

Potenziale für Klein- und Mittelunternehmen in der Herstellung von Elektrolyseuren

Wasserstoff sorgt für Furore. Es gibt de facto keinen wesentlichen Industriezweig, in dem Wasserstoff nicht Teil zukünftiger Lösungen ist, um Treibhausgase drastisch zu verringern. Sei es die Stahlindustrie, die chemische Industrie, die Öl- und Gasindustrie, alle planen mit Wasserstoff ihre Zukunft. Damit der Wasserstoff allen Erwartungen gerecht werden kann, muss seine Herstellung auch möglichst emissionsfrei sein. Eine der Möglichkeiten ist hierbei die Elektrolyse, die in dieser Publikation im Detail behandelt wird, um besonders Klein- und Mittelunternehmen die möglichen Chancen und Herausforderungen in Bezug auf das Produkt „Elektrolyseur“ näherzubringen.

Der Fokus dieser Studie liegt auf der Beschreibung der verschiedenen möglichen Elektrolysetechnologien sowie der darauf aufbauenden Bewertung von Subsystemen und Komponenten vor dem Hintergrund eines möglichen Markteintritts.



© sdecoret/AdobeStock

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	3
1.1 Wasserstoff: ein vielversprechender Energieträger für eine nachhaltige Zukunft	3
1.2 Entwicklung der Wasserstoffherstellung	3
1.3 Elektrolysebedarf	4
1.4 Geografische Unterschiede	4
2. Elektrolysetechnologien und deren Komponenten	5
2.1 Alkalische Elektrolyse (AEL)	5
2.2 Protonenaustauschmembran-Elektrolyse (PEMEL)	7
2.3 Festoxid-Elektrolyse (SOEC)	8
2.4 Anionenaustauschmembran-Elektrolyse (AEM)	10
2.5 Vergleich der Elektrolysetechnologien	12
3. Potenziale in der Herstellung von Elektrolyseuren	14
3.1 Grundsätzliche Anforderungen an Elektrolyseurkomponenten	14
3.2 Bewertung der Komponenten	15
3.3 Vormontage, Gehäuse- und Rahmenherstellung	18
3.4 Einzelschrittprozesse und Adaption bestehender Produkte	18
4. Ausblick in die Zukunft	18
Abkürzungsverzeichnis	20
Symbolverzeichnis	20
Quellenverzeichnis	21
Autoren	23

1. Einleitung

1.1 Wasserstoff: ein vielversprechender Energieträger für eine nachhaltige Zukunft

Wasserstoff gilt als vielversprechender Energieträger für eine nachhaltige Zukunft. Er kann als Energiespeicher fungieren für den Ausgleich von Angebot und Nachfrage an erneuerbarer Energie, direkt als kohlenstofffreier Kraftstoff oder er kann zur Produktion von kohlenstoffneutralen E-Fuels sowie synthetischen Chemikalien genutzt werden. Hauptaugenmerk liegt auf grünem Wasserstoff, der mithilfe von Elektrolyse und Strom aus erneuerbaren Energien erzeugt wird, da hier keine kohlenstoffäquivalenten Emissionen generiert werden bis auf die, die bei der Produktion von bspw. PV- und Windanlagen oder der Elektrolyseure anfallen. Grüner Wasserstoff macht gegenwärtig nur ca. 1 % der gesamten Menge an Wasserstoff aus, aber die Wachstumsaussichten sind sehr vielversprechend. Die Wasserstoffherstellung wird mithilfe eines Farbschemas gekennzeichnet. [1]

Kategorisierung von Wasserstoff

Pink/Rot	Aus Atomstrom
Grau	Aus fossilen Brennstoffen (Dampfreformierung)
Braun	Nebenprodukt-Wasserstoff, z. B. aus Chlor-Alkali-Elektrolyse
Blau	Dampfreformierung: CO ₂ wird abgeschieden und endgelagert (Carbon Capture and Storage), bspw. in Norwegen (in Deutschland ist die Speicherung nicht erlaubt)
Türkis	Pyrolyse von Methan (CH ₄) – C als Graphit entsteht – Wärmeversorgung für thermische Spaltung sollte aus erneuerbaren Energien kommen
Grün	Aus regenerativen Quellen – Elektrolyse mit Strom aus erneuerbarer Energie (Grünstrom)
Gelb	Elektrolyse mit allgemeinem Strommix

1.2 Entwicklung der Wasserstoffherstellung

Aktuell wird Wasserstoff hauptsächlich durch konventionelle Verfahren mithilfe fossiler Energieträger (99 %) erzeugt, wobei die Dampfreformierung von Erdgas ca. 62 % beiträgt und der daraus gewonnene Wasserstoff als „grauer“ Wasserstoff bezeichnet wird. Weitere 18 % stammen aus dem Cracken von Öl und 19 % werden durch Vergasung von Kohle gewonnen. [2] In den letzten Jahren hat sich das Interesse auf umweltfreundlichere Alternativen verlagert. „Blauer“ Wasserstoff entsteht hierbei nach wie vor aus fossilen Brennstoffen, jedoch werden die dabei anfallenden CO₂-Emissionen durch CCUS-Technologien genutzt bzw. gespeichert.

Der entscheidende Durchbruch für eine nachhaltige Wasserstoffherstellung ist der grüne Wasserstoff, hergestellt durch Elektrolyse. Die Elektrolyse ist ein Verfahren, bei dem Wasser (H₂O) unter Einsatz von elektrischer Energie aus erneuerbaren Energiequellen, primär Photovoltaik, Windenergie oder Wasserkraft, in seine Bestandteile Wasserstoff (H₂) und Sauerstoff (O₂) zerlegt wird.

1.3 Elektrolysebedarf

Der resultierende Elektrolysebedarf ergibt sich aus der zu erwartenden Nachfrage nach grünem Wasserstoff. Aktuell gibt es eine weltweit installierte Elektrolysekapazität von rund 1 GW. Laut jüngsten Zahlen der Internationalen Energieagentur (IEA) wird prognostiziert, dass es, je nach Szenario, weltweit einen Bedarf bis zum Jahr 2030 von rund 130 bis 200 GW geben wird. [2]

Im Vergleich dazu Deutschland: Derzeit gibt es eine Elektrolysekapazität von rund 100 MW, also 0,1 GW, mit dem Ziel, diese Kapazität für das Jahr 2030 auf 10 GW zu erhöhen. [3] Um den von der DENA prognostizierten Bedarf von 90–110 TWh bis zum Jahr 2030 zu decken, wäre aber eine Elektrolysekapazität von 40 GW erforderlich. [4] Daraus wird ersichtlich, dass Elektrolyseure und deren Komponenten sehr gute und hochdynamische Wachstumsmöglichkeiten bieten.

Obgleich der Fokus dieser Publikation auf Elektrolyseuren liegt, sei auch darauf hingewiesen, dass Elektrolyseverfahren einen nicht zu vernachlässigenden Wasserverbrauch von rund neun bis elf Liter Frischwasser pro erzeugtem Kilogramm Wasserstoff haben. Um den Bedarf an Frischwasser zu minimieren, besonders in Regionen, wo Frischwasser ohnehin stark eingeschränkt verfügbar ist, sind Elektrolyseeinheiten typischerweise auch an Meerwasserentsalzungsanlagen gekoppelt, die den Wirkungsgrad nicht signifikant beeinflussen. Hierzu passend hat beispielsweise Bosch kürzlich bekannt gegeben, sich auch Anlagen zu widmen, die der Aufbereitung von Wasser für Elektrolyseverfahren dienen. Daraus ist ersichtlich, dass sich Geschäftsmöglichkeiten nicht nur unmittelbar bei Elektrolyseuren auftun, sondern auch in den vor- bzw. nachgeschalteten Prozessschritten. [5]

1.4 Geografische Unterschiede

Ein Überblick über die Angebots- und die Nachfragesituation für grünen Wasserstoff zeigt, dass es zwar globale Trends, dennoch aber regionale Unterschiede gibt. In vielen Ländern besteht ein großes Potenzial für die Erzeugung von grünem Wasserstoff aufgrund der Verfügbarkeit erneuerbarer Energieträger.

Beispielsweise verfügen Südeuropa, Nordafrika und der Nahe Osten über enorme solare Ressourcen, während Nordeuropa und Teile Südamerikas über reichlich Windenergie verfügen. [6]

Auch Deutschland wird um den Import von Wasserstoff nicht umhinkommen (zur Erinnerung: 10 GW Elektrolyse bis 2030 geplant, benötigt werden in etwa 40 GW). Um dies realisieren zu können, wurden bereits etliche Partnerschaften ins Leben gerufen. Eine davon ist zum Beispiel HyGATE, eine Kooperation Deutschlands mit Australien, darüber hinaus gibt es Initiativen mit Kanada, Neuseeland, weiteren EU- und afrikanischen Staaten. [7] Das deutsche BMBF hat etwa auch eine Zusammenarbeit mit SADC und ECOWAS angekündigt, um die Potenziale der grünen Wasserstoffproduktion zu erforschen. [8]

Auf der Nachfrageseite sind industrielle Zentren und dicht besiedelte Agglomerationsräume, in denen der Bedarf an sauberen Energieträgern für Verkehr, Industrie und Wärmeversorgung hoch ist, von besonderem Interesse. Dazu gehören beispielsweise die europäischen Länder, insbesondere Deutschland, Frankreich und die Niederlande, die bereits ambitionierte Wasserstoffstrategien verfolgen. [9]

Angesichts der ungleichen Verteilung von regenerativen Energiequellen und der industriellen Nachfrage nach grünem Wasserstoff werden der internationale Handel und der Aufbau von Wasserstoffinfrastrukturen eine bedeutende Rolle spielen. Länder mit hohem Potenzial für die Erzeugung von grünem Wasserstoff können zu Exporteuren für Regionen werden, in denen das Energieangebot nicht vorhanden ist bzw. die Nachfrage das Angebot übersteigt. [10]

In diesem Zusammenhang ist auch das H2Global Instrument zu erwähnen, das grünen Wasserstoff sowie Wasserstoffderivate fördert, um Technologie- und Markthochlauf zu beschleunigen. Das BMWK stellt 900 Millionen Euro für das erste Förderfenster bereit. Weitere Ausschreibungen mit bis zu 3,5 Milliarden Euro Volumen werden vorbereitet. H2Global wird von der H2Global-Stiftung umgesetzt, unterstützt von Hintco, um Angebots-Nachfrage-Preisdifferenzen auszugleichen. Ziel ist die marktwirtschaftliche Förderung der grünen Transformation von Gesellschaft und Wirtschaft. [11]

2. Elektrolysetechnologien und deren Komponenten

Im Folgenden werden die aktuell meistdiskutierten vier Haupttypen von Elektrolysetechnologien vorgestellt, nämlich AEL, PEMEL, SOEC und AEM. Die nachfolgend beschriebenen Wirkungsgrade beziehen sich auf den unteren Heizwert, zudem ist zu erwähnen, dass die prozessbeschreibenden Grafiken einen allgemeinen Aufbau widerspiegeln von dem je nach Hersteller und Anforderung von abgewichen werden kann.

