



Power-to-Gas in Deutschland und NRW

Ideen, Potenziale, Projekte

Einführung

Power-to-Gas (PtG), die Wandlung von Strom in gasförmige Energieträger, bietet die Möglichkeit, große Mengen überschüssiger erneuerbarer Energie zu speichern und auf vielfältige Weise klimaschonend und emissionsfrei/-arm zu nutzen. Über Power-to-Gas können neue Anwendungen für erneuerbare Energien erschlossen und damit deren Ausbau zusätzlich forciert werden (Stichwort: Sektorenkopplung). Die Demonstration der Technologie hat in den vergangenen Jahren in Deutschland rasant Fahrt aufgenommen, so dass heute Anlagen mit etwa 21 MW Leistung in Betrieb und weitere in Planung oder in Bau sind. Eine Wirtschaftlichkeit ist aber noch nicht gegeben. Diese Broschüre beschreibt die unterschiedlichen Pfade, Projekte und Potenziale und endet mit einem Blick auf die in NRW aktiven Firmen und Forschungsstellen. Das Netzwerk Brennstoffzelle und Wasserstoff NRW unterstützt die einschlägig aktiven Unternehmen/KMU und forciert die hiesige Fachdiskussion im Rahmen seiner Expertengruppen „Power-to-Gas“ und „H₂-System“.

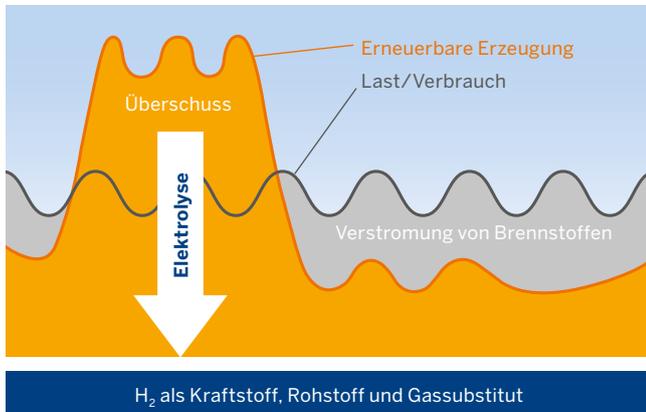
Power-to-Gas in der Energiewende

Im engeren Sinn des Begriffes Power-to-Gas ist die elektrolytische Erzeugung von Wasserstoff und dessen Einspeisung in das Erdgasnetz gemeint. Diese existente Infrastruktur weist in Deutschland eine Länge von fast

500.000 km auf. Es bindet Speicher mit einer Gesamtkapazität von 25 Mrd. m³ oder 275 TWh gemessen am Brennwert ein, was fast 30 % des in Deutschland jährlich verbrauchten Erdgases entspricht. Wird der Wasserstoff zuvor unter Nutzung von CO₂ methanisiert, können beliebige Mengen eingespeist werden. Darüber hinaus schließt Power-to-Gas aber auch Nutzungspfade mit Anwendung des reinen Wasserstoffs im Verkehr, in der Industrie oder zur Rückverstromung mit ein. Gerade die Verwendung als Kraftstoff wird wegen der hohen Effizienz und Emissionsfreiheit der damit möglichen Brennstoffzellenantriebe als ökonomisch, wie umweltpolitisch, interessant und besonders klimaschutzeffektiv angesehen. Sie benötigt jedoch eigene Infrastrukturen, die in der langjährigen Aufbauphase kaum durch den Umsatz finanziert werden können.

Brennstoffzellen-Fahrzeuge, die mit Wasserstoff betrieben werden, sind dabei heute technisch reif allerdings in der Markteinführung, mangels Massenfertigung, noch teurer als herkömmliche Technik. Der Aufbau der Infrastruktur schreitet voran. Bis 2023 will die H₂ Mobility Deutschland ein flächendeckendes Netz von 400 Wasserstofftankstellen errichten – davon 50 bis Ende des Jahres 2016 im Rahmen des Projekts Clean Energy Partnership (CEP).





Werden aus dem Wasserstoff anschließend vor Ort unter Zugabe von CO₂ flüssige Energieträger synthetisiert, spricht man von Power-to-Liquids oder auch Power-to-Chemicals. Da die Wasserstofferzeugung jeweils der grundsätzliche Schritt ist, gehören auch diese Pfade zur Power-to-Gas-Technologie. Ihnen allen ist gemein, dass sie die Speicherung und Nutzung sehr großer Energiemengen erlauben – Mengen, die sich in einem durch Wind und Sonne dominierten Stromsystem sonst nicht nutzen ließen.

