektrolyseure herstellt. Es wird auch eine breite Aktivität der Forschungsinstitute im Bereich der nicht-edelmetallhaltigen Katalysatoren wahrgenommen. Letztere Entwicklung findet immer öfter auch den Weg in eine Kommerzialisierung.

Stackgrößen der AEM-Elektrolyseure bewegen sich aktuell im kW-Bereich. Bei Pilotprojekten von mehreren 100 kW bis zu 1 MW wird häufig das sogenannte *numbering up* angewendet, bei dem mehrere kleinere Stacks kombiniert werden, um die erforderliche Leistung zu erreichen. Die vermarkteten AEM-Elektrolysestacks arbeiten in einem Bereich von 1 bis 35 bar und mit einer verdünnten Kalilauge (0,1 – 1 M) als Elektrolyt, womit je nach Anwendungsfall auf eine Nachverdichtung verzichtet werden kann.

Die Elektrolyseindustrie ist in Europa und vor allem auch in Deutschland stark vertreten. Der globale Markthochlauf von Elektrolyseuren hatte in den Jahren 2020 bis 2024 zunehmend an Dynamik gewonnen. Deutsche Akteure gehören dabei zu den Technologieführern, insbesondere in Bezug auf technische Kriterien wie Skalierbarkeit und Effizienz. Doch der Preisdruck, insbesondere auch durch chinesische Hersteller, ist spürbar. Um international wettbewerbsfähig zu sein, darf die Weiterentwicklung der Elektrolyse nicht an Tempo verlieren und muss auch Kosteneffizienz adressieren. Neben der Kostenreduktion und Skalierung spielt auch die breite Anwendbarkeit im industriellen Umfeld eine wichtige Rolle.

Die AEL-Technologie ist aufgrund ihrer hohen technologischen Reife besonders attraktiv für die industrielle Integration. Die PEM-Elektrolysetechnologie punktet u.a. mit kompaktem Design. Die Module können in einem Standardcontainer integriert (Plug-and-Play) angeboten werden. HTEL-Systeme befinden sich weltweit in der Demonstrationsphase und sind besonders interessant für industrielle Prozesse, bei denen Abwärme auf hohem Temperaturniveau zur Verfügung steht. In Bezug auf die AEM-Elektrolyse dominieren aktuell Kleinsysteme für Nischenanwendungen.

AEM Multicore © Möllmert/Enapter AG



Anbieter AEM-Elektrolyse	Headquarter	Produkt (Stack/ Modul/Anlage)	Wasserstoff- produktionsrate [Nm³/h)	Stackgröße [MW]	Modulgröße [MW]	Anlagengröße [MW] **)	Betriebstem- peratur [°C]	Betriebsdruck [bar] ***)	Teillastfähig- keit [%]	Elektrischer Energieverbrauch [kWh/Nm³ H₂ ****)	Ref.
Enapter AG	Deutschland	AEM Nexus 2500	500			2,5		35 bar	< 1–100	4,6 (System)	[23]
H2I GreenHydrogen	Österreich	2,4 MW H2IVE- SYSTEM	463			2,4		30			[139]
Cipher Neutron Inc.	Kanada	AEM Electrolyser		0,25			-	30 bar	20–120	4,02 (Stack)	[140]
Agastya Hydrogen, Inc.	USA	Agastya Modular 1 GW AEM Stack for single- and multi-core applications	255.584			1000		35		3,9	[141]
Alchmi, Inc.	USA										[142]
HyGreen energy (ehemals: Beijing SinoHy Energy Co., Ltd.)	China	AEM 2	100	0,5			60	16	10–120	4,4 (DC)	[127]
Tianjin Mainland Hydrogen Equip- ment Co., Ltd.	China	AEM electrolytic cell	10				60 +/- 2	16	20–120	3,6–4,5	[143]
Hydrolite Ltd.	Israel										[144]
SunGreenH2 Pte. Ltd.	Australia	2kW AEM Electrolyzer Stack and Unit	0,467	0,002			60–70	< 10	10–120	4,0 (Stack)/ 4,5 (System)	[145]

Tabelle 4.14: Übersicht der Spezifikationen ausgewählter Anbieter AEM-Elektrolysestacks und -systeme (zuletzt geprüft am 23.02.2026).

Reihenfolge: Deutschland, Europa (sonstige Länder), Nordamerika, Asien und Ozeanien.
) ohne Angabe der Norm bzw. Standardbedingungen nicht eindeutig; Berechnungen von kg/h nach Nm³/h mit Normkubikmeter nach DIN 1343, Normalbedingungen (1,01325 bar und 273,15 K)
)*) laut Herstellerangaben; entspricht nicht Angabe bereits realisierter Projektgrößen ***) teilweise unspezifisch angegeben *****) laut Herstellerangaben; Energieverbrauch pro Volumeneinheit ohne Angabe der Norm- bzw. Standardbedingungen nicht eindeutig; teilweise Stack und/oder System

4.3 Nicht-technische Hemmnisse für den Markthochlauf von Elektrolyseuren im GW-Maßstab

Um die Ziele der Nationalen Wasserstoffstrategie zu erreichen, müssen noch verschiedene Hürden genommen werden. Eine Einschätzung über Hemmnisse und Barrieren für den großskaligen Markthochlauf von Elektrolyseuren wurde aus den Experteninterviews ermittelt, die im Jahr 2023 durchgeführt wurden (siehe Anhang Abschnitt 9.1.1). Die Ergebnisse bilden aufgrund der Expertenauswahl die Sichtweise deutscher Elektrolyseur- und Komponentenhersteller und weiterer wissenschaftlicher Einrichtungen ab und decken sich zu großen Teilen mit den Ergebnissen des Wasserstoff-Kompasses [1] bzw. ergänzen ihn.

Niedrige Wirtschaftlichkeit und fehlende Planungssicherheit für Investmententscheidungen

Die aktuelle Nachfrage nach Elektrolyseuren ist für alle Technologien noch zu gering, um eine Fertigung in hohen Stückzahlen zu rechtfertigen. Eine Mehrheit der befragten Akteure nannte die noch niedrige Wirtschaftlichkeit aufgrund von CAPEX und OPEX sowie fehlende Nachfrageanreize als wichtigstes Hindernis, die Investmententscheidungen verzögert. Seit 2024 und verstärkt in 2025 häufen sich auch Nachrichten zu pausierten und abgesagten Projekten in Deutschland und Europa. Während CAPEX durch technologische Innovationen, serielle und optimierte Herstellverfahren und Prozessoptimierungen deutlich gesenkt werden können, werden OPEX maßgeblich durch die Stromkosten bestimmt. Folglich bestimmen die Strombezugskosten die Wasserstoffgestehungskosten zu einem erheblichen Anteil. Aktuelle realistische Betrachtungen [146] geben an, dass die tatsächlichen Kosten seiner Herstellung gegenüber bisherigen Annahmen sogar noch unterschätzt wurden. Neben den noch höheren Strombezugskosten als zunächst angenommen, spielen auch noch höhere Investitionskosten, die begrenzte Lebensdauer der Elektrolyseestacks und die damit verbundenen Folgekosten für den Austausch, sowie Wartungs- und Instandhaltungskosten eine wesentliche Rolle. In früheren Studien wurden konkret auch die Kosten für Projektplanung, Beschaffung und Installation unterschätzt und sind bei kleinen Projekten (unter 50 MW) zudem überproportional hoch. In Summe müssen daher Gestehungskosten von ca. 8 – 10 €/kg (abhängig von Projektgröße, Standort und Strombezug) angenommen werden. Innerhalb Deutschlands kommt für einen positiven Business Case aufgrund der hohen Stromkosten beispielsweise ein Standort mit sehr hoher Verfügbarkeit an Strom aus EE (z.B. Windpark) infrage, der relativ fern von industriellen Energieverbrauchern ist. Hier können sich Wasserstoffherstellung und Stromnetzausbau idealerweise ergänzen.

Eine weitere Möglichkeit ist die Herstellung von Wasserstoff an (internationalen) Standorten mit hohen EE-Potenzialen und

niedrigem Strompreis mit anschließendem Energieimport über Wasserstoff oder seiner Derivate nach Deutschland. Je mehr der Preis für Grünen Wasserstoff in Richtung Marktfähigkeit gesenkt werden kann, desto besser sind die Möglichkeiten, dass der Anlagenbetreiber für das Produkt Abnehmer findet und damit auch Planungssicherheit gewinnt. In der entstehenden Wasserstoffwirtschaft herrscht daher noch eine gewisse Unsicherheit, ob Marktteilnehmer diese Transformationsphase überstehen und damit Versorgung bzw. Abnahme gesichert sind. Alle beteiligten Akteure benötigen planbare Rahmenbedingungen, um Investitionsentscheidungen zu treffen.

Zu geringes Tempo beim Ausbau der Erneuerbaren Energien in Deutschland und Europa

Für die Wasserstoffherstellung in Deutschland oder Europa muss der Ausbau der Erneuerbaren Energien in Deutschland und Europa beschleunigt werden, damit hinreichend Strom zur Verfügung steht und idealerweise der Preis für den Strombezug zumindest temporär sinkt. Dies würde auch die Entscheidung für Umsetzungsprojekte und damit auch den Markthochlauf von Elektrolyseuren unterstützen. Idealerweise würden der Ausbau der Erneuerbaren Energien und der schrittweise Wasserstoffhochlauf parallel verlaufen, da auch Planung und Bau von Windkraftanlagen eine Vorlaufzeit von mehreren Jahren haben.

Für einen Hochlauf der Wasserstoffherstellung und damit der Elektrolyseurproduktion für den Energieimport müssen internationale Standorte identifiziert und Handelsbeziehungen aufgebaut werden. Aus technischer Sicht ergeben sich hier noch Forschungsbedarfe zu Standorteinflüssen auf Elektrolyseure und auch zur Anbindung an eine entsprechende Infrastruktur.

Bottlenecks in der Lieferkette: Komponenten und Edelmetalle

Für die Industrialisierung von Elektrolyseuren ist der Aufbau einer zuverlässigen Lieferkette unabdingbar. Zum Stand der Lieferketten wurde auch in den Interviews mit den Elektrolyseurherstellern gefragt. Insgesamt wurde betont, dass der Hochlauf mit den Zulieferern gemeinsam erfolgen muss. Auch wirtschaftliche Aspekte spielen hier eine Rolle, weil ein erheblicher Teil der Zulieferer zu kleinen oder mittleren Unternehmen gehört. Diese können oder wollen meist weniger finanzielles Risiko tragen und sind daher zurückhaltender mit großen Investitionen in eine Hochskalierung oder Anlagentechnik zur Automatisierung, wenn die Perspektive auf einen Markterfolg unsicher ist. Kooperationen von Herstellern und Zulieferern sind hier sinnvoll, um die Komponenten bestmöglich aufeinander abzustimmen und auch dem Zulieferer Einblick in den Stand der Technik bei seinem Kunden zu geben, damit er Chancen und Risiken abwägen kann und – im positiven Fall – mehr Investitionen wagt. In einigen Scale-up-Projekten von H₂Giga wurde der Hochlauf seitens der Zulieferer bereits für bestimmte Vorprodukte oder Komponenten erfolgreich adressiert.

Zum einen gab es Projekte, bei denen der Zulieferer direkt eingebunden wurde, zum anderen gab es in H₂Giga Next-Generation Scale-up-Projekte, in denen Zulieferer ihre Komponenten, beispielsweise Katalysatoren, CCMs oder den Stack, weiterentwickelten und hochskalierten.

Dennoch ist die Zuliefererbasis für einige wenige, aber wichtige Komponenten noch zu schmal und sollte unbedingt erweitert werden. Beispiele dafür sind das Diaphragma für die AEL, bei dem noch eine Single Source-Problematik besteht. Bei der Verfügbarkeit von Elektroden der nächsten Generation für die AEL und AEM-Elektrolyse wurden große Fortschritte gemacht, aber es müssen nun diese Ergebnisse in die Industrialisierung umgesetzt werden. Bei der PEM-Elektrolyse ist die CCM eine wichtige Kernkomponente, deren Eigenschaften grundsätzlich schwer einstellbar sind, sodass sie sich bei verschiedenen Zulieferern meist unterscheidet und nicht 1:1 austauschbar ist. Bei der CCM ist die Qualitätskontrolle besonders anspruchsvoll. Hier sollte mit weiterer Forschung ein fundierteres Verständnis der Herstellparameter-Eigenschaftsbeziehungen unterstützt werden, um den Herstellern eine Diversifizierung der CCM-Quellen zu erleichtern.

Auch bei Komponenten, die nicht ausschließlich Elektrolyseur-spezifisch sind, kommen Engpässe in der Lieferkette vor. Von den Herstellern aus H₂Giga wurden hier Transformatoren, Gleichrichter, Gasseparatoren und Verdichter angegeben. Für Lieferzeiten von Transformatoren wurden 2023 bis zu zwei Jahre angegeben. Für die HTEL ist die Verfügbarkeit und Beschaffung von Hochtemperatur-BoP-Komponenten herausfordernd, konkret wurden Komponenten wie Heizer, Wärmeübertrager, Lüfter und die Leistungselektronik für hohe Temperaturen erwähnt. Im Fall der PEM-Elektrolyse wird die Verfügbarkeit von Edelmetallen langfristig als kritisch angesehen. Gerade bei Iridium könnten kurzfristige hohe Bedarfe zu Engpässen führen. Eine langfristige Versorgung unter Annahme einer funktionierenden Recyclingkette ist dahingegen kalkulierbar. Für die Branche sind daher strategische Partnerschaften, z.B. mit Edelmetalllieferanten, wichtig, um die Verfügbarkeit von Iridium sicherzustellen. Zusätzlich sind funktionierende Recycling-Konzepte erforderlich, wie sie sowohl im H₂Giga-Projekt ReNaRe, aber auch in DERIEL und SEGIWA erfolgreich entwickelt wurden.

Beschränkung oder Verbot von PFAS in der EU

Das in Europa diskutierte PFAS-Verbot sorgte sowohl unter Herstellern als auch unter Betreibern für massive Verunsicherung. Kurz- und mittelfristig ist im Bereich der PEM-Elektrolyse keine Alternative für die PFAS-haltige Membran absehbar (weitere Details siehe Abschnitt 6.6). Eine verpflichtende Rücknahme des Elektrolyseurs am Ende der Lebensdauer wird als Möglichkeit in Betracht gezogen.

Für die AEL ist eine Polytetrafluorethylen-Auskleidung (PTFE) bei einigen KOH-führenden Teilen notwendig. Auch hier wurde das zunächst angekündigte PFAS-Verbot als Problem genannt. Die gefundene Übergangslösung, dass Elektrolyseure noch fluorpolymerhaltige Membranen, Dichtungen oder andere Komponenten enthalten dürfen, hat diese Situation zunächst einmal entspannt. Wichtig sind hier eine langfristige Perspektive und Planungssicherheit.

Fachkräftemangel in Deutschland

Laut den Elektrolyseur- und Komponentenherstellern besteht bereits ein spürbarer Fachkräftemangel bei akademischen und insbesondere auch bei nicht-akademischen MINT-Berufen. Ebenfalls Mangel besteht an Spezialisten für Wasserstofftechnologien und Personen mit spezifischen Kenntnissen zu Wasserstoffthemen. Gemäß einer Umfrage, die im H₂Giga-Projekt TPE zum Thema „Aus- und Weiterbildung“ im Hinblick auf die Konzeption eines Seminarangebots im März 2022 durchgeführt wurde, ist der Bedarf an der Weiterbildung von bestehendem Personal aus „Forschung und Entwicklung“ besonders hoch, gefolgt von der zweiten Personalgruppe „Technik“. Gewünschte Themen reichen von den elektrochemischen Grundlagen bis hin zu Sicherheitsschulungen.

Langwierige Genehmigungsverfahren für Wasserstoffherzeugungsanlagen in Deutschland

Die Beschleunigung von Genehmigungsverfahren für den Bau und den Betrieb einer Wasserstoffherzeugungsanlage ist von zentraler Bedeutung. In den Interviews wurden die derzeit noch sehr langen Genehmigungszeiten für Wasserstoffherzeugungsanlagen als Hürde genannt. Insbesondere bei kleinen Erzeugungsanlagen sind die Kosten des Genehmigungsverfahrens im Vergleich zu den Kosten der Anlage zu hoch und gefährden damit die Wirtschaftlichkeit. Der in 2025 vorgelegte Entwurf des Wasserstoffbeschleunigungsgesetzes [147] soll die Genehmigungsverfahren vereinfachen und klarer strukturieren. Zudem wurden im Rahmen des H₂Giga-Projekts TPE drei zentrale Dokumente zu dem Thema erarbeitet: ein Leitfaden zur Genehmigung von Elektrolyseanlagen in Deutschland, Länderstudien zu Genehmigungsregelungen für Elektrolyseanlagen und ein Musterantrag für das Antragsprogramm „ELiA“ [148].

Europäische Herausforderung: Preisdruck durch chinesische Hersteller, Problematik hoher Energiepreise

Die europäische Elektrolyseindustrie ist mit verschiedenen Herausforderungen konfrontiert. Aktuell sorgen chinesische Hersteller mit deutlich niedrigeren Herstellkosten für erheblichen Preisdruck. Europäische Hersteller punkten mit hoher Qualität und Lebensdauer der Elektrolyseure, Serviceleistungen und Ansprechpartner für ihre Kunden, aber können das niedrige chinesische Preisniveau nicht erreichen. Ebenfalls hemmend für den Wasserstoffhochlauf

und damit für den Elektrolysemarkt sind die hohen Energiepreise in Deutschland und Europa. Infolge des Ukraine-Kriegs ist das Strompreisniveau deutlich angestiegen, da sich die Energiepreise insgesamt erhöht haben und der Strompreis über das *Merit-Order*-Prinzip indirekt an den Gaspreis gekoppelt ist.

Das größte Hemmnis für den Markthochlauf der Wasserelektrolyse sind die hohen Wasserstoffgestehungskosten. Grüner Wasserstoff ist teurer als grauer Wasserstoff bzw. bisher genutzte fossile Energiequellen. Aufgrund der fehlenden Wirtschaftlichkeit und geringen Planungssicherheit werden Investitionsentscheidungen verzögert und seit 2024 und verstärkt in 2025 sogar Projekte pausiert oder abgesagt.

Besondere Bedeutung für einen positiven Business Case hat die Verfügbarkeit von günstigem grünem Strom und die Umsetzung von Dekarbonisierungsprojekten mit Wasserstoff. Der schnelle Ausbau von Erneuerbaren Energien und der Aufbau von internationalen Partnerschaften kann hier Abhilfe schaffen. Hinsichtlich des Hochlaufs der Wasserelektrolyse ist eine stabile Zuliefererlandschaft erforderlich, die durch weitere Kooperationen gestärkt und diversifiziert werden sollte. Genehmigungsverfahren müssen vereinfacht, digitalisiert und somit beschleunigt werden.

Elektrolyseurhersteller müssen wegen des anhaltenden Preisdrucks chinesischer Hersteller die Kostenstruktur von Elektrolyseuren nachhaltig optimieren. Hierfür sind auch weitere F&E-Anstrengungen erforderlich. Flankiert werden müssen diese durch politische Instrumente zur Stärkung der europäischen Hersteller und Zulieferer. Letztlich muss sich die neue Technologie am Markt etablieren, wofür es eines gesamten Wirtschaftskreislaufs aus Elektrolyseurfabriken, Infrastruktur und Anwendungsszenarien mit entsprechenden Abnehmern bedarf.

Stand der Technik und technische Ziele



Stacks und Elektrolysesysteme müssen bestimmte Anforderungen u.a. in Bezug auf Leistung, Kosten und Lebensdauer erfüllen, um heute, aber auch in der Zukunft, wettbewerbsfähig zu sein. Mittels *Key Performance Indicators* (KPI) können diese quantifiziert werden. Der Ansatz erlaubt den technologischen Fortschritt einzuordnen. Im Folgenden wird der aktuelle Stand der Technik der deutschen Elektrolyseindustrie (2024/2025) den technischen Zielen für das Jahr 2030 gegenübergestellt und mögliche F&E-Strategien diskutiert, die sich daraus ableiten lassen.

Die Auswahl und Darstellung der technologischen KPIs in Tabelle 5.1 bis Tabelle 5.4 erfolgte vergleichbar zum Vorschlag der *Clean Hydrogen Partnership* [149]. Daten für die Spalte 'State of the art Germany 2024/2025' stammen aus direkten Befragungen einzelner Experten aus Industrie und Wissenschaft. Im Vergleich dazu lieferte Tabelle 2.2 in Abschnitt 2.3 allgemeine technische Charakteristika der vier Technologien, deren Daten auf allgemeinen Literatur- und öffentlich verfügbaren Herstellerangaben basieren. Die Experten legten Zielwerte für das Jahr 2030 fest. Zur Orientierung und Einordnung wurde zusätzlich auf Angaben der *Clean Hydrogen Partnership* [149] zurückgegriffen, die zum Teil auch direkt übernommen wurden, und mit weiteren Kennwerten der *International Renewable Energy Agency* (IRENA) [150] und der IDTechEx [151] verglichen und ergänzt. Weiterhin wurden die Kennwerte mit publizierten Daten des *U.S. Department of Energy* (DOE) [152] verglichen, die noch ehrgeizigere Ziele, u.a. in Bezug auf Kosten und Reduzierung des PGM-Gehalts, anstreben. Teilweise wurden Zahlenwerte auch unter unterschiedlichen Randbedingungen und Einschätzungen festgelegt. Daher dienen die Tabellen für die vier Technologien in erster Linie der Orientierung, sind aber nicht in allen Punkten direkt miteinander vergleichbar.

Die deutsche Elektrolyseindustrie vereint eine Vielzahl an Schlüsselakteuren, die derzeit technologisch führend sind (siehe auch Abschnitt 4.2). Allerdings gilt für alle Technologien, dass einige technische Anforderungen an eine Industrialisierung der Wasserelektrolyse bis 2030 – zumindest bei einer Mehrheit der Hersteller – noch nicht erreicht sind und weitere F&E-Anstrengungen erforderlich machen. Insbesondere bei den Investitionskosten (siehe *Capital cost*) erscheinen die Ziele für 2024/2025 nicht erreicht.

Gleichzeitig konkurriert die deutsche Elektrolyseindustrie mit chinesischen Herstellern, die Stacks und Systeme zu weitaus niedrigeren Preisen anbieten. Daraus ergibt sich, dass das Streben nach Kostenreduktion aktuell der wichtigste Innovationstreiber ist. Auf Basis des KPI-Ansatzes hatte bereits IRENA im Jahr 2020 entsprechende Kostenreduktionsmaßnahmen der vier Technologien abgeleitet [150]. Der Stack macht neben den BoP-Kosten einen erheblichen Kostenfaktor (CAPEX) aus [1], [150]. Bei den Betriebskosten (OPEX) sind die Stromkosten bestimmend, sodass die Erhöhung der Umwandlungseffizienz bzw. die Reduktion des Energieverbrauchs eine wichtige Rolle spielt. Gleichzeitig muss ein Optimum aus Kostenreduktion, Effizienz und Lebensdauer gefunden werden, da alle Dimensionen miteinander in Zusammenhang stehen und miteinander konkurrieren. Dünnere Separatoren beispielsweise führen zu einer Verringerung des Innenwiderstands und damit zur Erhöhung der Umwandlungseffizienz verbunden mit einer Senkung von OPEX, bergen allerdings das Risiko einer Verringerung der Lebensdauer [150].

Auf Basis der KPIs werden im Folgenden technologiespezifische F&E-Maßnahmen abgeleitet. Es wird in Kürze die Grundlage für das Verständnis des nachfolgenden Kapitels gelegt, in dem die im Wasserstoff-Leitprojekt H₂Giga gesammelten F&E-Bedarfe dargestellt und bewertet werden.

Für die KPI-Tabellen gelten die Definitionen und Systembedingungen vergleichbar zu [149]. Die im Rahmen dieser Studie angepassten Erläuterungen der KPIs sind im Anhang (Abschnitt 9.1.3) zu finden.

Kennzahlen der Alkalischen Elektrolyse

Die KPIs für den aktuellen Stand der Technik (2024/2025) der AEL als auch für das Zieljahr 2030 sind in Tabelle 5.1 dargestellt. Einige Kennzahlen sind voneinander abhängig und müssen daher gleichzeitig erfüllt werden.