Damit die Zellen effizient arbeiten und eine hohe Produktqualität erzielen können, ist es entscheidend, dass das zugeführte Wasser von Verunreinigungen wie Ionen, Partikeln, organischen Substanzen und anderen Verbindungen gereinigt

wird. Verunreinigungen könnten die elektrochemischen Reaktionen stören, die Lebensdauer der Elektroden verringern und die Leistung der Zellen beeinträchtigen. Daher ist eine gründliche Wasseraufbereitung notwendig, um eine stabile und effiziente Elektrolyse zu gewährleisten und gleichzeitig hochreinen Wasserstoff zu produzieren. Zudem werden bei den vier Systemen noch ein Gleichrichter, der den Strom von der Quelle in den benötigten Gleichstrom umwandelt, sowie der Transformator, der die Spannung an die Anforderungen der Elektrolysezelle anpasst, benötigt.

$$\eta_{el} = \frac{\dot{m} \cdot LHV}{P_{el}} \quad (2-1)$$

Mögliche Wasseraufbereitungen

1. Filtration: Das Wasser wird durch verschiedene Filter geleitet, um Verunreinigungen wie Schwebstoffe, Partikel, organische und anorganische Stoffe zu entfernen.
2. Entsalzung: Durch Umkehrosmose oder Ionenaustausch werden Salze und andere Mineralien aus dem Wasser entfernt.
3. Desinfektion: Eine chemische oder physikalische Behandlung, z. B. durch UV-Licht oder Ozon, ist erforderlich, um Bakterien, Viren und andere Keime abzutöten.
4. Entkarbonisierung: Kohlendioxid wird aus dem Wasser entfernt, um den pH-Wert zu stabilisieren.
5. Elektrodenionisation: eine spezielle Technologie, bei der durch Anlegen von elektrischem Strom noch verbliebene Ionen aus dem Wasser entfernt werden.
6. Umkehrosmose: Bei der Umkehrosmose wird Wasser durch eine halbdurchlässige Membran gepumpt, die unerwünschte Verunreinigungen wie Salze, Schwermetalle und organische Stoffe zurückhält.

2.1 Alkalische Elektrolyse (AEL)

AEL ist eine etablierte Technologie zur Wasserstoff- und Sauerstoffgewinnung. Sie nutzt eine alkalische Elektrolytlösung, üblicherweise Kaliumhydroxid (KOH), als Elektrolyt. Der AEL-Elektrolyseur arbeitet bei Drücken von bis zu 30 bar und Temperaturen von 70 bis 90 °C, der erzielte Wirkungsgrad liegt im Bereich von etwa 50 bis 68 %. [12]

Die Komponenten in AEL-Elektrolyseuren arbeiten in einem orchestrierten Zusammenspiel, um eine effiziente Wasserstoffproduktion zu ermöglichen. Pufferspeicher übernehmen die vorübergehende Wasserstofflagerung, während Pumpen den kontinuierlichen Elektrolytfluss im System sicherstellen.

Der Elektrolyseprozess basiert auf der Verwendung von Wasser und der alkalischen Lösung als Elektrolyt. Wasser dient als Ausgangsmaterial und wird durch die Elektrolyse in Wasserstoff und Sauerstoff umgewandelt. Infolgedessen ermöglicht die alkalische Lösung den Ionenfluss während des Elektrolyseprozesses.

Während der Elektrolyse wird an der Anode Wasser zu Sauerstoff und OH⁻-Ionen oxidiert. An der Kathode bildet die Reduktion von Wasser Wasserstoffgas und OH⁻-Ionen. Diese Ionen wandern durch den alkalischen Elektrolyten, oft eine Kalilauge, zur Anode und reagieren dort zu Wasser und Sauerstoff. Die Membran leitet die OH⁻-Ionen, blockiert jedoch Gase, wodurch die Vermischung von Sauerstoff und Wasserstoff verhindert wird und Wasserstoff sowie Sauerstoff effizient produziert werden.

Ein poröser Separator ermöglicht den Ionenfluss, während bipolare Platten oder Verbindungsbleche Struktur bieten. Abhängig vom Design gewährleistet eine Gasdiffusionsschicht eine gleichmäßige Gasfassung. Anoden- und Kathodenleiter tragen zur leitenden Verbindung und Steuerung des Stroms bei. Durch das koordinierte Zusammenspiel all dieser Komponenten produziert der AEL-Elektrolyseur effizient und zuverlässig Wasserstoff.

Der Wasserringkompressor übernimmt eine zentrale Rolle beim Transport des erzeugten Wasserstoffs. Er komprimiert den Wasserstoff und leitet ihn in den nächsten Schritt des Prozesses. Anschließend entfernt der Gas-Wasser-Separator überschüssiges Wasser aus dem Gasstrom, während der Deoxo-Prozess (Sauerstoffabscheider) unerwünschte Verunreinigungen, insbesondere Sauerstoff, eliminiert.

Ein wichtiger Schritt ist die Trocknung des Wasserstoffgases, um Korrosion und andere Probleme zu verhindern. Danach dient der Pufferspeicher als kurzzeitiger Zwischenspeicher für Wasserstoff, um Schwankungen in Produktion und Nachfrage auszugleichen.

Die Hochdruckkompression erhöht den Druck des Wasserstoffgases und bereitet es für die weitere Nutzung oder Lagerung vor. Schließlich unterstützt der Hochdruck-Pufferspeicher die Lagerung von hochkomprimiertem Wasserstoff, der bei Bedarf entnommen werden kann. Dieser letzte Schritt kann bei allen Elektrolysesystemen angewandt werden, wird jedoch nur in der folgenden Darstellung gezeigt.

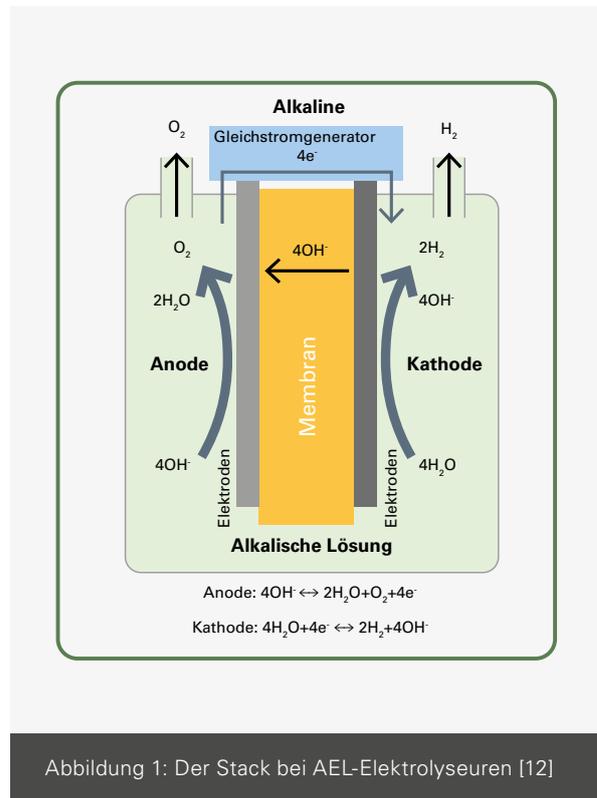


Abbildung 1: Der Stack bei AEL-Elektrolyseuren [12]

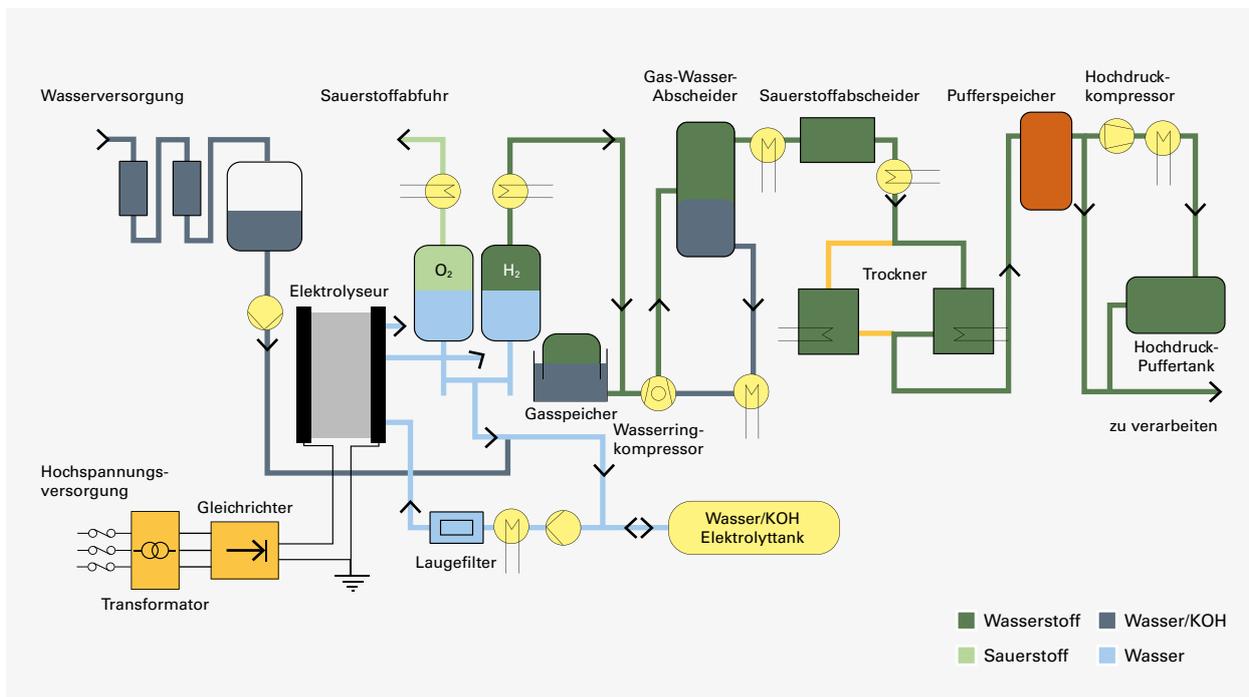


Abbildung 2: Allgemeiner Aufbau AEL [12]

Quelle: IRENA, 2020

2.2 Protonenaustauschmembran-Elektrolyse (PEMEL)

Der PEMEL-Elektrolyseur nutzt eine Protonenaustauschmembran, um den Transport von Protonen zu ermöglichen und die Elektroden zu trennen. Dieser Elektrolyseur arbeitet bei Drücken von bis zu 30 bar und Temperaturen von 50 bis 80 °C. Der erzielte Wirkungsgrad liegt zwischen etwa 50 % und 68 %, in einem ähnlichen Bereich wie die AEL. PEMEL-Elektrolyseure können zwischen 25 % und Vollast reguliert werden. [12]

Der Prozess der PEMEL findet im Stack statt. Hierbei wird Wasser mithilfe der Protonenaustauschmembran in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff aufgespalten. Die Elektrolysezelle leitet einen elektrischen Strom durch die Protonenaustauschmembran. Die katalytische Wirkung der Edelmetall-Elektrode führt zur Wasserspaltung an der Anode: Es entstehen Sauerstoff, freie Elektronen und positiv geladene H⁺-Ionen. Die Wasserstoffionen diffundieren durch die protonenleitende Membran zur Kathodenseite, wo sie mit den Elektronen reagieren und Wasserstoffgas erzeugen.