Im Jahr 2015 betrug die Stromerzeugung aus Wind und Sonne bereits ein Viertel des Strom-Endverbrauchs in Deutschland, die installierte Kapazität übersteigt etwas den Spitzenleistungsbedarf. Aufgrund der hohen Anlagenkosten können Power-to-Gas-Pfade aber erst wirtschaftlich werden, wenn Strom an einigen tausend Stunden im Jahr kostengünstig zur Verfügung steht. Dazu muss die installierte Kapazität Wind und Sonne in einem, durch Netzlimitationen begrenzten, Gebiet ein Mehrfaches des mittleren Leistungsbedarfs ausmachen. Schon heute gibt es windstarke Regionen in Küstennähe, in welchen bereits die Hälfte der erzeugbaren Energie vom Netzbetreiber aberegelt werden muss. Bei weiterhin engagiertem Ausbau der Wind und Sonne in den kommenden Jahrzehnten, wird sich der Effekt verstärken und ausbreiten. Um die Energie dann nutzen zu können, muss heute in die Entwicklung und Industrialisierung der Technologie investiert werden.

In Deutschland wird anhand zahlreicher Studien über die Rollen von Speichern und anderen Flexibilitätsoptionen im künftigen Energiesystem debattiert. Während einige Forscher Power-to-Gas erst jenseits von 80 % erneuerbarer Energie im Stromsystem als kostensenkend ansehen, heben andere die Bedeutung der bedarfsorientierten Rückverstromung bei mangelnder Einspeisung von Strom aus erneuerbaren Energien hervor. Wieder andere betonen, dass die durch Power-to-Gas mögliche sektorübergreifende Nutzung erneuerbarer Energie insbesondere in der Mobilität schon früher erheblich zum Klimaschutz und zur Luftreinhaltung beitragen würde.

Das Mengenpotenzial von Power-to-Gas wird je nach Ansatz sehr unterschiedlich eingeschätzt. Bei Vollversorgung des deutschen Strombedarfs mit erneuerbarer Energie, stünde, laut Sachverständigenrat für Umweltfragen, je nach Netzausbau und Erschließung von Pumpspeichern in Norwegen, ein inländischer Energiespeicherbedarf zwischen 0 und 250 TWh – der Hälfte des heutigen Endverbrauchs. 2030 könne noch die Hälfte der Überschüsse mit Stundenspeichern genutzt werden – 2050 nur noch ein Drittel. Nach einer Untersuchung mit sektorübergreifendem Ansatz des Forschungszentrums Jülich hingegen, ließen sich die Treibhausgasemissionen des deutschen PKW-Verkehrs durch Power-to-Hydrogen auf Basis von überschüssiger Windenergie von 100 Mio. t, bei gleicher Gesamtkilometerleistung, auf gut 18 Mio. t reduzieren. Dabei würden neben 28 Mio. PKW auch noch 2 Mio. leichte Nutzfahrzeuge und knapp 50.000 Busse versorgt.

Auch wenn es zuvor schon einzelne erfolgreiche H₂-Speicherprojekte gab – z. B. Phoebus am Forschungszentrum Jülich – ist Deutschland erst in den letzten drei Jahren in die intensive Erprobung von Power-to-Gas eingestiegen. Dabei geht es um vielfältige, projektspezifische Erkenntnisse. Die elektrische Leistung einiger Projekte hat die MW-Schwelle überschritten. Dies demonstriert die technische Reife der Technologie und ihre großtechnische Skalierbarkeit. Die folgende Karte zeigt die Verteilung von den über 30 Forschungs- und Pilot-Projekten in Deutschland. Mehr als 15 von ihnen speisen den erzeugten Wasserstoff entweder direkt oder nach einer zusätzlichen Methanisierung ins Erdgasnetz ein. Leere Symbole stehen für Projekte in Planung und Bau.