Kostensenkung, sowohl CAPEX als auch OPEX, ist für die AEL ein wichtiger Innovationstreiber. Hinzu kommt eine entsprechende Massenproduktionsfähigkeit als wesentliches Entwicklungsziel. Laut Experteneinschätzung haben eine Produktionsskalierung und die weitere Automatisierung von Prozessschritten das

Potenzial, die Stackkosten weiterhin erheblich zu senken. Begleitet sollten diese Anstrengungen von einer kontinuierlichen Weiterentwicklung des Stackdesigns. Um die Effizienz eines AEL-Systems zu verbessern, wäre die Optimierung der Betriebsführung ein möglicher Ansatzpunkt. Ein Betrieb bei höheren Temperaturen trägt zur Erhöhung der Effizienz der elektrochemischen Reaktion bei, kann allerdings gleichzeitig zu einer unerwünschten Verringerung der Lebensdauer führen. Der Ansatz muss daher dahingegen erweitert werden, dass keine Einschränkung hinsichtlich der Lebensdauer zu erwarten ist. Weiterhin wäre eine Verbesserung des Diaphragmas möglich, um dessen Beitrag zum Widerstand zu verringern. Der Hersteller Agfa arbeitet daran, für einen geringeren Widerstand die Dicke des Diaphragmas zu verringern.

Dabei muss aber sichergestellt werden, dass auch das unerwünschte Gas-Crossover (HTO und OTH) durch das Diaphragma gering bleibt und keine Defekte entstehen, durch die eine Degradation beschleunigt wird. All diese Anstrengungen zählen auf das Ziel ein, die Zellspannung auf unter 1,8 V abzusenken und somit die Effizienz der Wasserstoffherstellung zu erhöhen [153]. Die AEL ist eine besonders langlebige Technologie. Bei entsprechender Wartung ist eine Lebensdauer einer AEL-Anlage von mehr als 20 Jahren (Stackaustausch nach ca. 10 Jahren) realisierbar. Auf der Materialseite steht als Ziel die (Weiter-) Entwicklung von langzeitstabilen, effizienten Elektroden, die kostengünstig und insbesondere auch massenfertigungstauglich hergestellt werden können.

Alkaline Electrolysis	Unit	State of the art Germany 2024/2025	Target 2030
System			
Electricity consumption @nominal capacity	kWh/kg	49–54 (Target: 49)	48
	kWh/Nm ³ *)	4.4–4.8 (Target: 4.4)	4.3
Capital cost	€/kW	480–650 (Target: 480)	400
Operating point	% of nominal load	10/20–100	10–100
Pressure	bar	< 35	< 35
Temperature	°C	70–90	70–120 **)
O&M cost	€/(kg/d)/yr	43	35
Hot idle ramp time	s	30–240	10
Cold start ramp time	s	800–21.600	300 **)
Stack			
Degradation	%/1000 hrs	0.11	0.1
Current Density (nominal load) [147], [148]	A/cm ²	0.5–0.7	1.0
Stack size	MW	5	5–8
Use of critical raw materials as catalysts	mg/W	0–0.3	0
Life time	h	80,000	120,000 ***)

Tabelle 5.1: KPIs der Jahre 2024/2025 und 2030 für die AEL-Technologie – gemäß Befragung und Einschätzung von H₂Giga-Projektpartnern und Vergleich [149], [150], [151]
O&M cost = Operating and Maintenance cost. Teilweise werden noch kritische Rohstoffe, wie Ruthenium für die Kathode (hauptsächlich als RuO₂), eingesetzt. Die vollständigen Erläuterungen der KPIs, die im Rahmen dieser Studie angepasst wurden, sind im Anhang zu finden. *) Umrechnung erfolgte mit Normkubikmeter nach DIN 1343, Normalbedingungen (1,01325 bar und 273,15 K) **) Zielwert bis 2030 möglicherweise nicht erreichbar. ***) Wert hängt von vielen Faktoren ab.

Kennzahlen der PEM-Elektrolyse

Tabelle 5.2 stellt die KPIs der PEM-Elektrolysetechnologie für die Jahre 2024/2025 und 2030 zusammen. Mehrere Kennzahlen sind – wie auch bei der AEL – voneinander abhängig und müssen daher gleichzeitig erfüllt werden.

CAPEX und OPEX-Senkungsmaßnahmen sind auch für die PEM-Elektrolyse entscheidend für deren Marktfähigkeit. Auf Basis einer Kostenaufschlüsselung beschreiben Karl et al. [154] (Veröffentlichung aus den H₂Giga-Projekten DERIEL, SEGIWA und AEM-Direkt) verschiedene Ansätze zur Optimierung der PEM- (und AEM)-Elektrolyse. Demnach ist eine Erhöhung der Lebensdauer entscheidend für die Senkung der Investitionskosten, während die Steigerung der Gesamteffizienz und die Optimierung der Betriebsprofile entscheidend für die Senkung der Betriebskosten ist. Eine Möglichkeit zur Steigerung der Effizienz ist eine Verringerung der Membrandicke und damit des Zellwiderstands [19], [150], wobei auch hier auf den

Erhalt von Robustheit und Lebensdauer geachtet werden muss. Auf die Lebensdauer hat auch die Betriebstemperatur einen großen Einfluss. Bei Erhöhung der Temperatur wird zwar der Wirkungsgrad verbessert und damit die Effizienz erhöht, gleichzeitig allerdings die Lebensdauer verringert [155]. Die Wahl der Temperatur hängt von den grundlegenden Eigenschaften der Membran ab. Letztlich wird hier der Zielwert ein Optimum aus Effizienz, Degradation und Wartungsfreundlichkeit sein. Laut Experteneinschätzung ist ein höherer Druck als 30 bar nicht unbedingt erforderlich. Die Größe der Stacks hängt auch mit deren Handhabbarkeit zusammen. PEM-Elektrolyseurhersteller bieten einzelne Stacks zwischen 0,1 bis ca. 2 MW an. Die Standardgröße liegt derzeit zwischen 1 und 1,5 MW. Stacks größer 1 MW können günstiger sein, sind allerdings auch schwieriger zu handhaben.

Großskalige Anlagen benötigen besonders hohe Betriebssicherheit, da hohe Kosten bei Versagen oder Ineffizienz entstehen.

Parameter PEM-Elektrolyse	Unit	State of the art Germany 2024/2025	Target 2030
System			
Electricity consumption @nominal capacity	kWh/kg	51–55	41–48
	kWh/Nm ³ *)	4.6–4.9	3.7–4.3
Capital cost	(€/kW)	Target: 700–800	500
Operating point	% of nominal load	10–100	10–100
Pressure	bar	1–30	30
Temperature	°C	50–60	max. 70
O&M cost	€/(kg/d)/yr	10–20 €/kW/yr	lower
Hot idle ramp time	s	5–10	5–10
Cold start ramp time	s	900	n.a. ***)
Stack			
Degradation	%/1,000hrs	0.15–0.5	0.12
Current Density (nominal load)	A/cm ²	1.5–2.5	3–4
Stack size	MW	1–2	3
Use of critical raw materials as catalysts	mg/W	1.5–2	0.1–0.25
Life time	h	10 years **)	10 years

Tabelle 5.2: KPIs der Jahre 2024 und 2030 für die PEM-Elektrolyse Technologie - gemäß Befragung und Einschätzung von H₂Giga-Projektpartnern und Vergleich [149], [150], [151]

O&M cost = Operating and Maintenance cost. Als kritische Rohstoffe sind hier hauptsächlich Iridium als Anodenkatalysator und Platin als Kathodenkatalysator gemeint; auch Titan zählt zu den kritischen Rohstoffen. Die vollständigen Erläuterungen der KPIs, die im Rahmen dieser Studie angepasst wurden, sind im Anhang zu finden. *) Umrechnung erfolgte mit Normkubikmeter nach DIN 1343, Normalbedingungen (1,01325 bar und 273,15 K) **) Zahlenwert entspricht der Angabe des Zielwerts für 2024, ***) abhängig von Anforderungen wie Netzkompatibilität, Dynamik etc., kann gegebenenfalls zu einer Erhöhung der Stromgestehungskosten von Wasserstoff führen.

Siemens Energy verfolgt hier den Ansatz des „De-Risking“ [154], bei dem parallel zu einem festgelegten Betriebsmodus die Grenzen für einen sicheren Betrieb bei hoher Leistung und niedriger Degradation getestet werden. Das Wichtigste dabei sind Versuche an Pilotanlagen im industriell-relevanten Maßstab. Somit können Designfehler erkannt und entsprechende Anpassungen vorgenommen werden. Insgesamt vollzieht die Technologie gerade den Sprung hin zu einem TRL von 9, der weitere Betriebserfahrung erfordert.

In Bezug auf die Produktionstechnik sind weitere Automatisierung und insbesondere auch Qualitätssicherungsmaßnahmen, die zu einer Verringerung des Ausschusses führen, herstelllerspezifisch mit einem signifikanten Kostenreduktionspotenzial verbunden. Auf der Materialseite ist beispielsweise die Reduktion der Iridiumbelastung ein wichtiges Thema, da das Edelmetall ein großes Hindernis in Bezug auf Skalierung darstellen könnte. Sobald pro Jahr global

mehr als 20 GW PEM-Elektrolyseure vermarktet werden, könnte die Verfügbarkeit von Iridium kritisch werden, was dann nur durch entsprechendes Recycling abgemildert werden kann. Umso wichtiger ist daher ein sparsamer Einsatz dieses Edelmetalls ohne Einschränkungen hinsichtlich Leistung und Langzeitstabilität.

Kennzahlen der Hochtemperatur-Elektrolyse

Die KPIs der HTEL für die Jahre 2024/2025 (Stand der Technik) und 2030 sind in Tabelle 5.3 zusammengefasst. Mehrere Kennzahlen sind voneinander abhängig und müssen daher gleichzeitig erfüllt werden.

Das große Potenzial der Hochtemperatur-Elektrolyse liegt in ihrer hohen Effizienz und den damit vergleichsweise niedrigen OPEX. Wesentliche Herausforderung der Technologie und damit Kostentreiber stellt allerdings die im Vergleich zur AEL und PEM-Elektrolyse geringere Lebensdauer dar.

Parameter HTEL	Unit	State of the art Germany 2024/2025	Target 2030
System			
Electricity consumption @nominal capacity	kWh/kg	39	37
	kWh/Nm ³ *)	3.5	3.3
Capital cost	€/kW	1250–1750	520–650
Operating point	% of nominal load	n.a.	50–100
Temperature	°C	650–850	650–850
O&M cost	€/(kg/d)/yr	130	45–25
Hot idle ramp time	s	600–300	180
Cold start ramp time	h	-	4
Hot standby power consumption	% of nominal	2	1
Specific steam consumption	kg/kg H ₂	12–9	10–8
Stack			
Degradation	%/1,000hrs	1.5–1.0	0.9–0.5
Current Density (nominal load)	A/cm ²	0.85	1.5
Stack size	MW	0.05 (50 kW)	0.2 (200 kW)
Use of critical raw materials as catalysts	mg/W	0	0
Life time	h	30.000	50.000
Pressure	bar	1.3	5

Tabelle 5.3: KPIs der Jahre 2024 und 2030 für die HTEL-Technologie – gemäß Befragung und Einschätzung von H₂Giga-Projektpartnern und Vergleich [149], [150], [151]

O&M cost = Operating and Maintenance cost. Die vollständigen Erläuterungen der KPIs, die im Rahmen dieser Studie angepasst wurden, sind im Anhang zu finden.

*) Umrechnung erfolgte mit Normkubikmeter nach DIN 1343, Normalbedingungen (1,01325 bar und 273,15 K)

Laut Experteneinschätzung muss daher weiterhin an der Erhöhung der Lebensdauer bzw. an einer Reduktion der Degradation angesetzt werden, um die Wirtschaftlichkeit entscheidend zu verbessern und ihre Wettbewerbsfähigkeit zu erhöhen. In Bezug auf die Langzeitstabilität fehlt aktuell noch die nötige statistisch abgesicherte Erfahrung aus dem Betrieb von Stacks gleicher Bauweise und großer Anlagen. Auch eine weitere Skalierung der Modulleistung und eine Absenkung der Kosten für Modulbau wird erforderlich sein.

Eine weitere Maßnahme, die zur Senkung der Investitionskosten beiträgt, ist die Automatisierung des Stackbaus. Eine kosteneffizientere Gestaltung des Stacks und optimierte Betriebsstrategien könnten weiterhin dabei unterstützen, entsprechende Kostenreduktionsziele zu erreichen.

Im Allgemeinen müssen Zellen, Stacks und BoP in Bezug auf die Performance (Ziel: Signifikante Erhöhung der Lebensdauer) weiter vorangetrieben werden. Gleichzeitig muss die Entwicklung kosten- und fertigungsoptimierter Stackdesigns intensiviert und die großserientauglichen Systeme in der Praxis getestet werden. Besonders hilfreich wären dabei Untersuchungen zu den degradationsbestimmenden Mechanismen im Stack.

Kennzahlen der AEM-Elektrolyse

In Tabelle 5.4 sind die KPIs der AEM-Elektrolyse für die Jahre 2024 (Stand der Technik) und 2030 zusammengestellt. Mehrere Kennzahlen sind voneinander abhängig und sollten daher gleichzeitig erfüllt werden.

Eines der primären technologischen Entwicklungsziele der AEM-Elektrolyse ist die Erhöhung der Lebensdauer, um sie für die industrielle Anwendungen zu qualifizieren. Vor allem ist die Weiterentwicklung und Optimierung der Balance zwischen mechanischer Stabilität, Ionenleitfähigkeit und den Materialkosten für Membran und Ionomer entscheidend. Hier liegt die Herausforderung darin, ein kosteneffizientes Material zu entwickeln, das gleichzeitig langlebig und leistungsfähig ist [150].

Laut Experteneinschätzung ist für die Anodenseite die Verwendung von non-PGMs auf Technikumsebene im Stack möglich. Für die Kathode bedarf es eines Transfers der vielversprechenden non-PGM basierten Katalysatormaterialien auf die Technikumsebene. Final muss das Zusammenspiel der Anoden- und Kathodenmaterialien im Stack validiert werden. Der nächste Schritt hin zu höheren Reifegraden ist für eine Kommerzialisierung entscheidend. Auch die skalierbare Herstellung von MEAs mittels bekannter, aber auch innovativer Beschichtungskonzepte ist entscheidend für die Marktreife. Diese Optimierungen sind essenziell, um die AEM-Elektrolysetechnologie wirtschaftlich und technisch konkurrenzfähig zu machen und somit eine breitere Anwendung im industriellen Maßstab zu ermöglichen.

Parameter AEM-Elektrolyse	Unit	State of the art Germany 2024/2025	Target 2030
System			
Electricity consumption @nominal capacity	kWh/kg	Target: 53	48
	kWh/Nm ³ *)	> 4.8	4.3
Capital cost	€/kW	Target: 550–650 *)	300–450
Pressure	bar	< 35	
Temperature	°C	40–60	na
Operating point	% of nominal load	na	10–100
O&M cost	€/(kg/d)/yr	27	21
Hot idle ramp time	s	15	5–10
Cold start ramp time	s	450	150 **)
Stack			
Degradation	%/1000hrs	0.9	0.5
Current Density (nominal load)	A/cm ²	0.25–0.60	0.30–1.0
Stack size	MW	0.003 (3 kW)	0.02 (20 kW)
Use of critical raw materials as catalysts	mg/W	0–0.4	0
Life time	h	na	na (Ultimate target: 80,000)

Tabelle 5.4: KPIs der Jahr 2024 und 2030 für die AEM-Elektrolysetechnologie – gemäß Befragung und Einschätzung von H₂Giga-Projektpartnern und Vergleich [145], [150]

O&M cost = Operating and Maintenance cost. Als kritischer Rohstoff ist hier Platin als Kathodenkatalysator gemeint. Die vollständigen Erläuterungen der KPIs, die im Rahmen dieser Studie angepasst wurden, sind im Anhang zu finden. *) Umrechnung erfolgte mit Normkubikmeter nach DIN 1343, Normalbedingungen (1,01325 bar und 273,15 K) **) Zielwert bis 2030 möglicherweise nicht erreichbar.

Die deutsche Elektrolyseindustrie zählt aktuell bei den vier Technologien der Wasserelektrolyse jeweils zu den technologischen Vorreitern. Zur Erreichung der Ziele bis 2030 sind allerdings noch erhebliche F&E-Anstrengungen notwendig. Die bereits erlangten Ergebnisse auf Laborebene müssen in die industrielle Reife übertragen werden. Dabei treten weitere zu lösende Forschungsfragen zutage. Gleichzeitig muss die Produktionshochskalierung und Automatisierung mit innovativen Fertigungstechnologien sowie Qualitätssicherungsmaßnahmen weiter voranschreiten, um Elektrolyseure MADE IN GERMANY erfolgreich am Markt zu etablieren.

Forschungs- und Entwicklungsbedarfe

Für eine erfolgreiche Industrialisierung der Wasserelektrolyse ist deren Weiterentwicklung zwingend erforderlich. Um ein umfassendes und detailliertes Bild der erforderlichen Forschungs- und Entwicklungsmaßnahmen (F&E-Maßnahmen) zu erhalten, wurden im Jahr 2024 Bedarfe für Forschung und Entwicklung aus allen H₂Giga-Projekten abgefragt und zusammengefasst. Zusätzlich einzelne Hersteller, die nicht in H₂Giga vertreten sind, nach Forschungsbedarfen befragt, um ein möglichst vollständiges Bild zu erhalten. Insgesamt gingen ca. 450 Rückmeldungen ein, die von Kernteams aus Fachexperten in Kategorien geclustert und konsolidiert wurden. Alle Rückmeldungen wurden nach dem Kriterium ihres Impacts auf das Erreichen der Ziele der Nationalen Wasserstoffstrategie bewertet und priorisiert. Dabei wurden zwei Zeithorizonte separat betrachtet, nämlich bis 2030 und bis 2045. Konkret bezog man sich dabei auf die 2023 formulierten Ziele der NWS, den Aufbau von 10 GW heimischer Elektrolysekapazität in Deutschland und die Festigung der Position Deutschlands als Leitanbieter für Wasserstofftechnologien. Die Bedarfe wurden anschließend auch dem Nationalen Wasserstoffrat (NWR) vorgestellt und diskutiert. Auch wenn das 10 GW-Ausbauziel inzwischen relativiert wurde (Stand: Ende 2025), so zählen die vorgeschlagenen Arbeiten grundsätzlich auf den Aufbau von Elektrolysekapazität und den Technologieexport an internationalen Standorten ein, sodass die Bewertung und Priorisierung weiterhin sinnvoll sind.

Ein Teil der F&E-Bedarfe zählt dabei direkt auf die KPIs (siehe Kapitel 5) ein, wie eine Verbesserung in Bezug auf Kosten, Effizienz und Lebensdauer. Andere Punkte gehen über diese direkt-messbaren Kriterien hinaus. Anwendungsszenarien müssen ausgeweitet werden, sodass auch Themen wie Netz- und Systemdienlichkeit in den Vordergrund gerückt werden. Netzdienliche Anlagen sollen zukünftig zur Netzengpassbehebung beitragen. Langfristig gesehen kann auch der Netzausbaubedarf reduziert oder die Netzbetriebsführung optimiert werden. Anlagen, die sich system- bzw. sektorübergreifend verhalten, werden entsprechend den Anforderungen aller eingebundenen Systeme (Strom, Wärme, Gas) gerecht [156]. Letztlich muss ein Produktversprechen sichergestellt werden,

wobei auch Betriebsstabilität, Robustheit und Wartungsfreundlichkeit wichtige Entscheidungskriterien darstellen. Es gilt, das Kundenvertrauen in eine Qualität MADE IN GERMANY zu stärken.

Die F&E-Bedarfe wurden mit einer einheitlichen Struktur separat nach den vier Technologien AEL, PEM-Elektrolyse, HTEL und AEM-Elektrolyse ermittelt. Zusätzlich gibt es ‚Übergreifendes‘ sowie das Thema ‚PFAS-freie Elektrolyse‘. Als übergreifende Themen wurden Arbeitsgebiete zusammengefasst, die nicht direkt einer einzelnen Elektrolysetechnologie zugeordnet sind. Dazu gehören: Interaktion mit Wasser, Interaktion mit dem Stromnetz, regulatorische Rahmenbedingungen sowie Konzepte für Recycling und Wiederverwendung. Allerdings hat die Trennung zwischen ‚übergreifend‘ und ‚technologiespezifisch‘ auch eine gewisse Unschärfe. Daher können übergreifende Themen zusätzlich bei den technologiespezifischen F&E-Bedarfen gelistet sein, wie bei Betriebserfahrung, Produktionsschskalierung und beim Recycling. Das Thema ‚PFAS-freie Elektrolyse‘ behandelt in Bezug auf die PEM-Elektrolyse konkret die Entwicklung von fluorfreien Alternativen für PEM und Ionomere. Bei den anderen Elektrolysetechnologien kommen jedoch ebenfalls verschiedene fluorierte Materialien in der Peripherie und in der Vorkette zum Einsatz. Beispiele dafür sind Dichtungen oder mit Fluorpolymeren ausgekleidete Kessel oder Leitungen.

Die Einteilung der technologiebezogenen Themen erfolgte, wie in Abbildung 6.1 dargestellt, in sechs thematische Cluster: Material, Design, Produktionstechnik, Betrieb, Lebensdauer und Recycling. Bewusst nicht aufgeführt wurden Begriffe wie Digitalisierung oder Automatisierung, da diese als Methode und ‚Werkzeuge‘ für die oben genannten Kategorien aufgefasst werden und dort integriert sind. Die Kriterien für die Zuordnung in die Cluster sind in Tabelle 6.1 gelistet. Eine detaillierte Beschreibung des Abfrage- und Konsolidierungsprozesses ist im Anhang in Abschnitt 9.1.2 zu finden.

Die Detailtiefe der eingereichten F&E-Bedarfe war teilweise sehr hoch, während in anderen Fällen eher allgemeine und breite Formulierungen verwendet wurden.

Die Einreichungen mussten auch herstellerspezifisch interpretiert werden, da unterschiedliche Schwerpunkte oder Gewichtungen aufgrund unterschiedlicher Entwicklungsstände und Anforderungen gesetzt wurden. F&E-Bedarfe zwischen konkurrierenden Unternehmen wurden untereinander nicht geteilt. Somit enthält die vollständige Sammlung F&E-Bedarfe, die nicht bei allen Unternehmen bestehen bzw. Forschungsfragen, die bei einzelnen Herstellern bereits gelöst sind. Manche Themen waren auch bereits in H₂Giga adressiert worden, allerdings wurden teilweise Entwicklungen im Rahmen der Projektlaufzeit nicht vollständig abgeschlossen oder es hatten sich aufbauende Arbeiten ergeben.

Die wichtigsten F&E-Maßnahmen pro Cluster (max. 2-3) wurden jeweils durch das Kernteam ausgewählt und werden hier dargestellt. Zum einen wurden die Themen nach ihrem Impact priorisiert, während gleichzeitig die konkrete Auswahl als Konsens unter den Experten des jeweiligen Kernteams zu werten und somit in den meisten Fällen herstellerübergreifend zu verstehen ist. Teilweise wurden Themen zur kürzeren Darstellung zusammengefasst und entsprechend neu formuliert.

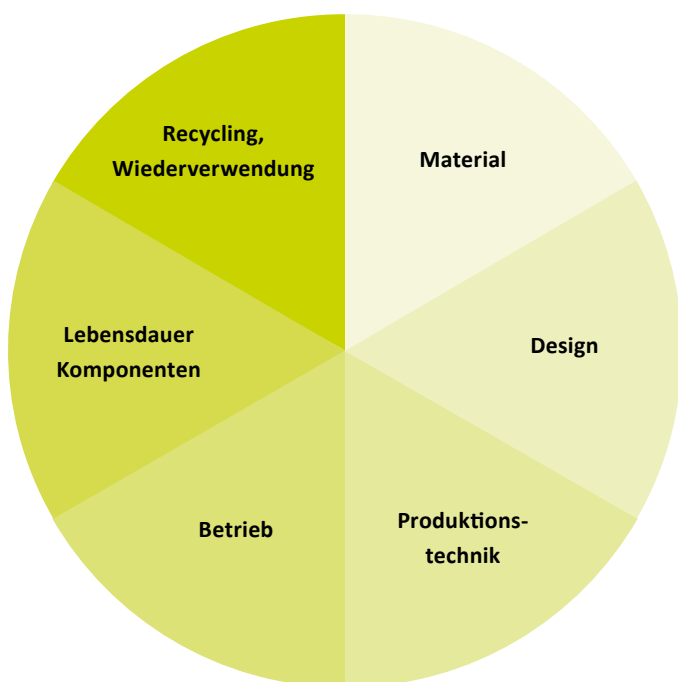


Abbildung 6.1: Übersicht der thematischen Clusterung für die Forschungsthemen der vier Elektrolysetechnologien

#	Clustering	Was gehört inhaltlich dazu?
1	Betrieb des Elektrolyseurs	Betriebserfahrung sammeln (auch außerhalb des spezifizierten Betriebsfensters), kritische Parameter für Betriebsstabilität identifizieren, Digitalisierung des Betriebs, netz-dienlicher und systemdienlicher Betrieb
2	Design	Anlagendesign, Design von Komponenten (<i>Design for Production, Maintenance, Supply Chain</i> usw.), auch Berücksichtigung des Einsatzes von neuen Materialien
3	Lebensdauer von Komponenten	F&E für Materialien für Langzeitstabilität, Anwendungsnahe Langzeittests von Elektrolyseur und Komponenten, Entwicklung von ex-situ Testmethoden, die Lebensdauer-relevante Parameter messen, F&E von beschleunigten Alterungstests. Nicht hier verortet: Lebensdauer für PFAS-freie Elektrolyse (separates Thema)
4	Produktionstechnik	Herstellung und Montage von den Komponenten bis hin zum Elektrolysesystem (inkl. Robotik), Beschichtungstechnik, Membran/Diaphragma-Herstellung, inklusive integrierter Qualitätskontrolle oder Eingangskontrolle und Entwicklung von Messmethoden dafür, inkl. Automatisierung und Digitalisierung der Abläufe
5	(Kritische) Materialien	Material- und Elektrodenentwicklung mit Ziel Edelmetall sparen oder ersetzen, Materialentwicklung für Hochtemperatur-/Druckaufgeladenen Betrieb, keramische H ₂ O/CO ₂ -Elektroden (SOE) sowie Materialien bzw. Membranen für AEM-Elektrolyse Nicht hier verortet: PFAS-freie Elektrolyse (separates Thema)
6	Recycling, Wiederverwendung	Demontage, Rückgewinnung, Konzepte zur Wiederverwendung von Einzelteilen, Recycling usw.

