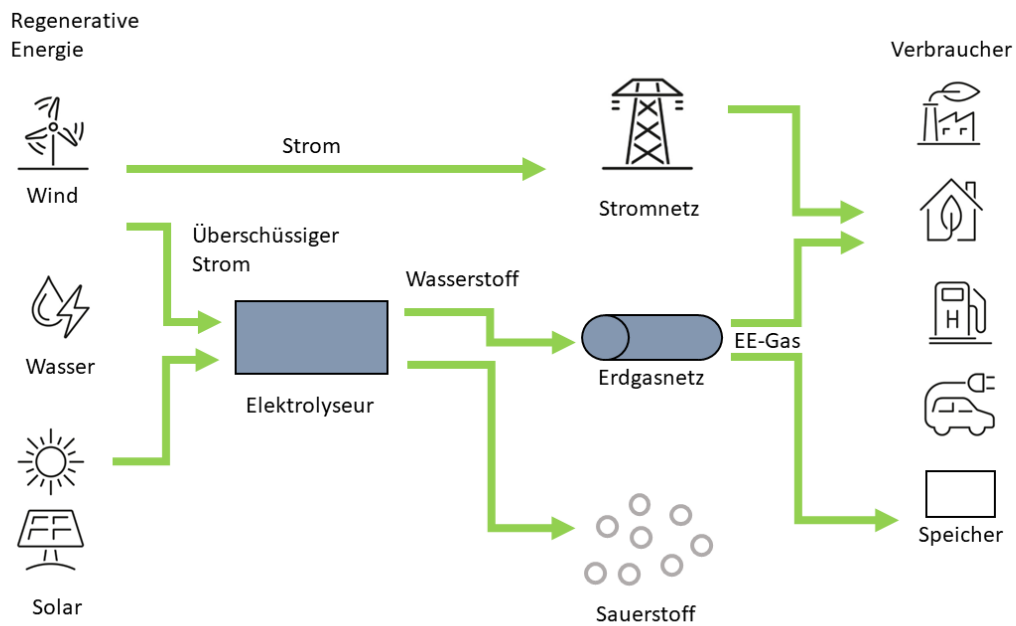


BESCHICHTUNGSLÖSUNGEN FÜR DIE WASSERSTOFF-ERZEUGUNG



INHALTSVERZEICHNIS

BESCHICHTUNGSLÖSUNGEN FÜR DIE WASSERSTOFF-ERZEUGUNG

1.	Einführung in das Thema Wasserstoff.....	Seite 3
1.1	Erklärung Power-to-X.....	Seite 5
1.2	Erklärung Power-to-Gas-Technologie (PtG): Elektrolyse als Bestandteil der regenerativen, strombasierten Wasserstofferzeugung.....	Seite 6
1.2.1	Funktionsweise der Wasserelektrolyse.....	Seite 6
1.2.2	Erläuterung grüner, blauer, grauer Wasserstoff.....	Seite 7
2.	Unterschiedliche Technologien zur Erzeugung.....	Seite 8
2.1	Alkalische Elektrolyse.....	Seite 8
2.2	Bauteile der alkalischen Elektrolysezelle – Kernkomponente Elektrolyseblock.....	Seite 9
2.2.1	Beispiele für Komponenten mit Beschichtungsbedarf im Elektrolyseblock.....	Seite 10
2.3	Kernkomponente Elektrolyseblock – Zellaufbau.....	Seite 10
2.4	Aufbau eines Elektrodenpackages.....	Seite 11
2.5	Notwendigkeit der Beschichtung der Elektrodenpackages Anode/Kathode.....	Seite 11
2.5.1	Beschichtung der Bauteile des Elektrodenpackages.....	Seite 12
2.5.2	Konkretes Beispiel zur Beschichtung der Bauteile des Elektrodenpackages und Rolle der galvanischen Beschichtung.....	Seite 13
2.5.3	Raney-Nickel als Beschichtungsoption für Elektroden.....	Seite 14
2.5.4	Funktionalisierte Nickelschichten und Aktivierung.....	Seite 14
2.5.5	Weitere Beschichtungsoptionen für die Wasserstofftechnologie.....	Seite 14
2.5.6	Kurzzeittest zur Prüfung der Lebensdauer und der elektrischen Wirksamkeit.....	Seite 14
3.	Aussichten für die Forschung.....	Seite 15
3.1	Aussichten für die Beschichtung im industriellen Maßstab.....	Seite 15
4.	Beispiel: Brennstoffzellen-Fahrzeuge als Verbraucher.....	Seite 16
4.1	Brennstoffzellenelektrische Antriebe bieten Vorteile für die Dekarbonisierung.....	Seite 16
5.	Anbieter von Beschichtungen für Elektrodenpackages/Komponenten für Elektrolyseure, Membran-Elektroden-Einheiten, Brennstoffzellen-Stacks.....	Seite 17
6.	Glossar / Begriffsdefinitionen.....	Seite 18
7.	Literatur.....	Seite 19
8.	Bildnachweise.....	Seite 20
9.	Kontaktinformationen.....	Seite 21



1. EINFÜHRUNG IN DAS THEMA WASSERSTOFF

Die Beschränkung des Klimawandels durch Reduzierung des weltweiten CO₂-Ausstoßes ist eine der wichtigsten Herausforderungen unserer Zeit. Um die erforderliche Verringerung der CO₂-Emissionen zu erreichen, sind vielfältige Maßnahmen notwendig, vom Einsatz neuer, regenerativer Energiesysteme bis zur Reduktion des Energieverbrauchs in der Industrie, der Mobilität und im privaten Bereich (bspw. Gebäude). Und es ist noch ein langer Weg: Derzeit ist die Europäische Union hinter China und den USA einer der weltweit größten Emittenten von Treibhausgas (zu 81% CO₂); Deutschland steht auf Platz 6 der größten CO₂-Emittenten.¹

Die Nutzung alternativer Energieträger abseits der fossilen Brennstoffe, der Umbau des Energiesystems, die Steigerung der Energieeffizienz und die Reduzierung des Emissions-Ausstoßes sind Säulen zur Erreichung der von der Bundesregierung verabschiedeten Klimaziele².

Vielfach gilt – neben der Nutzung von Sonnen- und Windenergie – auch der Wasserstoff als „Schlüsselement der Energiewende“³, der als „vielfältig einsetzbarer Energieträger eine Schlüsselrolle einnehmen“⁴ kann. Vor allem zur Verringerung des CO₂-Ausstoßes in der Industrie und in der Mobilität kann Wasserstoff einen wertvollen Beitrag leisten, sofern er klimafreundlich hergestellt wird (so genannter „grüner Wasserstoff“⁵, siehe Seite 18). Er kann zudem dazu beitragen, Teile des heutigen Energiebedarfs aller Sektoren aus erneuerbaren, CO₂-freien Quellen zu decken. Denn als flexibel speicher- und transportierbarer Energieträger kann Wasserstoff regenerativ erzeugte Energie in anderen Bereichen (Sektoren) nutzbar machen. Auch als chemischer Rohstoff bietet Wasserstoff viele Möglichkeiten für die Zukunft des Industriestandorts Deutschland. Somit kann Wasserstoff in vielen Bereichen, in denen Energie aufgewendet wird, zur Senkung des CO₂-Ausstoßes beitragen.

