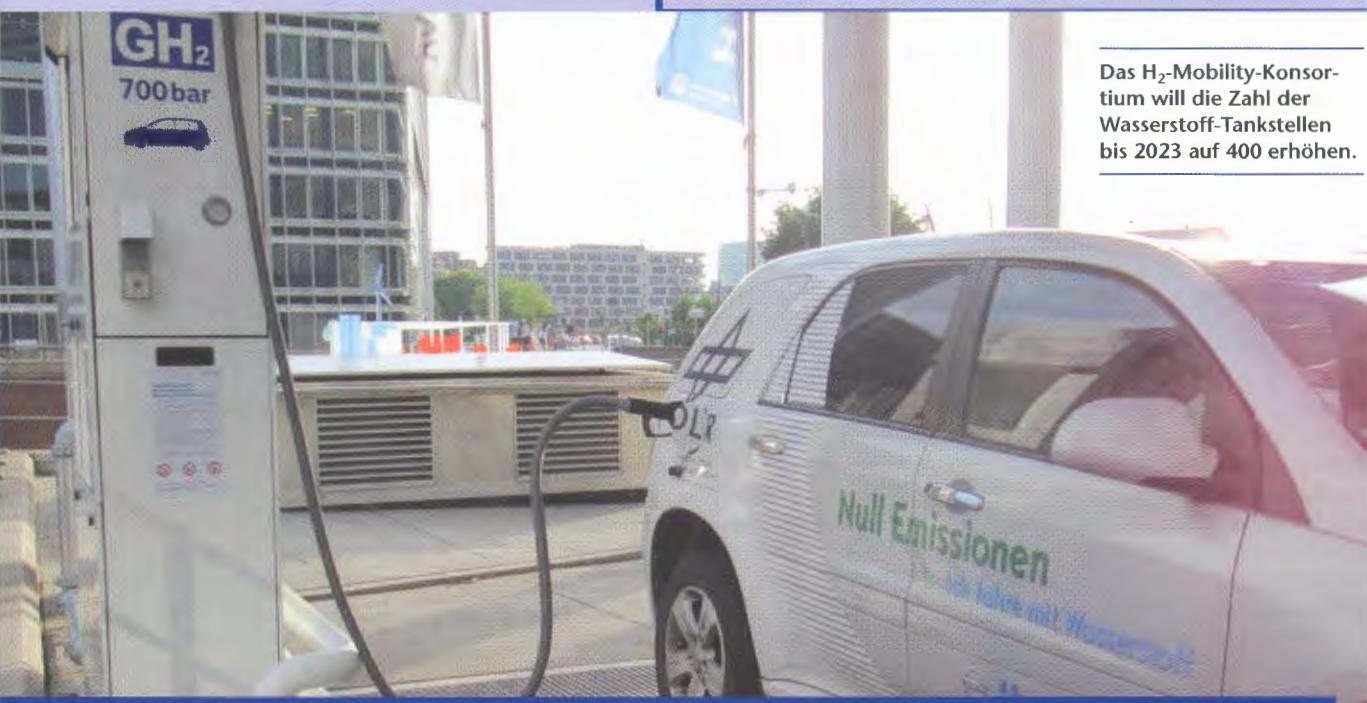


Das H<sub>2</sub>-Mobility-Konsortium will die Zahl der Wasserstoff-Tankstellen bis 2023 auf 400 erhöhen.



## Wasserstoff und Brennstoffzellen

Das Jahr 2013 war von der Diskussion über die Kostenauswirkungen der Energiewende und der Wahl der neuen Bundesregierung geprägt. Fortschritte bei der Markteinführung von stationären Brennstoffzellen für die Hausenergieversorgung sind deutlich. Die subventionierte Markteinführung von Hausenergieanlagen in Japan erfährt mit rund 57 000 Geräten in der Nutzung einen großen Zuspruch. Technologisch wurden weitere Fortschritte im Bereich der Zuverlässigkeit und Dauerhaltbarkeit erreicht. Erste serienreife Fahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb sind für 2015 angekündigt. Der Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur wird in den nächsten Jahren von besonderer Bedeutung sein; die Herstellung wird stark mit intermittierend anfallenden Stromüberschüssen erfolgen. Dazu laufen viele und vielschichtige Projekte zu „Power-to-Gas“-Anwendungen.

**B**ei der Regierungsbildung der Großen Koalition aus CDU/CSU und SPD Ende 2013 hat sich am Resortzuschnitt für das Thema Energie einiges geändert. Das Bundeswirtschaftsministerium unter Vizekanzler Sigmar Gabriel ist jetzt für den gesamten Energiebereich zuständig, auch für die erneuerbaren Energien, die bisher beim Bundesumweltministerium lagen. Im Koalitionsvertrag wird an dem Ziel festgehalten, Deutschland zum Leitmarkt und Leitanbieter für E-Mobilität zu ma-

chen. Dafür wird ein technologieoffener Ansatz inklusive der Wasserstoff-, Batterie- und Brennstoffzellentechnologie verfolgt. Im Einzelnen heißt es: „Am Ziel, eine Million Elektroautos in allen unterschiedlichen Varianten bis zum Jahr 2020 zu erreichen, wird festgehalten. Der Aufbau der entsprechenden Lade- und Tankstelleninfrastruktur wird vorangetrieben. Die Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW) wird ab 2016 ihre Arbeit auf die Implementierung und den Markthochlauf der Brennstoffzellentechnologie im mobilen und stationären Bereich konzentrieren.“ Die Energieforschung wird konsequent auf die Energiewende ausgerichtet. Voraussetzung dafür sind Forschung und Entwicklung für intelligente Lösungen insbesondere in den Bereichen Energieeffizienz, Energieeinsparung, erneuerbare Energien und Versorgungssysteme (unter anderem Speicher, Netze, Systemdienstleistungen durch erneuerbare Energien). Es heißt: „Die Projektförderung ist dabei

das geeignete Steuerungsinstrument, um ein zielgerichtetes politisches Handeln zu ermöglichen. Dazu sollen die Mittel im Energieforschungsprogramm verstetigt werden. Die stark schwankende Einspeisung erneuerbarer Energien erfordert einen Ausgleich durch verschiedene Flexibilitätsoptionen, wie zum Beispiel Lastmanagement, Power-to-Heat und Speicher. Mittel- bis langfristig steigt der Bedarf nach neuen Speichern, insbesondere Langzeitspeichern, die saisonale Schwankungen ausgleichen können. Mit den aktuellen und weiteren Demonstrationsprojekten werden wir die Technologie Schritt für Schritt weiterentwickeln, optimieren und zur Marktreife bringen“ [1; 2].

Eine wichtige förderpolitische Maßnahme in dieser Hinsicht wurde bereits Ende April 2013 vom BMBF mit der Bekanntmachung der Förderung von F&E-Arbeiten zum Themenfeld „Materialforschung für die Energiewende“ auf den Weg gebracht [3]. Dabei geht es darum, durch innovative Projekte aus dem Bereich der Grundlagenforschung Materialien für die Herausforderungen der Energiewende zu entwickeln. Als spezifische Themenfelder wurden Energieeffizienz in Gebäuden, Wasserstofferzeugung und -speicherung, Brennstoffzellentechnologien, Photovoltaik, Windenergie, Geothermie, Wasserkraft und Transportleitungen identifiziert. In einem zweistufigen Förderverfahren können bis zum 31. März 2015 Projektvorschläge eingebracht werden.

Das im Jahr 2007 gestartete Nationale Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP), das die Entwicklung wasserstoffbetriebener

### Autoren

**Dr. Günter Schiller**, Fachgebetsleiter Hochtemperatur-Elektrochemie, Elektrochemische Energietechnik und Prof. Dr. K. Andreas Friedrich, Abteilungsleiter Elektrochemische Energietechnik, beide Institut für Technische Thermodynamik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e. V., Stuttgart.

