

1

Einführung

In der aktuellen energiepolitischen Diskussion werden Wasserstoff und Brennstoffzellen teilweise recht kontrovers diskutiert. Für die einen ist Wasserstoff der Hoffnungsträger der Energiewende, weil er wie Erdgas oder Benzin in herkömmlichen Anlagen und Motoren verbrannt werden kann. Damit hätten fossile Infrastrukturen eine längere Daseinsberechtigung. Für die anderen ist Wasserstoff der Champagner der Energiewende, der kostspielig und energieaufwendig in der Herstellung ist und daher nur für exklusive Anwendungen geeignet ist. Man sollte Gasnetze besser gleich abreißen und auf eine rein elektrische Energieversorgung umstellen, sagen sie.

Die Wahrheit liegt natürlich irgendwo dazwischen. Doch eines ist klar: Die Umstellung eines mächtigen weltumspannenden fossilen Energiesystems auf eine klima- und umweltfreundliche Wirtschaftsweise gibt es nicht zum Nulltarif. Hierfür sind immense Investitionen und Jahrzehnte lange Anstrengungen erforderlich. Es ist die wohl größte energietechnische und wirtschaftliche Herausforderung seit Beginn der Industrialisierung, und eine enorme Schwierigkeit wird vermutlich die Umstellung in den Köpfen sein. Eine monopolistisch ausgelegte Verteilstruktur, die auf günstigen fossilen Energieträgern und einer expansiven Wirtschaftspolitik basiert, wird sich künftig kaum mehr mit den begrenzten Ressourcen und Umweltproblemen unseres Planeten in Einklang bringen lassen. Vielmehr ist ein bedachter Umgang mit hochwertiger Energie gewünscht, der auf dezentralen erneuerbaren Energiesystemen basiert. Eine smarte Vernetzung von Erzeugern, Verbrauchern und Speichern ist essenziell, um die tageszeitlichen und saisonalen Schwankungen der erneuerbaren Energievorkommen auszugleichen. Nur so können die verschiedenartigen Energieträger wie Strom und Gas in einem ausgeklügelten Wechselspiel entsprechend ihrer spezifischen Eigenschaften möglichst effizient und nachhaltig genutzt werden.

■ 1.1 Wasserstoff als Hoffnungsträger

Wasserstoff (H_2) ist ein sehr leichtes und brennbares Gas, das allerdings nicht frei verfügbar in der Natur vorkommt. Im **Erdgas** hingegen (Methan, CH_4) ist Wasserstoff enthalten, der an Kohlenstoff gebunden ist. Der Wasserstoff kann in einem thermischen Prozess abgespalten und freigesetzt werden, was heute bereits in nennenswertem Umfang in der chemischen Industrie geschieht. Hierbei entsteht allerdings wieder das Treibhausgas Kohlendioxid (CO_2), weshalb man auch vom **grauen Wasserstoff** spricht. Einige Vertreter aus Politik und Wirtschaft befürworten den Ansatz, den aus Erdgas hergestellten Wasserstoff als Brückentechnologie zu verwenden, um eine Wasserstoffwirtschaft aufzubauen. Dieser Vorschlag ist jedoch eher fragwürdig. Zum einen würden hiermit weiterhin fossile Verteilstrukturen unterstützt und ausgebaut werden, wodurch es sogar zu einem Anstieg der Treibhausgasemissionen kommen kann. Zum anderen zeigen die aktuellen politischen Missverhältnisse zwischen der EU und Russland, dass die starke Abhängigkeit von einem dominierenden Energieträger wie dem Erdgas in Zukunft unerwünscht ist.