Eine vom Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft des Landes Baden-Württemberg beauftragte Studie der Roland Berger GmbH bescheinigt der Wasserstofftechnologie eine äußerst positive Zukunft: „Die Technologie ist bereits seit Jahrzehnten bekannt und schon in vielen Bereichen umfassend erprobt worden. Aufgrund der dabei gesammelten Erfahrung und bisher erreichten technologischen Reife von Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Anwendungen kann in den nächsten Jahren der Schritt hin zur Kommerzialisierung und Marktdurchdringung gegangen werden, mit dem Wasserstoff und Brennstoffzellen zu einem wichtigen Eckpfeiler der Energiewende werden können. Dadurch können auch die derzeit noch hohen Technologiekosten gesenkt und signifikante Skaleneffekte realisiert werden, um letztendlich eine breite Anwendung der Technologie in allen Energieverbrauchssektoren zu ermöglichen.“⁶

Die Fraunhofer-Institute kommen in ihrer „Wasserstoff-Roadmap“ zu einer ähnlichen Einschätzung: „Wasserelektrolyse wird zu einer entscheidenden industriepolitischen Komponente werden, einerseits zur Erzeugung von Anteilen des benötigten Wasserstoffs, andererseits als Flexibilitätsoption im deutschen Stromnetz, aber auch als Kerntechnologie der Energiewende für den internationalen Exportmarkt. Wasserstoff kann einen entscheidenden Beitrag zur Treibhausgasneutralität der Sektoren Industrie und Verkehr leisten und auch in Gebäuden und bei der Rückverstromung Teil der Lösung sein, wenn die entsprechenden marktpolitischen Anreize mit dem Ziel einer deutlichen Lenkungswirkung gesetzt werden.“⁷

Spätestens seit der am 10. Juni 2020⁸ beschlossenen „Nationalen Wasserstoffstrategie“ der Bundesregierung und dem damit verbundenen Aktionsplan ist Wasserstoff fest als Energieträger der Zukunft im Energiemix verankert. Mit 38 Maßnahmen soll der Aktionsplan die Erzeugung, den Transport, die Nutzung und Weiterverwendung von Wasserstoff voranbringen. Bereits bis zum Jahr 2030 sollen 1 bis 5 Gigawatt Elektrolyseleistung (Erzeugungskapazität) beim grünen Wasserstoff realisiert werden.⁹

Damit Wasserstoff-Technologien eine Schlüsselposition bei der Transformation der Industrie zu einer nachhaltigen Wertschöpfung einnehmen und so zum Erreichen der Klimaziele beitragen können, ist nicht nur ein Umdenken erforderlich, sondern vor allem Handeln. „Entscheidend ist es, jetzt die Grundlage für eine CO₂-neutrale Wasserstoffwirtschaft zu legen, um dadurch das Erreichen der Klimaziele zu ermöglichen und die hiesige Wirtschaft optimal auf das kommende Wasserstoff-Zeitalter vorzubereiten“¹⁰, heißt es etwa bei der Fraunhofer-Gesellschaft über die Wasserstoff-Technologien.

Neben Forschung und Entwicklung, Ingenieurleistungen und Anlagenbau nimmt auch die Oberflächentechnik eine wichtige Rolle ein, um Wasserstofftechnologien „fit für die Zukunft“ zu machen. Denn sie kann durch die Entwicklung entsprechender Funktionsschichten dazu beitragen, Bauteile und Komponenten, die in der Wasserstofftechnologie eingesetzt werden, mit neuen Eigenschaften zu versehen – von der Erhöhung der Lebensdauer über Schutzfunktionen bis zur Steigerung des Wirkungs- und Effizienzgrades.



Abb. 1: Wasserstoff ist ein wichtiger Baustein hin zu einem nachhaltigeren Umgang mit unseren Ressourcen.

Unterteilt werden die Power-to-X-Technologien nach Energieform, in die umgewandelt wird

- Power-to-Gas = PtG
- Power-to-Heat = PtH
- Power-to-Liquid = PtL

oder nach Verwendungszweck, etwa

- Power-to-Fuel
- Power-to-Chemicals.

1.2 Erklärung Power-to-Gas-Technologie (PtG)

Elektrolyse als Bestandteil der regenerativen, strombasierten Wasserstofferzeugung

Power-to-Gas ist die Umwandlung von elektrischer Energie in Gas und bezeichnet den chemischen Prozess zur Herstellung von (Brenn-) Gas aus Wasser. Der Umwandlungsprozess erfolgt durch die Wasserelektrolyse und eine teilweise nachgeschaltete Methanisierung. Das entstandene Brenngas wird gespeichert und kann anschließend unterschiedlich eingesetzt werden.

Die Wasserstofferzeugung durch Elektrolyse ist damit ein zentraler Wandlungsschritt zwischen dem elektrischen Energiesystem und den nachgelagerten Anwendungssektoren. Ökologisch besonders sinnvoll ist der Einsatz der Power-to-Gas-Technologie, wenn für die Herstellung des Gases auf Strom aus erneuerbaren Energien zurückgegriffen werden kann, bspw. auf Windenergie.

1.2.1 Funktionsweise der Wasserelektrolyse

Wasserstoff ist ein Bestandteil des Wassers und fast aller organischen Verbindungen. Er ist das häufigste chemische Element und daher in großem Umfang vorhanden.

Wasserstoff hat die chemische Kurzformel H_2 und ist farb- und geruchlos. In der Regel ist er gasförmig und leichter als Luft. Allerdings kommt Wasserstoff in der Natur nur in gebundener Form vor, zum Beispiel als Bestandteil von Wasser. Um ihn als Energieträger nutzen zu können, muss gasförmiger Wasserstoff zunächst aus Wasser oder Methan gewonnen werden, bspw. durch Elektrolyse. Bei der Elektrolyse wird mit Hilfe von Strom, der über Elektroden zugeführt wird, Wasser in seine Bestandteile Sauerstoff und Wasserstoff getrennt. Dabei werden zwei Wassermoleküle in zwei Wasserstoffmoleküle und ein Sauerstoffmolekül aufgespalten.

Anschließend wird der Wasserstoff unter Zugabe von Kohlenstoffdioxid methanisiert. Danach kann er bspw. ins Erdgasnetz eingespeist werden („Weiterverarbeitung“ des Wasserstoffs).

