

FV Frankfurter Vermögen AG

H₂ - Wasserstoffwirtschaft

Jürgen Brückner | 27.08.2020

Inhaltsverzeichnis

Vorbemerkung	2
Motivation Wasserstoff	2
Regulatorisches Umfeld für den Klimaschutz	3
Nationale Wasserstoffinitiative der Bundesregierung	4
Bedeutung des Wasserstoffs im Energiesystem	6
Marktanalyse	7
<i>Nachfrageseite</i>	7
Transportsektor	7
Gebäudesektor	8
Industrieller Sektor	8
Energiewirtschaft	8
<i>Angebotsseite (Erzeugung)</i>	8
Wasserstoff-Infrastruktur	9
Firmenuniversum	10
<i>Exkurs Brennstoffzelle</i>	10
<i>Exkurs Funktionsprinzip Elektrolyse</i>	12
Fazit:	15

Die Bedeutung von Wasserstoff für den Klimaschutz und die Wirtschaft

Vorbemerkung

Die deutschen Medien haben sich lange Zeit im Hinblick auf die Möglichkeiten zur Reduzierung des CO₂-Ausstosses überwiegend mit dem Automobilsektor und hier insbesondere mit der Elektromobilität beschäftigt. Auch von politischer Seite wurde insbesondere das Thema Elektromobilität in den Vordergrund gestellt wie die Diskussion um die Elektroprämie erneut gezeigt hat. Vor diesem Hintergrund wird verkannt, dass sich fast stillschweigend parallel zur Batterietechnik weltweit eine sehr schnelle und mächtige Entwicklung für die Stromerzeugung und andere Anwendungen aus Wasserstoff entwickelt hat.

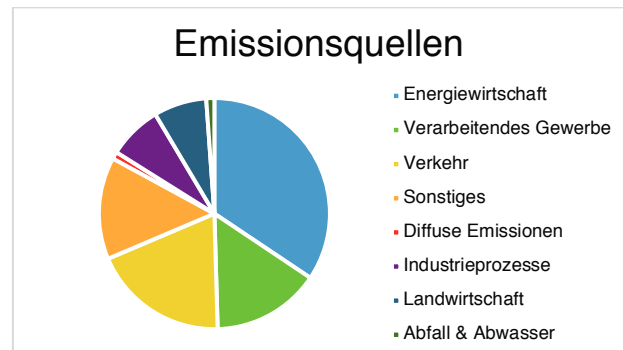
In diesem Artikel möchten wir dem Leser zu dem Thema Wasserstoff eine Orientierungshilfe geben und das Thema sowohl aus europäischer Sicht, aus regulatorischer Sicht, aus technologischer Sicht als auch aus Anlegersicht beleuchten.

Da die deutsche Sicht sehr stark vom Automobilsektor geprägt ist wurde das Potential des Wasserstoff als Quelle zur Stromerzeugung, Speicherung und Verteilung bisher nicht nachdrücklich verfolgt (auch wenn es seit Jahren verschiedene Förderprogramme gibt). Im Automobilsektor hat sich kürzlich der Daimler-Konzern sogar von der Weiterentwicklung für PkWs verabschiedet. Auch in der Diskussion um die Reduzierung des CO₂-Ausstosses steht der Automobilsektor im Vordergrund, obwohl auch andere Industriezweige wie z.B. die Stahlindustrie einen hohen Verbrauch haben. Wer daher überwiegend deutsche Medien zur Verfolgung der Energiepolitik benutzt, dem entgeht, mit welcher Stärke andere Länder die Wasserstofftechnik vorantreiben. Das wird auch daran sichtbar, dass es in vielen Ländern eine Fülle von Organisationen, Forschungsinstituten und Unternehmen gibt, die sich intensiv mit dem Thema beschäftigen. Allerdings darf nicht übersehen werden, dass auch in Deutschland das Thema jetzt im Rahmen der Nationalen Wasserstoffstrategie mit mehr Nachdruck angegangen wird, auch wenn es bedenklich stimmt, dass es hierzu erst der Wirtschaftskrise durch das Coronavirus bedurfte. Die Gründung eines hochkarätig besetzten Nationalen Wasserstoffrates sowie die Zielsetzung der Strategie gehen in die richtige Richtung: „Wir setzen auf eine Forschungsförderung bei Schlüsseltechnologien und neuen Ansätzen entlang der gesamten Wasserstoffkette: Von der Erzeugung über Speicherung, Transport und Verteilung bis hin zur Anwendung“, heißt es in dem Strategiepapier.

Motivation Wasserstoff

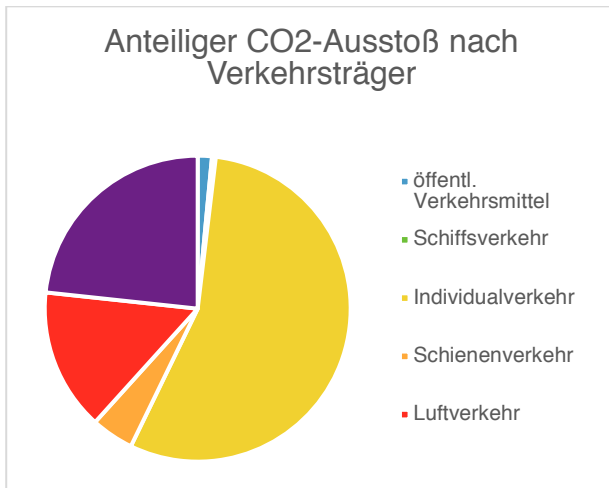
Um das Thema Wasserstoff im Hinblick auf seine Bedeutung für die Dekarbonisierung richtig einzu-

ordnen, empfiehlt es sich, sich zunächst einen Überblick über den CO₂-Anteil der unterschiedlichen Verbraucher zu verschaffen. Nach der Kategorisierung des Bundesumweltamtes verteilen sich die Treibhausgas-Emissionen auf die einzelnen Verbraucher in Deutschland wie folgt:



Der Anteil von Kohlendioxid an den Treibhausgasen beträgt dabei rund 88%, gefolgt von Methan.

In der Grafik wird deutlich, dass der Automobilverkehr keineswegs den größten Beitrag zu den Treibhausgas-Emissionen leistet. Eine Strategie zur Dekarbonisierung muss daher auch die anderen Verbraucher berücksichtigen. Wesentlich ist, dass nicht ein Sektor allein die Bürde der Verringerung von Treibhausgasen tragen sollte, sondern diese Bürde auf alle Sektoren übertragen wird, um nicht nur den maximalen Nutzen zu erzielen, sondern auch die Kosten tragbarer zu machen. Kaum bekannt ist z.B., dass Deutschland eines der Länder in Europa mit dem geringsten Elektrifizierungsgrad bei der Bahn ist: Während in Deutschland der Anteil der elektrifizierten Strecken im staatlichen Eisenbahnnetz lediglich 60% beträgt, beträgt dieser Anteil in Spanien 64%, Polen 64%, Italien 71%, Österreich 72% und 75% in Schweden und den Niederlanden. Auch wenn das Einsparpotential von Treibhausgasen durch eine höhere Elektrifizierung nicht signifikant ist (s. den nachstehenden Chart für einen Vergleich), so zeigt sich doch, dass das gesamte Potential von Einsparungsmöglichkeiten weitere Bereiche erfasst als in den breiten Medien oftmals diskutiert wird. Die Förderung der Produktionsmöglichkeiten und Stärkung der Wertschöpfungskette der Wasserstofftechnologie kann allein durch Fördermaßnahmen nur begrenzt gestärkt werden. Es ist daher zusätzlich zu diesen Maßnahmen ebenfalls eine Stärkung der Marktaktivierung notwendig. Dies kann z.B. durch den stärkeren Einsatz von wasserstoffangetriebenen Dieselmotoren bei der Bahn und der Ausstattung anderer kommunaler Verkehrsträger (Fuhrpark, Busse) durch klimafreundliche Technologien geschehen. Gerade hier könnte Deutschland zur Förderung der Wasserstofftechnologie wesentlich größere Beträge bereitstellen als bisher vorgesehen.



Das größte Potential ergibt sich jedoch neben dem Verkehrssektor in den energieintensiven Branchen der Chemie und Stahlerzeugung. Diese Branchen stehen vor einer besonders großen Herausforderung, da sie zur Erfüllung der Klimaschutzauflagen kontinuierlich ihre Effizienz steigern müssen. Hier setzt auch die Wasserstoff-Strategie der Bundesregierung an: Als Anreiz für Projekte zur Erzeugung von Wasserstoff garantiert die Bundesregierung die Zusatzkosten für klimafreundlich produzierten Wasserstoff zu übernehmen, denn klimaneutral produzierter Stahl wäre auf den Weltmärkten nicht wettbewerbsfähig.

Regulatorisches Umfeld für den Klimaschutz

Für ein besseres Verständnis der Einordnung der Klimaschutzziele und der daraus abgeleiteten Nachfrage nach Wasserstoffprodukten ist ein Blick auf den rechtlichen Rahmen notwendig. Der regulatorische Rahmen auf europäischer Ebene wird durch drei EU-Richtlinien vorgegeben, die insbesondere auf den Verkehrsbereich abstellen:

- die Erneuerbare-Energie-Richtlinie RED (Renewable Energy Directive)
- die Kraftstoffqualitäts-Richtlinie FQD (Fuel Quality Directive)
- Richtlinie über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe (2014/94/EU, AFID)

Während die RED zur Reduzierung der Treibhausgase auf eine Beimischung von Biokraftstoffen abstellt und hierfür eine Quote am gesamten Treibstoff anstrebt (derzeit 14% im Rahmen des RED II), stellt die FQD auf die tatsächliche Reduzierung der Treibhausgase ab.

Darüberhinaus hat die Bundesregierung zur Umsetzung der Klimaschutzregeln in Paris und Kyoto 2019

das Klimaschutzgesetz erlassen, welches für 2050 Treibhausgasneutralität vorsieht.

Auf europäischer Ebene hat Deutschland mit der sogenannten Effort Sharing Decision (Entscheidung Nr. 406/2009/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 über die Anstrengungen der Mitgliedstaaten zur Reduktion ihrer Treibhausgasemissionen mit Blick auf die Erfüllung der Verpflichtungen der Gemeinschaft zur Reduktion der Treibhausgasemissionen bis 2020) und der Europäischen Klimaschutzverordnung in den Sektoren außerhalb des Europäischen Emissionshandels (Verkehr, Gebäude, Teile der Industrie, Landwirtschaft, Abfallwirtschaft) ein Treibhausgasemissionsminderungsziel von 14 % bis 2020 und 38 % bis 2030 (jeweils gegenüber 2005) übernommen. Bis 2017 sind die Emissionen jedoch nur um 3 % gesunken.

Gemäß Art. 10 Absatz 1 der Richtlinie 2014/94/EU ist die Bundesregierung verpflichtet einen Bericht zu erstellen über die Umsetzung des nationalen Strategierahmens, der sich aus der Umsetzung der AFID-Richtlinie ergibt. Allein zur Umsetzung der Maßnahmen im Rahmen der AFID-Richtlinie hat die Bundesregierung 75 verschiedene Maßnahmen vorgesehen. Auf Länderebene gibt es 105 Maßnahmen.