Wasserstoff ist allerdings noch in einer anderen gebundenen Form in sehr großer Menge auf der Erde vorhanden – und zwar im Wasser (H_2O), in Verbindung mit Sauerstoff (O_2). Wasserstoff ist also wortwörtlich der Stoff, aus dem Wasser gemacht ist. Wasser ist allerdings eine sehr stabile und energiearme Verbindung, die sich nicht ohne Weiteres auflösen lässt. Für die Aufspaltung von Wasser mittels **Elektrolyse** muss daher zunächst sehr viel elektrische Energie aufgewendet werden. In sogenannten Elektrolyseuren wird Wasser mithilfe von elektrischem Strom zerlegt, wobei die Gase Wasserstoff und Sauerstoff freigesetzt werden. Wird für den Betrieb des Elektrolyseurs nur elektrische Energie aus erneuerbaren Quellen wie Wind- oder Solarenergie eingesetzt, so spricht man von **grünem Wasserstoff**. Bei der Elektrolyse wird der Sauerstoff meistens in die Atmosphäre entlassen (obwohl er auch für andere Zwecke wie beispielsweise zur Desinfektion eingesetzt werden kann). Das Wasserstoffgas wird komprimiert und kann in Stahlbehältern bevorratet und transportiert werden. Hochverdichteter Wasserstoff kann somit an **Wasserstofftankstellen** über einen Tankstutzen in den Drucktank von Fahrzeugen überströmt werden. Der Vorgang geschieht ähnlich schnell wie das Tanken von Benzin, wodurch ein klarer Vorteil gegenüber dem langwierigen Laden von Batteriefahrzeugen gegeben ist. Es gibt daher eine nennenswerte Menge an Befürwortern, die Wasserstofffahrzeuge den reinen Batteriefahrzeugen vorziehen würden. Ein weiterer Vorteil ist durch die größeren Reichweiten gegeben. Während bei kleinen Stadtfahrzeugen die Vorteile der Batterien überwiegen, sind schwere Fahrzeuge wie Busse, Lkw, Züge und Schiffe, die große Reichweiten zurücklegen müssen, mit Batterien nicht sinnvoll zu betreiben. Mit Wasserstoff in großen Druck-

tanks lassen sich hingegen Reichweiten von über 1000 Kilometer problemlos darstellen.

Die **Herstellung von grünem Wasserstoff** aus elektrischem Strom kann besonders vorteilhaft an Orten mit großen Energievorkommen wie beispielsweise Windparks an der Küste stattfinden. Doch auch im Binnenland gibt es günstige Standorte (Bild 1.1). Durch die Speicherfähigkeit von großen Energiemengen und die grundsätzliche Transportfähigkeit kann daher eine zeitliche und räumliche Entkopplung von Erzeugung und Verbrauch stattfinden. Wasserstoff kann für die saisonale Speicherung in großen Salzkavernen eingelagert und im Winter als erneuerbarer Energieträger anstelle von Erdgas in Gasturbinenkraftwerken wieder zurückverstromt werden. Er ist daher entlastend und unterstützend für die Stromnetze, insbesondere bei Verbrauchsspitzen und bei mangelndem Stromangebot aus erneuerbaren Energien im Winter.



Bild 1.1 Energiepark Mainz mit Wasserstoffspeichern: Der Wasserstoff wird mittels Elektrolyse und erneuerbarem Strom aus regionalen Wind- und Solaranlagen erzeugt (© mit freundlicher Genehmigung der Mainzer Stadtwerke AG).

In **Brennstoffzellenfahrzeugen** wird der elektrische Strom für die Antriebsmotoren an Bord aus Wasserstoff hergestellt. In Brennstoffzellen findet eine sogenannte kalte Verbrennung statt, ein elektrochemischer Prozess, bei dem Wasserstoff und Luftsauerstoff wieder zu Wasser reagieren, wobei elektrische Energie und Wärme freigesetzt werden. Die Effizienz ist hierbei deutlich höher als bei klassischen Verbrennungsmotoren, und aus dem Auspuff kommt nichts als reiner Wasserdampf. Auch Brennstoffzellenfahrzeuge sind demnach Elektrofahrzeuge, nur dass der elektrische Strom im Fahrzeug aus Wasserstoffgas generiert wird.