1.2.2 Erläuterung grüner, blauer, grauer Wasserstoff

Es gibt unterschiedliche Arten von Wasserstoff, abhängig davon, wie der Wasserstoff erzeugt wurde. Als „grünen Wasserstoff“ bezeichnet man regenerativ erzeugten Wasserstoff, der aus erneuerbaren Energiequellen stammt und ökologisch am sinnvollsten ist.

So genannter „blauer Wasserstoff“ hingegen wird aus fossilen Brennstoffen gewonnen. Bei seiner Herstellung entsteht zwar Kohlenstoffdioxid, dieses wird aber durch geeignete Technologien wie „Carbon Capture and Storage (CSS)“ abgeschieden und unterirdisch gespeichert. Dadurch gelangt das entstehende CO₂ nicht in die Atmosphäre.

Der hauptsächlich, zum Beispiel in der Industrie, genutzte Wasserstoff ist jedoch meist nicht CO₂-frei und wird als „schwarzer“, „brauner“ oder „grauer“ Wasserstoff bezeichnet, je nach dem, aus welchem fossilen Rohstoff der Wasserstoff hergestellt wurde (z. B. ist aus Braunkohle gewonnener Wasserstoff „brauner“ Wasserstoff, vgl. auch Glossar Seite 18).



Abb. 3

2. UNTERSCHIEDLICHE TECHNOLOGIEN ZUR ERZEUGUNG

Zur Herstellung von Wasserstoff werden bislang hauptsächlich vier verschiedene Elektrolyseverfahren genutzt. Diese unterscheiden sich hinsichtlich des gewählten Elektrolyten.

- Bei der **alkalischen Elektrolyse (AEL)** wird ein flüssiger, basischer Elektrolyt verwendet, z. B. Kalilauge bzw. ein Kalilauge-Wasser-Gemisch.
- Die **Protonen-Austausch-Membran-Elektrolyse (PEM)** nutzt eine protonendurchlässige Polymermembran (PEM von engl. „proton exchange membrane“). Die PEM wird auch als saurer Elektrolyseur oder saure Membran-Elektrolyse bezeichnet bzw. als Polymer-Elektrolyt-Membran-Elektrolyse (PEMEL).
- Zudem wird die **Feststoff-Oxid-Hochtemperatur-Elektrolyse** (engl. **SOEL**; Solid Oxid Electrolysis) mit einem Festoxid als Elektrolyten angewendet.
- Bei der **Hochtemperatur-Elektrolyse (HTEL)** handelt es sich um eine Wasser-Elektrolyse, bei der hohe Temperaturen (bis 900 °C) genutzt werden, um den Wirkungsgrad der wässrigen, alkalischen Elektrolyse zu verbessern.
- Zudem kann zwischen druckloser, atmosphärischer Elektrolyse und Druckelektrolyse unterschieden werden. Im weiteren Verlauf wird nur die **alkalische Elektrolyse (AEL)** näher betrachtet.

2.1 Alkalische Elektrolyse

Die alkalische Wasserelektrolyse ist die älteste und bislang am weitesten verbreitete Technologie. Zur Erzeugung von Wasserstoff und Sauerstoff mittels Elektrolyse werden sogenannte Elektrodenpackages verwendet. Diese Elektrodenpackages bestehen aus einer Anode, einer Kathode und einem Mittelblech, die bei modernen Konstruktionen stoffschlüssig miteinander verbunden sind. Das Mittelblech wird häufig auch als Bipolarplatte bezeichnet.

Bei dieser Form der Elektrolyse wird eine Stromquelle sowohl an den Minuspol (Kathode) der Elektrolysezelle als auch an ihren Pluspol (Anode) angeschlossen. Die Zelle ist mit einem Gemisch aus Wasser und Kalilauge als Elektrolyt gefüllt. Ein Elektrolyt ist eine Substanz, die durch entgegengesetzt geladene, bewegliche Ionen elektrisch leitfähig ist.

Unter definierten Voraussetzungen fließt elektrischer Strom zur Elektrolysezelle. Der Wasseranteil des Kalilauge-Gemischs wird durch das Einleiten des Stroms aufgespalten: An der Kathode bildet sich Wasserstoff, an der Anode Sauerstoff. Das Mittelblech sorgt für eine Abtrennung der Gas-Zwischenräume.

„Vorteile alkalischer Elektrolyseure sind ihre Einsatzfähigkeit, Robustheit und Lastwechselbeständigkeit, wie das Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW) erklärt.“¹¹ Auch die Beschichtung der einzelnen Bauteile des Elektrolyseurs bzw. seiner Bestandteile kann eine Rolle bei der Lebensdauer und Beständigkeit des Gesamtsystems spielen. Die Elektrodenfläche alkalischer Druckelektrolyseure lässt sich sehr gut in der auf industrielle Maßstäbe hochskalieren und herstellen, und dies ohne den Einsatz von Edelmetallen.

2.2 Bauteile der alkalischen Elektrolysezelle – Kernkomponente Elektrolyseblock

Der Elektrolyseblock ist die wesentliche Komponente, in der Wasser in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt wird. Der Elektrolyseblock benötigt eine Reihe von peripheren Kreisläufen, Komponenten und Subsystemen, die weitere Aufgaben übernehmen¹²:

Zufuhr von:

- Elektrolyt
- Speisewasser
- elektrischer Leistung
- Inertgas
- Abfuhr von Wärmeenergie
- Sammlung und Trennung der Produktgas-/Elektrolytgemische auf beiden Gasseiten
- Umwälzung des Elektrolytgemisches

Der Elektrolyseur ist das Ergebnis der Verbindung all dieser Teilsysteme zu einer funktionellen Einheit. Ergänzt durch weitere Funktionen (Gastrocknung, Kontrolle der Betriebsfunktionen sowie der Apparate- und Betriebssicherheit, Steuerungs- und Regelfunktionen des Elektrolysebetriebs) wird der Elektrolyseur zu einer Elektrolyseanlage erweitert.¹³

Der Elektrolyseblock setzt sich zusammen aus einem von Endplatten umschlossenen Zellrahmen, Isolierhülsen, Gasauslässen, Laugeneinlässen, einem Gleichstromanschluss, Spannstangen und einem Unterstützungsgestell, wie in Abb. 5 zu sehen.

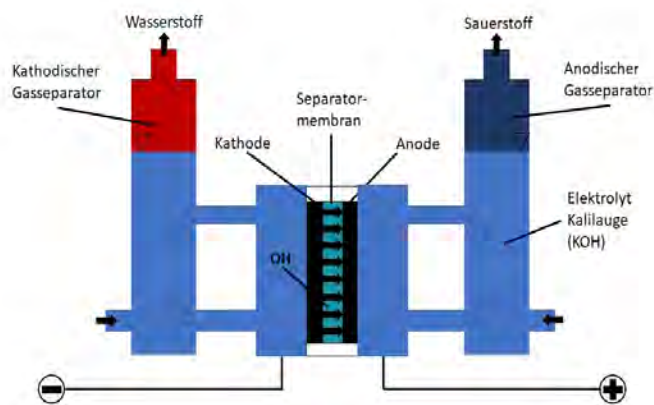


Abb. 4: Funktionsprinzip einer einzelnen alkalischen Elektrolysezelle

Zellblöcke werden aus identischen, aufeinandergeschichteten Zellanordnungen zusammengesetzt und bestehen aus bis zu 350 Zellen.