Brennstoffzellenfahrzeuge und die dafür notwendige Betankungsinfrastruktur sowie Brennstoffzellen für die Hausenergieversorgung zur Marktreife bringen soll, wird voraussichtlich fortgesetzt, wobei neben der Unterstützung von Forschung und Entwicklung zur Absicherung der technologischen Basis jetzt insbesondere auch die politischen Weichen für die Marktaktivierung in den kommenden Jahren gestellt werden müssen. Vor diesem Hintergrund haben Industrie und Wissenschaft über den Beirat der NOW ein Strategiepapier vorgelegt, das für die jeweiligen Märkte folgende Ziele für das Jahr 2025 nennt:

- Emissionsfreie Mobilität mit Brennstoffzellen für elektrische Fahrzeugantriebe und eine flächendeckende Wasserstoffinfrastruktur mit bundesweit mehr als 500 öffentlichen Wasserstoftankstellen und 2 000 Brennstoffzellenbussen im Liniennetz des ÖPNV. An der Zielvorgabe, bis zum Jahr 2020 eine Million Elektrofahrzeuge auf die Straße zu bringen, wird festgehalten. Um dies zu erreichen, soll der Kauf von Elektroautos zumindest indirekt über „zinsgünstige Kredite“ gefördert werden. Es soll „nutzerorientierte Anreize statt Kaufprämien“ geben. Es ist vorgesehen, bis Ende 2020 in Deutschland 86 000 Stromladestationen zu installieren.
- Wasserstofferzeugung aus erneuerbaren Energien und Integration in das Energiesystem als Bindeglied zwischen nachhaltiger Mobilität und Energieversorgung mit 1 500 MW Kapazität für Elektrolyseure zur Erzeugung von Wasserstoff aus erneuerbaren Energien, Umsetzung erfolgreicher Geschäftsmodelle für Power-to-Gas und Erschließung von Wasserstoffspeichern, um erneuerbaren Strom zu speichern.
- Stationäre Energieversorgung mit Brennstoffzellen in dezentraler Kraft-Wärme-Kopplung in der Haus- und Gebäudeversorgung für Haushalte und Industrie sowie sichere Stromversorgung für die Telekommunikation mit mehr als 500 000 Brennstoffzellenheizgeräten, mehr als 1 000 MW Brennstoffzellen-KWK-Anlagen sowie mehr als 25 000 sichere Stromversorgungsanlagen.

Der gesamte genannte Mittelbedarf für die Weiterentwicklung des NIP für den Zeitraum 2014 bis 2023 beträgt etwa 3,9 Mrd. €, wozu die Industrie etwa 2,3 Mrd. € beiträgt. Die erforderliche Unterstützung durch die öffentliche Hand für F&E-Aktivitäten und Markteinführungsinstrumente summiert sich auf etwa 1,6 Mrd. €, verteilt über zehn Jahre [4; 5].

Auf europäischer Ebene hat die gemeinsame Technologieinitiative für Brennstoffzellen und Wasserstoff (Fuel

Cells and Hydrogen Joint Technology Initiative, FCH-JTI), die zu Beginn des 7. Forschungsrahmenprogramms 2008 ins Leben gerufen wurde, um die Entwicklung von Brennstoffzellen und Wasserstofftechnologien in Europa zu beschleunigen und ihrer Markteinführung im Zeitraum zwischen 2010 und 2020 den Weg zu ebnen, eine neue Förderinitiative gestartet. Gründungsmitglieder dieser öffentlich-privaten Partnerschaft sind die Europäische Gemeinschaft, vertreten durch die Europäische Kommission, ein gemeinnütziger Interessenverband der europäischen Industrie (New Energy World Industry Grouping, NEW-IG) und ein Zusammenschluss von Forschungseinrichtungen und Universitäten (NERGY). Die Weiterführung des FCH-JTI für den Zeitraum 2014 bis 2024 wurde von der EU-Kommission am 10. Juli 2013 vorgeschlagen und wird voraussichtlich 2014 durch eine Verordnung des Rates beschlossen. Mit den ersten Ausschreibungen ist ab Mitte 2014 zu rechnen. Basierend auf einer strategischen Forschungsagenda wird die JTI ein zehnjähriges Programm zur Forschungsförderung umsetzen, das allen F&E-Akteuren aus den EU-Mitgliedsstaaten und assoziierten Staaten offensteht [6]. Das gesamte Fördervolumen beträgt 1,4 Mrd. €, von denen 700 Mio. € aus „Horizon 2020“ und der Rest von Seiten der teilnehmenden Industrieunternehmen beigetragen werden. Horizon 2020 ist das neue „8. Rahmenprogramm für Forschung und Innovation“ der Europäischen Union, das mit programmatisch angepasstem Namen das „7. Rahmenprogramm für Forschung, technologische Entwicklung und Demonstration“ ablöst. Horizon bildet den Kern der Forschungsförderung der EU und ist weltweit eines der größten öffentlichen Forschungsförderprogramme [7].

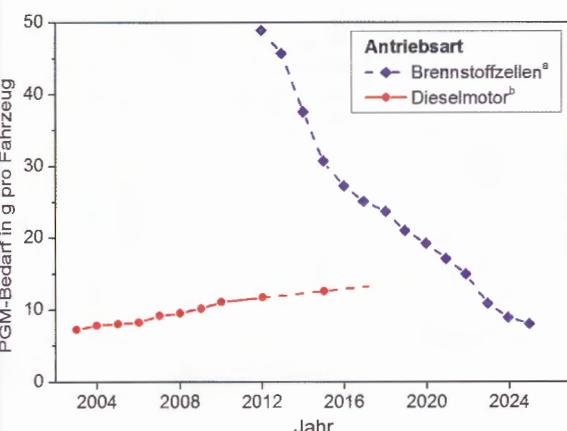
In den USA wurde im Mai 2013 vom Bundesenergieministerium (DOE) ein neues öffentliches Projekt (H2USA) zur Errichtung der Infrastruktur für neue Verkehrsmöglichkeiten aufgelegt. Dabei sollen Brennstoffzellenfahrzeuge auf Basis Wasserstoff den Verkehr in den USA diversifizieren, die Abhängigkeit vom importierten Öl verringern und die Wettbewerbsfähigkeit auf dem Weltmarkt steigern. Zu den Mitgliedern aus Autoherstellern, Behörden, Kraftstofflieferanten und Industrie gehören die American Gas Association, die Association of Global Automakers, die California Fuel Cell Partnership, die Electric Drive Transportation Association, die Fuel Cell and Hydrogen Energy Association, Hyundai Motor America, ITM Power, Mercedes-Benz USA, Nissan North America Re-

search and Development, Proton OnSite und Toyota Motor North America. H2USA soll die Erstkunden unterstützen, technische und ökonomische Studien durchführen sowie sich um die Infrastruktur und die Senkung der damit verbundenen Kosten kümmern [8].

## Automobile Anwendungen

Saubere Energie für den Verkehr, um einerseits die Abhängigkeit vom Erdöl zu verringern und andererseits CO<sub>2</sub>-arme Alternativen zum Erdöl zu entwickeln, ist ein weltweit angestrebtes Ziel für ein nachhaltiges und integratives Wachstum. Während weitere Effizienzverbesserungen wohl kurz- und mittelfristig die einfachste Lösung sind, muss langfristig eine Strategie für den Verkehrssektor umgesetzt werden, die auf eine schrittweise Ersetzung des Erdöls durch alternative Kraftstoffe und den Aufbau der entsprechenden Infrastruktur abzielt. Eine Vorreiterrolle für alternative Kraftstoffe, wie Elektrizität, Erdgas und Wasserstoff, die mit Brennstoffzellen-Batterie- und Hybridfahrzeugen verbunden sind, kann der deutschen und europäischen Industrie neue Marktchancen eröffnen und die Wettbewerbsfähigkeit im globalen Markt verbessern. Es gibt keine Patentlösung für die Zukunft der Mobilität, sondern es muss die Entwicklung aller wichtigen Kraftstoffalternativen im Hinblick auf einen umfassenden Mix alternativer Kraftstoffe vorangetrieben werden. Die Sicherheit der Energieversorgung im Verkehr wird nur durch eine breite Diversifizierung der Quellen für die einzelnen alternativen Kraftstoffe sichergestellt, insbesondere durch die Nutzung der universalen erneuerbaren Energieträger Elektrizität und Wasserstoff.