Darüber hinaus zeigt beispielsweise eine Studie des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme (ISE) in Freiburg, dass ab einer Speicherkapazität von etwa 60 Kilowattstunden Brennstoffzellen und Wasserstoff in Fahrzeugen umwelt-

freundlicher sind als Batterien, wenn man den vollständigen **Produktlebenszyklus** inklusive Herstellung, Nutzung und Entsorgung betrachtet. In Batterien muss nämlich die gesamte Energiemenge an umweltkritische Materialien wie Lithium, Cobalt und seltene Erden gebunden werden, die teils unter widrigen Bedingungen und unter Freisetzung von CO₂ gewonnen werden. In Elektrolyse- und Brennstoffzellen wird das Gas unabhängig von der Größe des Energiewandlers in Tanks gespeichert, sodass über die Zeit sehr große Gasmengen umsetzbar und damit speicherbar sind (Sternberg et al. 2019).



Vorteile von Wasserstoff und Brennstoffzellen:

- Energiespeicherung über lange Zeiträume und große Distanzen
- Entlastung und Stabilisierung der Stromnetze
- effiziente und schadstofffreie Energiewandlung
- schnelle Vertankung vergleichbar mit Benzin
- Nutzung für chemischen Prozesse

Den Vorteilen von Wasserstoff stehen allerdings auch einige **Nachteile** gegenüber. Wie bereits erwähnt, werden für die Elektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff große Mengen elektrischer Energie benötigt. Stammt der elektrische Strom auch aus der Verbrennung von fossilen Energien, also beispielsweise aus Kohlekraftwerken, so verschwinden die Vorteile gegenüber der Nutzung von Erdgas, da hierbei ebenfalls klimaschädliche Gase freigesetzt werden. Wasserstoff sollte also nur per Elektrolyse hergestellt werden, wenn der elektrische Strom zu 100 Prozent aus regenerativen Energiequellen wie Wind- oder Solarstrom stammt. Nur dann gilt der Begriff **grüner Wasserstoff**. Aktuell befinden sich die Erzeugungsanlagen für erneuerbare elektrische Energie in Deutschland noch im Aufbau. So müssen in den nächsten Jahrzehnten riesige Windparks in der Nord- und Ostsee (Offshore) und im Binnenland (Onshore) aufgeschlagen werden. Das Gleiche gilt für Photovoltaikanlagen, die sowohl auf Dächern als auch auf Freiflächen in großem Umfang installiert werden müssen. Nur so können klimaschädliche Gas- und Kohlekraftwerke schrittweise vom Netz genommen und die Klimaziele der EU erreicht werden. Gleichzeitig wird aber der Strombedarf rapide ansteigen, da weite Teile des Verkehrs (Elektromobilität) und der Gebäudeheizung (elektrisch betriebene Wärmepumpen) zu elektrifizieren sind. Werden im gleichen Zeitraum noch große Elektrolyseanlagen zur Erzeugung von grünem Wasserstoff installiert, so entsteht eine kritische **Konkurrenzsituation** hinsichtlich der vorrangigen Nutzung von sauberer elektrischer Energie. Hierbei sollten die effizientesten Technologien primär genutzt werden.



Nachteile von Wasserstoff und Brennstoffzellen:

- große Mengen erneuerbarer elektrischer Energie erforderlich
- verhältnismäßig geringe Speicherwirkungsgrade
- hohe Systemkomplexität und damit hohe Kosten