Tabelle 6.1: Inhaltliche Beschreibung der Kriterien zur Einordnung der Forschungsbedarfe in die sechs thematischen Cluster je Technologie (AEL, PEM-Elektrolyse, HTEL, AEM-Elektrolyse)

Im Folgenden werden die Ergebnisse in Form der tabellarisch gelisteten konsolidierten F&E-Bedarfe dargestellt und erläutert. Dabei wurde zusätzlich farblich sichtbar gemacht, ob es sich bei dem betreffenden Thema um ein Forschungs- oder Entwicklungsthema handelt. Die Entwicklungsthemen im Sinne von industrieller Entwicklung auf hohem TRL sind durch grüne Schrift gekennzeichnet, während alle Themen mit schwarzer Schriftfarbe dem Bereich der Forschung zugeordnet sind.

6.1 F&E-Bedarfe: Alkalische Elektrolyse

Für die alkalische Elektrolyse haben die H₂Giga-Projekte mehr als 60 F&E-Bedarfe gemeldet. Die wichtigsten F&E-Maßnahmen pro Cluster sind in Tabelle 6.2 dargestellt. Wegen der hohen technologischen Reife der alkalischen Elektrolyse zahlen viele der genannten Forschungsthemen bereits mit hohem Impact auf die kurzfristigen Ziele der NWS (Zeithorizont 2030) ein. Nur Themen mit Bezug auf Materialien und Design haben aufgrund der Dauer der Entwicklungszyklen in ihrer Wirkung spätere Zeithorizonte. Konkret besteht Bedarf an der Weiterentwicklung der Zellen und Stacks mit Bezug auf Kosten, Leistung, Lebensdauer bzw. Degradation und Robustheit. Entsprechende Ziele sind für 2030 noch nicht erreicht (siehe KPIs in Kapitel 5). Es gibt Bedarfe bei der Optimierung der Anode und der Entwicklung von effizienten und kostengünstigen Katalysator-Substraten/Materialien unter Verwendung bestehender oder integrierbarer Beschichtungstechniken; auch im Hinblick auf Skalierbarkeit.

Hier kann auf die umfassenden Ergebnisse zur Elektrodenentwicklung des H₂Giga-Projekts PrometH₂eus aufgebaut werden. Zusätzlich soll das skalierbare Design der Anode auf die Zellspannung hin optimiert werden. Derartige Entwicklungen werden sich ca. 3-5 Jahre später in eine industrielle Produktion niederschlagen. Neben der Weiterentwicklung der Anode ist auch die Optimierung der Kathodenroute von großer Bedeutung, da sich hier signifikante Verbesserungen abzeichnen. Zusätzlich kann eine Effizienzerhöhung erreicht werden, indem das Zelldesign im Hinblick auf eine Verringerung der Nebenströme und des Gas-Crossover optimiert wird.

Insgesamt soll beim Design ein ganzheitlicher Ansatz fortgeführt werden, der ein *Design for Manufacturing*, ein *Design for Assembly*, *Design for Maintenance*, *Design for Re-use* und *Design for Recycling* mitberücksichtigt. Komponenten müssen hochdurchsatzfähig sein. Bedarf wird in der Produktion bei der Optimierung des automatisierten Stackmontageprozesses, auch in Bezug auf ein Verständnis von Verkettungseffekten, gesehen. Weiterhin muss der Übergabeprozess in die Logistik (automatisiertes Verpacken und Entpacken) erprobt werden. Zusätzliche Themen sind das Hochpräzisionshandling und die Weiterentwicklung der Automatisierung von Kleinstkomponenten. Herstellerabhängig besteht auch Bedarf bei der Optimierung der Produktionsplanung/-steuerung und der Entwicklung von Flexibilisierungsoptionen. Um die Ausschussquote zu reduzieren und das Produktversprechen sicherzustellen, wird die Qualitätssicherung bzw. -steigerung der Produktion (Ziel: *End of Life* ohne Ausschuss) als weiterer relevanter Schritt identifiziert.

Die Hersteller meldeten im Rahmen der Abfrage nochmals die Problematik der aktuell nicht diversifizierten Quelle für das Diaphragma (Single Source). Daraus ergibt sich ein Bedarf, für diese Kernkomponente mindestens einen weiteren Zulieferer zu etablieren und die Technologie in der entsprechenden Skalierung bereitzustellen.

Anlagen wurden in den vergangenen Jahren bis in den GW-Maßstab hochskaliert und in Betrieb genommen; entsprechend gilt es aktuell, Betriebserfahrung an derartigen großskaligen Anlagen – auch im Langzeitbetrieb - zu sammeln. Themen der Betriebsüberwachung und Anlagensicherheit, Verbesserung der Auslegung und Betriebsoptimierung sowie eine Ausweitung der Anwendungsszenarien (u.a. der systemdienliche Betrieb) rücken in den Vordergrund. Um einen sicheren, zuverlässigen und robusten Betrieb zu garantieren, spielt dabei die Entwicklung digitaler Technologien für die Anlagenüberwachung und -steuerung eine entscheidende Rolle. Großskalige Testungen von AEL-Stacks sind erforderlich, um degradationsbestimmende Mechanismen, auch im Wechselbetrieb, verstehen zu können. Konkret werden Untersuchungen zur Degradation bei Temperatur- und Druckinhomogenitäten als wichtig eingestuft.

Auch Fragestellungen nach dem Einfluss von Elektrolytreinheit/ Verunreinigungen auf alle Komponenten der Elektrolysezelle/ Stackeinheit finden Erwähnung. Vielversprechende wissenschaftliche Ergebnisse gibt es auch in Bezug auf den verfahrenstechnischen Betrieb, z.B. in Bezug auf *forced-flow electrolysis*, *high temperature electrolysis*, *dry cathode/anode*.

Ein Hochfahren der Produktion, die mit einem hohen Rohstoffbedarf einhergeht, benötigt auch gezielte Recyclingstrategien, damit durch die Wiederverwertung von ausgedienten Stacks die Produktionskosten sinken. Als besonders wichtig in diesem Zusammenhang wird die Entwicklung von Geschäftsmodellen für *circular economy* angesehen, wobei eine Rückführung nicht zwingend zu den Herstellern, sondern auch für eine neue Verwendung im Zielland interessant sein könnte. Dies kann ebenfalls technologieübergreifend verstanden werden. Dafür werden Strategien für eine automatisierte Demontage und Sortierung der Komponenten benötigt. Weiterhin sollten Strategien für ein gezieltes Stack-Refurbishment durch den Austausch von defekten Zellen entwickelt werden.

Cluster	Thema, Aufgabenstellung: Was wird gebraucht, was fehlt noch?	Begründung: Warum erforderlich zum Erreichen der Ziele der NWS?	Impact bis 2030	Impact bis 2045
Material	Katalysatoren und Beschichtungsverfahren (Anode und Kathode), Prädiktive Testverfahren mit Simulation (z. B. Rück- oder Streuströme) und Tests im dynamischen Betrieb im industriellen Maßstab	Alternativen zu PGM-Beschichtungen mit mindestens vergleichbarer Leistung und Stabilität im dynamischen Betrieb	mittel	hoch
Material und Design	Aufbauend auf H ₂ Giga weitere Optimierung des Anodendesigns: Materialentwicklung und Simulation (bei einzelnen Herstellern)	Erhöhung der Effizienz	mittel	hoch
Design	Verringerung der parasitären Nebenströme und <i>Gas-Crossover</i> zwischen den Zellen, den Headern und Manifolds und den Stack-Anschlüssen	Erhöhung der Effizienz	hoch	hoch
Produktionstechnik	Entwicklung von Qualitätssicherungsmaßnahmen (Inline-Prüftechnik, Analytik, ...)	Vermeiden von Ausschuss (Senkung OPEX) und Stärken des Kundenvertrauens	hoch	hoch
Betrieb	Technologien für digitale Anlagenüberwachung und -steuerung zur Verbesserung der Auslegung und Betriebsoptimierung (sofern noch nicht erfolgt)	Erhöhung von Effizienz und Zuverlässigkeit	hoch	hoch
Lebensdauer Komponenten	Untersuchung des Einflusses von Lastwechseln auf Lebensdauer, Identifizieren geeigneter Betriebsfenster, Quantifizieren der Grenzen für Systemdienlichkeit	Verbesserung der Eignung für systemdienlichen Betrieb (neue Anforderung)	hoch	hoch
Recycling, Wiederverwendung	Geschäftsmodelle für <i>Circular Economy</i> entwickeln (nicht zwingend Rückführung zum Hersteller, sondern auch neue Verwendung im Zielland)	Ökonomie des Recyclings verbessern, Transportkosten reduzieren	hoch	hoch

Tabelle 6.2: F&E-Bedarfe AEL in Cluster eingeteilt (Schriftfarbe Schwarz: Forschungsthema, Schriftfarbe Grün: Entwicklungsthema)

6.2 F&E-Bedarfe: PEM-Elektrolyse

Für die PEM-Elektrolyse wurden insgesamt mehr als 95 F&E-Bedarfe eingereicht, die teilweise sehr detailliert und teilweise sehr allgemein formuliert waren. Die Themen der ‚PFAS-freien Elektrolyse‘ wurden in einer separaten Tabelle 6.7 zusammengefasst, da davon ausgegangen wird, dass PEM-Elektrolyseure, die im Zeitrahmen bis 2030 im industriellen Maßstab zum Einsatz kommen, auf Basis von konventionellen Perfluorsulfonsäure-Membranen (*Perfluorosulfonic Acid*, PFSA-Membran) hergestellt werden.

Teilweise wurden die genannten Punkte zusammengefasst und neu formuliert. Die Auswahl der wichtigsten F&E-Bedarfe ist in Tabelle 6.3 dargestellt. Aufbauend auf die in H₂Giga erzielten Ergebnisse rücken jetzt Themen in den Vordergrund, die gemäß des TRL die Industrialisierung der PEM-Elektrolyse weiter vorantreiben. Viele der genannten Themen zählen daher bereits auf die kurzfristigen Ziele der NWS ein (Zeithorizont 2030) und haben eine entsprechende mittel- und langfristige Wirkung (bis 2045).

Die Forschung an Katalysatoren und Elektroden spielt weiterhin eine bedeutende Rolle für zukünftige Elektrolyseurgenerationen. Ein permanent aktuelles Thema ist die Optimierung der Edelmetallnutzung. Insbesondere im industriellen Großmaßstab muss sparsam mit Pt und Ir umgegangen werden. Es bedarf daher weiterer Forschung an Katalysatoren mit geringem Anteil an Iridium sowie verbesserten Trägermaterialien, die sich nicht nur in Bezug auf Leistung, sondern auch im Langzeitverhalten qualifizieren.

Weiterhin muss die CCM hinsichtlich Leistung, Lebensdauer und automatischer Herstellbarkeit verbessert werden. Ein zu variierender Parameter ist hierbei die Membrandicke. Im Allgemeinen muss das Design von Komponenten oder Baugruppen dahingegen weiterentwickelt werden, dass die angestrebten Ziele in Bezug auf Leistung, Langzeitstabilität und Kosten erreicht werden. Eine der Ideen ist hierbei die Entwicklung von Barrierschutzschichten für Bipolarplatten und PtL zur Verhinderung von Wasserstoffdiffusion und folgender Wasserstoffversprödung. Großes Potenzial wird auch im Einsatz numerischer Modellierung in Kombination mit experimenteller Untersuchung gesehen. So könnten CFD-Simulationen entscheidend zu einer Optimierung des Komponenten-, Zell- und Stackdesigns beitragen. Basierend auf Tools für Brennstoffzellen-simulation könnten geeignete Tools für die Entwicklung neuer Designs entwickelt werden. Mit Blick auf die Produktion müssen jetzt die Grundlagen für eine ex-situ Qualitätskontrolle geschaffen werden, was eine entsprechende Methodenentwicklung von ex-situ

Testing erforderlich macht. Dazu würde sich eine Adaptierung aus der PEM-Brennstoffzelle anbieten.

Weiterhin wird je nach Hersteller eine weitere Automatisierung von Produktionsschritten genannt. Konkret rückt auch das Scale-up der Herstellung von Katalysatoren und Beschichtungstechnologien (CCM) in den Fokus. Produktionsparameter und Produkteigenschaften müssen miteinander in Relation gesetzt werden, wobei auch der digitale Zwilling eine entscheidende Rolle spielen wird. Verbessert werden soll auch das Verständnis kritischer Parameter für Qualität und Reproduzierbarkeit, was den Aufbau eines wirkungsvollen Qualitätssicherungssystems an verschiedenen Stellen des Herstellungsprozesses unterstützt. Bezüglich des automatisierten Assemblings des Stacks und seiner Komponenten ist der Stand bei den Herstellern nicht einheitlich, sodass hier bei einigen Partnern - auch nach H₂Giga - noch Entwicklungsbedarf besteht. Ebenfalls wichtig ist aktuell das Sammeln von Betriebserfahrung im industriellen Maßstab verbunden mit einer entsprechenden Betriebsoptimierung. Es muss Wissen um erlaubte und schädliche Betriebszustände gesammelt werden, um einen sicheren und effizienten Betrieb zu gewährleisten. Das ist von besonderer Bedeutung, da zunehmend der netz- und systemdienliche Betrieb von Elektrolyseuren erforderlich wird. Dafür ist ein grundlegendes Verständnis über die Grenzen der Betriebsfenster erforderlich. Mehr Verständnis der zugrunde liegenden Prozesse soll auch dabei helfen, die Wartungsintervalle und Maßnahmen angemessen zu definieren und ein transparentes *Health-Monitoring* des Stacks zu etablieren.

Besonders die Identifizierung von Degradationsmechanismen im Elektrolyseur im industriellen Maßstab und im realen Betrieb spielt jetzt eine entscheidende Rolle (siehe auch [154]). Weiterhin besteht Bedarf an anwendungsnaher Entwicklung von ex-situ life-time-Charakterisierungsmethoden von Komponenten, inklusive beschleunigte Alterungstests, insbesondere auch für große Zellen oder Stacks. Zusätzlich gilt es, den Einfluss der Wasserqualität auf die Lebensdauer zu untersuchen.

Für den Recyclingprozess von PEM-Elektrolyseuren wird der Forschungsbedarf vor allem im automatisierten *Disassembling* gesehen. Der Austausch alter Stacks in vorhandenen Systemen wird aufgrund der unterschiedlichen Zeitspannen notwendig sein, sodass Stack-Replacement-Konzepte gebraucht werden. Die Extraktion und Aufbereitung der Edelmetalle, Platin und Iridium, wird nach den Arbeiten dazu in H₂Giga als weitgehend gelöst angesehen und ist daher in der Tabelle nicht aufgeführt. Hier ist gegebenenfalls noch ein Scale-up in größere Maßstäbe erforderlich.

Cluster	Thema, Aufgabenstellung: Was wird gebraucht, was fehlt noch?	Begründung: Warum erforderlich zum Erreichen der Ziele der NWS?	Impact bis 2030	Impact bis 2045
Material	Weitere Forschung an Katalysatoren mit geringem Anteil an Iridium sowie verbesserten Trägermaterialien: Zielgrößen hohe Leistung und Langzeitstabilität (aufbauend auf H ₂ Giga, sofern noch nicht erfolgt)	Verringerung der Import-Abhängigkeit (und Kosteneinsparung) durch Verbesserungspotenzial bei Edelmetall-Katalysatoren und Elektroden	mittel	hoch
Design	Weiterentwicklung der <i>Catalyst Coated Membrane</i> (CCM). Ziel: mehr Leistung, Lebensdauer und autom. Herstellbarkeit	Optimierung der wichtigen Kernkomponente des Stacks, insbesondere mit Blick auf den Transfer zum industriellen Maßstab	hoch	hoch
Design	Methodenentwicklung zur CFD-Simulation von Komponenten-, Zell- und Stackdesign: z.B. Gasblasenbildung	Mehr wissensbasierte Optimierung statt <i>Trial & Error</i> . Optimierung durch numerische Modellierung und experimentelle Untersuchung.	hoch	hoch
Produktionstechnik	Methodenentwicklung für Ex-Situ Testing und Eingangskontrolle der PEM	Grundlagen für ex-situ QC schaffen und PEM-Zulieferer diversifizieren	hoch	hoch
Produktionstechnik	Weitere Automatisierung von Produktionsschritten bei Herstellern, die dieses in H ₂ Giga noch nicht vollzogen haben (sofern noch nicht erfolgt)	Eliminieren der Handarbeit insbesondere für qualitätsrelevante Schritte der Herstellung, Reproduzierbarkeit verbessern	hoch	hoch
Produktionstechnik	Scale-up der Herstellung von Katalysatoren und Beschichtungstechnologien (CCM): Verständnis der Herstellparameter-Eigenschafts-Beziehungen weiter verbessern	Herstellung von CCMs ist sehr empfindlich gegen Herstellparameter, Übertragung der Laborergebnisse auf große Maßstäbe oft nicht möglich. (unterschiedlicher Stand der Technik bei den Partnern)	hoch	hoch
Produktionstechnik	Hochratenfähige Qualitätssicherung von Komponenten und Stacks, H ₂ -sparende Qualitätssicherung der Stacks (beides sofern noch nicht erfolgt)	Sicherstellen von Produktversprechen, Kundenvertrauen, hohe Qualität MADE IN GERMANY sichern	hoch	hoch
Betrieb	Erforschung von <i>Health-Monitoring</i> -Methoden inkl. <i>Predictive Maintenance</i> für den Elektrolyseur (in industriellem Maßstab)	Automatisierung der Betriebsüberwachung für den industriellen Maßstab etablieren, angepasste Wartungs- und Instandsetzungsaktivitäten	hoch	hoch
Betrieb	Identifizierung von Degradationsmechanismen im Elektrolyseur im industriellen Maßstab und im realen Betrieb	Betriebsoptimierung hinsichtlich Lebensdauer: Intensive Vorarbeiten zu Degradationsmechanismen vorhanden, aber Ergänzung durch Untersuchungen an real großen Systemen und unter realen Bedingungen mit realen Störgrößen erforderlich (viele, aber nicht alles ist auf große Systeme übertragbar)	hoch	hoch
Lebensdauer Komponenten	Weitere anwendungsnahe Entwicklung von ex-situ life-time-Charakterisierungsmethoden von Komponenten, inklusive beschleunigte Alterungstests, insbesondere auch für große Zellen oder Stacks	Quantifizierung von Toleranzkennfeldern, Kenntnis der kritischen Grenzen der Herstellparameter und Materialeigenschaften, Vermeiden von Over-Engineering	mittel	hoch
Lebensdauer Komponenten	Untersuchung des Einflusses der Wasserqualität auf Lebensdauer	Kenntnis der Anforderungen an das Wasser, Vermeiden von Degradation	hoch	hoch
Recycling, Wiederverwendung	Technologien für automatisiertes Stack-Disassembling (sofern noch nicht erfolgt)	Essenziell für Kreislaufwirtschaft	mittel	hoch

Tabelle 6.3: F&E-Bedarfe PEM-Elektrolyse in Cluster eingeteilt (Schriftfarbe Schwarz: Forschungsthema, Schriftfarbe Grün: Entwicklungsthema)

6.3 F&E-Bedarfe: Hochtemperatur-Elektrolyse

Während die Funktion der HTEL in den letzten Jahren bei verschiedenen Herstellern in Kurzzeit- und Langzeittests verifiziert wurde, nennen Forschende und Entwickelnde aktuell als wichtige Forschungsthemen die Robustheit im Betrieb und die Herstellung der Komponenten für größere Zellflächen. Neben noch zu lösenden technologischen Herausforderungen (Stabilität, Lebensdauer) ist auch die Kostenreduktion ein wichtiges Thema. In Tabelle 6.4 sind die Forschungsbedarfe, die adressiert werden sollten, gesammelt. Insgesamt wurden 103 Forschungsbedarfe eingereicht. Einige bauen auf Ergebnissen und Entwicklungen aus H₂Giga auf, andere sind aufgrund des aktuellen Entwicklungsstandes und neuer Anforderungen hinzugekommen. Der Impact zu den Zielen der NWS wird als langfristig eingeordnet, was im Allgemeinen auf den technologischen Reifegrad der Technologie zurückzuführen ist. Vielen der genannten Themen wird allerdings eine hohe Relevanz in Bezug auf die Weiterentwicklung der Hochtemperatur-Elektrolyse und ihrer technologischen Reife zugeschrieben.

Um die technologische Reife und Langzeitstabilität perspektivisch zu erhöhen, umfasst der Cluster Materialien Forschungsbedarfe u.a. zu alternativen Elektrodenmaterialien.

Dies beinhaltet die Entwicklung keramischer Elektroden, und Elektrolyte mit höherer Leitfähigkeit, aber auch die Weiterentwicklung von Werkstoffmodellierung und -charakterisierung. Prozess-Struktur-Eigenschafts-Korrelationen sollen aufgedeckt werden, um Lebensdauern vorherzusagen, Verschleiß zu reduzieren und Schädigungsmechanismen aufzuklären.

Zellen, Bipolarplatten und Stacks müssen in Richtung der Zielparame-ter (siehe KPIs in Kapitel 5) weiter optimiert werden. Dabei gilt es insbesondere, die Zellfläche bei gleicher Leistungsdichte und Stabilität weiter zu vergrößern. Eine weitere Erhöhung der Modul-/Systemgröße hin zu kommerziellen Anlagen im GW-Maßstab ist aktuell ein wichtiger Entwicklungsschritt der HTEL. Dafür muss das Design in Bezug auf Kosten und Fertigung optimiert und auch ein *Design for Maintenance* und *Design for Recycling* mitgedacht werden. Bei der Produktionstechnik rückt somit das Thema Herstellen und das Handling und mechanische Festigkeit/Stabilität dünner Materialien in großen Formaten in den Fokus. Um Herstellkosten zu reduzieren und die Produktionsqualität weiter zu steigern, muss die Skalierung der HTEL-Stackfertigung vorangetrieben werden. Konkret ließe sich hier der Automatisierungsgrad an einer Vielzahl von Prozessschritten erhöhen.