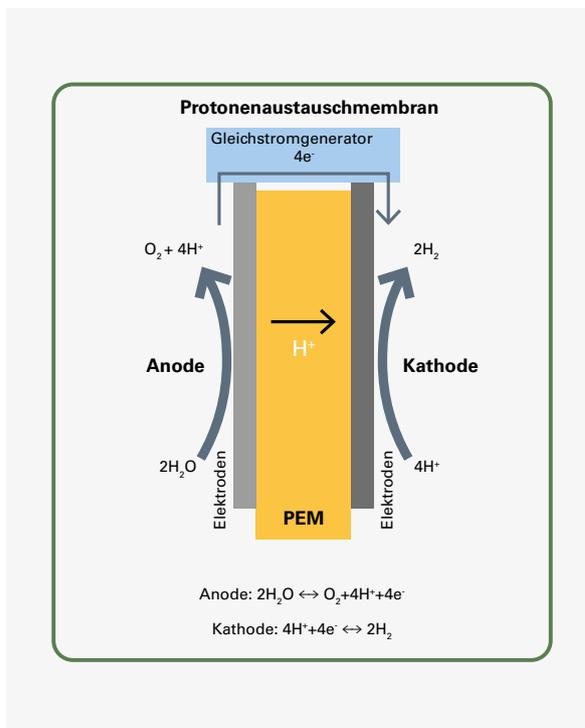
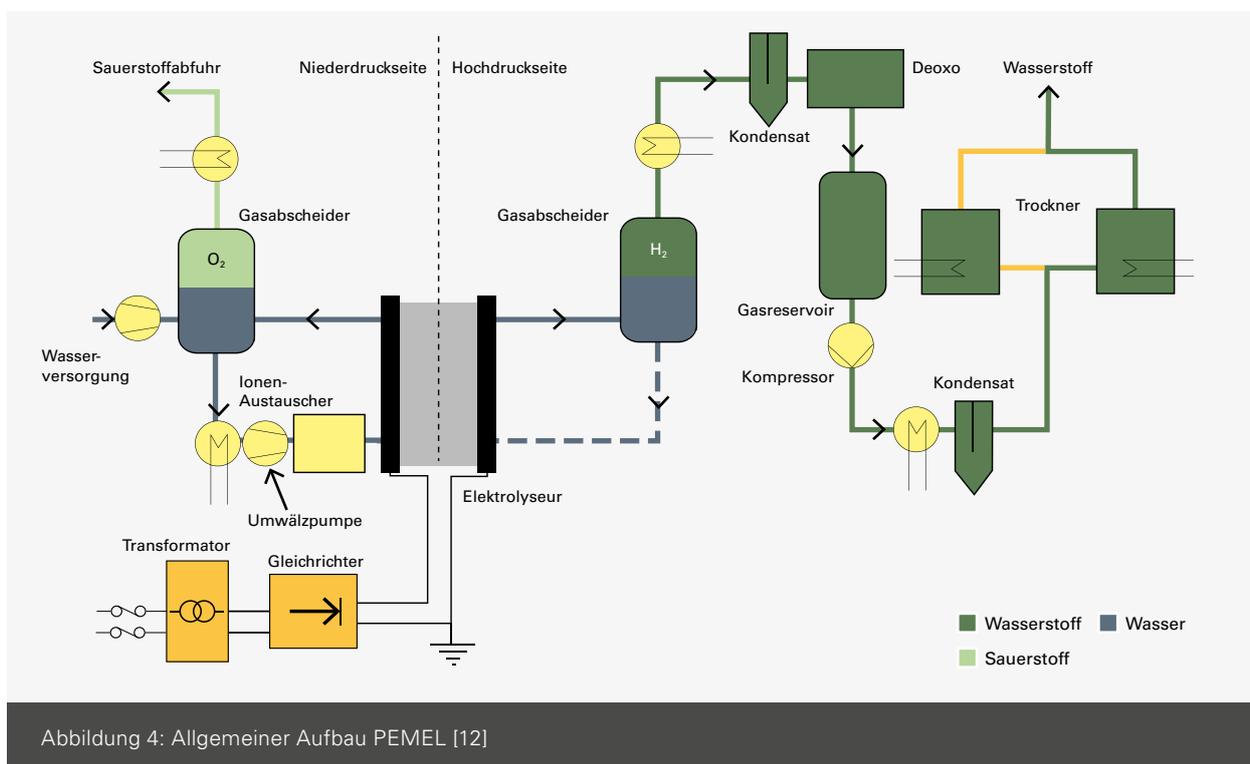


Abbildung 3: Der Stack bei PEMEL-Elektrolyseuren [12]

Quelle: IRENA, 2020

In einem PEM-Elektrolyseur ist die Protonenaustauschmembran aus einem protonenleitenden Polymer gefertigt und an ihrer Kathodenseite mit einer porösen Elektrode beschichtet, die Platin auf einem Kohlenstoffträger enthält. An der Anodenseite der Membran werden oftmals Edelmetalle wie Iridium und Ruthenium eingesetzt, entweder in metallischer Form oder als Oxide. Nach dem Stack-Prozess trennt ein Gas-Wasser-Abscheider den erzeugten Wasserstoff vom überschüssigen Wasser. Ein nachfolgender Kondensator kondensiert den Wasserdampf und separiert flüssiges Wasser. Für eine hohe Wasserstoffqualität sorgt der Deoxo, der unerwünschten Sauerstoff aus dem Wasserstoffstrom entfernt. Der Wasserstoff wird dann im Gasreservoir zwischengespeichert, bevor er vom Kompressor auf den erforderlichen Druck gebracht wird. Ein weiterer Kondensator sowie der Trockner entfernen dann übrig gebliebene Feuchtigkeit aus dem Wasserstoff.



2.3 Festoxid-Elektrolyse (SOEC)

SOEC-Systeme, auch als Hochtemperaturelektrolyse bekannt, nutzen Festoxidkeramiken als Elektrolytmaterial. Diese Technologie arbeitet bei einem Druck von 1 bar und Temperaturen zwischen 600 und 900 °C. Dadurch werden besondere Anforderungen an die Komponenten gestellt, die zur Verdampfung, Temperatur- und Druckregelung der erzeugten Gase benötigt werden. Der Wirkungsgrad von SOEC ist vergleichsweise hoch mit Werten von 75 bis 85 %. [12]

Durch einen Zulauf kommt Wasser in das System, das elektrisch oder auch durch die Abwärme aus anderen Prozessen in Wasserdampf umgewandelt wird. Es gibt auch Varianten, bei denen Wasserdampf direkt, optimal aus anderen Industrieprozessen, in das System eingespeist wird. Dadurch fällt ein Teil der Anlage weg, bei dem Verdampfungsenthalpie benötigt wird. Im Vorwärmer wird der Wasserdampf mittels eines Wärmetauscher-Netzwerks auf Betriebstemperatur für den Stack gebracht. Der Wasserdampf, der in den Stack fließt, wird nun mit Wasserstoff gemischt, um an der Kathodenseite eine reduzierende Atmosphäre

zu generieren, die Oxidation vorbeugt. Im Stack werden an der Kathode 70–80 % des Wasserdampfs in Wasserstoff umgewandelt. Das überschüssige Gemisch wird rezirkuliert und zum Gas-Wasser-Separator geschickt, wo der Dampf auskondensiert und der Wasserstoff abgenommen wird. Auf der Anodenseite wird Luft eingebracht, die hauptsächlich dem Wärmemanagement des Systems dient, hierbei entsteht zusätzlich sauerstoffangereicherte Luft. Der Prozess kann thermoneutral oder endotherm ablaufen, im letzteren Fall wird ein elektrischer Heizer verwendet. Die aktuelle Forschung zielt darauf ab, den Heizer nur zum Hochheizen des Systems zu benutzen, jedoch nicht im Betrieb. Wenn Wasserdampf in den Stack geleitet wird, durchläuft er die poröse Anode. Dort wird der Wasserdampf oxidiert, wodurch Sauerstoff und Elektronen freigesetzt werden. Die Elektronen bewegen sich extern zur Kathode. Zur gleichen Zeit wird an der Kathode, durch die poröse Struktur und in Anwesenheit der freien Elektronen, der Wasserdampf zu Wasserstoffgas reduziert. Der während dieses Prozesses an der Anode erzeugte Sauerstoff bleibt auf der Anodenseite. Der gesamte Vorgang des Wassersplittings, bei dem Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff umgewandelt wird, findet somit im Stack des SOEC-Elektrolyseurs statt. Die Elektrolytschicht ermöglicht den Transport von Ionen (Sauerstoffionen und Protonen) zwischen Anode und Kathode.