Die Energiespeicherung mittels Wasserstoff erfordert zudem eine **komplexe Systemtechnik** mit einer Vielzahl von mechanischen und elektronischen Komponenten wie Pumpen, Ventilen und Steuerungen. Hierdurch und aufgrund von Verlusten ergibt sich eine verhältnismäßig **geringe Gesamteffizienz**. Während Batterien sehr hohe elektrische Speicherwirkungsgrade im Bereich von 80 bis 90 Prozent aufweisen, liegt der Gesamtspeicherwirkungsgrad mit Elektrolyse, Verdichtung und Rückverstromung in Brennstoffzellen lediglich in einem Bereich von 30 Prozent (Kurzweil/Dietlmeier 2015). Daher ist die Energienutzung von Wasserstoff grundsätzlich **kostenintensiv** und sollte gut bedacht werden. Vor allem, wenn eine direkte Nutzung des elektrischen Stroms aus zeitlichen oder räumlichen Gegebenheiten nicht möglich ist, kommt die Nutzung von Wasserstoff als Energieträger in Betracht. Besonders für die saisonale Langzeitspeicherung, für Fahrzeuge mit großen Reichweiten und für bestimmte chemische oder verfahrenstechnische Prozesse wie die Stahl- und Glasherstellung wird Wasserstoff in der Zukunft alternativlos sein. Eine besondere technische Herausforderung ist die Weiterentwicklung der Brennstoffzellentechnologie zur deutlichen Steigerung der Effizienz. Dies ist ein Schwerpunkt des vorliegenden Buches.

■ 1.2 Funktionsprinzip der Brennstoffzelle

Das Buch trägt den Titel *Das System Brennstoffzelle*. Hierbei ist die Brennstoffzelle als Synonym für unterschiedliche Zelltypen anzusehen. In dieser allgemeineren Ausdrucksweise können sowohl Brennstoffzellen als auch Elektrolysezellen gemeint sein, da diese von der grundsätzlichen Funktionsweise sehr ähnlich aufgebaut sind und der Prozess prinzipiell reversibel, also umkehrbar ist und damit vorwärts wie rückwärts ablaufen kann (Bild 1.2).

Während der Elektrolyse erfolgt die Aufspaltung von Wasser in einem **elektrochemischen Prozess** mittels elektrischer Energie, wobei gasförmiger Wasserstoff und Sauerstoff freigesetzt werden. Bei der Umkehrung des Prozesses (kalte Verbrennung), der typischerweise in Brennstoffzellen abläuft, reagieren Wasserstoff und Sauerstoff wieder zu Wasser, wobei elektrische Energie und Wärme entstehen. Aufgrund der Stöchiometrie werden immer doppelt so viele Moleküle Wasserstoff wie Sauerstoff umgesetzt. Da die Trennung der Gase einen zusätzlichen Energieaufwand erforderlich macht und die in der Brennstoffzelle anfallende Abwärme nicht mehr in elektrische Energie umgewandelt werden kann, ist der Gesamtprozess verlustbehaftet. Hieraus erklären sich die geringeren Speicherwirkungsgrade im direkten Vergleich mit Batterien.

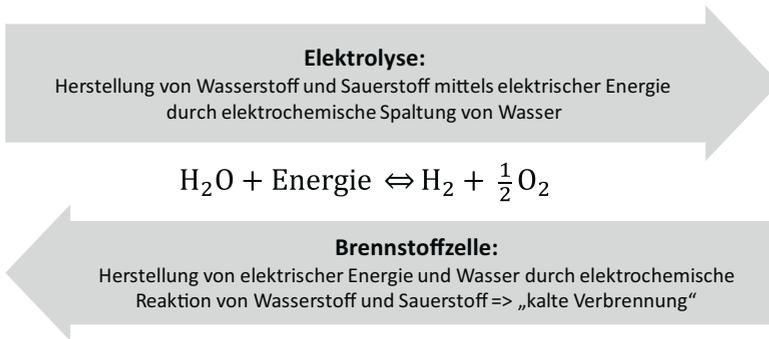


Bild 1.2 Reaktionsgleichung des grundsätzlich umkehrbaren Brennstoffzellenprozesses.