Cluster	Thema, Aufgabenstellung: Was wird gebraucht, was fehlt noch?	Begründung: Warum erforderlich zum Erreichen der Ziele der NWS?	Impact bis 2030	Impact bis 2045
Material	Weiterentwicklung von Werkstoffmodellierung und Werkstoffcharakterisierung neuer Materialien	Unterstützt systematische Entwicklung für mehr Leistung und v.a. Langzeitstabilität	mittel	hoch
Material	Entwicklung keramischer Elektroden für Wasser-/Dampfelektrolyse und CO ₂ -Coelektrolyse	Erhöhung für Langzeitstabilität, langzeitstabile CO ₂ - und Coelektrolyse	mittel	hoch
Design	Weiterentwicklung von Zellen, Stacks und Bipolarplatten	Lebensdauer signifikant erhöhen, Dampfnutzungsgrad erhöhen und somit Effizienz der Stromnutzung erhöhen & Kosten senken	mittel	mittel
Design und Produktionstechnik	Kosten- und fertigungsoptimiertes Stackdesign (weiter-) entwickeln, Handling von dünnen Materialien in großen Formaten möglich machen	Ziel sind großformatige Zellen, Beitrag zu NWS-Zielen durch sehr hohe Effizienz in passender Umgebung mit Wärmenutzung	mittel bis hoch	hoch
Betrieb	Robustheit des Stacks gegenüber Druckschwankungen und Ermöglichung des druckaufgeladenen Betriebs mit Druckdifferenz über die Zelle, Einfluss Betriebsbedingungen auf die Langzeitdegradation/Stackversagen, Einfluss Kontaminanten auf Langzeitdegradation	Robuster Stack kann das umgebende System vereinfachen und somit Kosten senken	mittel bis hoch	hoch
Lebensdauer Komponenten	Degradationsmechanismen unter hohen Stromdichten (>1 A/cm ²), Prüfungen von Elektrolyten und Zelle (z.B. thermomechanische Prüfungen u.ä.)	Verbesserung von Lebensdauerprognosen und Prüfungen unter realitätsnahen Betriebsbedingungen (Senkung CAPEX)	mittel bis hoch	hoch
Recycling und Wiederverwendung	<i>Design for Recycling</i> : Dismantling, Trennung der Komponenten, Recycling in der Produktion	Automatisierung des <i>Disassembling</i> ist erforderlich für industriellen Maßstab, Rückgewinnung seltener Erden, Minimierung des Ausschusses bei der Fertigung	mittel	hoch

Tabelle 6.4: Forschungsbedarfe HTEL in Cluster eingeteilt

Zusätzlich müssen Qualitätssicherungsmaßnahmen (u.a. zum Ausrichten beim Stapeln und Qualifizierung des Stapelergebnisses) – auch für die Fertigung größerer Stacks (mehr Ebenen) – entwickelt und eingeführt werden. Der druckaufgeladene Betrieb ist aktuell noch nicht umsetzbar, da Schwankungen des Transmembranendrucks (Zelle) und des Differenzdrucks Stack/Manifolds noch nicht bewältigt sind. Im aktuellen Stadium ist es außerdem wichtig, Langzeitbetriebserfahrungen (Betriebsverhalten und Lebensdauer) im Realbetrieb zu sammeln. Neben der Optimierung der Systemkonzepte und Betriebsstrategien werden Themen der Betriebsüberwachung und Anlagensicherheit relevant. Auch kommt die neue Anforderung der netz- und systemdienlichen Betriebsführung hinzu. Degradationsbestimmende Mechanismen in unterschiedlichen Betriebs- und *state-of-health*-Zuständen müssen ermittelt werden.

Hierzu gibt es mehrere, auch kombinierte Ansätze von fortschrittlichen Charakterisierungsmethoden und Leistungsüberwachung bis hin zur Modellierung und Simulation. Zur Verbesserung von Lebensdauerprognosen und Prüfungen unter realitätsnahen Betriebsbedingungen werden konkret thermomechanische Prüfungen von Elektrolyten und der Zelle bis 850 °C, auch in Wasserstoff/Wasserdampf-Atmosphäre, genannt. Nachdem erste Anlagen in Anwendungsumgebung in Betrieb gegangen sind, gewinnt jetzt das Thema Recycling an Bedeutung. Um Herstell- und Recyclingkosten zu senken, ließen sich Komponenten gegebenenfalls aufarbeiten und wiederverwenden. Eine mögliche Trennung der Komponenten sollte bereits in der Designentwicklung mitgedacht werden.

6.4 F&E-Bedarfe: AEM-Elektrolyse

Die noch junge AEM-Elektrolysetechnologie wurde in den vergangenen Jahren in kleinen Stacks (kW-Bereich) erfolgreich validiert. Die Technologie muss jetzt den Sprung vom Laborbetrieb zum großtechnischen Maßstab nehmen. Es ist einzelnen Herstellern bereits gelungen, die Technologie in die nächstgrößere Leistungsklasse (MW-Bereich) zu bringen und die Langzeitstabilität nachzuweisen. Jedoch sind noch viele, teilweise auch grundlegende Fragen offen, z.B. Struktur-Eigenschaftsbeziehungen des Zelldesigns und der Materialien. Insgesamt wurden 70 Forschungsthemen für die AEM-Elektrolyse genannt, die alle der ‚Forschung‘ zugeordnet wurden. Der Impact für 2030 wurde zum Zeitpunkt der Ermittlung der F&E-Bedarfe noch als niedrig bis mittel eingeschätzt, da ein Durchbruch der AEM-Elektrolysetechnologie und damit ihr Beitrag zu den Zielen der NWS erst zu einem späteren Zeitpunkt (ab 2035) erwartet wurden. Obwohl die Entwicklungsstände noch sehr unterschiedlich sind und aktuell erste AEM-Elektrolysestacks vor dem Markteintritt stehen, wird sich in den kommenden Jahren zeigen, welches Potenzial die AEM-Elektrolysetechnologie langfristig haben wird.

Um kostengünstige Elektrolysesysteme mit hoher Performance, Stabilität und Lebensdauer zu ermöglichen, bedarf es weiterhin der (Grundlagen-)Forschung an neuartigen Katalysatormaterialien für die nächste Generation von PGM-freien AEM-Elektrolyseuren.

Cluster	Thema, Aufgabenstellung: Was wird gebraucht, was fehlt noch?	Begründung: Warum erforderlich zum Erreichen der Ziele der NWS?	Impact bis 2030	Impact bis 2045
Material	Forschung und Entwicklung für Verbesserung von AEM-Elektrolyse-Katalysatoren (Anode und Kathode)	Bessere Leistung und Stabilität, tieferes Verständnis der Prozesse, um technologische Reife zu erhöhen	niedrig	hoch
Design	Entwicklung größerer Stacks (größere Zellflächen), Entwicklung Zelldesigns für große Flächen inkl. Materialentwicklung	Hochskalierung der Technologie, um in NWS-relevante Leistungsbereiche zu gelangen	mittel	hoch
Produktionstechnik	Technologien für Automatisierung der Produktionsanlagen ggf. unter Nutzung vorhandener PEM-Elektrolyse Prozesse	Ggf. aufbauend auf PEM-Elektrolyse Erfahrung bei der Entwicklung einer industriellen AEM-Elektrolyseur-Produktion	niedrig	hoch
Betrieb	Aufbau und Langzeituntersuchung von Stacks bzw. Anlagen im Pilotmaßstab	Tieferes Verständnis Langzeitstabilität und Leistung durch verbesserte Überwachung der Systeme und Sammlung von Erfahrungen	mittel	hoch
Lebensdauer Komponenten	Langzeittests und beschleunigte Alterungstests mit Abgleich zu standardisierten Lebensdauerprüfung, Defektlokalisierung	Langzeitstabilität und Betriebsstabilität sicherstellen und verbessern	mittel	hoch
Lebensdauer Komponenten	Weiterentwicklung von AEM-Membrantechnologie hinsichtlich Langlebigkeit, Druckbeständigkeit und Performance	Erhöhung der technologischen Reife durch Verbesserung von Materialeigenschaften	mittel	hoch
Lebensdauer Komponenten	Untersuchung von Kontaminationseffekten im Kreislaufwasser	Zuverlässigkeit sicherstellen und erhöhen sowie Degradation durch Kontamination verstehen	mittel	hoch

Tabelle 6.5: Forschungsbedarfe AEM-Elektrolyse in Cluster eingeteilt

Bei der Verbesserung und Weiterentwicklung der AEM-Elektrolyse Katalysatoren (Anode und Kathode) könnte auch das Wissen aus der AEL transferiert werden. Die Hochskalierung zu größeren Zellflächen, die für einen industriellen Maßstab essenziell ist, ist aktuell besonders relevant. Dazu kommen die Weiterentwicklung und Optimierung der Membran hinsichtlich Langlebigkeit, Druckbeständigkeit und Performance und die direkte Katalysator-Beschichtung. Fertigungstechnologien für die Automatisierung der Produktion von MEA und Stack müssen (weiter) erforscht und entwickelt werden. Hierbei könnte man sich gegebenenfalls das Wissen aus der PEM-Elektrolyse zu Nutze machen.

Weiterhin ist der Aufbau und die Langzeitvalidierung von Pilotanlagen inklusive Konditionierung des Stacks, Stack- und Modulmonitoring zur Betriebsüberwachung und das Sammeln von Erfahrung durch längere Betriebszeiten und bei dynamischem Betrieb erforderlich. Außerdem muss ein Wartungs- und Instandhaltungsmonitoring integriert werden. Wenn möglich, können in Betrieb befindliche Anlagen in diese Arbeiten einbezogen werden. Weitere Erfahrungen können durch Langzeittests und beschleunigte Alterungstests mit Abgleich zu standardisierten Lebensdauerprüfung und Erhöhung des Messdurchsatzes gesammelt werden. Die Ergebnisse können der Untersuchung von Effizienz-Verlusten durch Einfahren, Degradationsmechanismen, Lokalisierung von Defekten, Optimierung von Bestandteilen und dem Einfluss von *shunt currents* dienen.

Das Recycling von AEM-Elektrolyseuren wurde aktuell noch nicht betrachtet, sodass hier zunächst grundlegende Fragestellungen erörtert werden müssten. Rund um die Membran und Alterungsaspekte sowie in der Metallurgie werden vielfältige Themen gesehen. Auch die Aufbereitung des Elektrolyten (KOH) ist von Interesse. Aufgrund des noch nicht konkreten Bedarfs wurde das Thema Recycling in der Tabelle nicht berücksichtigt.

6.5 F&E-Bedarfe: Übergreifende Themen

Insgesamt listen die übergreifenden F&E-Bedarfe 91 Punkte. Ein Teil der Themen wurden erstmalig für eine der vier Technologien formuliert. Da diese allerdings als nicht-technologiespezifisch identifiziert wurden, sind sie entsprechend in die übergreifende Kategorie verschoben worden. Sie lassen sich den vordefinierten Clustern Produktionstechnik, Betrieb, Lebensdauer Komponenten und Recycling zuordnen, greifen aber auch weiterführende Aspekte wie die Interaktion mit Wasser und Strom, regulatorische Rahmenbedingungen, Logistik, Standardisierung und Modularisierung, Geschäftsmodelle sowie Aus- und Weiterbildung auf.

Das Kernteam beschränkte sich für die tabellarische Darstellung und Priorisierung auf die folgenden vier Cluster: Wasser, Interaktion mit dem Stromnetz, regulatorische Rahmenbedingungen sowie Technologien und Konzepte für Recycling und Wiederverwendung.

Darüber hinaus wurden weitere Punkte mit hohem Impact (für 2030) eingestuft, die herstellerübergreifend zutreffen: die Standardisierung der Industrieprozesse entlang der Wertschöpfungskette, die Einbindung in die Prozessleittechnik (inklusive Festlegung von Kommunikations- und Datenstandards), die Entwicklung von Standardmodulen für verschiedene Stack-Hersteller und Technologien sowie eine Standardisierung auf Komponentenebene. Weiterführend muss eine nachhaltige Verknüpfung der Sektoren Strom, Gas und Wärme unter Nutzung der Nebenprodukte Wärme und Sauerstoff mitgedacht werden. Im Rahmen der 2023 durchgeführten Experteninterviews wurde auch zum Thema Standardisierung befragt. Zum damaligen Zeitpunkt definierten die Projekte die individuellen Anforderungen (u.a. Infrastruktur, Netzfrequenz etc.), sodass Standardisierung als schwierig bis hinderlich angesehen wurde. Allerdings wären standardisierte Schnittstellen zu Strom, Wasser und Wasserstoff durchaus wünschenswert. Außerdem könnte eine Standardisierung der Schnittstellen zur Leistungselektronik in Bezug auf Sicherheit und Anlagenüberwachung angestrebt werden. Eine Aufnahme von Stacks in die Druckgeräterichtlinie wäre wünschenswert, da dies die Einordnung erforderlicher Sicherheitseinrichtungen für die Prüfung von Inbetriebnahme (PvI) durch die zuständige Überwachungsstelle ZÜS erleichtern würde.

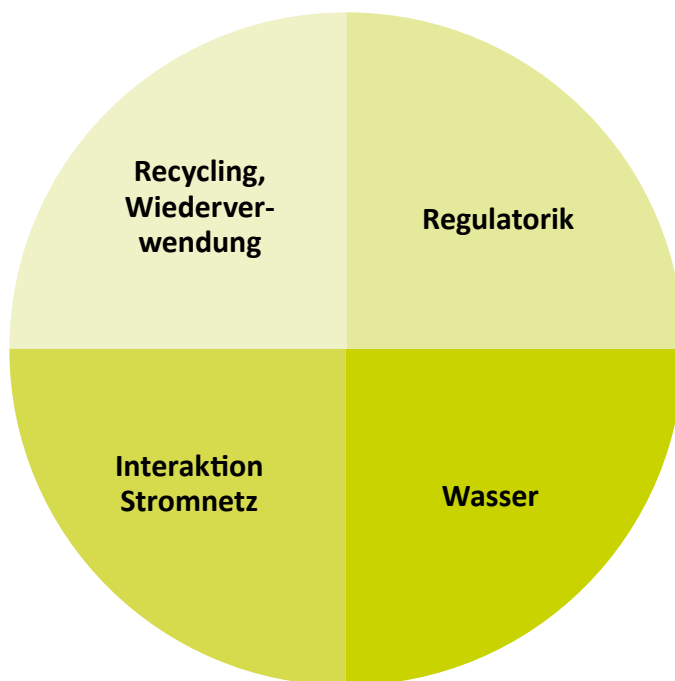


Abbildung 6.2: Übersicht der übergreifenden Forschungsthemen

Eines der nicht-technischen Themen ist hier die permanente regulatorische Evaluierung der Rechtslagen (Deutschland, EU und Global) und damit verbunden, soweit möglich und sinnvoll, ein Transfer der regulatorischen Rahmenbedingungen und technischen Anforderungen an den Elektrolyseur. Hier wäre es hilfreich, Synergien

und Transparenz zu schaffen, um Industrie und Wissenschaft diese Informationen zur Verfügung zu stellen und Mehrfacharbeit zu vermeiden. Beispielsweise scheinen die Regeln für die erforderliche Sicherheitsausrüstung von Elektrolysesystemen für das Inverkehrbringen in Europa nach einzelnen Erfahrungen trotz CE-Zertifizierung noch nicht einheitlich festgelegt zu sein und bringen teils umfangreiche Nacharbeiten mit sich. Neben den technischen Anforderungen wäre auch eine kontinuierliche Evaluierung von Nachhaltigkeitsaspekten (Nachhaltigkeitsevaluation/CO₂-Fußabdruck) sinnvoll und notwendig.

Weitere wichtige Themen sind die Schnittstellen zu den versorgenden Medien, Strom und Wasser, die bereits auch mit den H₂Giga-Projekten HyLeIT und FluCoM adressiert wurden. In letztgenanntem Projekt wurden Prozesswasserqualitäten und Kontaminationen aus dem Elektrolyseurbetrieb und deren Auswirkungen auf die Effektivität der Reinigungssysteme untersucht. Aktuell rückt eine Untersuchung und Bewertung des Einflusses der Wasseraufbereitungsqualität auf die Degradation (jeweils technologiespezifisch) in den Fokus. Darüber hinaus fehlen Konzepte zur Optimierung der Wasseraufbereitung (u.a. in ariden Regionen) sowie zur Nutzung von Synergien zu Systemen mit hinreichender Wasserqualität als Nebenprodukt. Zusätzlich könnten Lebenszyklusbetrachtungen in der Wasseraufbereitung und Verfahrenstechnik (basierend auf Brauchwasser), Wasserversorgung und Entsorgung, Nutzung der Abwärme der Elektrolyse zur Wasseraufbereitung in Deutsch-

land und global (an ariden Orten) hilfreich sein. Angestoßen wird außerdem eine Qualifizierung von Komponenten und Materialien von Elektrolyseuren und BoP-Komponenten hinsichtlich Kontamination des Betriebswassers.

Um eine Integration von Elektrolyseanlagen bestmöglich in das Energiesystem sicherzustellen, werden (neue) Anlagen- und Systemkonzepte erforderlich. Auch die Sektorenkopplung sowie Betriebs- und Regelungsstrategien rücken in den Fokus, da die Verbindung des Wasserstoffsektors mit dem Strom- und Wärmesektor ein wichtiger Baustein zur Transformation des Energiesystems darstellt. Hierzu kann auf Ergebnissen des H₂Giga-Projekts SYSTOGEN100 aufgebaut werden, das sich mit der Orchestrierung von Energiesystemen mit Elektrolyseuren beschäftigt. Insbesondere ist der system- und netzdienliche Betrieb eine zusätzliche Anforderung, die adressiert werden muss.

Das H₂Giga-Projekt IntegrH2ate hatte die übergeordnete Anlagensteuerung von Elektrolyseur und Wärmepumpe unter Berücksichtigung flexibler Anwendungsszenarien für Wärme- und Stromnetz betrachtet, um die Wirtschaftlichkeit von Elektrolyseuren durch nachhaltige Nutzung der Nebenprodukte zu erhöhen. Die Verknüpfung von Strom-, Wärme- und Gassektor ist ein wesentlicher Aspekt für das weitere Fortschreiten der Energiewende, für den die Elektrolyse einen wichtigen Baustein darstellt. Somit ist es von hoher Bedeutung, die Technologien zur sektorenübergreifen-

Cluster	Thema, Aufgabenstellung: Was wird gebraucht, was fehlt noch?	Begründung: Warum erforderlich zum Erreichen der Ziele der NWS?	Impact bis 2030	Impact bis 2045
Regulatorik	Permanente regulatorische Evaluierung der Rechtslagen (Deutschland, EU, Global) und entsprechende Hinweise zu bottlenecks und Änderungsbedarfen	Unterstützung der Hersteller und Zulieferer mit Informationen (Synergien schaffen)	mittel	mittel
Wasser	Untersuchung und Bewertung des Einflusses der Wasseraufbereitungsqualität auf die Degradation (jeweils technologiespezifisch)	Erhöhung der Lebensdauer, der Systemeffizienz und Rentabilität	hoch	hoch
Wasser	Untersuchung und Quantifizierung der Synergiepotenziale zur Wassernutzung- und Aufbereitung aus benachbarten Prozessen z.B. Kläranlagen in Verbindung mit der Sauerstoffnutzung aus der Elektrolyse	Einsparung der Trinkwasserbedarfe bei der Elektrolyse	hoch	hoch
Interaktion Stromnetz	(Neue) Anlagen- und Systemkonzepte, Sektorenkopplung inkl. Betriebs- und Regelungsstrategien.	Ziel: intelligente und bestmögliche Integration von Elektrolyseanlagen in das Energiesystem (unter Nutzung der Nebenprodukte Wärme und Sauerstoff)	hoch	hoch
Recycling, Wiederverwendung	Rohstoffbedarfsanalyse für die Wasserstoffwirtschaft, inklusive Wasser	Transparenz über Rohstoffbedarfe im industriellen Maßstab, Wasserbedarfe und NaCl einbeziehen	hoch	hoch
Recycling, Wiederverwendung	Digitalisierung der gesamten Wertschöpfungskette: Elektrolyseur-Produktpass (ggf. als Teil eines Recycling-Projekts)	Ausrollen eines digitalen Produktpass für Elektrolyseurkomponenten, Vorteile eines Materialpasses hinsichtlich kritischer Rohstoffe	hoch	hoch

Tabelle 6.6: Aufführung der wichtigsten Forschungs- und Entwicklungsthemen zu übergreifenden Themen
(Schriftfarbe Schwarz: Forschungsthema, Schriftfarbe Grün: Entwicklungsthema oder nicht-technisches Thema)

den Integration von Elektrolyseuren in den Bereichen Peripherie, Schnittstellen, Betriebsführung, übergeordnete Anlagensteuerung, Modularisierung und Standardisierung weiterzuentwickeln, zu erproben und zu skalieren.

Mit den Zielen zum Aufbau der Elektrolyseleistung in Deutschland geht ein enormer Strombedarf einher, der zum Erreichen der erforderlichen Auslastung der Elektrolyseure nur mit einer hohen Überbauung von EE-Erzeugerkapazitäten realisierbar und wirtschaftlich sein wird. Die Klärung der Netzanschlussbedingungen und Notwendigkeiten zur Erbringung von Systemdienstleistungen sind in diesem Zusammenhang für einen stabilen Netzbetrieb unabdingbar. Das Projekt HyLeiT hatte sich bereits im Rahmen von H₂Giga mit der elektrischen Systemtechnik von Elektrolyseanlagen, schwerpunktmäßig mit der Stromrichtertechnik, auseinandergesetzt. Weiterhin müssen Komponenten für die Stromversorgung entwickelt, optimiert und skaliert werden (Gleichrichter, Transformatoren, Stromschienen und Verbindungen) bei gleichzeitiger Kostenreduktion (z.B. durch Einsatz neuer Technologien wie z.B. Siliziumcarbid-Leistungshalbleiterbauelemente).

Hersteller- und technologieübergreifend ist auch das Thema Re-Use und Recycling. Dies spielt insbesondere für kritische Rohstoffe eine bedeutende Rolle. Ein Teil der Themen wurde im Rahmen der Projekte ReNaRe und IRIDIOS adressiert. Die Rohstoffbedarfe der Wasserelektrolyse und damit der Rohstoff-Footprint für grünen Wasserstoff sollen besser verstanden, quantifiziert und transparent gemacht werden. Eine Digitalisierung entlang der gesamten Wertschöpfungskette (Digitaler Produktpass) wird aktuell bereits in anderen Branchen implementiert und wird in Zukunft auch für die Elektrolyseindustrie eine Rolle spielen.

6.6 F&E-Bedarfe: PFAS-freie Elektrolyse

Fluorierte bzw. perfluorierte Materialien werden vom Gesetzgeber zunehmend eingeschränkt, da sie aufgrund ihrer außerordentlichen chemischen Stabilität bei einem eventuellen Eintrag in die Umwelt dort als ‚Ewigkeitschemikalien‘ persistieren. Zur Klärung der Begriffe sei hier zunächst angemerkt, dass unter ‚PFAS‘ alle per- und polyfluorierten Chemikalien und Materialien verstanden werden und unter ‚PFSA‘ die auf perfluorierten Sulfonsäure-Polymeren basierenden Membranen und Ionomere für die PEM-Elektrolyse zusammengefasst sind (z.B. Nafion®). Wegen der zentralen Rolle der PFSA-Membran kommt dem Thema ‚PFAS-freie Elektrolyse‘ bei der PEM-Elektrolyse besondere Bedeutung zu. Es zeichnet sich in der Debatte ab, dass Elektrolyseure wahrscheinlich von Ausnahmeregelungen der PFAS-Verbote profitieren können. Dennoch steht das Ziel, dass ein Eintrag dieser Materialien in die Umwelt verhindert werden muss.

Daher werden parallel die Routen der Vermeidung von fluorierten Materialien als auch zur Verhinderung des Austrags bei bestehender Verwendung von fluorierten Materialien verfolgt.

Im Fall der PEM-Elektrolyse haben die Forschenden aus Wissenschaft und Industrie einhellig zurückgemeldet, dass ein fluorfreier Ersatz der PFSA-Membran aufgrund der aktuell noch geringen Langzeitstabilität zum Erreichen der kurzfristigen NWS-Ziele (z.B. Installation von heimischer Elektrolysekapazität bis 2030) nicht zielführend wäre. Allerdings könnte die Fluorfreiheit zukünftig in Bezug auf eine angestrebte deutsche Technologieführerschaft ein besonderes Alleinstellungsmerkmal darstellen. Es gibt zwar vielversprechende Ansätze mit fluorfreien Membranen, die bereits mehrere tausend Stunden (ca. 2.000 h) im Betrieb absolviert haben, aber ein ausgereiftes Material mit gesicherter chemischer Stabilität unter realen Bedingungen im industriellen Maßstab wird bis 2030 nicht zur Verfügung stehen. Dennoch besteht großer Konsens darin, an fluorfreien Alternativen zu PFSA-Membranen sowie Ionomeren weiter intensiv zu forschen. Letztere sind auch bei AEM-Elektrolyse relevant, da auch diese aktuell noch fluorierte Ionomere in der Katalysatorschicht nutzt. Im Erfolgsfall hätte die Entwicklung fluorfreier Membranen und Ionomere einen Impact auf die Zielerreichung mit Zeithorizont 2045.

Dringend empfohlen wird die Forschung an Methoden zur vollständigen Vermeidung eines Austrags an PFSA-Rückständen aus PEM-Elektrolyseuren. Das umfasst die Erforschung der entsprechenden Analytik, um den Austrag zu detektieren und zu quantifizieren, und die Erforschung von Gegenmaßnahmen, wie Filtertechnologien. Das Ziel ist, den Austrag auf Null bzw. unter die Erfassungsgrenzen zu bringen. Insbesondere für den Fall, dass in Zukunft keine für alle PEM-Elektrolyse Anwendungen sinnvolle fluorfreie Alternative zur PFSA-Membran oder deren Ionomer in der Katalysatorschicht gefunden werden kann, liegt eine Lösung in der vollständigen Vermeidung des Austrags, sodass die PEM-Elektrolyse weiterhin gefahrlos für die Umwelt betrieben werden kann. Der Ansatz verspricht einen hohen Impact, da er grundsätzlich umsetzbar ist und sich vergleichsweise schnell realisieren lässt. Dafür muss eine solide Wissensbasis bereitgestellt werden, wie z.B. Methodenentwicklung der dafür erforderlichen Analytik und F&E an Technologien zur Austragsvermeidung (z.B. Filter).

