



Wasserstoff – Schlüssel zur Energiewende

Beispiele aus Nordrhein-Westfalen von
der Herstellung bis zur Nutzung

Inhalt

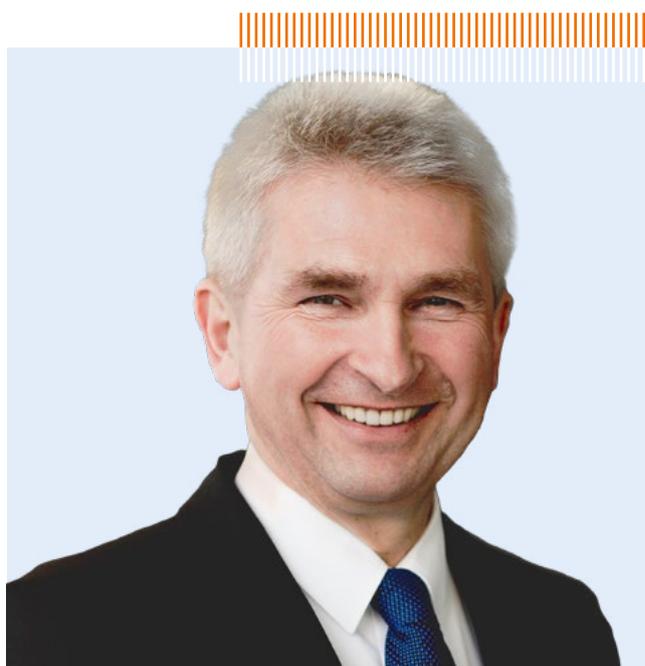
Vorwort (Prof. Dr. Andreas Pinkwart)	5
Vorwort (Dr. Thomas Kattenstein)	6
H₂-Eigenschaften auf einen Blick	8
Die neue Rolle von Wasserstoff in einer künftigen Energieversorgung	10
Wasserstoff als Sektorenkopplungsoption im Energiesystem der Zukunft	13
Potenziale der Einspeisung von Wasserstoff ins Erdgasnetz	17
Wasserstoffherstellung	19
Erdgasreformierung	20
Elektrolyse von Wasser	21
Wasserstoffpotenzial aus industrieller Erzeugung in NRW	25
Alternative Verfahren zur Wasserstofferzeugung	27
Power-to-X/Power-to-Gas Projekte in NRW	30
Wasserstofflogistik	33
Wasserstoffspeicherung	34
Flüssiggasspeicher	38
Feststoffspeicher	39
Flüssige organische Wasserstoffträger (LOHC)	42
Speicherung von Wasserstoff im geologischen Untergrund	43
Brennstoffzellen	44
Brennstoffzellen-Übersicht	45
PEM-Entwicklungen	47
Mobile Anwendungen	49
Wasserstoff tanken	58
Stationäre Anwendungen	64
Wasserstoff- und Brennstoffzellenland Nordrhein-Westfalen	69
Netzwerk Brennstoffzelle und Wasserstoff, Elektromobilität	70
Cluster EnergieForschung.NRW (CEF.NRW)	72
EnergieAgentur.NRW	73
Der Deutsche Wasserstoff Congress	74
Regionale Aktivitäten	75
Internationale Aktivitäten	79
Abkürzungs- und Literaturverzeichnis	81

Vorwort

Wasserstoff – das ist weit mehr als nur der Stoff, aus dem Wasser besteht. Mitte des 18. Jahrhunderts entdeckte der britische Naturwissenschaftler Henry Cavendish ein bis dato unbekanntes Gas, als er mit Quecksilber und Säuren experimentierte. Was wir heute als Wasserstoff bezeichnen, nannte Henry Cavendish damals noch „brennbare Luft“. Wer sich an die Knallgas-Experimente im Chemieunterricht zurückerinnert, wird gut nachvollziehen können, warum der Brite diesen Begriff wählte. Auch aus heutiger Sicht wäre „brennbare Luft“ kein schlechter Name für das kleinste aller Elemente. Denn in einer Zeit, wo wir mit Hochdruck an einer emissionsarmen und klimaverträglichen Energieversorgung arbeiten, kann Wasserstoff zum Schlüssel für die Energiewende werden.

Zu den großen Vorteilen von Wasserstoff gehört, dass er als Multitalent in allen Sektoren eingesetzt werden kann. Stationäre KWK-Brennstoffzellen können gleichzeitig Wärme und Strom liefern. Im Verkehrsbereich kann Wasserstoff zu einer emissionsarmen Mobilität beitragen und auch im Industriesektor ist er ein wichtiger Ausgangsstoff, etwa bei der Düngemittelproduktion.

Für das Energiesystem der Zukunft spielt Wasserstoff daher eine entscheidende Rolle. Die Stromerzeugung durch Windkraft und Photovoltaik nimmt immer mehr zu. Gleichzeitig haben wir aber keinen Einfluss darauf, wann und wie stark der Wind weht oder ob die Sonne den ganzen Tag lang scheint. Daher braucht es in einem solchen Energiesystem eine große Anzahl an Energiespeichern ganz unterschiedlicher Art. Batterie- und Pumpspeicher können zwar Energie über mehrere Stunden speichern. Allerdings reichen die Kapazitäten hier nicht aus, um auch größere Energiemengen über längere Zeiträume hinweg bereit zu halten. An genau dieser Stelle kommt der Wasserstoff ins Spiel: Power-to-Gas Anlagen können flexibel auf



die schwankende Erzeugung von Wind- und Sonnenstrom reagieren, indem sie Wasser in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff zerlegen. Auf Wasserstoff aufbauende synthetische Energieträger oder Wasserstoff in Reinform können so langfristig gespeichert werden und in verschiedenen Sektoren, wie dem Industrie- oder Verkehrssektor, zum Einsatz kommen. Außerdem können bereits bestehende Infrastrukturen, wie Gasleitungen oder Kavernenspeicher, genutzt werden.

Neben seinen Speichermöglichkeiten für die Energiewende ist Wasserstoff von großer Bedeutung für einen nachhaltigen und emissionsarmen Verkehr mit Brennstoffzellenfahrzeugen. Brennstoffzellen sind gegenüber herkömmlichen Verbrennungsantrieben erheblich effizienter und ermöglichen eine Mobilität ohne gesundheitsschädliche Emissionen – aus dem Auspuff blubbert lediglich heißer Wasserdampf. Brennstoffzellenfahrzeuge haben Reichweiten von mehreren hundert Kilometern und lassen sich in weniger als fünf Minuten auftanken. Eine attraktive Lösung, die auch in der Unternehmenswelt mehr und mehr Anklang findet.

Die Wasserstoffbranche ist aktiv und arbeitet mit großem Engagement an innovativen Lösungen für eine nachhaltige Zukunft. Die vorliegende Broschüre soll Ihnen einen kleinen Einblick in die Aktivitäten hier in Nordrhein-Westfalen geben. Darüber hinaus erfahren Sie auch etwas über ausgewählte Projekte außerhalb unseres Bundeslandes. Ich wünsche Ihnen eine spannende und erkenntnisreiche Lektüre!

Prof. Dr. Andreas Pinkwart

Minister für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie
des Landes Nordrhein-Westfalen

Vorwort

Neue Technologien für Energie und Verkehr, die Fortschritte bei Effizienz und Emissionsreduktion bieten, müssen oft gegen einen etablierten Stand der Technik antreten. Häufig erfordern sie erst einmal höhere Investitionen und Betriebskosten sowie zum Teil auch die Errichtung neuer Infrastrukturen. Wenn die Vorteile langfristig die Nachteile überwiegen, ist es eine gesellschaftliche Aufgabe, solchen Technologien durch geeignete Förderung, Informationsaustausch und Beratung den Weg in den Markt zu ebnen. Der Austausch zwischen Forschern, Entwicklern, Herstellern, Fördermittelgebern, potenziellen Investoren und Erstanwendern fördert die Entstehung von Allianzen, und hilft Potenziale zu diskutieren, Markteintrittsstrategien zu entwickeln und durch sachliche Auseinandersetzung sowohl erfolgversprechende Ansätze als auch Fehlentwicklungen aufzuzeigen.

Das Netzwerk Brennstoffzelle und Wasserstoff, Elektromobilität der Energie-Agentur.NRW fördert genau diesen Austausch. Es bringt erfahrene und neue Akteure auf dem Gebiet der Brennstoffzellen- und Wasserstofftechnik sowie Elektromobilität zusammen, um gemeinsam deren Entwicklung und Markteinführung voranzutreiben. Ziele sind die Etablierung eines entsprechenden Wirtschaftszweigs sowie die Unterstützung des Emissions- und Klimaschutzes in Zeiten der Energie- und Verkehrswende.

Schwerpunkte der aktuellen Aktivitäten sind die Untersuchung des möglichen Beitrags des Energiespeichers Wasserstoff zum Ausbau der erneuerbaren Energien, d. h. die Wasserstoffproduktion über Elektrolyseprozesse, die dezentrale und zentrale Speicherung des Wasserstoffs sowie die anschließenden Nutzungsoptionen. Hier stehen die Rückverstromung bspw. in Brennstoffzellen, die stoffliche Nutzung in der (petro)chemischen und Stahlindustrie, die direkte Einspeise-



möglichkeit in das Erdgasnetz sowie Umwandlung des Wasserstoffs in synthetische Energieträger zur Auswahl. Besonders interessant scheint aber die Nutzung von Wasserstoff als innovativer Kraftstoff im Verkehr in Verbindung mit Fahrzeugen auf Brennstoffzellenbasis (Pkw, Nutzfahrzeuge, Busse, Lkw, Züge, Schiffe) zu sein. Hier könnten besonders hohe Beiträge zum Klima- und Umweltschutz erzielt werden.

Wichtige Zielsetzung in allen Bereichen ist es, durch die Akquisition weiterer Anwender die Stückzahlen marktreifer Systeme zu vergrößern und damit zu einer Reduktion der Kosten zu kommen. Parallel ist es notwendig, weitere Forschung, Entwicklung und Demonstration zu betreiben, um die Technik zu verbessern, Zuverlässigkeit und Standzeiten zu erhöhen und auch auf diese Weise die Kosten zu verringern. Das Netzwerk Brennstoffzelle und Wasserstoff, Elektromobilität wird seine Mitglieder dabei auch in Zukunft durch die verschiedenen Serviceleistungen umfassend unterstützen.

Im Rahmen dieser Broschüre werden die aktuellen Entwicklungen der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie in den verschiedenen Anwendungen über den gesamten Innovationsprozess von der Forschung bis zum Markt dargestellt. Entwicklungen und Beispiele aus NRW stehen hierbei im Vordergrund, werden aber durch nationale Vorzeigeprojekte ergänzt. Wir danken an dieser Stelle den zahlreichen Co-Autoren für ihre Beiträge und wünschen Ihnen als Lesern eine spannende Lektüre.

Dr. Thomas Kattenstein

Leiter des Netzwerks Brennstoffzelle und Wasserstoff, Elektromobilität
des Landes Nordrhein-Westfalen

H₂-Eigenschaften auf einen Blick

Wasserstoff ist das leichteste aller Gase mit einer Dichte von 0,0899 Kilogramm pro Normkubikmeter (unter Standardbedingungen). Wasserstoff wurde 1766 von H. Cavendish entdeckt. Nach J. Dalton (1808) wurde die Masse des Wasserstoffatoms (gültig bis 1899) als Grundlage des Systems der chemischen Atomgewichte gewählt. Mit der Ordnungszahl 1 steht das Wasserstoffatom an erster Stelle im Periodensystem. Die Erdatmosphäre enthält nur Spuren von Wasserstoff; dagegen ist Wasserstoff in gebundenem Zustand als Wasser und in organischen Verbindungen weit verbreitet: Wasserstoff macht etwa 1 % der Erdkruste aus. Der Siedepunkt von Wasserstoff liegt bei -253 °C.

Wasserstoff hat im Vergleich zu anderen Energieträgern die höchste massenspezifische, aber gleichzeitig auch die geringste volumenspezifische Energiedichte, die je nach Anwendungsfall unterschiedliche Auswirkungen auf die Wahl der geeigneten Speicherart hat.

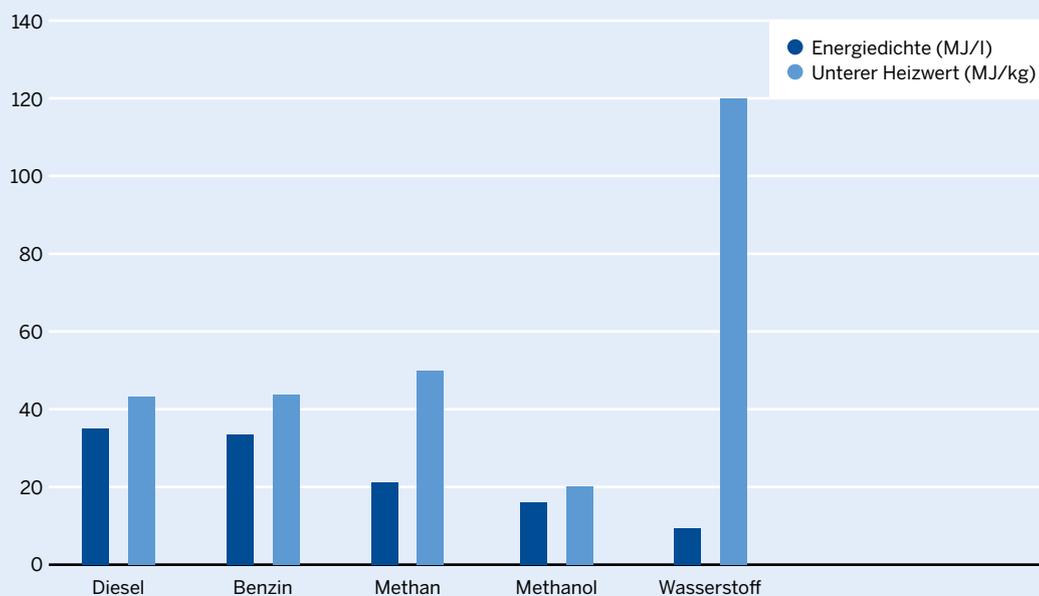
Wasserstoff zeichnet sich durch folgende Eigenschaften aus:

- nicht giftig und ätzend,
- nicht radioaktiv,
- nicht Wasser gefährdend,
- nicht Krebs erzeugend,
- leichter als Luft und
- schnell mit Luft verdünnend.

Darüber hinaus gilt es einige Sicherheitsaspekte zu beachten:

- bei der Verbrennung nicht sichtbar,
- mit weiten Zündgrenzen in Luft und bei niedriger Zündenergie leicht entzündbar,
- hohe Verbrennungsgeschwindigkeit und
- Tendenz, Materialprobleme (Versprödung, Tieftemperatur) zu verursachen.

Kraftstoffe bei Standardbedingungen ohne Speicher



Kenngrößen		Wasserstoff	Methan	Benzin	Methanol
Unterer Heizwert	kWh/kg	33	13,9	12	5,5
	MJ/kg	120	50	43	20
Dichte (15 °C, 1 bar)	kg/m ³	0,09	0,72	748	791
Zündgrenzen in Luft	Vol.-%	4 - 75	5 - 15	1 - 8	6 - 44
Minimale Zündenergie (= 1)	mWs	0,02	0,29	0,24	0,14
Verbrennungsgeschwindigkeit in Luft (= 1)	cm/s	265	43	40	48
Diffusionskoeffizient in Luft	cm ² /s	0,61	0,16	0,05	0,12
Toxizität		ungiftig	ungiftig	Benzol TRK** 1 ppm	MAK* 200 ppm
Spez. CO₂-Emissionen	g/MJ	0	58	74	69

Dabei gilt:

- Der Energieinhalt (Heizwert) von 1 Normkubikmeter Wasserstoff entspricht 0,34 l Benzin
- Der Energieinhalt (Heizwert) von 1 l flüssigen Wasserstoff entspricht 0,27 l Benzin
- Der Energieinhalt (Heizwert) von 1 Kilogramm Wasserstoff entspricht 3,75 l Benzin
- Der Energieinhalt (Heizwert) von 1 l Benzin entspricht 32,3 MJ

Die Nutzung von Wasserstoff für Energieumwandlungssysteme setzt die Lösung sicherheitstechnischer Aufgaben voraus:

- Maßnahmen für Transport und Speicherung,
- Maßnahmen bei Integration in Beförderungsmitteln (z. B. in Fahrzeugen),
- Maßnahmen für Gesundheit und Umwelt und
- Maßnahmen für Handhabung (Herstellung, Anlieferung und Tanken).

Die technischen Konzepte hierzu liegen ebenso vor, wie zahlreiche Vorschriften und technische Regeln (UVV, ExRL, ElexV, VDI, VDE, DIN, DVGW, VdTÜV, insbesondere Druckbehälterverordnung, technische Regeln für Druckgase, Druckbehälter und Rohrleitungen, BImSch-Gesetz, Gefahrstoffverordnung und Gerätesicherungsgesetz). Sie werden bei schrittweiser Einführung von Wasserstoff in den Energiemarkt technisch und gesetzgeberisch umgesetzt.

flexibler, brennstoffbasierter Stromerzeuger, die den inflexiblen Strombedarf zu Zeiten eines schwachen erneuerbaren Angebots sicher und ausdauernd bedienen.

Beide Typen von Wandlern, deren Einsatz sich zunehmend an Strommarktsituationen orientieren wird, müssen, wo es wirtschaftlich ist, auch ihre Abwärme nutzbar machen. Residuale Wärmebedarfe müssen dann weiter sicher versorgt werden – sei es mit Wärmepumpen, wo hohe Stromkennzahlen realisierbar sind, mit Biomasse oder Umweltwärme oder auch mit gasbasierten Geräten dort, wo die Nutzung der vorgenannten Optionen zu aufwändig ist. Strom führt, Wärme und Kälte folgen, Speicher assistieren und Gas muss zunehmend erneuerbar bereitgestellt werden.

Insgesamt werden energieintensive Produkte und Geschäftsmodelle, die auf stets verfügbarer fossiler Energie gediehen sind, Marktanteile an Materialien, Prozesse und Lösungen abgeben müssen, die deutlich weniger Emissionen verursachen. Damit zukunftsfähige Technologien und Geschäftsmodelle aber zuerst im eigenen Wirtschaftsraum Gestalt annehmen, müssen geeignete Randbedingungen gesetzt werden. Vielfach wird in diesem Zusammenhang gefordert, ein Level-Playing-Field zu schaffen, das der tatsächlichen emissionsmindernden Wirkung einer jeden Technologie Rechnung trägt, woraufhin diese Technologien dann jeweils die Nischen besetzen, für die sie am besten geeignet sind. Diese Bedingungen definieren den Markt. Je verlässlicher sie sind, umso eher erfolgen Investitionen. Quoten und abschmelzende Markteinführungshilfen können darüber hinaus für den Ansturm der Industrialisierung neuer Energienutzungspfade erforderlich sein.

Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien werden in einem solchen von Wind und Sonne dominierten Umfeld, das in gemäßigten Breiten von starken Schwankungen des Angebots geprägt ist, wesentliche Beiträge leisten. Zu Zeiten reichlichen Stromangebots wird mittels Elektrolyse Wasser gespalten und die Energie dabei größtenteils im erzeugten Wasserstoff gespeichert, und dieser kann dann je nach lokalen Gegebenheiten vielfältig verwendet werden:

Über das Gasnetz kann er allen typischen Gasanwendungen zugeführt werden und fossiles Gas ersetzen – sei es nach Einspeisung als reiner Wasserstoff in begrenzter Menge oder nach einer Methanisierung unter Einbindung von Kohlendioxid in unbegrenzter Menge.

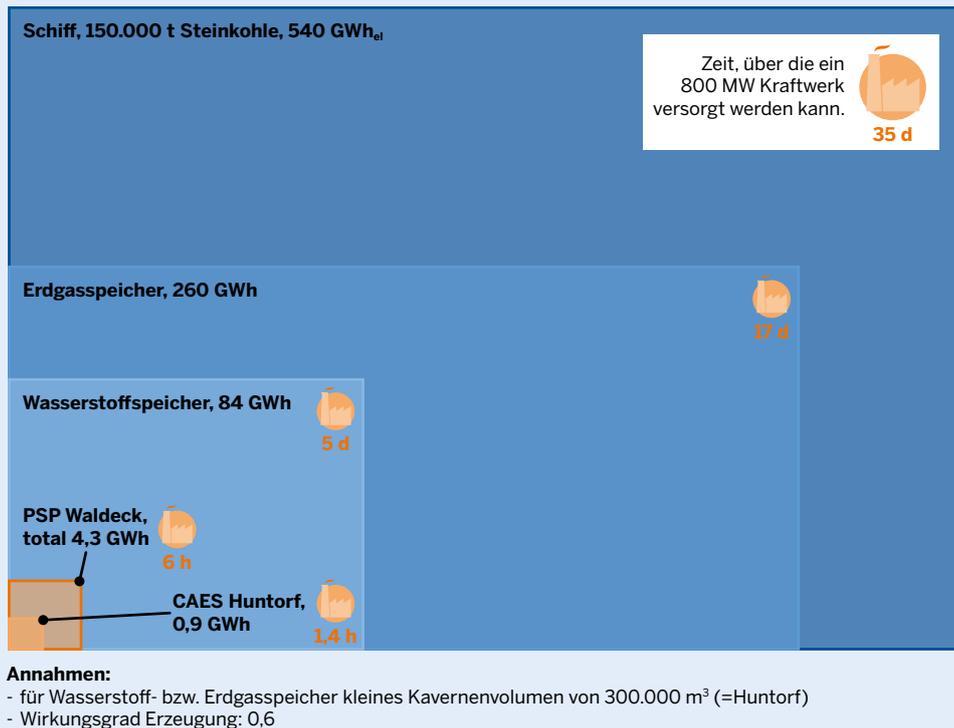
Er kann in Reinform in der Industrie und in Raffinerien Wasserstoff ersetzen, der bisher verlustbehaftet aus fossilen Rohstoffen gewonnen wird, er kann mit unvermeidlich anfallendem CO₂ zur Herstellung von Treib- oder Grundstoffen genutzt werden, und er kann als Reduktionsmittel oder Energiequelle neue industrielle Anwendungen erobern.

Wasserstoff kann in vielfältiger Form bei hoher Energiedichte risikoarm gespeichert und transportiert werden: physikalisch gelöst, chemisch gebunden, tiefkalt und flüssig oder unter Druck. Komprimierter Wasserstoff lässt sich in großen Mengen in Salzkavernen oder Großrohrsystemen speichern und effizient in Rohrleitungen oder flexibel in Trailern transportieren. Dabei fassen die größten Druckgastrailer inzwischen über eine Tonne Wasserstoff und in Trägermedien oder in flüssiger Form sind noch höhere Mengen möglich. Auch nicht mehr benötigte Erdgasleitungen sind unter Umständen geeignet. Die Handhabung gasförmigen Wasserstoffs ist außerhalb von Gebäuden weniger gefährlich als die von Erdgas. Aber auch innerhalb von Gebäuden wird Wasserstoff seit Jahrzehnten sicher beherrscht.

Schließlich kann Wasserstoff in Reinform als Energieträger für die Stromerzeugung und vor allem als Kraftstoff für Brennstoffzellenfahrzeuge eingesetzt werden. Hier hat er durch die Verdrängung kohlenstoffreicher Flüssigkraftstoffe und wenig effizienter emissionsbehafteter Verbrennungsmotoren nicht nur ein hohes Klimaschutz- und Emissionsminderungspotenzial, sondern er trifft auch auf die höchste Zahlungsbereitschaft. Er bietet gewohnte Flexibilität, kurze Betankungszeiten und hohe Reichweiten. Erste Serien-Pkw sind bereits auf dem Markt, einige Hersteller bieten schon Triebwagenzüge, Stadtbusse, städtische Nutzfahrzeuge und leichte Lieferfahrzeuge an. Demonstratoren für schwere Lkw, Schiffe und Kurzstreckenflugzeuge sind erfolgreich im Einsatz oder Aufbau.

Mobilität mit Wasserstoff aus erneuerbaren Energien ist so wichtig für den Klimaschutz, dass in der Aufbauphase, wo Verfügbarkeit zählt, auch Quellen genutzt werden dürfen, deren Beitrag zum Klimaschutz geringer ist. So führen Nebenproduktwasserstoff und Wasserstoff aus Erdgas ebenfalls auf den richtigen Weg. Die Hälfte des heute öffentlich getankten Wasserstoffs kommt aber schon aus erneuerbaren Quellen.