Eine Voraussetzung für eine solche Strategie besteht im Aufbau einer entsprechenden Infrastruktur. Die sechs Partner der H2-Mobility-Initiative (Air Liquide, Daimler, Linde, OMV, Shell und Toyota) haben sich auf einen konkreten Handlungsplan zum Aufbau eines landesweiten Wasserstoff-Tankstellennetzes für Brennstoffzellenfahrzeuge verständigt. Bis zum Jahr 2023 soll die heutige 15 Tankstellen umfassende öffentliche Wasserstoff-Infrastruktur in Deutschland auf rund 400 Tankstellen ausgebaut werden (s. auch Aufmacherfoto). Bereits innerhalb der kommenden vier Jahre sollen die ersten 100 Tankstellen in Betrieb gehen. Eine Grundsatzvereinbarung darüber wurde Ende September 2013 von Vertretern aller beteiligten Partner unterzeichnet. Ziel ist es, zwischen den Ballungsgebieten mindestens



<sup>a</sup>: The impact of widespread deployment of fuel cell vehicles on platinum demand and price, Intern. Journal of Hydrogen Energy 2011, 36, 11116-11127  
<sup>b</sup>: Global PGM Outlook, RBC Capital Markets 2013, [http://www.resource-capital.ch/fileadmin/research/fremde/Heinz\\_Isler\\_Juli2013/Global\\_PGM\\_Outlook\\_RBC\\_28.6.13.pdf](http://www.resource-capital.ch/fileadmin/research/fremde/Heinz_Isler_Juli2013/Global_PGM_Outlook_RBC_28.6.13.pdf)

alle 90 Autobahn-Kilometer eine H<sub>2</sub>-Tankstelle anzubieten, so dass ab 2023 in den Metropolregionen jeweils mindestens zehn Wasserstoffstationen zur Verfügung stehen. Für dieses zukunftsweisende Infrastrukturprojekt wird ein Gesamtinvestitionsbedarf von rund 350 Mio. € veranschlagt, allerdings hoffen die beteiligten Unternehmen auf eine Kostenteilung mit der öffentlichen Hand [9].

Das Problem der hohen Kosten für alternative Fahrzeugantriebe ist immer noch ein wesentlicher Hinderungsgrund für die schnelle Markteinführung in größerer Stückzahl und Anlass für Kontroversen über die längerfristige Perspektive. Befeuert wurde diese Diskussion kürzlich durch eine von Roland Berger Strategy Consultants veröffentlichte Studie über die Kostensituation bei Brennstoffzellenfahrzeugen [10]. Die Autoren untersuchten die Kostenstruktur der beiden für die PEM-Brennstoffzelle wesentlichen Komponenten, nämlich der Polymerelektrolytmembran und Platin als notwendigem Katalysatormaterial. Sie kommen zu der Schlussfolgerung, dass trotz einer Massenfertigung von 300 000 Fahrzeugen pro Jahr und einer signifikanten Verringerung der Platinbeladung auf weniger als 10 g pro Fahrzeug (entsprechend 0,15 mg/cm<sup>2</sup>) und damit einer Kostenreduktion des Brennstoffzellensystems um 80 % gegenüber heute mit Kosten von mindestens 9 000 € pro Fahrzeug zu rechnen ist. Sie sehen weiterhin Probleme mit der dann erforderlichen Verfügbarkeit von Platin und ziehen daher die Technologie generell in Zweifel, wenn nicht Lösungen für Platin-freie Katalysatoren gefunden werden. Platin-freie Katalysatoren befinden sich allerdings erst im Stadium der Grundlagenforschung und stehen frühestens in zehn Jahren zur Verfügung.

Unterstützung erhielten solche Zweifel durch Aussagen von Dr. Zetsche von

Bild 1

### Erwartete Entwicklung im Edelmetall-Bedarf pro Fahrzeug für Verbrennungsmotoren und Brennstoffzellenantriebe.

Daimler und Carlos Ghosn, dem Vorstandsvorsitzenden von Nissan, die beide ebenfalls einen Zeitraum von mindestens weiteren zehn Jahren für die Markteinführung aufgrund der Situation bei Infrastruktur und Kosten prognostizieren.

Die Studie von Roland Berger Strategy Consulting berücksichtigt einige wichtige Aspekte bei der Betrachtung der Zukunftsfähigkeit von Brennstoffzellenfahrzeugen nicht ausreichend. So wird zwar die benötigte Platinmenge pro Fahrzeug herausgestellt, ohne jedoch zu beachten, dass auch heute bereits in Verbrennungsmotoren ein hoher Edelmetallgehalt für die Abgasreinigung notwendig ist. Dieser wird in den kommenden Jahren aufgrund strengerer Abgasnormen voraussichtlich weiter steigen, was zu einer weiteren Annäherung des Edelmetallbedarfs für konventionelle Verbrennungsmotoren und Brennstoffzellenantriebe führen wird (Bild 1). Des Weiteren sind die zu erwartenden Recyclingraten für die verwendeten Membran- sowie Katalysatormaterialien in PEMFC-Systemen deutlich höher als im Falle von Abgasreinigungskatalysatoren.

Weiterhin findet sich in der Studie wieder die Entwicklung von kostengünstigen nicht-fluorierten Membranen noch die Einführung neuer Katalysatorstrukturen wie Core-Shell-Partikel, nanostrukturierte Dünnschichtkatalysatoren noch die Entwicklung von platinarmen Legierungskatalysatoren. Diese Aspekte müssen zwingend bei einer Bewertung von Brennstoffzellenfahrzeugen berücksichtigt werden, da sie zum einen zu einer weiteren Kostenverringerung von PEMFC-Systemen führen und zum anderen den geführten Vergleich zwischen verschiedenen Antriebskonzepten deutlich verschieben. Unter Berücksichtigung dieser Aspekte fällt die Beurteilung der Zukunftsfähigkeit von Brennstoffzellenfahrzeugen deutlich positiver aus, als dies in der Studie dargestellt wird. Zweifellos sind für eine ökonomisch konkurrenzfähige Markteinführung von Brennstoffzellenfahrzeugen noch Hürden zu überwinden, und es bedarf noch Weiterentwicklungen, ein Erfolg erscheint aber bei weiterer Unterstützung durch die Politik als wahrscheinlich.