Auch außerhalb der MEA und damit auch bei anderen Elektrolysetechnologien werden in der Elektrolyse und in ihrer Vorkette fluorierte Materialien eingesetzt, z.B. in Dichtungen, Behältern oder Verbindungsstücken. Hier muss in Zukunft ebenso sondiert werden, inwiefern das Risiko eines Eintrags in die Umwelt besteht und wie dieser zuverlässig vermieden werden kann, oder ob diese Materialien durch fluorfreie Alternativen ersetzt werden können.

Thema, Aufgabenstellung: Was wird gebraucht, was fehlt noch?	Begründung: Warum erforderlich zum Erreichen der Ziele der NWS?	Impact bis 2030	Impact bis 2045
PFAS-freie PEM-Materialien und -Verstärkung entwickeln, Optimierung auf Lebensdauer (Oxidationsstabilität)	Langzeitstabile PEM-Elektrolyse ohne PFAS-Membran	niedrig	mittel
PFAS-freie Ionomere für PEM-Katalysatorschicht entwickeln	Ionenleitfähige PEM-Katalysatorschicht ohne PFAS	niedrig	mittel
PFAS-freie Zellkomponenten außerhalb der MEA entwickeln (Dichtungen, Beschichtungen), alle Elektrolysetechnologien	Wenn regulatorisch erforderlich, Ersatz für fluoridierte Dichtungen und weitere Materialien finden	niedrig	mittel
Untersuchung des möglichen PFAS-Austrags aus dem PEM-Elektrolyseur	Objektive Daten zum Eintrag in die Umwelt, Mitigationskonzepte entwickeln. Ziel: darstellen, ob und wie Eintrag zu 100 % ausgeschlossen werden kann	hoch	hoch

Tabelle 6.7: Wichtigste Forschungsthemen für den Umgang mit PFAS-Materialien und deren Ersatz in der Elektrolyse

Die deutsche Elektrolyseindustrie hat noch erheblichen F&E-Bedarf, um die angestrebten Zielkennwerte (bis 2030) zu erreichen. Das Wasserstoff-Leitprojekt H₂Giga hat eine solide Basis für eine Elektrolyse im industriellen Maßstab gelegt. Deutscher Stakeholder aus Wissenschaft und Industrie stellten offene Forschungsfragen zusammen, die für den Wasserstoffhochlauf noch gelöst werden müssen. Ein wichtiger Aspekt bildet dabei das Verständnis von grundlegenden Prozessen an großen Systemen, da nicht alle Erkenntnisse von der Laborzelle in den MW-Stack übertragbar sind. Auch das Sammeln von Betriebserfahrung großer Systeme in Kombination mit Erforschung der Vorgänge in Stack und System schließen sich an die Forschungsergebnisse von H₂Giga an und bauen darauf auf.

Wünschenswert ist hier eine Zusammenarbeit von Wissenschaft und Industrie, auch im Rahmen der Umsetzung, um Betriebserfahrung auf allen Ebenen zu sammeln und gleichzeitig grundlegendes Verständnis zu generieren. Auch eine Integration der Elektrolyse ins Stromnetz, inklusive der Folgen auf Zell- und Stackebene, muss untersucht und besser verstanden werden. Digitale Technologien und KI-Methoden sollten entwickelt und implementiert werden, um den Zustand der Kernkomponenten, Wartungserfordernisse und die Gesamtorchestrierung im Energiesystem zu steuern. Insgesamt braucht die deutsche Elektrolyseindustrie für den Hochlauf der Wasserelektrolyse ein Ökosystem, in dem Wissenschaft und Industrie diesen gemeinsam voranbringen und Innovationen in die Anwendung überführen.

Technologie-Roadmap: Handlungsempfehlungen für die Weiterentwicklung der Wasser- elektrolyse für den GW-Maßstab

Die Serienfertigung von effizienten, langlebigen, günstigen und skalierbaren Elektrolyseuren ist unabdingbar, um die Verfügbarkeit von CO₂-armem Wasserstoff durch heimische Elektrolysekapazität und Importe sowie die Leitanbieterposition entlang der gesamten Wertschöpfungskette von Wasserstofftechnologie sicherzustellen. Die Projekte des Wasserstoff-Leitprojekts H₂Giga trieben während ihrer Laufzeit von 2021 bis 2025 die Erforschung und Entwicklung von Technologien für die Hochskalierung und Serienfertigung von Elektrolyseuren voran (siehe Kapitel 3). H₂Giga legte somit die Voraussetzungen für eine technologische Vorreiterrolle der deutschen Elektrolyseindustrie im internationalen Vergleich (siehe Kapitel 4.2 und State of the art Germany 2024/2025 aus Kapitel 5). Der Übergang von Manufakturarbeit in die automatisierte und serielle Fertigung von Elektrolyseuren leistete einen relevanten Beitrag zur Produktionshochskalierung in Deutschland, insbesondere der technologisch reiferen Technologien AEL und PEM-Elektrolyse (siehe Kapitel 4.1).

Vor dem Hintergrund der ebenfalls gewachsenen internationalen Konkurrenz (siehe Abschnitt 4.2) besteht ein erheblicher Wettbewerbsdruck für die Hersteller von Elektrolyseuren, nicht zuletzt, weil der Wasserstoffhochlauf aktuell langsamer als erwartet verläuft (siehe auch Abschnitt 4.3). Die Hauptursache dafür sind die hohen Wasserstoffgestehungskosten, die aktuell für Grünen Wasserstoff auf 8 – 10 €/kg geschätzt werden, abhängig von Projektgröße, Standort und Strombezug. Die Stromkosten sind ein erheblicher Faktor, sodass die Elektrolyseure sowohl über ihre Umwandlungseffizienz als auch über die Investitionskosten in die Kostenstruktur eingehen. Die Effizienz ist bei vielen Herstellern bereits relativ hoch und hat auch ihre thermodynamische Grenze, sodass zwar noch ein gewisses Verbesserungspotenzial vorhanden ist, dieses aber nicht überschätzt werden sollte. Die Investitionskosten können durch automatisierte Herstellmethoden, ausgereifte Lieferketten sowie sparsamen Einsatz und effizientes Recycling teurer Rohstoffe gesenkt werden. Darüber hinaus sind wichtige, eventuell auch unterschätzte, Wettbewerbsaspekte die Zuverlässigkeit, Lebensdauer und optimierte Wartung der Elektrolyseure. Hier kann mit Forschung und Entwicklung technologisch angesetzt und ein Vorsprung

herausgearbeitet und gesichert werden, wie es im Folgenden in diesem Kapitel beschrieben wird.

Weiterhin gibt es nicht-technische Handlungsmaßnahmen, die den Hochlauf des Grünen Wasserstoffs unterstützen können. Für eine Herstellung in der EU oder in Deutschland wäre gerade in der Startphase des Hochlaufs eine pragmatische Regulatorik für den Strombezug hilfreich, die zu möglichst wenig Zusatzkosten führt. Auch zügige und digitalisierte Genehmigungsverfahren für Elektrolyseanlagen würden sich positiv auswirken.

Ein positiver business case wird im Wesentlichen durch die Verfügbarkeit von günstigem, regenerativem Strom ermöglicht. In der Anfangsphase des Hochlaufs ist es sinnvoll, für den Heimatmarkt Wasserstoff herzustellen und damit auch Betriebserfahrung unter Rea-life-Bedingungen zu sammeln, ergänzt durch Forschung an großen Systemen in ihrer realen Einsatzumgebung. Davon ausgehend zeichnet sich ab, dass ein großer Teil des Wasserstoffs mittelfristig an Standorten mit hohem Potenzial für Erneuerbaren Strom erzeugt werden wird. Dafür gilt es, ein weiterer nicht-technischer Aspekt, entsprechende internationale Beziehungen aufzubauen, die eine diversifizierte, resiliente Lieferstruktur für den Energieimport wachsen lassen. Forschungsseitig kann dieses unterstützt werden, indem mit Partnern aus späteren Energie-Lieferländern, zusammen an Wasserstoff und Elektrolyse gearbeitet wird, insbesondere an der Betriebssicherheit und am Einfluss Standort-spezifischer Bedingungen, wie Temperaturschwankungen, Wasserqualität, Feuchtigkeit und Unwetterpotenzial.

Für die aktuelle Phase des Wasserstoffhochlaufs, national oder international, werden die bereits ausgereifteren Technologien, AEL und PEM-Elektrolyse, die wesentliche Rolle spielen. Die Handlungsempfehlung für die technologische Weiterentwicklung legt hier einen besonderen Schwerpunkt auf die Betriebssicherheit und Zuverlässigkeit großer Systeme, auch als ‚De-Risking‘ bezeichnet. Kern des De-Riskings ist das Verständnis von lebensdauerrelevanten Parametern und Versagensmechanismen, auf dessen Basis solide Mitigationskonzepte gefunden werden können.

Für die neueren Technologien, HTEL und AEM-Elektrolyse, wird weitere Materialentwicklung und Hochskalierung empfohlen, um die Chancen von besonders hoher Umwandlungseffizienz (HTEL) oder Einsparen von Edelmetallkatalysatoren (AEM-Elektrolyse) wahrzunehmen. Sie werden wahrscheinlich erst in einer späteren Phase des Wasserstoffhochlaufs im großen Maßstab beitragen.

Aufbauend auf den Forschungs- und Entwicklungsbedarfen, die Partner aus Industrie und Forschung formuliert haben (siehe Kapitel 6), sollte aus technologischer Sicht auf einer mittel- bis langfristigen Zeitschiene (bis 2030 und 2045) ein Ökosystem aus Herstellern, Zulieferern und Forschungspartnern entstehen, das Wasserstofftechnologien wettbewerbsfähig, resilient und nachhaltig implementiert. Als Zielbild wäre vorstellbar, dass die Branche für den internationalen Markt effiziente, langlebige, günstige und skalierbare Elektrolyseure fertigt und vermarktet. Die Anlagen sind wartungsarm, intelligent und wichtige Komponenten sind für das Recycling geeignet. Das System erfüllt technische und ökonomische Anforderungen mit Materialien, die kostengünstig, recyclebar und nachhaltig sind. Die Elektrolyselandschaft ist vernetzt und digitalisiert. Genehmigungsverfahren sind vereinfacht und digitalisiert, und befähigen somit eine schnelle Umsetzung von Elektrolyseprojekten. Für Elektrolyseure ist Deutschland technologieführend, sowohl für den Heimatmarkt als auch für den Export, was Arbeitsplätze sichert sowie Resilienz und Autarkie schafft.

Im Folgenden werden konkrete technische Handlungsmaßnahmen auf Basis der Ergebnisse der Kapitel 3 bis 6 technologiespezifisch formuliert und dargestellt. Abschnitt 4.1 und Kapitel 5 (*State of the art Germany 2024/2025*) liefern dabei ein Gesamtbild zum Stand der Industrialisierung und Hochskalierung der jeweiligen Technologie. Die technischen und ökonomischen Ziele stammen aus Kapitel 5 (*Target 2030*). Entsprechende Handlungsmaßnahmen aus Kapitel 6 werden in konsolidierter und prägnanter Form den jeweiligen Zielen zugeordnet. Für Details wird auf Kapitel 6 verwiesen. Für das Zieljahr 2045 werden teilweise Handlungsmaßnahmen vorgeschlagen, diese müssen während der folgenden fünf Jahre (2026 – 2031) kontinuierlich evaluiert und entsprechend den rasanten Weiterentwicklungen angepasst werden.

Alkalische Elektrolyse

Ein wichtiger Treiber der AEL ist die Kostenreduktion (CAPEX und OPEX). Bis 2030 müssen Investitionskosten auf < 400 Euro/kW sinken, gleichzeitig ist die Senkung von OPEX notwendig. Zellen und Stacks sollten mit Blick auf Kosten, Performance, Lebensdauer, Degradation und Robustheit weiterentwickelt werden, um notwendige Zielspezifikationen zu erreichen. Hier lässt sich an den Elektroden (Katalysatoren), am Diaphragma und weiteren Effekten (Verringerung der parasitären Nebenströme und *Gas-Crossover*)

ansetzen. Sowohl am Anodendesign als auch an der Kathodenroute muss weitergearbeitet werden. Bei den Entwicklungen ist es wichtig, das komplexe Zusammenspiel aller Parameter zu berücksichtigen. Die Verbesserungen sollen insgesamt zur Steigerung der Umwandlungseffizienz beitragen. Genaue Zielparameter sind bei verschiedenen Herstellern und Entwicklern nicht einheitlich, aber als Referenzpunkte in der elektrochemischen Charakterisierung werden < 1,7 V bei 0,5 A/cm² oder 1,8 V bei 1 A/cm² genannt.

In Bezug auf das Elektrolysesystem gilt es, Betriebserfahrung an Großanlagen (> 100 MW) und im Langzeitbetrieb zu sammeln, sowie Auslegung und Betrieb zu optimieren. In Zukunft sollen Elektrolyseure möglichst netz- und systemdienlich betrieben werden. Daraus ergibt sich die neue Anforderung, die AEL-Anlage hinsichtlich des dynamischen Betriebs zu optimieren. Zum einen müssen Materialien der Zelle an den flexiblen Betrieb und an die Betriebspausen angepasst werden, zum anderen müssen digitale Technologien zur Anlagensteuerung und -überwachung und für die Kommunikation mit der Netzumgebung erforscht und entwickelt werden. Großskalige Testungen von AEL-Stacks befähigen dazu, degradationsbestimmende Mechanismen, auch im Wechselbetrieb, grundlegender zu verstehen, wodurch lebensdauerverlängernde Maßnahmen erarbeitet werden können. In Bezug auf die Produktion muss eine weitere Erhöhung des Automatisierungsgrades angestrebt werden. Auch Technologien für spezifische Qualitätssicherungsmaßnahmen sind erforderlich und noch nicht ausreichend vorhanden, um den Ausschuss zu verringern und somit Herstellkosten zu senken.

Grundsätzlich ist eine diversifizierte Zuliefererstruktur für jede Technologie wichtig und muss auch bei der AEL ausgebaut werden. Ein besonders kritischer Punkt ist hier die aktuelle Single Source-Situation bezüglich der Kernkomponente Diaphragma. Hier wären technologische Entwicklungen bei weiteren potenziellen Zulieferern wichtig, um dauerhaft auf mindestens zwei bis drei Anbieter zurückgreifen zu können und somit die Liefersicherheit zu erhöhen. Auch andere Materialien, wie Nickel und Stahl, müssen ressourcenbewusst eingesetzt werden und die Konstruktion recyclebar ausgelegt werden. Das Ziel ist, mit den bis 2030 erreichten Ergebnissen und Erkenntnissen eine neue Technologiegeneration zu entwickeln und eine entsprechende Fertigungskapazität für den Markt vorzubereiten. Dabei müssen auch die vielversprechenden technologischen Entwicklungen auf Laborebene (Komponenten, Verfahren, Design) in die Industrialisierung einfließen. Die AEL hat ein hohes Potenzial, große Anteile des Wasserstoffhochlaufs abzubilden, weil sie bereits als äußerst langzeitstabil verifiziert ist und ohne oder mit geringen Mengen Edelmetall auskommt, was gerade in der Situation des Rohstoffmangels und komplexer internationaler Abhängigkeiten ein großer Vorteil sein kann. Die Technologie-Roadmap der AEL ist in Abbildung 7.1 zu finden.

PEM-Elektrolyse

Auch bei der PEM-Elektrolyse bleibt die Kostenreduktion (CAPEX und OPEX) ein wichtiger Treiber. Grundsätzlich sind die CAPEX-Kosten bei einer PEM-Elektrolyse tendenziell etwas höher, auch weil teure Edelmetalle (Platin und Iridium) in den Katalysatoren enthalten sind. Es wird laufend angestrebt, insbesondere den Iridium-Anteil auf der Anode zu reduzieren, ohne damit die Leistung, Langzeitstabilität oder Widerstandskraft gegen Verunreinigungen zu beeinträchtigen. Auch hier sollte weiter geforscht werden, insbesondere im Wechselspiel zwischen Partikelgrößen, Trägereigenschaften und Benetzbarkeit bzw. Hydrophobizität der porösen Katalysatorschicht. Flankiert werden muss das allerdings von der Erforschung und Implementierung kostengünstiger Recycling-Prozesse, da die hohen Elektrolysekapazitäten für einen Wasserstoffhochlauf einen ‚Verbrauch‘ dieser Edelmetalle nicht erlauben.

Des Weiteren muss auch die Herstellung der Katalysatoren und entsprechende Beschichtungstechnologien für die Kernkomponente CCM industrialisiert werden. Im Allgemeinen muss das Design CCM auf Leistung, Lebensdauer, automatische Herstellbarkeit und Rückgewinnung der Edelmetalle hin weiterentwickelt werden. CFD-Simulationen von Komponenten-, Zell- und Stackdesign-Baugruppen können eine wissensbasierte Optimierung ermöglichen. Für Stacks und Systeme gilt es, Betriebserfahrung im industriellen Maßstab zu sammeln und digitale Lösungen zur Betriebsüberwachung weiterzuentwickeln und zu implementieren. Eine neue Anforderung, die in den Vordergrund rückt, ist die Eignung des Elektrolyseurs für den system- und netzdienlichen Betrieb. Das Verständnis von Degradationsmechanismen auf Zell- und Stackebene ist zu vertiefen. Besonders relevant sind zum aktuellen Zeitpunkt Untersuchungen von Degradationsmechanismen an großen Stacks oder Systemen, idealerweise unter anwendungsnahen Bedingungen und realer Einsatzumgebung. Wo noch nicht geschehen, muss an der weiteren Automatisierung von Produktionsschritten und an Methoden für die Qualitätskontrolle gearbeitet werden, da der Stand bei verschiedenen Stack-Herstellern unterschiedlich ist. Wie bei der AEL ist auch hier eine solide, resiliente Zuliefererstruktur ohne Single Sources wichtig. Diese sollte ausgebaut und abgesichert werden. Mit diesen Fortschritten kann die Basis für einen weiteren Produktionshochlauf von PEM-Elektrolyseuren gelegt werden. Da der Austausch von PEM-Stacks im Allgemeinen nach einer Lebenszeit von ca. 10 Jahren erforderlich ist, muss beim Stack-Design auch das Stack-Disassembling mitgedacht werden. Zwecks Ressourceneffizienz muss Iridium, aber auch Platin und Titan, einem anschließenden Recycling-Prozess zugeführt werden.

Ein weiteres Thema ist die Problematik der fluorhaltigen Membran und Ionomere der PEM-Elektrolyse (PFAS-Debatte). Daher soll mit besonderer Intensität an fluorfreien Membranen und Ionomeren für die PEM-Elektrolyse geforscht werden, mit dem

Ziel, die Leistung und Lebensdauer der Standard-PFSA-Membranen (z.B. Nafion®) zu erreichen. Es wird aber erwartet, dass diese neuen Materialien erst langfristig zur Verfügung stehen (zukünftige Elektrolyseurgenerationen). Zudem steht wegen der aggressiven Bedingungen auch ein technologisches Risiko im Raum, dass die Langzeitstabilität eventuell nicht erreicht werden kann. Das bedeutet, dass für den aktuellen Wasserstoffhochlauf zunächst die konventionellen PFSA-Membranen und Ionomere verwendet werden müssen. Demgegenüber steht die Anforderung, keine fluorierten Polymere in die Umwelt abzugeben. Hier ist dringend Forschung notwendig, den Austrag zu messen, quantifizieren und Gegenmaßnahmen zu entwickeln, und zwar für aktuelle Elektrolyseurgenerationen. Die Technologie-Roadmap der PEM wird in Abbildung 7.2 dargestellt.

Hochtemperatur-Elektrolyse

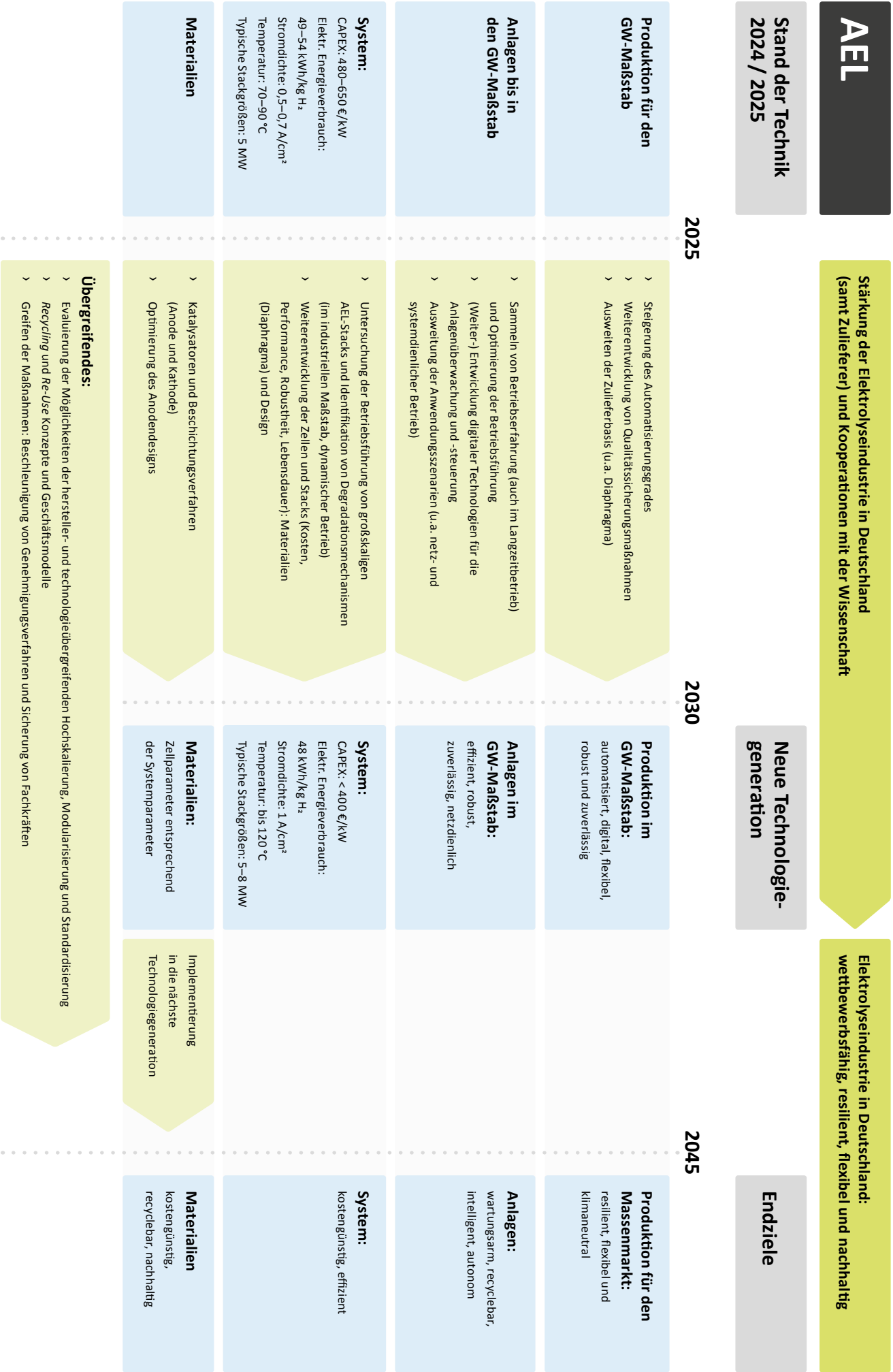
Die HTEL, wie in Abbildung 7.3 veranschaulicht, muss in den nächsten Jahren schrittweise großserientauglich erprobt werden und ihre Modul-/Systemgröße hin zu kommerziellen Anlagen im GW-Maßstab skalieren. Zellen, Bipolarplatten und Stacks müssen insbesondere in Bezug auf Kosten und Leistung sowie Lebensdauer optimiert werden. Bis zum Jahr 2030 kann ein kosten- und fertigungsoptimiertes Stackmodul etabliert werden, das mit anlagenoptimierten BoP-Komponenten ergänzt wird. Gleichzeitig muss ein *Design for Maintenance* und *Design for Recycling* mitgedacht werden. Die neue Generation der HTEL-Stacks wird sich in den nächsten Jahren in einer Langzeitvalidierung unter Beweis stellen. Es gilt außerdem, degradationsbestimmende Mechanismen in unterschiedlichen Betriebs- und state-of-health-Zuständen zu ermitteln. Der aktuelle Fortschritt ermöglicht auch eine entsprechende Produktionshochskalierung. Fabrik- und Logistikkonzepte für eine serientaugliche Produktion von HT-Elektrolyseuren können umgesetzt werden. Entwicklungsarbeit ist hierbei insbesondere in Bezug auf das Handling dünner Materialien in großen Formaten zu leisten. Die Automatisierung kann an einer Vielzahl von Prozessschritten vorangetrieben werden.