Während eine Mischung aus Wasserstoff und Sauerstoff, das sogenannte **Knallgas**, prinzipiell in sehr einfachen Elektrolysezellen aus blanken Metallplatten hergestellt werden kann, erfordern moderne Elektrolyse- und Brennstoffzellen die Trennung der Reaktionsgase durch eine **gasdichte Membran**. Mit der Erfindung einer stabilen Polymer-Elektrolyt-Membran (kurz: PEM), die gleichzeitig leitfähig für Ionen ist, kann dies heute in vielfältigen Brennstoffzellenanwendungen sichergestellt werden. Wie in Bild 1.3 schematisch dargestellt, werden Wasserstoff und Sauerstoff von zwei gegenüberliegenden Seiten an eine solche Membran herangeführt. Unmittelbar auf die Membran sind beidseitig feinporige **Elektroden** aufgebracht. Diese bestehen aus **Katalysatoren**, an denen die eigentlichen elektrochemischen Reaktionen ablaufen. Häufig werden hierfür Edelmetalle wie Platin und Iridium eingesetzt. Es gibt aber auch günstigere Alternativen wie Nickel, Eisenverbindungen und Kohlenstoff.

Die in Bild 1.2 dargestellte Gesamtreaktion ergibt sich hierbei aus zwei **Teilreaktionen** an den beiden Elektroden. Auf der linken Seite (hier: Anode) geht der Wasserstoff in Lösung, wobei Protonen (H^+ -Ionen) und Elektronen (e^-) entstehen:



Diese Ionen wandern nun durch die Membran zur gegenüberliegenden Sauerstoff-Elektrode. Die bei der Reaktion freigesetzten Elektronen (e^-) fließen über die elektrisch leitfähigen Zellmaterialien durch einen äußeren Stromkreis, wo sie in einem elektrischen Verbraucher Arbeit verrichten können. An der Sauerstoffelektrode (hier: Kathode) werden die Elektronen aufgenommen und sorgen gemeinsam mit den H^+ -Ionen für die Reduktion des Sauerstoffs, wobei Wasser entsteht:



Das Reaktionswasser wird mit dem Gasvolumenstrom abgeführt. In heutigen PEM-Brennstoffzellen wird hierzu mittels Kompressor ein geregelter Luftstrom mit Überschuss durch die Brennstoffzelle geführt.

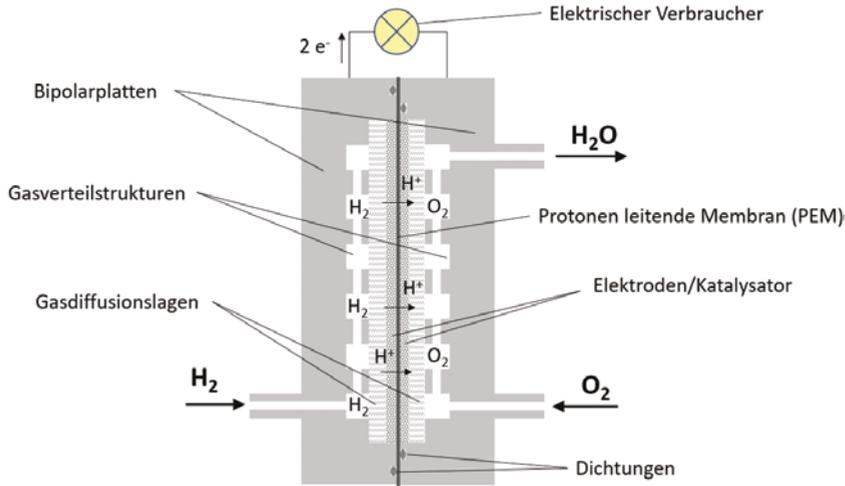


Bild 1.3 Schematische Darstellung einer Brennstoffzelle mit protonenleitender Membran (PEM).

Für die Realisierung des Prozesses ist eine ausgeklügelte **Zellkonstruktion** erforderlich. Um die feinen Elektroden einerseits elektrisch zu kontaktieren und andererseits eine gute Gasversorgung zu gewährleisten, werden dünne Gasdiffusionslagen aufgepresst. Diese bestehen meist aus feinen Kohlefaserpapieren. Für die gleichmäßige Gasversorgung der Elektroden sind typischerweise meanderförmige Gasverteilstrukturen in mechanisch stabile Platten eingearbeitet. Man spricht von Bipolarplatten, wenn diese Platten auf zwei Seiten mit benachbarten Zellen in Verbindung stehen und von der einen Zelle den Minuspol und von der anderen Zelle den Pluspol darstellen. Da die elektrische Spannung einer typischen Brennstoffzelle lediglich 0,5 bis 1,0 Volt beträgt, werden für technische Anwendungen eine Vielzahl solcher Einzelzellen aufeinandergestapelt und mithilfe von stabilen Endplatten miteinander verschraubt. Einen solchen Zellstapel bezeichnet man aus dem Englischen kommend als Stack. Für mobile Anwendungen zum Beispiel im Pkw-Bereich werden Hunderte Einzelzellen zu großen Brennstoffzellen-Stacks in Reihe geschaltet, sodass elektrische Leistungen im Bereich von 100 kW zur Verfügung stehen.