Automobilhersteller wie Toyota, Honda und Hyundai setzen weiterhin auf eine schnelle Markteinführung von Brennstoffzellenautos auf Basis von Wasserstoff. Toyota hat für 2015 die Markteinführung des ersten Brennstoffzellen-Hybridfahrzeugs angekündigt. Der Toyota FCV soll zunächst mit einigen mehreren Hundert Fahrzeugen auf den Markt kommen und in einer zweiten Stufe mit mehreren Zehntausend Fahrzeugen produziert werden. Durch das technische Know-how, das Toyota bei Hybridantrieben gesammelt hat, und durch den Markterfolg des Prius ist Toyota von einem weiteren Markterfolg der Brennstoffzellenfahrzeuge überzeugt. Mit dem ersten in Serie produzierten Fahrzeug „Toyota FCV Concept“, das in Japan, den USA und Europa eingeführt werden wird, trat Toyota auf der 43. Tokyo Motor Show im November 2013 auf. Der FCV Concept bietet eine Reichweite von mindestens 500 km und kann in nur drei Minuten betankt werden – also genau so schnell wie ein konventionell betriebenes Fahrzeug. Dank des leichten und kompakten Brennstoffzellenstacks sowie den beiden 700-bar-Hochdruckwasserstofftanks bietet das Fahrzeug Platz für vier Passagiere (Bild 2). Dies wurde hauptsächlich durch Fortschritte bei den Wasserstofftanks erreicht, wobei statt vier nun zwei kompaktere Tanks unter dem Fahrzeuboden verbaut werden. Eine neue Brennstoffzelle ermöglicht bei einer Leistung von mindestens 100 kW die aktuell weltweit höchste Leistungsabgabe von 3 kW pro Liter Bauvolumen, wodurch die Größe und das Gewicht des Brennstoffzellenpaketes um die Hälfte reduziert werden konnten. Damit haben sich auch die Kosten für die Brennstoffzelle sowie die Wasserstofftanks im Laufe der Entwicklung deutlich verringert. Toyota strebt weitere Kosteneinsparungen an, um die erste Limousine mit Brennstoffzellen-Hybridantrieb zu einem marktgerechten Preis anbieten zu können [11]. Auch Honda zeigte im November ein Konzeptfahrzeug mit Brennstoffzelle bei der Los Angeles International Auto Show (Bild 3, links). Das Auto bietet dank besserer Anordnung der Komponenten Platz für fünf Personen. Der verbesserte Stack leistet mehr als 100 kW mit einer Leistungsdichte von 3 kW pro Liter. Auch die Reichweite von fast 500 km und das Betanken auf 700 bar in etwa drei Minuten entspricht dem Leistungsstandard des Toyota-Fahrzeugs. 2015 will Honda die Fahrzeuge zunächst in den USA und Japan und später dann auch in Europa auf den Markt bringen. Weiterhin kündigten Honda und General Motors eine



Bild 2

Toyota FCV Concept mit Fahrzeug-Aufbau (oben), Fahrzeug, 100-kW-Stack (rechts oben) und 700-bar-H<sub>2</sub>-Tank (rechts unten); FC Expo Tokio 2013.

strategische Partnerschaft an, um durch gemeinsame Entwicklung die Kosten weiter zu senken [12].

Der südkoreanische Hersteller Hyundai hat bereits im Januar 2013 mit der Serienproduktion des ix35 FCEV begonnen (**Bild 3**, rechts). Bis 2015 wird Hyundai 1000 Stück des Brennstoffzellenautos im koreanischen Ulsan fertigen. Ab 2015 sollen dann jährlich bis zu 10 000 Einheiten hergestellt werden. Der ix35 ist mit einer 100 kW leistenden Brennstoffzelle und einer Lithium-Polymer-Batterieeinheit mit einer Kapazität von 24 kWh ausgerüstet. Mit bis zu 5,6 kg Wasserstoff, die an Bord mitgeführt werden können, hat der Hyundai ix35 eine Reichweite von bis zu 588 km. Der durchschnittliche Verbrauch liegt bei 0,96 kg pro 100 km. Die Höchstgeschwindigkeit beträgt 160 km/h. In Europa werden einige Fahrzeuge in Demonstrationsprojekten betrieben, aber bisher nicht in Deutschland [13].

Um die Kommerzialisierung der Brennstoffzellen-Fahrzeugtechnologie voranzutreiben, haben die Daimler AG, Ford Motor Company und Nissan Motor Company ein Abkommen getroffen. Die Zusammenarbeit zielt auf eine gemeinsame Entwicklung eines Brennstoffzellensystems unter dem Gesichtspunkt einer Senkung der Entwicklungskosten. Dank einer höchstmöglichen Vereinheitlichung der Entwicklung mit Investitionen aller drei Partner zu gleichen Teilen sowie einem hohen Produktionsvolumen und den damit verbundenen Skaleneffekten soll der Weg für die Einführung eines wettbewerbsfähigen Brennstoffzellenfahrzeugs im Jahr 2017 geebnet werden [14].

leneffekten soll der Weg für die Einführung eines wettbewerbsfähigen Brennstoffzellenfahrzeugs im Jahr 2017 geebnet werden [14].

## Stationäre Anwendungen

Stationäre Brennstoffzellen zur Elektrizitätsbereitstellung und zur Heißwasseraufbereitung werden insbesondere in japanischen Haushalten immer populärer. Nachdem in Japan seit der Katastrophe vom März 2011 fast die gesamte Nuklearkapazität stillgelegt ist, werden alle Möglichkeiten ergriffen, die drohenden Energieengpässe zu überbrücken. Die Installation von Mikro-Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen in privaten Haushalten auf der Basis von Brennstoffzellen, die unter dem Begriff „Ene-Farm“ stehen, läuft auf Hochtouren. Die ersten Anlagen kamen 2009 auf den Markt, und bis Ende 2011 waren bereits insgesamt 23 000 Anlagen installiert. Bis Oktober 2013 waren etwa 57 000 Anlagen in Betrieb, der Preis fiel von anfänglich rund 28 000 € auf heute etwa 16 000 €, wobei die staatliche Subvention heute bei etwa 3 650 € liegt und in den nächsten Jahren auslaufen soll. Bis zum Jahr 2030 wird als Ziel eine Anzahl von 5,3 Millionen Einheiten genannt. Ene-Farm-Systeme werden in Japan zu mehr als 85 % mit Erdgas betrieben, der Rest arbeitet mit Flüssiggas. Wichtigste Produzenten der Systeme sind Panasonic, Toshiba und die zur JX Nippon Oil & Energy gehörende Firma Eneos Celltech. Vertrieben werden die Geräte vor allem über Gasversorger,

wie Tokyo Gas oder Osaka Gas. Aber auch Firmen wie Itochu Enex, Japans größtes Handelshaus, sehen eine aussichtsreiche Ergänzung ihres Kerngeschäfts. In der Zukunft werden verstärkt Systeme gesehen, die mit Hochtemperaturzellen (SOFC) arbeiten. Sie sind kleiner und haben im Vergleich zu dem üblichen Niedertemperatursystem höhere Wirkungsgrade. Eine der ersten Anlagen dieser Art wurde 2012 von einem Konsortium aus den Firmen Kyocera, Osaka Gas, Aisin Seiki, Chofu Seisakusho und Toyota vorgestellt. Die Betriebstemperatur des Systems liegt bei 700 bis 750 °C und der Wirkungsgrad bei 46,5 %. Die Firma Toho Gas verkauft die neue Ene-Farm seit Anfang 2013 für einen Preis von etwa 23 700 € [15]. Panasonic kündigte nun für 2014 auch den Vertrieb ihrer Anlagen in Kooperation mit Viessmann in Deutschland an. Das System mit einer PEM-Brennstoffzelle hat eine elektrische Leistung von 750 W sowie 1 kW thermische Leistung mit einem Gesamtwirkungsgrad von 90 % (**Bild 4**, links). Die Anlagen werden von Panasonic in Japan gebaut und in Deutschland von der Firma Viessmann zum System integriert und vertrieben [16].

Auch Südkorea hat sich ehrgeizige Ziele hinsichtlich der Reduktion der Emission von Treibhausgasen gesteckt. Hier gibt es den bisher größten Brennstoffzellenpark mit Hochtemperaturbrennstoffzellen mit einer Leistung von 11,2 MW der amerikanischen Firma FuelCell Energy. Nun beabsichtigt Südkorea für 2013 und die folgenden Jahre weitere Anlagen mit Brennstoffzellen dieses Herstellers aufzustellen, die dann vom Energieversorger Posco Energy betrieben werden. Es handelt sich dabei um zwei Anlagen mit Gesamtleistungen von 58,8 MW bzw. 122 MW mit Kraft-Wärme-Kopplung [17].