Speicher für große Energiemengen



Quelle: Uniper

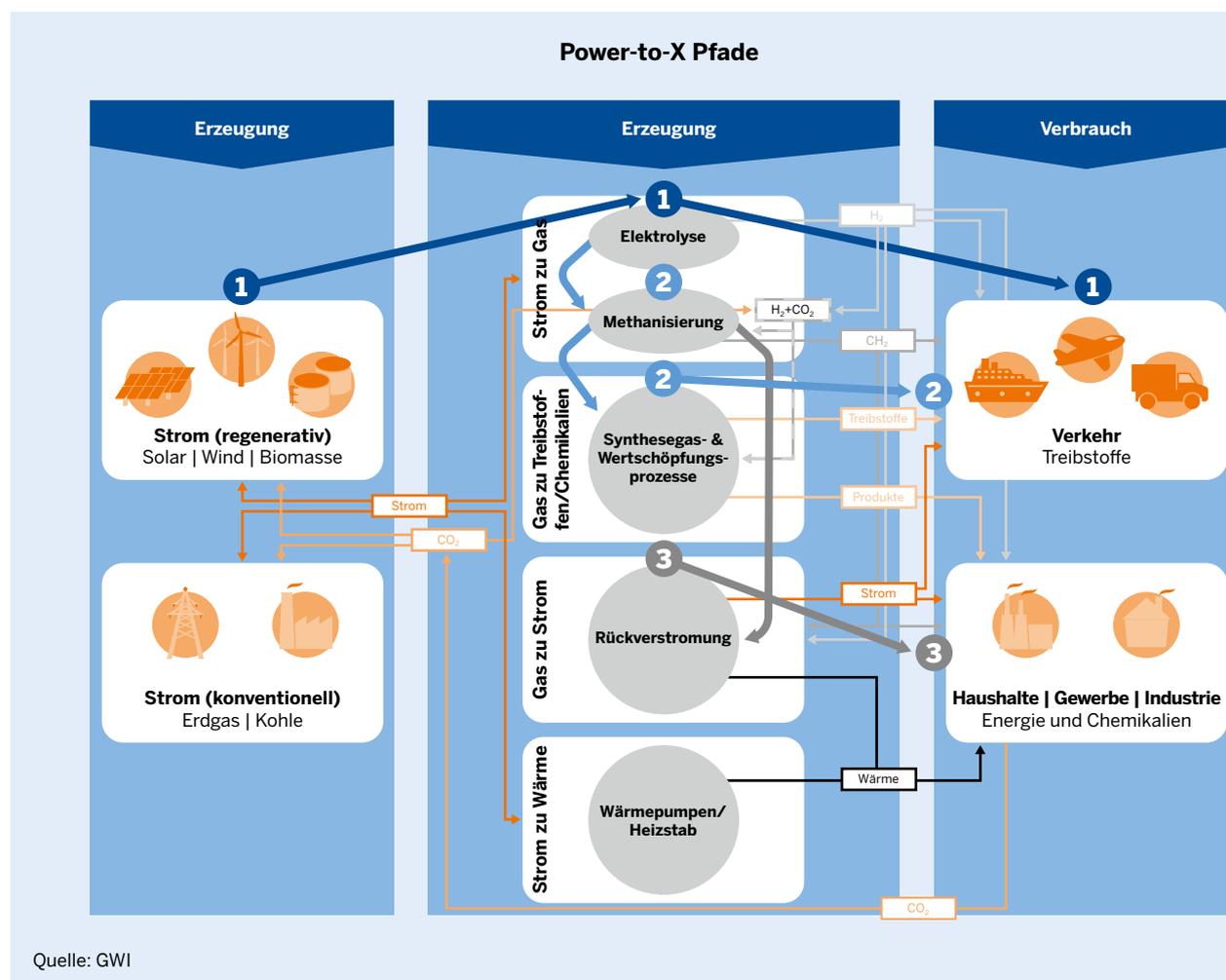
Der Aufbau von Wasserstoff-Infrastrukturen ist allerdings eine Aufgabe, die nur im Zusammenspiel ausdauernder Partner bewältigt werden kann. Die Umstellung von Flotten auf neue Antriebe erfordert Mut und strategisches Vorgehen – umso mehr, wo die Versorgung erst bei einer höheren Fahrzeugzahl erschwinglich wird. Der wirtschaftliche riskante Aufbau von Tankstellen für die individuelle Mobilität, die einige Jahre auf eine wirtschaftliche Auslastung warten müssen, hat in Deutschland 2016/17 unter Führung der H₂ Mobility Deutschland GmbH an Fahrt aufgenommen. Der Aufbau effizienter Versorgungssysteme mit Großspeichern und Rohrleitungen ist ohne staatliche Zielvorgaben wirtschaftlich noch riskanter – selbst wenn man für manche geeigneten Gasleitungen nach der L-Gas/H-Gas-Umstellung heute schon vorsichtig an Wasserstoff denkt. Investitionen für Generationen brauchen daher politische und öffentliche Unterstützung. Es wird sich aber langfristig auszahlen, denn große Energiemengen lassen sich gasförmig verlustärmer, mit geringerem Platzbedarf und kostengünstiger transportieren als in Form elektrischen Stroms.

Schließlich müssen auch Brennstoffzellen für die Stromversorgung erwähnt werden: Brennstoffzellen arbeiten leise und schadstofffrei bei Wirkungsgraden bis 60 % für Strom und Energienutzungsgraden (Mitnutzung der Wärme) bis 90 %. Der auch bei kleiner Leistung hohe Wirkungsgrad prädestiniert sie für dezentrale Versorgungsaufgaben. Kleinste Einheiten versorgen portable Kommunikations- und Messgeräte. Mikro-KWK-Anlagen auf Gasbasis (Erdgas/Biogase) im kW-Maßstab versorgen Eigenheime und Kleinbetriebe, etwas größere versorgen Funkstationen, noch größere bis in den MW-Bereich dienen wieder der KWK für Großgebäude und Industrie oder gewährleisten wartungsarm eine unterbrechungsfreie Stromversorgung. Die sauerstoffarme Abluft aus Brennstoffzellen kann zusätzlich für den Brandschutz in Lagern und Datenzentren genutzt werden.

Die folgenden Kapitel unserer Co-Autoren sollen die verschiedenen Aspekte der energetischen Nutzung von Wasserstoff näher beleuchten.

Wasserstoff als Sektorkopplungsoption im Energiesystem der Zukunft

Wie oben erwähnt, ist die Sektorkopplung einer der wichtigsten Bausteine zur Dekarbonisierung bei gleichzeitiger Flexibilisierung der Energienutzung. Dabei ist einer der wesentlichsten Pfade zur energietechnischen und energiewirtschaftlichen Verknüpfung für die benötigte Sektorkopplung der Power-to-X Pfad. Eine Zusammenfassung heute diskutierter Möglichkeiten des sektorenübergreifenden Power-to-X Konzepts zeigt die Abbildung.



Neben beispielsweise der Nutzung des regenerativ erzeugten Stroms im Wärmebereich ist insbesondere auch die Nutzung des Stroms zur Erzeugung von Wasserstoff mithilfe der Wasserelektrolyse eine vielversprechende Sektorenkopplungsoption.

Aktuell wird im Rahmen der Energiewende eine Reihe von Nutzungsalternativen für den so erzeugten Wasserstoff diskutiert, darunter ⁽¹⁾:

- Rückverstromung zum Ausgleich fluktuierender Einspeisung aus erneuerbaren Energien,
- Nutzung zur Erzeugung von flüssigen Kraftstoffen,
- Nutzung als Kraftstoff für Fahrzeuge (Pkw, Busse und Lkw) und Züge mit hocheffizienten Brennstoffzellenantrieben (FCEV),
- Produktion von chemischen Stoffen wie Ammoniak,
- direkte Wasserstoffeinspeisung ins vorhandene Erdgasnetz und
- Methanisierung zur nachfolgenden Einspeisung ins vorhandene Erdgasnetz.

Kennzeichnend für die dritte Nutzungsoption ist, dass die Emissionsvorteile erneuerbarer elektrischer Stromerzeugung auf den Transportsektor ausgeweitet werden. Im Vergleich zu Erdgasanwendungen werden dabei zum einen Energieträger mit höheren spezifischen THG-Emissionen ersetzt. Zum anderen kann eine etwa um den Faktor zwei verbesserte Energienutzung durch den Einsatz der Brennstoffzellentechnik in Fahrzeugantrieben erzielt werden.

Status und Ziel der Sektorenkopplung

In der unteren Tabelle ist der aktuelle sektorale Energieverbrauch und der Anteil der fossilen Energieträger aufgelistet. Wird die Sektorenkopplung verstärkt eingesetzt, ergeben sich zwei Effekte. Erstens wird der Energieverbrauch aufgrund der neuen Pfade sektoral steigen, welche den EE-Strom direkt oder indirekt verwenden, wobei dies grundsätzlich nicht negativ zu werten ist. Die Effizienz der einzelnen Pfade ist nicht mehr das alleinige Kriterium für die Sektorenkopplung. Einzelne Pfade, welche ineffizient sind, können trotzdem für das Gesamtsystem notwendig und wichtig sein, da sie beispielsweise den anfallenden Peak-Strom der EE, der anderweitig nicht genutzt werden kann, verwenden können. Durch die Nutzung dieses EE-Stroms wird sich somit dann zweitens der Anteil fossiler Energieträger in den einzelnen Sektoren deutlich reduzieren ⁽²⁾.

Sektoraler Energieverbrauch und Anteile fossiler Energieträger im Jahr 2015 ⁽³⁾

Sektoren	Sektoraler Energieverbrauch	Anteil fossiler Energieträger*
Industrie	716 TWh	53 %
Verkehr	728 TWh	94 %
Haushalte	636 TWh	59 %
Gewerbe, Handel, Dienstleistungen	387 TWh	50 %
Stromerzeugung	1.385 TWh	61 %

* Anmerkung: Direkter Einsatz

Dabei liegen nun erstmals neben den sektorenübergreifenden Zielen der Bundesregierung, wie beispielsweise der CO₂-Reduktion bis zum Jahr 2050 um 80 bzw. 95 % gegenüber 1990 auch sektorenspezifische Ziele, die im Klimaschutzplan der Bundesregierung verankert sind, vor. Insbesondere der Verkehr hat mit einer vergleichsweise sehr geringen CO₂-Minderung von 1990 bis 2014 von 1,2 % einen erheblichen Wandel zu vollziehen, um die Minderungsziele von 40 bis 42 % bis zum Jahr 2030 zu erreichen, wie die folgende Tabelle zeigt.

Sektorenspezifische CO₂-Reduktionsziele bis zum Jahr 2030

Sektor	1990 tCO ₂ eq	2014 tCO ₂ eq	2014 vs. 1990	Ziel 2030 tCO ₂ eq	Ziel 2030 vs. 1990
Energie-wirtschaft	466	358	- 23,2 %	175 - 183	62 – 61 %
Gebäude	209	119	- 43,1 %	70 - 72	67 – 66 %
Verkehr	162	160	- 1,2 %	95 - 98	42 – 40 %
Industrie	283	181	- 36 %	140 - 143	51 – 49 %
Landwirt-schaft	88	72	- 18,2 %	58 - 61	34 – 31 %
Sonstige	39	12	- 69 %	5	87 %
Summe	1248	902	- 27,7 %	543 - 562	56 – 55 %

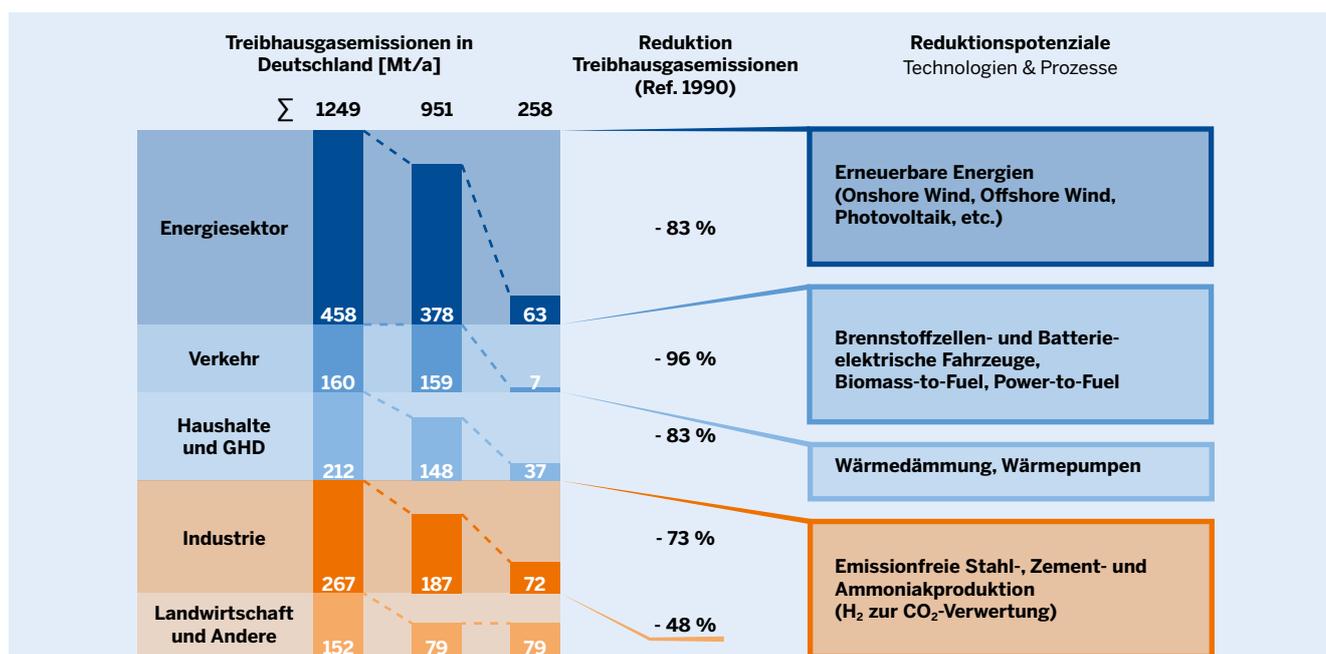
Potenzieller Beitrag von Wasserstoff für die CO₂-Bilanz des Zieljahres 2050

Die Abbildung unten zeigt, dass Wasserstoff einen wesentlichen Beitrag zur CO₂-Reduktion für das Jahr 2050 liefern kann. Beispielsweise gibt es mehrere Möglichkeiten, wie regenerativer Strom in den Stahlproduktionsprozess integriert werden könnte, zum Beispiel durch Techniken wie Gichtgas-Rezirkulierung, Hochöfen mit CO₂-Abscheidung, einen höheren Anteil an Elektro-Lichtbogenöfen sowie die Verwendung von Wasserstoff als Reduktionsmittel. Es konnte gezeigt werden, dass diese Prozesse zu größerer und schließlich völliger Unabhängigkeit von Kohle führen könnten. Dies eröffnet die Möglichkeit, der Stahlindustrie Strom und Wärme durch Kopplung mit regenerativer Stromerzeugung (Sektorenkopplung) zur Verfügung zu stellen. Eine Analyse für Deutschland zeigte, dass mit diesen Technologien CO₂-Emissionen gegenüber den Werten von 1990 um 47 - 95 % gesenkt werden können und durch Integration von 12 - 274 TWh erneuerbaren Stroms in die Stahlindustrie der Primärenergiebedarf gegenüber 2008 um 27 - 95 % gesenkt werden kann. Dies würde einen erheblichen Beitrag zur Senkung der CO₂-Emissionen und des Brennstoffbedarfs in der Stahlindustrie darstellen ⁽⁴⁾. Für Haushalte eignen sich beispielsweise Brennstoffzellensysteme (SOFC), welche jedoch mit PV und Wärmepumpensystemen konkurrieren. Ein wirtschaftlicher Anwendungsfall wäre beispielsweise die autarke Vollversorgung eines Haushaltssystems ⁽⁵⁾. Für den Verkehr und Industrie eignen sich weitere oben beschriebene Nutzungsoptionen für Wasserstoff.

Kostenvergleich von Wasserstoffnutzungsoptionen

Eine auf einem erneuerbaren Energiekonzept basierende, vergleichende Kostenabschätzung zeigt, dass es auch ökonomisch sinnvoller ist, mineralölbasierte Kraftstoffe durch Wasserstoff anstatt durch Erdgas zu ersetzen. Zur Bewertung der Kraftstoffoption sind dazu in der Abbildung unten heutige Kosten für Benzin an der Tankstelle in Höhe von 8 ct/kWh (70 ct/l) ohne Steuern als Benchmark angegeben. Bei Annahme des oben genannten Verbrauchsvorteils betragen die „erlaubten“ Kosten für Wasserstoff an der Tankstelle dementsprechend 16 bzw. 22 ct/kWh bei einem Verbrauch der Brennstoffzellenfahrzeuge von 1 bzw. 0,7 kg auf 100 km.

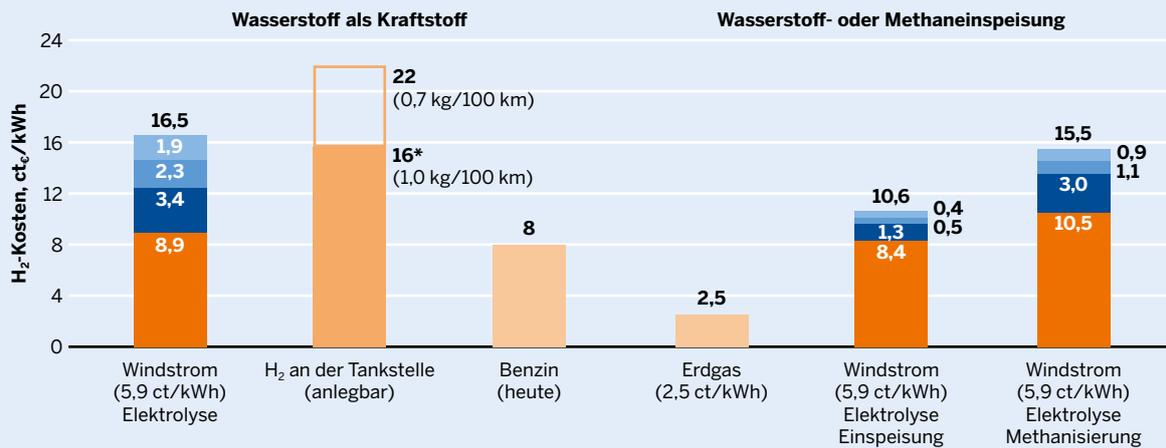
Der Kostenvergleich für das Szenario „Einspeisung ins Erdgasnetz“ macht deutlich, dass bereits bei der direkten Einspeisung von Wasserstoff die spezifischen Kosten um den Faktor 4,3 höher sind als die Erdgaskosten. Bei vorheriger Methanisierung beträgt dieser Faktor sogar 6,2. Da in diesen Szenarien bereits die variablen Energiekosten deutlich über den Kosten des zu substituierenden Energieträgers liegen, ist eine wirtschaftlich begründbare Einspeisung von Wasserstoff oder Methan ins Erdgasnetz derzeit nicht absehbar.



Beispielhafte potenzielle Beiträge von Wasserstoff als Sektorenkopplungsoption zur Reduktion der CO₂-Emissionen für das Jahr 2050 (GHD: Gewerbe, Handel und Dienstleistungen)

Quelle: FZ Jülich

Kostenvergleich von Wasserstoffnutzungsoptionen



Kapitalkosten: Abschreibung der Investition plus Verzinsung

- 10 a für Elektrolyseure und andere Produktionsanlagen
- 40 a für Übertragungsnetz
- 20 a für Verteilnetz und Tankstellen
- Verzinsung 5,8 % p.a.

Weitere Annahmen:

- 2,9 Mio. t_{H₂}/a aus erneuerbarer Energie via Elektrolyse
- Elektrolyse: $\eta = 70\%$ _{LHV}, 28 GW; Spezif. Investition 50 €/kW
- Methanisierung: $\eta = 80\%$ _{LHV}

Während die Einspeisung ins Erdgasnetz um ein Vielfaches zu teuer ist, kann H₂ als Treibstoff wirtschaftlich konkurrenzfähig sein.

*Anlegbare Kosten bei halbiertem Kraftstoffverbrauch gegenüber Benzinfahrzeugen



Quelle: FZ Jülich

Im Vergleich zu den oben genannten Nutzungsalternativen (Rückverstromung des Wasserstoffs, direkte Einspeisung ins Erdgasnetz oder Einspeisung von Methan nach vorhergehender Methanisierung) bietet diese Option einerseits die größte CO₂-Ersparnis. Andererseits stellt sie aber auch die ökonomisch sinnvollste Alternative dar, da die Vergleichskosten im Kraftstoffmarkt deutlich höher sind als im Bereich der Erdgasnutzung.

Kontakt:

Prof. Dr.-Ing. D. Stolten
 Institutsleitung
 Forschungszentrum Jülich GmbH
 Tel. 02461/61-5147
 d.stolten@fz-juelich.de

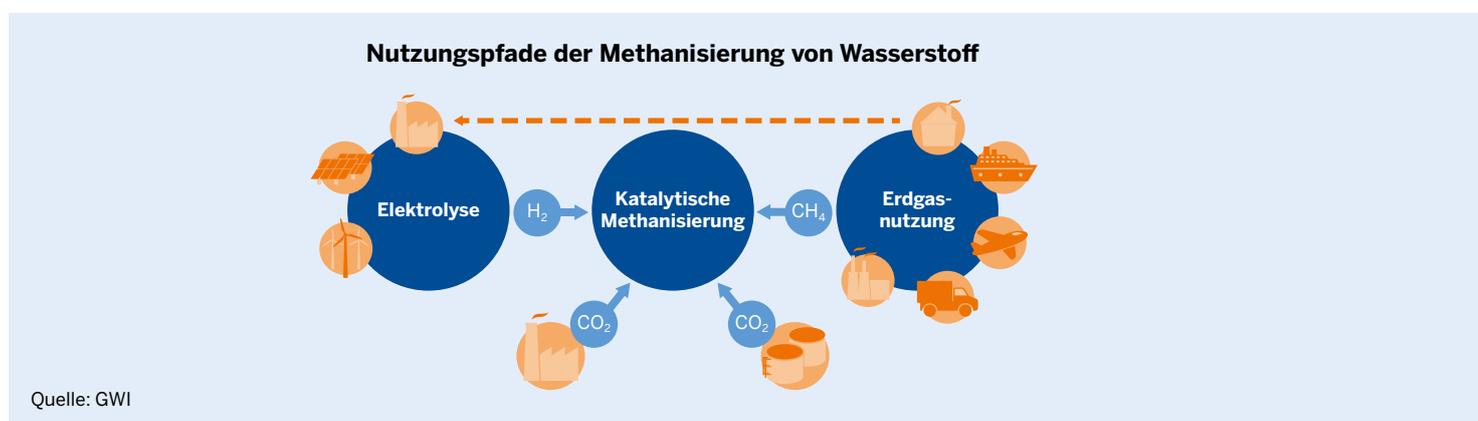
Dr.-Ing. M. Robinius
 Leitung Abteilung Verfahrens- und Systemanalyse
 Forschungszentrum Jülich GmbH
 Tel. 02461/61-3077
 m.robinius@fz-juelich.de

www.fz-juelich.de

Potenziale der Einspeisung von Wasserstoff ins Erdgasnetz

Wie oben aufgeführt, ist eine vielversprechende Option zur Integration erneuerbarer Energien in den Erdgassektor die Wasserstoffproduktion mit anschließender Einspeisung ins Erdgasnetz. Die gespeicherte Energie kann von dort aus, im Sinne der Sektorenkopplung, in mehreren Bereichen wieder genutzt werden. So steht – auch in Zeiten von EE-Mangel – dem Wärmesektor, dem Industriesektor, dem Mobilitätssektor oder auch der Rückverstromung wieder Energie zur Verfügung, wie die folgende Abbildung zeigt.

Die potenzielle Einspeisemenge von Wasserstoff ist direkt abhängig von der Erdgasabnahme im jeweiligen Netz. Da sowohl die Verfügbarkeit erneuerbarer Energien als auch der Erdgasverbrauch saisonalen Schwankungen unterliegen, müssen diese besonders detailliert betrachtet werden.

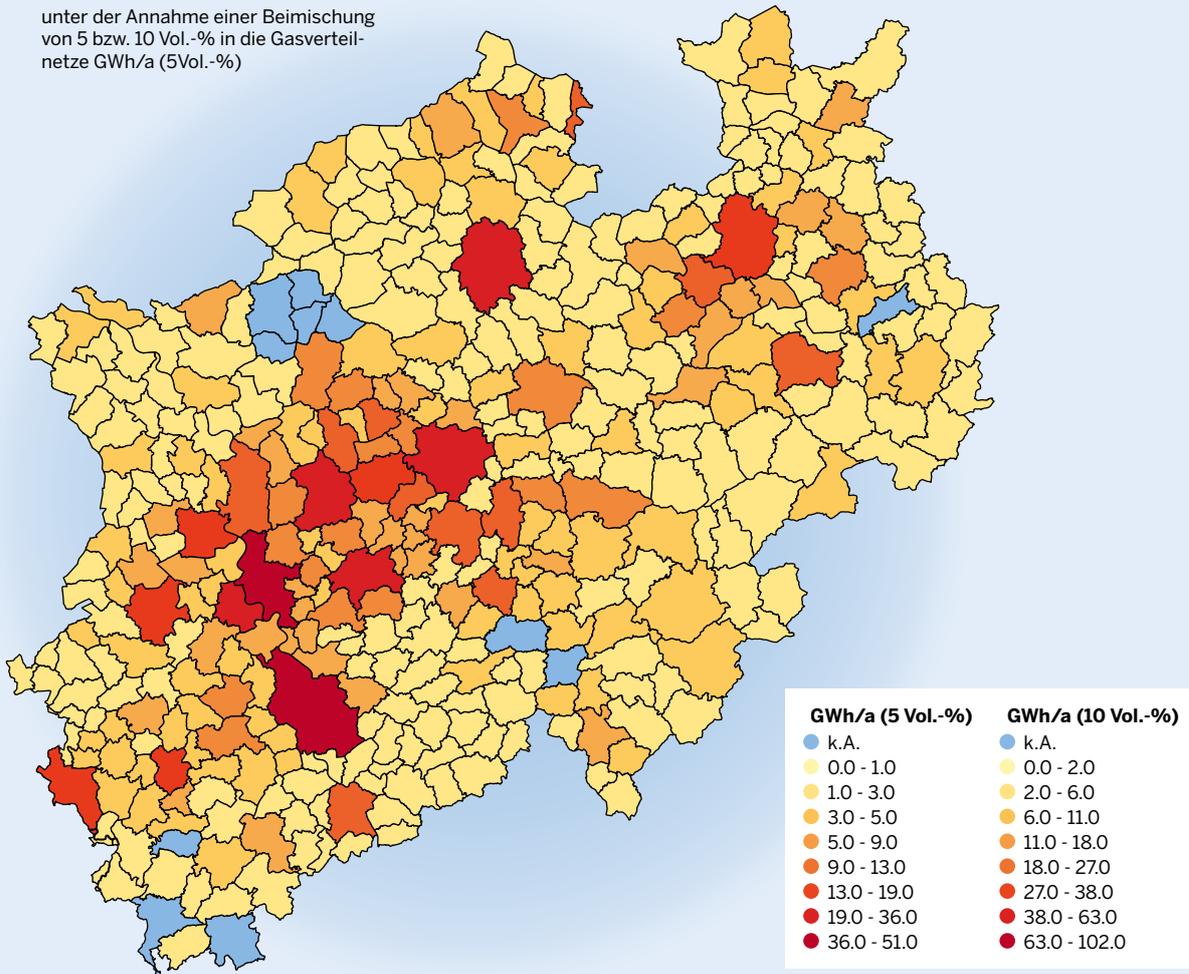


Grundsätzlich müssen Einspeiser sicherstellen, dass die Beschaffenheit des eingespeisten Gases kompatibel zum Gasnetz ist und die Interoperabilität des Gasnetzes gewahrt bleibt (EnWG § 49). Die Qualität des Austausch- oder Zusatzgases ist in der Gasnetzzugangs-Verordnung in Verbindung mit einem statischen Verweis auf die Arbeitsblätter G 260 und G 262 des Deutschen Vereins des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW) geregelt. Die aktuell gültige GasNZV verweist auf den DVGW-Regelwerkstand von 2007. Das nach der GasNZV maßgebliche DVGW Arbeitsblatt G 262 schreibt vor, den Wasserstoffanteil im Gasgemisch auf maximal 5 Vol.-% zu begrenzen. Die aktuelle Fassung der Arbeitsblätter G 262 von 2011 und G 260 von 2013 würden bei entsprechendem Verweis in einer neuen GasNZV H₂-Anteile bis 10 % zulassen, solange diese nicht enger von sensiblen Endanwendungen begrenzt werden.