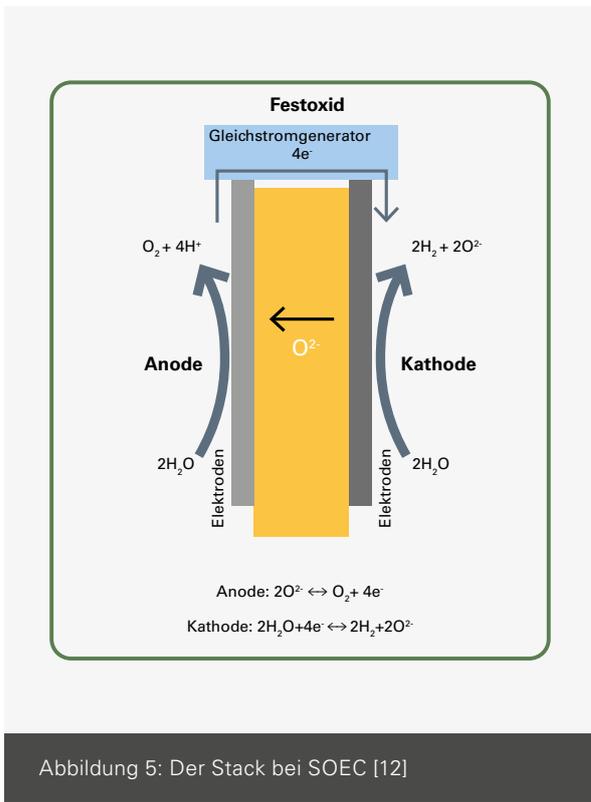


Abbildung 5: Der Stack bei SOEC [12]

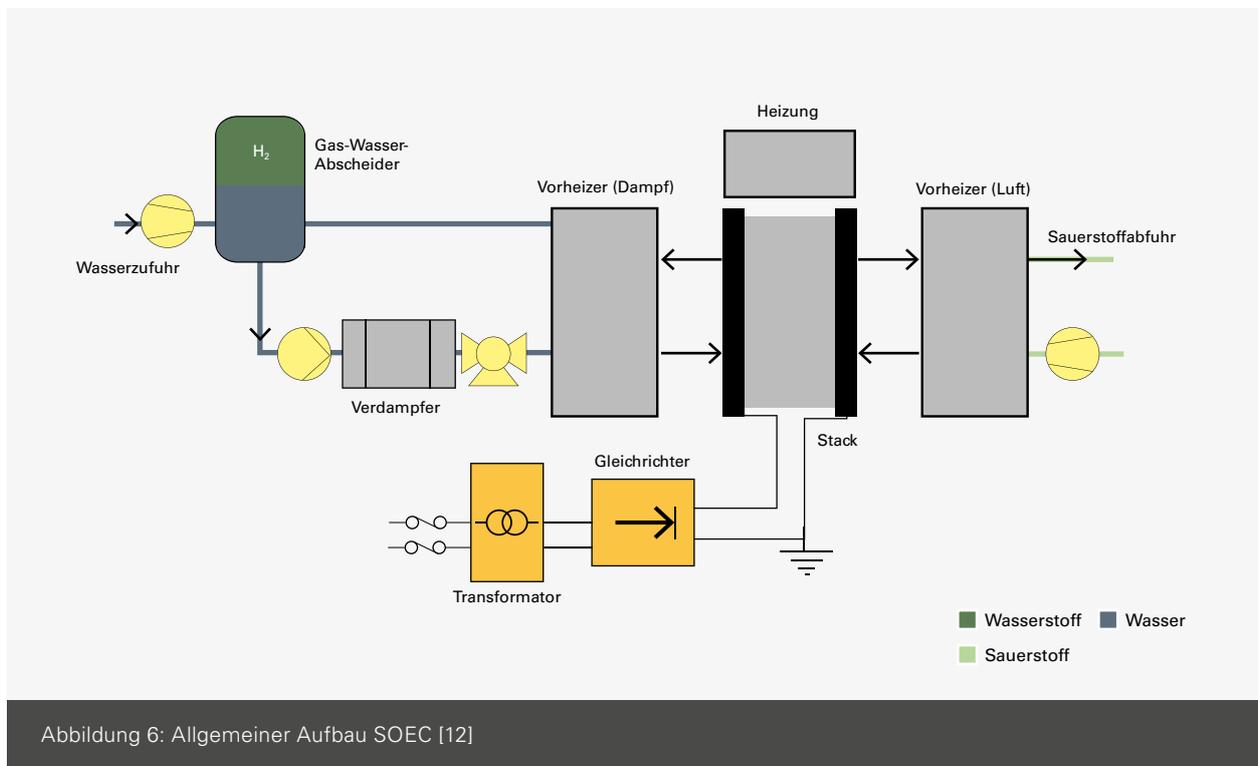


Abbildung 6: Allgemeiner Aufbau SOEC [12]

Weitere Anwendungsmöglichkeiten

1. Co-Elektrolyse

Die Co-Elektrolyse ist ein Verfahren zur Herstellung von Wasserstoff und anderen Brennstoffen durch die Elektrolyse von Wasser und CO_2 . Im Gegensatz zur konventionellen Elektrolyse wird die CO_2 -Reduktion direkt in die Elektrolyse integriert, wodurch sowohl Wasser als auch CO_2 gleichzeitig zu Brennstoffen in Form von Kohlenwasserstoffen umgewandelt werden können.

Während der Co-Elektrolyse wird das Wasser an der Kathode in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten, während CO_2 an der Anode zu Kohlenstoffmonoxid und Sauerstoff reduziert wird. Die elektrochemische Reaktion in der SOEC wird durch Anlegen einer elektrischen Spannung an die Elektroden hervorgerufen. Der Vorteil der Co-Elektrolyse besteht darin, dass sie sowohl Wasser als auch CO_2 als Ausgangsstoffe nutzt, wodurch sie eine vielversprechende Methode zur Emissionsreduzierung darstellt. Darüber hinaus ist die erzeugte Brennstoffmischung (ein Synthesegas, das wiederum in andere Gase wie Methan oder Methanol umgewandelt werden kann) vielseitig einsetzbar, was sie zu einer attraktiven Option für die Energiewirtschaft macht.

2. rSOC (reversible Festoxid-Elektrolysezelle)

Die rSOC stellt eine innovative Weiterentwicklung in der Brennstoffzellentechnologie dar. Der rSOC-Prozess entspricht der Umkehrung der SOEC. Hierbei wird die Zelle im Brennstoffzellenmodus betrieben und erzeugt aus Wasserstoff elektrische Energie und Wärme.

2.4 Anionenaustauschmembran-Elektrolyse (AEM)

Die AEM-Technologie verwendet eine spezielle Anionenaustauschmembran als Elektrolyt, die spezifische Anforderungen an die Komponenten zur Elektrolytregeneration und -lagerung stellt. Die AEM-Technologie arbeitet bei Drücken von bis zu 35 bar und Temperaturen von 40 bis 60 °C. Der Wirkungsgrad von AEM liegt im Bereich von 52 bis 67 %, vergleichbar mit AEL und PEM. [12] Im Vergleich zu AEL kommt AEM ohne den alkalischen Elektrolyt aus und im Vergleich zu PEM braucht es bei AEM keine knappen und teuren Rohstoffe wie Platin, Iridium oder Ruthenium.

Mittels einer Umwälzpumpe wird ein stetiger Fluss des Elektrolyten im Elektrolyttank aufrechterhalten. Hierbei spielt ein Wärmetauscher eine Rolle, indem er die Temperatur reguliert, während der Ionen-Austauscher die Elektrolytlösung dabei unterstützt, Ionen aufzunehmen und abzugeben.

Dabei kommt eine Anionenaustauschmembran zum Einsatz, die den Transport von Anionen ermöglicht und gleichzeitig als Separator zwischen den Elektroden dient. Im AEM-Verfahren wird Wasserdampf mithilfe dieser Membran in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff aufgespalten.

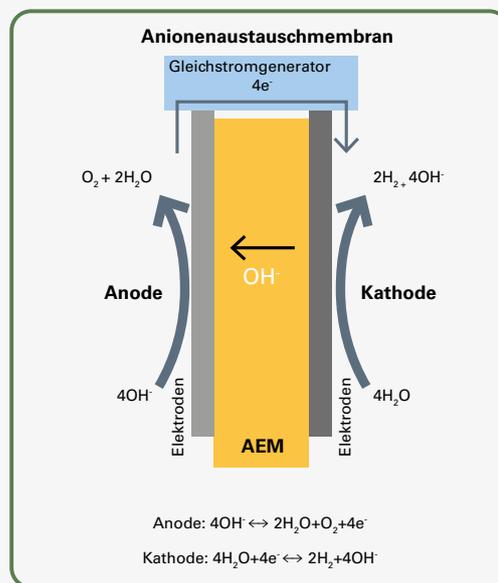


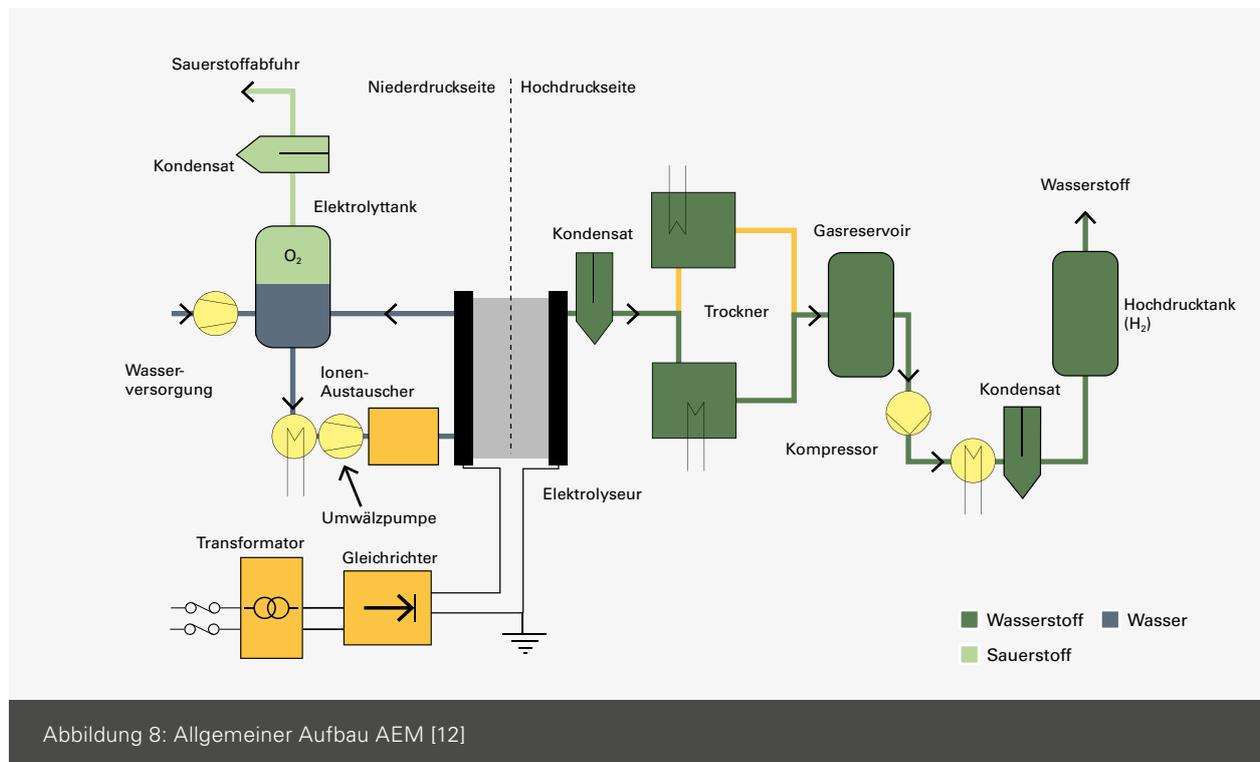
Abbildung 7: Der Stack bei AEM-Elektrolyseuren [12]

Quelle: IRENA, 2020

Im AEM-Elektrolyseur durchdringt Wasser die Membran und verlagert sich von der Anode zur Kathode. Dort bildet sich Wasserstoff, der durch die Gasdiffusionsschicht entlassen wird. Parallel dazu bewegen sich Hydroxidionen (OH^-) durch die Membran in Richtung Anode. An der Anode werden diese Ionen zu Sauerstoff umgewandelt, der über die Gasdiffusionsschicht abtransportiert wird.