Die aktuelle **Brennstoffzellenforschung** befasst sich vor allem mit der Optimierung der Zellmaterialien, damit die Haltbarkeit erhöht und die Herstellkosten gesenkt werden können. So wurde der Einsatz des teuren Edelmetalls Platin in den letzten beiden Jahrzehnten bereits auf ein Zehntel herabgesenkt. Während Bipolarplatten früher aufwendig aus massiven Grafitplatten gefräst wurden, werden sie heute aus dünnen beschichteten Edelstahlplatten ausgestanzt (Kurzweil 2016).

Heute haben Elektrolyse- und Brennstoffzellen einen hohen technologischen Reifegrad erlangt, sodass erste in Serie gefertigte Produkte in den Markt eingeführt

wurden. Bis zu einer massenhaften Anwendung mit niedrigen Herstellkosten und investitionsfreudigen Gewinnmargen im Wasserstoffgeschäft sind jedoch noch einige technologische und wirtschaftliche Anstrengungen und begünstigende politische Rahmenbedingungen erforderlich.

■ 1.3 Aktuelle Herausforderungen der Brennstoffzellentechnologie

Für die Realisierung von brauchbaren und kostengünstigen Elektrolyse- und Brennstoffzellen ist vor allem eine **Senkung der Herstellkosten** erforderlich. Das ist eine enorme wissenschaftlich-technische Herausforderung. Es beginnt bei hohen, teils widersprüchlichen Anforderungen an die Zellmaterialien zum Beispiel hinsichtlich elektrischer Leitfähigkeit, Gasdichtigkeit, Porosität, Wasseraufnahme und Korrosionsbeständigkeit. Vor allem auf der Sauerstoffseite von Elektrolyseuren mit sauren Membranen (PEM) herrscht ein so hohes korrosives Potenzial, dass praktisch nur massive Platten aus gefrästem Titan beständig sind. Die Herstellung ist entsprechend aufwendig und kostenintensiv. Zudem ist eine anspruchsvolle Dichtungstechnik erforderlich, die häufig nur in mühsamer Handarbeit realisiert werden kann. Enge Fertigungstoleranzen machen vor allem Zellstapel mit über hundert Zellen durch hohe Ausschussraten sehr kostspielig. Neben den Materialwissenschaften sind also hochspezialisierte und automatisierte Fertigungsverfahren gefragt, mit denen eine zuverlässige und kostengünstige Serienproduktion von Elektrolyse- und Brennstoffzellen-Stacks realisiert werden kann.

Eine weitere große Herausforderung liegt in der **Verbesserung der Effizienz** von Elektrolyseuren und Brennstoffzellen, vor allem in Konkurrenz zu Batteriespeichern. Der vorangehend genannte geringe Speicherwirkungsgrad der Wasserstoffnutzung ergibt sich vor allem durch die Kombination verschiedener Teilprozesse (Herstellung, Verdichtung, Transport und Rückverstromung von Wasserstoff), die alle verlustbehaftet sind. Doch auch die Effizienz von Elektrolyseuren und Brennstoffzellen ist aktuell noch verbesserungswürdig. Während die PEM-Technologie große Vorteile in Bezug auf eine anwendbare Konstruktion und hohe Leistungsdichten aufweisen kann, sind in Bezug auf den maximal erzielbaren Wirkungsgrad elektrochemische Grenzen gesetzt. Vor allem die Sauerstoffreaktion läuft im sauren Milieu langsam und stark verlustbehaftet ab. Hier verzeichnet die alkalische Technologie einige Vorteile. Zum einen können hiermit deutlich höhere Wirkungsgrade erzielt werden, zum anderen können günstige Katalysatoren aus Nickel eingesetzt werden. Alkalische Elektrolyseure stellen daher heute noch den Stand der Technik dar, auch wenn die PEM-Technologie auf dem Vormarsch ist.