Flankiert werden diese Richtlinien durch das 2019 erlassene Klimaschutzgesetz, welches verbindliche detaillierte Sektorziele zur Treibhausgaseminderung im Rahmen des Klimaschutzplanes 2050 setzt (vgl. die nachfolgende Tabelle aus dem Klimaschutzgesetz):

Jahresemissionsmenge in Mio. Tonnen CO ₂ -Äquivalent	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Energiewirtschaft	280		257								175
Industrie	186	182	177	172	168	163	158	154	149	145	140
Gebäude	118	113	108	103	99	94	89	84	80	75	70
Verkehr	150	145	139	134	128	123	117	112	106	101	95
Landwirtschaft	70	68	67	66	65	64	63	61	60	59	58
Abfallwirtschaft und Sonstiges	9	9	8	8	7	7	7	6	6	5	5

In Verbindung mit dem Klimaschutzgesetz hat die Bundesregierung ebenfalls die Bepreisung von CO₂ geregelt, die gesetzlich im Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG) verankert ist und für deren Vollzug das Umweltbundesamt zuständig ist. Das Gesetz betrifft die Sektoren Wärme und Verkehr und bestimmt, dass ab 2021 die Hersteller von Brennstoffen an einem Emissionshandelssystem teilnehmen müssen. Die Bedeutung des Emissionshandels ergibt sich daraus, dass rund 40 Prozent aller europäischen Treibhausgasemissionen in den EU-Emissionshandel einbezogen sind.

Als Auswirkung des Gesetzes wird eine schrittweise Preiserhöhung für Brennstoff erwartet (vgl. die nachstehende Tabelle).

Schrittweise Preiserhöhung für ausgewählte Brennstoffe durch das BEHG			
	Einheit	2021	2023
Erdgas	kWh	0,5	0,6
Superbenzin	l	6	8
Diesel	l	7	10
leichtes Heizöl	l	7	10

Bisher fehlte den Sektoren Wärme und Verkehr ein System, welches die Bepreisung am CO₂-Gehalt ausrichtet. Das bisherige EU-Emissionshandelssystem gilt nur für weite Teile der Energiewirtschaft und Industrie.

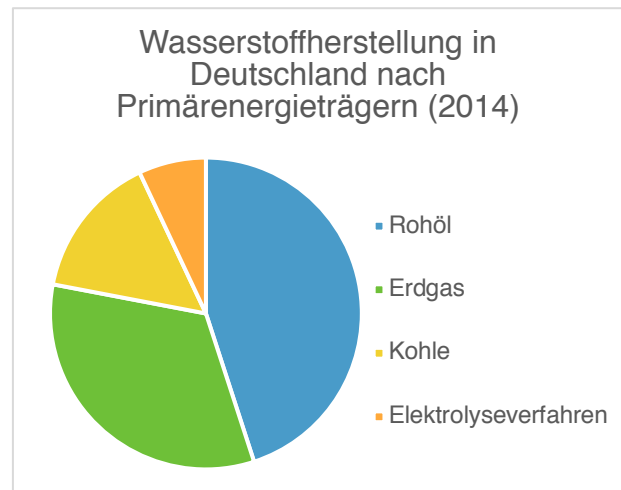
Nationale Wasserstoffinitiative der Bundesregierung

So sehr die Wasserstoff-Initiative der Bundesregierung zu begrüßen ist, so gibt es dennoch Kritikpunkte: Die Kritik richtet sich vor allem gegen die einseitige Bevorzugung von sogenanntem „grünen“ Wasserstoff, also Wasserstoff, der aus erneuerbaren Energien hergestellt wird. Gerade aufgrund der guten Gasinfrastruktur in Deutschland hätte es sich angeboten, auch die Produktion von „blauem“, also auf der Basis von mit Erdgas hergestelltem Wasserstoff, stärker in die Förderung einzubeziehen. Die Bevorzugung von grünem Wasserstoff führt auch dazu, dass der Wasserstoff nicht notwendigerweise dort produziert wird, wo er günstig hergestellt werden kann bzw. verbraucht wird und damit zusätzliche Verteilungswege notwendig sind. Zur Erzielung einer höheren Wirtschaftlichkeit ist es wesentlich eine maximale Nutzung zu erreichen um so über Skaleneffekte die Kosten zu senken. Der Brennstoffzelle ist es egal, ob sie mit grünem, blauem oder türkischem Wasserstoff betrieben wird. Vor diesem Hintergrund wäre z.B. bei der Elektrolyse daher nicht nur die Produktion von grünem, sondern auch von blauem und türkischem Wasserstoff (d.h. auf der Basis der Methanpyrolyse, die ebenfalls eine CO₂-arme Wasserstoffherzeugung ermöglicht, jedoch Temperaturen von über 1000° C und die Entsorgung von Kohlenstoffprodukten erfordert) in die Förderung einzubeziehen.

Wie ist das Programm der Bundesregierung insgesamt zu bewerten? An der Wasserstoff-Initiative der Bundesregierung überrascht vor allem, dass sie als eine völlig neue Zukunftsinitiative dargestellt wird. Wer jetzt jedoch in Euphorie über dieses Programm ausbricht, übersieht, dass bereits 2016 mit dem „Nationalen Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP)“ ein zehnjähriges Programm zur Förderung der Wasserstofftechnologie aufgelegt wurde, in dessen Rahmen ein belastbares Fördervolumen von bis zu 1,4 Mrd. Euro bereitgestellt wird.

Eine nachdrückliche Förderung der Wasserstoffstrategie kommt auch relativ spät. Spät, weil ein Land wie Frankreich mit einer wesentlich besseren Energiebilanz als Deutschland deutlich größere Anstrengungen unternommen hat als Deutschland. Der erste mit Wasserstoff angetriebene Zug wurde konsequenterweise daher von Alstom und nicht von Siemens entwickelt. Die unterschiedliche Energiepolitik zeigt sich auch daran, dass sowohl das Vereinigte Königreich als auch Frankreich ab 2040 Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren verbieten.

Das Programm ist auch wenig ambitioniert. Wenig ambitioniert, weil die Initiative nicht vollumfassend alle Anwendungen abdeckt und der Betrag von 7 Mrd. Euro (bzw. 9 Mrd. unter Einbezug der europäischen Unterstützung) weder im Hinblick auf seine Bedeutung im Konjunkturprogramm (allein 5,4 Mrd. Euro werden für den Kinderbonus bereitgestellt) noch im Hinblick auf die notwendigen Investitionen überzeugend ist: Nach Angaben des Hydrogen Council, einer aus 63 Unternehmen bestehenden Organisation zur Förderung der Wasserstoffenergie, werden bis 2030 ca. 70 Mrd. USD benötigt, um die Lücke zwischen den Kosten von Wasserstoff-Technologien und der Alternativen mit einem geringen CO₂-Ausstoß zu decken. Allein für die entscheidende Kerntechnologie der Elektrolyse (die für die Umwandlung von Elektrizität in Wasserstoff benötigt wird) werden Investitionen von 20 Mrd. USD veranschlagt, ein Bereich wo Deutschland über keine großen Kapazitäten verfügt, denn der Bedarf für Wasserstoff wird überwiegend durch andere Energieträger abgedeckt (vgl. das nachstehende Schaubild).

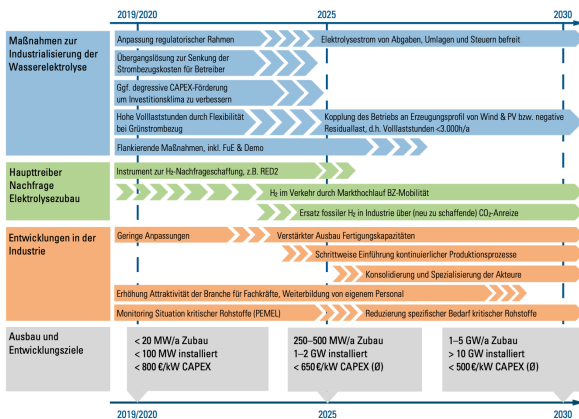


Selbst Portugal mit einer wesentlich geringeren Wirtschaftsleistung als Deutschland wird 7 Mrd. Euro für die Entwicklung der Wasserstofftechnologie bereitstellen (auch wenn die Beträge aufgrund eines unterschiedlichen Zeitrahmens nicht direkt zu vergleichen sind).

Der geringe Ehrgeiz des Regierungsprogramms äußert sich auch in der Zielgröße: „Ziel ist, dass eine Elektrolyseleistung in einer Größenordnung von 2

GW aufgebaut wird“ heißt es in der Wasserstoff-Strategie.

Hier überrascht, dass bei der Lektüre der Wasserstoff-Strategie der Eindruck erweckt wird, als ob es sich mit diesem Ziel um etwas völlig Neues handelte! Tatsächlich wurde bereits 2018 in der „Roadmap zur Industrialisierung der Wasserelektrolyse“ ein Ziel von 1-2 GW bis 2025 von der Elektrolysebranche für erreichbar gehalten (die Roadmap ist Bestandteil des vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur herausgegebenen Dokumentes „Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland: Chancen und Herausforderungen für nachhaltigen Wasserstoff für Verkehr, Strom und Wärme“). Experten des Fraunhofer Instituts fordern allerdings, dass bereits in den nächsten Jahren 1- 5 GW **pro Jahr** an Elektrolyseuren herzustellen sind um den Klimaschutzziele gerecht zu werden (vgl. das nachstehende Schaubild aus einer Präsentation des Fraunhofer Institutes).



Die Deutsche Energieagentur (Dena) geht von Elektrolyse-Kapazitäten von 16 GW in 2030 bzw. 53 bis 63 GW in 2050 aus. Der Deutsche Wasserstoff- und Brennstoffzellenverband geht gar von mindestens 100 GW bis 2050 aus. Zur Veranschaulichung: 1 GW Elektrolysekapazität erzeugt bei 4.000 Volllaststunden pro Jahr Wasserstoff für 1.700 Dieseltreibwagen, 30.000 Busse oder 200.000 Lieferwagen.

Neben Skaleneffekten bedarf es zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit noch erheblicher Forschungsanstrengungen, um bei Leistungsdichte, Effizienz und Lebensdauer bessere Ergebnisse zu erzielen. Es bleibt offen, wie diese Verbesserungen erzielt werden können, denn es gibt ja auch schon bisher mit dem NIP ein langjähriges Förderprogramm. Parallel zu den Anstrengungen auf der Produktionsseite bedarf es jedoch wie in dem Schaubild ersichtlich außerdem noch Maßnahmen auf der Nachfrageseite zur Marktaktivierung, z.B. durch CO₂-Anreize. (hier setzt das Regierungsprogramm also die richtigen Akzente, auch wenn die niedrigen CO₂-Preise kritisiert werden, da der Anreiz als zu gering angesehen wird).