Unterstützt durch den Elektrokatalysator, der chemische Reaktionen zur Wasserspaltung vorantreibt, gewährleistet eine Gasdiffusionsschicht eine gleichmäßige Gasverteilung. Bipolare Platten oder Verbindungsbleche bieten strukturellen Halt und ermöglichen den Stromfluss. Der Elektrolyt, häufig in die Membran integriert, erleichtert den Transport der Ionen. Die Anoden- und Kathodenleiter leiten den elektrischen Fluss, um die Wasserstoffproduktion im AEM-Elektrolyseur in koordiniertem Zusammenspiel zu ermöglichen.

Nach Abschluss des Elektrolyseprozesses im AEM-Verfahren übernehmen verschiedene Komponenten die Aufbereitung und Bereitstellung des erzeugten Wasserstoffgases. Sinngemäß ist der weitere Prozess vergleichbar mit der AEL, daher wird an dieser Stelle nicht mehr im Detail darauf eingegangen.



2.5 Vergleich der Elektrolysetechnologien

Die folgende Tabelle zeigt die wesentlichsten Merkmale der vier Elektrolysetechnologien in einer Übersicht.

[2],[12]	AEL	PEMEL	SOEC	AEM
Status	Kommerziell	Kommerziell	Annähernd kommerziell	Prototyp
Marktanteil (2021)	70 %	25 %	~5 %	
Temperatur	70–90 °C	50–80 °C	600–900 °C	40–60 °C
Druck	<30 bar	<30 bar	1 bar	<35 bar
Wirkungsgrad Stack (LHV)	50–68 %	50–68 %	75–85 %	52–67 %
Stromverbrauch System kWh/kg H ₂	50–78	50–83	40–50	57–69
Wasserstoffqualität	99,9–99,9998 %	99,9–99,9999 %	99,9 %	99,9–99,999 %
Lebensdauer (h) (Stack)	60.000	50.000–80.000	40.000	>5.000
CAPEX-System (10 MW)	500–1.000 USD/kW	700–1.400 USD/kW	-	-

Quelle: AVL, [11]

Tabelle 1: Vergleich der Elektrolysetechnologien

Reinheit von Wasserstoff

Bei der Verwendung von Wasserstoff in bspw. Nutzfahrzeugen mit PEM-Brennstoffzellen ist ein hoher Reinheitsgrad unerlässlich, um eine effiziente und störungsfreie Funktion zu gewährleisten. Verunreinigungen wie Kohlenmonoxid (CO), Kohlendioxid (CO₂), Schwefelverbindungen und Feuchtigkeit können die Leistung und Lebensdauer der PEM-Brennstoffzelle beeinträchtigen.

Das gängige Bewertungsschema in der Industrie setzt sich aus zwei Zahlen zusammen z. B. 4.5. Hierbei gibt die erste Stelle die Häufigkeit der Zahl 9 an, was „99,99“ ausmacht, und die zweite Stelle die letzte Ziffer, das würde in diesem Fall einer Qualität von 99,995 % entsprechen.

Aus Marktsicht sind heute üblicherweise AEL im Einsatz, gefolgt von PEMEL. SOEC oder AEM sind heute de facto im großen Maßstab noch nicht präsent. AEL- und PEMEL-Elektrolyseure sind kommerziell verfügbar, wobei die alkalischen Elektrolyseure eine ausgereifere Technologie sind und seit langem in der Chlor-Alkali-Industrie verwendet werden. Für großindustrielle Prozesse ist (aktuell noch) die Nutzung von AEL-Elektrolyseuren stark präsent, weil es die gängigste Technologie ist. Es ist viel Erfahrung, auch im großen Maßstab, vorhanden.

Inzwischen haben PEMEL-Elektrolyseure auch ihren Platz gefunden, unter anderem für kleinskalige Anwendungen, etwa die dezentrale Energieversorgung in Wohngebieten oder die lokale Wasserstoffproduktion für Brennstoffzellenfahrzeuge. Die PEMEL zeichnet sich insbesondere durch eine schnelle Reaktionszeit aus. [13]

SOEC hingegen eröffnen Möglichkeiten für eine sehr effiziente Wasserstoffproduktion in Industrien mit hohem Wärmeangebot wie Stahl- oder Zementherstellung, die Produktion von E-Fuels sowie bspw. Ammoniak. Bei der SOEC liegt der Technologiereifegrad derzeit bei TRL 7–8, und bedeutet, dass die Technologie bereits in einer relevanten Umgebung demonstriert wurde. [14]

AEM-Elektrolyseure befinden sich noch in einem frühen Entwicklungsstadium. Im Jahr 2020 wurde die Technologie von der IEA als TRL 4 (früher Prototyp) bewertet, aber sie hat sich schnell weiterentwickelt, und die IEA hat ihre Bewertung inzwischen auf TRL 5–6 (vollständiger Prototyp im Maßstab) erhöht. Es gibt bereits verfügbare Prototypen im Kilowatt-Maßstab, sodass AEM-Elektrolyseure in naher Zukunft in größeren Stückzahlen produziert werden können.

Alternative Technologien zur Wasserstoffherstellung

In Zukunft könnten Wettbewerbstechnologien den Marktanteil von Elektrolyseuren begrenzen bzw. die Verfügbarkeit von Wasserstoff in großen Mengen unterstützen. Im Folgenden drei mögliche Technologien, an denen heute gearbeitet wird.

1. Gewinnung von Wasserstoff mithilfe thermochemischer Verfahren (derzeit TRL 1–3) wie thermische Dissoziation und photokatalytische Wasserspaltung: Diese Verfahren befinden sich noch in einem frühen Stadium, bieten jedoch vielversprechende Möglichkeiten für die effiziente und nachhaltige Erzeugung von Wasserstoff. Ebenso könnten Biomasseverfahren (TRL 5–6) wie Fermentation und Dampfreformierung in der Wasserstoffproduktion an Bedeutung gewinnen. [14]
2. Kapillarelektrolyse von Hysata: Im Gegensatz zu herkömmlichen Elektrolyseverfahren, bei denen sich Elektroden im Wasser befinden, nutzt die Kapillarelektrolyse hauchdünne Kapillaren, um den Elektrolyten zwischen den Elektroden zu transportieren. Dieser kontinuierliche Kapillareffekt ermöglicht die effiziente Wasserstoff- und Sauerstoffproduktion (mit einem Wirkungsgrad von bis zu 95 %). Ein poröser Separator aus Polyethersulfon sorgt dabei für die notwendige Durchflussrate. Die Anode besteht aus einem beschichteten Nickelgitter, während die Kathode aus Platin und Kohlenstoff besteht. [15]
3. Kombination eines Zink-Luft-Akkus mit einem Elektrolysesystem. Während des Ladevorgangs trennen sich Wasserstoff und Sauerstoff durch Elektrolyse, Zink reduziert sich zu Zinkoxid. Beim Entladen verbinden sich Zink und Sauerstoff wieder zu Zinkoxid, während Wasserstoff freigesetzt wird. [16]

	AEL	PEMEL	SOEC	AEM
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> - Niedrige Anschaffungskosten - Hohe Lebensdauer - Einfacher Aufbau - Etabliertes System 	<ul style="list-style-type: none"> - Höchste Wasserstoffqualität - Kompaktes Design - Schnelle Reaktionszeit 	<ul style="list-style-type: none"> - Hohe Effizienz - Geringere Anteile an Edelmetallen benötigt - CO₂-Co-Elektrolyse möglich - Reversibler Modus 	<ul style="list-style-type: none"> - Keine Edelmetalle im Katalysator
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> - Korrosive Lauge - Niedrigste Wasserstoffqualität 	<ul style="list-style-type: none"> - Empfindlichkeit gegenüber Verunreinigungen (Wasser) 	<ul style="list-style-type: none"> - (Idealerweise) Abwärme vorhanden - (Noch) hohe Anschaffungskosten - Effizienter Betrieb nur 24/7 möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - (Noch) unausgereift - Chemisch-mechanische Stabilität der Membran - Niedrige Leitfähigkeit und langsame Katalysator-Kinetik

Tabelle 2: Vor- und Nachteile von Systemen

Quelle: AVL, [11]

3. Potenziale in der Herstellung von Elektrolyseuren

Aufbauend auf die Darstellungen der vier Elektrolysetypen werden nun die wesentlichen Komponenten hinsichtlich verschiedener Kriterien bewertet, um darauf aufbauend eine Übersicht geben zu können, welche Komponenten unter Berücksichtigung spezieller Rahmenbedingungen aus Herstellersicht interessant sein könnten. Zudem können auch weitere Punkte wie Montage oder Einzel-schrittfertigungen eine wirtschaftliche Option bieten.

In diesem Zusammenhang sei einleitend auch das geförderte Projekt „BW-Elektrolyse“ in Baden-Württemberg erwähnt. Es eröffnet insbesondere kleinen und mittelständischen Unternehmen wirtschaftliche Chancen in der Produktion von Elektrolyseuren und zugehörigen Bauteilen. Dies ermöglicht diesen Firmen den Zugang zu wachsenden Märkten für Elektrolysetechnologien und die Sicherung von Marktanteilen. Vor allem für exportorientierte Unternehmen im Maschinen- und Anlagenbau sowie der Komponenten-Zulieferindustrie ist „BW-Elektrolyse“ interessant. Die Landesregierung investiert fünf Millionen Euro, um Unternehmen im Land eine führende Position bei Wasserstofftechnologien zu verschaffen. Frühzeitiges Engagement in dieser Power-to-X-Technologie eröffnet die Chance, sich international erfolgreich zu positionieren und durch technologischen Vorsprung langfristig wirtschaftlichen Erfolg zu erzielen. Als Paradebeispiel für das Wertschöpfungspotenzial im Land entsteht in „BW-Elektrolyse“ ein produktnaher Systemdemonstrator mit einer Leistung von einem MW. Dieser Elektrolyseur soll viele Bauteile aus Baden-Württemberg beinhalten und den beteiligten Unternehmen die Möglichkeit bieten, eigene Produkte in einer realen Umgebung zu testen und öffentlichkeitswirksam zu präsentieren. [17]

3.1 Grundsätzliche Anforderungen an Elektrolyseurkomponenten

Die Auswahl der richtigen Komponenten für Elektrolyseure spielt wie in allen Systemen eine entscheidende Rolle hinsichtlich Effizienz, Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit dieser Anlagen. Elektrolyseurkomponenten können hinsichtlich der an sie gestellten Anforderungen in drei wesentliche Bereiche eingeteilt werden.