Auch die Erforschung alternativer Elektrodenmaterialien und Elektrolyte mit höherer Leitfähigkeit ist noch nicht abgeschlossen. Gleichwohl können aber auch neuartige Entwicklungen der protonenleitenden Festoxidzellen (PCC) einen Einfluss auf die HTEL haben, die heute kaum abzuschätzen, aber auf jeden Fall zu beobachten sind. Ab 2030 kann über eine weitere Steigerung des Automatisierungsgrades und die Weiterentwicklung von Qualitätssicherungsmaßnahmen nachgedacht werden. Es wird sich außerdem absehen lassen, ob sich die HTEL für einen potenziellen Massenmarkt durchsetzen wird. Immer mehr Umsetzungsprojekte werden starten, sodass Betriebserfahrung im industriellen Umfeld gesammelt werden kann. Somit rücken möglicherweise dann Themen der Betriebsführung und -optimierung in den Fokus.

Großskalige und leistungsfähigere HTEL-Stacks sollen zur Identifikation von Degradationsmechanismen hin getestet werden. Gleichzeitig müssen sich leistungsfähige Materialien perspektivisch für neue Technologiegenerationen beweisen.

AEM-Elektrolyse

Für die AEM-Elektrolyse gilt es nach wie vor, grundlagenorientierte Aufgaben zu bewältigen (siehe Abbildung 7.4). Die aktiven Zellflächen müssen hochskaliert werden, während gleichzeitig die Stromdichte von 0,6 bis 1,0 A/cm² erhöht (Zellspannung möglichst < 1,7 V) und langfristig eine Lebensdauer von idealerweise 80.000 h erreicht werden soll (Endziel). Hierzu müssen Katalysatoren verbessert werden und für die Lebensdauer ggf. auch Membranen weiterentwickelt werden. Diese neuen Materialien müssen in Langzeitvalidierung (inkl. Alterungstests) ihre Funktionalität unter Beweis stellen. Pilotanlagen sollten aufgebaut und validiert werden. Um die serientaugliche Produktionshochskalierung voranzutreiben, muss anschließend der Aufbau von automatisierten Produktionsanlagen für MEA und Stack-Herstellung erfolgen. Ab dem Jahr 2030 werden weitere Entwicklungsiterationen folgen. Mitte der 2030er Jahre kann ein *Stack of the Future* definiert sein. Dementsprechende Produktionskapazitäten sind dann aufzubauen.



PEM

Stärkung der Elektrolyseindustrie in Deutschland
(samt Zulieferer) und Kooperationen mit der Wissenschaft

Elektrolyseindustrie in Deutschland:
wettbewerbsfähig, resilient, flexibel und nachhaltig

Stand der Technik
2024 / 2025

Neue Technologie-
generation

Endziele

2025	2030	2045
Produktion für den GW-Maßstab - Steigerung des Automatisierungsgrades - Weiterentwicklung von Qualitätssicherungsmaßnahmen - Ausweiten der Zulieferbasis (u.a. CCM)	Produktion im GW-Maßstab: automatisiert, digital, flexibel, robust und zuverlässig	Produktion für den Massenmarkt: resilient, flexibel und klimaneutral
Anlagen bis im dreistelligen MW-Bereich - Sammeln von Betriebserfahrung (auch im Langzeitbetrieb) und Optimierung der Betriebsführung (Weiter-) Entwicklung digitaler Technologien für die Anlagenüberwachung und -steuerung - Ausweitung der Anwendungsszenarien (u.a. netz- und systemdienlicher Betrieb)	Anlagen im GW-Maßstab: effizient, robust, zuverlässig, netzdienlich	Anlagen: wartungsarm, recyclebar, intelligent, autonom
System: CAPEX: 700–800 €/kW Elekt. Energieverbrauch: 51–55 kWh/kg H₂ Stromdichte: 1,5–2,5 A/cm² Druck: 1–30 bar Typische Stackgrößen: 1–2 MW Lebensdauer: 10 Jahre	System: CAPEX: < 500 €/kW Elekt. Energieverbrauch: 41–48 kWh/kg H₂ Stromdichte: 3–4 A/cm² Druck: 30 bar Typische Stackgrößen: 3 MW Lebensdauer: 10 Jahre	System: kostengünstig, effizient
Materialien - Weiterentwicklung von Low-Ir-Katalysatoren - PFAS-freie Komponenten	Materialien: Zellparameter entsprechend der Systemparameter Implementierung in die nächste Technologiegeneration	Materialien kostengünstig, recyclebar, nachhaltig
Übergeordnetes: - Evaluierung der Möglichkeiten der hersteller- und technologieübergreifenden Hochskalierung, Modularisierung und Standardisierung - Recycling und Re-Use Konzepte und Geschäftsmodelle - Greifen der Maßnahmen: Beschleunigung von Genehmigungsverfahren und Sicherung von Fachkräften		

Abbildung 7.2: Technologie-Roadmap für die PEM-Elektrolyse

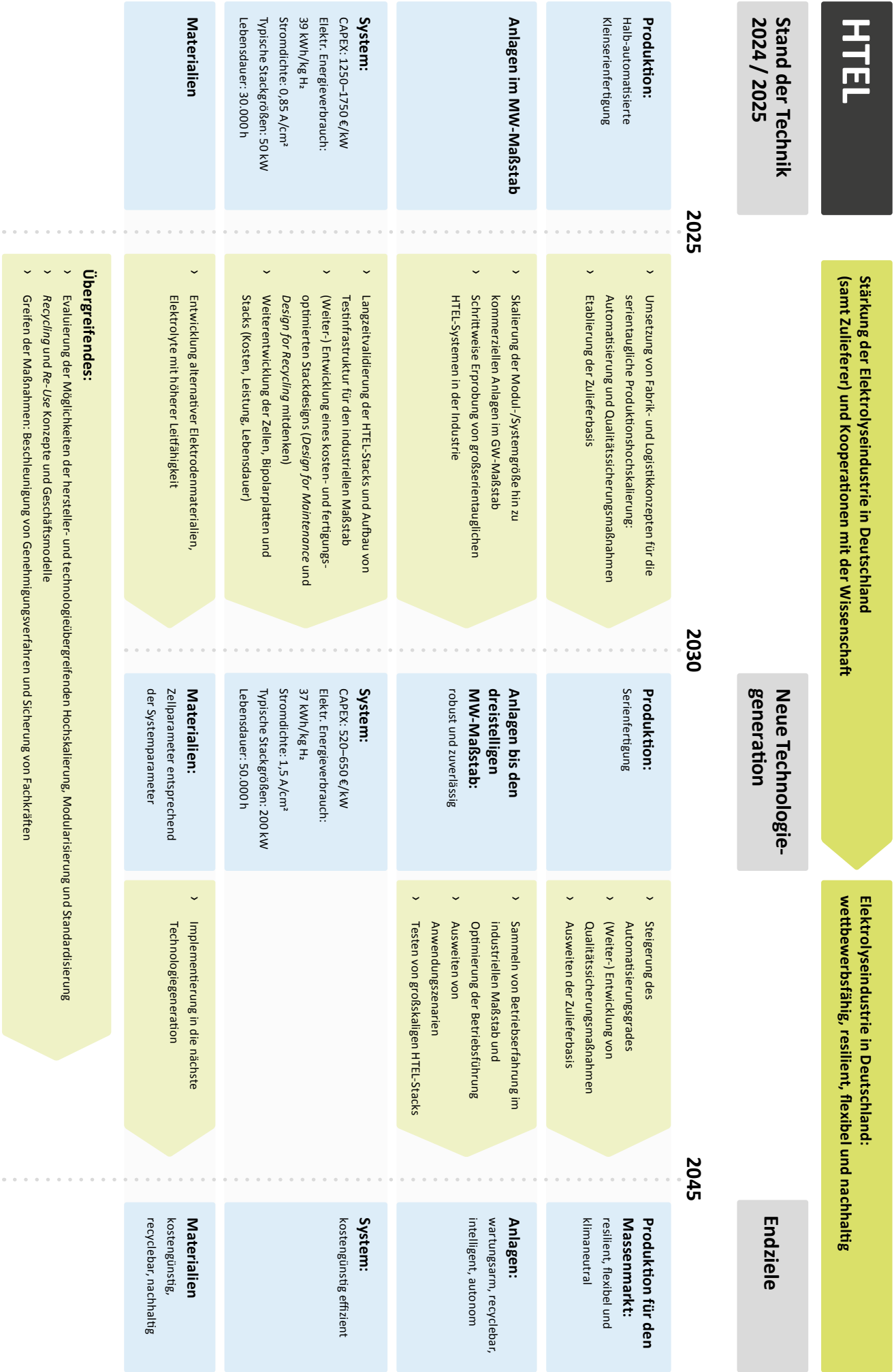


Abbildung 7.3: Technologie-Roadmap für die HTEL

Stärkung der Elektrolyseindustrie in Deutschland
(samt Zulieferer) und Kooperationen mit der Wissenschaft

Elektrolyseindustrie in Deutschland:
wettbewerbsfähig, resilient, flexibel und nachhaltig

Stand der Technik
2024 / 2025

Neue Technologie-
generation

Endziele

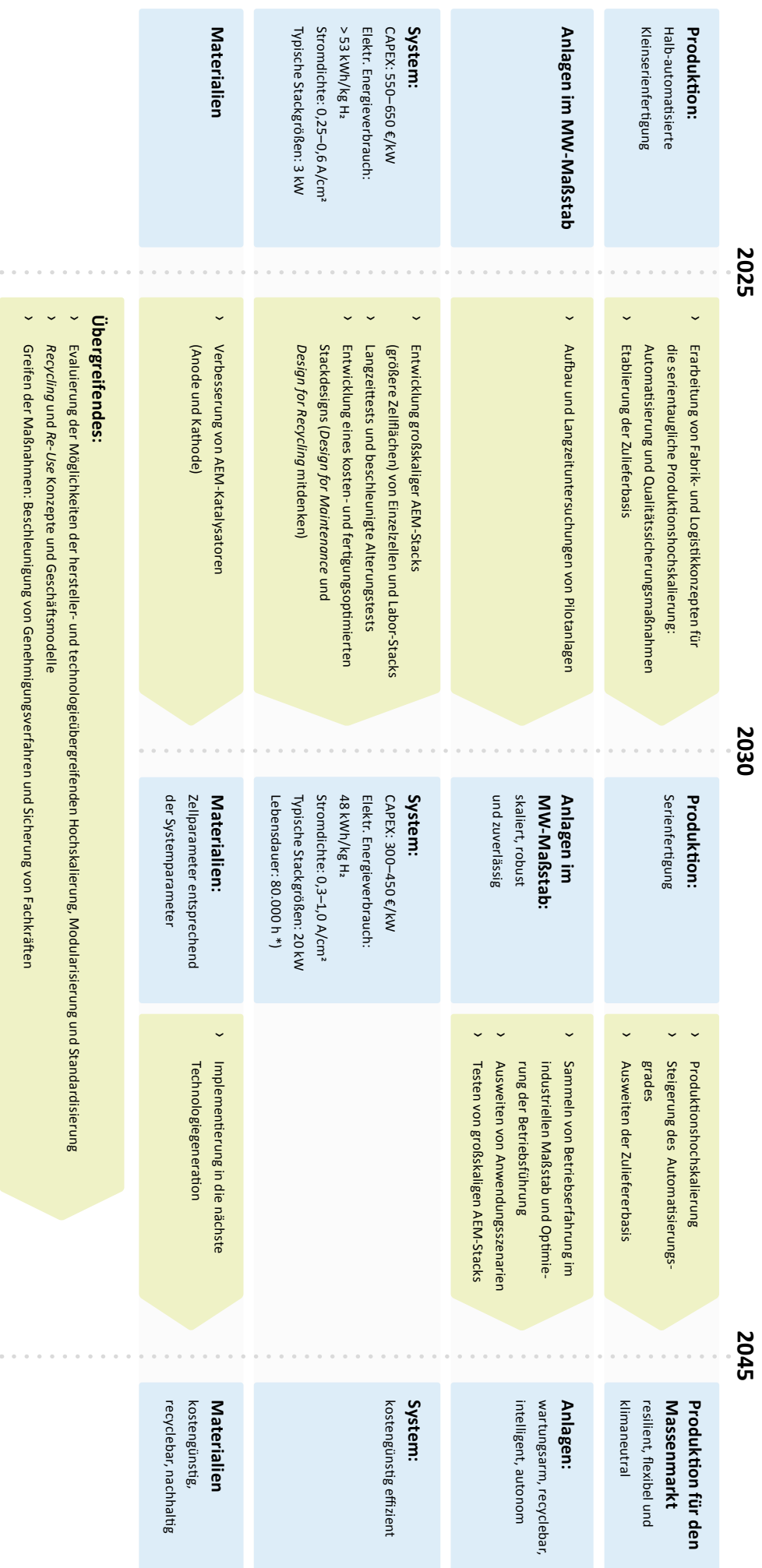


Abbildung 7.4: Technologie-Roadmap für die AEM-Elektrolyse *) Endziel

Das Wasserstoff-Leitprojekt H₂Giga stellte Technologien bereit, die den Aufbau von Elektrolysekapazität gemäß den 2023 formulierten Zielen der Nationalen Wasserstoffstrategie deutlich beschleunigen können. Auch unter Einsatz dieser Technologien wurden Fertigungskapazitäten von mehreren Gigawatt pro Jahr aufgebaut, und deutsche Hersteller haben heute weltweit eine technologisch starke Position. Bis 2030 können deutsche Hersteller kumulierte Fertigungskapazitäten von mindestens 20 Gigawatt pro Jahr bereitstellen, die im Wesentlichen durch AEL- und PEM-Elektrolyseure realisiert werden. Die Industrialisierung der Elektrolysebranche, und damit der Markthochlauf von Elektrolyseuren, hat nicht nur in Deutschland, sondern auch weltweit in den letzten drei Jahren an Geschwindigkeit zugenommen – auch vor dem Hintergrund, dass der Wasserstoffhochlauf im Jahr 2025 in Deutschland und Europa langsamer als erwartet abläuft. Die Technologie-Roadmap Elektrolyse empfiehlt für die beiden reiferen Technologien, AEL und PEM-Elektrolyse, vor allem Forschung und Entwicklung am Betrieb, insbesondere in größeren Systemen, um Verständnis und Mitigation von Degradationsmechanismen und Weiterentwicklung für den netz- und systemdienlichen Betrieb zu erreichen. Diese beiden Technologien werden den wesentlichen Teil der ersten Phase des Wasserstoffhochlaufs bedienen.

Für die neueren Technologien, HTEL und AEM-Elektrolyse, stehen weitere Hochskalierung von Herstellungsverfahren und gegebenenfalls größere Zellflächen im Vordergrund. Hier wird ein längerer Zeithorizont angenommen, aber die Chancen der besonders hohen Umwandlungseffizienz (geringerer Strombedarf/OPEX) in spezieller Einsatzumgebung (HTEL) oder der Idealfall der edelmetallfreien Membranelektrolyse (AEM-Elektrolyse) erscheinen attraktiv und sollten genutzt werden. Auch nicht-technische Handlungsempfehlungen, wie pragmatische Regulatorik und insbesondere der Aufbau internationaler Beziehungen für Wasserstoffimport bzw. Energieimport, werden genannt, da im industrialisierten Deutschland und Mitteleuropa die Strompreise überwiegend hoch sind. Für internationale Kooperationen mit Ländern, die gute Stromgestehungskostenpotenziale von Erneuerbaren Energien aufweisen, werden gemeinsame F&E-Projekte empfohlen, um die dortigen Betreiber bzw. das Forschungsumfeld in einem sicheren und störungsfreien Betrieb der deutschen Anlagen zu unterstützen.



Literaturverzeichnis

[1]	DECHEMA e.V. und acatech, „Wasserstoff-Kompass“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.wasserstoff-kompass.de
[2]	EWI & BET, „Energiewende. Effizient. Machen. – Monitoringbericht zum Start der 21. Legislaturperiode, im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie.“ 2025.
[3]	Europäischer Rat und Rat der Europäischen Union, „Pariser Klimaschutzübereinkommen“. Zugegriffen: 4. Juni 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.consilium.europa.eu/de/policies/paris-agreement-climate/
[4]	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, „Klimaschutzplan 2050 - Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/klimaschutzplan-2050.html
[5]	Bundesamt für Justiz- Kompetenzzentrum Rechtsinformationssystem des Bundes -, „Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG)“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/
[6]	Europäischer Rat und Rat der Europäischen Union, „Fit für 55“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.consilium.europa.eu/de/policies/fit-for-55/
[7]	Bundesanzeiger Verlag GmbH, „Erstes Gesetz zur Änderung des Bundes-Klimaschutzgesetzes“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBl&start=//%5b@attr_id=%27bgbl121s3905.pdf%27%5d#_bgbl__%2F%2F%5B%40attr_id%3D%27bgbl121s3905.pdf%27%5D__1734445422728
[8]	M. Wappler, D. Unguder, X. Lu, H. Ohlmeyer, H. Teschke, und W. Lueke, „Building the green hydrogen market – Current state and outlook on green hydrogen demand and electrolyzer manufacturing“, International Journal of Hydrogen Energy, Bd. 47, Nr. 79, S. 33551–33570, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.07.253.
[9]	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), „Die Nationale Wasserstoffstrategie“. Juni 2020.
[10]	Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), „Ideenwettbewerb, Wasserstoffrepublik Deutschland“. [Online]. Zugegriffen: 4. Juni 2025. Verfügbar unter: https://www.fona.de/de/massnahmen/foerdermassnahmen/ideenwettbewerb_wasserstoffrepublik_gruner_H2.php
[11]	Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR), „Wasserstoff-Leitprojekte“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/
[12]	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), „Fortanschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie“. Juli 2023.
[13]	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), „Importstrategie für Wasserstoff und Wasserstoffderivate“. Juli 2024.
[14]	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE), „Klimaneutral werden – wettbewerbsfähig bleiben“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Dossier/klimaneutral-werden-wettbewerbsfaehig-bleiben.html
[15]	DECHEMA e.V., „Das Wasserstoff-Leitprojekt H ₂ Giga Wasserelektrolyse für Grünen Wasserstoff im Gigawatt-Maßstab“. Zugegriffen: 28. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/lw_resource/datapool/systemfiles/elements/files/05C4AF0039AB2C08E0637E695E863F24/current/document/H2Giga_Projektbroesch%C3%BCre.pdf
[16]	Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt; Referat F22: „Energie; Wasserstofftechnologien“, „Wie das Leitprojekt H ₂ Giga Elektrolyseure zur Wasserstoff-Herstellung in die Serienfertigung bringen will“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/leitprojekte/h2giga
[17]	A. Buttler und H. Spliethoff, „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, Bd. 82, S. 2440–2454, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.09.003.
[18]	R. Reissner, J. Vaes, und S. Hosseiny, RESelyser: System Concept for a combined RES-Electrolyser plant with optimised efficiency: Part 1 Review of electrolyser system with special emphasis on the HYSOLAR system. 2017. [Online]. Verfügbar unter: http://www.reselyser.eu/
[19]	I. Rolo, V. A. F. Costa, und F. P. Brito, „Hydrogen-Based Energy Systems: Current Technology Development Status, Opportunities and Challenges“, Energies, Bd. 17, Nr. 1, S. 180, Dez. 2023, doi: 10.3390/en17010180.
[20]	T. Smolinka, „Wasserstoffbereitstellung mittels Wasserelektrolyse: Stand der Technik und Perspektiven“, gehalten auf der 12. Niedersächsische Energietage, Hannover, 5. November 2019. [Online]. Verfügbar unter: https://www.efzn.de/fileadmin/Sites/EFZN/Images/Ereignisse/2019-11-NET12/Vortraege/NET2019_03_Smolinka_Impulsvortrag.pdf
[21]	D. Udomsilp, C. Lenser, O. Guillon, und N. H. Menzler, „Performance Benchmark of Planar Solid Oxide Cells Based on Material Development and Designs“, Energy Tech, Bd. 9, Nr. 4, S. 2001062, Apr. 2021, doi: 10.1002/ente.202001062.
[22]	G. Flis und G. Wakim, „Solid Oxide Electrolysis: A Technology Status Assessment“. 15. November 2023.
[23]	Enapter, „AEM EL 4.1“. [Online]. Verfügbar unter: https://handbook.enapter.com/electrolyser/el41/downloads/Enapter_Datasheet_EL41_EN.pdf
[24]	Enapter, „Electrolyser 4.1 (EL 4.1), Enapter Handbook“. [Online]. Verfügbar unter: https://handbook.enapter.com/electrolyser/el41/
[25]	TOPSOE, „SOEC: YOUR EFFICIENCY ADVANTAGE“. [Online]. Verfügbar unter: https://engage.topsoe.com/y1530201419
[26]	Sunfire, „Sunfire-HyLink SOEC“. [Online]. Verfügbar unter: https://backend.sunfire.de/wp-content/uploads/2024/12/Sunfire_Fact-Sheet_SOEC_DE_digital.pdf
[27]	D. Henkensmeier u. a., „Separators and Membranes for Advanced Alkaline Water Electrolysis“, Chem. Rev., Bd. 124, Nr. 10, S. 6393–6443, Mai 2024, doi: 10.1021/acs.chemrev.3c00694.