Im Projekt „Virtuelles Institut - Strom zu Gas und Wärme“ untersucht das Gas- und Wärme-Institut Essen e.V. (GWI) unter anderem die Potenziale der Wasserstoffeinspeisung in Gasverteilnetze in NRW. Hierbei liegt der Fokus nicht nur auf der regionalen EE-Erzeugung und -Umwandlung, sondern auch auf der Untersuchung regionaler Gasbedarfe in den gegebenen Verteilnetzen. Die Analyse wird unter Berücksichtigung saisonaler und wirtschaftlicher Aspekte durchgeführt. Dabei wurde die Jahresarbeit Erdgas für NRW auf Netzbetreiber- und Gemeindeebene ermittelt. Auf Basis dieser Daten konnte die potenziell einspeisbare Wasserstoffmenge für das Szenario 2050 berechnet werden.

Wasserstoffpotenziale der Gemeinden NRWs 2015

unter der Annahme einer Beimischung von 5 bzw. 10 Vol.-% in die Gasverteilnetze GWh/a (5Vol.-%)



Quelle: GWI

Die Abbildung zeigt als ein Ergebnis der Studie, die Wasserstoffpotenziale der Gemeinden NRWs, ausgehend von deren Erdgasverbrauch aus dem Jahr 2015. Aufgrund der guten Infrastruktur und hoher Erdgasabsatzmengen ist es in NRW theoretisch möglich, je nach saisonalem Erdgasabsatz zwischen ca. 0,68 und 1,05 Mrd. m³ H₂/Jahr einzuspeisen. Auf Basis des Anteils EE für das Jahr 2050 (Umweltbundesamt, Energieziel 2050) ergibt sich eine große Menge an elektrischer Energie, die allerdings nicht ganzjährig durch eine reine Zusatzgaseinspeisung speicherbar ist. Der Modellrechnung folgend ist eine Methanisierung unter der Voraussetzung eines direkten Verbrauchs der eingespeisten Mengen mindestens in den Sommermonaten vorteilhaft. Dabei konnten mögliche Einschränkungen durch spezielle Gasabnehmer wie Erdgas-Tankstellen, Industriefeuern und stoffliche Nutzer noch nicht berücksichtigt werden. Hierzu besteht noch Untersuchungsbedarf.

Weitere Informationen zur Veröffentlichung „Potenziale der Einspeisung von Wasserstoff ins Erdgasnetz eine saisonale Betrachtung“ findet man im Internet und ab Juli 2018 auch den Abschlussbericht des Virtuellen Instituts.

Kontakt:

Janina Senner
Gas- und Wärme-Institut Essen e. V.
Tel. 0201/3618-277
senner@gwi-essen.de

www.gwi-essen.de

Wasserstoffherstellung

Die gezielte Herstellung von Wasserstoff erfolgt heute meist mittels Dampfreformierung von Erdgas oder Naphtha. Darüber hinaus entsteht Wasserstoff als Nebenprodukt der Chlor-Elektrolyse und der Reformierung kohlenstoffreicher Grundstoffe wie Acetylen und Ethylen aus Erdgas und ist Bestandteil von Kokereigas und Stahlwerksgasen. Wasserelektrolyse macht nur einen geringen Bruchteil der weltweiten Erzeugung aus und erfolgt in größerem Stil dort, wo preiswerter Strom aus Wasserkraft, aber kein Erdgas als Wasserstoffquelle für die Düngemittelproduktion zur Verfügung steht – sowie in in kleineren Dimensionen dort, wo Bedarfe zu weit von industriellen Wasserstoffquellen entfernt sind.

Im Zuge der Umstellung der Energieversorgung auf erneuerbare Quellen, wird der Anteil des gezielt per Wasserelektrolyse hergestellten Wasserstoffs, steigen. Neben der

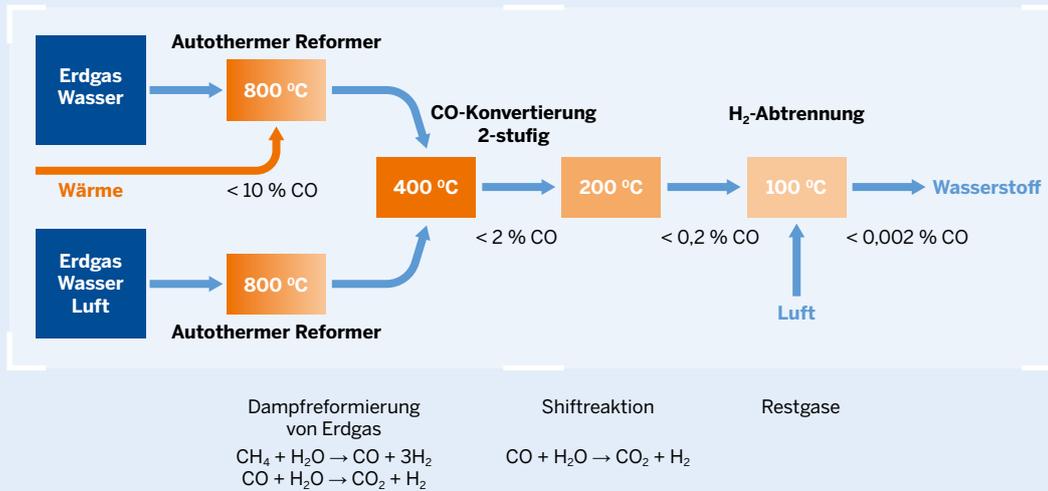
klassischen alkalischen Elektrolyse wurden in den letzten Jahren stark die PEM-Elektrolyse und auch die Festoxid-elektrolyse vorangetrieben. Weiterer technischer Fortschritt sowie der Bau größerer Einheiten im MW-Bereich werden dazu beitragen, dass die elektrolytische Wasserstoffherzeugung aus vorzugsweise regenerativ erzeugtem Strom in Zukunft deutlich effizienter und kostengünstiger und damit wettbewerbsfähiger zur konventionellen Erzeugung aus Erdgas werden wird.

Des Weiteren werden Verfahren zur Erzeugung von Wasserstoff aus Reststoffen, Biomasse, Algen, Biogas und Faulgasen entwickelt, die unter Umständen als weitere Wasserstoffquelle dienen könnten.

In den nächsten Kapiteln werden einige dieser Verfahren zur Wasserstoffherzeugung vorgestellt.



Wasserstoff aus Erdgas: Verfahrensschritte der Dampfreformierung und CO-Konvertierung



Quelle: DLR

Erdgasreformierung

Wasserstoff wird heute noch vorrangig durch Reformierung von Erdgas gewonnen (heterogen katalysierte Dampfreformierung von Methan, siehe Abbildung oben). Bei der Erdgasreformierung wird zunächst ein Synthesegas (Wasserstoff, Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Wasserdampf und Restkohlenwasserstoffe) produziert. Kohlenmonoxid kann über eine Konvertierungsreaktion mit Wasser weiter zu Wasserstoff und Kohlendioxid umgewandelt werden. Wasserstoff wird aus dem Gasgemisch durch Absorption, Adsorption oder mittels Membranen abgetrennt.

Wasserstoffproduktionsanlage in Dormagen

Air Liquide betreibt in Dormagen bei Köln einen hochmodernen Steam(Dampf)reformer. Er hat eine jährliche Produktionskapazität von 22.000 t Wasserstoff und 120.000 t Kohlenmonoxid.

Im Rahmen seiner Initiative „Blue Hydrogen“ hat Air Liquide sich verpflichtet, bis 2020 mindestens 50 % seines, für Energieanwendungen bestimmten, Wasserstoffs entweder ohne Freisetzung von Kohlendioxid oder auf dem Wege einer CO₂-neutralen Produktion zu erzeugen. Vor diesem Hintergrund wurden auch Strategien und Konzepte zur Steigerung des Angebots von grün zertifiziertem Wasserstoff in Deutschland entwickelt: Air Liquide konnte die Zertifizierung des Prozesses zur Herstellung von „Blue Hydrogen“ als grün zertifiziertem Wasserstoff gemäß den CEP-Vorgaben bzw. dem TÜV SÜD Standard CMS 70 erfolgreich abschließen. Blue Hydrogen wird hierbei zentral in einem Dampf reformer von Air Liquide in Dormagen durch Reformierung von Biomethan hergestellt und kann auf Basis eines Massenbilanzierungssystems über verschiedene Air Liquide-Füllwerke an die Tankstellen geliefert werden.



Wasserstoffherstellungsanlage der Air Liquide

Kontakt:

Fabian Radix
 Air Liquide Deutschland GmbH
 Tel. 0211/6699-4212
 fabian.radix@airliquide.com

www.airliquide.com

Elektrolyse von Wasser

Die elektrochemische Gewinnung von Wasserstoff mittels Wasserelektrolyse ist ein technisch altes Verfahren, das seit mehr als hundert Jahren weltweit etabliert ist. Durch die gegenwärtig höheren Gestehungskosten gegenüber dem aus fossilen Energieträgern wie Erdgas und Kohle hergestellten Wasserstoff werden momentan weltweit nur etwa 4 % des Wasserstoffs mittels Elektrolyse erzeugt. Jedoch wird der Wasserstoff in zukünftigen Energiesystemen, bei denen erneuerbare Energien im Energiemix den Hauptanteil übernehmen sollen, eine bedeutsame Rolle als Speichermedium und Energieträger u. a. für den Verkehr spielen.

Die elektrochemische Wasserzersetzung durch Elektrolyse (siehe Infokasten) besteht aus zwei Teilreaktionen, die durch einen ionenleitenden Elektrolyten getrennt sind. Je nach verwendetem Elektrolyten unterscheidet man drei relevante Verfahren der Wasserelektrolyse, die in der Abbildung auf der nächsten Seite mit ihren jeweiligen Teilreaktionen an Anode und Kathode, den typischen Temperaturbereichen und den Ionen für den entsprechenden Ladungstransport zusammengefasst sind:

- die alkalische Elektrolyse mit einem flüssigen basischen Elektrolyten,
- die saure PEM-Elektrolyse mit einem protonenleitenden polymeren Festelektrolyten und
- die Hochtemperatur-Elektrolyse mit einem Festoxid als Elektrolyt.

Das Wasser wird bei der alkalischen Elektrolyse normalerweise an der Kathodenseite, bei der PEM-Elektrolyse an der Anodenseite, zugeführt. Bei der Hochtemperatur-Elektrolyse wird der benötigte Wasserdampf an der Kathode zugeführt. Die Hochtemperatur-Elektrolyse wird aktuell von Forschungseinrichtungen und der Industrie entwickelt, es existieren aber noch keine kommerziellen Systeme im Maßstab einiger kW Leistung.

Alkalische Elektrolyseure

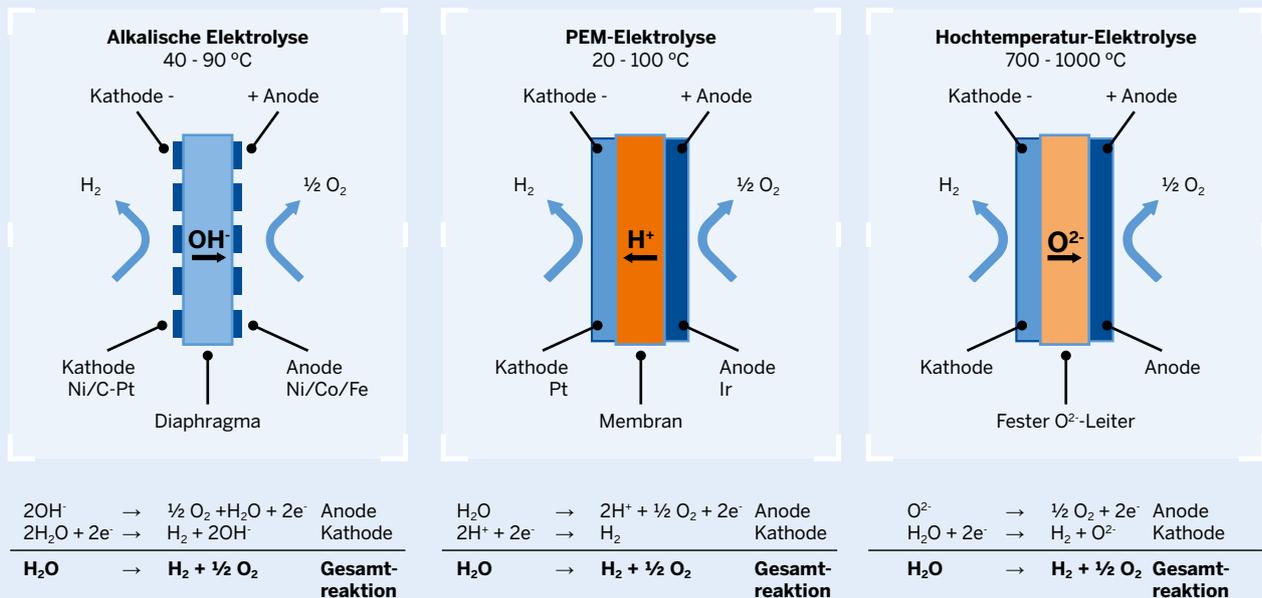
Zurzeit gibt es kommerzielle Produkte nur in den Bereichen alkalische Elektrolyse (schon seit mehreren Jahrzehnten in unterschiedlichen Baureihen bis ca. 750 Nm³/h Wasserstoff verfügbar) und PEM-Elektrolyse (Produktentwicklung erst seit 20 Jahren, daher nur wenige kommerzielle Anlagen < 65 Nm³/h auf dem Markt). Alkalische Elektrolyseure arbeiten in der Regel mit einer wässrigen KOH-Lauge mit einer typischen Konzentration von 20 - 40 %. Die Betriebstemperatur liegt üblicherweise bei ca. 80 °C und die Stromdichten im Bereich von 0,2 - 0,4 A/cm². Der Spannungswirkungsgrad für den Stack von kommerziellen Anlagen liegt bei etwa 62 - 82 % bezogen auf die thermoneutrale Spannung von 1,48 V. Seit der Einführung der Wasserelektrolyse vor mehr als hundert Jahren sind jedoch bis heute nur wenige tausend Anlagen hergestellt worden. Als Resultat dieser vergleichsweise geringen Aktivitäten hat sich der Stand der Technik bei großen Elektrolyseanlagen in den letzten vierzig Jahren nur marginal verändert.

So wurden größere Elektrolyseanlagen mit einer Kapazität bis 30.000 Nm³/h Wasserstoff für die Ammoniaksynthese und die Düngemittelherstellung (z. B. in Assuan, Ägypten) im letzten Jahrhundert nur dann realisiert, wenn preiswerte elektrische Energie aus Wasserkraft vorhanden war. Dabei kamen bei den damals realisierten Großanlagen zum größten Teil drucklos betriebene bipolare Elektrolyseure zum Einsatz, deren Kapazität ca. 200 Nm³/h Wasserstoff betrug. Nur die Firma ELB Elektrolysetechnik GmbH stellte Druckelektrolyseure nach Lurgi-Technologie mit einer elektrischen Leistung von ca. 3,6 MW (produzierte Wasserstoffmenge 740 Nm³/h) her, die den Wasserstoff und Sauerstoff unter 30 bar bereitstellten. Der Zellstapel besteht dabei aus bis zu 560 Zellen mit einem Durchmesser von 1,60 m und ist entsprechend der Anzahl der Zellen bis zu 10 m lang. Für alkalische Elektrolyse-Zellenstapel (Stacks) werden Laufzeiten bis zu 90.000 h angegeben, so dass in der Regel alkalische Elektrolyseure alle sieben bis zwölf Jahre generalüberholt werden und ein Austausch der Elektroden und Diaphragmen erfolgt.

PEM-Elektrolyseure

Für die PEM-Elektrolyse mit protonenleitenden Membranen (Abbildung Mitte), existiert eine Produktentwicklung erst seit zwanzig Jahren, so dass nur wenige kommerzielle Produkte für industrielle Nischenanwendungen (z. B. lokale Produktion hochreinen Wasserstoffs für die Halbleiterfertigung und die Glasindustrie) auf dem Markt sind. Anders als bei der alkalischen Wasserelektrolyse verwendet man Elektroden mit Platingruppenmetallen. In aktuellen kommerziellen Systemen werden auf der Anode etwa 4 mg/cm² Iridium oder Ruthenium und auf der Kathode etwa 2 mg/cm² Platin eingesetzt. Unter den gegebenen Betriebsbedingungen arbeiten diese PEM-Elektrolyse-Systeme bei Spannungen von ca. 2 V bei Stromdichten bis etwa 2 A/cm² und bei Betriebsdrücken bis maximal 30 bar. Dies entspricht zwar dem gleichen Spannungswirkungsgrad von ca. 67 - 82 %, jedoch gegenüber der alkalischen Wasserelektrolyse bei wesentlich höheren Stromdichten (0,6 - 2,0 A/cm²). Für die Zellenstapel wird eine Lebensdauer von bis zu 60.000 h in realen Systemen angegeben.

Funktionsprinzipien der unterschiedlichen Arten der Wasserelektrolyse



Vergleich von alkalischer Elektrolyse und PEM-Elektrolyse

Alkalische Elektrolyse



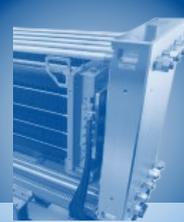
Vorteile:

- etablierte Technologie
- keine Edelmetallkatalysatoren
- hohe Langzeitstabilität
- relativ niedrige Kosten
- Module bis 760 Nm³/h (3,4 MW)

Herausforderungen:

- Erhöhung der Stromdichten
- Ausweitung des Teillastbereichs
- Systemgröße und Komplexität („Footprint“)
- Reduktion des Aufwands der Gasreinigung
- Gesamtmaterialeinsatz (Stacks derzeit im Tonnenmaßstab)

PEM-Elektrolyse



Vorteile:

- höhere Leistungsdichte
- höherer Wirkungsgrad
- einfacher Systemaufbau
- gute Teillastfähigkeit
- Fähigkeit zur Aufnahme extremer Überlast (systemgrößenbestimmend)
- extrem schnelle Systemantwort für Netzstabilisierungsaufgaben
- kompaktes Stackdesign für Hochdruckbetrieb

Herausforderungen:

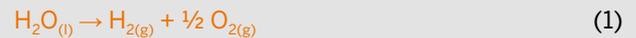
- Erhöhung der Langzeitstabilität
- Scale-up-Stack und Peripherie in den MW-Bereich
- Kostenreduktion durch Reduktion bzw. Substitution von Edelmetallkatalysatoren und kostenintensiven Komponenten (Stromkollektoren/Separatorplatten)

Wasserelektrolyse zur Leistungsregelung

Das fluktuierende Angebot erneuerbarer Energien – beispielsweise in Form von Windstrom – stellt eine besondere Herausforderung an die Verfahrenstechnik der jeweiligen Elektrolysetechniken, zumal der Elektrolyseur zur Erbringung einer Regelleistung eingesetzt wird und somit mit stark fluktuierenden Leistungen und mangels Leistungseintrag häufigen Unterbrechungen betrieben wird. Eine besondere Problematik stellt das Teillastverhalten insbesondere bei alkalischen Elektrolyseuren wegen steigender Gasverunreinigungen dar. So beträgt der untere Teillastbereich von alkalischen Elektrolyseanlagen nur 20 - 40 % der Nennlast, da die Fremdgaskonzentration insbesondere von H₂ in O₂ sehr schnell einen kritischen Bereich von beispielsweise 2 % erreicht, bei der die Anlage aus Sicherheitsgründen abgeschaltet werden muss. Die PEM-Elektrolyse besitzt gegenüber der alkalischen Elektrolyse einen größeren Teillastbereich. Auf Zell- und Zellstapelebene kann im Gegensatz zur alkalischen Elektrolyse bis auf 5 - 10 % Teillast abgeregelt werden. Beide auf dem Markt verfügbaren Elektrolysetechniken haben somit ihre Vor- und Nachteile.

Um beide Technologien der Wasserelektrolyse realistisch und nachhaltig in den Massenmärkten der Wasserstoff-erzeugung mit regenerativ erzeugtem Überschussstrom nach dem Jahr 2020 einsetzen zu können, sind weitere Technologieschritte erforderlich, um die zu niedrigen Leistungsdichten, die unzulängliche Stabilität und die zu hohen Kosten der aktuell eingesetzten Technologien zu verbessern beispielsweise zu reduzieren. Zu den Herausforderungen bei der Weiterentwicklung der alkalischen Wasserelektrolyse zählen insbesondere die Erhöhung der Leistungsdichte des Zellenstapels, die Ausweitung des Teillastbereichs, die Reduzierung der Systemgröße und Komplexität sowie die Verbesserung der Dynamik des Gesamtsystems. Im Bereich der PEM-Elektrolyse stehen neben der Erhöhung der Langzeitstabilität und der Vergrößerung der Anlagengröße in den MW-Bereich vor allem die Kostenreduktion durch Reduktion und Substitution der Edelmetallkatalysatoren bei gleichbleibenden Leistungswerten im Vordergrund.

Für die elektrolytische Zersetzung von Wasser in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff



benötigt man unter Standardbedingungen (298,15 K und 1 bar) eine Reaktionsenthalpie (Bildungsenthalpie des flüssigen Wassers) von $\Delta H_r = 286 \text{ kJ/mol}$, was einer thermo-neutralen Spannung, dem Higher Heating Value (HHV), von $U^\circ_{th} = 1,48 \text{ V}$ beziehungsweise einem Energieinhalt von $3,54 \text{ kWh/Nm}^3$ entspricht. Bei dieser Spannung ist die elektrische Energie gleich der Reaktionsenthalpie ΔH° der Wasserzerersetzung. Die reversible Spannung U° ergibt sich aus der freien Reaktionsenthalpie $\Delta G_R = 237 \text{ kJ/mol}$ zu

$$U^\circ = (\Delta G^\circ)/nF \quad (2)$$

Unter Standardbedingungen (298,15 K und 1 bar) ergibt sich für $U^\circ = 1,23 \text{ V}$ (Elektronenzahl $n = 2$; Faraday-Konstante $F = 96500 \text{ As/mol}$), was dem Lower Heating Value (LHV) von $3,0 \text{ kWh/Nm}^3$ entspricht. Beim Vergleich der Effizienz unterschiedlicher Systeme ist zu beachten, dass vielfach der LHV als Referenz angegeben wird und es nicht zu einer Vermischung kommen sollte.

Die praktisch erzielbaren Zellspannungen in realen Wasserelektrolyseuren liegen jedoch erheblich über der theoretischen reversiblen Zellspannung.

Kontakt:

Martin Müller
Forschungszentrum Jülich GmbH
IEK-3 Elektrochemische Verfahrenstechnik
Forschungszentrum Jülich GmbH
Tel. 02461/61-1859
mar.mueller@fz-juelich.de

Marcelo Carmo
Forschungszentrum Jülich GmbH
IEK-3 Elektrochemische Verfahrenstechnik
Forschungszentrum Jülich GmbH
Tel. 02461/61-5590
m.carmo@fz-juelich.de

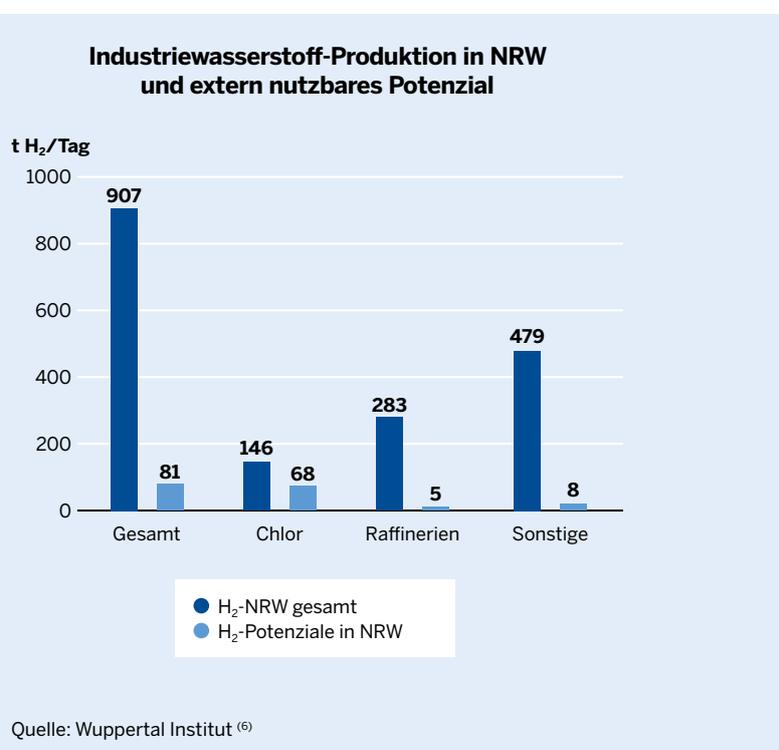
www.fz-juelich.de

Wasserstoffpotenzial aus industrieller Erzeugung in NRW

Die Vision einer klimafreundlichen zukünftigen energetischen Nutzung von Wasserstoff ist untrennbar mit dessen Herstellung auf der Basis von regenerativer Energie verknüpft. Allerdings kann der Rückgriff auf anderweitig in Industrieprozessen erzeugten Wasserstoff einschließlich vorhandener Infrastrukturelemente für eine Übergangszeit sinnvoll sein. Nordrhein-Westfalen bietet hierfür mit dem Rhein-Ruhr-Raum besonders günstige Voraussetzungen und verfügt über zahlreiche für die energetische Wasserstoffnutzung geeignete Standorte.

Die bereits 2009 angefertigte Landesstudie „Optionen für den kostenoptimierten, schrittweisen Aufbau einer H₂-Infrastruktur in Nordrhein-Westfalen“⁽⁶⁾ verknüpfte die Erhebung verfügbarer Wasserstoffmengen in NRW mit der Modellierung des Aufbaus einer Wasserstoff-Infrastruktur und betont dabei die besondere Ausgangslage NRW. Dies war von der Idee inspiriert, überschüssige Mengen fossilen Wasserstoffs für einen Übergangszeitraum mobilen Nutzungen zuzuführen.