1. Im Frischwasserpfad sind die Komponenten oft weniger massiv und weniger anspruchsvoll, da sie hauptsächlich mit gereinigtem, de-ionisiertem Wasser in Berührung kommen. Diese Komponenten umfassen beispielsweise Pumpen, Filter und Rohrleitungen, die für den kontinuierlichen Wasserfluss und die Reinigung des Elektrolyseursystems erforderlich sind.

2. Die chemisch reaktiven Gase im Wasserstoffpfad erfordern dagegen chemische Beständigkeit gegenüber Wasserstoff und Sauerstoff, daher eine sorgfältige Materialauswahl. Zu den Komponenten im Wasserstoffpfad gehören unter anderem Wasserstoffkompressoren, Wärmetauscher und Separatoren, die für die Wasserabscheidung, Reinigung und Verdichtung für die spätere Lagerung verantwortlich sind.
3. Im Stack selbst findet der eigentliche Elektrolysevorgang mit der Reduktion des Wassers bzw. der Lauge zu Wasserstoff statt. Hier befinden sich Elektroden und Membranen, um den effizienten Transfer von Elektronen und Ionen zu gewährleisten. Die Komplexität der Komponenten im Stack resultiert aus den hohen Anforderungen an die Leistung, Haltbarkeit und Zuverlässigkeit des Elektrolyseprozesses. Zusätzlich zur präzisen Herstellung der Komponenten erfordert der Stack eine sorgfältige Kontrolle der Temperatur, des Druckes und der Gaskonzentrationen, um optimale Ergebnisse zu erzielen.

3.2 Bewertung der Komponenten

Die Bewertung wurde im ersten Schritt verallgemeinert und von Expert:innen in den jeweiligen Themenfeldern durchgeführt, d.h. unabhängig davon, ob sie für Groß- oder Kleinunternehmen relevant war. Erst anschließend erfolgte eine Anpassung an Bedürfnisse speziell von Klein- und Mittelunternehmen, um mögliches Potenzial für einen Markteintritt darzustellen. Die Skala reicht von eins bis zehn, wobei ein höherer Wert jeweils als „einfacher“ für ein Unternehmen gesehen werden kann, da damit geringere Einstiegshürden verbunden sind. Hierbei wurden Kosten, die für die Herstellung benötigt werden, und Produktionsanforderungen am stärksten gewichtet. Dem folgen die Marktsituation sowie die Verfügbarkeit von Ressourcen und Material. Die geringste Gewichtung wurde der Komplexität zugeordnet. Der Durchschnitt dieser gewichteten Werten entspricht der Gesamtwertung einzelner Komponenten und entscheidet somit über das folgende Rating.

Die Kriterien in der Übersicht.

1. Die **Komplexität** der Komponenten bezieht sich auf technische Anforderungen und die Integration in bestehende Systeme. Eine höhere Bewertung bedeutet hier, dass die Bauteile weniger komplex sind. Dies kann viele Gründe haben, unter anderem geforderte Genauigkeiten oder geometrische Formen.
2. Die **Verfügbarkeit** von Ressourcen und Fachpersonal betrifft die Zugänglichkeit von Werkstoffen, Technologien und qualifizierten Mitarbeiter:innen. Hier gilt: Je höher die Bewertung ist, desto leichter ist der Zugang zu den oben genannten Ressourcen.
3. **Kosten und Produktion** sind entscheidend für die Auswahl von Elektrolyseuren sowie Komponenten. In diesem Punkt werden unter anderem Themen berücksichtigt wie Durchlaufzeit, Skalierbarkeit und zu erbringende Vorleistungen. Die einzelnen Komponenten sollten sowohl kosteneffizient sein als auch einen zuverlässigen Betrieb ermöglichen. Hier gilt: je höher die Bewertung, desto leichter beziehungsweise günstiger kann man produzieren.
4. Die **Marktbewertung** stellt sicher, dass die ausgewählten Komponenten den aktuellen und zukünftigen Marktanforderungen entsprechen, unter anderem in Bezug auf Trends, Nachfrage, Wettbewerb und regulatorische Rahmenbedingungen. Eine höhere Bewertung impliziert einen (angenommenen) leichteren Markteinstieg.

Durch diese umfassende Bewertung der Komponenten von Elektrolyseuren für Klein- und Mittelunternehmen können fundierte Entscheidungen bei der Auswahl erleichtert werden. Die angepasste Bewertungstabelle ermöglicht die Identifizierung von Optionen, um in die Produktion einzusteigen.

Nachfolgend wird die Bewertung von drei ausgewählten Komponenten exemplarisch dargestellt, Puffertank, Kondensator und Feststoffelektrolyseur um Unterschiede in den jeweiligen Kategorien zu demonstrieren.

	Gesamt	Komplexität	Verfügbarkeit	Kosten und Produktion	Marktbewertung
Puffertank (AEL)	8,04	9,50	9,67	7,50	6,00
Kondensator (PEMEL)	6,67	7,67	6,00	6,33	7,00
Feststoff-elektrolyt (SOEC)	4,48	3,00	3,33	2,67	9,00

Quelle: AVL

Tabelle 3: Auszug aus der Bewertung ausgewählter Komponenten

Bei den genannten drei Komponenten ergibt sich, dass der Puffertank die beste Bewertung hat, gefolgt von Kondensator und Feststoffelektrolyt. Die Kategorien Verfügbarkeit sowie Kosten und Produktion sind sichtlich verschieden bewertet, entscheiden also die finale Bewertung maßgeblich mit. Während Kondensatoren und Puffertanks in der Regel mit einfachen Speichermechanismen arbeiten, um Energie zu speichern oder kurzzeitig bereitzustellen, basiert ein Feststoffelektrolyt auf dem Transport von Ionen durch ein festes Medium. Dies erfordert ein tiefes Verständnis von Materialwissenschaften, Chemie und Elektrochemie. Die Herstellung solcher Elektrolyte erfordert spezielle Techniken und die richtige Wahl der Materialien, um sicherzustellen, dass sie effizient arbeiten und sicher sind. Daher gilt der Feststoffelektrolyt in der technologischen Welt als eine anspruchsvollere und komplexere Technologie im Vergleich zu Kondensatoren oder Puffertanks.

Um aus den Bewertungen Schlussfolgerungen ziehen zu können, wurden die Komponenten gemäß ihrer Bewertungsergebnisse in drei Kategorien aufgeteilt. Die Gliederung nach Komplexität eines möglichen Markteintritts soll Unterschiede in Anforderungen und Hürden besser zu veranschaulichen. Komponenten aus Kategorie zwei und drei stellen höhere Anforderungen, da sie ein fortgeschrittenes chemisches, technisches und physikalisches Verständnis erfordern, das die Nuancen und die Komplexität ihrer Funktionsweise und Interaktion unterstreicht. Es sei angemerkt, dass sich die drei Kategorien auf einen Neueinstieg eines Unternehmens in die Produktion beziehen. Im Fall, dass bereits ähnliche Komponenten produziert werden, ist es für einen Betrieb unter Umständen leichter, die neuen Bauteile in das Portfolio aufzunehmen.

Kategorie 1 (Rating >7): commodity-like

In Kategorie eins werden Komponenten aufgeführt, die als relativ einfach einzustufen sind. Hierzu gehören Wassertanks, Wasser- und Luftfilter, Pumpen, Wärmetauscher (Luft), elektrische Luftheizer, Rahmen sowie „einfache“ Klammern und Toleranz-Kompensatoren. Diese Komponenten erfordern weniger komplexe Technologien und haben verhältnismäßig geringe Anforderungen. Ein Einstieg in die Wasserstoffproduktion mit Fokus auf Komponenten der Kategorie eins könnte zügig realisiert werden, da die dafür notwendigen Ressourcen in der Regel leichter verfügbar sind und der Markt möglicherweise einfacher zu erschließen ist.

Kategorie 2 (Rating 6–7): versiert

Kategorie zwei umfasst Komponenten wie Transformator, Gleichrichter, Kondensat-/Luft-Separatoren, Wärmetauscher (Gas/Wasser), Trockner, Filter, Pumpen (Elektrolyt, Wasserstoff), Katalysatoren, Wasseraufbereitung, Verdampfer sowie „mittelschwere“ Klammern, Toleranz-Kompensatoren, Flansche, Rohre und Schweißgruppen. Diese Komponenten sind bereits etwas komplexer als die in Kategorie 1 genannten. Hier sind ein höheres technisches Know-how und spezifische Kenntnisse erforderlich. Der Markt für Komponenten der Kategorie zwei ist anspruchsvoller als der für Kategorie eins, da spezifische technologische Anforderungen erfüllt werden müssen. Es ist wichtig zu beachten, dass Komponenten in Kategorie zwei, wie beispielsweise Wasserstoffverdichter oder Katalysatoren, besondere Vorsicht im Umgang mit Wasserstoff erfordern, da dieser hochentzündlich ist und spezielle Sicherheitsvorkehrungen erfordert.

Kategorie 3 (Rating <6): komplex

Kategorie drei umfasst Komponenten wie (Hochdruck-)Kompressoren, Elektrolyt, Anoden und Kathoden, Bipolarplatten, Interkonnektoren, Elektrokatalysatoren (Stack), Ejektoren, Dichtungen, „komplexe“ Toleranz-Kompensatoren, Flansche und Isolierungen. Diese Komponenten stellen die höchste Komplexitätsstufe dar. Zusätzlich ist wichtig zu beachten, dass diese Komponenten aufgrund ihrer höheren Komplexität und spezialisierten Anforderungen mit hohen Drücken und Temperaturen beaufschlagt werden und eine umfangreiche Vorbereitung und Expertise erfordern. Im Zusammenhang mit SOEC-Systemen müssen zudem hohe Temperaturen zwischen 600 °C und 900 °C berücksichtigt werden. Diese Temperaturen stellen entsprechende Anforderungen an Kompensatoren und andere Bauteile, da Wärmeausdehnung und Temperaturwechsel gesondert berücksichtigt werden müssen. Der Einstieg in den Markt könnte aufgrund der hohen Komplexität der Komponenten eine Herausforderung darstellen, da vielschichtige technische Anforderungen und umfassendes Fachwissen gefordert sind. Jedoch könnten sich größere Profitmargen ergeben, da diese Hürden möglicherweise nur von wenigen Wettbewerbern überwunden werden. Dies könnte zu mehr Preissetzungsfreiheit, erhöhter Differenzierung und weniger Konkurrenzdruck führen. Daher bietet der Einstieg in den Markt der Kategorie drei möglicherweise eine strategische Chance für langfristige rentable Positionierung durch höhere Profitmargen und geringere Konkurrenz.