Alkalische Brennstoffzellen in der klassischen Bauweise sind durch den Einsatz von flüssiger Kalilauge unpraktisch in der Anwendung und weisen zu geringe Leistungsdichten auf. Die Entwicklung stabiler alkalischer Membrane (*Anion Exchange Membrane*, AEM) für hohe Wirkungsgrade bei gleichzeitig hohen Leistungsdichten ist aktueller Forschungsgegenstand (Xue et al. 2022).

Ein weiterer essenzieller Punkt ist die **Umweltverträglichkeit** bei der Herstellung von Elektrolyse- und Brennstoffzellen. So setzen Platin und vor allem Iridium, das für die PEM-Elektrolyse benötigt wird, hohe CO₂-Emissionen bei der bergbaulichen Gewinnung frei. Diese Emissionen und der Energieaufwand sollten in der ganzheitlichen Lebenszyklusanalyse mitberücksichtigt werden. Weiterhin basiert der Membrangrundstoff auf einer chemischen Fluorverbindung (PTFE) aus fluorierten Kohlenstoffgerüsten. **Fluorverbindungen** sind in jüngster Zeit unter kritische Beobachtung geraten, da sie in zunehmender Konzentration in der Umwelt auftauchen und die Auswirkungen nicht abschätzbar sind. Auch Brennstoffzellen können aus dem „Auspuff“ über verbrauchte Luft und Wasser Abrieb aus den fluorierten Kohlepapieren und der PTFE-vernetzten Elektroden-Membran-Verbindung nach draußen befördern, sodass diese in die Umwelt gelangen. Aus diesen Gründen wird unter anderem die **alkalische Elektrolyse- und Brennstoffzellentechnologie** weiterentwickelt, die ohne Platin und Iridium auskommt und mit Nickeln und Silberelektroden arbeitet. Die Membrane basieren zudem auf einer andersartigen Molekülstruktur aus Kohlenstoffringen, die ohne PTFE auskommt. Hinzu kommt der Vorteil des nennenswert höheren Wirkungsgrads mit der alkalischen Technologie. Ihr soll aufgrund des zukunftssträchtigen Potenzials in puncto Energieeffizienz ein besonderes Augenmerk im Rahmen des Buches zukommen.

Im Gegensatz zu Batterien weisen Elektrolyse- und Brennstoffzellen eine hohe **Systemkomplexität** auf. Während Batterien einfach aus aufeinandergestapelten oder zusammengrollten flachen Zellmaterialien hergestellt werden, muss bei Brennstoffzellen immer die gesamte Gastechnik mit aufgebaut werden. Wasserstoff muss in Drucktanks mitgeführt und über Druckminderer und Ventile den einzelnen Zellen gleichmäßig zugeführt werden. Mittels Kompressoren werden die Zellen mit Luftsauerstoff versorgt, der allerdings genau geregelt werden muss, um ein Absaufen oder Austrocknen der empfindlichen Membrane zu verhindern. Die Temperierung erfolgt mittels zusätzlicher Pumpen und Kühlkreisläufe. Über teure Leistungselektronik erfolgt die Anpassung der Spannungsniveaus an das Verbrauchersystem. Bei der Wasserstoffherstellung muss neben der Realisierung der Elektrolytkreisläufe eine aufwendige Gasreinigung vorgesehen werden. Die Verdichtung des Wasserstoffgases erfolgt in der Regel mit schweren Kompressoren, die energie- und wartungsaufwendige Maschinen darstellen. Aus diesen Gründen fällt es momentan schwer, die **Wasserstofftechnologie** zu verkleinern und zu vereinfachen. Die Tendenz geht daher zur Projektierung von industriellen Großanlagen mit hohen Durchsätzen, da sich die aufwendige Anlagentechnik hier schneller amorti-