[28]	A. Buttler und H. Spliethoff, „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, Bd. 82, S. 2440–2454, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.09.003. A. Buttler und H. Spliethoff, „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, Bd. 82, S. 2440–2454, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.09.003.
[29]	Ecolyzer, „Alkaline Electrolysers for the Production of Green Hydrogen“. [Online]. Verfügbar unter: https://ecolyzer.com/fileadmin/files/EcoLyzer_Data-Sheet_technical_EN_2024_04.pdf
[30]	N. Sata und R. Costa, „Protonic ceramic electrochemical cells in a metal supported architecture: challenges, status and prospects“, Prog. Energy, Bd. 6, Nr. 3, S. 032002, Juli 2024, doi: 10.1088/2516-1083/ad3f6b.
[31]	S. Zong, X. Zhao, L. Jewell, Y. Zhang, und X. Liu, „Advances and challenges with SOEC high temperature co-electrolysis of CO ₂ /H ₂ O: Materials development and technological design“, Carbon Capture Science & Technology, Nr. 12, 2024, doi: 10.1016/j.ccst.2024.100234.
[32]	C. Graves, S. D. Ebbesen, M. Mogensen, und K. S. Lackner, „Sustainable hydrocarbon fuels by recycling CO ₂ and H ₂ O with renewable or nuclear energy“, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Bd. 15, S. 1–23, 2011, doi: 10.1016/j.rser.2010.07.014.
[33]	N. Du, C. Roy, R. Peach, M. Turnbull, S. Thiele, und C. Bock, „Anion-Exchange Membrane Water Electrolyzers“, Chem. Rev., Bd. 122, Nr. 13, S. 11830–11895, Juli 2022, doi: 10.1021/acs.chemrev.1c00854.
[34]	Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt; Referat F22: „Energie; Wasserstofftechnologien“, „20-Megawatt-Elektrolyseur mit H ₂ Giga-Technik kann starten“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/aktuelles/news/h2giga_20-megawatt-elektrolyseur
[35]	TU Clausthal, „Ziel ist es grünen Wasserstoff wettbewerbsfähig zu machen“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.tu-clausthal.de/universitaet/einrichtungen/presse-und-oeffentlichkeitsarbeit/pressemitteilungen/artikel/ziel-ist-es-gruenen-wasserstoff-wettbewerbsfaehig-zu-machen
[36]	Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt; Referat F22: „Energie; Wasserstofftechnologien“, „Innovationsbeauftragter Grüner Wasserstoff eröffnet Musterfertigung für Elektrolyse-Stacks in Dortmund“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/aktuelles/news/h2giga_musterfertigung_stacks
[37]	C. Gohlke u. a., „Boosting the Oxygen Evolution Reaction Performance of Ni-Fe-Electrodes by Tailored Conditioning“, ChemElectroChem, Bd. 11, Nr. 18, S. e202400318, Sep. 2024, doi: 10.1002/celc.202400318.
[38]	T. Wagner, F. Schaumburg, F. Kensy, A. Lorke, und N. Wöhrle, „Changes: Optimizing morphology and chemistry of nickel surfaces by a scalable plasma process for hydrogen electrolyzers“, Surface and Coatings Technology, Bd. 505, S. 132056, Juni 2025, doi: 10.1016/j.surfcoat.2025.132056.
[39]	J. R. Seidenberg u. a., „Bayesian Optimization of Electrode Conditioning of Ni(-Fe) Electrodes for the Alkaline Oxygen Evolution Reaction“, ChemElectroChem, Bd. 12, Nr. 24, S. e202500284, Dez. 2025, doi: 10.1002/celc.202500284.
[40]	N. Thissen u. a., „Industrially Relevant Conditions in Lab-Scale Analysis for Alkaline Water Electrolysis“, ChemElectroChem, Bd. 11, Nr. 1, S. e202300432, Jan. 2024, doi: 10.1002/celc.202300432.
[41]	Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt; Referat F22: „Energie; Wasserstofftechnologien“, „Ein Elektrolyseur offenbart sein Innerstes“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/aktuelles/news/h2giga/deriel_pem_elektrolyse
[42]	E. Jodat, A. Karl, und G. Schmid, „Towards Water Electrolysis at Scale-De-Risking of AEM&PEM-Electrolysis“, Electrochemical Science Advances, Special Collections, Juli 2025.
[43]	Siemens Energy Global GmbH & Co. KG, „Eröffnung der Siemens Energy Elektrolyseur-Fertigung“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.siemens-energy.com/de/de/home/pressemitteilungen/siemens-energy-und-air-liquide-ebnen-mit-gigawatt-fabrik-fuer-el.html
[44]	DECHEMA e.V., „Das Wasserstoff-Leitprojekt H ₂ Giga Wasserelektrolyse für Grünen Wasserstoff im Gigawatt-Maßstab“. Zugegriffen: 28. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/lw_resource/datapool/systemfiles/elements/files/05C4AF0039AB2C08E0637E695E863F24/current/document/H2Giga_Projektbroesch%C3%BCre.pdf
[45]	J. Heinrich u. a., „Functionalization of Ti64 via Direct Laser Interference Patterning and Its Influence on Wettability and Oxygen Bubble Nucleation“, Langmuir, Bd. 40, Nr. 6, S. 2918–2929, Feb. 2024, doi: 10.1021/acs.langmuir.3c02863.
[46]	Fraunhofer IEG, „Versuchsanlage macht Elektrolyseur und Wärmepumpe gemeinsam effizient“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ieg.fraunhofer.de/de/presse/pressemitteilungen/2024/versuchsanlage-zittau.html
[47]	Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt; Referat F22: „Energie; Wasserstofftechnologien“, „Elektrolyse: Erstmals Abwärme als Fernwärme nutzbar“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/aktuelles/news/eroeffnung_la-seve
[48]	Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt; Referat F22: „Energie; Wasserstofftechnologien“, „IntegrH2ate: Innovative Anlage koppelt Wasserstoff-Erzeugung mit Wärmenutzung“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/aktuelles/news/h2giga_integrh2ate
[49]	N. C. Röttcher, J. Zhou, L. Löttter, K. J. J. Mayrhofer, und D. Dworschak, „Tracing Iridium Dissolution Pathways in Proton Exchange Membrane Water Electrolyzers at Relevant Current Densities in Real Time“, ChemElectroChem, Bd. 12, Nr. 15, S. e202500098, Juli 2025, doi: 10.1002/celc.202500098.
[50]	P. L. Darge, N. C. Röttcher, M. Zlatar, K. J. J. Mayrhofer, S. Cherevko, und D. Dworschak, „Shortening Accelerated Stress Tests: An Identical Charge Approach for Oxygen Evolution Reaction Electrocatalysts“, ACS Catal., Bd. 15, Nr. 12, S. 10336–10346, Juni 2025, doi: 10.1021/acscatal.5c01464.
[51]	„Statuskonferenz H ₂ Giga“, 2024.
[52]	Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt; Referat F22: „Energie; Wasserstofftechnologien“, „AEM-Elektrolyse weltweit erstmals im Megawatt-Maßstab möglich“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/aktuelles/news/aem-megawatt
[53]	A. Klinger, „Direktbeschichtung von AEM-Membranen für großskalige Elektrolyseure“, gehalten auf der H ₂ Giga-Abschlusskonferenz, Frankfurt am Main, 2. Juli 2025.

[54]	thyssenkrupp nucera AG & Co. KGaA, „Ausbau auf 5 Gigawatt jährliche Fertigungskapazität: thyssenkrupp in allen drei Wasserstoff-Leitprojekten des BMBF vertreten“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.thyssenkrupp-nucera.com/de/ausbau-auf-5-gigawatt-jaehrliche-fertigungskapazitaet-thyssenkrupp-in-allen-drei-wasserstoff-leitprojekten-des-bmbf-vertreten/
[55]	Forschungsnetzwerke Energie, „Grüner Wasserstoff muss so günstig werden wie möglich“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.forschungsnetzwerke-energie.de/news/de/interview-wiebk-lueke-wasserstoff-wew
[56]	Siemens Energy Global GmbH & Co. KG, „Siemens Energy und Air Liquide ebnet mit Gigawatt-Fabrik für Elektrolyseure Weg für den Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.siemens-energy.com/de/de/home/pressemitteilungen/siemens-energy-und-air-liquide-ebnet-mit-gigawatt-fabrik-fuer-el.html
[57]	Quest One GmbH, „Meilenstein für grüne Wasserstoffwirtschaft: Quest One eröffnet neuen Gigahub“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.questone.com/news/detail/meilenstein-fuer-gruene-wasserstoffwirtschaft-quest-one-eroeffnet-neuen-gigahub/
[58]	Sunfire SE, „Willkommen bei Sunfire“. [Online]. Zugegriffen: 23. Februar 2026. Verfügbar unter: https://sunfire.de/de/
[59]	M. Römer, B. Winter, E. Mazeika, und K. Dröder, „Design and Analysis of Mechanical Gripper Technologies for Handling Mesh Electrodes in Electrolysis Cell Production“, 2023, doi: 10.15488/15297.
[60]	C. Locci, M. Mertens, S. Höyng, G. Schmid, T. Bagus, und P. Lettenmeier, „Scaling-up PEM Electrolysis Production: Challenges and Perspectives“, Chemie Ingenieur Technik, Bd. 96, Nr. 1–2, S. 22–29, Jan. 2024, doi: 10.1002/cite.202300111.
[61]	Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt; Referat F22: „Energie; Wasserstofftechnologien“, „Wasserstoff-Hochlauf: Elektrolyseure im Megawatt-Maßstab“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/aktuelles/news/h2giga/pep-in-gigafactory
[62]	Schaeffler Technologies AG & Co. KG, „Schaeffler präsentiert Lösungen für die industrielle Produktion von grünem Wasserstoff“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.schaeffler.de/de/news_medien/pressemitteilungen/pressemitteilungen_detail.jsp?id=88029248
[63]	C. Santoro u. a., „What is Next in Anion-Exchange Membrane Water Electrolyzers? Bottlenecks, Benefits, and Future“, ChemSusChem, Bd. 15, Nr. 8, S. e202200027, Apr. 2022, doi: 10.1002/cssc.202200027.
[64]	IEA, Paris, „Global Hydrogen Review 2025“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2025
[65]	Hydrogen Council and McKinsey & Company, „Global Hydrogen Compass 2025“. [Online]. Verfügbar unter: https://compass.hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2025/09/Hydrogen-Council-Global-Hydrogen-Compass-2025.pdf
[66]	IEA, „Global Hydrogen Review 2024“, 2024.
[67]	IEA, „Hydrogen Tracker“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/hydrogen-tracker
[68]	B. Walker, C. F. Kurzke, M. Stahmer, und S. Petersen, „Quo vadis deutsche Wasserstoffwirtschaft?“ [Online]. Verfügbar unter: https://aktuell.nationalatlas.de/wasserstoff-7_11-2024-0-html/
[69]	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, „Übersicht der deutschen IPCEI Hy2Infra-Projekte“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Downloads/1/ipcei-deutsche-hy2infra-projekte.pdf?__blob=publicationFile&v=7
[70]	Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, „Reallabore der Energiewende“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.energieforschung.de/de/aktuelles/aktuelle-forschungsthemen/reallabore-der-energiewende
[71]	Entwurf eines Gesetzes zur Beschleunigung der Verfügbarkeit von Wasserstoff und zur Änderung weiterer rechtlicher Rahmenbedingungen für den Wasserstoffhochlauf und weiterer energierechtlicher Vorschriften. [Online]. Verfügbar unter: https://dserver.bundestag.de/btd/21/025/2102506.pdf
[72]	H2Global Stiftung, „H2Global Stiftung“. [Online]. Verfügbar unter: https://h2-global.org/
[73]	EWE AG, „EWE: Offizieller Baustart von 320-Megawatt-Erzeugungsanlage in Emden“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ewe.com/de/media-center/pressemitteilungen/2025/11/ewe-offizieller-baustart-von-320-megawatt-erzeugungsanlage-in-emden-ewe-ag
[74]	NDR, „Wasserstoff-Produktion: Grundstein in Moorburg gelegt“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ndr.de/nachrichten/hamburg/wasserstoff-produktion-grundstein-in-moorburg-wird-gelegt,moorburg-132.html
[75]	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, „Atlas für geeignete Elektrolyseur Standorte in Deutschland“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.h2-power.de/willkommen/
[76]	V. Gerbaulet, K. Haalck, und J. Rasch, „Standortkompass für großskalige Elektrolyseanlagen“, Dezember 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.region-heide.de/fileadmin/inhalte/downloads/Standortkompass_f%C3%BCr_grossskalige_Elektrolyseanlagen.pdf
[77]	DECHEMA e.V. und acatech, „Länderanalyse des Wasserstoffkompasses“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.wasserstoff-kompass.de/news-media/dokumente/wasserstoff-strategien-laender-vergleich
[78]	„A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe.“, COM(2020) 301 final. Brussels, 2020. [Online]. Verfügbar unter: https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-07/hydrogen_strategy_0.pdf
[79]	European Union, „Renewable hydrogen“. [Online]. Verfügbar unter: Renewable hydrogen
[80]	European Union, „Directive (EU) 2023/2413 of the European Parliament and of the Council of 18 October 2023 amending Directive (EU) 2018/2001, Regulation (EU) 2018/1999 and Directive 98/70/EC as regards the promotion of energy from renewable sources, and repealing Council Directive (EU) 2015/652“.
[81]	The U.S. Department of Energy, „U.S. National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap.“ Juni 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.hydrogen.energy.gov/library/roadmaps-vision/clean-hydrogen-strategy-roadmap

[82]	L. Pingkuo und G. Junqing, „Comparative analysis on the development potential of green hydrogen industry in China, the United States and the European Union“, International Journal of Hydrogen Energy, Bd. 84, S. 700–717, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.08.298.
[83]	T. W. House, „Biden-Harris Administration Announces Regional Clean Hydrogen Hubs to Drive Clean Manufacturing and Jobs“. 13. Oktober 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://bidenwhitehouse.archives.gov/briefing-room/statements-releases/2023/10/13/biden-harris-administration-announces-regional-clean-hydrogen-hubs-to-drive-clean-manufacturing-and-jobs/
[84]	S. Penttinen, „Navigating the hydrogen landscape: An analysis of hydrogen support mechanisms in the US and the EU“, Rev Euro Comp Intl Enviro, Bd. 33, Nr. 3, S. 397–411, Nov. 2024, doi: 10.1111/reel.12575.
[85]	Hydrogen Council and McKinsey & Company, „Hydrogen Insights 2023: An update on the state of the global hydrogen economy, with a deep dive into North America“. Mai 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://hydrogencouncil.com/en/hydrogen-insights-2023
[86]	S. O. Bade und O. S. Tomomewo, „A review of governance strategies, policy measures, and regulatory framework for hydrogen energy in the United States“, International Journal of Hydrogen Energy, Bd. 78, S. 1363–1381, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.06.338.
[87]	„Annual Merit Review Presentation Database“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.hydrogen.energy.gov/library/amr-presentation-database?filter=Technology+Area-Hydrogen+Technologies=on&page=1&filter-Technology+Area-Hydrogen+Technologies-Production=on
[88]	BloombergNEF and The Business Council for Sustainable Energy, „Sustainable Energy in America 2025 Factbook“. [Online]. Verfügbar unter: https://bcse.org/market-trends/
[89]	The Ministerial Council on Renewable Energy, Hydrogen and Related Issues, „Basic Hydrogen Strategy“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/suiso_seisaku/pdf/20230606_5.pdf
[90]	New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO), „The world’s largest-class hydrogen production, Fukushima Hydrogen Energy Research Field (FH2R) now is completed at Namie town in Fukushima.“ [Online]. Verfügbar unter: https://www.nedo.go.jp/english/news/AA5en_100422.html
[91]	Jera, „Yamanashi Prefecture and JERA Promote Regional Hydrogen Utilization for a Carbon-Free Future!“ [Online]. Verfügbar unter: https://www.jera.co.jp/en/action/discover/030
[92]	National Development and Reform Commission, „氢能产业发展中长期规划（2021-2035年）“. 23. März 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.gov.cn/xinwen/2022-03/24/5680975/files/6b388f7c324a4b1db0b30dc6f52b7e02.pdf
[93]	L. Yushan und A.-S. Corbeau, „China’s Hydrogen Strategy: National vs. Regional Plans“, Center on Global Energy Policy at Columbia University SIPA CGEP. [Online]. Verfügbar unter: https://www.energypolicy.columbia.edu/publications/chinas-hydrogen-strategy-national-vs-regional-plans/
[94]	Y. Yao u. a., „Hydrogen energy industry in China: The current status, safety problems, and pathways for future safe and healthy development“, Safety Science, Bd. 186, S. 106808, Juni 2025, doi: 10.1016/j.ssci.2025.106808.
[95]	S. Wei, Y. Liu, S. Xiao, und P. Wu, „Hydrogen policy evolution in China and globally: A spatial and thematic comparison“, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Bd. 224, S. 116087, Dez. 2025, doi: 10.1016/j.rser.2025.116087.
[96]	National Development and Reform Commission, „氢能产业发展中长期规划（2021-2035年）“. 23. März 2022. Zugriffen: 21. Februar 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.gov.cn/xinwen/2022-03/24/5680975/files/6b388f7c324a4b1db0b30dc6f52b7e02.pdf
[97]	Sunfire, „Sunfire-HyLink Alkaline“. [Online]. Verfügbar unter: https://backend.sunfire.de/wp-content/uploads/2024/12/Sunfire_Fact-Sheet_AEL_DE-digital.pdf
[98]	thyssenkrupp nucera, „Industrial-Scale Water Electrolysis for Green Hydrogen Production“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.thyssenkrupp-nucera.com/wp-content/uploads/2024/10/thyssenkrupp-nucera_green-hydrogen_brochure_A4_241029_RZ_WEB.pdf
[99]	WEW, „WE MAKE GREEN HYDROGEN POSSIBLE!“ [Online]. Verfügbar unter: https://wewhydrogen.com/
[100]	Rely, „Clear100+“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.relysolutions.com/sites/rely/files/2025-08/clear100-technical-sheets_digital.pdf
[101]	stargate hydrogen, „Technical Specifications Starbase & Aurora“. [Online]. Verfügbar unter: https://stargatehydrogen.com/wp-content/uploads/2025/10/Specification_sheet_Starbase_and_Aurora_Stargate_hydrogen-Q3-2025.pdf
[102]	HYGEAR, „Electrolysis: PEM & alkaline“. [Online]. Verfügbar unter: https://hygear.com/technology/electrolysis/
[103]	HydrogenPro, „High-pressure alkaline electrolyzers“. [Online]. Verfügbar unter: https://hydrogenpro.com/wp-content/uploads/2025/06/Technical-details_1.3.pdf
[104]	nel, „AWE 100“. [Online]. Verfügbar unter: https://nelhydrogen.com/wp-content/uploads/2025/08/AWE-100-Standard-Plant-Solution_DOC006451_01-1.pdf
[105]	Hydrogen Optimized, „WATER ELECTROLYZER PRODUCT SPECIFICATION“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.hydrogenoptimized.com/solutions
[106]	NextHydrogen, „NH-X Series Electrolyser Systems“. [Online]. Verfügbar unter: https://nexthydrogen.com/products/
[107]	Mitsubishi Power Americas, „Electrolyzers“. [Online]. Verfügbar unter: https://power.mhi.com/regions/amer/products/electrolyzers
[108]	GUOFUHEE, „Hydrogen Generation System (HGS)“. [Online]. Verfügbar unter: http://en.guofuhe.com/site/product_detail_1/1
[109]	Hygreen energy, „Alkaline Electrolyzers“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.hygreenenergy.com/electrolyzers/alkaline/
[110]	LONGi, „LONGi Hydrogen“. [Online]. Verfügbar unter: https://static.longi.com/LON_Gi_Hydrogen_Products_and_Solution_Brochure_EN_4544d65a2e.pdf
[111]	PERIC Hydrogen Technologies Co., „Alkaline Type Hydrogen Generation System“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.peric718.com/AlkalineTypeHydrogen/r-56.html

[112]	SUNGROW „ALK Water Electrolysis Equipment“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.sungrowpower.com/en/products/hydrogen/alk-water-electrolysis-equipment
[113]	Tianjin Mainland Hydrogen Equipment Co. Ltd, „ALK water electrolysis hydrogen production equipment“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.cnthe.com/en/col.jsp?id=106
[114]	AsahiKASEI, „Aqualyzer“. [Online]. Verfügbar unter: https://ak-green-solution.com/assets/pdf/brochure_en.pdf
[115]	Bosch, „Hybrion PEM Electrolysis Stack“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bosch-hydrogen-energy.com/pem-electrolysis/pem-electrolysis-stacks/
[116]	Fest, „Modulare PEM Elektrolyseure 2-50 MW“. [Online]. Verfügbar unter: https://fest-group.de/loesungen/pem-elektrolyseure/
[117]	iGas energy, „GREEN ELECTROLYZER“. [Online]. Verfügbar unter: https://igas-energy.de/produkte/power-to-x
[118]	Quest One, „QUEST ONE PEM-ELEKTROLYSEUR MODULAR HYDROGEN PLATFORM“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.questone.com/fileadmin/user_upload/Quest_One_Data-Sheet_MHP_DE_0825.pdf
[119]	Schaeffler, „Vitesco PEM Elektrolyse Stacks für mittlere und große industrielle Anwendungen“. [Online]. Verfügbar unter: https://medias-library.schaeffler-cdn.com/hcms/v4.1/entity/file/1247961/storage/MT10Nzk2MS8wL21hc3Rlcj8vLz11MjMxNjc4
[120]	Siemens Energy, „Hydrogen and Power-to-X solutions“. [Online]. Verfügbar unter: https://p3.aprimocdn.net/siemensenergy/973beb1b-97e0-4150-9c2e-b29800761a8c/Electrolyzer_Brochure_Hydrogen_PowertoX-pdf_Original%20file.pdf
[121]	ITM, „ALPHA“. [Online]. Verfügbar unter: https://itm-power-assets.s3.eu-west-2.amazonaws.com/14299_ITM_Alpha_Spec_Sheet_1_7_5db44f3d20.pdf
[122]	NEL, „PEM 100“. [Online]. Verfügbar unter: https://nelhydrogen.com/wp-content/uploads/2025/03/PEM-100-Standard-Plant-Solution_PD-0600-0144-Rev-B-1.pdf
[123]	Accelera, „PEM electrolyzers“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.accelerazero.com/sites/default/files/2025-09/HyLYZER-1000-spec-sheet-2025.pdf
[124]	Ohmium, „Ohmium® cutting-edge PEM electrolyzer“. [Online]. Verfügbar unter: https://cdn.prod.website-files.com/62727ad5ed2dca1929e23851/68e3c2f0fb23bab4fca01715_Ohmium_Mark2_Brochure_OCT25.pdf
[125]	Plug Power, „Electrolyzer Hydrogen Solutions Now“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.plugpower.com/hydrogen/electrolyzer-hydrogen/
[126]	Cawolo, „PEM industry Hydrogen production“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.gdcawolo.com/Pem-industry-hydrogen-production-/cawolo-2400kw-green-hydrogen-generator-500nm3h-hydrogen-making-machine-custom-hydrogen-energy-generator-hydrogen-storage
[127]	Hygreen energy, „PEM Electrolyzers“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.hygreenenergy.com/electrolyzers/pem-electrolyzers/
[128]	PERIC Hydrogen Technologies Co., „PEM Type Hydrogen Generation System“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.peric718.com/PEM-Type-Hydrogen-Generation-System/r-52.html
[129]	SUNGROW „PEM Water Electrolysis Equipment“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.sungrowpower.com/en/products/hydrogen/pem-water-electrolysis-equipment
[130]	Bloom Energy, „Elektrolyzer Technology“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-03/H2-PACE-bloomenergy-4.pdf
[131]	RWE, „RWE-Hochinnovative SOEC-Technologie am Wasserstoffstandort Lingen“. [Online]. Verfügbar unter: https://sunfire.de/de/cases/rwe-hochinnovative-soec-technologie-am-wasserstoffstandort-lingen/
[132]	Sunfire, „Neste-Raffinerie in Rotterdam: Weltweit größter SOEC-Elektrolyseur nimmt Betrieb auf“. [Online]. Verfügbar unter: https://sunfire.de/de/news/neste-raffinerie-in-rotterdam-weltweit-groesster-soec-elektrolyseur-nimmt-betrieb-auf/
[133]	TOPSOE, [Online]. Verfügbar unter: https://www.topsoe.com/soec
[134]	Ceres Power Holdings plc, „Electrolyser module“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ceres.tech/products-and-applications/products/electrolyser-module/
[135]	elcogen, „Highly efficient fuel cell and electrolysis stack technology“. [Online]. Verfügbar unter: https://elcogen.com/products/solid-oxide-stack-modules/
[136]	Bloomenergy, „BLOOM ELECTROLYZERTM“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bloomenergy.com/wp-content/uploads/bloom-energy-electrolyzer-datasheet-december-2023.pdf
[137]	h2e POWER, „Solid Oxide Electrolyser Cell“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.h2epower.net/solid-oxide-electrolyser-cell/
[138]	TOSHIBA, „Produce Hydrogen“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.global.toshiba/ww/products-solutions/hydrogen/products-technical-services/supply-chain.html
[139]	H2i GreenHydrogen, „Unsere Lösungen“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.greenhydrogen.at/produkte
[140]	Cipher Neutron, „The AEM Electrolyser“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.cipherneutron.com/the-aem-electrolyser/
[141]	Agastya Hydrogen, „Agastya Modular 1 GW AEM Stack for single- and multi-core applications“. [Online]. Verfügbar unter: https://agastyah2.com/1-gw-aem-electrolyser/
[142]	Alchemr, „A SIMPLE SOLUTION TO RELIABLE GREEN HYDROGEN PRODUCTION“. [Online]. Verfügbar unter: https://alchemr.com/technology/

[143]	TianJin Mainland Hydrogen Equipment Co., Ltd., „AEM water electrolysis hydrogen production equipment“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.cnthe.com/en/col.jsp?id=107
[144]	Hydrolite, „Our AEM Technology“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.hydrolite-h2.com/aem-technology/
[145]	Sungreen, „DATASHEET SUNGREENH2 2kW AEM ELECTROLYZER UNIT“. [Online]. Verfügbar unter: https://cdn.prod.website-files.com/607fc5aee6af16caf6051fdf/691da75c8a92e8fe2a3dc711_2kW%20AEM%20ELECTROLYZER%20UNIT%201.pdf
[146]	S. Mohr, T. Schmidt-Achert, V. Ziemsky, und S. Pichlmaier, „Von der Theorie zur Praxis: Warum grüner Wasserstoff teurer ist als gedacht: Discussion Paper“, Research Center for Energy Economics, 2025. doi: 10.34805/FFE-13-25.
[147]	Deutscher Bundestag, „Regierung legt Wasserstoff-Beschleunigungsgesetz vor“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bundestag.de/presse/hib/kurzmeldungen-1121260
[148]	Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt; Referat F22: „Energie; Wasserstofftechnologien“, „Elektrolyseanlagen: Wie Genehmigungsverfahren schneller werden“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/aktuelles/news/h2giga/tpe-beschleunigung-genehmigungsverfahren
[149]	Clean Hydrogen Partnership, „Clean Hydrogen JU - SRIA Key Performance Indicators (KPIs)“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.clean-hydrogen.europa.eu/knowledge-management/strategy-map-and-key-performance-indicators/clean-hydrogen-ju-sria-key-performance-indicators-kpis_en
[150]	IRENA, „Green hydrogen cost reduction“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.irena.org/publications/2020/Dec/Green-hydrogen-cost-reduction
[151]	C. Idrissov und A. Holland, „Markt für grüne Wasserstoffproduktion und Elektrolyseure 2024-2034: Technologien, Akteure, Prognosen“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.idtechex.com/de/research-report/markt-f-r-gr-ne-wasserstoffproduktion-und-elektrolyseure-2024-2034-technologien-akteure-prognosen/992
[152]	U.S. Department of Energy, „Hydrogen Production Related Links“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-related-links#targets
[153]	M. Schalenbach, G. Tjarks, M. Carmo, W. Lueke, M. Mueller, und D. Stolten, „Acidic or Alkaline? Towards a New Perspective on the Efficiency of Water Electrolysis“, J. Electrochem. Soc., Bd. 163, Nr. 11, S. F3197–F3208, 2016, doi: 10.1149/2.0271611jes.
[154]	A. Karl u. a., „Water Electrolysis Facing the Gigawatt Challenge—Comprehensive De-Risking of Proton Exchange Membrane and Anion Exchange Membrane Electrolyser Technology“, Electrochemical Science Adv, Bd. 5, Nr. 3, S. e202400041, Juni 2025, doi: 10.1002/elsa.202400041.
[155]	P. Lettenmeier, „Wirkungsgrad – Elektrolyse“, Siemens, White paper, Jan. 2019. [Online]. Verfügbar unter: https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:a5fa8257-6c71-496f-a324-454241f1df71/version:1626351542/white-paper-effizienz-de.pdf
[156]	VDE, „Netzdienliche Integration von Elektrolyseuren“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.vde.com/resource/blob/2224284/d805489288dc8f775f27a36708354211/netzdienliche-elektrolyse--1--data.pdf

Anhang

9.1 Methodik

Das Dokument wurde während der Laufzeit von H₂Giga in den Jahren 2021 bis 2025 im Rahmen des H₂Giga-Projekts Technologieplattform Elektrolyse (TPE) durch die DECHEMA e.V. erarbeitet. Die Teilnahme an H₂Giga-Veranstaltungen ermöglichte tiefe Einblicke in die Fortschritte der H₂Giga-Projekte und damit für den Stand der Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland.