Nennenswerte Quellen und Nutzungen von industriell erzeugtem Wasserstoff in NRW bestehen vor allem im Bereich der Chlorproduktion sowie der Raffinerien und der rückläufigen Produktion von Koks für die Rohstahlerzeugung. Daneben wird Wasserstoff teilweise mittels Erdgasreformierung gewonnen, um als chemischer Grundstoff in anderen Produktionen eingesetzt zu werden. Bei der elektrolytischen Herstellung von Chlor fällt Wasserstoff als Nebenprodukt von hoher Reinheit an. Entwicklungen in der Verfahrenstechnik ermöglichen es, die Chlorproduktion bei deutlicher Energieeinsparung ohne den Anfall von Wasserstoff betreiben zu können. Im Einzelfall erfolgt dies in Abhängigkeit vom Marktwert des als Nebenprodukt erzeugten Wasserstoffs.



Die Abbildung zeigt die Zusammenstellung der Ergebnisse für Nordrhein-Westfalen. Danach entfallen auf Anlagen zur Chlor-Alkali-Elektrolyse lediglich 16 % (siehe Bild auf der nächsten Seite oben) der Wasserstoff-Gesamtproduktion, während der Anteil dieser Anlagen und Standorte am Wasserstoff-Potenzial für neue Nutzungen 80 % ausmacht. Demgegenüber entfallen über 80 % der gesamten Produktion auf Raffinerien und sonstige Anlagen, die aber zusammen lediglich 20 % zum Potenzial beitragen.

Neben der Verfügbarkeit von industriell erzeugtem Wasserstoff spielen auch die räumliche Lage der jeweiligen Industriestandorte sowie der Umfang vorhandener Infrastrukturen eine wichtige Rolle für die Nutzung von Wasserstoff in ersten Brennstoffzellenfahrzeugen. Schließlich besteht ein wesentlicher Vorteil der industriellen Nutzung von Wasserstoff in Nordrhein-Westfalen in der vorhandenen Wasserstoff-Pipeline, die über die erzeugenden Standorte hinaus zu einer erheblich besseren Flächenschließung beitragen könnte.



Chlor-Alkali-Elektrolyse in Hürth-Knapsack: 310.000 t Chlor pro Jahr, 203.000 Nm³ Wasserstoff pro Tag

Gegenüber dem Zeitpunkt der Studie ist durch den wirtschaftlichen Strukturwandel und zunehmendem Interesse an verfügbarem Industrie-Wasserstoff das verfügbare Aufkommen deutlich zurückgegangen. Seinerzeit hätten mit dem für Nordrhein-Westfalen abgeschätzten industriellen Potenzial von 958.000 Nm³ pro Tag oder 350 Mio. Nm³ pro Jahr etwa 260.000 Brennstoffzellen-Pkw (12.000 km pro Jahr bei einem Verbrauch von 3,5 l Benzin-Äquivalent je 100 km oder etwa 1 kg Wasserstoff je 100 km) für erste Projekte der Markteinführungsphase betankt werden können. Zwischenzeitlich ist, angeregt durch die fluktuierende Stromerzeugung aus regenerativen Quellen und die somit bestehende Notwendigkeit der Sektorenkopplung, die Forschung zur regenerativen Erzeugung von Wasserstoff weiter fortgeschritten.

Neben der Möglichkeit eines emissionsfreien Verkehrs bietet Wasserstoff als Energieträger auch große Potenziale bei der regionalen Wertschöpfung. Bisher entstehen zum Beispiel im Raum Köln für den Betrieb der ca. 1.000 Linienbusse Kosten von 25 - 30 Mio. Euro pro Jahr für Dieseltreibstoff (1,15 Euro pro l x 1.000 Busse x 55.000 km pro Jahr Laufleistung x 43 l Dieselverbrauch pro 100 km). Ein wesentlicher Teil dieser Kosten könnte direkt in der Region investiert werden, um so einen Beitrag zur regionalen Wirtschaft zu leisten, die notwendigen Transportwege deutlich zu verkürzen und gleichzeitig die Versorgungssicherheit zu erhöhen.

Kontakt:

Andreas Pastowski
Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH
Tel. 0202/2492-118
Andreas.Pastowski@wupperinst.org
www.wupperinst.org

Thomas Grube
Forschungszentrum Jülich GmbH
Tel. 02462/61-5398
th.grube@fz-juelich.de
www.fz-juelich.de

Boris Jermer
HyCologne - Wasserstoffregion Rheinland e.V.
Tel. 02233/406-123
jermer@hycologne.de
www.hycologne.de

Alternative Verfahren zur Wasserstofferzeugung

Photobiologische Wasserstofferzeugung

Der steigende Bedarf nach umweltfreundlichen und nachhaltigen Energien macht Wasserstoff (H_2) als Energieträger sehr attraktiv. Photoautotrophe Mikroorganismen könnten zukünftig diesen Bedarf decken.

Mit Hilfe der Photosynthese können einige Mikroalgen die Sonnenenergie nutzen, um aus Wasser Wasserstoff und Sauerstoff herzustellen. Für diese sogenannte photobiologische Wasserstofferzeugung ist der Biokatalysator Hydrogenase verantwortlich. Dieses Enzym ist in der Lage, bis zu 10.000 Moleküle Wasserstoff in der Sekunde ⁽⁷⁾ zu produzieren.

Die Grünalge *Chlamydomonas reinhardtii* ist für die photobiologische H_2 -Produktion besonders geeignet, da sie ein hocheffizientes Enzym zur Wasserstoffbildung besitzt. Eine genaue Charakterisierung des Wasserstoffmetabolismus von *C. reinhardtii* stellt das Hauptforschungsgebiet der AG Photobiotechnologie der Ruhr-Universität Bochum (RUB) dar, um zukünftig die biotechnologische Wasserstoffproduktion effizienter zu gestalten.

Im Rahmen des von der EU geförderten Projekts Sun2Chem entwickelte das Team um Prof. Thomas Happe halb-künstliche Chloroplasten. Chloroplasten sind in den Zellen der Pflanzen für die Photosynthese zuständig. Mit Hilfe der Synthetischen Biologie können die semi-artifiziellen Chloroplasten dazu beitragen, die photosynthetische Wasserstoffproduktion zu steigern. Ein verwandter Forschungsansatz der Photobiotechnologie-Gruppe befasst sich mit dem Nachbau des Hydrogenase-Enzyms im Reagenzglas. Bereits erste Forschungsergebnisse der Gruppe konnten darlegen, dass die künstliche Hydrogenase die gleichen biochemischen Eigenschaften besitzt und genauso effizient ist wie das natürliche Enzym.

Das kürzlich gestartete Deutsch-Chinesische Projekt Sigal4NRG zum Aufbau eines Deutsch-Chinesischen Labors für Algenbioenergie befasst sich intensiv mit dem Thema, die Erkenntnisse aus dem Reagenzglas in die Algenzelle zu übertragen. Das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Vorhaben wurde vom Lehrstuhl Biochemie der Pflanzen gemeinsam mit der AG Photobiotechnologie (RUB), dem Herner Projektbüro SolarBioproducts Ruhr und dem Single Cell Center des Institute for Bioenergy and Bioprocess Technology der Chinese Academy of Sciences (CAS-QIBEBT) in Qingdao initiiert. Hierbei verfolgen die Forscher das Ziel, mit Hilfe von molekularbiologischen Methoden die Eigenschaften von Algenstämmen für die Energieerzeugung zu optimieren.

Die synthetische und die Molekularbiologie stellen bei der photobiologischen Wasserstofferzeugung wertvolle Instrumente dar. Die Ergebnisse der Forschungsarbeiten der AG Photobiotechnologie können zukünftig dazu beitragen, Wasserstoff aus Mikroalgen im industriellen Maßstab herzustellen und damit ökonomisch kompetitiv zu machen.

Kontakt:

Prof. Dr. Thomas Happe
AG Photobiotechnologie
Ruhr-Universität Bochum
Tel. 0234/3227026
thomas.happe@rub.de

www.rub.de/pbt

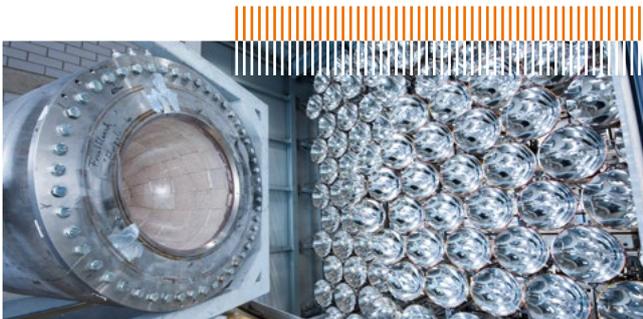


Wasserstoffherstellung über solar-thermochemische Kreisprozesse: Hydrosol-Plant – Synlight – ASTOR

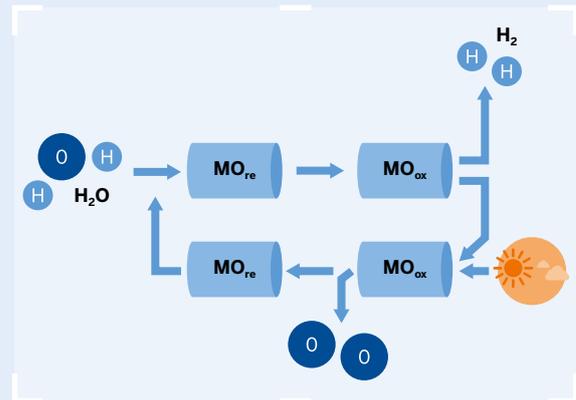
Solar betriebene thermochemische Kreisprozesse stellen eine vielversprechende Option zur regenerativen Herstellung von Wasserstoff dar. Wird in einem thermochemischen Kreisprozess die notwendige Prozesswärme durch konzentrierte Sonnenstrahlung zugeführt, läuft der Prozess ohne die Nutzung fossiler Ressourcen ab.

Im Rahmen einer Reihe von EU-Projekten (HYDROSOL I, HYDROSOL II, HYDROSOL3D und HYDROSOL-PLANT hat die Solarforschung des DLR in Zusammenarbeit mit weiteren europäischen Partnern einen zweistufigen thermochemischen Kreisprozess entwickelt und „solarisiert“, bei dem Metalloxide als Redox-Material eingesetzt werden. Das Reaktorkonzept sieht die Verwendung zellulärer Strukturen vor, die entweder vollständig aus dem verwendeten Redox-Material bestehen oder aber aus einem Schichtverbund, der das Redox-Material als Oberflächenschicht auf einem keramischen Substrat trägt. Die durchströmten Strukturen stellen einerseits die Reaktionsoberfläche für die Spaltung von Wasser zur Verfügung und dienen andererseits als volumetrische Solarabsorber. Sie werden mittels konzentrierter Solarstrahlung auf die notwendigen Prozesstemperaturen von 800 bis 1.400 °C erhitzt.

Im ersten der beiden Teilschritte wird das Redox-Material oxidiert, den dafür nötigen Sauerstoff entnimmt das Material dem Wasserdampf, mit dem es durchströmt wird. Dadurch werden die Wassermoleküle gespalten und Wasserstoff entsteht. Im zweiten Teilschritt wird das Metalloxid reduziert und wieder in einen sauerstoffarmen Zustand versetzt. Es wird damit für die erneute Wasserstoffherstellung „regeneriert“.



Prozessschema eines
zweistufigen Kreisprozesses



Quelle: DLR

Im Rahmen der genannten Projekte wurden Solarreaktoren und Anlagentechnik sukzessive weiterentwickelt und in mehreren Messkampagnen qualifiziert. Um zu demonstrieren, dass das entwickelte Anlagenkonzept auch im größeren Maßstab funktioniert, wird zur Zeit eine 750 kW_{th}-Anlage (Abbildung oben) errichtet, die den Prozess auf der Plataforma Solar de Almería in Südspanien demonstrieren wird. Mit dieser Anlage, in der Nickel-Ferrit und Ceroxid als Redox-Materialien verwendet werden, soll mit verbesserter Effizienz der Wasserstoff-Umsatz weiter erhöht werden. In den aktuell laufenden, NRW/EU-finanzierten Projekten „Modularer Hochleistungsstrahler“ (MHLS) und ASTOR wird die Technologie weiter an den Markt herangeführt. Das Wärmerückgewinnungskonzept wird verbessert und der Prozess (teil-)automatisiert. Die Experimente finden in diesen Projekten nicht mit konzentrierter Solarstrahlung, sondern in einer „künstlichen Sonne“ statt, der im Rahmen von MHLS gebauten Anlage „Synlight“. Sie besteht aus 149 flexiblen Einzelstrahlern und bietet mit einer Gesamtstrahlungsleistung von ca. 200 kW optimale, unterbrechungsfreie Testbedingungen.

Kontakt:

Dr. Martin Roeb, Dr. Thomas Fend
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Tel. 02203/6012673
martin.roeb@dlr.de, thomas.fend@dlr.de

www.dlr.de

Wasserstoff aus Klärgas

Die Wasserwirtschaft bietet mit ihren Kläranlagen wesentliche Potenziale zur Einführung einer nachhaltigen wasserstoffbasierten Energieinfrastruktur. Das Faulgas, das im Zuge der Schlammbehandlung auf Kläranlagen anfällt, kann als erneuerbare Ressource für die Erzeugung von Bioerdgas und Wasserstoff dienen. Dies ist insbesondere dann zielführend, wenn – bspw. durch andere erneuerbare Energien am Standort – überschüssige Energie vorhanden ist, die in eine speicherbare Form überführt werden soll.

Die Emschergenossenschaft, als größter Kläranlagenbetreiber Deutschlands, hat frühzeitig entschieden, die Aufbereitung von Faulgas zu Bioerdgas und Wasserstoff im Demonstrationsvorhaben „EuWaK – Erdgas und Wasserstoff aus Kläranlagen“ auf der Kläranlage Bottrop zu testen und weiterzuentwickeln. Das Projekt wurde 2012 abgeschlossen. Projektpartner der Emschergenossenschaft bei der Projektentwicklung und Projektrealisierung waren die Tuttahs & Meyer Ingenieurgesellschaft für Wasser-, Abwasser- und Abfallwirtschaft mbH (T&M), das Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft an der RWTH Aachen (FiW), das Ingenieurbüro Redlich und Partner GmbH (IBR) sowie die Stadt Bottrop.

In dem Pilotvorhaben wurde Faulgas zunächst zu Bioerdgas aufbereitet. Der maximale Faulgas-Input der Anlage lag bei 120 Nm³/h. Ein Teilstrom des erzeugten Bioerdgases wurde ausgeschleust, verdichtet (Kapazität max. 72 Nm³/h) und an einer Gastankstelle an betriebseigene Erdgasfahrzeuge abgegeben. Die Tankstelle wurde und wird weiterhin nach Projektabschluss zur internen Nutzung weiterbetrieben. Ein weiterer Teilstrom des erzeugten Bioerdgases wurde in einem Dampfreformer zu Wasserstoff umgewandelt (max. 100 Nm³/h). Der erzeugte Wasserstoff wurde über eine Rohrleitung, die innerhalb des Projektes neu verlegt wurde, zu einem nahe gelegenen Schulzentrum geleitet, wo in einem Blockheizkraftwerk Strom und Wärme für die Energieversorgung der Schule erzeugt wurde. Dieses Wasserstoff-BHKW war im Projektzeitraum von 2008 - 2012 jährlich zwischen 500 und 1.500 Std. im Nennbetrieb. Die Wasserstoffnutzung erfolgte in Kooperation mit der Stadt Bottrop. Neben der Nutzung in einem BHKW wurde im Projektrahmen die weitere Aufbereitung des Wasserstoffs zu Tankzwecken evaluiert. Hierzu wurde eine Wasserstofftankstelle auf dem Gelände der Kläranlage Bottrop errichtet, die perspektivisch mit der Wasserstoffherzeugung verbunden werden sollte. Dies konnte im Projektrahmen jedoch nicht mehr realisiert werden.

Die Forschungsergebnisse zeigten einen stabilen und zuverlässigen Betrieb der Bioerdgasherstellung und Erdgastankstelle. Hierauf aufbauend konnte beim Betrieb der Wasserstoffherzeugung im Rahmen eingehender Gasanalysen die Erzeugung hochreinen Wasserstoffs der Qualität 4.0 (99,99 Vol.-% H₂), vereinzelt sogar 5.0 (99,999 Vol.-% H₂), dokumentiert werden. Die Konzentrationen an CO und CO₂ lagen unterhalb der Nachweisgrenze.

Im günstigsten Fall lag der energetische Wirkungsgrad der Wasserstoffherzeugung im Bereich von 40 %; dieser Wert wurde aufgrund der insgesamt noch verbesserungswürdigen Anlagenverfügbarkeit allerdings nicht durchgehend erreicht. Im Hinblick auf die Gesamtbewertung sind zudem die spezifischen Wirkungsgrade vor- bzw. nachgeschalteter Prozessstufen (hier: Bioerdgaserzeugung und H₂-BHKW) zu berücksichtigen.

Das Projekt wurde mit Förderung des Landes Nordrhein-Westfalen und der Europäischen Union realisiert. Im September 2012 endete der Forschungsbetrieb. Nach Abschluss wurde die Wasserstoffschiene noch kurzfristig weiterbetrieben; sie ist mittlerweile eingestellt. Die Aufbereitung zu Bioerdgas sowie die zugehörige Tankstelle sind – auch im Hinblick auf die Entwicklung einer zukünftigen Mobilität – weiterhin in Betrieb.

Kontakt:

Daniel Klein
Emschergenossenschaft/Lippeverband
Tel. 0201/1042280
klein.daniel@eglv.de

www.eglv.de



Power-to-X/Power-to-Gas Projekte in NRW

Die im Kapitel „Die neue Rolle von Wasserstoff in einer künftigen Energieversorgung“ diskutierte Wandlung von Strom in gasförmige und auch flüssige Energieträger als der Teil einer künftigen Energieversorgung wird auch in NRW in zahlreichen Projekten erprobt. Während das wasserstoffbasierte Energiekomplementärsystem in Herten externen Kunden die Erprobung weitgehend autarker erneuerbarer Energieversorgungskonzepte bis 50 kW Nutzlast im Netzparallelbetrieb und im Inselbetrieb erlaubt, steht in Ibbenbüren neben der Wasserstoffeinspeisung ins Gasnetz und der Nutzung der Elektrolyseur-Abwärme die Systemdienstleistung für das Stromnetz im Vordergrund. In Duisburg und in Niederaußem werden stoffliche Nutzungen von Kohlendioxid aus der Stahl- beziehungsweise der Stromerzeugung erprobt, und in Wesseling wird die Minderung der CO₂-Intensität klassischer Kraftstoffe angestrebt – perspektivisch aber auch die Bereitstellung erneuerbaren Wasserstoffs für andere Anwendungen. Die Vielfalt dieser und weiterer Projekte belegt das hohe Maß an Kompetenz im Bundesland Nordrhein-Westfalen. Eine umfassende Übersicht bietet auch die Broschüre „Power-to-Gas in Deutschland und NRW“ der EnergieAgentur.NRW⁽⁸⁾. Nachfolgend werden einige Standorte vorgestellt.

Duisburg

Das Projekt „Carbon2Chem“ erforscht die Nutzung von Hüttengasen als Ressource für Chemie-Produkte. Durch die Verwertung der Abgase wird die Grundlage für nachhaltige Stahlerzeugnisse und Basischemikalien aus deutscher Hand gelegt. Stahlwerke setzen erhebliche Mengen an CO₂ frei. Die deutsche Stahlbranche ist für ungefähr 6 % des deutschen CO₂-Gesamtausstoßes verantwortlich. Neben der Sicherung der Stahlproduktion am Standort Deutschland gilt es, exportfähige Lösungen zur nachhaltigen Abgasnutzung zu entwickeln. Carbon2Chem will die Hüttengase in chemische Grundstoffe umwandeln und damit fossile Rohstoffe ersetzen. Aus dem Abgas der Hochöfen werden Vorprodukte für Kraftstoffe, Kunststoffe oder Düngemittel. Hüttengas besteht aus 44 % Stickstoff, 23 % Kohlenstoffmonoxid, 21 % Kohlendioxid, 10 % Wasserstoff und 2 % Methan. Gleichzeitig schafft das Vorhaben die Grundlage einer nachhaltigen Wertschöpfungskette, die verschiedene Sektoren miteinander verbindet. Die dazu benötigte elektrische Energie wird lastflexibel aus erneuerbaren Energien bezogen. Das Projekt hat das Potenzial, zu einer bedeutenden Schlüsseltechnologie zum globalen Klimaschutz zu werden und kann international breit vermarktet werden. Die Verwertung der Hüttengase wirft allerdings

viele grundsätzliche Forschungsfragen auf. Daher arbeiten im Projekt weltweit führende Industrieunternehmen mit exzellenten Forschungsinstitutionen zusammen.

www.carbon2chem.de

Essen

Am Gas- und Wärme-Institut Essen e.V. (GWI) wird im Rahmen des Virtuellen Instituts Strom zu Gas und Wärme zu Forschungszwecken eine 15 kW PEM-Elektrolyse (Polymer Elektrolyt Membran) samt chemischer Methanisierung errichtet. Weitere Details im Beitrag zum Virtuellen Institut (Seite 78).

www.gwi-essen.de

Herten

Im Anwenderzentrum h2herten wurde mit einer NRW/EU-Koförderung eine Pilotanlage zur Forschung und Entwicklung von Komponenten und Konfigurationen für die regenerative Energieversorgung aufgebaut. Die Modellanlage stellt eine vollständige regenerative Energieversorgung auf Basis von Wasserstoff dar. Das Kernstück, ein Energiekomplementärsystem bestehend aus Elektrolyseur, Kompressor, H₂-Speicher, Brennstoffzelle und Batterie, ist eine der fortschrittlichsten Power-to-Gas Anlagen für die dezentrale Bereitstellung von regenerativ erzeugtem Strom und Wasserstoff. Mit den Echtzeitdaten der benachbarten Windkraftanlage und dem simulierten Energiebedarf des Anwenderzentrums h2herten konnte eine autarke, hundert Prozent regenerative Energieversorgung im industriellen Maßstab stabil und fehlerfrei gefahren werden.

www.h2herten.de



Ibbenbüren

In Ibbenbüren betreibt die innogy SE eine PEM-Elektrolyse mit 150 kW Eingangsleistung. Der erzeugte Wasserstoff wird stromab einer Gasentspannungsanlage in das öffentliche Gasnetz eingespeist, wobei der volumetrische Wasserstoffanteil im Erdgas stets unter 1 % bleibt. Dies wird mit Hilfe modernster Gasmesstechnik überwacht. Weltweit bisher einzigartig ist die Nutzung der Abwärme des Elektrolyseurs, die hier zur Vorwärmung des Erdgases vor der Gasentspannung anstelle von Wärme aus einem BHKW verwendet wird, wann immer der Elektrolyseur in Betrieb ist. Damit wird ein Rekord-Energieausnutzungsgrad von 86 % erreicht. Ohne Abwärmenutzung beträgt der Wirkungsgrad – bezogen auf den Brennwert – 71 % und im Teillastfall bis zu 75 %. Im Rahmen des im Jahr 2016 gestarteten Verbundprojekts Designnetz (01/2017-12/2020), das verschiedene Flexibilitätsoptionen erprobt, wird im Rahmen freigeschalteter Leistungsanteile eine netzdienliche Fernsteuerung der Anlage durch den Stromnetzbetreiber erprobt.

www.designnetz.de

Niederaußem

In Niederaußem werden an einem Braunkohle-Kraftwerk der RWE Power AG durch die Mitsubishi Hitachi Power Systems Europe (MHPSE) als Systemintegrator und diverse Partner im Rahmen des EU-SPIRE-Förderprojektes MefCO₂ (12/2014 - 11/2018) eine PEM-Elektrolyse, eine Anlage zur Abscheidung von Kohlendioxid aus dem Kraftwerks-Rauchgas und einer Methanol-Erzeugungsanlage errichtet. Partner sind u. a. die Carbon Recycling International (Island) für den Reformer, Hydrogenics Europe (Belgien) für die 1 MW PEM-Elektrolyse sowie die Universität Duisburg-Essen für den CO₂-Abscheideprozess.

Ziel ist die Demonstration der ökonomischen Machbarkeit der Aufwertung von abgedehntem CO₂ zu einem vielseitigen Grundstoff unter Einsatz von Wasserstoff, der mit überschüssiger erneuerbarer Energie erzeugt wurde. Entsprechend wird ein lastflexibler Betrieb des Reformers angestrebt. Die Anlage wird eine Methanol-Produktionskapazität von etwa 1 t/d haben.

www.mefco2.eu

Der RWE-Standort Niederaußem ist auch an dem Ende 2017 gestarteten Projekt Align-CCUS, das aus dem europäischen ERA-NET Act Fond gefördert wird, beteiligt. Das Projekt erarbeitet Low-Carbon-Lösungen für fünf europäische Industrieregionen. Die Kosten der CO₂-Abscheidung (CC) sollen reduziert, Fragen des Kohlendioxidtransports und seiner Speicherung (S) im Meeresboden gelöst und Möglichkeiten der CO₂-Konversion bzw. Kohlenstoffwiederverwendung (U=utilization) entwickelt werden. Insbesondere soll im Schwerpunkt „Wiederverwendung“ in Niederaußem mit einer durch MHPSE gelieferten Anlage die direkte Herstellung der methanol-basierten Diesel-Ersatzkraftstoffe DME und OME (Dimethylether, Oxymethylen-Dimethylether) aus den lokal gewonnenen Einsatzstoffen H₂ und CO₂ erprobt werden. Um die Brauchbarkeit der Kraftstoffe zu testen, wird durch die RWTH Aachen und die FEV GmbH ein angepasstes Einspritzsystem entwickelt und mit den Ersatzkraftstoffen in einem Fahrzeug zum Einsatz gebracht. Außerdem wird ein 240 kW Stromerzeuger für DME angepasst. Das Forschungszentrum Jülich führt die Life-Cycle-Analysen (LCA) durch. Die Größe des von Asahi Kasei gelieferten Elektrolyseurs ist bei Drucklegung noch nicht bekannt.

www.alignccus.eu

Saerbeck

In Saerbeck wird im Rahmen des NRW-geförderten Projekts EnerPrax (12/2016 - 11/2019) am dortigen Bioenergiepark ein kombinierter Energiespeicher errichtet. Dazu gehören eine PEM-Elektrolyse mit 12 kW Eingangsleistung, die mit einer biologischen Methanisierung gekoppelt wird, zwei Batterien (Blei/Lithium-Ionen) mit je 6 kW Leistung und eine 15 kW Redox-Flow-Batterie. Der Park verfügt neben je 4 Blockheizkraftwerken für Biogase mit insgesamt 2 MW_{el} aktuell über 7 Windkraftanlagen mit je 3 MW Leistung und etwa 6 MW an Photovoltaik.

www.energiespeicher.nrw

Steinfurt

Der Kreis Steinfurt, in dem auch Saerbeck liegt, befasst sich insgesamt intensiv mit dem Thema Wasserstoff als Energiespeicher. Im Rahmen der Strategie Energieland 2050 will der Kreis seinen Energiebedarf vollständig aus lokalen erneuerbaren Energien decken. Dazu soll die vor Ort gewonnene Energie auch weitgehend im Kreis genutzt werden. Die Konzeptstudie „Steinfurter Flexkraftwerke“ von 2016 zeigt den möglichen Beitrag einer Wasserstoffwirtschaft hierzu.

www.energieland2050-dialog.de

Wesseling

Am Standort Wesseling der Shell Rheinland Raffinerie wird eine Wasserstoff-Elektrolyseanlage mit einer Nennleistung von 10 MW gebaut. Als eine der größten PEM-Elektrolysen weltweit hilft sie, das Stromnetz bei einem zunehmenden Anteil an fluktuierenden erneuerbaren Energien zu stabilisieren. Sie wird im Rahmen des Projekts Refhyne zusammen mit ITM Power, SINTEF, thinkstep und Element Energy mit Hilfe des europäischen Förderprogramms FCH 2 JU installiert. Der Startschuss erfolgte im Januar 2018.