Projektbeispiele

Projekte mit Wasserstoffeinspeisung in das Erdgasnetz

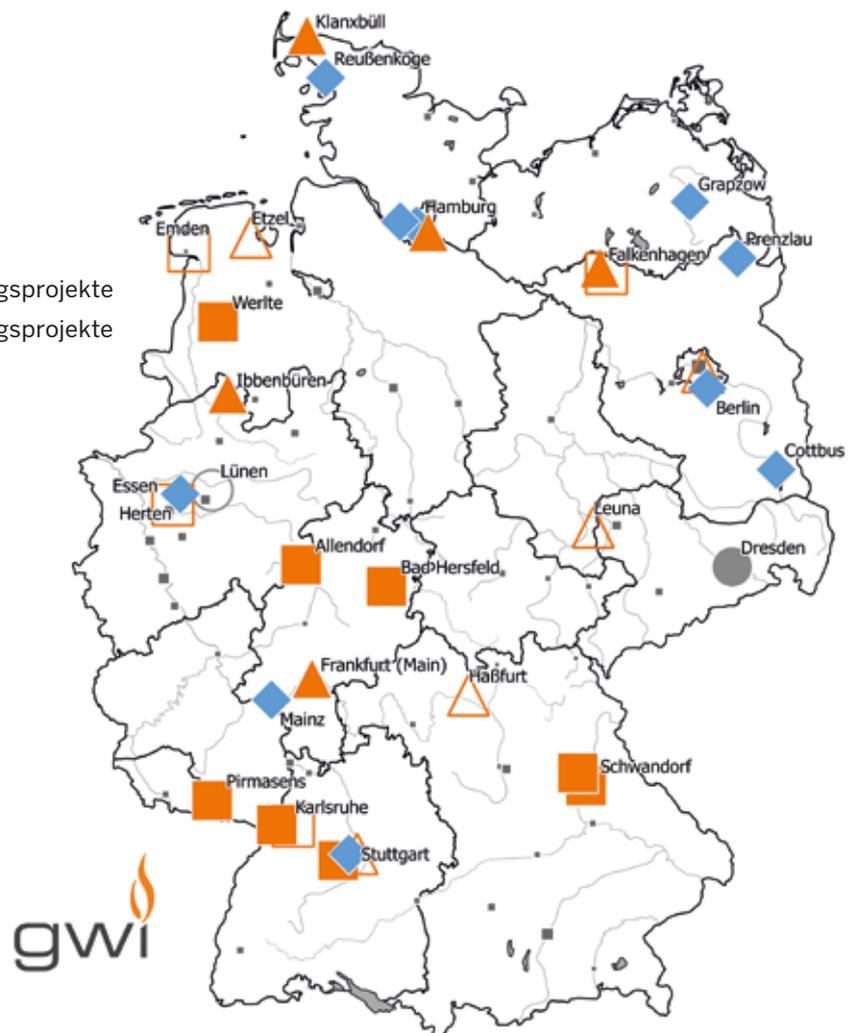
In **Falkenhagen**, Brandenburg, betreibt das Unternehmen Uniper Energy Storage (ehemals E.ON) in Kooperation mit dem Schweizer Partner Swissgas AG seit 2013 eine Power-to-Gas-Anlage, welche unter dem Einsatz eines alkalischen Elektrolyseurs von Hydrogenics mit einer Eingangsleistung von 2 MW_{el} etwa 360 m³/h Wasserstoff produziert. Dieser wird über eine 1,6 km lange Wasserstoffleitung in das Hochdruck-Erdgasnetz der ONTRAS Gastransport eingespeist und steht dort den Endkunden zu Verfügung. Vermarktet wird das Produkt unter der Bezeichnung „E.ON WindGas“ und hat ein Verhältnis von 90 % Erdgas und 10 % regenerativem Wasserstoff. Im ersten Betriebsjahr wurden bereits mehr als 2 Millionen kWh Wasserstoff eingespeist.

In **Hamburg-Reitbrook** betreibt Uniper Energy Storage seit September 2015 eine weitere Pilotanlage. Dabei kommt erstmals die Megawatt-PEM-Technologie von Hydrogenics zum Einsatz (Bild S. 5). Die Spitzenleistung beträgt 1,5 MW_{el} bei einer Wasserstoffherzeugung von 265 Nm³/h.

In **Klanxbüll**, Schleswig-Holstein, führte der Deutsche Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW) mit Partnern bis Mitte 2015 einen Feldversuch durch. In einem abgegrenzten örtlichen Verteilnetz mit etwa 128 Gaskunden, welches keine Erdgas-Tankstelle aufweist, wurde Wasserstoff in unterschiedlichen Konzentrationen bis hin zu 9,9 Vol.-% eingespeist. Die H₂-Verträglichkeit der angeschlossenen Gasendgeräte wurde bestätigt und es gab keine relevante Verschlechterung bei den Emissionen.