Das Regierungsprogramm erweckt streckenweise den Eindruck, als ob es vor allem den Interessen der Unternehmen zur Erreichung ihrer Klimaschutzziele gerecht werden soll und nicht dem Aufbau einer kohärenten Wasserstoff-Industrie dient, welche die gesamte Wertschöpfungskette abdeckt (auch wenn dieses Ziel im Papier der Regierung explizit genannt wird). So sind z.B. die konkreten Maßnahmen zur Marktaktivierung nicht sehr ambitioniert (weder die direkten Maßnahmen noch die indirekten Maßnahmen über die CO₂-Bepreisung), aber gerade diese Maßnahmen werden als unabdingbar angesehen, um durch Skaleneffekte eine höhere Wirtschaftlichkeit zu erreichen. Auch das Fraunhofer-Institut weist am Beispiel von strombasierten Kraftstoffen darauf hin, dass zur Marktaktivierung weitere Maßnahmen erforderlich sind:

„Die durch den Gesetzgeber in Deutschland gegebenen Möglichkeiten zur Produktion strombasierter Kraftstoffe sind derzeit regulatorisch stark beschränkt und nur auf Einzelfälle anwendbar ... Die Weiterentwicklung des regulatorischen Rahmens (z. B. Befreiung des Elektrolysestroms von Abgaben, Steuern und Umlagen) sollte deshalb oberste Priorität bei der Marktaktivierung der Elektrolyse haben.“

Unklar ist letztendlich auch, wo die Schwerpunkte für den Einsatz der 7 Mrd. Euro liegen sollen, denn Prioritäten werden nicht genannt und das Programm stellt nur verklausuliert auf die jeweiligen Haushalte ab.

Wasserstoff-Pläne im Rest der Welt

Deutschland nimmt im Vergleich zum Rest der Welt keineswegs eine Vorreiterrolle ein. Eine nähere Beschreibung der Programme in anderen Regionen der Welt würde aber an dieser Stelle zu weit führen. Es sei lediglich kurz auf die USA, Frankreich und Spanien eingegangen. Im Vergleich mit Deutschland ist zu beachten, dass in den USA andere Voraussetzungen gegeben sind. Bei der Erzeugung von Strom wird z.B. nicht nur auf die erneuerbaren Energien, sondern auch auf die Stromerzeugung durch kleinere modulare Kernkraftwerke gesetzt. Die USA verfügen auch über einen Vorteil bei der Lagerung von CO₂, der als Abfallprodukt bei dem CCC – Verfahren anfällt, denn das Land hat große natürliche potentielle Speicherkammern mit einer Speicherkapazität von 3.000 metrischen Gigatonnen CO₂. Auch bei den Forschungsanstrengungen setzen die USA andere Akzente als z.B. die Europäer. In den USA wirkt das U.S. Department of Energy Office beispielsweise an der Entwicklung neuer Katalysatoren für Brennstoffzellen mit, die nicht auf teuren Edelmetallen beruhen. Hierzu werden zusammen mit Forschungsinstituten und der Industrie Modelle und Materialien getestet, die den Einsatz neuer Platin-freier Materialien ermöglichen

(das teure Edelmetall Platin stellt einen wesentlichen Kostenfaktor bei Brennstoffzellen dar). Die USA unternehmen auch große Anstrengungen bei der Entwicklung von Brennstoffzellen auf Basis von Festkörper-Brennstoffzellen (Solid Oxide Fuel Cell Program). Das amerikanische Unternehmen Bloom Energy zählt zu den Marktführern und die USA verdanken diesem Unternehmen die weltweit größte installierte Kapazität von 350 MW. Die Forschungsanstrengungen zielen darauf ab, die Zuverlässigkeit, Robustheit und die Lebensdauer bei Zelle, Stack (Stapel) und dem System zu erhöhen. In Japan spielt Kyocera eine führende Rolle bei SOFC Brennstoffzellen. In China sind es Suzhou Huatsing Power, SOFCMAN und CNFC, die eine führende Rolle bei SOFC spielen.

Frankreich hat sich im Rahmen des Paris Agreement zur Erreichung des 2 Grad Klimaschutz-Ziels verpflichtet den CO₂-Ausstoss von 310 Mt in 2015 auf 90 Mt in 2050 zu senken. Frankreich geht hier wesentlich ambitionierter als Deutschland vor, obwohl die Stromkosten aufgrund der Kernkraftenergie bereits jetzt mit 50g/kWh deutlich geringer als in Deutschland mit 560g/kWh sind. Konkrete Ziele für den Ausbau der Wasserstoff-Industrie sind in Frankreich nicht gegeben, jedoch hat die Association française pour l'hydrogène et les piles à combustible (AFHYPC) in einer Studie Pläne für die Entwicklung einer Wasserstoff-Strategie aufgezeigt. Zu den Zielen bis 2030 zählt nicht nur die Senkung von 10 – 12 Mio Tonnen CO₂-Ausstoss, sondern auch die Schaffung von 45.000 Arbeitsplätzen sowie ein Exportvolumen von 6-7 Mrd. Euro an Geräten, Komponenten und Spezialgütern. Zur Erreichung dieser Ziele hat Frankreich ähnlich wie Deutschland verschiedene Förderprogramme aufgelegt.

Auch Spanien bekennt sich zur Förderung von Wasserstoff und der im Juli 2020 verabschiedete Plan („Hoja de Ruta del Hidrógeno: una apuesta por el hidrógeno renovable“) sieht vor, dass bis 2030 8,9 Mrd. Euro in Wasserstoffprojekten investiert wird. Im Vordergrund steht neben einer Vereinfachung des regulatorischen Rahmens der Aufbau einer Elektrolysekapazität von 4 GW.

Im Gegensatz zu Deutschland, Spanien und Portugal mit quantitativen Investitionsprogrammen für die Wasserstoff-Industrie, bleibt die im Vereinigten Königreich von E4Tech entwickelte Roadmap eher unbestimmt. Der Fokus liegt hier stärker auf der Effizienz der Brennstoffzelle als auf dem Aufbau einer Wasserstoff-Industrie mit Fokus Elektrolyse. In einem öffentlichen Schreiben vom 16. Juni 2020 an das Finanzministerium haben sich jedoch mehrere in der Initiative „Hydrogen Strategy Now“ zusammengeschlossene Lobbyverbände und Unternehmen dafür ausgesprochen, dass die Regierung die private Initiative von 1,5 Mrd. Pfund mit öffentlichen Geldern unterstützt.

Die hiergenannten Vorhaben in ausgewählten Ländern sollen nur beispielhaft aufzeigen, dass dem Thema „Wasserstoff“ zunehmend hohe Priorität eingeräumt wird. Die großen „Player“ befinden sich jedoch in China, Japan und Südkorea.

Bedeutung des Wasserstoffs im Energiesystem

Was zeichnet nun die Bedeutung von Wasserstoff in der Energiewirtschaft besonders aus? Wasserstoff wird im Ökosystem an drei Stellen eingesetzt:

- Als Endprodukt (Elektrolyse, Reformierung)
- Als Energiespeicher
- Als Energieträger (Brennstoffzelle)

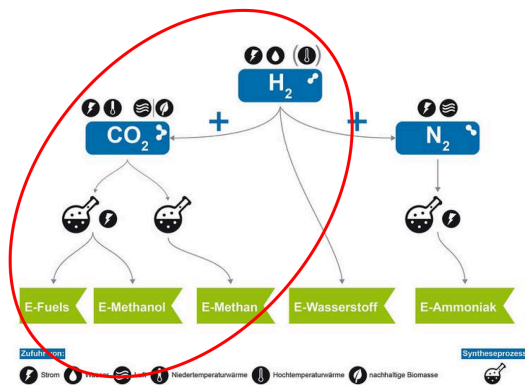
Wasserstoff eignet sich für eine Reihe unterschiedlicher Anwendungen. An erster Stelle steht die Stromerzeugung, da bei Verwendung von grünem Wasserstoff keinerlei Umweltbelastung entsteht. Hierzu wird eine Brennstoffzelle genutzt, die je nach Art entweder bei Pkws, Lastkraftwagen, Zügen und Straßenbahnen genutzt wird, aber auch als Energiequelle für die Heizung von Häusern genutzt werden kann. Im Gegensatz zu der Stromerzeugung über eine Batterie wird der Strom bei einer wasserstoffgetriebenen Brennzelle durch eine elektrochemische Reaktion erzeugt, wobei durch die Reaktion Wasserstoff zusammen mit Sauerstoff in H₂O umgewandelt wird und insofern keinerlei umweltschädliche Stoffe ausgeschieden werden.

Die Nutzung von Wasserstoff geht jedoch weit über die Stromerzeugung hinaus, da Wasserstoff auch als Medium für die Speicherung und den Transport genutzt werden kann (auch wenn es noch teuer ist, wird auch die Alternative der Konversion und Rekonversion von Wasserstoff in Ammoniak diskutiert, da Ammoniak eine höhere Dichte hat und deshalb leichter zu transportieren ist). Außer als Ammoniak kann Wasserstoff aber auch in anderer chemisch gebundener Form wie Methanol oder auch LOHC (Liquid Organic Hydrogen Carriers) transportiert werden.

Wenn Wasserstoff im Rahmen des Power-to-Gas (P2G) dem Erdgas-Netz beigemischt wird, können Kosten für das Netz optimiert werden. P2G eignet sich außerdem als Möglichkeit überschüssige Energie z.B. von Windanlagen in der Nordsee temporär zu speichern. Der durch die Windanlagen produzierte überschüssige Strom würde dann genutzt um durch eine Elektrolyse Wasserstoff zu produzieren. Deutschland erlaubt übrigens ähnlich wie die Niederlande einen wesentlich höheren Anteil der Beimischung von Wasserstoff in das Erdgas-Netz als andere Länder. Der Deutsche Verein des Gas- und Wasserfaches e. V. (DVGW) strebt als Ziel für die Beimischung sogar einen Anteil von 20% an. Ein höherer Anteil oder eine Umstellung auf 100% Wasserstoff erfordert zur Vermeidung von Korrosionsschäden ein „Retrofitting“ bzw. einen Austausch der Pipelines (Einsatz von Polyethylenen und Polymer). Bei 100% sind auch Leckkontrollen notwendig.

Wasserstoff spielt auch eine Rolle als Zwischenprodukt für synthetische Kraftstoffe. Dass es sich hier nicht um ein Nischenprodukt handelt erkennt man daran, dass die spanische Firma Repsol eine der größten Anlagen für klimaneutrale synthetische Kraftstoffe (auf der Basis von Wasserstoff und CO₂) mit einem Investitionsvolumen von 60 Mio Euro bauen wird (zusätzlich zu einer Anlage für die Methanpyrolyse). In Deutschland hat sich Sunfire mit der Entwicklung von sogenannten e-fuels einen Namen gemacht. Audi betreibt bereits seit 2013 eine Anlage zur Produktion von synthetischem Erdgas (Methan, welches fossilem Erdgas sehr ähnlich ist), welches durch Zuführung von CO₂ zu Wasserstoff hergestellt wird. Die Bedeutung dieser Technologie liegt auch darin, dass schädliches CO₂ gebunden wird. Diese Art der Nutzung von Wasserstoff, die auf dem Fischer-Tropsch-Verfahren beruht, kann auch für die Produktion von Kunststoffen und Kosmetika genutzt werden.