Die Shell Rheinland Raffinerie verwendet jährlich für ihre Produktionsprozesse rund 180.000 t Wasserstoff aus Dampfreformierung. Mit Werken in Köln-Godorf und Wesseling ist sie die größte deutsche Raffinerie. Pro Jahr werden rund 17 Mio. t Rohöl verarbeitet. Die Elektrolyse, betrieben mit Strom aus erneuerbaren Energien, soll eine Schlüsseltechnologie für eine CO₂-freie Wasserstoff-Erzeugung in der Raffinerie werden, da der Wasserstoff vollständig in die Raffinerieprozesse integriert werden kann. Der Standort erlaubt es, die Anlagen zu erweitern, um Wasserstoff an Kunden außerhalb der Raffinerie zu liefern. So wird er eine wichtige Rolle in der Integration von Energiespeicher und Netzausgleich spielen.

www.fch.europa.eu



Wasserstofflogistik

Die Wasserstofflogistik umfasst alle Aspekte von der Quelle bis zum Rad – von der Primärenergiequelle über Konditionierung (flüssig, gasförmig), Speicherung und Transport (Gasflaschen, Kryobehälter, Trailer, Pipeline) bis zur Betankung von Fahrzeugen. Eingeschlossen sind sämtliche Vorgänge an den Tankstellen: Onsite-Wasserstoffherstellung mittels Elektrolyse, Onsite-Erdgasreformierung, Verdampfung von flüssigem Wasserstoff oder Verdichtung zur Betankung von Hochdruckgasspeichern. Die Auswahl von geeigneten Logistikkonzepten zur Wasserstoffbereitstellung orientiert sich an Kriterien wie Wirtschaftlichkeit, Effizienz und Umweltwirkungen und ist in starkem Maß abhängig von folgenden Aspekten:

- genutzte Primärenergie (Wind, Sonne, Biomasse, Erdgas),
- Technologie und Dimensionierung der Anlagen zur Wasserstoffherstellung,
- regionale und lokale Gegebenheiten (Entfernung Tankstelle von der Wasserstoffherzeugung, Nachfragesituation) und
- der Wasserstoffanwendung (mobil, stationär, Leistung).

Für einen Übergangszeitraum, in dem erneuerbare Energien nicht in ausreichendem Maß zur Verfügung stehen, kann der Zugriff auf konventionell erzeugten Wasserstoff sinnvoll sein. Bereitstellungswege für gezielte Anwendungen müssen unter den genannten Voraussetzungen vergleichend analysiert und bewertet werden. Die technischen Voraussetzungen für die Nutzung des Energieträgers Wasserstoff im Verkehr sind verfügbar, doch fehlt es derzeit noch an einer flächendeckenden, nachhaltigen Wasserstoffinfrastruktur.

Wasserstoffspeicherung

Die Speicherung von Wasserstoff ist ein entscheidendes Kriterium für den wirtschaftlichen Erfolg der Wasserstoffnutzung für Energieumwandlungssysteme mit Brennstoffzellen. Weltweit wird mit großer Intensität an der Lösung dieser Problematik gearbeitet. Insbesondere bieten sich die in der Abbildung unten gezeigten Teilloptionen an.

Bei einer umfassenden Bewertung der einzelnen Systeme (Wasserstoffbehälter, Speichermasse, Peripherie, Be- und Entladung) müssten Kriterien wie Speichereffizienz, Energiebedarf (Energieeffizienz), Lebensdauer, Be- und Entladegeschwindigkeit, Speicherform, Wasserstoffverluste sowie Kosten herangezogen werden. Von besonderer Bedeutung sind die nachfolgend erörterten Speicherformen Hochdruckgasspeicher, Flüssiggasspeicher, Metallhydridspeicher, chemische Hydridspeicher (anorganische und organische Verbindungen) sowie die großtechnische Speicherung in Salzkavernen, wie sie im Zusammenhang mit der Energiewende diskutiert wird.

Physikalische Speicher

Hochdruckgasspeicher

(350 bis 700 bar, 23 bis 39 g H₂ pro Liter) Tank-speicherdichte in Faserverbundbauweise bis 4,5 Gewichtsprozent H₂

Flüssiggasspeicher

(-253 °C, 1 bar, 71 g H₂ pro Liter)

Tankspeicherdichte mit Stahlhülle bis 6 Gewichtsprozent H₂

Adsorptionsspeicher

(Van-der-Waals- oder andere Sorptionsbindungen), z. B.: Zeolithe, C-Nanostrukturen, Metal-Organic-Frameworks (MOF)

Chemische Speicher

(chemische Verbindungen des H₂ mit Metallen und Nichtmetallen)

Metall-Hydridspeicher

Klassische Metallhydride: $\text{LaNi}_5\text{H}_6 \rightleftharpoons \text{LaNi}_5 + 3 \text{H}_2$

Komplexe Metallhydride: $\text{NaAlH}_4 \rightleftharpoons \text{NaH} + \text{Al} + 3/2 \text{H}_2$

Chemische Hydridspeicher

$\text{NaBH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons 4\text{H}_2 + \text{NaBO}_2$ (Beladung mit H₂ nicht im Pkw)

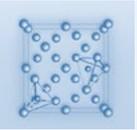
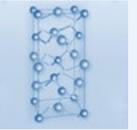
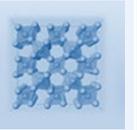
Kovalente und flüssige organische Hydridspeicher

Ammoniak, Borane, Kohlenwasserstoffe (z. B. Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHC))

Kavernenspeicher

(Untergrundhohlspeicher in Salzstöcken)

Wasserstoff-Speichertechnologien

						
Flüssigwasserstoff	Kryo-adsorption	Zwischengitterplatz-Metallhydride	Druckwasserstoff	Alanate	Salzartige Metallhydride	Wasser
LH ₂	Aktivkohle	FeTiH _x /LaNi ₅ H _x	CGH ₂	NaAlH ₄	MgH ₂	H ₂ O

Betriebstemperatur:

-253 °C	>-200 °C	0 - 30 °C	25 °C	70 - 170 °C	330 °C	>>1000 °C
---------	----------	-----------	-------	-------------	--------	-----------



Produktion eines CFK-Behälters bei EMS am Standort Jülich

Druckbehälter zur gasförmigen Speicherung von Wasserstoff

Wer Wasserstoff als Energieträger nutzen will, muss Mittel und Wege finden, um ihn zu speichern. Denn die geringe volumetrische Energiedichte von Wasserstoff macht es erforderlich, ihn stark zu komprimieren, um auf angemessenem Raum Wasserstoff auch in größeren Mengen speichern zu können. Die Speicherung unter hohem Druck in Gasdruckbehältern hat sich in diesem Zusammenhang als sinnvolle Lösung etabliert.

Grundsätzlich lassen sich vier verschiedene Bauweisen von Gasdruckbehältern unterscheiden:

- Typ I = konventionelle Gasflaschen aus Stahl
- Typ II = Stahlliner umfangsgewickelt mit Verbundfaser
- Typ III = Metallischer Liner vollumwickelt mit Verbundfaser
- Typ IV = Kunststoffliner vollumwickelt mit Verbundfaser

Moderne Typ-IV-Behälter gelten aufgrund ihres geringen Gewichts, der außerordentlichen Festigkeit des Materials und ihrer Eignung zur kosteneffizienten Serienfertigung für die aktuelle und künftige Wasserstoffspeicherung als Mittel der Wahl.

EMS ist ein führender Anbieter von Typ-IV-Druckbehältern aus carbonfaserverstärktem Kunststoff (CFK). Bereits im Jahr 1999 – also in einer Zeit als Stahlflaschen Standard und CFK-Produkte noch so gut wie unbekannt waren – wurde am Standort Jülich eine vollständig aus CFK gefertigte Typ-IV-Gasflasche für den Betrieb zugelassen. Es handelte sich um die europaweit erste Zulassung eines solchen Produkts. Zu den heute nachgefragten Produkten zählen insbesondere CFK-Drucktanks für mobile Anwendungen

(Autos, Busse, Lkw, Züge) mit einem Betriebsdruck von bis zu 700 bar sowie Behälter zur stationären Nutzung, etwa im Rahmen einer Wasserstofftankstelle für diese Fahrzeuge. Der Standort Jülich profitiert dabei zusätzlich von seiner günstigen Lage in unmittelbarer Nähe zum Forschungszentrum Jülich und zur RWTH Aachen und der Einbindung in wissenschaftliche Forschungsnetzwerke.

Kontakt:

E&MS GmbH
 Johannes Lorenz
 Tel. 02461/657200
 Johannes.lorenz@ems-evolves.com

www.ems-evolves.com

Typ-IV-Druckbehälter zur Wasserstoffspeicherung



Quelle: EMS, Jülich

Wasserstofflogistik auf der Straße

Transportlösungen für Wasserstoff bis Ende der 1990er Jahre basierten ausschließlich auf Behälterkonzepten der Kategorie Typ I. Hier gab es Lösungen mit bis zu 400 Einzelbehältern, die zu Großbündel auf einen Trailer liegend montiert wurden. Das Speichervolumen lag bei ca. 3.000 m³, Druckstufe 200 bar.

Bis heute gibt es noch eine Transportlösung basierend auf Typ I Behältern – bekannt als Tube-Trailer –, bei denen Speichervolumina bis 4.500 m³ bei 200 bar möglich sind und die noch ihre Marktakzeptanz haben. Hauptargumente sind hier die geringe Behälteranzahl (max. 10 Stk./Fahrzeug) sowie der Prüfzeitraum, denn die Behälter sind nur alle 10 Jahre prüfpflichtig.

Durch den Einsatz neuer Behältertechnologien ist ein effektiverer Transport möglich geworden. Composite-Behälter bieten ein sehr gutes Kilogramm/Liter-Verhältnis gegenüber den reinen Stahlbehältern. Dies führt dazu, dass wesentlich größere Ladevolumina gefahren werden können. Auch ein höherer Druck bis 500 bar kann heute geladen werden.

Das 300 bar System hat sich am weitesten etabliert: mit diesen Systemen können bis zu 14.500 m³ transportiert werden. Gebaut werden die Systeme als Trailer-Fahrzeuge oder als Container (MEGC, Multiple Element Gas Container). Trailer-Konzepte sind etwas leichter als die Kombination Container/Chassis und haben eine etwas höhere Ladekapazität. Container-Konzepte bieten wiederum den Vorteil, im Bedarfsfall das Chassis tauschen zu können. Speziell beim Werkstattbesuch ist dies ein erheblicher Vorteil, denn dadurch verringern sich die Standzeiten beträchtlich. Containerlösungen können auch im kombinierten Verkehr gefahren werden, z. B. Straße/Schiene. Es sind Container von 10 bis 45 ft am Markt verfügbar. Auch die Containerversion mit einem Chassis erreicht das zulässige Gesamtgewicht nicht, vielmehr wird in dieser Kombination zuerst die Volumengrenze erreicht.

Transportabler Wasserstoffdruckspeicher



Quelle: Wystrach

Alle Systeme von Typ I (Tube-Trailer) bis Typ IV haben heute ihre Berechtigung. Ist jedoch ein hohes Ladevolumen gefragt, sticht hier das Transportsystem mit den Composite-Behältern (Typ III/Typ IV) besonders hervor (Abbildung oben). Hier wird nahezu die dreifache Menge Gas gefahren, was sich erheblich auf die Logistikkosten und die Umwelt auswirkt, da sich der Einsatz des Zugfahrzeugs gegenüber der alten Typ I-Lösung auf ein Drittel reduziert. Die ersten Generationen der neuen Systeme hatten noch eine Prüfzeit von 5 Jahren, somit waren hier die Betriebskosten höher. Dies änderte sich jedoch zunehmend auf 10 Jahre. Die Verlängerung der Prüffrist basiert auf positiven Testergebnissen der letzten Jahre – somit auch ein Plus in Sachen Sicherheit.

Typ IV Behälter bieten eine hohe Lastwechselfreudigkeit und haben dadurch bedingt auch keine Lebensdauerbeschränkung. Eingesetzte Absperreinrichtungen und Sicherheitssysteme sorgen dafür, dass während der Fahrt die hinten/seitlich montierten Verrohrungen kein Gas führen. Speziell dem Auffahrunfall wird hier Rechnung getragen. Weitere Sicherheitssysteme für den Brandfall können installiert werden, die Systeme garantieren ein kontrolliertes Ablassen.

Die neuen 300 bar Systeme, wie sie die Fa. Wystrach in Weeze baut, bringen außerdem den Vorteil der Nutzmenge über den erhöhtem Druck beim Abtanken: In der industriellen Nutzung werden in der Regel 40 bar Tanks befüllt, durch die Druckdifferenz 40/300 oder 40/200 bar können mehr Kunden mit einer Container/Trailer-Füllung angefahren werden.

Kontakt:

Wolfgang Wolter
Wystrach GmbH
Tel. 02837/913513
wolter@wystrach-gmbh.de

www.wystrach-gmbh.de

Wasserstoff-Abfüllzentrum und Wasserstoff-Pipeline

Die AIR LIQUIDE Deutschland GmbH betreibt in Marl das größte Abfüllzentrum Europas für gasförmigen Wasserstoff. Der Wasserstoff wird im Chemiepark Marl im Wesentlichen mittels Dampfreformer erzeugt und auf bis zu 300 bar verdichtet. Wasserstoff-Teilströme versorgen Produktionsanlagen im Chemiepark Marl, das Abfüllzentrum und die Pipeline. Im Abfüllzentrum erfolgt die Abfüllung von Wasserstoff-Trailern mit 200 bar Betriebsdruck und einem Inhalt von 3.500 bis 7.500 m³ (290 kg - 625 kg) sowie Stahlflaschen und Flaschenbündeln mit Betriebsdrücken von 200 und 300 bar. Mittels Nachreinigung werden Qualitäten bis 99,9999 Volumenprozent erreicht. Jährlich werden ca. 15.000 Trailer-Fahrzeuge sowie eine Vielzahl von Flaschen und Bündeln in Marl abgefüllt.

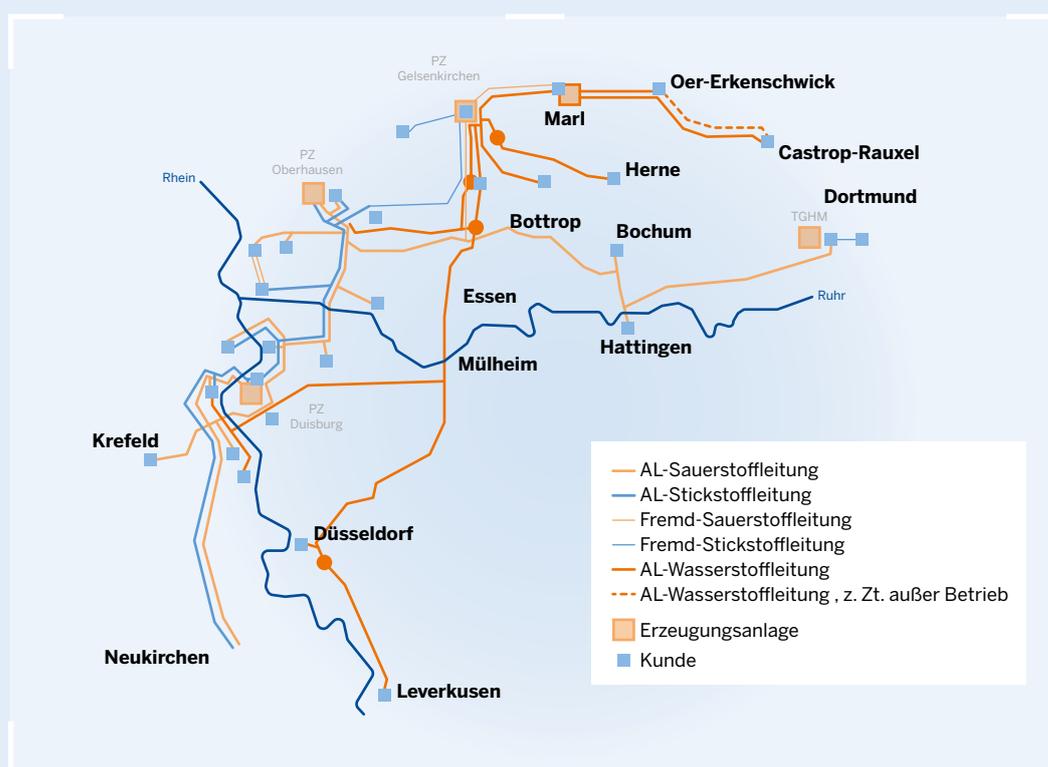
Dieser Standort ist auch Ausgangspunkt für die längste deutsche Wasserstoff-Pipeline mit einer Ausdehnung von rund 240 Kilometern (mit den Endpunkten in Castrop-Rauxel und Leverkusen sowie Anschlüssen in Krefeld und Oberhausen). Die Kapazität der Pipeline beträgt bis zu 40.000 m³ Wasserstoff pro Stunde bei Betriebsdrücken bis zu 25 bar. Mit dieser Pipeline ist ein sicherer und kostengünstiger Wasserstofftransport mit hoher Versorgungssicherheit gewährleistet. Bedarfsspitzen und Minderverbräuche einzelner Abnehmer können kompensiert und Industrie-Wasserstoff eingespeist werden.

Kontakt:

Andrea Feige
Air Liquide Deutschland GmbH
Tel. 0211/6699264
andrea.feige@airliquide.com

www.airliquide.com

Wasserstoff-Pipeline-Netz (240 km)





Quelle: Linde

Flüssiggasspeicher

Die Speicherung von Wasserstoff in flüssiger Form ist keine neuartige Technologie – sie wird in der Gaseindustrie bereits seit Anfang des 20. Jahrhunderts eingesetzt. Der Verflüssigungsprozess ist zwar energieintensiv, denn industrielle Anlagen wandeln elektrische Energie in Kälte, die für die Verflüssigung benötigt wird. Trotzdem ergibt sich aufgrund der höheren Energiedichte (d. h. es kann mehr Wasserstoff pro Lieferung transportiert und pro Aufstellfläche gespeichert werden) und des deutlich geringeren Energieaufwands für eine spätere Verdichtung in vielen Fällen ein betriebswirtschaftlicher Vorteil gegenüber einer Lieferkette, die auf komprimiertem, gasförmigem Wasserstoff aufbaut. Dieser Vorteil macht sich insbesondere bei hohen Wasserstoffbedarfen deutlich bemerkbar.

Der für Transport und Speicherung verwendete Flüssigwasserstofftank besteht im Wesentlichen aus zwei Behältern: Der äußere Behälter wird durch den atmosphärischen Druck belastet. Der sich im Hochvakuum befindliche innere Behälter durch Druckbelastung von innen. Die Behälter werden heute nahezu ausschließlich aus austenitischem Edelstahl gefertigt (Abbildung oben).

Eine Herausforderung der Flüssigwasserstoffspeicherung ist das langsame Verdampfen des Inhalts durch Wärmeinflüsse von außen (Leitung, Konvektion, Strahlung). Erfolgt über einen längeren Zeitraum keine Entnahme, lässt sich ein so genannter „Boil-off-Effekt“ (abgedampftes Gas) messen. Durch ausgereifte Isolationssysteme, aktive Kühlung oder die Kombination von Flüssig- und Druckspeicher kann der Zeitraum bis zum Eintreten einer Verdampfung jedoch entscheidend verlängert werden. Zudem kann die im Boil-off-Wasserstoff enthaltene Energie wiederum gespeichert und vielfältig genutzt werden, etwa zur Leitungskühlung, zur Energiebereitstellung über eine Brennstoffzelle oder zur Wärmeerzeugung durch Verbrennung. Dieser Effekt wirkt sich positiv auf die Energiebilanz des Gesamtsystems aus.

Kontakt:

Alexander Schadowski
Linde AG, Linde Gases Division
Tel. 0211/7481175
alexander.schadowski@linde.com

www.linde-gas.de

Feststoffspeicher

Neben Druck- und Flüssigwasserstoffspeichern bieten Feststoffspeicher (metallische und nicht-metallische Hydridspeicher und Speicher auf Kohlenstoffbasis oder Mischformen dieser Typen) eine dritte Alternative zur Speicherung von Wasserstoff. Bisherige reversible Hydridsysteme speichern bis zu 1,5 Gewichtsprozent Wasserstoff bei Raumtemperatur. Seit einigen Jahren werden komplexe Hydride mit bis zu 5,5 Gewichtsprozent H_2 -Speicherkapazität untersucht: zum einen reversible Hydridverbindungen (Wiederbeladung unter Wasserstoffdruck möglich, z. B. $NaAlH_4$) und zum anderen nicht-reversible Hydride (Wiederbeladung unter Wasserstoffdruck nicht möglich, zur Regenerierung sind chemische Umwandlungen notwendig, z. B. bei $NaBH_4$). Für mobile Systeme werden reversible Hydridsysteme bevorzugt.

Die Verwendung von Metallhydriden als Wasserstoffspeicher im mobilen Bereich wird durch die Anforderungen an die Geschwindigkeit der Hydrierung limitiert. Die Wiederbeladung (Tankvorgang) sollte unter folgenden Bedingungen stattfinden: Drücke von $p < 50$ bar, Temperaturen von $T < 100$ °C und Zeiten von $t < 10$ min. Gegenwärtig sind allerdings keine Systeme bekannt, die diesen Anforderungen bei hinreichend hoher Speicherkapazität gerecht würden.

Das Max-Planck-Institut für Kohlenforschung in Mülheim an der Ruhr betreibt Grundlagenforschung auf den Gebieten der organischen und metallorganischen Chemie, der homogenen und heterogenen Katalyse sowie der theoretischen Chemie mit dem Ziel, neue Methoden zur selektiven und umweltfreundlichen Stoffumwandlung zu entwickeln.

Für die Speicherung von Wasserstoff werden neue Materialien auf der Basis von komplexen Aluminiumhydriden erforscht und weiterentwickelt. Zwar erreichen komplexe Aluminiumhydride auf der Grundlage von $NaAlH_4$ reversible Speicherkapazitäten von bis zu 5 Gewichtsprozent Wasserstoff (1 g Speichermaterial setzt rund 600 ml Wasserstoff frei), aber für Anwendungen im mobilen Bereich werden Materialien mit höherem Wasserstoffgehalt gesucht.

Die Geschwindigkeit der Freisetzung und der Beladung der Materialien mit Wasserstoff kann durch die Wahl von geeigneten Katalysatoren in einem weiten Bereich variiert werden. Dadurch lassen sich die Eigenschaften des Speichermaterials an die Erfordernisse von Brennstoffzellen anpassen. Die Entwicklung dieser Feststoffspeicher erfolgt in enger Kooperation mit Automobilkonzernen. Gemeinsam mit dem Institut für Energie- und Umwelttechnik (IUTA) werden Lösungen zur Integration von Feststoffspeichern und Brennstoffzellen in praxistaugliche Komplettsysteme für den Leistungsbereich 200 W_{el} erarbeitet (Abbildung unten).

Metallhydride speichern nicht nur reversibel Wasserstoff, sondern auch große Mengen Wärme und können daher als thermochemische Wärmespeicher zum Einsatz kommen. Wärme kann bei einem Wärmeüberschuss zugeführt (unter Abgabe des Wasserstoffs) und bei Wärmebedarf bei gleicher Temperatur und verlustfrei wieder abgerufen und genutzt werden. Thermochemische Wärmespeicher auf Basis von Metallhydriden bieten nicht nur eine Verknüpfung zur Wasserstofftechnologie, sondern können auch zur Entlastung von Stromnetzen und zur Aufnahme von Überschussenergie (Power-to-Heat) beitragen. Basierend auf Mg-Verbindungen werden Materialien und Systeme für den Temperaturbereich 300 - 600 °C entwickelt.

Kontakt:

Dr. Michael Felderhoff
 Max-Planck-Institut für Kohlenforschung
 Tel. 0208/3062368
felderhoff@mpi-muelheim.mpg.de
www.kofo.mpg.de



Leichtmetall-Speichertank

Geeignet für Metallhydride mit stranggepressten Aluminiumprofilen zur optimalen Wärmeübertragung für die Wasserstoffversorgung einer HT-PEM Brennstoffzelle (geöffnet zur Aufnahme von ca. 2.0 kg Na_3AlH_6). Kooperationspartner: MPI Mülheim, IUTA Duisburg, FWB Brökelmann Aluminiumwerk GmbH & Co. KG, Trimet Aluminium AG).