In Europa ist das mit EU-Mitteln finanzierte ene.field-Projekt das größte Leuchtturmprojekt für Mikro-KWK-Anlagen für Privathaushalte. Das Projekt mit einer fünfjährigen Laufzeit von 2012 bis 2017 richtet in zwölf EU-Staaten bis zu 1000 Brennstoffzellen-Heizungssysteme ein. Das Projekt mit einem Umfang



Bild 3

Honda FCEV Concept (links) und Hyundai Tucson Fuel Cell (rechts); Quelle: Green Car Reports, [www.greencarreports.com](http://www.greencarreports.com).

Bild 4

Ene-Farm-Gerät Panasonic (links, IFA Berlin 2013) und preisgekröntes BlueGen von Ceramic Fuel Cells (rechts, Hannover-Messe 2013).



von 26 Mio. € bringt 26 Partner aus den Feldern Mikro-KWK-Hersteller, führende europäische Energieversorger und Forschungsinstitute zusammen. Als Hersteller beteiligen sich die Firmen Buderus, Elcore, Baxi Innotech, Vaillant, Dantherm Power, Hexis, RBZ Cogen Europe, Ceres Power und SOFC Power mit sowohl auf PEM- als auch SOFC-Technologie basierenden Anlagen [18].

Der in Deutschland größte Praxistest von Brennstoffzellen-Heizgeräten – das Callux-Projekt – verfolgt das Ziel, den deutschen und europäischen Markt für die innovativen Anlagen vorzubereiten. Der Praxistest läuft bis Mitte 2016 und soll bis dahin mehr als 500 Geräte der Hersteller Baxi Innotech, Hexis und Vaillant mit den beteiligten Energieversorgern EnBW, E.on, EWE, MVV Energie und VNG unter Alltagsbedingungen in Einfamilienhäusern erproben. Bis Ende 2013 wurden bisher 350 Anlagen installiert, die mit 2,3 Millionen Betriebsstunden gelaufen sind und insgesamt 1,3 Millionen kWh Strom produziert haben. Es konnten bereits entscheidende Erfolge erzielt werden. So hat sich die Zahl der Serviceeinsätze im bisherigen Projektverlauf halbiert, wozu vor allem die Verbesserung der Stucklebenserwartung auf mehr als 16 000 Stunden verantwortlich war. Darüber hinaus wurden der elektrische Wirkungsgrad auf bis zu 34 % und der Gesamtwirkungsgrad auf bis zu 96 % erhöht. Damit einher ging eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um bis zu einem Drittel pro Anlage, verglichen mit einer Brennwerttherme und Strombezug aus dem Netz. Auch die Geräteabmessungen und das Gewicht haben sich in etwa halbiert. Auch bei den Kosten konnten wichtige Ziele erreicht werden. Durch die von vornherein verbindliche Vereinbarung von Stückzahlen und Kostenzielen hat sich der Aufwand zur Herstellung von Brennstoffzellenheizgeräten seit Projektstart um 60 % vermindert. Die Kosten für den Service und die Vorhaltung von Ersatzteilen reduzierten sich sogar um 90 %. Auch vereinfachte sich die Installation der innova-

tiven Heizungsanlagen dank zunehmender besserer Einbindung in die vorhandene Haustechnik [19; 20].

Der deutsch-australische Entwickler und Hersteller von Technologien für Festoxid-Brennstoffzellen Ceramic Fuel Cells GmbH (CFC) ist ein weltweit führendes Unternehmen im Bereich der Hausenergieversorgung auf Brennstoffzellenbasis. Ihre kleinformativen Mikro-KWK-Systeme erreichen bei der kombinierten Erzeugung von Strom und Wärme einen elektrischen Wirkungsgrad von bis zu 60 %. Aus Erdgas kann im Jahr bis zu 13 000 kWh Strom und bis zu 5 200 kWh Wärme erzeugt werden. Damit lassen sich die Energiekosten und CO<sub>2</sub>-Emissionen im Vergleich zum Bezug aus dem Netz um bis zu 50 % reduzieren. Der Preis einer solchen Anlage liegt bei 20 000 €. Das Unternehmen hat 2009 eine der weltweit ersten Serienfertigungen für Brennstoffzellenstapel in Heinsberg bei Aachen eröffnet. Mit rund 50 Mitarbeitern werden dort neben den Brennstoffzellenstapeln auch komplett Mikro-KWK-Anlagen gefertigt. Für sein Produkt „BlueGen“ hat CFC 2013 nun den Preis für Innovation und Klimaschutz der deutschen Gaswirtschaft in der Kategorie „Forschung und Entwicklung“ gewonnen (Bild 4, rechts) [21].

In den USA vertreibt die Firma Bloom Energy Brennstoffzellensysteme auf Basis der oxidkeramischen Hochtemperaturbrennstoffzelle (SOFC) für KWK-Anwendungen unter dem Namen „Bloom Energy Server“ [22]. Es handelt sich dabei um Anlagen im Leistungsbereich 100 kW bis 1 MW oder höher. Die Größe eines 100-kW-Systems wird vergleichbar mit der eines Pkw-Parkplatzes angegeben, und es kann etwa 100 Durchschnittshaushalte oder ein kleines Bürogebäude versorgen. Der elektrische Wirkungsgrad für ein 100-kW-System wird mit > 50 %, bezogen auf den unteren Heizwert, angegeben. Die Kosten für eine Einheit liegen bei 800 000 US-\$, und es wird eine Amortisationszeit von fünf Jahren durch die Einsparkosten an den Energieversorger versprochen. Als

Brennstoff kann Erdgas oder Biogas verwendet werden. Referenzanlagen laufen bereits bei Großfirmen, wie FedEx, Google, Staples und Wal Mart, und innerhalb der nächsten zehn Jahre werden auch kleine KWK-Anlagen für Einfamilienhäuser zu Kosten von ungefähr 3 000 US-\$ angekündigt.

## Wasserstoffprojekte

Die Bundesregierung strebt mit dem Energiekonzept 2050 eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung an, wozu neben der Reduktion des Primärenergieverbrauchs auch die Verringerung der Treibhausgasemissionen und der Ausbau der erneuerbaren Energien auf 80 % am Bruttostromverbrauch und auf 60 % am Bruttoendverbrauch zu den wichtigsten Vorgaben zählen. Bei einem so hohen angestrebten Anteil an regenerativen Energiequellen, hauptsächlich durch Wind- und Solarenergie, ist eine Speicherung von Energie zur zeitlichen Anpassung des Energieangebots an den aktuellen Energiebedarf unumgänglich. Der Energieträger Wasserstoff bzw. daraus gewonnene synthetische Kohlenwasserstoffe als Kraftstoffe können diese Funktion auch im benötigten Umfang in idealer Weise erfüllen. Mit regenerativ erzeugtem elektrischem Strom kann mit Elektrolyseverfahren, wie alkalische und PEM-Elektrolyse sowie längerfristig auch mit der Hochtemperatur-Dampfelektrolyse, Wasser gespalten und in umweltverträglicher Weise der speicherbare Energieträger Wasserstoff bzw. Kohlenwasserstoffe gewonnen werden.

Vor diesem Hintergrund wurden in Deutschland eine Reihe von Projekten zur Entwicklung und Demonstration der Speicherung zeitlich auftretender Energieüberschüsse aus regenerativen Quellen wie Solarenergie und insbesondere Windenergie begonnen, bei denen der regenerativ erzeugte Strom über Elektrolyse von Wasser in speicherbare chemische Energieträger wie Wasserstoff oder Methan umgewandelt wird. Das Übersichtsbild (Bild 5) zeigt eine zusammenfassende Darstellung, wo diese so genannten Power-to-Gas-Projekte angesiedelt sind. Einige davon werden im Folgenden exemplarisch näher beschrieben.