Die Stellung von Wasserstoff als Vorprodukt für synthetische Kraftstoffe und Stickstoffdünger (Ammoniak) wird anschaulich an dem folgenden Schaubild deutlich:

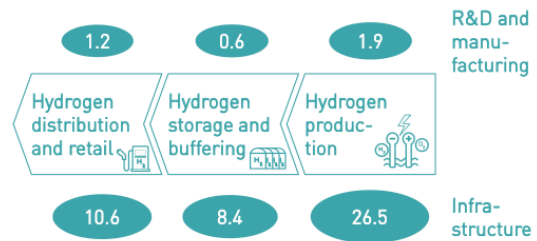


Marktanalyse

Für eine Bewertung des Wachstumspotentials des Marktes betrachten wir den Markt sowohl von der Nachfrage- als auch der Angebotsseite (Produktionspotential). Wesentlich ist, dass die Nachfrage nach Wasserstoffprodukten zunächst von den Klimaschutzvorgaben geprägt wird, da die Energieerzeugung bzw. Kraftstoffproduktion bei den derzeitigen Losgrößen ohne Fördermaßnahmen nicht wirtschaftlich ist.

Zur Erreichung der Ziele in Europa sind nach einer Studie des Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking insgesamt Investitionen von Euro 65 Mrd. erforderlich, deren Hauptanteil auf den Bau von Elektrolyseanlagen entfällt:

Cumulative investments in hydrogen production, storage, and distribution (2018-30)¹



Nachfrageseite

Nach der Roadmap des Berichtes „Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking“ gehen Analysten davon aus, dass der Anteil von Wasserstoff an der Energienachfrage in Europa von 2% in 2015 auf 4% in 2030 (bzw. 6% unter einem optimistischen Szenario) und 2050 im günstigsten Fall bis zu 24% erreichen könnte (für das Jahr 2050 ist auch die Klimaneutralität vorgesehen). Nur in diesem günstigsten Fall kann das Ziel der Reduzierung der Temperatur um 2 Grad erreicht werden. Zur Erreichung dieser Ziele ist Wasserstoff in den folgenden Sektoren einzusetzen (Zahlen in Klammern zeigen den notwendigen Anteil der CO₂-Reduktion an zur Erreichung des 2%-Temperaturziels):

- Transportsektor (72%)
- Beheizung und Energie im Gebäudesektor (57%)
- Hitze im industriellen Sektor (56%)
- Kraftstoffe als Ersatz für fossile Kraftstoffe
- Energiesektor

Transportsektor

Im Transportsektor wird sich die Nutzung von Wasserstoff in verschiedenen Phasen vollziehen: Derzeit ist die Wirtschaftlichkeit vor allem bei Notstromgeräten und Gabelstaplern ausreichend noch für einen kommerziellen Einsatz. Auf der nächsten Stufe sehen Marktexperten den Schienennahverkehr (Alstom liefert bereits Wasserstoff-Züge), gefolgt von Bussen, Lastkraftwagen und erst später den privaten Pkws. Anwendungen wird es auch im Schiffsverkehr geben sowie in einer fernerer Zukunft möglicherweise im Flugverkehr, sofern Biokraftstoffe entwickelt werden können.

Bei Lastkraftwagen kommt es aufgrund der langen Lebensdauer der Fahrzeuge ebenfalls auf eine lange Lebensdauer der Brennstoffzelle an. Bisher war die Akzeptanz in diesem Sektor noch geringer, da Kosten eine wesentliche Rolle spielen und in diesem Sektor weniger Fördermaßnahmen bestehen. Der erfolgreiche Börsengang von Nikola sowie eine

große Lieferung an Anheuser-Busch über 800 FCEV Lastwagen zeigen jedoch das Marktpotential. Die Akzeptanz könnte auch weiter zunehmen, wenn Diesellastwagen aus den Stadtzentren verbannt werden.

Die Preise der bereits jetzt marktfähigen Pkws von des Toyota Mirai und Hyundai ix35 liegen etwa doppelt so hoch wie die Preise vergleichbarer Elektroautos wie z.B. der Renault Zoe und der Nissan Leaf. In dem Maße wie jedoch die Nachfrage zunimmt werden die Preise fallen und Wasserstoff-angetriebene Pkws könnten sich als die kostengünstigere Alternative erweisen.

Busse mit Brennstoffzellen sind relativ ausgereift und die Stadt London hat z.B. vier Busse eingesetzt mit einer Betriebszeit von 18.000 Stunden. In Kalifornien wurden 10 Busse mit 12.000 Stunden betrieben, davon einer mit mehr als 22.000 Stunden (d.h. nahe dem Ziel der DOE von 25.000 Stunden).

Nach einer Studie der Royal Society of Chemistry sind allein in den USA 12.000 brennstoffzellen-angetriebene Gabelstapler im Einsatz (85% davon von der Firma Plug Power geliefert). Hier kann Wasserstoff seine Vorteile ausspielen, da aufgrund ihrer Emissionsfreiheit die Gabelstapler in Innenräumen fahren können. Aufgrund der ggü. batteriegetriebenen Einheiten schnelleren Ladungszeit reduziert sich der Studie zufolge die TCO (Total Cost of Ownership) um 24%.

Gebäudesektor

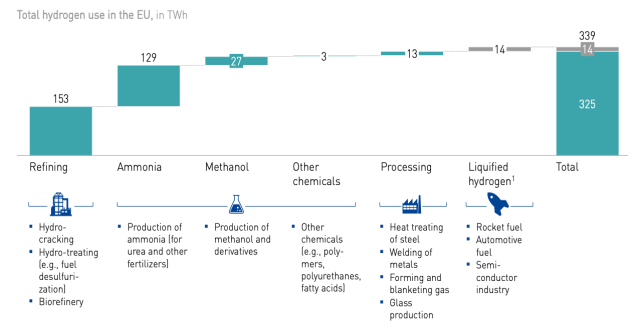
In der Gebäudeheizung stand die Anwendung von Wasserstoff bisher nicht im Vordergrund, obwohl neuere Studien auch hier von einem Potential sprechen. Wasserstoff-Boiler können z.B. auch mit Wasserstoff-Mischungen angetrieben werden. Brennstoffzellen haben im Wohnungssektor einen Nischenmarkt, wobei insbesondere die sogenannten micro-CHP Systeme weltweit mit einem Einsatz von 225.000 Einheiten eine starke Marktstellung erobert haben. Experten erwarten, dass die Brennstoffzellen ab 2025 mit anderen Heiztechnologien wettbewerbsfähig sein werden.

Industrieller Sektor

In der Industrie werden zur Reduzierung der Treibhausgase verschiedene Varianten diskutiert (Recycling, Biomasse, Effizienzsteigerung, etc.), wobei der Einsatz von Wasserstoff noch eine entferntere Möglichkeit darstellt. Insbesondere im Hochtemperatur-Bereich bei der Stahlerzeugung und in der chemischen Industrie (die beide rund 30% des CO₂-Ausstosses verantworten) wird nicht vor 2030 ein wirtschaftlicher Einsatz erwartet.

Wasserstoff wird in der Industrie sowohl als Brennstoff als auch als Vorprodukt eingesetzt wie zuvor erläutert. Von besonderer Bedeutung ist sein Einsatz bei der Erzeugung von Ammoniak, dem Hauptprodukt für Stickstoffdünger. Das folgende Schaubild gibt einen guten Überblick über das gesamte

Spektrum des Einsatzes von Wasserstoff in der Industrie in Europa:



Eine Sonderrolle für den Einsatz von Wasserstoff ergibt sich in dem als CCU bezeichneten Verfahren. Hier handelt es sich um die Nutzung von Wasserstoff, um CO₂-Emissionen der Industrie nützlich zu verwerten. Gegen einen weiteren Einsatz von CCU sprechen offenbar noch die hohen Kosten von 90 Euro pro Tonne. Experten erwarten eine Wirtschaftlichkeit erst bei 30 Euro pro Tonne.

Energiewirtschaft

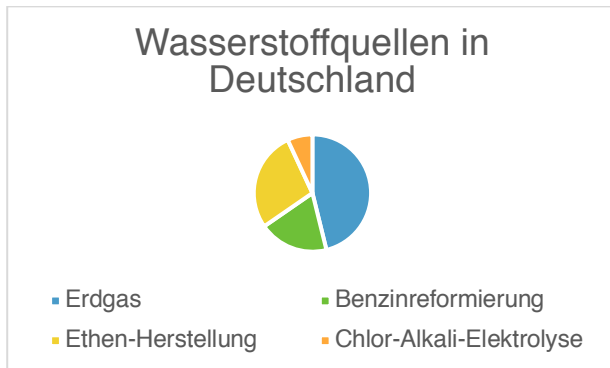
Auch in der Energiewirtschaft eignet sich Wasserstoff als Ersatz für fossile Energieträger. Seine Rolle besteht hier überwiegend darin, überschüssigen Strom über den Weg der Elektrolyse chemisch zu speichern. Er kann dann genutzt werden, um z.B. in Brennstoffzellen Strom zu erzeugen oder Kraftstoff für Brennstoffzellenantriebe herzustellen. Brennstoffzellen eignen sich damit für eine Vielzahl von Aufgaben, wobei in den USA Brennstoffzellen zur lokalen Stromversorgung an Popularität gewinnen, da sie nach einer Studie günstigeren Strom liefern als lokale Versorger und einen geringeren Schadstoffausstoß haben. Zudem ermöglichen sie den Ersatz von Dieselgeneratoren und eignen sich auch als unterbrechungsfreie Stromerzeuger (USV) in größeren Netzen, wo sie der Ersatzstromversorgung dienen.

Wasserstoff kommt auch besondere Bedeutung in seiner Rolle als Speichermedium zu, da es eine sehr hohe Energiedichte hat. Das europäische Gasnetz hat eine Kapazität von 36 Mrd. m³ und bei einer Beimischung von 10% in das Gasnetz könnten 100 TWh von Wasserstoff gespeichert werden. Aufgrund der guten Speicher- und Transporteigenschaften von Wasserstoff können auch die spezifischen Möglichkeiten der Produktion von Solar-, Wind- und Wasserenergie besser genutzt werden, da Energie dort produziert werden kann, wo sie am günstigsten zur Verfügung steht.

Angebotsseite (Erzeugung)

Da Wasserstoff auf der Erde nur in gebundener Form in Wasser und Kohlenwasserstoffen vorkommt, muss er unter Einsatz von Energie hergestellt werden. Weltweit wird Wasserstoff noch zu

96% aus fossilen Energieträgern hergestellt und nur zu 4% durch das elektrochemische Verfahren der Elektrolyse. In Deutschland verteilt sich die Wasserstoffherzeugung wie folgt auf die Verfahren auf:



Ganz allgemein wird außerhalb der Elektrolyse von Reformierung gesprochen, womit die Umwandlung von Kohlenwasserstoffen (Erdgas, Leichtbenzin, Ethanol) in Wasserstoff gemeint ist. Bei der Reformierung wird die Dampfreformierung (auch als SMR abgekürzt) und partielle Oxidation unterschieden. Bei diesem Verfahren wird neben Wasserstoff auch CO und CO₂ erzeugt, wobei CO mit Dampf zu zusätzlichem Wasserstoff und CO₂ umgesetzt wird (der sogenannten Wassergas-Shift-Reaktion). Die Freisetzung von CO₂ ist daher auch der wesentliche Kritikpunkt an dieser Art der Wasserstoffherzeugung. Typische Anlagen der Dampfreformierung haben eine Kapazität von 50.000 – 200.000 Normkubikmeter pro Stunde (Nm³/h). Das nachstehende Bild zeigt eine Anlage von Linde mit einer Kapazität von 100.000 Nm³/h.