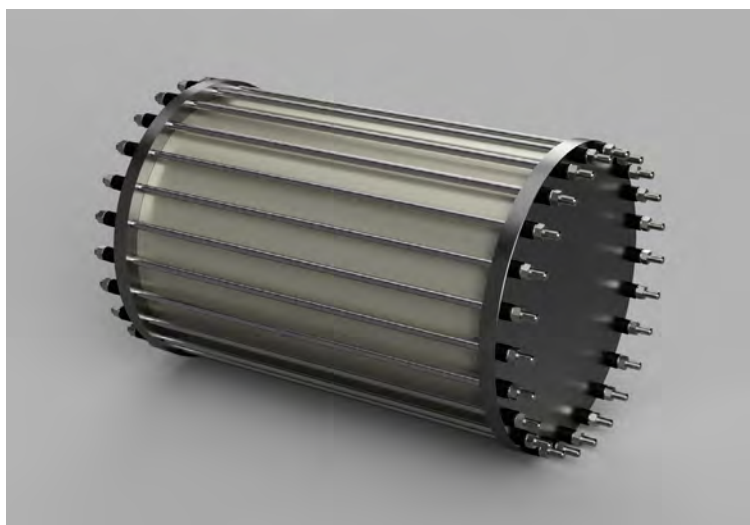


Abb. 5: 3D-Zeichnung eines alkalischen Elektrolyseblocks

2.2.1 Beispiele für Komponenten mit Beschichtungsbedarf im Elektrolyseblock¹⁴

- Endplatten: Korrosionsschutz vor aggressiven Medien, Gasen
- Zellrahmen: Korrosionsschutz vor aggressiven Medien, Gasen
- Druckmantelringe: Korrosionsschutz vor aggressiven Medien, Gasen
- Elektroden-Schutzbeschichtungen: Korrosionsschutz und Langlebigkeit
- Elektrochemisch aktive Beschichtungen: Senkung des Energieverbrauchs zur Gaserzeugung
- Bipolarplatten für elektrochemische Wasserstofferzeuger

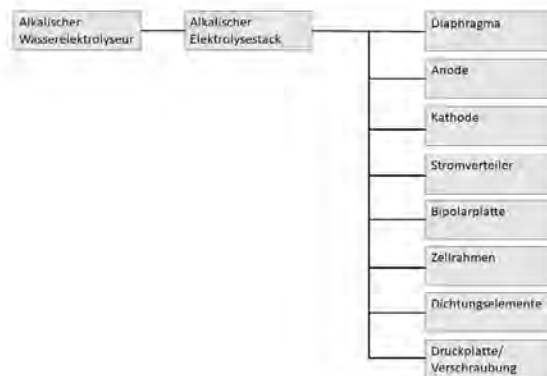


Abb. 6: Komponentendiagramm des Elektrolyseurs¹⁵

2.3 Kernkomponente Elektrolyseblock – Zellenaufbau

Bei jeder Elektrolysetechnologie wird in der Zelle an der Kathode gasförmiger Wasserstoff und anodenseitig Sauerstoff erzeugt. Eine einzelne Zelle besteht nur aus einer geringen Anzahl an Bauteilen. Diese werden für eine einfache Montage mechanisch lösbar miteinander verbunden, ineinandergesteckt oder geschichtet bzw. gestapelt.

Im einfachsten Fall besteht eine Zelle aus einem Zellrahmen, einer umlaufenden Dichtung, einer Zellmembran, zwei Gasproduktions-Elektroden und zwei Stromüberträgern sowie zwei Bipolarplatten, die die Zelle sich mit den Nachbarzellen funktionell teilt. Mehrere Zellen ergeben gemeinsam einen Zellstapel.

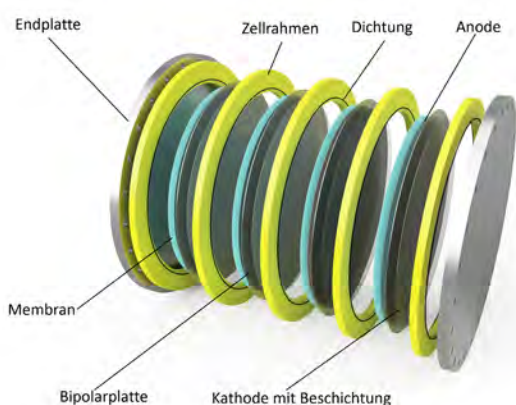


Abb. 7: Kernkomponente Elektrolyse-Block, Bauelemente einer alkalischen Druckelektrolysezelle / schematischer Aufbau eines Zellenstapels

Eine alkalische Druckelektrolysezelle besteht aus den Funktionskomponenten Arbeitselektroden, Bipolarplatte, Membran samt Druckring, Zellrahmen (mit Sammlern für Gasabfuhr sowie Elektrolytzufuhr) und einem 3-lagigen Elektrodenpackage, siehe Abb. 7.

Der Druckring fungiert als mit dem Zellrahmen fest verbundene Gas-Abdichtung einer Bipolarplatte oder einer Zellmembran, die im Zellrahmen eingesetzt wird. Der Zellrahmen dient als „Behälter“ für die Elektrolysezelle. Bei Druckelektrolyseuren werden oft runde Formen eingesetzt; bei drucklosen Elektrolyseuren kommen auch rechteckige Zellrahmen zum Einsatz. Neben wichtigen mechanischen Eigenschaften, welche die Zellrahmen erfüllen müssen, müssen sie auch für den direkten Kontakt mit Wasserstoff, Sauerstoff, voll entsalztem Wasser, Kalilauge und Kombinationen aus diesen Chemikalien geeignet sein.

Mittels Zugankern und zweier stabiler Endplatten werden die losen Komponenten des Zellenstapels zu einem gerichteten Zellenstapel zusammengefügt und mechanisch verspannt, um einen gasdichten Zustand der Zelle herzustellen. Zur Energieeinführung werden die Endplatten mit den jeweiligen Strompolen verbunden. Außerdem werden Rohrverbindungen in die Endplatten integriert. Diese Rohrverbindungen werden für die Elektrolyt- und Kühlwasserzuleitung sowie auf der Gaserzeugungsseite für den getrennten Abtransport von Wasserstoff und Sauerstoff genutzt.¹⁶

2.4 Aufbau eines Elektrodenpackage

Das Elektrodenpackage ist eines der zentralen Bauteile des Zellstapels und nimmt eine wichtige Aufgabe bei der Effizienz des kompletten Elektrolyseurs wahr. Aufbau:



Abb. 8: Von der Holzapfel Group gefertigtes Elektrodenpackage. Der Querschnitt zeigt das beschichtete Elektrodenblech mit Anode, Kathode und Bipolarplatte.