Das erste Wasserstoff-Hybridkraftwerk wurde bereits 2011 in Prenzlau in der Uckermark von den beteiligten Unternehmen Enertrag AG, Total Deutsch-

Bild 5

**Demonstrationsprojekte mit Elektrolyse-Wasserstoff:**  
**Prenzlau:** Hybridelektrizitätswerk, Wasserstofftankstelle, Verstromung mit Abwärmenutzung.  
**Berlin-Schönefeld:** Hybridelektrizitätswerk, Wasserstofftankstelle, Verstromung mit Abwärmenutzung.  
**Grapzow:** Erdgashochdrucknetz, Tankstelle.  
**Falkenhagen:** Erdgashochdrucknetz.  
**HH Reitbrook:** Erdgashochdrucknetz.  
**HH Hafen:** Wasserstofftankstelle.  
**Werlte:** Methanisierung, CO<sub>2</sub>-Quelle Biogas; Erdgasnetz.  
**Ibbenbüren:** Erdgashochdrucknetz, Verstromung.  
**Herten:** Tankstelle, Verstromung.  
**Niederaussem:** Methanisierung.  
**Frankfurt/Main:** Erdgasnetz.  
**Mainz:** Trailer, Erdgasnetz, Verstromung.  
**Schwandorf:** Methanisierung, CO<sub>2</sub>-Quelle Bio-/Klärgas.  
**Stuttgart:** Vaihingen Methanisierung, Talstr. Tankstelle, Erdgasleitung.  
**Freiburg:** Tankstelle.



land, Vattenfall und Deutsche Bahn in Betrieb genommen (Bild 6). Es vereinigt erstmals die Energiequellen Wind, Wasserstoff und Biogas zu einem Verbund, um eine nachhaltige Energieversorgung und Energiespeicherung mit einem Mix aus rein erneuerbaren Energiequellen im Praxistest nachzuweisen. Der in drei Windturbinen mit je 2 MW erzeugte Strom wird anteilig in einem alkalischen Elektrolyseur, der eine Leistung von 600 kW aufweist, zur Herstellung von 600 m<sup>3</sup> Wasserstoff eingesetzt, der gespeichert und in Zeiten hoher Nachfrage bei gleichzeitig geringem Windenergieangebot in einem Wasserstoff-Biogas-Blockheizkraftwerk zur Strom- und Wärmebereitstellung genutzt wird [23]. Außerdem kommt der grüne Wasserstoff auch an Total-Wasserstofftankstellen in Berlin und Hamburg an die Zapfsäule. Nachdem sich die erste Einspeisung, die für Mitte 2012 vorgesehen war, verzögert hatte, wird nun seit Oktober 2013 über eine Stichleitung Wasserstoff auch ins Erdgasnetz eingespeist, wodurch der Energieversorger Greenpeace Energy seine etwa 8 000 Gaskunden versorgt. Das gesamte Investitionsvolumen der Anlage liegt bei 21 Mio. € und wird durch das Land Brandenburg und das Bundesverkehrsministerium gefördert [24].

Im August 2013 hat auch der Energieversorger E.on in Falkenhagen in Brandenburg eine Power-to-Gas-Pilotanlage in Betrieb genommen. Mittels Elektrolyse wird dort in einem Windpark regenerativ erzeugter Strom in Wasserstoff umgewandelt und in das regionale Ferngasnetz eingespeist. Die gespeicherte Energie steht dann dem Erdgasmarkt zur Verfügung und findet Anwendung im Wärmemarkt, in der Industrie, in der Mobilität und bei der Stromerzeugung.

Die Anlagenleistung beträgt 2 MW. Dies entspricht einer Produktion von 360 m<sup>3</sup> Wasserstoff pro Stunde [25]. Eine weitere Anlage ist von E.on in Hamburg-Reitbrook geplant (Bild 7). Dort soll mittels PEM-Elektrolyse (weltweit erste 1-MW-Anlage) Windstrom in Wasserstoff umgewandelt und ins Erdgasnetz eingespeist werden. Der erste Spatenstich erfolgte im Juni 2013, die Bauzeit soll 1,5 Jahre betragen, so dass der Regelbetrieb bereits Ende 2014 aufgenommen werden soll. Die Projektbeteiligten sind neben E.on die Firmen Hydrogenics und SolviCore sowie die Forschungseinrichtungen Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme FhG-ISE [26].

Eine dritte Anlage für die Speicherung regenerativer Energie über Wasserstoff wurde im September 2013 mit dem Demonstrations- und Innovationsprojekt RH2-Werder/Kessin/Altentreptow mit der Inbetriebnahme des Umspannwerks feierlich eingeweiht [27]. Es besteht aus dem mit 140 MW leistungsstärksten Windpark in Mecklenburg-Vorpommern, einem 380-kV-Umspannwerk zur Anbindung an das Übertragungsnetz

und dem größten Wind-Wasserstoff-Speichersystem inklusive Rückverstromungseinheit in Deutschland. Der Windpark liefert sauberen Strom für ungefähr 125 000 Haushalte, der im Bedarfsfall durch das dort installierte Wind-Wasserstoff-System CO<sub>2</sub>-frei gespeichert werden kann. Mit einem 300-bar-Wasserelektrolyseur mit einer Leistung von 1 MW wird Wasserstoff hergestellt, der vielfältig durch Einspeisung in das Erdgasnetz, durch Rückverstromung in einem BHKW und zur Betankung von Fahrzeugen genutzt werden kann. Das Umspannwerk verbindet den Windpark mit der Höchstspannungsstrecke Greifswald-Lubmin-Berlin und stellt damit einen wichtigen Baustein für den Netzausbau im Rahmen der Energiewende in Mecklenburg-Vorpommern dar. Das Projekt wird durch das Verkehrsministerium (heute: BMVI) im Rahmen des Nationalen Innovationspro-

Bild 6

**Hybridelektrizitätswerk von Enertrag in Prenzlau; alkalischer Elektrolyseur 600 kW (rechts unten).**

Bild: Enertrag

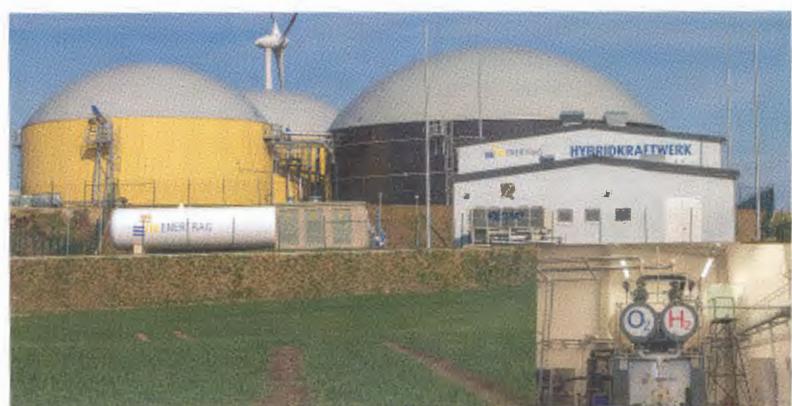


Bild 7

**Besucherzentrum zu Power-to-Gas von E.on Hanse in Reitbrook (links) und kompakter 1-MW-PEM-Elektrolyseur (rechts) für die Wasserstofferzeugung.**

Bild: E.on Hanse und Hydrogenics



gramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP) mit rund 4,5 Mio. € gefördert.