Der Vorteil der partiellen Oxidation liegt darin, dass die Reaktionswärme direkt im Reaktionsraum erzeugt wird und dadurch eine kompaktere Ausführung der Reaktoren möglich ist. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass auch weniger reine, flüssige oder feste Kohlenwasserstoffe (Kohle, Erdöl, etc.) genutzt werden können. Beide Verfahren können auch in der autothermen Reformierung (ATR) kombiniert werden. Die hierbei freigesetzten CO₂-Mengen lassen sich besser abscheiden als bei der SMR (90% bei AMR statt 65% bei SMR). Das anfallende CO wird nicht in die Umgebungsluft abgegeben, sondern im sogenannten CCS-Verfahren (Carbon Capture and Storage) unterirdisch gelagert. In Deutschland sind die Speicherkapazitäten für CO₂ jedoch begrenzt und bei Nutzung anderer Lagerstätten würden zusätzliche Lager- und Transportkosten anfallen.

Neben den Verfahren der Elektrolyse und Reformierung wird derzeit auch an anderen Verfahren geforscht, z.B. der photoelektrischen Erzeugung, der photobiologischen Erzeugung und der thermochemischen Erzeugung mittels solarer Hochtemperaturprozesse.

Wasserstoff-Infrastruktur

Die Infrastruktur setzt sich aus drei Feldern zusammen:

- Distribution
- Tankstellennetzwerk
- Verdichtung
- Wasserstoffspeicher

Die Verteilung kann mit Trailern (Druckgas und Flüssiggas) oder Pipelines erfolgen. Druckgastrailer stellen für mittlere Mengen die übliche Form dar, die mit einem Druck von 200 bar bis 500 bar arbeiten.

Bevor der Wasserstoff gespeichert werden kann, ist er zu komprimieren. Bisher geschieht die Komprimierung überwiegend auf mechanischem Weg, der jedoch je nach Anwendung verschieden hohe Druck erfordert. Diese Verfahren sind erprobt, jedoch aufgrund von hohen Wartungsarbeiten an mechanischen Teilen wenig effizient und teuer. Es gibt daher Forschungsansätze, die nach anderen Methoden Ausschau halten, wobei insbesondere der elektrochemischen Verdichtung stärkere Bedeutung zukommt (s. S. 12 wegen Details). Das Verfahren der „metal hydride compression“ befindet sich noch im Anfangsstadium und wird vorwiegend von Wissenschaftlern in Norwegen (Hystorsys) und Russland erforscht (s.u. das Bild einer Anlage von Hystorsys). Bisher sind die Arbeiten noch auf Laborebene mit einem Druck bis zu 200 bar (200 bar ist der Druck, der für die Anbindung an Trailer erforderlich ist). Die Forschungsanstrengungen verdeutlichen, dass es

in der gesamten Wertschöpfungskette der Wasserstoffindustrie unzählige Ansatzstellen gibt, wo der Prozess verbessert werden kann.



Bei der Speicherung werden überwiegend Salzkavernen zur Erdgasspeicherung eingesetzt. In den USA und dem vereinigten Königreich werden Salzkavernen bereits seit längerem auch zur Speicherung von Wasserstoff genutzt. In Deutschland Zu einer voll ausgebauten Wasserstoff-Infrastruktur gehört auch ein Pipeline-Netzwerk, welches ebenfalls als Speichermedium geeignet ist. In Deutschland steht hierzu das Erdgasnetz zur Verfügung, denn Erdgas ist grundsätzlich für die Aufnahme von Wasserstoff geeignet. Der Oldenburger Energieversorger EWE plant bereits Erdgaskavernen für Wasserstoff zu nutzen. Bereits vor Jahren wurden vor der Umstellung auf Erdgas die deutschen Gasnetze mit dem sogenannten Stadtgas betrieben, welches zu 51% aus Wasserstoff bestand. In dem Maße wie später im Rahmen der Energiewende weniger Erdgas verbraucht wird können die bisherigen Erdgasleitungen auch für den Transport von Wasserstoff genutzt werden. Die Idee besteht darin, dass überschüssiger Strom aus Windanlagen in Norddeutschland in Wasserstoff gespeichert wird und der Transport durch Pipelines nach Süddeutschland geschieht. Bei Nutzung bestehender Erdgasleitungen bestünde ein Vorteil auch darin, dass keine neuen Stromtrassen verlegt werden müssten. Außer in Deutschland sind Pipelines auch in Frankreich, Belgien und den Niederlanden verlegt. Dem Pipeline-Netz kommt gerade im Hinblick auf das geplante Nordsee Wind Power Hub, in dem bis 2030 10.000 Windräder verbunden werden besondere Bedeutung zu.

Das Tankstellennetz für Wasserstoff nimmt in der gesamten Infrastruktur eine Schlüsselstellung ein. Die Bundesregierung und H2 Mobility (ein Gemeinschaftsunternehmen von Air Liquide, Linde, OMV, Shell, Total und Daimler) planen dementsprechend

das Wasserstoff-Tankstellennetz in diesem Jahr bis auf 100 Tankstellen weiter auszubauen.

Firmenuniversum

Für ein besseres Verständnis der Bedeutung der Unternehmen empfiehlt es sich die Unternehmen nach ihrer Stellung in der Wertschöpfungskette einzuordnen. Wir werden im folgenden Text die Unternehmen nach den folgenden Geschäftsfeldern unterscheiden:

- Elektrolyseure
- Anlagenbauer (Reformierung, etc.)
- Brennstoffzellenhersteller
- Hersteller von Schlüsselkomponenten
- Integrierte Firmen
- Hersteller von Infrastruktur

Wie im Text erwähnt (vgl. S. 5) werden die höchsten Investitionsausgaben im Ökosystem Wasserstoff bei den Elektrolyseuren (den Herstellern und Betreibern von Elektrolyseanlagen) erwartet. Obwohl derzeit mehr als 95% der Wasserstoffproduktion über die Reformierung gewonnen wird, stellt die Elektrolyse die Kerntechnologie für die Umwandlung von grünem Wasserstoff in Strom dar und hier sind daher auch die größten Wachstumsraten zu erwarten. Die Wasserstoffgewinnung ist kein Selbstzweck, sondern sein Einsatz dient letztendlich der Stromerzeugung (und Energiespeicherung) bzw. industriellen Anwendungen wie der Ammoniak-Erzeugung. Besondere Bedeutung kommt der Brennstoffzelle zu, denn sie ermöglicht die Umwandlung der chemischen Bindungsenergie in elektrische Energie.

Exkurs Brennstoffzelle

In diesem Exkurs möchten wir einen groben Überblick über die Wirkungsweise einer Brennstoffzelle geben, da dann die Bedeutung der einzelnen Komponenten deutlicher wird. Das Grundprinzip der Brennstoffzelle beruht darauf, dass im Wasserstoffmolekül das Elektron vom Atom getrennt wird und der freie Elektronenfluss damit als Stromquelle genutzt wird. Die Trennung von Protonen und Elektronen erfolgt an der Anode der Brennstoffzelle und zur Erleichterung der Aufspaltung wird die Anode mit Platin beschichtet, welches als Katalysator dient. In die Brennstoffzelle wird einerseits an der Anode Wasserstoff eingeleitet, andererseits an der Kathode Sauerstoff. Damit sich die Gase nicht in der Zelle vermischen wird eine Membrane eingesetzt. Sie ermöglicht, dass die Protonen zur Kathode fließen können, verhindert jedoch den Durchfluss der Elektronen, die über ein äußeres Kabel abfließen können, wo sie elektrische Arbeit verrichten. Auf der anderen Seite der Membrane, der Kathode, reagieren die Protonen und Elektronen mit dem Sauerstoff zu Wasser.

Aus dieser kurzen Erklärung wird bereits deutlich, dass in einer Brennstoffzelle mehrere kritische Komponenten eingesetzt werden:

- Die Membrane
- Der Katalysator
- Die Elektroden (Anode/Kathode)
- Der Gas Diffusion Layer (GDL)
- Die Bipolarplatte
- Der Elektrolyt

Während die Funktionsweise der Membrane und des Katalysators wie oben beschrieben leicht verständlich ist, ist die Bedeutung der anderen Komponenten weniger offensichtlich. Der GDL ist z.B. für das Wassermanagement und den optimalen Gas-transport in der Zelle verantwortlich. Die Bipolarplatten haben u.a. den Zweck die Reaktionsgase möglichst gleichmäßig und in ausreichendem Maß zur Verfügung zu stellen. Zu den Funktionen gehört daneben die Bereitstellung der thermischen Leitfähigkeit zum Management der Temperatur des Elektrolyts. Zur Sicherstellung dieser Funktionen müssen die Bipolarplatten über eine hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit, geringe Gasdurchlässigkeit, hohe mechanische Stärke und Korrosionsschutz verfügen.

Der Elektrolyt kann flüssig sein (Laugen oder Säuren) oder fest sein (z.B. Keramikwerkstoffe).

Jede dieser Komponenten bestimmt durch ihre Gestaltung in unterschiedlicher Stärke die Leistung der Brennstoffzelle. Für das Design der Komponenten ist ein besseres Verständnis der sogenannten „hydrogen oxidation reaction“ (HOR) erforderlich. Hier kommt es darauf an, diese Reaktion zu beschleunigen, wobei der Katalysator, aber auch der PH-Gehalt des Elektrolyts eine Rolle spielen. Das Edelmetall Platin ist zwar ein geeigneter Katalysator, aber sein hoher Preis erhöht die Kosten der Brennstoffzelle. Aus Forschungsberichten wird deutlich, dass für die Nutzung anderer Materialien und die Beschleunigung der Reaktion noch ein besseres Verständnis der Elektroneneigenschaften, die die Bindungsenergie zwischen den Katalysatoratomen und Adsorbaten bestimmen, erforderlich ist. Aus Forschungsberichten wird ebenfalls deutlich, dass in den letzten Jahrzehnten gerade dem Verständnis und der Modellierung der Elektroneneigenschaften wenig Bedeutung geschenkt wurde und man sich stärker auf die direkten elektrochemischen Wirkungen konzentriert hatte. In dem Maße wie sich die Forschung jetzt stärker auf das Verständnis der Wirkungszusammenhänge zwischen den verschiedenen Materialien konzentriert, sollte auch die Leistung der Zellen erhöht werden.

Für das Verständnis der weiteren Entwicklungsmöglichkeiten der Wasserstoffindustrie ist zu beachten, dass bei jeder der verschiedenen Komponenten der

Brennstoffzelle nach Möglichkeiten gesucht wird, die Effizienz, Lebensdauer, etc. zu verbessern.