- Mittelblech/Bipolarplatte
Funktion: gasdichte Trennung der Zellen, positionsgenaueres Halten der Anoden und Kathoden im Stack, in diesem Fall mit stoffschlüssiger Verbindung Anode – Kathode – Mittelblech
- Anode
Funktion: Erzeugung von Sauerstoff durch Elektrolyse
- Kathode
Funktion: Erzeugung von Wasserstoff durch Elektrolyse

2.5 Notwendigkeit der Beschichtung der Elektrodenpackages Anode/Kathode

Die Notwendigkeit der Beschichtung der einzelnen Bauteile liegt zum einen in der Verbesserung von Beständigkeit und Lebensdauer des Gesamtsystems begründet. So kann ein aufgebracht Korrosionsschutz zur längeren Haltbarkeit beitragen.

Ein weiterer Grund ist die energetische Wirkungsgradverbesserung. Auf der mechanischen Seite sorgt diese für die Optimierung der Elektrodenpackages. Durch die galvanische Beschichtung ist eine Hochskalierung auf den industriellen Maßstab möglich. Mechanische Beschädigungen und Deformationen der Elektroden, wie sie bei APS- und VPS-Beschichtungen entstehen, werden ausgeschlossen.

Die Zellenspannung sinkt in der Regel um 150-200mV durch die aufgebrachte funktionelle, aktive Beschichtung in Verbindung mit ebenen Elektroden und die durch diese Faktoren bedingte Wirkungsgradverbesserung.

2.5.1 Beschichtung der Bauteile des Elektrodenpackages

Spezialisten der Oberflächentechnik arbeiten in Forschungs- und Entwicklungsprojekten gemeinsam mit Instituten daran, die galvanischen Beschichtungsmethoden zu optimieren. So werden etwa in Forschungsprojekten bestehende alkalische Elektrolyse-Technologien in Hinblick auf industriell geprägte galvanische Beschichtungsmethoden für Elektroden zur Marktreife weiterentwickelt. Ziel ist es, erfolgreich validierte Materialien und Beschichtungsverfahren aus dem Testmaßstab der Elektrodenfläche von 1.500 cm² aus dem technischen Prototypenmaßstab bis zu 30.000 cm² für den industriellen Maßstab hochzukalieren.

Ergänzende projektbegleitende Untersuchungen an Elektrolyse-Testständen validieren die Verwendbarkeit der entwickelten Schichten.

Der Prozess soll flexibel so ausgestaltet werden, dass er für viele gängige Elektrodensubstrate bzw. -größen (von ca. 1.000 mm bis zu ca. 2.400 mm Durchmesser) und Elektrodenkonzepte („festes“ Elektrodenpackage, lose Schichtung und stoffschlüssige Verbindungen) für atmosphärischen oder Druck-Betrieb anwendbar ist, um eine möglichst breite Verwertungsperspektive des Beschichtungsverfahrens zu gewährleisten. Für periphere Teile der Elektrolyseure wie zum Beispiel Zellenrahmen sind bewährte Beschichtungsoptionen vorhanden.

Im Fokus steht die Validierung von ausgewählten Materialien und Verfahren, die den Schritt von der Manufaktur zu serientauglichen Fertigungsprozessen, gepaart mit niedrigen Material- und Herstellkosten unter potentielltem Ausschluss von Edelmetall, ermöglichen.

Eine der wesentlichen Herausforderungen der nächsten Jahre wird sein, auf Grundlage geeigneter Materialien und Verfahren den Schritt hin zu einer großskaligen Elektrolyse-Industrie zu vollziehen, um Kostensenkungspotentiale heben zu können.



Abb. 9: Technikumsanlage der Holzapfel Group

In Bezug auf die Beschichtung stehen die Steigerung des elektrischen Wirkungsgrades und das Erhöhen der Langzeitstabilität sowie des Korrosionsschutzes im Fokus. Auch das Herstellen galvanisch-katalytisch funktionierender Schichten mit bis zu 1000-fach vergrößerter Oberfläche hat für den Einsatz in der Elektrolyse große Bedeutung.

Neben galvanischen Beschichtungsverfahren wird auch das thermische Spritzen (Vakuum-, Niederdruckplasmaspritzen, atmosphärisches Plasmaspritzen¹⁷) eingesetzt, um Bauteile für Elektrodenpackages zu beschichten. Auch die physikalische Gasphasenabscheidung (Physical Vapour Deposition, kurz PVD) kommt zum Einsatz¹⁸, etwa für die Beschichtung von Bipolarplatten.

2.5.2 Konkretes Beispiel zur Beschichtung der Bauteile des Elektrodenpackages und Rolle der galvanischen Beschichtung

Die Bauteile Anode, Kathode und Mittelblech werden bspw. von der Holzapfel Group mit einem speziellen Verfahren auf Nickelbasis beschichtet. Um den Wirkungsgrad zu verbessern und der Degradation entgegen zu wirken, wird die Kathode mit einer zusätzlichen Beschichtung versehen. Im Gesamtsystem werden durch diese Kombination die katalytischen Eigenschaften und die Wirkungsgrade optimiert.

Die spezielle Beschichtung hat den Effekt, dass u.a. die elektrische Kontaktfläche im Elektrolyseur vergrößert wird. Dies führt zu einer Erhöhung der Leistungsdichte. Es ist möglich, viel Wasserstoff auf kleinem Bauraum zu erzeugen. Dadurch wird das Investitionsvolumen verringert. Auch Zellrahmen und ggf. andere wasserführende Bauteile können vornehmlich korrosionsschützend beschichtet werden.

Die langzeitstabile Elektrolyse ist bei Beschichtungsentwicklungen für Elektrolyseure ebenfalls ein Thema. Hier wird an Methoden geforscht, um die Beschichtung von Elektrodenoberflächen insbesondere während der Elektrolyse mittels alkalischer Wasserspaltung langzeitstabil zu ermöglichen.

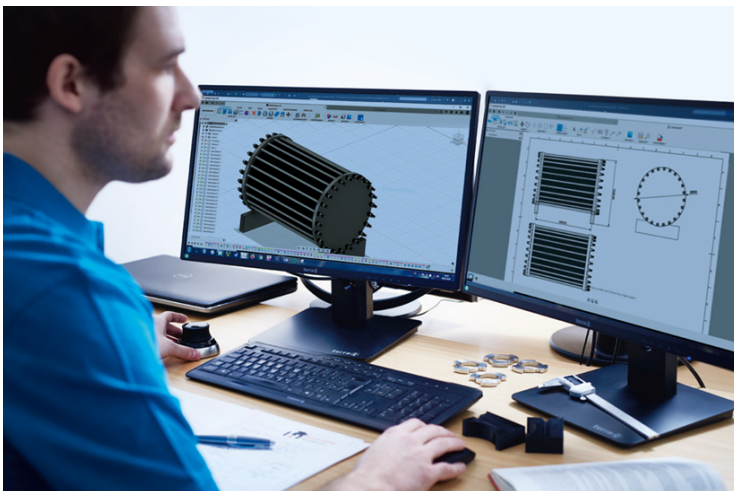


Abb. 10: Die Holzapfel Group entwickelt, fertigt und montiert Elektrodenpackages für Stacks.