Unter Führung der Thüga AG als Projektkoordinator bündeln 13 kommunale Unternehmen und Stadtwerke ihr Know-how und Kapital, um im Netzgebiet der Netzdienste Rhein-Main in Frankfurt mit einer Demonstrationsanlage mit Überschussstrom und Elektrolyse Wasserstoff zu erzeugen, der in das kommunale Gasverteilnetz eingespeist wird. Der Anteil von Wasserstoff im Erdgasnetz darf maximal 5 % betragen, bzw. 2 %, wenn sich eine Erdgastankstelle im Netz befindet. Die Anlage erzeugt mit einer Stromaufnahme von 315 kW pro Stunde rund 60 m<sup>3</sup> Wasserstoff und kann so in einer Stunde 3 000 m<sup>3</sup> mit Wasserstoff angereichertes Erdgas in das Netz einspeisen. Außerdem befindet sich am Standort ein Heizkraftwerk, das die Möglichkeit bietet, in einer eventuell zweiten Projektphase nach 2016 Erfahrungen zur Erzeugung von synthetischem Methan aus Wasserstoff und Kohlendioxid zu sammeln. Diese Option erlaubt die unbegrenzte Einspeisung von synthetischem Methan in das Erdgasnetz. Kernstück der Anlage ist ein Protonen-Austausch-Membran (PEM)-Elektrolyseur der Firma ITM Power. Ende November 2013 hat die Anlage erstmalig Wasserstoff in das Frankfurter Gasverteilnetz eingespeist. Der Elektrolyseur liefert den Wasserstoff bereits mit einem für das Netz passenden Druck von 3,5 bar, so dass auf einen Verdichter verzichtet werden kann. Bis Ende 2016 werden die Unternehmen Erfahrungen sammeln, wie die Anlage unter Praxisbedingungen funktioniert. Die Betriebsphase wird von wissenschaftlichen Projektpartnern begleitet und vom hessischen Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz gefördert [28].

Eine weitere geplante Anlage zur Speicherung von überschüssigem regenerativ erzeugtem Strom soll 2015 in einem „Energiepark“ in Hechtsheim bei Mainz entstehen [29]. Die Stadtwerke Mainz errichten hier gemeinsam mit den Partnern Linde, Siemens und der Hochschu-

le Rhein Main eine 6-MW-Anlage zur Wasserstoffherstellung. Dieser soll als Zwischenspeicher Engpässe im Verteilernetz ausgleichen und in das Erdgasnetz eingespeist werden. Dort steht es für Heizungen oder Gas- und Blockheizkraftwerke zur gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung zur Verfügung. Außerdem könnte der Wasserstoff an zukünftige Wasserstofftankstellen geliefert werden. Kernstück ist ein von Siemens entwickeltes PEM-Elektrolysesystem. Der Wasserstoff wird mit einem von Linde entwickelten Wasserstoffverdichter komprimiert und gespeichert oder in Wasserstofftrailer gefüllt. Die Entwicklung verbesserter Komponenten für PEM-Elektrolyseure ist auch Gegenstand in Projekten des Leuchtturms „Wind-Wasserstoff-Kopplung“ [30]. Der Verbund „ekolyser“ nutzt die Expertise von Forschungseinrichtungen (Forschungszentrum Jülich, Fritz-Haber-Institut der Max-Plack-Gesellschaft) und Industrie (Solvicore, Gräbener Maschinentechnik, FuMA-Tech), um die Standzeit von Membranen zu verbessern, metallische Bipolarplatten für den anspruchsvollen Betrieb in Elektrolyseuren zu entwickeln und die Beladung mit teurem Platin zu reduzieren. Im Projekt „LastElSys“ entwickeln das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und die Firma Hydrogenics PEM-Elektrolyseure weiter und passen diese an die wechselnden Lasten an, die bei der Verwendung von Strom aus fluktuierenden erneuerbaren Energien auftreten. Ziel sind lastwechselresistente Membran-Elektroden-Einheiten für PEM-Elektrolysesysteme. Dazu wird ein Testsystem aufgebaut, in dem verschiedene Kombinationen von Membranen und Katalysatoren erforscht und getestet werden können. Ein weiteres Projekt an der Technischen Universität Berlin verfolgt die Entwicklung neuartiger hochaktiver und preisgünstiger Elektrokatalysatoren für beide Teilreaktionen der Wasserelektrolyse.

Auch in Frankreich und den USA interessiert man sich für die Speicherung von Überschüssen an erneuerbarem Strom in Form von Wasserstoff. Diesem Zweck dient in Frankreich das GRHyd-

Projekt, das vom Gasversorger GDF Suez ins Leben gerufen wurde [31; 32]. Im Juli 2013 fiel der Startschuss für die Initiative „Mobilité Hydrogène France“, ein Zusammenschluss von 24 Partnern aus den Gebieten Produktion, Speicherung, Energieversorgung und Politik. In einer ersten fünf Jahre laufenden Erprobung soll über Elektrolyse erzeugter Wasserstoff in ein lokales Gasnetz eingespeist und parallel dazu ein Teil des „grünen“ Wasserstoffs zusammen mit Erdgas zum Kraftstoffgemisch Hythane verarbeitet und in Fahrzeugen des öffentlichen Nahverkehrs getestet werden. In den USA wurde im Juni 2013 vom California Hydrogen Business Council (CHBC) ein Programm zu Wasserstoff als Kraftstoff und zur Speicherung erneuerbarer Energie gestartet [33]. Das bekanntgegebene Programm möchte 33 % erneuerbaren Strom im kalifornischen Netz bis 2020 erreichen. Dazu muss die Erzeugung erneuerbarer Energie massiv ausgebaut werden. Wasserstoff als Speicher löst nach Ansicht des CHBC nicht nur technische Probleme, sondern bietet auch außerordentliche geschäftliche Chancen für Kalifornien.

Neben der Speicherung regenerativ erzeugter Energie in Form von Wasserstoff wird auch die nachfolgende Umwandlung des Wasserstoffs mit CO<sub>2</sub> in der so genannten Sabatier-Reaktion in Methan angestrebt, da damit ein in den bestehenden Erdgasnetzen transportierbarer Energieträger zur Verfügung steht. Diese Technologie wird besonders vom Zentrum für Sonnenenergie und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW) angestrebt, das Ende 2012 auch eine Forschungsanlage mit einer elektrischen Anschlussleistung von 250 kW in Betrieb genommen hat [34]. Während des Betriebs wollen die ZSW-Forscher mit ihren Kollegen vom Fraunhofer-Institut IWES und der Firma Etogas GmbH (vormals SolarFuel) die Technologie weiter optimieren. Die 250-kW-Anlage besteht aus einem alkalischen Druckelektrolyseur, einer Methanisierungseinheit sowie dem Prozessleitsystem für die Steuerung und Regelung. Das Konzept wird auch in einer Pilotanlage in der Energielandschaft Morbach in Rheinland-Pfalz umgesetzt, wobei das CO<sub>2</sub> der dort bestehenden Biogasanlage entnommen wird [35]. Die Anlage hat eine Leistung von 25 kW, größere Anlagen bis 6 MW sind für die nächsten Jahre in Planung. Die Hochskalierung einer solchen

Power-to-Gas-Anlage für den energiewirtschaftlich relevanten Bereich von 1 bis 20 MW wird gegenwärtig vom ZSW zusammen mit den Partnern Etogas und Enertrag durchgeführt. Das ZSW koordiniert die Entwicklungsarbeiten an einer 300-kW-Elektrolyse mit einem Zellstapel, dessen Leistung auf mehr als 1 MW steigerbar ist. Dieser Stack setzt sich aus etwa 70 Zellen zusammen, die über vergrößerte Flächen und eine erhöhte Gasleistung verfügen. Daneben werden zahlreiche weitere technische Neuerungen erprobt, wie eine 1-MW-Gleichrichteranlage, eine innovative Elektrodenbeschichtung sowie ein modularer Aufbau der Gesamtanlage.