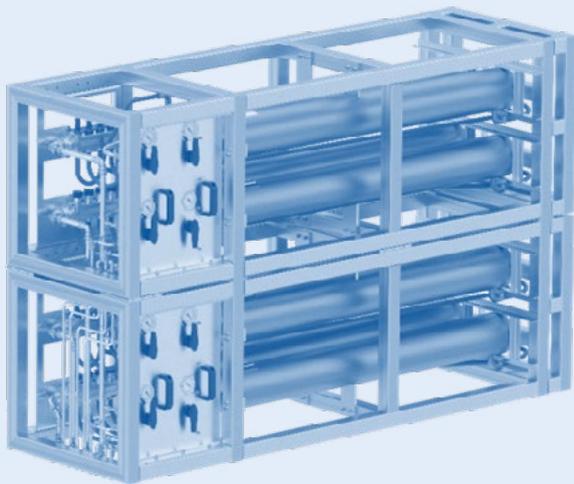
Quelle: MPI für Kohlenforschung

Saisonale Energiespeicherung in Metallhydrid-Speichern

Als Spezialist für Pulvermetallurgie beschäftigt sich GKN Sinter Metals bereits seit einigen Jahren mit der Entwicklung von Wasserstoffspeichern auf Basis von Metallhydriden. Im eigenen Forschungszentrum in Radevormwald wurde dabei nicht nur die Speicherkapazität verschiedener Metallpulver untersucht, sondern auch die Auswirkung verschiedener Kompaktierungen des Materials. Diese Erkenntnisse waren ausschlaggebend für die Entwicklung eines kompletten Wasserstoff-Energie- und Wärmespeichersystems auf Metallhydrid-Basis.

Für ein Pilotprojekt entsteht derzeit ein solches Speichersystem mit einer Leistung von 130 kWh – ausreichend, um einen Vierpersonenhaushalt für rund 12 Tage mit Strom und zusätzlich sechs Tage mit Wärme zu versorgen. Auf diese Weise erreicht das GKN System eine Gesamtenergieeffizienz von bis zu 90 %. Im besonderen Fall des Pilotprojektes in den Südtiroler Alpen wird das Speichersystem in Verbindung mit einer kleinen Wasserturbine eingesetzt. Das Haus hat keinen Anschluss an das öffentliche Stromnetz. Neben der kurzfristigen Speicherung der Energie zur Abdeckung von Spitzenlasten oder bei Ausfall der Turbine steht bei diesem Projekt insbesondere auch die saisonale Speicherung von Energie in Wasserstoff im Mittelpunkt.

Transportabler Wasserstoffdruckspeicher



Quelle: GKN

Kontakt:

Dr. Nils Bornemann
Global VP Advanced Engineering
Tel 0228/9335140
nils.bornemann@gkn.com

www.gkn.com

H2Tank2Go® - Wasserstoffspeicherpatronen



H2Tank2Go® befüllt mit Hydrolium (dunkles Pulver, Bild Mitte), H2Tank2Go® an einem Tankautomat

Quelle: Zoz GmbH

Metallhydrid-Speicher in Wechselkartuschen

Komplexe Metallhydride könnten absehbar eine Klasse der besten Wasserstoff-Energiespeicher der Zukunft repräsentieren. Die größte bekannte Speicherkapazität besitzt dabei Lithium-Borhydrid (LiBH_4) mit einer theoretischen H_2 -Kapazität von 18,3 Gew. %



und liegt damit etwa sechsmal höher als heute bekannte Raumtemperaturhydride mit 2 - 4 Gew. %. Um diese Möglichkeiten kommerziell verfügbar zu machen, sind jedoch noch große Forschungsanstrengungen nötig.

Seit 2010 entwickelt und baut die Fa. Zoz in Wenden kleine Wasserstoffspeicherpatronen namens H2Tank2Go®, die mit einem speziellen Raumtemperaturhydrid befüllt sind (Abbildung oben). Bei Raumtemperatur ist der Druck innerhalb eines Behälters ca. 5 bar. In einem Hochdrucktank müssten 700 bar überschritten werden, um die gleiche Wasserstoffmenge einzulagern. Die volumetrische Speicherdichte des H2Tank2Go® ist tatsächlich höher als die der sogenannten Kryotanks, in denen Wasserstoff bei extrem niedrigen Temperaturen (-253 °C) in flüssiger Form gespeichert wird.

Diese flaschengroße Kartusche (Volumen 0,95 l) ist mit dem metallischen Speichermedium nicht vollständig gefüllt, kann jedoch reversibel etwa 50 g (~ 556 Normalliter, entspricht etwa 1,67 kWh chemischer Energie) an H_2 speichern und verbleibt in Form eines losen sehr feinen Pulvers im Tank. Die Möglichkeit, über „click'n'go Systeme“ (Schnellkupplungen) eine leere Kartusche durch eine frisch geladene zu ersetzen, ist auch für die Elektromobilität sehr interessant, insbesondere auch deshalb, weil da eine Infrastruktur quasi bereits vorhanden ist (vgl. Tausch von CO_2 -Kartuschen im Baumarkt).

Spezielle Flaschenhalterungen können z. B. in Elektro-Pkw mit Brennstoffzellen-Range-Extender sechs Metallhydridtanks aufnehmen. Die durch die Brennstoffzellen erzeugte Abwärme kann direkt auf die H_2 -Tanks geleitet werden, womit eine beschleunigte Freisetzung des gespeicherten Wasserstoffs erreicht wird. Das Hauptanwendungsziel ist daher die Nutzung als Wasserstoff-Reichweitenverstärker für bestehende batteriebetriebene Fahrzeuge, die ihre Li-Ion-Batterien jederzeit aufladen, was zu einer erhöhten Unabhängigkeit von begrenzten Ladeorten führt. Das Design für das System ermöglicht jedoch auch die Verwendung als unabhängige Stromversorgung, wo immer Strom benötigt wird, z. B. auf dem Boot oder beim Camping.

Kontakt:

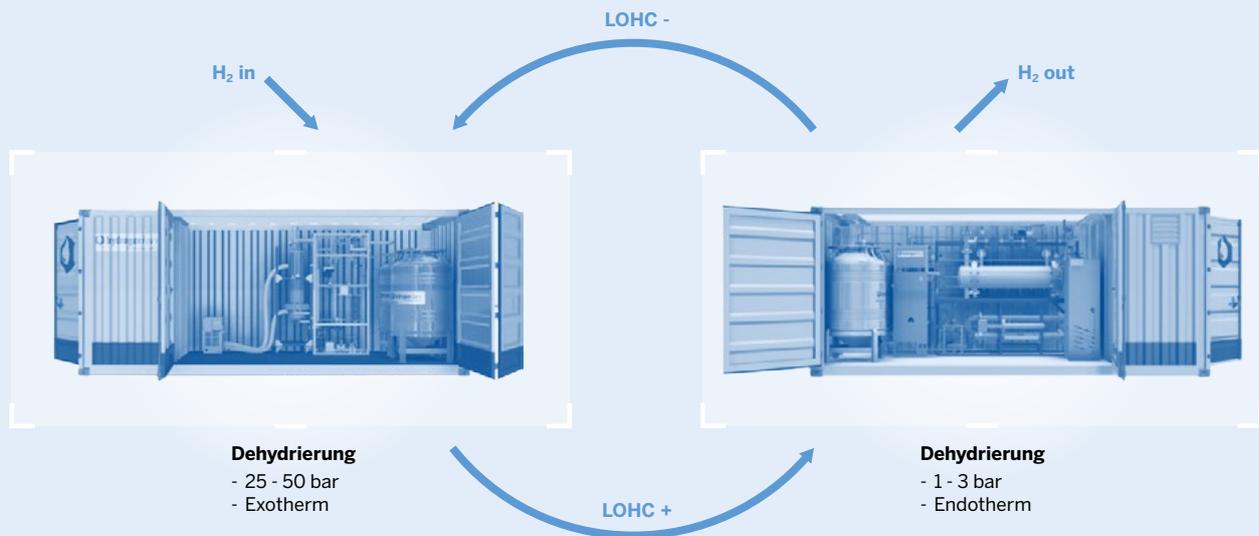
Dr. Henning Zoz
Zoz Group
zoz@zoz.de

www.zoz.de



„IronBird“-Stromkoffer im Kofferraum

Schematische Darstellung des reversiblen LOHC Kreislaufs



Quelle: Hydrogenious Technologies GmbH

Flüssige organische Wasserstoffträger (LOHC)

Die Speicherung von Wasserstoff in flüssigen organischen Trägerflüssigkeiten (engl. Liquid Organic Hydrogen Carriers, kurz LOHC) ist eine innovative Technologie, die den chemischen Speichern zuzuordnen ist. Kernaspekt und Vorteil dieser vierten Form der Speicherung ist die Vermeidung von elementarem Wasserstoff in der stationären Bevorratung und im Transport sowie die gleichzeitige Erhöhung der Speicherdichte auf bis zu 6,23 % bezogen auf die Masse. Im Verlauf der Entwicklungsgeschichte von LOHC haben sich aromatische Kohlenwasserstoffe als besonders geeignete Trägersubstanzen herauskristallisiert. Besonderes Interesse erfahren dabei die folgenden Trägersystem-Kombinationen: Toluol/Methylcyclohexan (entwickelt z. B. durch die japanische Firma Chiyoda) sowie Dibenzyltoluol/Perhydro-Dibenzyltoluol (entwickelt z. B. durch die Firma Hydrogenious Technologies in Erlangen).

Das Grundkonzept der LOHC-Technologie ist in der Abbildung oben dargestellt. Molekularer Wasserstoff wird mittels katalytischer Hydrierung an eine Trägerflüssigkeit gebunden. Die Reaktion ist exotherm und findet bei Temperaturen über 150 °C und Drücken von 25 - 50 bar statt. Das Produkt der Hydrierung ist die mit Wasserstoff gesättigte Trägerflüssigkeit, die sich in der bestehenden Infrastruktur für fossile Kraftstoffe lagern und transportieren lässt. Die Freisetzung des Wasserstoffs bei Bedarf erfolgt über die komplementäre, katalytische Dehydrierung. Dieser endotherme Prozess benötigt Temperaturen > 250 °C bei Drücken kleiner 3 bar. Das Produkt der Dehydrierung ist molekularer Wasserstoff und die wieder ungesättigte

Trägerflüssigkeit. Letztere kann nun wieder dem reversiblen Kreislauf zugeführt werden. LOHC wird somit nicht verbraucht, sondern dient rein als Pfandsystem für Wasserstoff, das zyklisch be- und entladen wird.

Die Vorteile dieses Speichersystems sind die sichere Lagerung und der effiziente Transport von Wasserstoff bei Umgebungsbedingungen in der existierenden Infrastruktur für fossile Brennstoffe.

Das infrastrukturelle Grundkonzept, das die LOHC-Technologie zu einer wirtschaftlichen Alternative gegenüber Druck- und Flüssigwasserstoff macht, besteht aus einer zentralen Wasserstoffquelle – konventionell oder erneuerbar – und mehreren dezentralen Wasserstoffverbrauchern. LOHC wird aktuell im kommerziellen Umfeld für die Versorgung von Industrieabnehmern eingesetzt. Insbesondere auch durch die ölähnlichen Eigenschaften von geeigneten LOHC-Systemen und dem damit erleichterten Handling wird die Technologie künftig verstärkt an Wasserstofftankstellen, mit Fokus auf Bussen, Zügen und Flotten zum Einsatz kommen.

Speicherung von Wasserstoff im geologischen Untergrund

Ohne große Speicher in geologischen Formationen ist die derzeitige hohe Versorgungssicherheit der bisher vorwiegend auf Kohle, Öl und Erdgas basierenden Energiewirtschaft nicht denkbar. So verfügt Deutschland in der Europäischen Union über den größten Erdgasvorrat fast ausschließlich in Porenspeichern und künstlich erstellten Salzkavernen. Ebenso wird Rohöl in zahlreichen Salzkavernen für längere Zeiträume bevorratet. Mit dem eingeleiteten Übergang auf erneuerbare Energieträger, allen voran wetterabhängiger Wind- und Solarenergie, ergeben sich völlig neue Anforderungen an den Ausgleich zwischen Erzeugung und Bedarf. Auch da ermöglichen Speicher in geologischen Formationen den Ausgleich über verschiedene Zeithorizonte, von kurzfristigen Windprognoseabweichungen über mehrtägige Flauten bis hin zu saisonalen Schwankungen und strategischen Reserven.

Für die großtechnische Speicherung von gasförmigem Wasserstoff bieten sich insbesondere künstlich erstellte Salzkavernen an, da Salzgestein eine extrem geringe Durchlässigkeit gegenüber Gasen wie Wasserstoff aufweist und zudem nicht mit Wasserstoff reagiert. Da dieser Speicher – im Gegensatz zu Porenspeichern – wie ein großer unterirdischer Tank aus einem großvolumigen Hohlraum mit Zugangsbohrung besteht, ist er für ein flexibles Ein- und Auslagern besonders geeignet. Die grundsätzliche Eignung von Salzspeicherkavernen für die Wasserstoffspeicherung ist durch jahrzehntelange Betriebspraxis sowohl in Großbritannien als auch in den USA nachgewiesen. Hinsichtlich einiger Komponenten besteht jedoch noch Entwicklungsbedarf aufgrund höherer Sicherheitsanforderungen in Deutschland. Die erforderlichen Entwicklungen können im Rahmen von Demonstrationsprojekten in überschaubarem Zeithorizont getätigt werden.

Typische Dimensionen einer Speicherkaverne sind Hohlräume von 250.000 - 750.000 m³, Durchmesser von 50 - 80 m und Höhen von mehreren 10 bis 100 m, abhängig von der zur Verfügung stehenden Salzmächtigkeit. Je nach Randbedingung werden für Wasserstoff Speicherdichten von 8 bis 11 kg je m³ geometrischen Hohlraum in Bezug auf das Arbeitsgas erreicht. Eine Kaverne von 500.000 m³ weist damit bei einem einmaligen Umschlag eine Speicherkapazität von 133 bis 183 GWh auf – bezogen auf den unteren Heizwert von Wasserstoff (Abbildung oben rechts). Je nach Auslegung der Zugangsbohrung beträgt die Leistung des Speichers somit mehrere 100 MW in Bezug auf den unteren Heizwert.

Die Standortwahl für die Errichtung eines Wasserstoffsystems mit Kavernenspeicher hängt im Wesentlichen von zwei Faktoren ab: Verfügbarkeit geeigneter Salzstrukturen



Speicherkaverne in Zechsteinsalz

Kapazität für Wasserstoff bis zu etwa 200 GWh.

Quelle: KBB

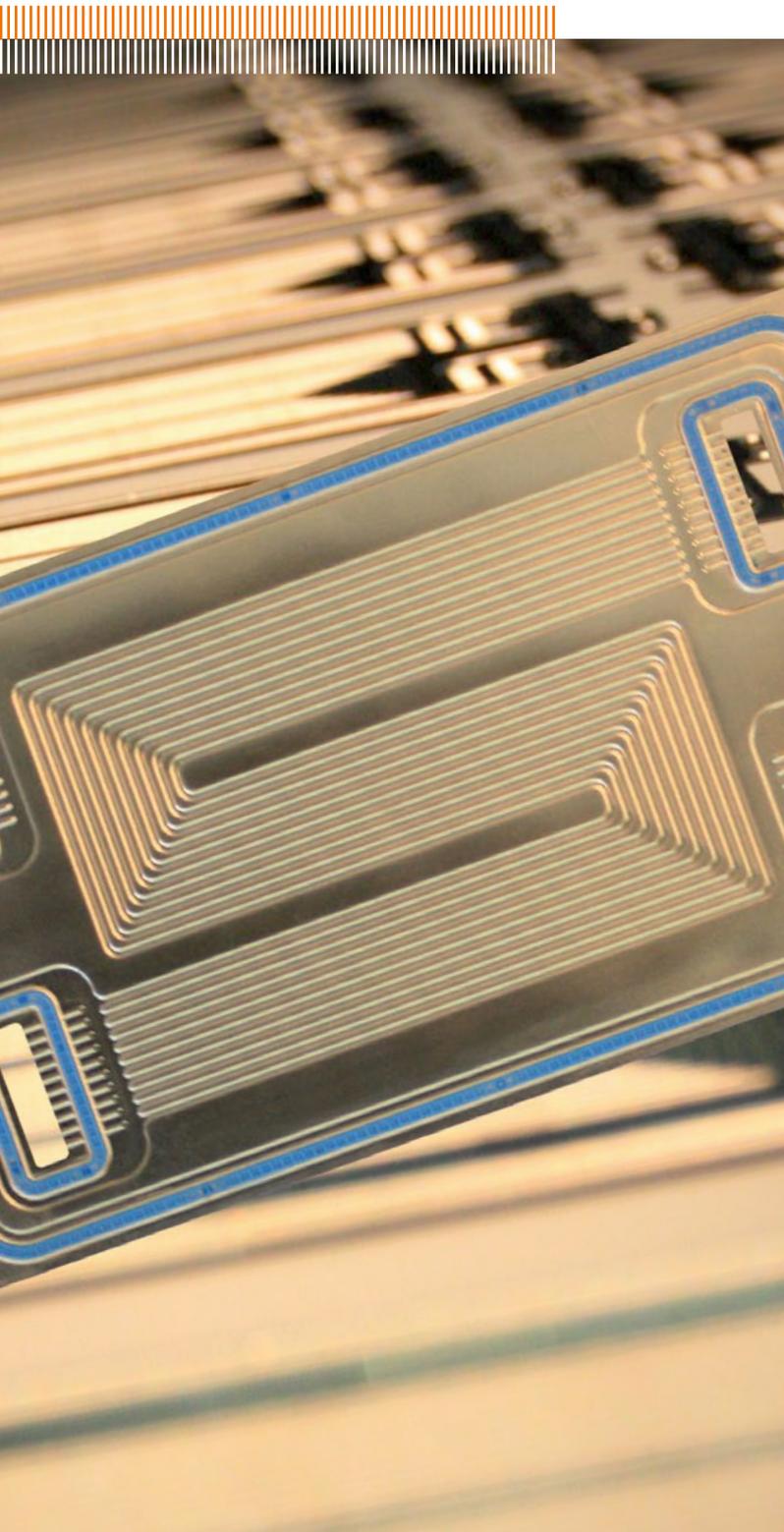
und konzeptionelle Einbindung in ein Energiesystem. Die geologische Verfügbarkeit in Deutschland ist sehr ungleichmäßig verteilt. Während vor allem Bundesländer wie Niedersachsen und Schleswig-Holstein eine Vielzahl geeigneter Strukturen aufweisen, ist in Süddeutschland eine Kavernenspeicherung so gut wie ausgeschlossen. Im Nordwesten von Nordrhein-Westfalen befindet sich das für den Kavernenbau gut geeignete Zechsteinsalz flächig in einer für den Kavernenbau geeigneten Teufenlage. Dort befinden sich die Kavernenspeicher Xanten und Epe bei Gronau. Letzterer ist einer der größten deutschen Gasspeicher in Salzkavernen. Die Kavernen werden dort von der Salzgewinnungsgesellschaft Westfalen für die Salzförderung erstellt und im Anschluss an Energieversorgungsunternehmen vermietet. Hier lagert ebenfalls ein Teil der strategischen Ölreserve der Bundesrepublik. Aufgrund der bereits vorhandenen Infrastruktur zur Kavernenerstellung sowie der vorhandenen Abnahmemöglichkeit der, während der Kavernenerstellung anfallenden Sole, bietet der Standort eine gute Ausgangsposition für die Errichtung eines Wasserstoffspeichers. Dies führt im Vergleich zu einer Standortneuentwicklung zu einer deutlichen Kosten- und Zeitreduktion.

Die Entwicklung eines neuen Speicherstandorts kann wegen des umfangreichen Planungs-, Genehmigungs- und Explorationsaufwands gut 10 Jahre in Anspruch nehmen. Eine zusätzlich positive Auswirkung in Bezug auf die Einbindung in ein Energiekonzept des Standorts Epe können die vergleichsweise geringe Entfernung zum Einspeisepunkt des Offshore-Windstroms bei Diele/Dörpen von gut 100 km sowie eine mögliche Anbindung an die bestehende Wasserstoffpipeline zwischen Marl, Castrop-Rauxel, Oberhausen, Krefeld und Leverkusen haben.

Kontakt:

Sabine Donadei
KBB Underground Technologies GmbH
Tel. 0511/54281738
donadei@kbbnet.de

www.deep-kbb.de



Brennstoffzellen

Wasserstoff kann in einem weiten Spektrum stationärer, mobiler sowie portabler energietechnischer Anwendungen genutzt werden. Motoren, Turbinen und vorrangig Brennstoffzellen als hocheffiziente, elektrochemische Energiewandler werden für den zukünftigen Einsatz von Wasserstoff als Energieträger entwickelt. Die Brennstoffzelle erzeugt Strom und Wärme direkt aus Wasserstoff oder – nach entsprechender Aufbereitung – auch indirekt aus Methan, Methanol, Diesel, Kerosin und anderen Energieträgern.

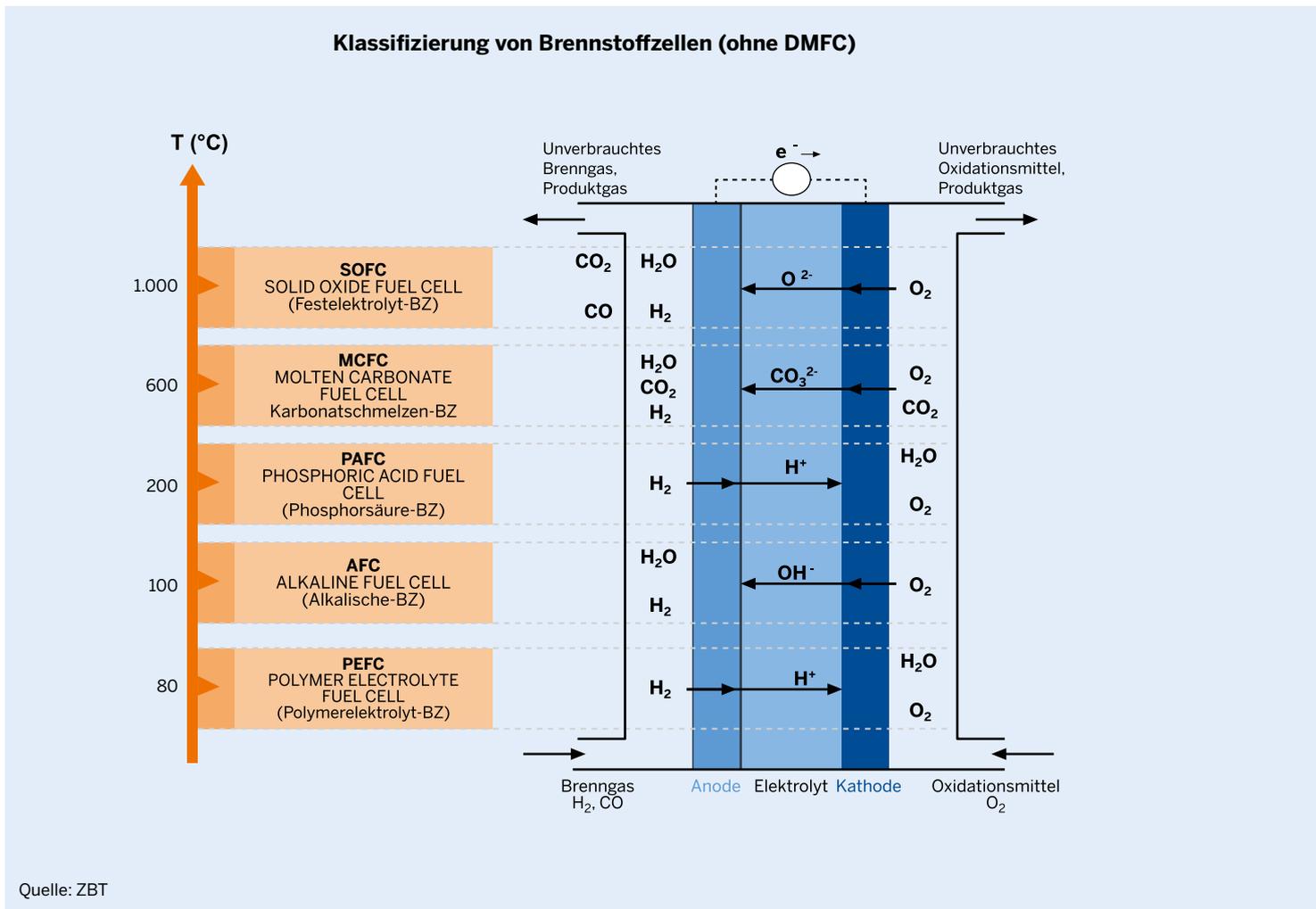
Für die Elektromobilität ist eine mit Wasserstoff betriebene Membran-Brennstoffzelle am besten geeignet. Diese Brennstoffzellen werden aber auch für die Versorgung von netzfernen Anwendungen oder Notstromversorgungen entwickelt. Je nach Wasserstoffbereitstellung sind im Vergleich zu heutigen Umwandlungssystemen mit konventionellen Energieträgern sehr niedrige Emissionswerte erreichbar; allerdings erfordert die Wasserstoffbereitstellung eine entsprechende Infrastruktur, Tankstellen oder Distribution von Wasserstoffspeichern (Kartuschen). Die Nutzung von Synthesegasen (H_2 -/ CO -/ CO_2 -Gemischen aus Erdgas, Kohle oder Biomasse) in Brennstoffzellen ist ebenfalls inzwischen Stand der Technik.

Brennstoffzellen - eine Übersicht

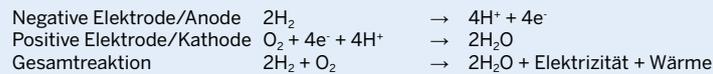
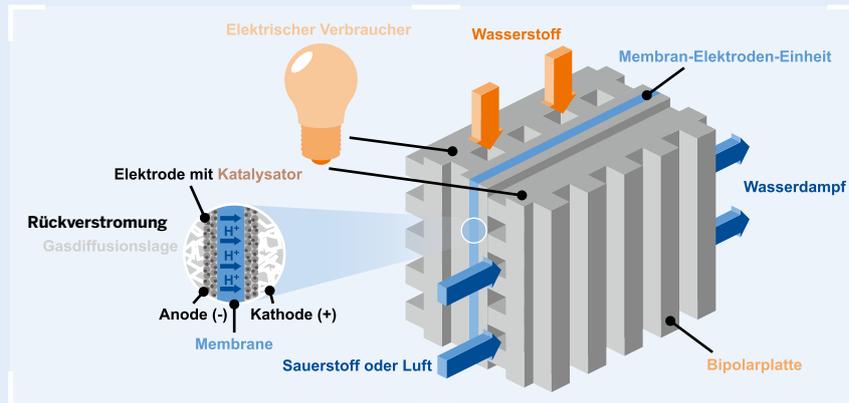
Heute werden mehrere Brennstoffzellentypen entwickelt, die sich durch Elektrolyt, Betriebstemperatur und Reaktionsgase unterscheiden:

- Alkalische Brennstoffzelle (AFC)
- Membran-Brennstoffzelle (PEMFC oder PEFC)
- Direkt-Methanol-Brennstoffzelle (DMFC)
- Phosphorsäure-Brennstoffzelle (PAFC)
- Karbonatschmelzen-Brennstoffzelle (MCFC)
- Oxidkeramische Brennstoffzelle (SOFC)

Aus ihren spezifischen Eigenschaften resultieren verschiedene Anwendungsgebiete. Unterschiedliche Brennstoffzellentypen (Abbildung unten) und entsprechende Energieträger vom Wasserstoff bis zum flüssigen oder gasförmigen Kohlenwasserstoffgemisch bedingen einen sehr unterschiedlichen verfahrenstechnischen Aufwand für die Brenngasbereitstellung vor dem Brennstoffzellensystem und weisen insgesamt unterschiedliche Wirkungsgrade und Stromkennzahlen für die gleichzeitige Strom- und Wärmeerzeugung auf.