Power-to-Gas Projekte in Deutschland

- ▲ Wasserstoff-Einspeisung in Erdgasnetze
- △ Wasserstoff-Einspeisung in Erdgasnetze in Planung/Bau
- Methanisierungs- und Methan-Einspeisungsprojekte
- Methanisierungs- und Methan-Einspeisungsprojekte in Planung/Bau
- ◆ Andere Wasserstoff-Anwendungen
- Umwandlung in chemische Produkte
- Umwandlung in chemische Produkte in Planung/Bau



Im Mai 2014 ist auf dem Gelände der Mainova in **Frankfurt** am Main eine weitere PtG-Anlage in Betrieb gegangen. Bei dem eingesetzten Elektrolyseur handelt es sich um eine PEM-Elektrolyse des britischen Herstellers ITM Power mit einer elektrischen Eingangsleistung von 320 kW_{el}. Damit produziert die Anlage etwa 60 m³/h Wasserstoff, der in das kommunale Erdgas-Verteilnetz bei einem Druck von 3,5 bar eingespeist wird. Die Anlage stellt negative Regelleistung zur Verfügung, bei einem Überangebot im Stromnetz startet der Elektrolyseur und produziert Wasserstoff.

Eine weitere Demonstrationsanlage wird in **Ibbenbüren**, NRW, von der RWE betrieben. In dem PEM-Elektrolyseur geliefert von ITM Power (Titelbild) mit einer Eingangsleistung von 150 kW_{el} wird Wasserstoff produziert und ins öffentliche Gasnetz eingespeist, wobei die H₂-Konzentration unter 1 Vol.-% bleibt. Mit dem angereicherten Erdgas werden u. a. Blockheizkraftwerke betrieben, welche bei Bedarf den erzeugten Strom ins Stromnetz rückspeisen können. Die Wärme aus dem BHKW, sowie die Abwärme des Elektrolyseurs, werden zur Vorwärmung für die Erdgasentspannung bei der örtlichen Gasdruckregelanlage genutzt. Damit wird weltweit erstmalig in einer PtG-Anlage ein Energie-Nutzungsgrad von 86 %, gemessen am Brennwert, erreicht.

In **Essen**, ebenfalls NRW, wird 2017 eine weitere Demonstrationsanlage in Betrieb gehen. In einem Verbund aus sieben Forschungsinstituten, dem „Virtuellen Institut Strom zu Gas und Wärme“ soll eine kleinskalige Anlage, bestehend aus PEM-Elektrolyse, katalytischer Methanisierung, lokal begrenzter Gasnetz-Einspeisung und Nutzung in unterschiedlichen Gasanwendungstechnologien (Brennstoffzellen, Kraft-Wärme-Kopplung, Brennerthermen, etc.), in haushaltsüblicher Größe aufgebaut werden. Zielsetzung ist die Demonstration möglichst vieler unterschiedlicher Nutzungspfade für erneuerbare Gase, begleitet durch Untersuchungen zur Systemintegration.





Projekte mit Wasserstoffanwendungen

In acht Projekten wird Wasserstoff in Reinform verstromt oder der Mobilität zugeführt. Mit einer elektrischen Eingangsleistung von insgesamt 9 MW können hier stündlich 1.700 m³ Wasserstoff erzeugt werden. Eine Rückverstromung findet in **Grazpow**, **Herten** und **Prenzlau** statt. Dagegen werden in **Berlin**, **Freiburg**, **Hamburg**, **Mainz**, **Prenzlau** und **Stuttgart** H₂-Tankstellen beliefert, wobei in **Mainz** auch die Belieferung von Industriekunden, sowie die Einspeisung in das Erdgasnetz möglich sind.

In **Grazpow**, Mecklenburg-Vorpommern, dient der Wasserstoff bei Windflaute zur Versorgung eines 140-MW-Windparks mit Betriebsstrom (Bild o. l.).

Diesen liefert ein 250-kW_{el}-Verbrennungsmotor der Firma senergie. Der Elektrolyseur erzeugt bis zu 210 m³/h Wasserstoff bei einem auf den Heizwert bezogenen Wirkungsgrad von 61%. Der Wasserstoff wird für die Speicherung mit einem Wirkungsgrad von 93% auf bis zu 310 bar verdichtet. Obwohl der Zykluswirkungsgrad „nur“ 18% beträgt, ist der Betreiber vom Konzept überzeugt. Eine Gasnetzeinspeisung als Verwendungsalternative ist in Vorbereitung.