Bei der Membrane werden in der Industrie fast ausschließlich Membranen der amerikanischen Firma Chemours (eine Abspaltung von Dupont) verwendet. Die unter dem Markennamen Nafion vertriebene Membrane weist hinsichtlich Membranstärke, mechanische Stärke, Crossover (s.u. zur Erklärung des Begriffs), Haltbarkeit und Temperaturbeständigkeit ($>100\text{ °C}$) keine optimalen Eigenschaften auf und gilt auch als sehr teuer. Verschiedene Unternehmen wie 3M, Gore, Asahi Glass und Solvay Specialty Polymers haben daher Alternativen entwickelt. In Deutschland berichtete das Max-Planck-Institut für Festkörperforschung bereits 2017, dass es im Rahmen des Forschungsprojektes PSUMEA 2 eine leistungsfähige Membrane entwickelt hat, die eine bessere Leistung als Nafion aufweist. Hier ein Auszug aus dem Bericht:

„Darüber hinaus zeigt der neue Membrantyp weitere, entscheidende Vorteile gegenüber dem Stand der Technik. Im Gegensatz zur etablierten Technik erweichen die Membranen nicht bis mindestens 200 Grad Celsius und zeigen auch weit über 100 Grad Celsius keine irreversiblen Schäden. Ihre mechanische Festigkeit ist hoch und der Gasdurchtritt sehr gering, was die Ausprägung sehr dünner Membranen und damit eine weitere Leistungssteigerung ermöglichen sollte. Die Kombination aus geringem Gasdurchtritt (mehr als eine Größenordnung) und sehr hoher Leitfähigkeit machen diesen neuen Membrantyp auch sehr geeignet für Anwendungen in der Wasserelektrolyse. Ebenfalls liegen die geschätzten Herstellungskosten etwas unter denen von heute üblichen Membranen.“

Trotzdem scheinen Nafion-Membranen den Markt weiterhin zu beherrschen und ein Forschungsbericht vom April 2020 bestätigt diese Ansicht:

„Nafion membranes are still the dominating material used in the polymer electrolyte membrane (PEM) technologies. They are widely used in several applications thanks to their excellent properties: high proton conductivity and high chemical stability in both oxidation and reduction environment. However, they have several technical challenges: reactants permeability, which results in reduced performance, dependence on water content to perform preventing the operation at higher temperatures or low humidity levels, and chemical degradation.“

Die hohe Anzahl von Forschungsarbeiten in diesem Feld verdeutlicht die Bedeutung der Membranen für die Brennstoffzellen und zeigt auf, dass noch erhebliches Potential für eine Verbesserung der Leistungsfähigkeit bzw. Kosten besteht. Neueste Forschungsberichte sehen bei sogenannten Hydrocarbon-Membranen Potential für eine höhere Leistung

bzw. geringere Materialkosten. Die Geschichte endet jedoch hier nicht, denn die Leistungsfähigkeit der Membranen kann zusätzlich durch eine Beschichtung gesteigert werden. Die amerikanische Firma Sono-Tek ist führend bei dieser Art der Beschichtung. Technologische Herausforderungen bestehen jedoch nicht nur im Hinblick auf die Steigerung der Effizienz der Membrane, sondern auch im Hinblick auf eine kostengünstige Produktion.

Es gibt verschiedene Typen von Brennstoffzellen, die je nach Anwendung unterschiedlichen Bedürfnissen genügen (vgl. die nachstehende Übersicht für eine Klassifizierung).

BZ-Typ	Betriebstemperatur	Elektrolyt	Elektrische Leistung	Wirkungsgrad (%)
AFC	60-90	Kalilauge	250 kW	50-60
PEMFC	50-180	Polymermembran	400 kW mehrere 10 MW	30-60
PAFC	160-220	Phosphorsäure Karbonat-Schmelze	mehrere MW	30-40
MCFC	600-700	Karbonat-Schmelze	mehrere MW	55-60
SOFC	700-1000	Oxidkeramik	mehrere MW	50-70

Wie anfangs in diesem Text dargestellt, haben die USA eine eigene Initiative zur Förderung der oxidkeramischen Brennstoffzellen (SOFC von engl. solid oxid fuel cell). Sie setzen hierbei allerdings auch auf den Einsatz von Kohle zur Erzeugung von Elektrizität. Hier ein Auszug aus der Initiative:

To enable the generation of efficient, low-cost electricity from natural gas or coal for:

- Near term: Natural gas-based distributed generation
 - 100 kWe – 1 MWe
- Long term: Coal and natural gas utility-scale applications with Carbon Capture and Sequestration (CCS)
 - 10 MWe – 50 MWe

Dieser Typ zeichnet sich dadurch aus, dass anstatt eines flüssigen Elektrolyts und Membrane ein aus Keramik (Zirkoniumoxid) bestehender Festkörper verwendet wird. Außerdem kann auf einen Katalysator verzichtet werden. Eine SOFC arbeitet bei hohen Temperaturen bis 1000° C und erreicht eine Effizienz zwischen 60% und 80%. SOFC finden Anwendung bei kleineren und großen Energieversorgungseinheiten (Bloom Energy stellt z.B. eine 100kW-Anlage her). Die hohen Temperaturen stellen hohe Anforderungen an die Materialien und die Forschungsinitiative geht auch auf die damit verbundenen Änderungen in den Mikrostrukturen der Metalle ein.

Neben dem Unterscheidungsmerkmal der Stellung innerhalb des Ökosystems Wasserstoff können wir die Unternehmen auch nach ihrer Stellung bei den Endmärkten, die sie bedienen, klassifizieren.

Plug Power z.B. ist der führende Lieferant von Wasserstoffbrennzellen für Flurförderzeuge. Ballard

Power hat sich stärker auf Brennstoffzellen für Triebwagen, Lastwagen und Schwerverkraftwagen spezialisiert. Bloom Energy hingegen stellt überwiegend Brennstoffzellen für Datenzentren her, die u.a. der Netzwerksicherheit dienen. Bei der Klassifizierung der Elektrolyseure haben wir andere Merkmale herangezogen (vgl. die Tabelle auf S. 11).

Exkurs Funktionsprinzip Elektrolyse

Wir haben gesehen, dass für die Elektrolyse die höchsten Investitionen erwartet werden. Da bisher erst ca. 4% des weltweit produzierten Wasserstoff mit der Elektrolyse erzeugt wird, ergibt sich ein hohes Marktpotential. In der Elektrolyse verlaufen ähnliche elektrochemische Prozesse ab wie bei der Brennstoffzelle, für einen wirtschaftlichen Einsatz sind jedoch noch hohe Forschungsanstrengungen erforderlich, die besonders die Membran- und Katalysatormaterialien betreffen (s. a. unten den Kommentar zur Automatisierung). Eine Kernkomponente der Elektrolyse stellt der sogenannte HER Katalysator an der Kathode dar (von englisch „hydrogen evolution reaction“). Experten weisen darauf hin, dass die Menge der verwendeten Materialien IrOx und Rhuthenium zu hoch ist, um langfristig eine ausreichende Wirtschaftlichkeit zu erreichen. Von gleicher Bedeutung ist auch eine ausreichende Stabilität und hohe Lebensdauer des Katalysators.

Da die PEM Elektrolyse (s.u. wegen Erklärung) Ähnlichkeiten mit der PEM Brennstoffzelle aufweist möchten wir im folgenden nur auf das Funktionsprinzip der PEM Elektrolyse eingehen. Als Hydrolyse bezeichnet man allgemein die elektrochemische Aufspaltung eines Stoffes durch Zufuhr von elektrischem Strom. In der Wasserelektrolyse wird Wasser (H₂O) aufgespalten in seine Bestandteile Wasserstoff (H₂) und Sauerstoff. Bei der sogenannten PEM-Elektrolyse (PEM steht für „Polymer-Elektrolyt-Membrane“) wird wie bei der Brennstoffzelle ebenfalls eine protonendurchlässige Membrane benutzt, deren Prinzip auf der Beweglichkeit der Ladungsträger beruht. Die Membrane ermöglicht hier eine räumliche und elektrische Trennung der Reaktionsräume von Anode und Kathode. Aufgrund der elektrischen Potentiale an Anode und Kathode und des sauren Mediums des Elektrolyt sind zur Vermeidung einer Reaktion edle Metalle erforderlich. An der Anode ist das Potential höher, so dass Titan eingesetzt wird, während aufgrund des geringeren Potentials der sogenannten Wasserstoffentwicklungsreaktion auch kohlenbasierte Materialien eingesetzt werden können. Wie bei der Brennstoffzelle sind für die Reaktion ebenfalls Katalysatoren erforderlich, für die Platin eingesetzt wird.

Bei der Elektrolyse können verschiedene technologische Ansätze unterschieden werden: Die Alkalische Elektrolyse (AE), die PEM-Elektrolyse und die Hochtemperatur-Elektrolyse (SOEC), wobei letztere

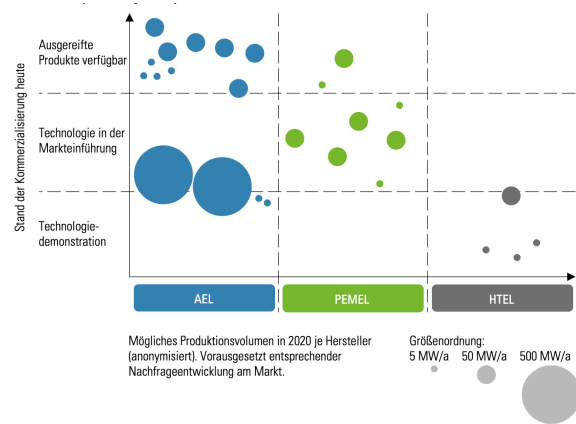
deutlich höhere Investitionskosten erfordert. Perspektivisch soll nach Ansicht von Experten jedoch bei Nutzung aller Skaleneffekte und Standardisierung der Anlagenkomponenten die SOEC preislich mit den beiden anderen etablierten Verfahren in Zukunft konkurrieren können.

Derzeit dominiert die AE klar und stellt den Großteil der weltweit installierten Kapazität. Ein großer Vorteil der alkalischen Elektrolyse ist, dass die Herstellung keine knappen oder kritischen Rohstoffe benötigt (als Anodenmaterial wird Nickel verwendet, welches verhältnismäßig günstig ist und eine gute elektrochemische Aktivität und Beständigkeit in alkalischen Umgebungen besitzt). Zwar ist die AE das bewährteste und preiswerteste Elektrolyseverfahren, aber sie ist insbesondere in der regenerativen Energiewirtschaft mit ihren wechselnden Lastbereichen nur bedingt geeignet, da im Teillastbetrieb hohe Wirkungsgradverluste eintreten. Die PEM-Elektrolyse entwickelt sich sehr schnell und wird zunehmend wettbewerbsfähig. Ein eingehender Vergleich der Vor- und Nachteile der einzelnen Technologien würde hier zu weit führen, es sei jedoch darauf hingewiesen, dass in der PEM-Elektrolyse inzwischen auch Anlagen mit einer Kapazität bis zu 1 MW gebaut werden und diese Technologie sich immer stärker in den Vordergrund drängt.