2.5.3 Raney-Nickel als Beschichtungsoption für Elektroden

Galvanisch abgeschiedene Raney-Nickel-Schichten bieten den Vorteil der verzugsfreien Abscheidung gegenüber Schichten, die mit den Verfahren APS (Atmosphärisches Plasma Spritzen) oder VPS (Vakuum Plasma Spritzen) erzeugt werden. Untersuchungen renommierter Institute zeigen, dass ebene und mit Raney-Nickel-Schichten hergestellte Elektrode mit möglichst geringem Abstand zur Membran derzeit die besten Ergebnisse in Bezug auf den elektrischen Wirkungsgrad der alkalischen Elektrolyseure erbringen. Ebene, galvanisch hergestellte Anoden und Kathoden bieten den Vorteil, dass diese mit geringstem Abstand zur Membran („Zero Gap“) in der Zelle positioniert werden können.

Damit trägt die Entwicklung der galvanischen Raney-Nickel-Beschichtung zur Verbesserung der Energiebilanz bei.

2.5.4 Funktionalisierte Nickelschichten und Aktivierung

Es gibt einige weitere Verfahren, um funktionalisierte Nickelschichten und dadurch aktivierte, vergrößerte Oberflächen zu erzeugen. Neben der Verwendung von Raney Nickel können auch Nickellegierungen und Ko-Abscheidungen (wie Nickel-Zink, Nickel-Eisen-Zink) eingesetzt werden. Auch die galvanische Abscheidung mit Ko-Abscheidungen wie Nickel-Molybdän, Nickel-Wolfram, Kobalt-Molybdän, Kobalt-Wolfram und weitere Methoden wurden bereits zur Aktivierung der Kathode angewendet.

2.5.5 Weitere Beschichtungsoptionen für die Wasserstofftechnologie

Die Holzapfel Group kann Bauteile für Elektrodenpackages wie Anoden, Kathoden, Mittel-bleche und Endplatten, aber auch Zellrahmen und wasserführende Komponenten, mit einer funktionellen Korrosionsschutzschicht versehen. Für die alkalische Wasserelektrolyse können Bauteile bis zu einer Größe von 2300 x 1900mm beschichtet werden. Es stehen weitere Verfahren wie Chemisch Nickel, Nickelsulfamat, galvanisch Nickel, Silber, Zinn, Zink-Nickel oder andere Beschichtungskombinationen zur Verfügung.

2.5.6 Kurzeittest zur Prüfung der Lebensdauer und der elektrischen Wirksamkeit

Sowohl während der Produktentwicklung als auch im Serienprodukt sind die Parameter Wirkungsgrad und Lebensdauer wichtige Kenngrößen.

Die Holzapfel Group kann in Elektrolysestacks im Technikumsformat Wirkungsgradmessungen vornehmen und die Stabilität der aufgetragenen Schichten prüfen. Aussagen über Langzeitstabilität und Degradation sind nur über einen kurzen Zeitraum sinnvoll darzustellen. Lebensdauer-Tests von neuen Beschichtungen über eine zu erwartende Lebensdauer von 10 Jahren liegen nicht oder nur zum Teil vor.

Um die Langzeitstabilität zu verifizieren, arbeiten Institute und Unternehmen wie die Holzapfel Group an Kurzeittests im Zeitraffer.



Abb. 11: Laboruntersuchungen mit einem Rasterelektronenmikroskop

3. AUSSICHTEN FÜR DIE FORSCHUNG

Langzeitstabile, vor Degradationen geschützte und katalytisch hochaktive Oberflächen sind ein Kernthema für die Beschichtung von Elektrolyseur-Komponenten. Insbesondere durch den Einsatz großflächig katalytisch beschichteter Elektroden ist neben der Reduzierung des spezifischen Energieverbrauchs bei der Wasserstoffherzeugung auch eine Reduzierung der Anlagenkosten durch Erhöhung der Stromdichte in Aussicht.

Derzeit finden Forschungsarbeiten im Becherglas und im Technikums-Maßstab auch für die Anoden-Seite statt. So kann etwa durch die Einlagerung von Katalysatoren in das Beschichtungssystem eine weitere Reduzierung des spezifischen Energieverbrauchs gewährleistet werden. Die Holzapfel Group arbeitet zudem daran anschließend bei den Themen der Hochskalierung auf den benötigten industriellen Maßstab mit.

3.1 Aussichten für die Beschichtung im industriellen Maßstab

Die Optionen zur Beschichtung von Elektroden stehen häufig noch nicht im industriellen Maßstab zur Verfügung.

Neue Entwicklungen ermöglichen die Beschichtung deutlich größerer Elektrodenflächen. Damit werden nach heutiger Einschätzung Elektroden aus einem Stück für die meisten Elektrolyseurgrößen industriell herstellbar sein. Basis dafür ist die Entwicklung von Anlagentechniken, die eine gleichmäßige Schichtdicken- und Metallverteilung auf den Elektrodenflächen verzugsfrei sicherstellen.



Abb. 12: Anlage zur Beschichtung von Bauteilen für die Wasserelektrolyse.

Die Möglichkeiten der galvanischen Beschichtung bieten weiterhin durch den Wegfall von mechanischen Belastungen (Verzug) den Vorteil, die Substratstärken teilweise bis zu 50% zu reduzieren. Dies kann Materialeinsparungen von bis zu 40% für die Substrate bedeuten.

Durch die verbesserte Ebenheit werden die Abstände der Elektrode zur Membran partiell auf nahezu 0 mm („Zero Gap“) reduziert. Die Gefahr der mechanischen Verletzung der Membran durch punktuelle Druckstellen, verursacht durch Unebenheiten der Elektroden, wird abgestellt.

4. BEISPIEL: BRENNSTOFFZELLEN-FAHRZEUGE ALS VERBRAUCHER

Bei Brennstoffzellen-Fahrzeugen wird in der Brennstoffzelle aus Wasserstoff elektrischer Strom für den Antrieb erzeugt. Dazu wird die Elektrolyse umgekehrt: Wasserstoff und Luftsauerstoff reagieren zu Wasser. Dadurch entstehen elektrische Energie und Wärme, wobei die Energie zum Antrieb des Elektromotors genutzt wird.