	Kategorie 1: commodity-like	Kategorie 2: versiert	Kategorie 3: komplex
AEL	<ul style="list-style-type: none"> - Wassertanks - Pumpe (H₂O) 	<ul style="list-style-type: none"> - Transformator - Gleichrichter - Laugenfilter - Wärmetauscher - Elektroden - Separatoren - (Hochdruck-)Kompressor (H₂) - Trockner 	<ul style="list-style-type: none"> - Elektrolyt - Anode - Kathode - Elektrokatalysator - Bipolarplatten - (Hochdruck-)Kompressor (H₂) - Gasdiffusionsschicht
AEM	<ul style="list-style-type: none"> - Wassertanks - Pumpe (H₂O) 	<ul style="list-style-type: none"> - Transformator - Gleichrichter - Wärmetauscher - Ionentauscher - Separatoren - Trockner - Anoden-/Kathodenleiter - Hochdrucktank 	<ul style="list-style-type: none"> - Anionenaustauschmembran - Anode - Bipolarplatten - Elektrolyt - Elektrokatalysator - Gasdiffusionsschicht - Kathode - Kompressor (H₂)
PEMEL	<ul style="list-style-type: none"> - Wassertanks - Pumpe (H₂O) 	<ul style="list-style-type: none"> - Transformator - Gleichrichter - Wärmetauscher - Wasseraufbereitung - Kondensator - Katalytischer Sauerstoffreduzierer - Trockner - Anoden-/Kathodenleiter - Sauerstoffverdünnung 	<ul style="list-style-type: none"> - Protonenaustauschmembran - Anode - Kathode - Elektrokatalysator - Gasdiffusionsschicht - Bipolarplatten/Interkonnektoren - Elektrolyt - (Hochdruck-)Kompressor (H₂)
SOEC	<ul style="list-style-type: none"> - Elektroheizer - Wassertanks - Pumpe (H₂O) - Luftfilter - Wärmetauscher (Luft) 	<ul style="list-style-type: none"> - Transformator - Gleichrichter - Wasseraufbereitung - Verdampfer - Wärmetauscher - Gebläse - Ggf. CO₂-Leitung - Supportstruktur - Anoden-/Kathodenleiter 	<ul style="list-style-type: none"> - Syngas-Kompressor - Ejektor - Kondensator - Kompressor (H₂, Syngas) - Feststoffelektrolyt - Interkonnektoren - Elektrokatalysator - Anode - Kathode
Allgemein	<ul style="list-style-type: none"> - Klammern - Flansche (PEMEL) - Rahmen - Toleranzen-Kompensatoren (PEMEL) 	<ul style="list-style-type: none"> - Flansche (AEL, AEM) - Rohre - Schweißgruppen - Toleranzen-Kompensatoren (AEL, AEM) - Isolierung 	<ul style="list-style-type: none"> - Flansche (SOEC) - Toleranzen-Kompensatoren (SOEC) - Dichtungen

Tabelle 4: Bewertung der Komponenten

3.3 Vormontage, Gehäuse- und Rahmenherstellung

Bei der Produktion von Komponenten für Elektrolyseure ist die Vormontage (Preassembly) ein wichtiger Aspekt. Hierbei handelt es sich beispielsweise um die präzise Positionierung und Ausrichtung von Bauteilen zueinander, um sie anschließend prozesssicher und mit hoher Genauigkeit fügen zu können. Außerdem kann es sich um die Kombination einzelner Komponenten zu funktionalen Bauteilgruppen handeln, insbesondere des sogenannten Stackmoduls: Mehrere Zellenpakete müssen passend angeordnet und in ein Gehäuse integriert werden. Es besteht die Chance, sich auf die Vormontage und den Zusammenbau dieser Bauteile inkl. Einbau in einem Gehäuse zu spezialisieren.

Als besonderer Schritt der Vormontage müssen bei höheren Leistungsanforderungen beziehungsweise für die Produktion hoher Wasserstoffmengen auch beim SOEC mehrere Stacks zu einem Stackmodul verbunden werden. Diese größeren, leistungsfähigeren Einheiten erfordern eine robuste und mit geringen Toleranzabweichungen gestaltete Verbindung für die Medien. Dies geschieht über sogenannte Sammelleitungen (Manifolds) als Guss- oder als Schweißbaugruppe, die mit Flanschen und Leitungen verbunden werden.

Für größere Systeme im MW-Bereich können mehrere Stackmodule beispielsweise in einem Container integriert werden und mit einer entsprechenden Balance-of-Plants-Einheit (entspricht allen Komponenten außerhalb des Stacks) kombiniert und aufgebaut werden. Dies beinhaltet auch die Herstellung von Rahmenstrukturen als Support für den Aufbau großer Anlagen, wo es Potenzial für den schweren Stahlbau gibt. Je nach Kraftwerksgröße können in weiterer Folge mehrere Container gestapelt und erweitert werden.

3.4 Einzelschrittprozesse und Adaption bestehender Produkte

Bei einzelnen Komponenten wie Bipolarplatten oder Interkonnektoren, die aus Edelmetallen oder Leichtmetallen hergestellt werden, können auch Einzelschritte wie Stanz-, Präge- und Fließpressen oder andere kalte Umformtechnologien zum Einsatz kommen. Es gibt bereits Hersteller, die diese Anlagen liefern, so besteht die Option für Unternehmen, die Maschinen zu erwerben, um sich auf diese Einzelschritte zu spezialisieren. Darüber hinaus können Unternehmen ihr bestehendes Portfolio z. B. im Bereich von Pumpen oder Wärmetauschern den Anforderungen entsprechend adaptieren und somit einen Eintritt in den Elektrolyseurmarkt anvisieren.

4. Ausblick in die Zukunft

Im Hinblick auf die Möglichkeiten in der Herstellung von Elektrolyseuren und die wachsende Bedeutung von grünem Wasserstoff als Energieträger gibt es vielversprechende Absatzmärkte in Europa. Europa hat das Potenzial, eine starke Position in der Elektrolyseurindustrie einzunehmen und von der steigenden Nachfrage nach grünem Wasserstoff zu profitieren. [18] Eine gezielte Förderung und Unterstützung durch politische Maßnahmen sowie Investitionen in Forschung und Entwicklung sind entscheidend, um die Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Branche zu stärken und die Energiewende voranzutreiben. [19]

Elektrolyseure können Leistungen bis zu mehreren hundert MW abdecken. Um den Bedarf von 130 bis 200 GW bis zum Jahr 2030, wie er von der IEA prognostiziert wird, zu decken, würde eine beträchtliche Anzahl von Elektrolyseuren erforderlich sein. [2]

Die EU-Wasserstoffstrategie gliedert sich in drei Phasen. Phase eins (2020–24) betont die Dekarbonisierung und Förderung neuer Wasserstoffanwendungen mit einem Ziel von 6 GW Wasserstoffelektrolyse auf Basis erneuerbarer Energien bis 2024. In Phase zwei (2024–30) strebt man die Integration von Wasserstoff in das Energiesystem an, mit bis zu 40 GW Wasserstoffelektrolyse auf Basis erneuerbarer Energien bis 2030. Dabei wird Wasserstoff schrittweise in Bereichen wie Stahlherstellung und Transport eingesetzt. Phase drei (ab 2030) fokussiert sich auf den großflächigen Einsatz dieser Wasserstofftechnologien, besonders in schwer dekarbonisierbaren Sektoren. [20]

Hydrogen Valley

Hydrogen Valley ist die Bezeichnung für eine Region oder ein geografisches Gebiet, das sich auf die Entwicklung und den Einsatz von Wasserstofftechnologien konzentriert. Solch ein Gebiet würde nicht nur Wasserstoffproduktionsanlagen beherbergen, sondern auch eine Infrastruktur für den Transport, die Lagerung und die Nutzung von Wasserstoff in verschiedenen Anwendungen, z. B. für den Verkehr, die Industrie oder die Stromerzeugung.

Die Europäische Hydrogen-Valleys-Partnerschaft ist ein Schlüsselelement dieser Strategie und fördert Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien für emissionsfreie Energielösungen. Die Ziele umfassen Technologieentwicklung, regionale Kooperationen, Integration in verschiedene Sektoren zur Dekarbonisierung, Förderung der Produktion von grünem Wasserstoff und politische Beteiligung. Die Herausforderung besteht in der nahtlosen Integration und Nutzung dieser Potenziale zur Förderung der Dekarbonisierung. [21]

Ein Beispiel in Deutschland ist der im Rahmen der Bund-Länder-Vereinbarung zum Kohleausstieg ins Leben gerufene Helmholtz-Cluster (HC-H2), um den Strukturwandel im Rheinischen Braunkohlerevier zu fördern. Das HC-H2 konzentriert sich auf grünen Wasserstoff und erforscht innovative Technologien für seine Produktion, Logistik und Nutzung. Dies umfasst die Verwendung bestehender Infrastrukturen für Wasserstofftransport und -speicherung. Das neu gegründete Institut für nachhaltige Wasserstoffwirtschaft am Forschungszentrum Jülich bildet das Herzstück von HC-H2 und wird durch regionale Demonstrationsprojekte ergänzt. Das BMBF zielt darauf ab, weitere Akteure in der Region zu aktivieren. [22]

Die Entstehung der Hydrogen Valleys bietet auf jeder Ebene Möglichkeiten für Unternehmen, in die Wasserstoffbranche einzusteigen. Letztendlich sollte die gesamte Wertschöpfungskette – von der Materialversorgung über die Komponentenfertigung und die Vormontage bis hin zur Endmontage und Qualitätssicherung – abgedeckt werden. Diese Konzentration von Fachwissen und Ressourcen in einem überschaubaren geografischen Gebiet trägt zur Stärkung der Elektrolyseurindustrie bei und fördert die Weiterentwicklung und Verbreitung dieser Technologie. [9]

Darüber hinaus können Produktionscluster auch die Infrastruktur unterstützen, die für die Elektrolyseurproduktion erforderlich ist. Dies umfasst beispielsweise spezialisierte Labore, Testeinrichtungen sowie Schulungs- und Weiterbildungsprogramme, um die Qualitätssicherung zu verbessern und das Fachwissen der Mitarbeiter:innen zu erweitern. Die Zusammenarbeit in einem Cluster kann auch dazu beitragen, die Verfügbarkeit von und den Zugang zu Rohstoffen und Materialien sicherzustellen und ein abgestimmtes Vorgehen im Sinne der Gesamtproduktionskette ermöglichen.