Die Firma Audi hat als Automobilhersteller das Power-to-Gas-Konzept aufgegriffen, um aus grünem Strom, Wasser und Kohlendioxid die nachhaltigen Energieträger Wasserstoff und Methan, die Audi „e-gas“ nennt, als Kraftstoffe anzubieten [36]. Dieses Projekt nutzt die Ergebnisse des bereits genannten Projektes. Gemeinsam mit dem Anlagenbauer Etogas GmbH und dem Projektpartner MT-BioMethan GmbH hat Audi auf einem 4 100 m<sup>2</sup> großen Grundstück des Energieversorgers EWE in Werlte im Emsland eine e-gas-Anlage errichtet. Die Anlage arbeitet in zwei Prozessschritten: Elektrolyse und Methanisierung. Im ersten Schritt nutzt die Anlage überschüssigen regenerativen Strom, um mit drei Elektrolyseuren Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff zu spalten. Der Wasserstoff kann als Treibstoff für zukünftige Brennstoffzellenautos dienen, derzeit fehlt aber noch eine flächendeckende Infrastruktur. Deshalb erfolgt unmittelbar der zweite Verfahrensschritt der Methanisierung. Durch die Reaktion des Wasserstoffs mit CO<sub>2</sub> entsteht synthetisches Methan, das Audi e-gas, das mit fossilem Erdgas nahezu identisch ist und über das deutsche Erdgasnetz an Tankstellen bundesweit verteilt werden kann. Die Abwärme, die bei der Methanisierung entsteht, wird als Prozessenergie in der benachbarten Biogasanlage genutzt, wodurch der Gesamtwirkungsgrad deutlich ansteigt. Aus der Biogasanlage stammt auch das hochkonzentrierte CO<sub>2</sub>, das als Grundbaustein für das e-gas benötigt wird. Pro Jahr produziert die Audi-e-gas-Anlage etwa 1000 t e-gas und bindet damit rund 2000 t CO<sub>2</sub>. Mit dem e-gas können voraussichtlich 1500 Audi A3 jedes Jahr 15 000 km CO<sub>2</sub>-neutral zurücklegen. Beim Kauf des Autos können die Kunden ein Kontingent e-gas mitbestellen und damit an einem bilanziellen Verfahren teilnehmen. Es stellt sicher, dass die Menge Gas, die sie an der Erdgastankstelle einfüllen, durch die Audi-e-gas-

Anlage ins Netz eingespeist wird. Dieses Projekt ist Teil der umfassenden Audi-e-fuels-Strategie. Parallel zur e-gas-Anlage in Werlte betreibt Audi mit dem Partner Joule in Hobbs, New Mexico, USA, eine Forschungsanlage zur Herstellung von e-Methanol und e-Diesel [36]. In dieser Anlage produzieren Mikroorganismen, ähnlich wie nachfolgend bei dem Projekt in der Kläranlage Schwandorf beschrieben, hocheine Kraftstoffe.

Eine Variante der Methanisierung von Wasserstoff mit CO<sub>2</sub> in der Power-to-gas-Technologie wird von der Firma Microb-Energy entwickelt und mit Partnern an der Kläranlage Schwandorf Wackersdorf in Bayern erprobt [37]. Es handelt sich dabei statt eines katalytischen Umwandlungsprozesses um eine „mikrobielle Methanisierung“, bei der die Umwandlung des im Gärprozess einer Kläranlage anfallenden Kohlendioxids und des extern zugegebenen Wasserstoffs zu Methan auf mikrobiologischem Weg erfolgt. Ein Elektrolyseur liefert Wasserstoff mit einer Produktionsrate von 30 m<sup>3</sup>(i.N.)/h, der dann von speziell adaptierten Mikroorganismen in Methan umgesetzt wird. Dieser Umwandlungsprozess kann bei der Betriebstemperatur der Kläranlage von 40 °C sehr schnell in Gang gesetzt oder abgeschaltet werden. Das erforderliche Kohlendioxid ist durch den anaeroben Abbauprozess der Kläranlage frei verfügbar. Die Stabilität und die Stoffumsatzrate des biologischen Prozesses sollen bei unterschiedlichen Zugabemengen von Wasserstoff untersucht und damit auf reale Betriebsbedingungen bei schwankenden Überschussstrommengen getestet werden. In der Begleitforschung durch die Hochschule Regensburg werden Energiebilanzen, Wirkungsgrade und Treibhausbilanzen des Verfahrens untersucht und mit anderen Möglichkeiten der Energiespeicherung verglichen.

## Forschungsprogramme

Auch die Helmholtz-Gemeinschaft hat die Bedeutung der Energiespeicherung für die Umwandlung der Energieversorgung und -nutzung erkannt und ein neues Programm „Speicher und vernetzte Infrastrukturen“ für die Speicherung und Verteilung von Energie definiert. In diesem Programm, das von 2015 bis 2019 geplant ist, wird mit Energiespeicherlösungen daran gearbeitet, Schwankungen bei Energieerzeugung und -verbrauch in Zukunft auszugleichen. Die notwendige Infrastruktur wird so weiterentwickelt, dass unterschiedliche Energieträger miteinander gekoppelt werden können. Das Programm umfasst rund 62 Mio. € pro Jahr und beinhaltet Batte-

rieentwicklung, Wasserstoff und Elektrolyse, synthetische Kohlenwasserstoffe, Brennstoffzellen, thermische Energiespeicher und Supraleitung, Netze und Systemintegration. Es ist damit weltweit eines der größten Programme, das diese Themen integriert und umfassend bearbeitet. Die elektrochemischen Speicherlösungen werden von den Grundlagen bis zur Anwendungsreife weiterentwickelt. Dabei geht es sowohl um statioäre als auch mobile Energiespeicher. Für Batterien werden Materialien für Elektroden ebenso wie Elektrolyte, Zellen und gesamte Systeme erforscht. Die Anwendungen werden als prototypisch demonstriert. Die Elektrolyse, insbesondere die Polymer-Elektrolyse und die Hochtemperatur-Festoxid-Elektrolyse werden ebenfalls von den Materialien bis zur Anwendung erforscht, wobei je nach Reifegrad Kostensenkung oder Funktionalität im Fokus der Forschung stehen. Sichere Wasserstoffsystemlösungen, sowohl auf Komponentenebene (zum Beispiel Speicher) wie auch auf Systemebene (zum Beispiel Tankstellen), werden ebenfalls entwickelt und für die breite Anwendung in der Gesellschaft erüchtigt. Synthetische Kohlenwasserstoffe sind Speicher mit höchster Energiedichte, und sie lassen sich leicht transportieren. Dazu optimieren die Forscher der HGF die Erzeugung und untersuchen ihr Potenzial. Basis ist dabei die Wasserstofferzeugung aus erneuerbarer Energie und die anschließende Fischer-Tropsch-Synthese. Die schon langjährige Expertise im Bereich der Brennstoffzelle wird genutzt, um langzeitstabile und kostengünstige Energiewandlungslösungen anzubieten, die sich durch die hohe Energieeffizienz in der Wandlung zu Elektrizität auszeichnen. Thermische Hochtemperaturspeicher werden als Querschnittstechnologie für die Effizienzsteigerung und Flexibilisierung von konventionellen Kraftwerken, solarthermischen Kraftwerken sowie Industrieprozessen erforscht. Schwerpunkte sind dabei thermische Speicher mit Salzschmelzen, Latentwärmespeicher und Reaktionswärmespeicher. Weitere Themen sind supraleitende Komponenten, ihre Integration in Netze und die Wechselwirkung verschiedener Energieträger.

## Literatur

Die Literaturstellen zu dieser Jahresübersicht sind auf der BWK-Homepage über das Menü „Archiv/Literaturverzeichnis“ aufrufbar.

 [www.eBWK.de](http://www.eBWK.de)