Dazu kamen Experteninterviews, die Sammlung und Bewertung von F&E-Bedarfen sowie eine umfangreiche Recherche. Fachliche Unterstützung kam von Christian Bernäcker, Fraunhofer IFAM, für

AEL und AEM-Elektrolyse, Tom Smolinka, Fraunhofer ISE, für PEM-Elektrolyse, Mihails Kusnezoff, Fraunhofer IKTS, für HTEL, Clemens Schneider, Fraunhofer IEG für Übergreifendes (Speziell: Systemintegration) und Mona Wappler, Hochschule Rhein-Waal, für Markt, Wettbewerb und Regulatorik.

9.1.1 Datenerhebung durch Experteninterviews

Experteninterviews (Akteure der Elektrolyselandschaft samt Wissenschaft) wurden Mitte 2023 durchgeführt. Für jede Technologie wurden jeweils mindestens drei Interviews geführt (siehe Tabelle 9.1). Ein exemplarischer Auszug der Fragen ist in Tabelle 9.2 zu finden.

#	Institution	Technologie	H ₂ Giga	Projektname
1	thyssenkrupp nucera	AEL	Ja	INSTALL AWE
2	Sunfire	AEL	Ja	AEL4GW
3	WEW	AEL	Ja	StaR
4	Siemens Energy	PEM-Elektrolyse	Ja	SEGIWA
5	Linde/ITM	PEM-Elektrolyse	Ja	IntegrH2ate, SineWave
6	Everllence	PEM-Elektrolyse	Ja	PEP.IN
7	Schaeffler Technologies	PEM-Elektrolyse	Ja	StacIE
8	Sunfire	HTEL	Ja	HTEL-Module, HTEL-Stacks
9	Fraunhofer IKTS	HTEL	Ja	HTEL-Stacks
10	AVL LIST (Österreich)	HTEL	Nein	
11	Enapter	AEM-Elektrolyse	Ja	Hy-Core
12	ZBT Duisburg	AEM-Elektrolyse	Ja	AlFaKat, PEP.IN
13	Siemens Energy	AEM-Elektrolyse	Ja	AEM-Direkt

Tabelle 9.1: Liste der teilnehmenden Institutionen der durchgeführten Experteninterviews

Marktsituation
› In welchen Ländern/Regionen sehen Sie den größten pull nach Elektrolyseuren? › Wie könnten geeignete Vertriebsstrukturen dazu beitragen, die Elektrolyse zur globalen Industrie zu entwickeln? › Welche politischen/wirtschaftlichen Schritte erachten Sie als notwendig, um die Elektrolysebranche zur Gigawatt-Industrie zu entwickeln?
Entwicklungsziele
› Welche primären technologischen Entwicklungsziele verfolgt Ihre Firma? › Welche Skalierung strebt Ihre Firma 2025/2030 an?
Produktionsprozess Stack/Elektrolyse-Anlage
› Welche Bottlenecks entlang der Fertigungskette zur GW-Fertigung existieren in Ihrer Firma? › Welche Bottlenecks entlang der Fertigungskette zur GW-Fertigung sehen Sie bei Ihren Zulieferern? › Welche BOP Komponenten sind kritisch zur Erreichung des GW-Maßstabs? › Sind nach erfolgreichem Abschluss von H₂Giga noch manuelle Produktionsschritte notwendig? Wird hier eine Automatisierung angestrebt?
Schnittstellen/Infrastruktur
› Welche Maßnahmen sollen zur Standardisierung der Schnittstellen angestoßen werden?
Kennzahlen
› Was sind zukünftig die typischen Leistungsklassen der von Ihnen produzierten Elektrolyseure? › Wie viel GW Elektrolysekapazität planen Sie 2030, bzw. 2050 pro Jahr herstellen zu können?

Tabelle 9.2: Auszug der Fragen der Experteninterviews

9.1.2 Datenerhebung und Konsolidierung der Forschungs- und Entwicklungsbedarfe

Forschungs- und Entwicklungsbedarfe, die zum Erreichen der Ziele der Nationalen Wasserstoffstrategie beitragen, wurden im ersten Halbjahr 2024 gesammelt. Sie beziehen sich auf noch erforderliche F&E-Bedarfe in der Annahme eines erfolgreichen Abschlusses der noch anstehenden Projektarbeiten. Die Sammlung der Themen erfolgte technologiespezifisch mit den zwei zusätzlichen Kategorien

„Übergreifendes“ und „PFAS-freie Elektrolyse“. Im Rahmen der einheitlichen Abfrage (siehe Abbildung 9.1) beteiligten sich alle H₂Giga-Projekte mit ihren insgesamt mehr als 120 Partnern.

Die Bedarfe wurden um Informationen weiterer Hersteller ergänzt. In Kernteams bestehend aus jeweils 4–10 Vertretern aus Industrie und Forschung (siehe Tabelle 9.3) wurden die insgesamt 450 Einträge geclustert, konsolidiert, priorisiert und mit Vertretern des NWR diskutiert.

Thema, Aufgabenstellung: Was wird gebraucht? Was fehlt noch?	Begründung: Warum erforderlich zum Erreichen der Ziele der NWS?	Impact: (Zeithorizont bis 2030)	Impact: (Zeithorizont bis 2045)	Partner: Welche Partner können beitragen? (auch halbge-nerische Nennung möglich)	Neues Thema? Oder baut es auf Ergebnisse (welche?) von H ₂ Giga auf?	Vorschlag aus H₂Giga-Verbund: Acronym
---	---	---	---	--	---	--

Abbildung 9.1: Abfragestruktur der F&E-Bedarfe

	Firmen/Universitäten/Forschungseinrichtungen
AEL	Linde
	Sunfire
	WEW
PEM-Elektrolyse	Fraunhofer IEG
	Hahn-Schickard
	Heraeus
	Linde
	Schaeffler
	Siemens Energy
	Zentrum für BrennstoffzellenTechnik
HTEL	DECHEMA Forschungsinsitut
	Sunfire
AEM-Elektrolyse	FH Münster
	FH Münster
	Siemens Energy
	Zentrum für BrennstoffzellenTechnik
Übergreifendes	DECHEMA Forschungsinstitut
	Entwicklungsagentur Heide
	Fraunhofer IEG
	Fraunhofer IEE
	Linde
	TU Bergakademie Freiberg

Tabelle 9.3: Übersicht der Kernteams zur Konsolidierung, Einordnung und Überarbeitung der gesammelten F&E-Bedarfe. Im Rahmen der Abfrage beteiligten sich alle H₂Giga-Projekte mit ihren insgesamt mehr als 120 Partnern.

9.1.3 Erläuterungen zu den KPIs

KPIs laut Beschreibung der *Clean Hydrogen Partnership* [149], übersetzt mit DeepL.com (kostenlose Version) und nachkorrigiert sowie im Rahmen dieser Studie angepasst.

Alkalische Elektrolyse

(Allgemein für das System): Standard-Randbedingungen, die für alle KPIs des Elektrolysesystems gelten: Bezug von Wechselstrom und Leitungswassereintrag gemäß ISO 14687-2 bei einem Druck von 30 bar und einer Wasserstoffreinheitsgrad von 5. Bei abweichenden tatsächlichen Randbedingungen können Korrekturfaktoren angewendet werden. Alle KPIs sind voneinander abhängig und sollten gleichzeitig erfüllt werden.

KPI - *Electricity consumption @nominal capacity*: Elektrischer Energiebedarf bei nominaler Wasserstoffproduktionsrate des Systems unter Standard-Randbedingungen, einschließlich der erforderlichen Energie für die Kühlung.

KPI - *Capital cost*: Die Kapitalkosten basierend auf einem Produktionsvolumen von 100 MW für ein einzelnes Unternehmen und einer Lebensdauer des Systems von 10 Jahren im Dauerbetrieb, wobei das Ende der Lebensdauer ab einem Anstieg des erforderlichen Energiebedarfs der Wasserstoffproduktion um 10 % definiert ist. Austausche von Stacks sind nicht in den Kapitalkosten enthalten. Die Kosten beziehen sich auf die Installation an einem vorbereiteten Standort (Fundament/Gebäude und erforderliche Anschlüsse sind vorhanden). Transformatoren und Gleichrichter sind in den Kapitalkosten miteinzubeziehen.

KPI - *O&M cost*: Betriebs- und Wartungskosten, gemittelt über die ersten 10 Jahre des Systems. Mögliche Kosten für Austausche von Stacks sind nicht in den Betriebs- und Wartungskosten enthalten. Stromkosten sind nicht in den Betriebs- und Wartungskosten enthalten.

KPI - *Hot idle ramp time*: Benötigte Zeit, um die Nennkapazität in Bezug auf die Wasserstoffproduktionsrate zu erreichen, wenn das Gerät aus dem Warmstandby-Modus (System bereits auf Betriebstemperatur und -druck) gestartet wird.

KPI - *Cold start ramp time*: Benötigte Zeit, um die Nennkapazität in Bezug auf die Wasserstoffproduktionsrate zu erreichen, wenn das Gerät aus dem Kaltstandby-Modus gestartet wird.

KPI - *Degradation*: Degradation des Stacks, definiert als prozentualer Wirkungsgradverlust bei Betrieb mit Nennkapazität. Beispielsweise führt ein Wert von 0,125 %/1.000 h zu einem Anstieg des Energieverbrauchs um 10 % über eine Lebensdauer von 10 Jahren bei 8.000 Betriebsstunden pro Jahr.

KPI - *Current density*: Mittlere Stromdichte der Elektrolysezelle bei Betriebstemperatur und -druck und Nennwasserstoffproduktions-rate des Stacks. Gemessen in Amper pro Quadratcentimeter (A/cm^2).

KPI - *Use of critical raw materials as catalysts*: Teilweise werden noch kritische Rohstoffe, wie Ruthenium für die Kathode (hauptsächlich als RuO_2), eingesetzt.

PEM-Elektrolyse

(KPI - *Electricity consumption @nominal capacity*), (KPI - *O&M cost*), (KPI - *Hot idle ramp time*) und (KPI-*Degradation*): Gleiche Bedingungen wie für die alkalische Elektrolyse.

Die KPIs für Degradation und Energieverbrauch sind voneinander abhängig und sollten gleichzeitig erfüllt werden.

KPI - *Capital cost*: Die Investitionskosten basieren auf der Annahme einer Produktion von 100 MW für ein einzelnes Unternehmen gemäß der aktuellen Definition.

KPI - *Cold start ramp time*: Benötigte Zeit, um die Nennkapazität in Bezug auf die Wasserstoffproduktionsrate zu erreichen, wenn das Gerät bei $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ kalt gestartet wird.

KPI - *Current density*: Mittlere Stromdichte der Elektrolysezelle bei Betriebstemperatur und -druck und Nennwasserstoffproduktions-rate des Stacks.

KPI - *Use of critical raw materials as catalysts*: Als kritische Rohstoffe sind hier hauptsächlich Iridium als Anodenkatalysator und Platin als Kathodenkatalysator gemeint; auch Titan zählt zu den kritischen Rohstoffen.

HTEL

(Allgemein für das System): Standard-Randbedingungen, die für alle System-KPIs gelten: Bezug von Wechselstrom und Leitungswasser-eintrag; Ausgabe von Wasserstoff gemäß ISO 14687-2 bei atmosphärischem Druck und einer Wasserstoffreinheitsgrad von 5. Bei abweichenden tatsächlichen Randbedingungen können Korrekturfaktoren angewendet werden.

Alle KPIs sind voneinander abhängig und sollten gleichzeitig erfüllt werden, mit Ausnahme der reversiblen Parameter, die nur reversiblen Systeme betreffen.

KPI - *Electricity consumption @nominal capacity*: Der Strombedarf entspricht dem der alkalischen Elektrolyse. Der Wärmebedarf ist die Wärmeaufnahme des Systems bei Nennleistung (meist durch Dampf bereitgestellt).

KPI - *Capital cost*: Die Kapitalkosten basieren auf einem Produk-

tionsvolumen von 100 MW für ein einzelnes Unternehmen und einer Lebensdauer des Systems von 10 Jahren im Dauerbetrieb, wobei das Ende der Lebensdauer ab einem Anstieg des erforderlichen Energiebedarfs der Wasserstoffproduktion um 10 % definiert ist. Austausche von Stacks sind nicht in den Investitionskosten enthalten. Die Kosten beziehen sich auf die Installation an einem vorbereiteten Standort (Fundament/Gebäude und erforderliche Anschlüsse sind vorhanden). Transformatoren und Gleichrichter sind in den Investitionskosten enthalten.

KPI - *O&M cost*: Betriebs- und Wartungskosten, gemittelt über die ersten 10 Jahre des Systems. Mögliche Kosten für Austausche von Stacks sind in den Betriebs- und Wartungskosten enthalten. Stromkosten sind nicht in den Betriebs- und Wartungskosten enthalten.

KPI - *Hot idle ramp time*: Benötigte Zeit, um die Nennkapazität in Bezug auf die Wasserstoffproduktionsrate zu erreichen, wenn das Gerät aus dem warmen Standby-Modus (System bereits auf Betriebstemperatur und -druck) gestartet wird.

KPI - *Cold start ramp time*: Benötigte Zeit, um die Nennkapazität in Bezug auf die Wasserstoffproduktionsrate zu erreichen, wenn das Gerät aus dem kalten Standby-Modus gestartet wird.

KPI - *Degradation*: Degradation unter thermoneutralen Bedingungen (bei thermoneutraler Spannung) in Prozent Verlust der Produktionsrate (Wasserstoffleistung) bei konstanter Effizienz. Beachten Sie, dass dies eine andere Definition als bei der Niedertemperatur-Elektrolyse ist, was den Unterschied in der Technologie widerspiegelt. Die Testzeit sollte mindestens 2000 Stunden betragen.

KPI - *Current Density*: Mittlere Stromdichte der Elektrolysezelle bei Betriebstemperatur und -druck und Nennwasserstoffproduktions-rate des Stacks.

AEM-Elektrolyse

Allgemein für das System: Standard-Randbedingungen, die für alle System-KPIs gelten: Eingabe von Wechselstrom und Leitungswasser; Ausgabe von Wasserstoff gemäß ISO 14687-2 bei atmosphärischem Druck und einer Wasserstoffreinheitsgrad von 5. Bei abweichenden tatsächlichen Randbedingungen können Korrekturfaktoren angewendet werden.

(KPI - *Electricity consumption @nominal capacity*) bis (KPI - *Current Density*): Ähnliche Bedingungen wie für die alkalische Elektrolyse und Anwendung von ISO 14687-2.

KPI - *Current Density (nominal load)*: Es liegen nur Daten aus wissenschaftlichen Veröffentlichungen vor, Zielwerte für KOH-basierten Elektrolyten $< 1,0\text{ } \%$ mol.

KPI - *Use of critical raw materials as catalyst*: Als kritischer Rohstoff ist hier Platin als Kathodenkatalysator gemeint.

9.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1	Struktur des Wasserstoff-Leitprojekts H ₂ Giga	10
Abbildung 2.2	Layout eines AEL-Systems; angepasst von [17]; Original [18]	11
Abbildung 2.3	Prozesskette der wichtigsten Schritte zu Aufbau und Einsatz eines Elektrolyseurs, hier am Beispiel eines PEM-Elektrolyseurs	11
Abbildung 6.1	Übersicht der thematischen Clusterung für die Forschungsthemen der vier Elektrolysetechnologien	48
Abbildung 6.2	Übersicht der übergreifenden Forschungsthemen	55
Abbildung 7.1	Technologie-Roadmap für die AEL	63
Abbildung 7.2	Technologie-Roadmap für die PEM-Elektrolyse	64
Abbildung 7.3	Technologie-Roadmap für die HTEL	65
Abbildung 7.4	Technologie-Roadmap für die AEM-Elektrolyse	66
Abbildung 9.1	Abfragestruktur der F&E-Bedarfe	76

9.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1	Vergleich von wesentlichen Bestandteilen und Parametern der vier Technologien der Wasserelektrolyse [19], [20]	12
Tabelle 2.2	Vergleich der Elektrolysetechnologien auf Systemlevel [19], [20], [22]	12
Tabelle 4.1	Fertigungskapazitäten deutscher Elektrolyseurhersteller (laut öffentlich verfügbarer Informationen)	21
Tabelle 4.2	Klassifizierung der Prozessstabilität zur Einordnung der Fertigungstechnologien für Elektrolyseure	22
Tabelle 4.3	Qualitative Einordnung des Stands der Industrialisierung der Fertigungstechnologien für AEL (Referenzjahr: 2025). *) Single Source	23
Tabelle 4.4	Qualitative Einordnung des Stands der Industrialisierung der Fertigungstechnologien für PEM-Elektrolyse (Referenzjahr: 2024)	24
Tabelle 4.5	Qualitative Einordnung des Stands der Industrialisierung der Fertigungstechnologien für HTEL (Stack) (Referenzjahr: 2025)	25
Tabelle 4.6	Qualitative Einordnung des Stands der Industrialisierung der Fertigungstechnologien für AEM-Elektrolyse (Referenzjahr: 2024)	26
Tabelle 4.7	Zusammenfassung Vergleich Marktcharakteristika Europa, USA und China	29
Tabelle 4.8	Vergleich Anzahl Hersteller nach Region (Headquarter) 2022 und 2025	29
Tabelle 4.9	Anzahl Hersteller nach Region und Technologie 2022	30
Tabelle 4.10	Anzahl Hersteller nach Region und Technologie 04/2025	30
Tabelle 4.11	Übersicht der Spezifikationen ausgewählter Anbieter für alkalische Elektrolysestacks und -systeme (zuletzt geprüft am 11.12.2025)	32
Tabelle 4.12	Übersicht der Spezifikationen ausgewählter Anbieter für PEM-Elektrolysestacks und -systeme (zuletzt geprüft am 15.12.2025)	33
Tabelle 4.13	Übersicht der Spezifikationen ausgewählter Anbieter für HTEL-Stacks und -Systeme (zuletzt geprüft am 12.12.2025)	35
Tabelle 4.14	Übersicht der Spezifikationen ausgewählter Anbieter AEM-Elektrolysestacks und -systeme (zuletzt geprüft am 12.12.2025)	37
Tabelle 5.1	KPIs der Jahre 2024/2025 und 2030 für die AEL-Technologie – gemäß Befragung und Einschätzung von H ₂ Giga-Projektpartnern und Vergleich [149], [150], [151]	42
Tabelle 5.2	KPIs der Jahre 2024 und 2030 für die PEM-Elektrolyse Technologie – gemäß Befragung und Einschätzung von H ₂ Giga-Projektpartnern und Vergleich [149], [150], [151]	43
Tabelle 5.3	KPIs der Jahre 2024 und 2030 für die HTEL -Technologie. gemäß Befragung und Einschätzung von H ₂ Giga-Projektpartnern und Vergleich [149], [150], [151]	44
Tabelle 5.4	KPIs der Jahr 2024 und 2030 für die AEM-Elektrolyse Technologie – gemäß Befragung und Einschätzung von H ₂ Giga-Projektpartnern und Vergleich [145], [150]	46
Tabelle 6.1	Inhaltliche Beschreibung der Kriterien zur Einordnung der Forschungsbedarfe in die sechs thematischen Cluster je Technologien (AEL, PEM-Elektrolyse, HTEL, AEM-Elektrolyse)	49

Tabelle 6.2	F&E-Bedarfe AEL in Cluster eingeteilt	50
Tabelle 6.3	F&E-Bedarfe PEM-Elektrolyse in Cluster eingeteilt	52
Tabelle 6.4	Forschungsbedarfe HTEL in Cluster eingeteilt	53
Tabelle 6.5	Forschungsbedarfe AEM-Elektrolyse in Cluster eingeteilt	54
Tabelle 6.6	Aufführung der wichtigsten Forschungs- und Entwicklungsthemen zu übergreifenden Themen	56
Tabelle 6.7	Wichtigste Forschungsthemen für den Umgang mit PFAS-Materialien und deren Ersatz in der Elektrolyse	58
Tabelle 9.1	Liste der teilnehmenden Institutionen der durchgeführten Experteninterviews	75
Tabelle 9.2	Auszug der Fragen der Experteninterviews	76
Tabelle 9.3	Übersicht der Kernteams zur Konsolidierung, Einordnung und Überarbeitung der gesammelten F&E-Bedarfe. Im Rahmen der Abfrage beteiligten sich alle H ₂ Giga-Projekte mit ihren insgesamt mehr als 120 Partnern.	77

9.4 Abkürzungsverzeichnis

AEL/AWE	Alkalische Wasserelektrolyse
AEM	Anionenaustauschmembran
BIL	<i>Bipartisan Infrastructure Law</i>
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung (seit 2025 BMFTR)
BMFTR	Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (ehemals BMBF)
BMWE	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (ehemals BMWK)
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klima (seit 2025 BMWE)
BoP	<i>Balance of Plant</i>
CAPEX	<i>Capital expenditures</i>
CCM	<i>Catalyst coated membrane</i>
CCS	<i>Catalyst coated substrate</i>
EE	Erneuerbare Energien
FID	<i>Final Investment Decision</i>
F&E	Forschung & Entwicklung
HTEL	Hochtemperatur-Elektrolyse
IRA	<i>Inflation Reduction Act</i>
IRENA	<i>International Renewable Energy Agency</i>
KOH	Kaliumhydroxid
LHV	<i>Lower heat value</i>
LSCF	Lanthan-Strontium-Kobalt-Ferrit
LSM	Lanthan-Strontium-Manganit
MEA	Membran-Elektroden-Einheit (<i>membrane electrode assembly</i>)
MPL	<i>Microporous layer</i>
NWR	Nationaler Wasserstoffrat
NWS	Nationale Wasserstoffstrategie
O&M cost	<i>Operation & maintenance cost</i>
OPEX	<i>Operational expenditures</i>
PCC	<i>Proton Conducting Ceramic Cell</i>

PEM	Protonenaustauschmembran
PFAS	Per- und polyfluorierte Chemikalien
PFSA	Perfluorsulfonsäuren (<i>perfluorosulfonic acid</i>)
PGM	<i>Platinum Group Metals</i>
PTFE	Polytetrafluorethylen
Pvi	Prüfung von Inbetriebnahme
QC	<i>Quality Control</i>
RED	Erneuerbare-Energien-Richtlinie
RFNBO	<i>Renewable Fuels of Non-Biological Origin</i>
SOEC	<i>Solid Oxide Electrolysis Cell</i>
TPE	Technologieplattform Elektrolyse
TRL	<i>Technology Readiness Level</i>
YSZ	Yttrium-stabilisiertes Zirkoniumdioxid



Herausgeber

DECHEMA e.V.
Theodor-Heuss-Allee 25
60486 Frankfurt am Main

Simone Rogg
Thomas Hild
Eva Kolle-Görgen
Isabel Kundler

Autoren

Simone Rogg, DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.
Thomas Hild, DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.
Eva Kolle-Görgen, DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.
Isabel Kundler, DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.

Christian Bernäcker, Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM
Tom Smolinka, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Mihails Kusnezoff, Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS
Clemens Schneider, Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geotechnologien IEG
Mona Wappler, Hochschule Rhein-Waal

Erstellt im Rahmen des H₂Giga-Projekts „Technologieplattform Elektrolyse“ mit Unterstützung weiterer H₂Giga-Projekte, gefördert durch das Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR)

FKZ: 03HY101A (DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.)

© DECHEMA e.V., Februar 2026

© Grafik Titelseite: Projektträger Jülich im Auftrag des BMFTR