Aufbau einer Brennstoffzelle



Quelle: ZBT

Energieumsatz in der Brennstoffzelle

Brennstoffzellen bieten die Möglichkeit, die in Brennstoffen (insbesondere Wasserstoff und Methanol) gespeicherte chemische Energie unter Umgehung eines thermischen Prozesses direkt in elektrische Energie umzuwandeln. Der theoretische Wirkungsgrad der Energiewandlung wird dabei nicht durch den Carnot-Wirkungsgrad begrenzt. Entscheidend ist das Verhältnis der freien Enthalpie ΔG zur Reaktionsenthalpie ΔH . Bereits bei niedrigen Temperaturen (Raumtemperatur) ist eine effiziente Energiewandlung möglich.

1 Mol Wasserstoff + 0,5 Mol Sauerstoff = 1 Mol Wasser

Theoretisch entstehen bei 25 °C und 1 bar:
48 kJ Wärme + 237 kJ (ΔG) = 285 kJ pro Mol Wasserstoff (ΔH)

Das bedeutet, dass ein theoretischer Wirkungsgrad von 83 % erreicht werden kann. Bei einem realen System müssen die gesamten Verluste innerhalb der Brennstoffzelle und in den peripheren Komponenten berücksichtigt werden, so dass der Gesamtwirkungsgrad niedriger, aber immer noch im Vergleich zu konventionellen Systemen deutlich besser ist.

Durch den Elektronenfluss über den Stromkreislauf wird eine elektrische Leistung erzeugt. Die restliche Energie, die bei dem chemischen Prozess frei wird, geht in Wärme über. Die theoretische Zellspannung beträgt im Leerlauf 1,2 Volt. Mit einem elektrischen Verbraucher reduziert sich die Spannung, so dass Brennstoffzellen meist mit ungefähr 0,7 Volt betrieben werden. Die Stromstärke ist dabei von der elektrischen Last und der Membranfläche abhängig. Um eine verwertbare Spannung für die Nutzung zu erhalten, werden mehrere Brennstoffzellen in Reihe geschaltet und in einem sogenannten Stapel (Stack) angeordnet (Abbildung oben). Die PEM arbeitet bei 60 bis 80 °C als sogenannte Niedertemperatur-Membran-Brennstoffzelle (NT-PEM). Hochtemperatur-Membran-Brennstoffzellen (HT-PEM) können im Temperaturbereich zwischen 120 und 200 °C betrieben werden. Vorteile der HT-PEM sind höhere CO-Toleranz, keine Befeuchtung der Reaktionsgase und damit vereinfachtes Wasser- und Wärmemanagement für das gesamte System.

Ein Brennstoffzellensystem mit Membran-Elektroden-Anordnung (MEA), Diffusionsschicht, Bipolarplatten (zwischen den Zellen), Endplatten und Dichtungen muss ergänzt werden durch ein elektrisches System, Hilfsysteme und Luftversorgung sowie gegebenenfalls ein Brennstoffsystem. Wenn Energieträger wie Methanol, Diesel, Kerosin oder Erdgas verwendet werden, ist eine angepasste Wasserstoffbereitstellung mit Reformier und Gasnachbehandlung erforderlich.

Kontakt:

Prof. Dr. Angelika Heinzel
 Zentrum für Brennstoffzellentechnik ZBT GmbH
 Tel. 0203/75984225
 a.heinzel@zbt-duisburg.de

www.zbt-duisburg.de

PEM-Entwicklungen

Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzellen (PEMFC oder PEFC) sind wesentliche Bausteine für eine zukünftige effiziente Energieumwandlungstechnologie. Die Anwendungen reichen vom mobilen Einsatz beispielsweise in Kraftfahrzeugen über Bordstromversorgungen bis hin zu stationären und portablen Anwendungen. Je nach Anwendungsfall kommen Wasserstoff oder reformierte Kohlenwasserstoffe als Energieträger in Frage, die sowohl in der klassischen NT-PEM als auch bei 160 °C in der HT-PEM umgewandelt werden können. Aktuell wird die NT-PEM insbesondere für Anwendungen mit reinem Wasserstoff zum Beispiel in der Mobilität und Notstromversorgung bevorzugt. Die Hochtemperaturvariante wird dann eingesetzt, wenn reformierte Kohlenwasserstoffe wie etwa Methanol oder Erdgas eingesetzt werden.

Mit der schrittweise anlaufenden Einführung von Brennstoffzellen in Fahrzeugen und anderen Anwendungen werden die Aufgaben an die Produktionstechnik und die Qualitätssicherung für die Einzelkomponenten der Brennstoffzelle zunehmend diffiziler. Das Duisburger Zentrum für Brennstoffzellentechnik (ZBT) leistet signifikante Beiträge für die Produktionstechnik von Brennstoffzellenstapeln und ihre Teilkomponenten. Automatisierte Fertigungsprozesse und Qualitätssicherungsprozesse sind in der Entwicklung.

Am ZBT wird beispielsweise seit mehreren Jahren ein wichtiges Element der Brennstoffzelle, die sogenannte Bipolarplatte, mittels Spritzgießprozess im Kleinserienmaßstab für den Eigenbedarf zur Manufaktur der Niedertemperatur-Stapel hergestellt. Bipolarplatten erfüllen in einer PEM-Brennstoffzelle neben der protonenleitenden Polymermembran und den beiden Gasdiffusionsschichten eine Vielzahl von entscheidenden Aufgaben zur Aufrechterhaltung des elektrochemischen Prozesses – unter anderem die Leitung der elektrischen und thermischen Leistung, die Zu- und Abführung der Medien sowie die mechanische Stabilisierung des Stapels. Alternativ zu den spritzgegossenen graphitbasierten Bipolarplatten werden in automobilen Anwendungen verstärkt Stacks mit extrem flachen metallischen Bipolarplatten eingesetzt. Diese Entwicklung stellt eine große Herausforderung für die Dichtigkeit der Brennstoffzellenstapel dar. Der Einsatz des flüchtigen Energieträgers Wasserstoff in der Brennstoffzelle erfordert eine hochgenaue reproduzierbare Dichtungsanfertigung für jede einzelne Zelle in einem Brennstoffzellenstapel, der zum Beispiel in automobilen Anwendungen einige hundert Einheiten lang sein kann. Mithilfe der Dispensertechnik werden am ZBT für verschiedenste Brennstoffzellenstapel

stabile und kostengünstige Lösungen für die wiederholkomponente Dichtung erarbeitet. Auch hochkomplexe Dichtaufgaben zum Beispiel im Bereich der Medienzuführung können erfolgreich entwickelt und letztendlich im Kleinserienmaßstab produziert werden.

Neben der Anwendung im Bereich der Mobilität werden zukünftig auch verstärkt stationäre Stromversorgungsanwendungen benötigt, gerade in netzfernen Gebieten und Regionen mit schlechter Energieversorgung sind Lösungen auf Basis der Brennstoffzellentechnik mit Wasserstoff oder anderen Energieträgern notwendig.

Bei den Entwicklungsaufgaben sind Aspekte der Systemtechnik (Peripherietechnik, Steuerungstechnik) und der Anwendungsanpassung wesentliche Bestandteile der Arbeiten. Typische Beispiele für die Anwendungen solcher Systeme und damit der Duisburger Brennstoffzellen sind:

- Bordstromversorgung (Auxiliary Power Units, APU) auf Basis von Wasserstoff, LPG oder Methanol,
- unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) für dezentrale Anwendungen und
- Leichttransportsysteme und alternative Mobilitätskonzepte.



Spritzgegossene Bipolarplatte für HT-PEFC

Brennstoffzellenstapel für Notstromversorgungssysteme



Quelle: ZBT

Das Forschungszentrum Jülich fokussiert seine Arbeiten im Bereich der PEFC auf Entwicklung und Charakterisierung von Brennstoffzellenkomponenten und Stacks im Leistungsbereich bis 5 kW. Wesentliche Komponenten von Stacks sind die Bipolarplatten, die vielfach aus Graphit-Komposit Materialien hergestellt werden. Zur Reduktion von Kosten, Gewicht und Volumen bietet es sich an, metallische Bipolarplatten einzusetzen. Vorteile dieser Platten sind die möglichen Gewichts-, Volumen- und Kostenreduktionspotenziale. Mit Partnerunternehmen hat das IEK-3 des Forschungszentrums Jülich metallische Bipolarplatten entwickelt und deren Funktionalität demonstriert. Diese Bipolarplatten bestehen aus geprägten Metallfolien mit einer Dicke im Bereich von 0,1 mm bis 0,2 mm. Das Konzept ermöglicht eine Flüssigkeitskühlung zwischen den verschweißten anoden- und kathodenseitigen Bipolarplatten.

Zur Vermeidung korrosionsbedingter Degradation von Zellen und Stacks sind die Platten mit einer Korrosionsschutzschicht zu versehen. Zwar bietet sich Gold als Beschichtung an, kostengünstigere Schichten sowohl in Bezug auf das Material als auch in Bezug auf den Beschichtungsprozess sind jedoch wünschenswert. Konsequenterweise hat das Forschungszentrum eine auf Kohlenstoff basierte Beschichtungstechnologie entwickelt. Die mit vielen Preisen ausgezeichnete Technologie konnte ihre Langzeitbeständigkeit sowohl bei internen Tests als auch bei Versuchen externer Partner nachweisen. Durch die Firma PRECORS GmbH, ein Spin-off des Forschungszentrums Jülich, wird die Technologie mittlerweile kommerzialisiert.

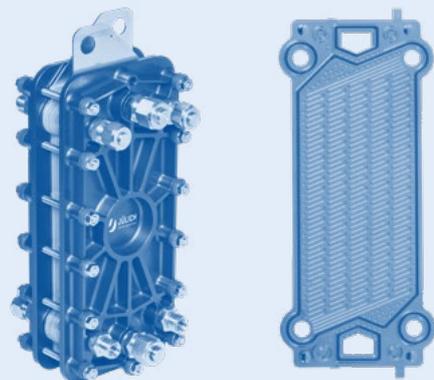
Aufgrund der unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften metallischer geprägter Bipolarplatten im Vergleich zu graphitischen Platten wurden sowohl das Dichtkonzept als auch das Stackverspannungskonzept entsprechend den geänderten Anforderungen angepasst. Die Abbildung unten zeigt sowohl eine beschichtete metallische Bipolarplatte als auch einen 10-zelligen Stack mit modifizierten, dem metallischen Stackdesign angepassten Endplatten.

Die Entwicklung von Zellen und Stacks wird maßgeblich durch moderne Modellierungs- und Simulationswerkzeuge unterstützt. Damit ist es möglich, die komplexen Wechselwirkungen innerhalb der Brennstoffzellen zu quantifizieren. Die nichtlinearen gekoppelten Prozesse innerhalb von Zellen und Stacks werden entsprechend der unterschiedlichen Raum- und Zeitskalen berücksichtigt. Daraus folgen komplexe Modelle zur Beschreibung des Zell- und Stackverhaltens, die als Designtool für die Hardware-Entwicklung zum Einsatz kommen.

Kontakt:

Prof. Dr. Angelika Heinzel
Zentrum für Brennstoffzellentechnik ZBT GmbH
Tel. 0203/75984225
a.heinzel@zbt-duisburg.de

Prof. Dr. Werner Lehnert
Forschungszentrum Jülich GmbH
Tel. 02461/613915
w.lehnert@fz-juelich.de



Beschichtete metallische Bipolarplatte mit Dichtung (links).
10-zelliger Stack mit metallischen Bipolarplatten und modifizierten Endplatten (rechts).

Quelle: Forschungszentrum Jülich

Mobile Anwendungen

Derzeit wird aus mehreren Gründen intensiv an neuen Energieträgern und Antrieben für den Straßenverkehr gearbeitet:

- Reduzierung des Treibhauseffekts (CO_2 , N_2O , CH_4),
- Verringerung der Abhängigkeit von fossilen Energieträgern (Erdöl, Erdgas),
- Verbesserung der Luftqualität (limitierte Emissionen: CO, NOX, Partikel, C_nH_m) und
- Verringerung der Geräuschemissionen.

Zur Erreichung dieser Ziele befassen sich die Fahrzeugentwickler mit den folgenden Aufgabenstellungen:

- Verbesserung konventioneller Antriebe im Hinblick auf Effizienz und Emissionen,
- Entwicklung neuer Antriebe (Hybridantriebe, Elektroantriebe mit Batterien und/oder Brennstoffzellen) und
- Einführung neuer Energieträger (Erdgas, Biokraftstoffe, regenerative Kraftstoffe (e-Fuels), regenerativer Strom, Wasserstoff).

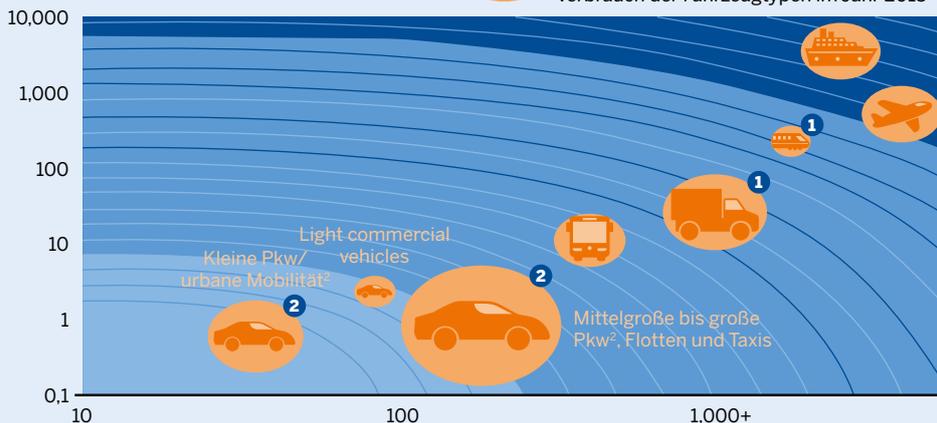
Antriebe und Energieträger

Heute konzentrieren sich die meisten Anstrengungen auf die Verbesserung konventioneller verbrennungsmotorischer Antriebe auf der Basis von Benzin und Diesel sowie Erdgas und Biokraftstoffen. Zunehmend setzen sich die Automobilhersteller jedoch auch mit der Elektrifizierung der Fahrzeuge auseinander, um den oben genannten Anforderungen an die Mobilität von morgen gerecht zu werden:

- Hybrid-Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor und Elektromotor sowie einer Hochleistungsbatterie im Fahrzeug,
- Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor und Elektromotor, deren Batterien mit Strom aus dem Netz aufgeladen werden (Plug-In-Hybride und Range Extender),
- rein elektrisch angetriebene Fahrzeuge mit Batterien, die mit Strom aus dem Netz aufgeladen werden, und
- rein elektrisch angetriebene Fahrzeuge mit Brennstoffzellen und Batterien, in denen getankter Wasserstoff in Strom umgewandelt wird sowie teilweise die Batterie aus dem Netz geladen wird.

Antriebsportfolio für die Mobilität der Zukunft

Gewicht [Tonnen]



¹ Batterie-Brennstoffzellen Hybrid für ausreichende Leistung

² Aufteilung in A- und B-Segment LDVs (kleiner Pkw) und C+ Segment LDVs (mittelgroßer bis großer Pkw) basierend auf einem Marktanteil von 30 % A/B-Segment Pkw und 50 % geringerem Energiebedarf



Mercedes Benz GLC F-Cell (Vorserie, 147-kW-Elektroantrieb, Li-Ion-Batterie mit 13,8 kWh Energieinhalt, Druckwasserstoff-Speicher (700 bar) mit 4,4 kg Wasserstoff)

Die beiden letztgenannten Lösungswege werden gegenüber konventionellen Lösungen aber nur dann zu deutlich niedrigeren spezifischen Treibhausgasemissionen führen, wenn sie auf regenerativ erzeugtem Wasserstoff bzw. Strom und nicht auf fossilen Energieträgern basieren – also nicht auf Wasserstoff aus Kohle und nicht auf Strom auf heute üblicher Strommix-Basis. Die Well-to-Wheel-Analyse des Wasserstoff-Brennstoffzellenantriebs (von der Quelle bis zum Rad im Fahrzyklus) zeigt, dass eine deutliche Reduzierung der Treibhausgasemissionen (30 %) im Vergleich zum Verbrennungsmotor trotzdem bereits dann erreicht wird, wenn Wasserstoff aus Erdgas hergestellt wird.

Verglichen mit Elektrizität lässt sich Wasserstoff besser speichern; dagegen kann Strom direkt aus dem Netz im Fahrzeug als Energieträger gespeichert werden. Regenerativ erzeugter Strom auf der Basis von Wind, Sonne und Wasser fällt diskontinuierlich an, lässt sich dann allerdings mittels Elektrolyse gut in Wasserstoff umwandeln und speichern. Dieser Wasserstoff kann entweder im Brennstoffzellen-Fahrzeug zur Stromerzeugung oder direkt im Verbrennungsmotor genutzt werden, sofern eine hinreichende Infrastruktur für die Wasserstoffbereitstellung gegeben ist. Konzepte mit Wasserstoff-Verbrennungsmotoren werden derzeit von der Industrie nicht weiter verfolgt – unter anderem wegen der schlechten Energiebilanz dieses Antriebs.

Brennstoffzellensysteme als elektrochemische Energiewandler zur Stromerzeugung für die mobile Anwendung sind weltweit in der Entwicklung und Demonstration. Einige Automobilhersteller bieten bereits Brennstoffzellen-Fahrzeuge an. Auch der Aufbau der erforderlichen Wasserstoff-Infrastruktur wurde in verschiedenen Regionen der Welt bereits gestartet, so z. B. in den USA, Japan, China und der EU. In der EU ist Deutschland bzgl. der Wasserstoff-Infrastruktur am weitesten vorangeschritten. Parallel und in Ergänzung dazu werden auch Elektrofahrzeuge mit Batterien entwickelt und auf den Markt gebracht. Aufgrund geringer Reichweiten, langer Ladezeiten und hoher Preise sind die Verkaufszahlen bisher noch moderat.

Durch Fortschritte in der Batterietechnik (Li-Ionen-Technologie) und der Konzeption der Fahrzeuge bieten die Fahrzeughersteller mehr und mehr Batteriefahrzeuge mit Reichweiten größer 400 km an. Zudem werden die Ladezeiten durch Einsatz von Ladern mit hohen Ladeleistungen (> 100 kW) deutlich kürzer. Ladezeiten von weniger als 30 Minuten sind nur bei Einsatz von sehr hohen Ladeleistungen (größer 200 kW) erreichbar. Ein Wasserstofftank ist hingegen in wenigen Minuten aufgefüllt, und schon heute liegt die Reichweite zwischen 400 und 750 Kilometern. Beide Fahrzeugkonzepte werden daher ihren Platz in der Mobilität finden. Je nach Größe der Fahrzeuge und Einsatzzweck sind entweder reine Batteriefahrzeuge, reine Brennstoffzellen-Fahrzeuge oder solche mit einer Kombination aus Batterie und Brennstoffzelle sinnvoll (siehe Abbildung auf Seite 49).

Wasserstoffnutzung im Pkw

Weltweit arbeiten Automobilhersteller an der Entwicklung von Elektrofahrzeugen mit Brennstoffzellen. Erste Kleinserien von BZ-Pkw und BZ-Bussen wurden produziert und weltweit in Kundenhand erprobt, beispielsweise von Daimler (Bild links), General Motors, Toyota, Honda und Hyundai. Für eine breite Markteinführung sind noch einige Optimierungsaufgaben zu bewältigen:

- Erhöhung der Brennstoffzellen-Lebensdauer (mind. 5.000 h),
- Erhöhung der gravimetrischen und volumetrischen Leistungsdichte,
- Katalysatoroptimierung und Minimierung des Edelmetallbedarfs,
- Reduktion der Material- und Herstellungskosten einzelner BZ-Systemkomponenten,
- Fahrzeugintegration einschließlich Wasserstoffspeicherung,
- Kostenreduktion und
- Aufbau der notwendigen Wasserstoff-Infrastruktur.

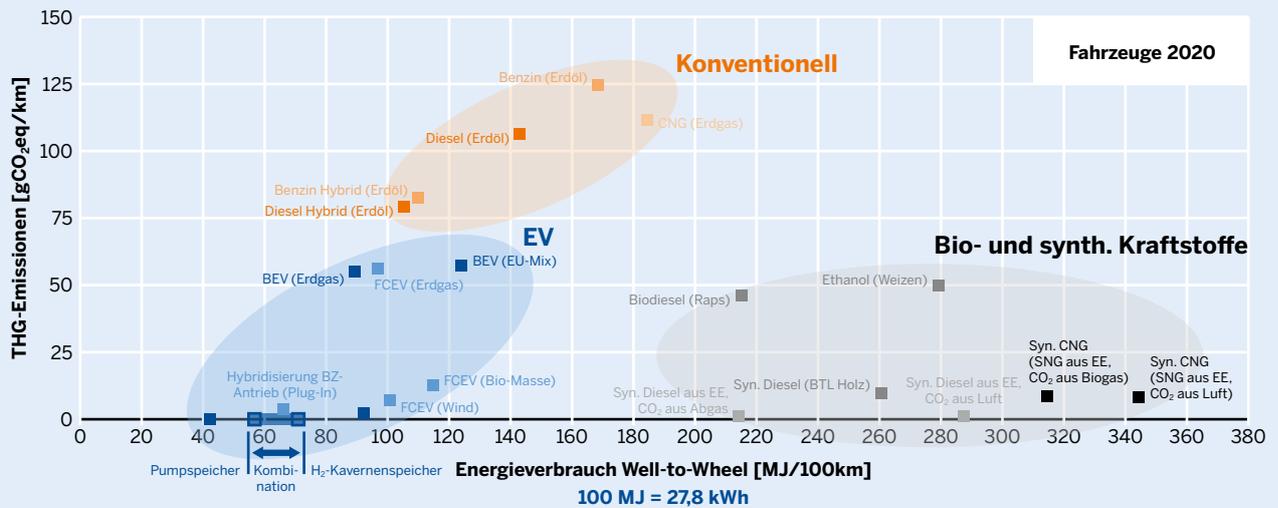
Die größten verbleibenden Herausforderungen sind die immer noch deutlich höheren Kosten gegenüber verbrennungsmotorischen Antriebskonzepten und der

Infrastrukturaufbau. Weitere Fortschritte in Materialentwicklung, Systemoptimierung sowie Serienfertigung mit entsprechenden Skaleneffekten werden dazu beitragen, den Kostenunterschied zu minimieren.

Neue Antriebe für den Verkehr können nur dann ein großes Anwendungspotenzial erreichen, wenn sie einerseits mit einem höheren Systemwirkungsgrad als verbrennungsmotorische Antriebe zur Schonung der vorhandenen Energieressourcen und insgesamt zur Minderung der Schadstoffemissionen beitragen, andererseits aber Fahrleistungen, Nutzlasten und Reichweiten erlauben, die denen konventioneller Fahrzeuge vergleichbar sind. Und insgesamt müssen die neuen Antriebe im Preis konkurrieren können. Dabei gilt es, den spezifischen Energieverbrauch (Megajoule pro 100 km) und die Treibhausgasemissionen (Gramm pro Kilometer) einer Energieumwandlungskette von der Quelle des Primärenergieträgers bis hin zum Fahrzeug im Betrieb gegenüber den konventionellen Energieumwandlungsketten für den Verkehr zu verbessern (Abbildung auf der nächsten Seite oben). Gewichtsreduzierung, Rückgewinnung von Bremsenergie oder Verkehrsleitsysteme können einen zusätzlichen Beitrag leisten.



Spezifische THG-Emissionen und Primärenergieaufwände für Pkw-Fahrzeugantriebe (Nachhaltigkeit, Ökologie, Optiresource)



Quelle: WtW-Report 2014: EUCAR/CONCAWE/JRC, Version 4a

Die Abbildung oben zeigt – entsprechend einer Analyse nach www.optiresource.org auf der Basis von Daten der JEC WtW-Studie und Berechnungen der LBST GmbH – die Zusammenhänge für die konventionellen Antriebe mit Verbrennungsmotoren (VM) und die entsprechenden Hybridantriebe ebenfalls mit Verbrennungsmotoren und einer zusätzlichen Batterie (Hybrid-VM) im Cluster oben rechts. Alle anderen Ergebnisse für die neuen Energieträger und Antriebe, wie sie mit Beispielen in der Abbildung dargestellt sind, lassen sich wie folgt charakterisieren:

- Elektrofahrzeuge mit Batterie auf der Basis erneuerbar erzeugter Elektrizität weisen die geringsten Treibhausgasemissionen und den niedrigsten spezifischen Primärenergieverbrauch in der Gesamtbilanz auf.
- Elektrofahrzeuge mit Brennstoffzelle erlauben ebenfalls eine erhebliche Reduktion des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen.
- Beide Antriebe lassen in Abhängigkeit von der Strom- bzw. Wasserstoffherzeugung eine große Bandbreite der Bilanzwerte für Treibhausgasemissionen und Primärenergieverbrauch zu.
- Biokraftstoffe und synthetische Kraftstoffe aus erneuerbarem Strom erlauben eine signifikante Reduktion der Treibhausgasemissionen, führen aber zu deutlich höheren Energieaufwendungen.

Die langfristig große Herausforderung wird darin bestehen, hinreichende Potenziale an regenerativ erzeugter Elektrizität und Wasserstoff bei hinreichender Infrastruktur und bezahlbaren Kosten bereitzustellen.