4.1 Brennstoffzellenelektrische Antriebe bieten Vorteile für die Dekarbonisierung

Brennstoffzellenbetriebene Fahrzeuge können zur Dekarbonisierung beitragen. Sie verfügen über eine Brennstoffzelle samt Wasserstofftank, die während der Fahrt den Strom für den Antrieb erzeugt. Eine kleine Batterie wird als Zwischenspeicher genutzt und unterstützt bei Lastspitzen wie dem Beschleunigen. Zudem speichert die Batterie Rekuperationsenergie (Energierückgewinnung beim Bremsen).

Ziel ist, den Energieverbrauch zu senken und durch eine sektorübergreifende Nutzbarmachung von erneuerbaren Energien die Dekarbonisierung des Energiesystems voranzutreiben. Eine wichtige Rolle für die Sektorkopplung spielen Power-to-X-Technologien, mit deren Hilfe Strom aus erneuerbaren Energien gespeichert und somit in anderen Sektoren nutzbar gemacht werden kann.

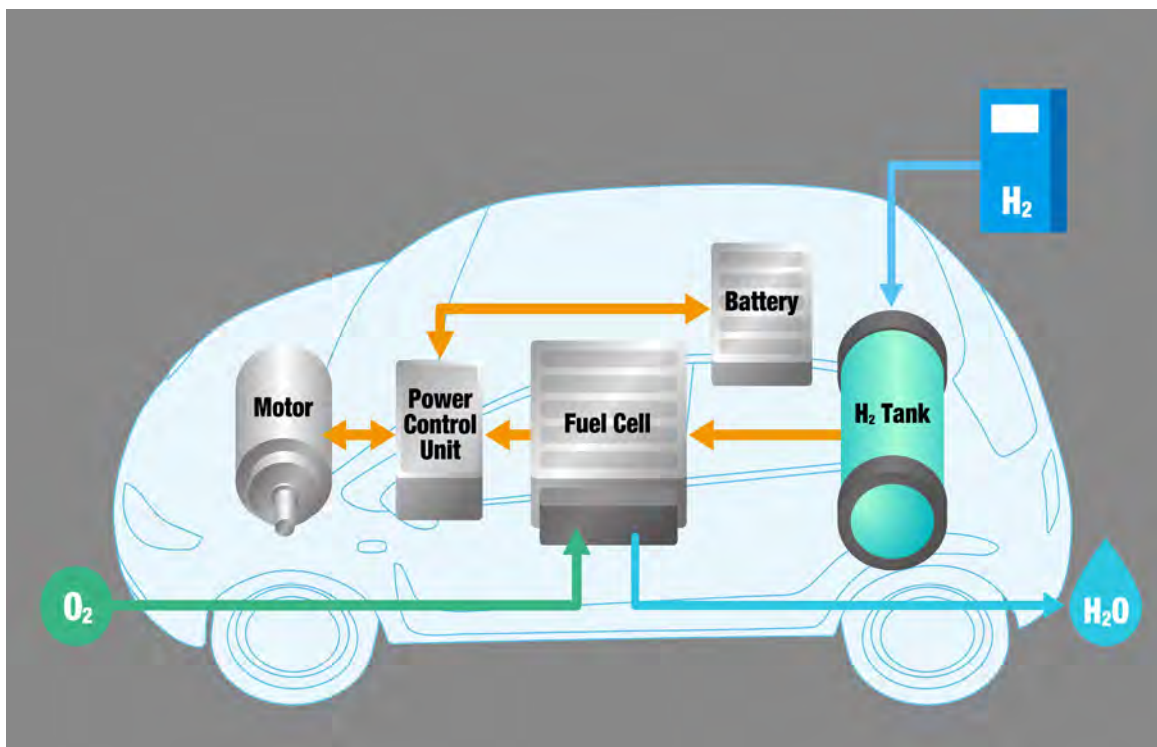


Abb. 13: Funktionsprinzip eines Brennstoffzellenfahrzeugs

5. ANBIETER VON BESCHICHTUNGEN FÜR ELEKTRODENPACKAGES/ KOMPONENTEN FÜR ELEKTROLYSEURE, MEMBRAN-ELEKTRODEN -EINHEITEN, BRENNSTOFFZELLEN-STACKS

Die Holzapfel Group ist seit Jahren ein innovativer und verlässlicher Partner für Kunden, Lieferanten, Institute und Dienstleister, wenn es darum geht, zukunftssträchtige Verfahren und Prozesse zu entwickeln und in Serienprozessen anzubieten. Seit 2005 wurden durch die Holzapfel Group verschiedene Anlagenobjekte aus der Druck- und atmosphärischen Elektrolyse mit Elektroden bestückt, die bei der Holzapfel Group beschichtet wurden. Es wurden diverse objektbezogene Beschichtungen sowie ergänzend dazu auch Montagen kompletter Elektrodenpackages durchgeführt. Weiterentwicklungen zur Herstellung optimierter Elektrodenpackages wurden im Rahmen des Leuchtturmprojekts „Power-to-Gas Baden-Württemberg“ durchgeführt. Für Hersteller von Elektrolyse-Anlagen bzw. Elektrolyseuren oder ihre Zulieferer ist die Holzapfel Group aufgrund dieser Expertise ein kompetenter Partner in Beschichtungsfragen. Künftig werden Möglichkeiten entstehen, verschiedene Substrate in den derzeit bekannten Elektrodengrößen der weltweit agierenden Hersteller von alkalischen Elektrolyseuren zu beschichten. Mit der Option, die Vernicklung von zusätzlichen Zellteilen zu übernehmen, stellt die Holzapfel Group sich als Full-Service-Anbieter für die Beschichtungstechnik im Bereich Wasserstoff auf.