sieren lässt. Brennstoffzellen-Pkw lassen sich heute in Europa noch nicht zu wettbewerbsfähigen Preisen herstellen. Deutschland sollte jedoch aufpassen, dass ein noch bestehender **technologischer Vorsprung** nicht verspielt wird, nur weil derzeit hohe Kosten gescheut werden. In Japan, Südkorea und China beobachtet man aktuell deutlich stärkere Aktivitäten in der Vermarktung erster serienreifer Pkw mit Brennstoffzellenantrieb. In China haben gleich mehrere Automobilhersteller angekündigt, bis zum Jahr 2030 rund eine Millionen Brennstoffzellen-Pkw auf die Straßen zu bringen.

Auch wenn die Aufwände und Kosten der Wasserstofftechnik derzeit noch zu hoch liegen, um attraktive Gewinne zu erzielen, so ist die Technologie dennoch ein **unverzichtbarer Baustein für die Energiewende**. Wasserstoff als erneuerbarer Energieträger wird zwangsläufig für die Stabilisierung der Stromnetze, als Treibstoff für den Verkehr und für die chemische Industrie benötigt. Aus diesen Gründen gibt es nun sowohl auf europäischer Ebene als auch in Deutschland **politische Vorgaben**, die zum Beispiel in Form einer Wasserstoffstrategie niedergeschrieben sind. Demnach sollen bis zum Jahr 2030 in der Europäischen Union 40 Gigawatt Elektrolysekapazität und in Deutschland 10 Gigawatt installiert werden. Neben der Entwicklung von Fahrplänen und Zielvorgaben und dem Aufbau strategischer Netzwerke hat die Bundesregierung nun insgesamt 900 Millionen Euro für die Förderung von Wasserstoffprojekten zugesagt. Gefördert werden in der Regel Einzelvorhaben von Unternehmen und Forschungsinstituten, wobei der Schwerpunkt auf der großindustriellen Herstellung von Wasserstoff liegt. Eine besondere Hoffnung liegt im **Import von grünem Wasserstoff** aus sonnenreichen Gegenden der Erde. So könnte beispielsweise in Chile oder Saudi-Arabien Wasserstoff aus günstigem Solarstrom hergestellt und dann tiefkalt verflüssigt per Schiff nach Deutschland transportiert werden. Neben den technischen Schwierigkeiten und den großen Verlusten durch den Transport besteht die große Herausforderung im Aufbau einer solchen Technologie in Ländern, die keine vergleichbare technische Infrastruktur wie Deutschland vorweisen können. Projekte dieser Art werden daher vermutlich ein bis zwei Jahrzehnte in Anspruch nehmen. Für die chemische Industrie mit einem enormen Bedarf an Wasserstoff zum Beispiel für die Stahl- und Glasherstellung wird es mittelfristig allerdings kaum eine Alternative geben.

In kleinerem Maßstab ließen sich allerdings auch in Deutschland sehr viel schneller nennenswerte Kapazitäten an Wasserstoffherzeugern oder Brennstoffzellen aufbauen, wenn ein **dezentraler Ansatz** verfolgt und unterstützt würde. In landwirtschaftlichen Betrieben, Kleingewerben oder gar in Privathäusern könnte dann mittels kleiner Elektrolysegeräte Wasserstoff aus überschüssigem Photovoltaikstrom produziert und in das Erdgasnetz oder ein reines Wasserstoffnetz eingespeist, selbst bevorratet oder an Tankstellen geliefert werden. Vergleichbar mit dem EEG (Erneuerbare-Energien-Gesetz) würde hierzu eine Art **Wasserstoff-Umlage** benötigt werden, mit der die Investitionskosten bezuschusst werden. Mit ei-