Mit dem wachsenden Interesse und den Investitionen in die Wasserstoffindustrie gibt es vielfältige Chancen für Unternehmen und Projekte, die sich auf die Herstellung, Speicherung und Nutzung von Wasserstoff konzentrieren. Der Einstieg in die Wasserstoffbranche kann zu nachhaltigem Wachstum, Innovationen und positiven Auswirkungen auf die europäische Energiewende führen. Zudem ist das Engagement nicht nur auf die Produktion einzelner Teile begrenzt, sondern kann auf Einzelschrittprozesse, Vormontage sowie Forschung, wie sie hier exemplarisch vorgestellt wurden, erweitert werden. Somit birgt die sich etablierende Branche ein großes Potenzial für Hersteller und Forschungseinrichtungen aller Art.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Der Stack bei AEL-Elektrolyseuren [12]	6
Abbildung 3: Der Stack bei PEMEL-Elektrolyseuren [12]	7
Abbildung 2: Allgemeiner Aufbau AEL [12]	7
Abbildung 4: Allgemeiner Aufbau PEMEL [12]	8
Abbildung 5: Der Stack bei SOEC-Elektrolyseuren [12]	9
Abbildung 6: Allgemeiner Aufbau SOEC [12]	9
Abbildung 7: Der Stack bei AEM-Elektrolyseuren [12]	10
Abbildung 8: Allgemeiner Aufbau AEM [12]	11

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich der Elektrolysetechnologien	12
Tabelle 2: Vor- und Nachteile von Systemen	14
Tabelle 3: Auszug aus der Bewertung ausgewählter Komponenten	16
Tabelle 4: Bewertung der Komponenten	17

Abkürzungsverzeichnis

PV	Photovoltaik
CCUS	Carbon Capture Utilization and Storage
IEA	Internationale Energieagentur
DENA	Deutsche Energie-Agentur
AEL	Alkalische Elektrolyse
PEMEL	Protonenaustauschmembran-Elektrolyse
SOEC	Festoxid-Elektrolysezelle
AEM	Anionenaustauschmembran-Elektrolyse
TRL	Technologiereifegrad (Technologie Readiness Level)
CAPEX	Investitionsausgaben (Capital Expenditures)
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
EU	Europäische Union
SADC	Entwicklungsgemeinschaft des südlichen Afrika (Southern African Development Community)
ECOWAS	Westafrikanische Wirtschaftsgemeinschaft (Economic Community of West African States)
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
rSOC	Reversible Festoxid-Elektrolysezelle (Reversible Solid Oxide Cell)
SOFC	Festoxid-Elektrolysezelle (Solid Oxide Fuel Cell)

Symbolverzeichnis

η	Wirkungsgrad
LHV	Lower Heating Value (unterer Heizwert)
\dot{m}	Massestrom
P_{el}	Elektrische Leistung

Quellenverzeichnis

- [1]
Grüner Wasserstoff: Alle reden darüber, aber wo bleibt er?, 24.02.2022 [Online]. Available: <https://www.dw.com/de/grüner-wasserstoff-alle-reden-darüber-aber-wo-bleibt-er/a-60891717>
- [2]
IEA (2022), Global Hydrogen Review 2022, OECD Publishing [Online]. Available: Paris, <https://doi.org/10.1787/a15b8442-en>.
- [3]
Eröffnungsbilanz Klimaschutz, 01/2022 [Online]. Available: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/220111_eroeffnungsbilanz_klimaschutz.pdf?__blob=publicationFile&v=8
- [4]
Grüner Wasserstoff – lokaler Bedarf global gedacht, 17.05.2022 [Online]. Available: <https://www.engie-deutschland.de/de/magazin/gruener-wasserstoff-lokaler-bedarf-globalgedacht#:~:text=Laut%20einer%20Prognose%20der%20Deutschen%20Energie-Agentur%20%28dena%29%20besteht,dieser%20Bedarf%20durch%20inl%C3%A4ndische%20Produktion%20nicht%20zu%20decken.>
- [5]
Bosch entwickelt Wasseraufbereitungs- und H₂-Anlagen, 29.06.2023 [Online]. Available: <https://www.golem.de/news/wasserstoffwirtschaft-bosch-entwickelt-wasseraufbereitungs-undh2-anlagen-2306-175384.html>
- [6]
PTX-ATLAS: WELTWEITE POTENZIALE FÜR DIE ERZEUGUNG VON GRÜNEM WASSERSTOFF UND KLIMANEUTRALEN SYNTHETISCHEN KRAFT- UND BRENNSTOFFEN, 05/2021 [Online]. Available: https://www.energie.fraunhofer.de/content/dam/energie/de/documents/01_PDF_PI/dokumente_pi_2021/210526_iee_FraunhoferIEE-PtX-Atlas_Hintergrundpapier_final.pdf
- [7]
Welche Projekte für die internationale Wasserstoff-Kooperation fördert das BMBF?, 26.07.2023 [Online]. Available: <https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/kurzmeldungen/de/woher-soll-der-gruene-wasserstoffkommen.html>
- [8]
POTENZIALATLAS GRÜNER WASSERSTOFF IN AFRIKA: EINE STUDIE DER TECHNOLOGISCHEN, ÖKOLOGISCHEN UND SOZIOÖKONOMISCHEN MACHBARKEIT, o.D. [Online]. Available: <https://www.h2atlas.de/de/ueber-uns>
- [9]
International Hydrogen Strategies, 09/2020 [Online]. Available: <https://www.weltenergieerat.de/publikationen/studien/international-hydrogen-strategies/>
- [10]
Irena (2023), The cost of financing for renewable power, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2023 [Online]. Available: <https://www.irena.org/Publications/2023/May/The-cost-of-financing-for-renewable-power>
- [11]
Wichtige Etappe für den globalen Markthochlauf für grünen Wasserstoff: Bundesregierung und EU-Kommission machen H2Global zum europäischen Wasserstoff-Projekt, 01.06.2023 [Online]. Available: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2023/06/20230601-bundesregierung-und-eu-kommission-machen-h2global-zum-europaeischen-wasserstoffprojekt.html>
- [12]
Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal, 10/2020 [Online]. Available: <https://www.irena.org/publications/2020/Dec/Green-hydrogen-cost-reduction>

[13]

Wasserstoff im zukünftigen Energiesystem:
Fokus Gebäudewärme, 05/2020 [Online].
Available: Hauptkomponenten der Elektrolysetechnologien
https://www.iee.fraunhofer.de/content/dam/iee/energiesystemtechnik/de/Dokumente/Studien-Reports/FraunhoferIEE_Kurzstudie_H2_Gebaeudewaerme_Final_20200529.pdf

[14]

ETP Clean Energy Technology Guide, 12.06.2023 [Online].
Available: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/etp-clean-energy-technologyguide?selectedCCTag=Hydrogen&selectedVCStep=Production&selectedSector=Hydrogen>

[15]

Hysata verspricht billigen, grünen Wasserstoff im Gigawatt-Maßstab ab 2025, 21.02.2023 [Online].
Available: <https://www.cleantalking.de/hysata-kapillarelektrolyse-wasserstoff/>

[16]

Neuartiger Stromspeicher produziert gleichzeitig Wasserstoff, 03.08.2023 [Online]. Available: <https://www.basicothinking.de/blog/2023/08/03/wasserstoff-strom-speicher/>

[17]

„BW-Elektrolyse“ unterstützt Unternehmen beim Technologieeinstieg. Das hilft, Marktanteile zu sichern, o.D. [Online]. Available: <https://www.bw-elektrolyse.de/>

[18]

Global landscape of renewable energy finance 2023, 04/2023 [Online]. Available: <https://www.irena.org/Publications/2023/Feb/Global-landscape-of-renewable-energy-finance-2023>

[19]

IEA (2019), The Future of Hydrogen, IEA, Paris, 06/2019. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>

[20]

Questions and answers: A Hydrogen Strategy for a climate neutral Europe, 08.07.2020 [Online].
Available: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda_20_1257

[21]

Hydrogen valleys, o.D. [Online].
Available: <https://s3platform.jrc.ec.europa.eu/hydrogenvalleys#inline-nav-1>

[22]

Startschuss für Helmholtz-Cluster Wasserstoff, 13.09.2022 [Online]. Available: <https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/kurzmeldungen/de/2022/09/startschuss-wasserstoffinnovationsregion.html>

Autoren

AVL List GmbH

Jakob Püringer, Carsten Stöwe, Bernd Jeitler, Bernd Reiter, Alexander Schenk, Franz Hofer

AVL möchte speziell thyssenkrupp für die wertvolle Unterstützung und den wesentlichen Beitrag zu dieser Publikation danken. Als Kooperationspartner von AVL in Fragen der Industrialisierung von Brennstoffzellenprodukten hat thyssenkrupp sein Fachwissen eingebracht, was die Detailtreue und Qualität dieser Arbeit erheblich erweitert hat.

Hintergrund: Landeslotsenstelle Transformationswissen BW

Im aktuellen Umbruch der Automobilwirtschaft stehen insbesondere mittelständische Unternehmen vor großen Herausforderungen, sei es im Bereich der zukünftigen Entwicklung des Geschäftsmodells, der Mitarbeiterqualifizierung oder der generellen Ausrichtung der Unternehmensstrategie. Die Landeslotsenstelle setzt hier an und bietet Vertreter:innen der Automobilwirtschaft, insbesondere Mittelständlern der Zuliefererindustrie und des Kfz-Gewerbes, Orientierung und Unterstützung in folgenden Themengebieten: zielgruppenspezifisch aufbereitetes Wissen zu Technologien, Prozessen und Trends; Übersicht über Weiterbildungs- und Qualifizierungsangebote; strukturierter Überblick zu Beratungsangeboten und Förderprogrammen des Landes; Informationen zu thematisch passenden Veranstaltungen. Weitere Informationen unter www.transformationswissen-bw.de

Hintergrund: Plattform H2BW

Wertschöpfungspotenzial verbunden mit Emissionsreduktion und das nicht nur im Mobilitätssektor – die Vorteile von Wasserstoff als Energieträger sind groß. Insbesondere grüner Wasserstoff, d.h. auf Basis erneuerbarer Energien produzierter Wasserstoff, spielt für die Senkung des CO₂-Ausstoßes eine entscheidende Rolle. Um in Baden-Württemberg eine zukunftsfähige Wasserstoffwirtschaft zu entwickeln, wurde mit der Plattform H2BW eine zentrale Anlaufstelle für alle Akteure im Bereich der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien geschaffen. Weitere Informationen unter www.plattform-h2bw.de

Herausgeber



Gefördert von



Layout/Satz/Illustration

markentrieb – Die Kraft für Marketing und Vertrieb

Stand

November 2023