Einige charakteristische Merkmale der verschiedenen Elektrolysen sind in der nachstehenden Tabelle dargestellt (Quelle: Auszug aus einer Studie von Shell):

	Temperatur °C	Elektrolyt	Anlagengröße	Wirkungs- grad	Reinheit H ₂	
Alkaline Elektrolyse (AE)	60 - 80	Kalium- hydroxid	0,25 - 760 Nm ³ H ₂ /h	1,8 - 5.300 kW	65 - 82%	99,5% - 99,9998%
Proton Exchange Membran Elektrolyse (PEM)	60 - 80	Feststoff- membran	0,01 - 240 Nm ³ H ₂ /h	0,2 - 1.150 kW	65 - 78%	99,9% - 99,9999%
Anion Exchange Membran Elektrolyse (AEM)	60 - 80	Polymer- Membran	0,1 - 1 Nm ³ H ₂ /h	0,7 - 4,5 kW	k.A.	99,4%
Solid Oxide Elektrolyse (SOE)	700 - 900	Oxidkeramik	Bisher nur Labormaßstab		85% (Labor)	k.A.

Das folgende Schaubild aus einer Studie des Fraunhofer-Institutes zeigt übersichtlich den Stand der Kommerzialisierung der verschiedenen Elektrolyse-Technologien:



Bei der Einschätzung der Wirtschaftlichkeit der Elektrolyse kommt es neben den Kosten für die Stromerzeugung auf verschiedene Faktoren an. Hierzu zählen nicht nur die direkten Kosten, die die Effizienz der Wasserstoffproduktion beeinflussen, sondern auch andere Faktoren wie z.B. eine schnelle Reaktion auf Stromschwankungen (Regelbarkeit), eine hohe Lebensdauer und der Reinheitsgrad des Wasserstoffs. Da Strom aus erneuerbaren Energien nicht konstant zur Verfügung steht, können die Anlagen nicht unter Vollast betrieben werden. Daher besteht hier auch bei der Entwicklung und Vermarktung von teillastoptimierten Gleichrichtern und Transformatoren Handlungsbedarf in der Industrie.

Ein weiterer Faktor, der die Wirtschaftlichkeit im Ökosystem beeinflusst, ist ein hoher Ausgabedruck des Elektrolyseurs, da ein hoher Druck die Kosten für die spätere Wasserstoffkompression reduziert. Im Idealfall kann damit eine Zwischenstufe (mechanische Geräte) für die Verdichtung eingespart werden, so dass Verdichtung und Erzeugung in einer Einheit nur auf elektrochemischem Weg erfolgen. Ein wesentlicher Vorteil dieses Ansatzes besteht darin, dass aufgrund fehlender beweglicher Bauteile die Wartungskosten geringer sind.

Bei der elektrochemischen Verdichtung (EHC electrochemical compression) sind vielfältige Wechselwirkungen zu untersuchen, die in unterschiedlicher Weise die Wirtschaftlichkeit, Effizienz und Lebensdauer beeinflussen (z.B. durch Veränderungen von Temperatur, Druck, Materialien, Komponenten, etc.). Der höhere Druck bei der Verdichtung von Wasserstoff in der Zelle beeinflusst auch die Lebensdauer der Membrane: Bei der Hydrolyse handelt es sich um eine sogenannte exotherme Reaktion, die zu hohen lokalen Temperaturen führen kann und dadurch die Membrane im Zeitverlauf zerstören kann. Ein weiteres Problem, welches in der Zelle bei hohem Druck entsteht ist der sogenannte „cross over“-Effekt. Hierbei handelt es sich um die unerwünschte Diffusion des Gases von der Anode zur Kathode durch die Membrane. Dieser Effekt gilt

als einer der Hauptgründe für die Beeinträchtigung der Lebensdauer der Membrane und des Katalysators. Da der „crossover“-Effekt von fundamentaler Bedeutung für die Lebensdauer der Zelle ist, werden in der Forschung Anstrengungen unternommen, diesen Effekt auch quantitativ zu bestimmen.

Einen kleinen Überblick über die Komplexität der elektrochemischen Verdichtung erhält man durch Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile eines hohen Ausgabedrucks (vgl. die nachstehende Übersicht).

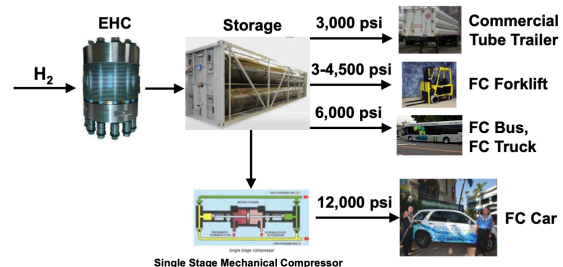
Vorteile	Nachteile
Energieeinsparung Kompression	Reduzierung der Effizienz
Reduzierung der Verdichtungsstufen	Reduzierung der Lebensdauer der Zellen

Das Thema der Wasserstoffverdichtung auf elektrochemischem Wege befindet sich jedoch trotz intensiver Forschung offenbar immer noch in den Anfängen, da die mechanischen Verfahren günstiger und langjährig erprobt sind. Auch hier haben die USA ähnlich wie bei der SOFC ein Studienprogramm aufgelegt. Das erstmals 2010 vom DOE initiierte mehrjährige Programm ist im Juni 2020 ausgelaufen und lässt auf deutliche Fortschritte bei dem Grad der Verdichtung schließen. Das amerikanische Unternehmen FuelCell Energy berichtete in einer umfangreichen Studie, dass bereits 2012 ein Druck von 12.000 psi erreicht wurde (den Wert in Bar errechnet man durch Division des psi durch 14) und damit das vom DOE vorgegebene Ziel erreicht wurde. Obwohl das Unternehmen detailliert die Vorteile und Möglichkeiten der elektrochemischen Verdichtung darstellt und aktiv an der Forschung zu EHC teilgenommen hat, sind in jüngeren Unternehmenspräsentationen jedoch keine Hinweise auf einen Einsatz zu finden.

Wesentlich weiter fortgeschritten ist offenbar die Forschung von Giner Elx (das amerikanische Unternehmen wurde kürzlich von Plug Power übernommen), das in einer Studie mit Partnern aus der akademischen Welt im vergangenen Jahr detaillierte Ergebnisse für EHC vorstellte. Offenbar handelt es sich noch um Laborergebnisse, die bisher nicht zu einer industriellen Anwendung geführt haben. Da Giner Elx als einziges privates Unternehmen an dieser Studie teilnahm, ist davon auszugehen, dass das Unternehmen einen Wettbewerbsvorteil hat. Auf einer Messe stellte Giner Elx kürzlich ihr Projekt mit der Zielvorgabe von 900 bar vor (s. nachstehend einen Auszug aus der Unternehmenspräsentation auf der Messe, der das Ziel und den heutigen Stand aufzeigt):



Wir sind auf das Thema „Verdichtung“ näher eingegangen, weil es oft bei der Analyse und Beschreibung der Wasserstoffunternehmen vernachlässigt wird. Die Verdichtung stellt jedoch in der gesamten Wertschöpfungskette der Wasserstoffindustrie einen wichtigen Schritt dar, der überdies mit hohen Kosten verbunden ist. Es ist daher zum Verständnis der Industrie nicht ausreichend, allein die Kosten der Wasserstoffproduktion zu betrachten, sondern es müssen die Kosten der gesamten Wertschöpfungskette analysiert werden. Wenn es daher gelingt, allein durch die elektrochemische Verdichtung eine direkte Verbindung zu den Endnutzern (vgl. das nachstehende Schaubild) herzustellen wäre das ein großer Fortschritt.



Klassifizierung der Elektrolyseure

Die Elektrolyseure sind weltweit relativ konzentriert aufgestellt und durch verschiedene Übernahmen hat sich der Konzentrationsprozess weiter verstärkt. Obwohl die Größe der Wasserstoffproduktion ein entscheidendes Unterscheidungsmerkmal darstellt, sind auch andere Merkmale zu beachten. Bei der Analyse der Elektrolyseure ist ferner zu beachten, in wie weit sie vertikal integriert sind, d.h. viele Fertigungsschritte bei den Stackkomponenten selbst durchführen (z.B. eigene Beschichtung der zugekauften Membranen). Die nachstehende Übersicht ermöglicht einen Vergleich der Akteure im Hinblick auf verschiedene Kennzahlen (bei den Herstellern ist zu beachten, dass Hydrogenics von Cummins

und Giner inzwischen von Plug Power übernommen wurden):

Manufacturers	System model	H ₂ production rate, Nm ³ /hr	H ₂ purity (after purification)	Installed power, MW	System consumption, kWh/Nm ³ of H ₂	Delivery pressure, bar
Hydrogenics	HyLYZER-3000	3000	99,998%	15	5,0-5,4	30
Proton Onsite	M400	400	>99,9995%	2	5	30
Siemens	Silyzer 200	225	99,9%	1,25	5,1-5,4	35
ITM power	HGas1000	215	99,999%	1,03	5,5	20-80
Giner	200S	200	99,999%	1	5	40
AREVA H ₂ Gen	E120	120	99,999%	0,96	4,8	30
H-TEC	ME100/350	66	99,999%	0,225	4,9	20
Kobelco-eco solutions	SH60D	60	99,9999%	0,2	5,5-6,5	8,2
Treadwell Corp.	NA	10,2	NA	NA	NA	75,8
Angstrom Advanced	HGH170000	10	99,9999%	0,058	5,5	4
SylaTech	HE32	2	99,999%	0,01	4,9	30
GreenHydrogen	HyProvide P1	1	99,995%	0,01	5,5	50

Wasserstoff aus Anlegersicht:

Das hohe Potential von Wasserstoff hat folgerichtig auch die Investoren auf den Plan gerufen. Was muss der Anleger beachten und wie kann er bei der Auswahl vorgehen? Als grobe Vororientierung für die Aktienauswahl eignet sich zunächst die Liste der Mitglieder im Hydrogen Council, die das Spektrum der bekannten Firmen gut, aber nicht vollständig abdeckt. Auch die beiden DAX-Werte Linde und Siemens lassen den Anleger an dem Wasserstoff-Potential teilhaben (Siemens betreibt z.B. in Mainz die weltweit größte PEM-Elektroanalyseanlage). Der Anleger sollte so vorgehen, dass er oder sie idealerweise in diejenigen Aktien der Unternehmen investiert, die innerhalb der Wertschöpfungskette eine Schlüsselposition einnehmen bzw. eine möglichst hohe Markteintrittsbarriere haben. Beispielfähig können hier neben den großen Herstellern von Elektrolyseanlagen und Brennstoffzellen auch die Hersteller von Schlüsselkomponenten genannt werden. Zu den Schlüsselkomponenten gehören vor allem die Membran-Elektroden-Einheiten (engl. membrane electrode assembly, MEA) sowie die Hersteller von Bipolarplatten. Die MEA macht derzeit ca. 40% der Kosten des Stacks (Stapel) aus, gefolgt von den Bipolarplatten, die etwa 20% ausmachen. Bipolarplatten stellen zusammen mit der MEA das Herzstück einer Brennstoffzelle dar und sind damit eine der wichtigen Schlüsselkomponenten. Eine weitere wichtige Schlüsselkomponente der Brennstoffzellen stellt der Katalysator dar, für dessen Herstellung derzeit überwiegend Platin und Iridium verwendet wird. Forscher arbeiten jedoch an anderen Materialien, die kostengünstiger sind, z.B. Kobalt-Phosphat Nanopartikel. Auch für die Bipolarplatte, die Membrane und die GDL gibt es spezialisierte Hersteller.