Das Energiekomplementärsystem in **Herten** enthält eine 150-kW-Elektrolyseanlage, die 30 m³/h Wasserstoff erzeugt. Technisch erlaubt sie die Vollversorgung des Büro- und Laborgebäudes (Titelbild) mit Strom und

Wasserstoff unter ausschließlicher Nutzung des Stroms einer lokalen Windenergieanlage. Der Wasserstoff wird bei Drücken bis 50 bar in einem Tank von 115 m³ Volumen gespeichert. Bei Windflaute können in einer PEM-Brennstoffzellenanlage 50 kW Strom erzeugt werden. **Grazpow** und **Herten** arbeiten mit alkalischen Druckelektrolyseuren von Hydrogenics und gingen 2013 in Testbetrieb.

Herten ist mit seinen Erzeugungs- und Lastsimulatoren (Bild o. r.) als offenes Testzentrum für externe Kunden konzipiert. Die Möglichkeit, Inselnetze zu simulieren, ist in Deutschland einzigartig. Es zeigte sich, dass die alkalische Elektrolyse auch den steilen Flanken der Windleistung gut folgen kann – mit gewissen Grenzen bei einer plötzlichen Abschaltung des Windrades.

Im Hybridkraftwerk **Prenzlau** wird Windenergie aus eigenen Anlagen, mittels eines drucklosen alkalischen 600-kW-Elektrolyseurs, geliefert und von McPhy in Wasserstoff umgewandelt. Dieser kann bei Bedarf in unterschiedlichen Gemischen mit Biogas in einem Blockheizkraftwerk verstromt werden, so dass insgesamt zuverlässig Grünstrom am Markt angeboten werden kann. Zudem kann der Wasserstoff an einer eigenen Tankstelle vertankt werden. Auch in **Reußenköge** wird Wasserstoff mit Biogas gemischt und verstromt. Hier ist ein PEM-Elektrolyseur von H-TEC Systems im Einsatz.



In **Berlin, Freiburg, Hamburg** und **Stuttgart** werden Tankstellen per Onsite-Elektrolyse versorgt. Die Kapazitäten betragen 100, 6, 180 respektive 60 Nm³/h. An den drei größeren Tankstellen können auch Nahverkehrsbusse betankt werden. Tankstellenbetreiber sind der Mineralölkonzern Total, das Fraunhofer ISE und die Energieversorger Vattenfall und EnBW.

Der Energiepark **Mainz** wurde im Juli 2015 in Betrieb genommen. Drei PEM-Elektrolyseure, geliefert von Siemens, mit je zwei Stacks und einer Spitzenleistung von 6 MW_{el} können 1.000 m³/h Wasserstoff erzeugen. Dieser wird in Hochdrucktanks gespeichert. Die Fotos zeigen eine der drei Elektrolyseeinheiten respektive die Wasserstoffspeicher mit der Elektrolysehalle im Hintergrund. Es ist eine Abfüllstation für 200-bar-Trailer vorhanden, um den Wasserstoff an Tankstellen oder an Industriekunden zu liefern. Er kann jedoch auch in das Erdgasnetz eingespeist werden. Die Beschaffung von Bussen mit Brennstoffzellenantrieb ist in Vorbereitung. In einem ersten Schritt wird eine Linie versorgt werden, die in der Nähe des Energieparks endet. Die Busse fahren auf dieser Linie täglich 200 km. Stromseitig dient die Anlage primär dazu, überschüssigen Windstrom zu nutzen. Zudem wird man Regelenergie anbieten.

Projekte mit Methanisierung

In mehreren Demonstratoren wird die Methanisierung des Wasserstoffs erprobt. Diese ermöglicht es, praktisch unbegrenzte Energiemengen in das weitverzweigte Erdgasnetz einzuspeisen und beliebig anzuwenden. Man unterscheidet die thermische und die biologische Methanisierung. Letztere sei in hohem Maß zeitlich flexibel. Zumeist wird CO₂ aus Biogasanlagen genutzt, da dieses bei der Reinigung des Roh-Biogases auf Gasnetzqualität ohnehin anfällt. Außerdem lässt sich die Abwärme der Methanisierung im Biogasreaktor nutzen.