Abb. 14: Forschung und Entwicklung bei der Holzapfel Group

6. GLOSSAR

Begriffsdefinitionen¹⁹

Arten von Wasserstoff

- „Blauer“ Wasserstoff = Aus fossilen Brennstoffen gewonnener Wasserstoff, bei dessen Herstellung Kohlenstoffdioxid entsteht, aber durch Carbon Capture and Storage (CSS) abgeschieden und unterirdisch gespeichert wird. So gelangt das entstehende CO₂ nicht in die Atmosphäre
- „Brauner“ Wasserstoff = Aus Braunkohle gewonnener Wasserstoff, Kohlenstoffdioxid wird bei der Produktion freigesetzt
- „Grauer“ Wasserstoff = Aus Erdgas gewonnener Wasserstoff; CO₂ wird bei der Herstellung freigesetzt
- „Grüner“ Wasserstoff = regenerativ erzeugter Wasserstoff aus erneuerbaren Energiequellen, z. B. mittels Elektrolyse aus grünem Strom oder Biomasse gewonnener Wasserstoff, bei dessen Herstellung kein CO₂ freigesetzt wird
- „Schwarzer“ Wasserstoff = Aus Kohle gewonnener Wasserstoff, bei dessen Herstellung Kohlenstoffdioxid freigesetzt wird
- „Türkiser“ Wasserstoff = Wird aus Biomasse bzw. Biogas mittels Pyrolyse hergestellt, wobei kein bzw. nur sehr wenig CO₂ freigesetzt wird
- Brennstoffzellen-Stack = Stapel aus hintereinander angeordneten bzw. geschalteten Brennstoffzellen
- Elektrolyse = Aufspaltung einer chemischen Verbindung unter Einsatz von Strom. Die Wasserelektrolyse, bei der Wasser in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt wird, dient der Erzeugung von Wasserstoff.
- Hochtemperaturelektrolyse (HTEL): Wasser-Elektrolyse, bei der durch hohe Temperaturen (bis 900 °C) der Wirkungsgrad verbessert wird
- Power-to-Gas = Nutzung von Strom (hauptsächlich aus erneuerbaren Energien) zur Herstellung von Gasen, v.a. Wasserstoff, durch Wasserelektrolyse
- Power-to-X = Umwandlung von bei der Stromerzeugung durch regenerative Quellen entstehenden Strom überschüssen in andere, speicherbare Energieformen. Power-to-X-Technologien tragen dazu bei, dass Strom aus erneuerbaren Energien sektorübergreifend nutzbar gemacht werden kann
- Sektorkopplung = Verknüpfung verschiedener Sektoren (Stromerzeugung, Industrie, Mobilität und Verkehr sowie Gebäudewärme und -strom) mit dem Ziel, den Energieverbrauch zu senken und durch eine sektorübergreifende Nutzarmachung von erneuerbaren Energien die Dekarbonisierung des Energiesystems voranzutreiben. Eine wichtige Rolle für die Sektorkopplung spielen Power-to-X-Technologien, mit deren Hilfe Strom aus erneuerbaren Energien gespeichert und somit in anderen Sektoren nutzbar gemacht werden kann.

7. LITERATUR

- 1 Vgl.: Potenziale der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie in Baden-Württemberg. Studie der Roland Berger GmbH im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft des Landes Baden-Württemberg. Februar 2020, S. 9.
- 2 Vgl. „Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050“, <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975226/1679914/e01d6bd855f09bf05cf7498e06d0a3ff/2019-10-09-klimamassnahmen-data.pdf?download=1>, abgerufen am 23.04.2021.
- 3 <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/wasserstoff.html>, abgerufen am 22.04.2021.
- 4 <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/wasserstoff.html>, abgerufen am 22.04.2021.
- 5 ebd.
- 6 Potenziale der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie in Baden-Württemberg. Studie der Roland Berger GmbH im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft des Landes Baden-Württemberg. Februar 2020, S. 9.
- 7 Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland, C. Hebling, M. Ragwitz et. al, 2019, S. 1.
- 8 Siehe <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2020/20200610-globale-fuehungsrolle-bei-wasserstoff-technologien-sichern.html>, abgerufen am 22.04.2021.
- 9 Siehe „Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland“, C. Hebling, M. Ragwitz et. al, 2019, S. 5 (Abbildung 1).
- 10 <https://www.fraunhofer.de/de/forschung/fraunhofer-strategische-forschungsfelder/wasserstoff-technologien.html>, abgerufen am 22.04.2021
- 11 Zitat des Zentrums für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW). Aus: Springer Professional, Onlineartikel, Woher kommt der Wasserstoff?, abgerufen am 03.02.2021.
- 12 Vgl. Informationszusammenstellung - Aktueller technischer Stand / Herstellerinformationen. Wasserstoff-Technologien: Wasserstofferzeugung mit Elektrolyse. Brinner, Andreas, Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg, Juli 2019, S. 30.
- 13 Ebd.
- 14 Nach: Elektrolytische Wasserstofferzeugung. Vortrag von Andreas Brinner, Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg, bei den 42. Ulmer Gesprächen der Deutschen Gesellschaft für Galvano- und Oberflächentechnik e.V. (DGO) am 4. Mai 2021.
- 15 In Anlehnung an Studie IndWEDe Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland: Chancen und Herausforderungen für nachhaltigen Wasserstoff für Verkehr, Strom und Wärme; Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Berlin 2018, S. 33.
- 16 Vgl. Informationszusammenstellung - Aktueller technischer Stand / Herstellerinformationen. Wasserstoff-Technologien: Wasserstofferzeugung mit Elektrolyse. Brinner, Andreas, Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg, Juli 2019, S. 28.
- 17 Vgl. Studie IndWEDe Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland: Chancen und Herausforderungen für nachhaltigen Wasserstoff für Verkehr, Strom und Wärme; Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Berlin 2018, S. 97.
- 18 Vgl. ebd., S. 103.
- 19 Nach: Potenziale der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie in Baden-Württemberg, Studie der Roland Berger GmbH im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft des Landes Baden-Württemberg, Februar 2020.

8. BILDNACHWEISE

Titelbild: Holzapfel Group - Icons © FourLeafLover – stock.adobe.com

Abb. 1: © Maksim Pasko – Fotolia

Abb. 2: Holzapfel Group - Icons © FourLeafLover – stock.adobe.com

Abb. 3: © Trilight Visions – Dkosig -iStock

Abb. 4: © Holzapfel Group

Abb. 5: © Holzapfel Group

Abb. 6: Diagramm angelehnt an Studie IndWEDe Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland

Abb. 7: Quelle: ZSW

Abb. 8: © Holzapfel Group

Abb. 9: © Holzapfel Group

Abb. 10: © Holzapfel Group/imago/Gabi Sonnenschein

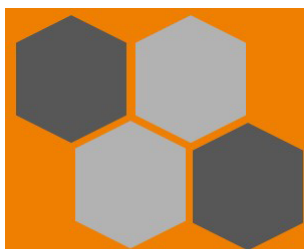
Abb. 11: © Holzapfel Group/imago/Gabi Sonnenschein

Abb. 12: © Holzapfel Group

Abb. 13: © metamorworks – stock.adobe.com

Abb. 14: © Holzapfel Group/imago/Gabi Sonnenschein

9. KONTAKTINFORMATIONEN



**Beschichtungslösungen für die
Wasserstoffherzeugung**

SIE HABEN NOCH FRAGEN ODER BENÖTIGEN EINE BERATUNG
FÜR EINEN KONKRETEN
ANWENDUNGSFALL FÜR DIE WASSERSTOFFERZEUGUNG?

**Nehmen Sie Kontakt auf:
Unser
WASSERSTOFF-TEAM
berät Sie gerne!**

VERANTWORTLICH FÜR DEN INHALT

HOLZAPFEL GROUP

Holzapfel Metallveredelung GmbH
Unterm Ruhestein 1
35764 Sinn

Tel.: +49 (0)2772 5008-0

E-Mail: wasserstoff@holzapfel-group.com

Web: www.holzapfel-group.com