In dem Maße wie sich die bisher guten Ergebnisse auf Laborebene auch für die industrielle Produktion eignen, erhalten Elektrolyse und Brennstoffzelle zusätzlichen Schub. Da die Hersteller von kritischen Schlüsselkomponenten oft höhere Margen durchsetzen können, sind sie besonders interessant. Allerdings ist zu beachten, dass es unterschiedliche Technologien (bei der Bipolarplatte vor allem Graphite Carbon und Titan) gibt, die es zu bewerten gilt und die unterschiedliche physikalische Vor- und Nachteile z.B. im Hinblick auf Energiedichte, Korrosionsfähigkeit, etc. aufweisen und aufgrund unterschiedlicher Kosten auch die Wettbewerbsfähigkeit beeinflussen. Insgesamt mangelt es an entscheidenden Schritten der Wertschöpfungskette der Elektrolyse an einem zu geringen Automatisierungsgrad, da die Losgrößen zu gering sind. Ein wesentlicher Hebel, um daher künftig Kostensenkungen zu erzielen, ist die schrittweise Erhöhung des Automatisierungsgrades entlang der Lieferkette, angefangen von standardisierten Zellkomponenten (z. B. die Membran-Elektroden-Einheit) bis hin zur Stackmontage (die bisher überwiegend manuell stattfindet). Hier wird deutlich, dass zusammen mit Skaleneffekten das Potential für Kostensenkungen erheblich ist und bei steigender Wirtschaftlichkeit die Bedeutung von Wasserstoff auch für den Anleger einen hohen Stellenwert einnehmen sollte.

Fazit:

Wasserstoff stellt eine Schlüsseltechnologie der Energiewende dar und eröffnet gerade für Deutschland auch Exportpotentiale. Eine nachdrückliche Förderung durch eine vorausschauende Industriepolitik ist daher in nationalem Interesse. Deutschland verfügt mit einer Reihe vorzüglicher Forschungsinstitute und Universitäten, einer starken Chemie- und Stahlindustrie, einer ausgereiften Erdgas-Infrastruktur über alle Voraussetzungen für die Entwicklung einer leistungsfähigen Wasserstoff-Infrastruktur. Jedoch bleibt offen, warum die bisherigen Förderprogramme nicht den gewünschten Erfolg gezeigt haben. Ein Problem - das der zu hohen Kosten - wird durch das jetzt vorgelegte Programm angegangen, ein anderes Problem liegt aber auch in der Regulierung, die ebenso konsequent an die Marktbedingungen angepasst werden muss. Bei weiter sinkenden Kosten durch Skaleneffekte wird die Wasserstofftechnologie einen signifikanten Beitrag zur Wirtschaftsleistung beitragen. Insgesamt stimmt optimistisch, dass weltweit Förderprogramme aufgelegt werden und durch den Druck zur Reduzierung der Treibhausgase daher mit Nachdruck an der Entwicklung der wirtschaftlichen Nutzung der Wasserstofftechnologie gearbeitet wird. Optimistisch stimmt auch, dass wichtige Teile der Wertschöpfungskette aus dem Labor in die industrielle Produktion übertragen werden. Aber auch auf Laborebene gibt es Fortschritte, da zunehmend versucht wird, die Effizienz über ein besseres Verständnis der Wirkungszusammenhänge zu steigern. Hier werden

deshalb weitere technologische Fortschritte erwartet.

Deutschland darf jedoch nicht übersehen, dass sich die Welt außerhalb Deutschlands teilweise deutlich schneller dreht. China, Japan und Südkorea allein erteilen jedes Jahr mehr Patente im Bereich Wasserstoff als die gesamte EU. Während die EU weltweit 16% aller Patente erteilt, entfallen auf die drei genannten Länder rund 60% aller Patente weltweit. Die europäische Position ist gefährdet und Europa riskiert, dass die Industrie, besonders die Automobilindustrie und ihre Zulieferer, Marktanteile verlieren.

Bei der Aktienanlage stellt die Branche die Investoren vor besondere Herausforderungen, da viele Unternehmen noch Verluste machen und die Investoren daher nicht mehr mit den traditionellen Werkzeugen der Analyse von Kennzahlen eine Auswahl treffen können. Der Investor muss sich daher stärker mit der Struktur der Branche und den Stärken und Schwächen der einzelnen Unternehmen und Technologien befassen. Besonders für die Zunft der Value-Investoren stellt das ein Dilemma dar, denn die Bestimmung des Unternehmenswertes in einem sich schnell entwickelnden Markt gleicht dem Schuss auf ein bewegliches Ziel. Für den Investor mit Interesse an einer Zukunftstechnologie mit hohem Wachstumspotential ergeben sich jedoch interessante Anlagemöglichkeiten.

Anlage:

- a) FV Technologie Wasserstoff Wikifolio
- b) Universum Wasserstoff-Unternehmen
- c) Ausgewählte Quellen

FV Technologie Wasserstoff Wikifolio

In der Frankfurter Vermögen AG haben wir kürzlich ein Wikifolio aufgelegt. Hierbei handelt es sich um ein Zertifikat, welches die Wertentwicklung von z.Z. 30 verschiedenen Wasserstoffaktien abbildet. Wir können auf diese Art auch kleinere Wertpapieranlagen über eine größere Anzahl von Aktien diversifizieren. Am Markt gibt es derzeit keine vergleichbaren Fonds oder ETFs, so dass wir mit dem von uns aktiv gemanagten Wikifolio den Investoren eine attraktive Anlagemöglichkeit bieten.

In dem Wikifolio sind Unternehmen aus der gesamten Wertschöpfungskette enthalten. Bei großen Firmen wie z.B. Linde und Air Liquide ist der Anteil „Wasserstoff“ am Umsatz weniger hoch, bei anderen Firmen beträgt er 100%, wobei kleinere Unternehmen Nischen bedienen.

Das Wikifolio wurde am 4. Juni 2020 aufgelegt und hat seitdem einen Wertzuwachs von 16,8% erzielt (s. nachstehende Grafik für die Wertentwicklung):



Die 10 größten Unternehmen im Portfolio sind die folgenden Werte:

Aktien

PLUG POWER INC. DL-,01
US72919P2020

AIR LIQUIDE INH. EO 5,50
FR0000120073

LINDE PLC EO 0,001
IE00BZ12WP82

AIR PRODS & CHEM
US0091581068

CUMMINS INC. DL 2,50
US2310211063

CERES POWER HLDGS LS-,10
GB00BG5KQW09

NEL ASA NK-,20
NO0010081235

ALSTOM S.A. INH. EO 7
FR0010220475

BALLARD PWR SYS
CA0585861085

PARKER-HANNIFIN DL-,50
US7010941042

Elektrolyse:	Typ:	MktK / Umsatz:	Cash Burn:	Inv / Umsatz:	Brennstoffzelle:	Typ:	MktK / Umsatz:	Cash Burn:	Inv / Umsatz:
Nel	AEL/PEM	49,24	30,23	44,02%	Plug Power	PEM	14,96	14,65	24,80%
Plug Power	PEM	14,96	14,65	24,80%	AFC	AEL	/	5,20	X
ITM	PEM	217,29	6,46	118,22%	Proton	PEM	635,81	1,92	76,85%
McPhy	AEL	34,76	27,46	0,61%	Ceres Power	SOFC	78,63	248,61	X
Linde	PEM(ITM)	4,79	∞	10,66%	Ballard Power	PEM	31,08	58,28	28,41%
Air Liquide	AEL(Hydrogenics)	3,13	∞	11,06%	Bloom Energy	SOFC	2,49	∞	5,88%
Membrane:					Flow Plate:				
Matthey		0,32	∞	2,27%	Cell Impact		91,77	0,39	78,28%
Chemours		0,63	∞	7,06%	Impact Coatings		24,30	2,82	9,77%
GDL:					Katalysator:				
SGL		0,43	∞	7,23%	Matthey		0,31	∞	2,27%

*MktK/Umsatz (Marktkapitalisierung / Umsatz)

*Cash Burn (Cash Reserve in Monaten)

*Inv/Umsatz (Investments / Umsatz)

Ausgewählte Quellen:

Hydrogen Generation from Electrolysis
(<https://www.osti.gov/servlets/purl/948808>) 2009

Potenzialstudie Wasserstoffwirtschaft (https://ee-sh.de/de/dokumente/content/Berichte_Studien/2019-09-06-Potenzialstudie-H2-NF-Endfassung-L-Web.pdf) 2019

Dissertation PEM-Elektrolyse-Systeme zur Anwendung in Power-to-Gas Anlagen (<https://publications.rwth-aachen.de/record/689617/files/689617.pdf>) 2017

Shell Wasserstoffstudie (https://www.shell.de/medien/shell-publikationen/shell-hydrogen-study/jcr-content/par/toptasks_e705.stream/1497968981764/1086fe80e1b5960848a92310091498ed5c3d8424/shell-wasserstoff-studie-2017.pdf)

Hydrogen Roadmap (https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/Hydrogen%20Roadmap%20Europe_Report.pdf) 2019

Eckpunkte zur Ausgestaltung eines nationalen Emissionshandels für Wärme und Verkehr (https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/eckpunkte_national_emissionshandel_waerme_verkehr_bf.pdf) 2019

Entwurf eines Gesetzes Einführung eines Bundes-Klimaschutzgesetzes und zur Änderung weiterer Vorschriften (<https://dip21.bundestag.de/dip21/btd/19/143/1914337.pdf>)

Studie IndWEDe Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland: Chancen und Herausforderungen für nachhaltigen Wasserstoff für Verkehr, Strom und Wärme (<https://www.dwv-info.de/wp-content/uploads/2019/06/NOW-Elektrolysestudie-2018.pdf>) 2018

Auf dem Weg in die Wettbewerbsfähigkeit: Elektrolysegase erneuerbaren Ursprungs (https://www.dwv-info.de/wp-content/uploads/2018/04/Energy-Brainpool_auf-dem-Weg-in-die-Wettbewerbsfähigkeit_Elektrolysegase-erneuerbaren-Ursprungs.pdf) 2018

Die Nationale Wasserstoffstrategie (https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=16)

U.S. DOE Office of Fossil Energy's Solid Oxide Fuel Cell Program
(<https://www.netl.doe.gov/sites/default/files/2020-03/ICACC-1-27-2020.pdf>) 2020

Weiterentwicklung der THG-Quote als Instrument des Klimaschutzes, Institut für Energie und Umweltforschung, Heidelberg

(https://vm.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-mvi/intern/Dateien/PDF/Klimaschutz_IFEU_Kurzstudie_THG-Einsparquote_als_Instrument_180104.pdf) 2017

Electrochemical Compression (https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review19/in005_hamdan_2019_o.pdf)

Electrochemical Hydrogen Compression
(<https://www.osti.gov/servlets/purl/1235441>)

Hoja de Ruta del Hidrógeno: Una apuesta por el hidrógeno renovable

Composite Polymers Development and Application for Polymer Electrolyte Membrane Technologies— A Review, April 2020

All-Hydrocarbon MEA for PEM Water Electrolysis
(<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/aenm.201903995>)