In **Stuttgart** betreibt ETOGAS eine alkalische Elektrolyse mit 250 kW_{el} und eine thermische Methanisierung. Die Erfahrungen setzt der Fahrzeughersteller Audi in **Werlte** mit ETOGAS und weiteren Partnern im wirtschaftlich relevanten Maßstab um. Der Wasserstoff wird dort in drei drucklosen, alkalischen Elektrolyseuren von McPhy mit einer Leistung von je 2,1 MW erzeugt. Der Gesamtwirkungsgrad der Umsetzung bis zum Methan betrage 54 %. Die Abwärme wird im Biogasreaktor genutzt. Das Foto zeigt den Reformerturm (S. 8 u. I.), der hier weniger Platzbedarf hat als die Elektrolysehalle. Audi beliefert mit dem grünen Erdgas registrierte Kunden bilanziell über normale CNG-Tankstellen. Die Fahrzeuge sollen im Lebenszyklus weniger CO₂-Emission verursachen als Batteriefahrzeuge, da das emittierte CO₂ vorher gebunden wird. In beiden Fällen wird mit CO₂-frei erzeugtem Strom gerechnet.

In **Allendorf** wird seit März 2015 an einer Biogas-Anlage der Viessmann Gruppe eine 300 kW PEM-Elektrolyse von Schmack Carbotech als Systemintegrator und eine biologische Methanisierung von MicroEnergy betrieben. Die kompakte Elektrolyse – rechts im mittleren Bild – liefert 60 Kubikmeter Wasserstoff pro Stunde. Die Methanisierung nutzt CO₂ aus der Biogasanlage und findet im gezeigten Reaktor bei höheren Temperaturen statt. Die zum Reaktor gehörigen Container enthalten die Steuerung und die Hilfskomponenten (Bild u. r.).

Der Standort **Falkenhagen** wird im Rahmen des jüngst angelaufenen EU-Projekts Store&Go um eine thermische Methanisierung erweitert. Diese wird für eine Elektrolyseleistung von 1 MW_{el} ausgelegt und kann somit die Hälfte des am Standort erzeugbaren Wasserstoffs verarbeiten.

Projekte mit Erzeugung flüssiger Energieträger (PTL)

Die erste Power-to-Fuel-Anlage Deutschlands wurde 2015 von der sunfire GmbH in **Dresden** in Betrieb genommen. Die Anlage arbeitet mit einer selbst entwickelten Festoxid-Elektrolyse unter Druck, die auch bereits in geschlossenen Energiespeichersystemen auf Wasserstoffbasis im Einsatz ist. In Dresden wird hingegen ein Naphtha-ähnliches sogenanntes „blue crude“ hergestellt. Die Tageskapazität beträgt 160 Liter. (Bild S. 9 u. r.)

In **Lünen**, NRW, wird an einem Steinkohle-Kraftwerk der STEAG von der Mitsubishi Hitachi Power Systems Europe GmbH eine Power-to-Methanol-Anlage mit Inbetriebnahmeziel 2017 errichtet. Dabei kommen eine PEM-Elektrolyse von Hydrogenics mit einer Leistung von 1 MW_{el} und ein Methanol-Reformer von Carbon Recycling International zum Einsatz. Das CO₂ wird mit einer, von der Universität Duisburg-Essen entwickelten, Aminwäsche

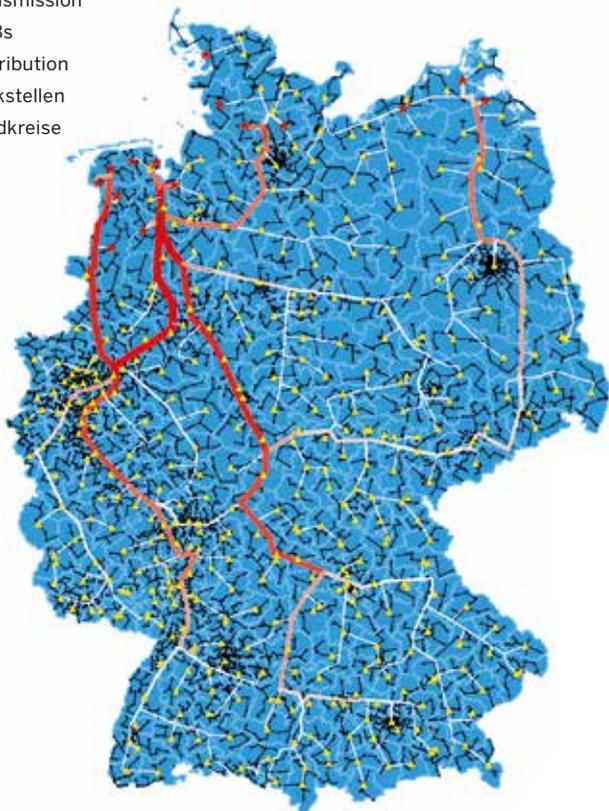


Ausblick

Insgesamt sind in Deutschland PtG-Anlagen mit einer Gesamtleistung von 21 MW in Betrieb. Mehr als zehn weitere Projekte sind im Bau. Davon wurden/werden einige besonders innovative Projekte öffentlich gefördert. Andere werden von Energieversorgern finanziert, die die Technologie unter realitätsnahen Einsatzbedingungen testen wollen.

Die in der Strategieplattform Power-to-Gas der Deutschen Energieagentur zusammengeschlossenen Unternehmen und Institutionen haben 2014 das Ziel verkündet, bis 2022 Anlagen mit einer Gesamtleistung von 1 GW zu errichten. Das Strategiepapier zum Nationalen Innovationsprogramm NIP2 schlägt für 2025 als Ziel 1,5 GW vor. Damit Power-to-Gas auf Basis erneuerbarer Energien einen Beitrag zur Emissionsminderung leisten kann, müssen aber noch Hürden abgebaut werden. Dazu gehören sowohl einige Letztverbraucherabgaben, als auch die grundsätzliche Bevorzugung des Übertragungsnetzausbaus gegenüber Speichern und anderen zeitlichen Flexibilitätsoptionen durch das aktuelle Marktdesign, das Netzlimitationen innerhalb der bestehenden Preiszonen nicht wiedergibt und eine Nutzung zunehmender, engpassbedingter Überschüsse nicht unterstützt.

- ★ Wasserstoffquellen
- Transmission
- ▲ HUBs
- Distribution
- Tankstellen
- Landkreise



Auch künftige Wasserstoff-Pipelinennetze, unter Einbeziehung von Großspeichern zur effizienten Versorgung des Straßenverkehrs mit Wasserstoff, sind bereits Gegenstand der Forschung in NRW und ergänzen die Erprobung der Power-to-Gas-Technologien. Das Bild zeigt eine Visualisierung aus dem Forschungszentrum Jülich. Erste Berechnungen liefern Kosten unterhalb der jährlichen Ausgaben Deutschlands für Mineralölimporte und bekräftigen, dass es sich lohnt, die Forschung zu vertiefen, sowie Fragen gesellschaftlicher und regulatorischer Art anzugehen.

Power-to-Gas-Kompetenz aus NRW

Der Kompetenzatlas des Netzwerks unter www.energieagentur.nrw/brennstoffzelle enthält zahlreiche Firmen und Institute.

Hervorzuheben sind besonders

Anlagenhersteller:

- Hydrogenics: PEM- und alkalische Elektrolyse
- ThyssenKrupp Uhde Chlorine Engineers: alkalische Elektrolyse
- Schmack Carbotech: Systemintegration
- I-gas: Gasanlagen, PEM-Elektrolyse

Energieversorger:

- Uniper, RWE/Westnetz, STEAG

Forschungseinrichtungen:

- Forschungszentrum Jülich IEK-3: PEM-Elektrolyse, SOFC/SOEC, alkalische Membran, Systemanalyse
- Gas- und Wärme-Institut Essen: Systemtest
- Zentrum für BrennstoffzellenTechnik ZBT: PEM-Elektrolyse, Komponenten
- Ruhr-Univ. Bochum: Membranen, Katalysatoren
- Max-Planck-Institut für Chemische Energiekonversion: Katalyse
- Westfälische Hochschule: PEM-Elektrolyse
- Virtuelles Institut "Strom zu Gas und Wärme": Systemfragen

Komponentenlieferanten:

- MeliCon: Stromverteiler für PEM-Elektrolyse
- Gräbener: Bipolarplatten, Umformmaschinen
- Membrasenz: Membran für die alkalische Elektrolyse.

Das Netzwerk Brennstoffzelle und Wasserstoff unterstützt alle auf dem Gebiet aktiven Unternehmen und Einrichtungen. Im Rahmen der Expertengruppen „Power-to-Gas“ und „H₂-System“ werden die technischen und die systemischen Aspekte intensiv diskutiert.

Referenzen und weiterführende Informationen

Zusätzliche Quellen sind über das Netzwerk erhältlich

Power-to-Gas in der Energiewende

J. Schaffert et al.: The influence of power-to-gas on natural gas quality & applications; International Gas Research Conference IGRC 2014, Copenhagen, paper TO5-2

Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., 133. Gasstatistik Deutschland Berichtsjahr 2011, ISBN 978-3-89554-194-0 (2013)

Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.; Gasspeicher in Deutschland – gesicherte Erdgasversorgung (2015)

Fraunhofer ISE; <https://energy-charts.de/energy.htm>

D. Fürstenwert et al.; Studie der Agora Energiewende : Stromspeicher in der Energiewende, 050/10-S-2014/DE, Berlin, 09/2014.

K. Görner, VGB PowerTech. 5/2015, 31–38 (2015)

K. Stolzenburg et al.: Integration von Wind-Wasserstoff-Systemen in das Energiesystem. Studie der Planet Gbr i.A. d.er NOW. 31.03.2014

Sachverständigenrat für Umweltfragen: Wege zur 100 % erneuerbaren Stromversorgung: Sondergutachten. Berlin, 2011. www.umweltrat.de

e-mobil BW, LBST: Die Rolle von Wasserstoff in der Energiewende (06//2015), <http://www.e-mobilbw.de/de/service/publikationen.html>.

D. Stolten et al; VDI-Tagung Innovative Fahrzeugantriebe, Dresden, 6.–7.11. 2012, ISBN 978-3-18-092183-9 (2012).

H. Barthels et al.; Internat. J. Hydrogen Energy. 23, 295-301 (1998)

DENA-Strategieplattform Power-to-Gas. www.powertogas.info

Projekte mit Einspeisung in das Erdgasnetz

www.eon-gas-storage.de/cps/rde/xchg/egs/hs.xsl/3310.htm

P. Nitschke-Kowsky et al. Energie-Wasser-Praxis 10/2015.

www.hzwei.info/blog/2014/06/05/thuega-nimmt-itm-elektrolyseur-in-betrieb/

www.vorweggehen.de/energieforschung/power-to-gas/

Projekte mit Wasserstoffnutzung

www.rh2-wka.de/

www.wasserstoffstadt-herten.de

www.enertrag.com/projektentwicklung/hybridkraftwerk.html

www.gp-joule.de/100-erneuerbar/stromlueckenfueller

www.energiepark-mainz.de/

Projekte mit Methanisierung

www.etogas.com/referenzen/

www.audi-mediacyber.com/de/pressemitteilungen/weltpremiere-audi-eroeffnet-power-to-gas-anlage-784

<http://www.viessmann.de/de/presse/aktuelles/Power-to-Gas.html>

<http://www.storeandgo.info/>

Projekte mit Erzeugung flüssiger Energieträger

www.sunfire.de

www.eu.mhps.com/de/pressemitteilungen.html?id=598#598 (20.01.15)

ThyssenKrupp AG; Presseinformation 10.01.2014

Ausblick

www.powertogas.info/roadmap/eckpunkte/

Impressum

EnergieAgentur.NRW GmbH
Roßstraße 92
40476 Düsseldorf

Telefon: 0211/837 1930
hotline@energieagentur.nrw
www.energieagentur.nrw

© EnergieAgentur.NRW GmbH/EA440

Gestaltung

www.designlevel2.de

Stand

06/2016

Ansprechpartner

Dr. Thomas Kattenstein
Leiter Netzwerk Brennstoffzelle und Wasserstoff NRW

kattenstein@energieagentur.nrw
www.energieagentur.nrw/brennstoffzelle

Redaktion

Dr. Michael Weber mit freundlicher Unterstützung von
Janina Senner und Dr. Johannes Schaffert (GWI)

Bildnachweis

Titel: H₂Herten GmbH
Seite 2 (links): Regionalverkehr Köln GmbH
Seite 3: h₂-netzwerk-ruhr e.V.
Seite 4: Gas- und Wärme-Institut Essen
Seite 5: Hydrogenics GmbH
Seite 6: WIND-Projekt GmbH, H₂Herten GmbH
Seite 7: Energiepark Mainz
Seite 8: Etogas GmbH/Audi AG, Viessmann Werke
Seite 9: sunfire GmbH, MHPSE GmbH
Seite 10: FZ-Jülich GmbH/Robinius

Die EnergieAgentur.NRW GmbH verwendet in ihren Veröffentlichungen allein aus Gründen der Lesbarkeit die männliche Form von Substantiven; diese impliziert jedoch stets auch die weibliche Form.