Kontakt:

Dr. Jörg Wind
Daimler AG
Tel. 07021/894614
joerg.wind@daimler.com

www.optiresource.org

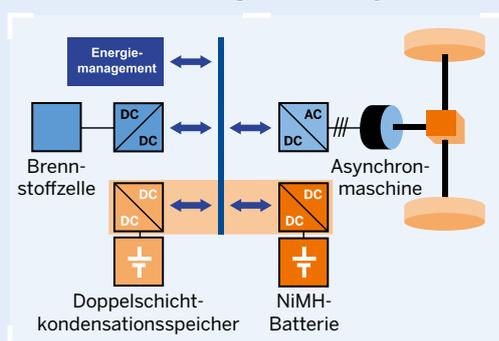
Brennstoffzellenbusse

Angesichts der immer stärkeren Verkehrsströme wird der öffentliche Personennahverkehr künftig eine wichtigere Rolle spielen. Doch auch hier gelten die gleichen Anforderungen hinsichtlich Emissionsminderung (Abgas, Lärm) und Klimaschutz wie im Individualverkehr.

Eine groß angelegte Studie der EU ⁽⁹⁾ hat dargelegt, dass es auch bei den Bussen ein Portfolio verschiedenster Antriebsstränge geben wird, beginnend mit den verbrennungsmotorisch-basierten Hybridkonzepten bis hin zu Batterie- und Brennstoffzellenbussen. Aber nur die beiden letztgenannten garantieren Emissionsfreiheit in den Städten. Die Wahl des geeigneten Antriebskonzepts wird dann von der Länge der Busrouten, auf denen das Fahrzeug eingesetzt wird, sowie von der zur Verfügung stehenden Infrastruktur (Ladestationen, Wasserstoff-Tankstellen) abhängen.

Eine bedeutende Verbesserung des Energiemanagements und damit der Betriebsstrategie für den Einsatz der Brennstoffzellen wurde durch die Neukonzeptionierung des elektrischen Antriebsstrangs erreicht. Bei Brennstoffzellenfahrzeugen früherer Generationen wurde der gesamte Leistungsbedarf durch die Brennstoffzelle abgedeckt. Bei den neueren Fahrzeugen setzt man auf die Hybridisierung des Brennstoffzellen-Antriebsstrangs mit Batterien und/oder Hochleistungskondensatoren. Während die Brennstoffzelle möglichst in einem konstanten Betriebszustand bleibt (was auch deren Lebensdauer zugutekommt), übernehmen die elektrischen Speicher die Abdeckung der Spitzenlasten beim Beschleunigen. Beim Bremsen hingegen wird der entstehende Strom aus den Antriebsmotoren in den Batterien oder Kondensatoren gespeichert (Rekuperation). Dieses Konzept führt durch die mögliche Verkleinerung der Brennstoffzellenleistung zu einer deutlichen Kostenabsenkung bei den Brennstoffzellenbussen.

Dreifach-Hybrid-Konzept



Quelle: FH Köln



Brennstoffzellenbusse der Regionalverkehr Köln GmbH

Eines der ersten Brennstoffzellen-Batterie-Hybrid-Konzepte für den Antriebsstrang in Bussen wurde innerhalb des EU-Projekts HyChain-MINTRANS durch die Firma Hydrogenics in Gladbeck realisiert. Als Basis diente ein batteriebetriebener Bus, in dem eine 10-kW-PEM-Brennstoffzelle zusammen mit einer NiCd-Batterie eingebaut wurde. Die Busse wurden seit Mai 2009 fünf Jahre im Liniendienst der Vestischen Straßenbahnen GmbH in den Städten Herten, Gladbeck und Bottrop eingesetzt.

In einem gemeinsam durch das Land Nordrhein-Westfalen und den Niederlanden geförderten Projekt wurde ab 2009 weltweit erstmalig auch ein 18 m langer Gelenkbus mit Brennstoffzellen-Dreifach-Hybrid-Antrieb entwickelt. Bei der Busplattform handelte es sich um den „Phileas“ der Firma APTS aus Helmond. Das 150 kW-Brennstoffzellensystem generierte zusammen mit Batterien und Superkondensatoren eine Antriebsleistung von 240 kW, so dass eine Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h erreicht werden konnte. Das Brennstoffzellensystem stammte von Ballard aus Kanada. Die Firma Vossloh-Kiepe mit Sitz in Düsseldorf zeichnete für das Energiemanagement verantwortlich, die Hoppecke Batterien GmbH aus Brilon entwickelte das Speichermodul aus NiMH-Batterien. Die Busse wurden zwischen 2011 und 2016 bei der Regionalverkehr Köln GmbH (RVK) in Hürth, im Rhein-Erft-Kreis und in der Region Köln betrieben. Dort fahren seit 2014 auch zwei Brennstoffzellenbusse des Herstellers Van Hool.

Bei den Antriebskonzepten lässt sich aktuell ein Trend zu sogenannten Range-Extender-Konzepten beobachten. In diesen dient eine vergleichsweise kleine Brennstoffzelle (rund 60 kW) dazu, während der Fahrt den Speicher eines eigentlich batterieelektrischen Busses nachzuladen und damit dessen Reichweite deutlich zu erhöhen, ohne dafür eine größere und damit schwere Batterie einbauen zu müssen. Die Brennstoffzelle wird so bei konstantem Lastpunkt betrieben, was deren Lebensdauer zugutekommt. Allerdings kann die Brennstoffzelle in der Regel die Antriebsbatterie nicht vollständig nachladen, so dass ggf. ein externes Laden via Stecker im Busdepot nötig ist.

Mit dem Ziel, die Kosten für Anschaffung und Betrieb deutlich zu senken, startete das Fuel and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU) im Jahre 2016 ein groß angelegtes Beschaffungsprogramm für Brennstoffzellenbusse. Dieses mündete in den Projekten JIVE 1 und 2 (JIVE = Joint Initiative for Hydrogen Vehicles across Europe), über die europaweit in den nächsten Jahren rund 300 Brennstoffzellenbusse beschafft und ab Ende 2019 bei rund 20

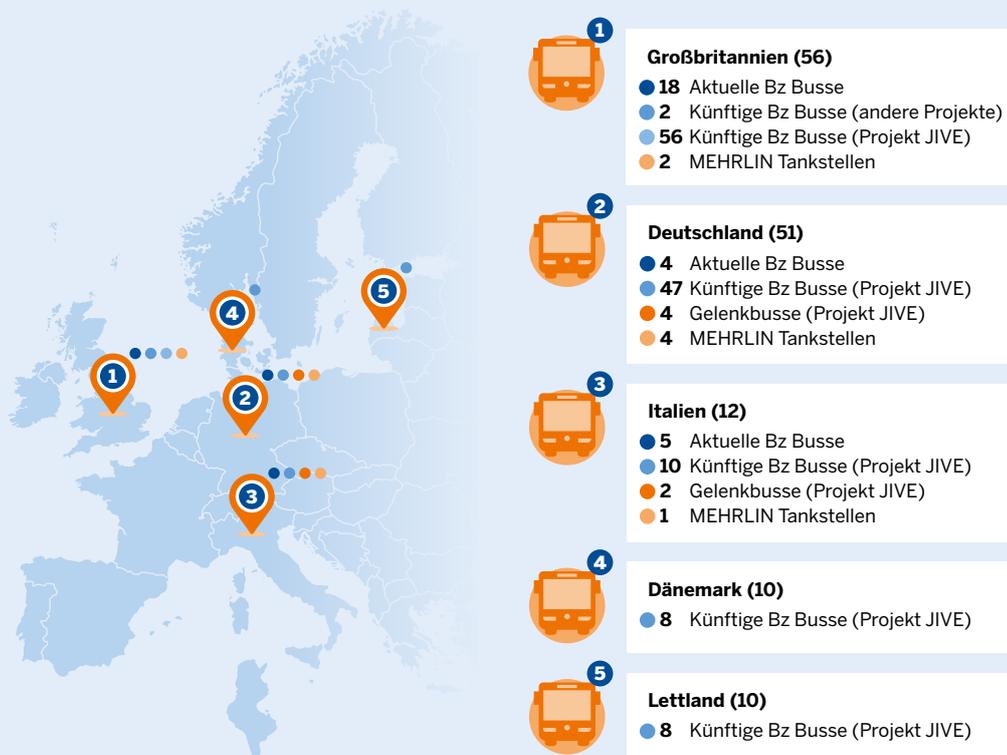
Verkehrsunternehmen zum Einsatz kommen. Aus NRW sind die Regionalverkehr Köln GmbH und die WSW mobil GmbH aus Wuppertal dabei. Die RVK wird im Rahmen der JIVE-Projekte 45, die WSW 20 Brennstoffzellenbusse beschaffen. Über das EU-Projekt „MEHRLIN“ (unter dem Dach der DG MOVE) werden zudem in Europa noch sieben Bustankstellen errichtet, darunter eine Tankstelle in Wuppertal. Mithilfe von Projekte wie JIVE ist es gelungen, den Anschaffungspreis eines Brennstoffzellenbusses auf rund die Hälfte des Preises aus dem Jahr 2014 zu senken.

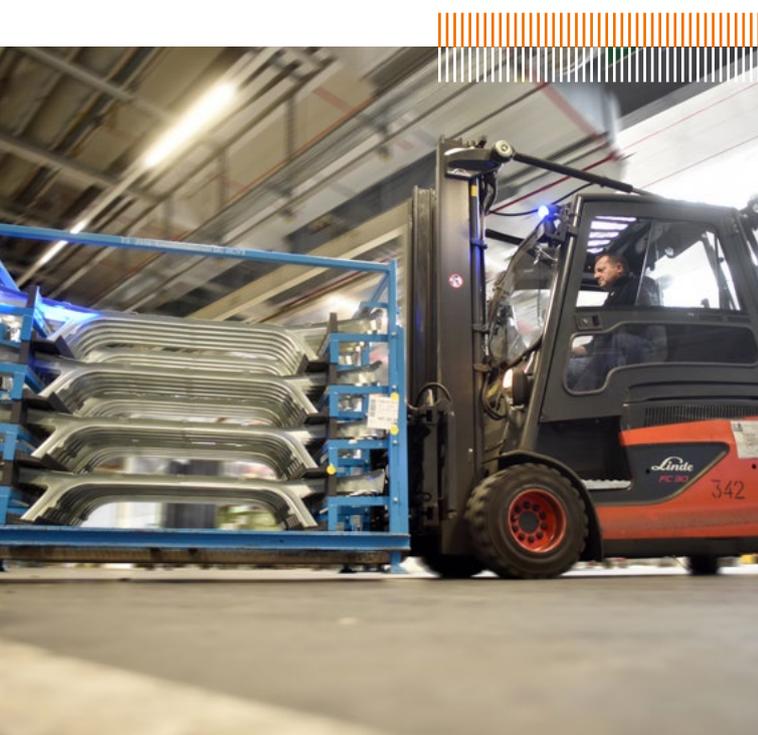
Kontakt:

Dr. Frank Koch
Netzwerk Brennstoffzelle und Wasserstoff, Elektromobilität
der EnergieAgentur.NRW
Tel. 0209/167-2816
koch@energieagentur.nrw

www.energieagentur.nrw

Projekt JIVE





Wasserstoffbetriebene Gabelstapler

Im Mercedes-Benz Werk Düsseldorf wird seit Dezember 2014 ein Demonstrationsprojekt durchgeführt, in dem wasserstoffbetriebene Gabelstapler in der innerbetrieblichen Logistik zum Einsatz kommen.

Im Rahmen eines unter dem Dach des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP) geförderten Projekts sind zwei 3 t Brennstoffzellen-Gabelstapler und eine Wasserstofftankstelle in Betrieb genommen worden. Für die Brennstoffzelle wurden die Fahrzeuge von der Firma Linde Material Handling GmbH umgebaut und zertifiziert. Die von der Firma Air Products auf dem Werksgelände errichtete mobile Wasserstofftankstelle versorgt die Gabelstapler mit Wasserstoff. Die Erkenntnisse des Projekts werden durch die Fachhochschule Hamm wissenschaftlich begleitet. Regional wird es von der EnergieAgentur.NRW unterstützt.

Ziel des Projektes ist es, die Einsatzfähigkeit der Gabelstapler in der Automobillogistik im Dreischichtbetrieb zu testen. Es soll geprüft werden, ob Brennstoffzellen-Gabelstapler ökologisch und ökonomisch attraktiv sind bzw. welchen Kosten und Chancen sich im Vergleich zu den Alternativen ergeben.

Nach anfänglichen Vorbehalten gegenüber dem Wasserstoff sind die Fahrzeuge mittlerweile von den Fahrern gut angenommen worden. Zudem haben die Gabelstapler ihre Belastbarkeit in den ergangenen 3 ½ Jahren unter Beweis gestellt, wie man aus den Zwischenergebnissen ersehen kann:

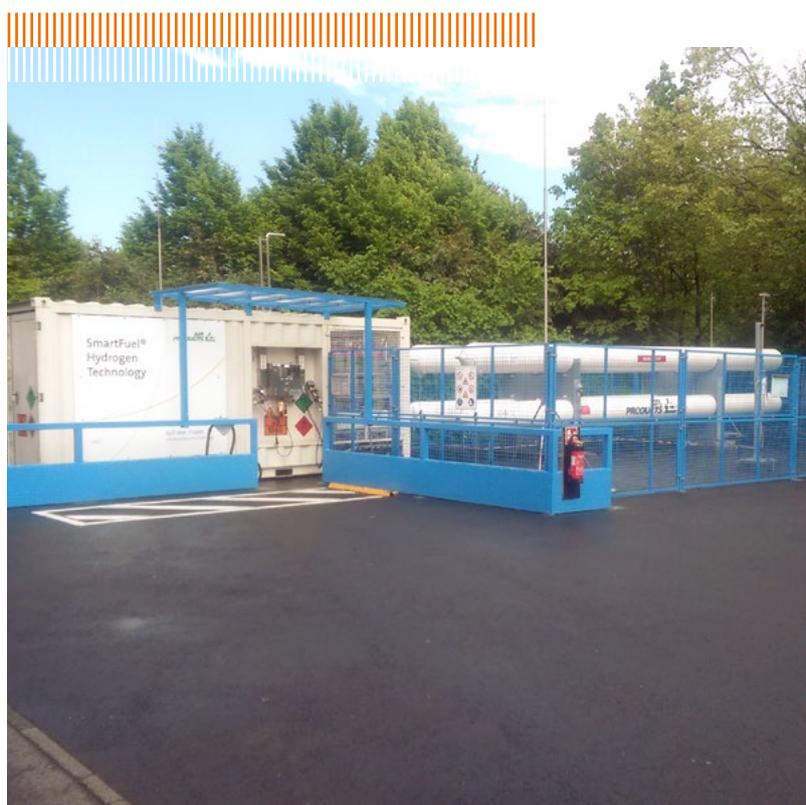
- Energieverbrauch: 0,2 - 0,45 kg/Bh (Ø 0,3)
- Laufleistung mit einer Tankfüllung: 4 - 6 Betriebsstunden
- Bisherige Laufzeit gesamt: > 13.000 Betriebsstunden
- Betankungen: > 2.600 Betriebsstunden

Kontakt:

Matthias Kromm
Tel. 0211/9532224
matthias.kromm@daimler.com

Wolfgang Radtke
Tel. 0211/9533174
wolfgang.radtke@daimler.com

www.daimler.com



Wasserstofftankstelle im Daimler-Werk Düsseldorf



Brennstoffzellenbinnenschiff „MS innogy“

Um eine Lösung der Reichweitenproblematik der Elektromobilität im Schiffsbereich zu demonstrieren, ließ innogy SE im Rahmen der „Grüne Hauptstadt Europas – Essen 2017“ im Sommer des gleichen Jahres die „MS innogy“ zu Wasser. Das zuvor dieselbetriebene Personenausflugsschiff wurde dafür mit einem methanol-elektrischen Antrieb ausgestattet, der aus insgesamt 7 HT-PEM-Brennstoffzellen mit je 5 kW Leistung, 2 Lithium-Ionen Batteriepaketen mit Kapazitäten von je 60 kWh (netto) und einem Elektromotor besteht. Während der rein batterieelektrische Betrieb des 29 m langen und 160 Personen fassenden Schiffes für ca. 2 bis 3 Std. auf dem Essener Baldeneysee ausreichend ist, können die Brennstoffzellen in Verbindung mit einem Methanoltank (330 l) die Betriebsdauer durch kontinuierliches Nachladen der Batterien auf bis zu 15 Std. verlängern. Durch den Einsatz von grünem Methanol, das zuvor mithilfe von regenerativem Strom erzeugt worden ist, gestaltet sich der Antrieb insgesamt CO₂-neutral. Bedingt durch den lautlosen Antrieb sind nun auch Fahrten in das Vogelschutzgebiet Heisinger Ruhraue möglich.

Projektpartner:

Lux-Werft und Schifffahrt GmbH
Moselstraße 10
53859 Niederkassel

Weisse Flotte Baldeney GmbH
Hardenbergufer 379
45239 Essen

Serenergy
Lyngvej 8
9000 Aalborg
Dänemark

Kontakt:

Henning Joswig
innogy SE
henning.joswig@innogy.com
www.innogy.com

Triebwagen mit Brennstoffzellenantrieb

Rund 50 % des deutschen Streckennetzes sind nicht elektrifiziert. Auf diesen Strecken können daher nur Lokomotiven und Triebwagen mit Dieselantrieb eingesetzt werden. Betreiber und Öffentlichkeit haben oftmals ein großes Interesse daran, den Schienenverkehr auf solchen Strecken von Emissionen, die mit dem herkömmlichen Dieselmotor verbunden sind, zu befreien. Jedoch ist der Bau von Oberleitungen sehr kostenintensiv (ab 250.000 €/km zuzüglich Stromversorgung), hinzu kommen nicht unbeträchtliche Kosten für die Wartung. Der Bau von Oberleitungen ist daher auf Strecken mit geringer Auslastung oft unwirtschaftlich und manchmal in landschaftlich reizvollen Gebieten überhaupt nicht gewünscht.

Der Einsatz elektrischer Triebzüge mit wasserstoffbetriebenen Brennstoffzellen stellt hier eine interessante Alternative dar, die die Technologieführerschaft Deutschlands weiter unterstreichen und die nötige Flexibilität in einem sich ändernden Nahverkehrssektor – insbesondere im ländlichen Raum – mit sich bringen kann.

Der französische Bahnhersteller Alstom hat an seinem Standort in Salzgitter mit dem Coradia iLint ein solches Fahrzeug mit Brennstoffzellenantrieb entwickelt. Der Triebwagen hat eine Maximalgeschwindigkeit von 140 km/h und zudem eine vergleichbare Beschleunigungs- und Bremsleistung. Eine Tankfüllung von 180 kg Wasserstoff erlaubt je nach Topographie eine Reichweite von bis zu 1.000 km. Der Coradia iLint ist zudem mit einer Batterie ausgestattet, um die an Bord erzeugte elektrische Energie zwischenspeichern und Bremsenergie rückgewinnen zu können. So lässt sich im Vergleich zu Dieselfahrzeugen eine Energieeinsparung von gut 40 % erzielen. Damit erreicht man selbst bei Verwendung von Wasserstoff aus fossilen Quellen CO₂-Minderungen von gut 30 % im Vergleich zum Dieselantrieb.

Eine technische Herausforderung ist die Errichtung der Betankungsinfrastruktur. Je nach Größe der Triebwagenflotte müssen mehrere Tonnen Wasserstoff pro Tag vertankt werden. Tankstellen dieser Größenordnung wurden bislang nicht errichtet. Die Bereitstellung der Wasserstoffmenge muss zudem sichergestellt sein und sollte möglichst effizient bei geringstmöglicher Belastung der Anrainer erfolgen. In NRW würde sich dazu beispielsweise die vorhandene Wasserstoffpipeline im Ruhrgebiet anbieten, was den Transport per Trailer-Lkw über die Straße vermeiden würde.

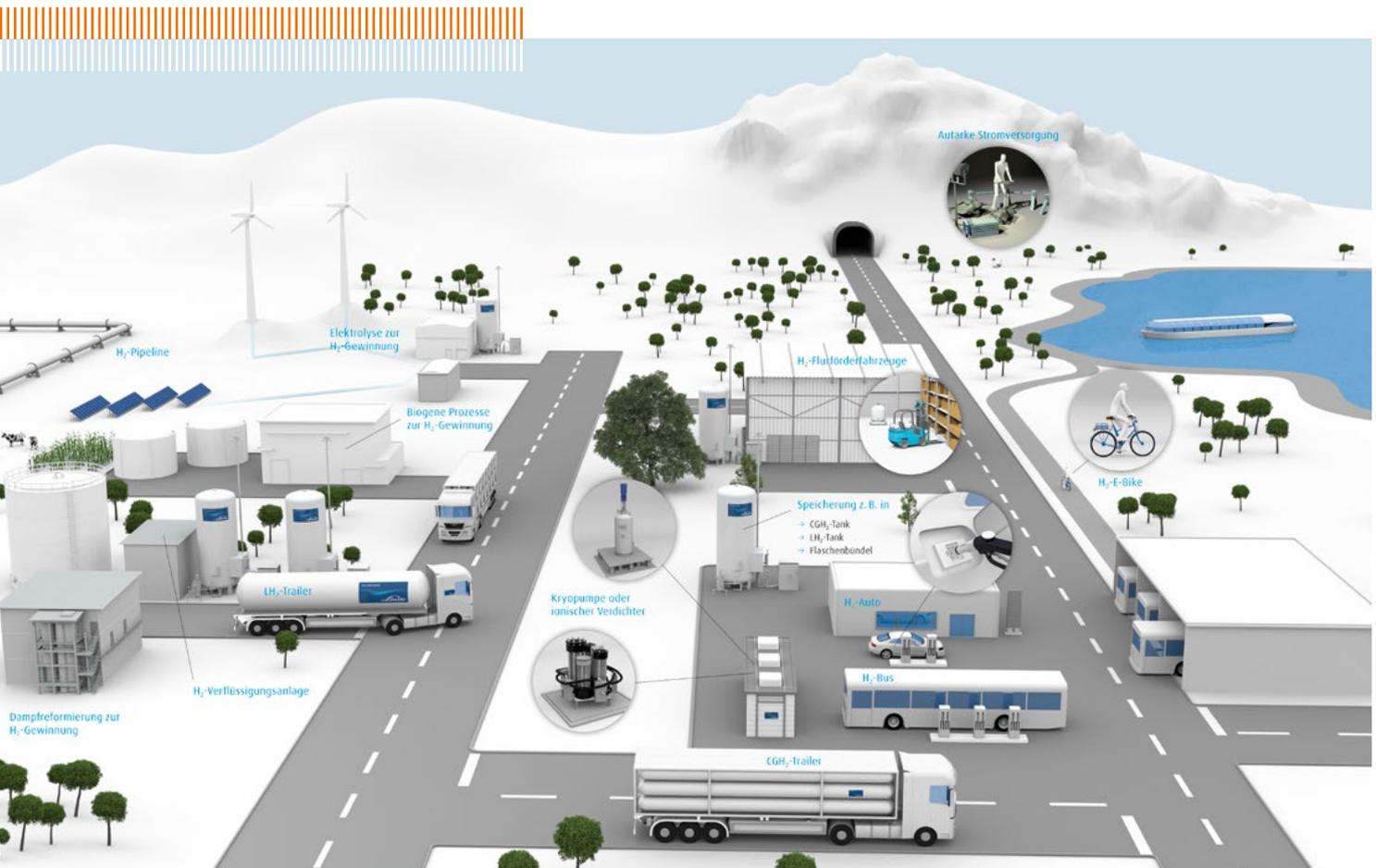
Ein erstes Pilotprojekt wird 2018 im Raum Hamburg an den Start gehen. Weitere Projekte in anderen Bundesländern sollen folgen.

Kontakt:

Dr. Jens Sprotte
ALSTOM Transport Deutschland GmbH
Tel. 05341/9004721
jens.sprotte@alstomgroup.com
www.alstomgroup.com



Brennstoffzellantriebwagen Alstom Coradia iLint



Wasserstoff-Wertschöpfungskette Linde (Quelle: Linde)

Wasserstoff tanken

Neben den ökologischen Vorteilen von Null-CO₂-Emissionen ist Wasserstoff wegen seines hohen Energiegehalts auch aus technischer Sicht ein vielversprechender Energieträger. Damit Wasserstoff jedoch als kommerzieller Kraftstoff zum Einsatz kommen kann, müssen seine Eigenschaften als Gas geringer Dichte bei der Speicherung und Betankung berücksichtigt werden.

Wasserstoff wird an die Tankstelle entweder tiefkalt verflüssigt bei -253 °C (Liquified Hydrogen – LH₂) oder gasförmig unter Druck bei circa 200 bis 500 bar (Compressed Gaseous Hydrogen – CGH₂) geliefert und in die entsprechenden Speichertanks vor Ort gefüllt. Er kann aber auch mittels Elektrolyse oder Dampfreformierung direkt an der Tankstelle hergestellt werden. Da im Fahrzeug nur begrenzt Bauraum für die Kraftstoffspeicherung zur Verfügung steht, wird Wasserstoff komprimiert im Fahrzeug vorgehalten, um möglichst viel Energiegehalt zu speichern (700 bar für Pkw, 350/700 bar bei Nutzfahrzeugen/Bussen). Dazu wird der Wasserstoff an der Tankstelle verdichtet und anschließend als komprimierter, gasförmiger Wasserstoff in das Brennstoffzellenfahrzeug vertankt.

Die Verdichtertechnologie ist das Herzstück einer Wasserstoff-Tankstelle. Grundsätzlich gibt es zwei verschiedene Methoden: Zum einen kann gasförmiger Wasserstoff auf bis zu 900 bar komprimiert werden – mithilfe verschiedener Kompressoren wie Trockenläufer, Membranverdichter oder dem ionischen Kompressor, den die Linde AG speziell für diesen Einsatz entwickelt hat. In Deutschland sind aktuell bereits fast 30 Wasserstoff-Tankstellen mit ionischem Verdichter an öffentlichen Pkw-Tankstellen in Betrieb.

Zum anderen kann verflüssigter Wasserstoff mittels der Kryopumpentechnologie im überkritischen Zustand auf bis zu 900 bar komprimiert, anschließend auf minus 40 °C erwärmt und daraufhin gasförmig vertankt werden. Diese Technologie bietet sich insbesondere bei hohem Bedarf an, da auf diesem Weg am Standort erheblich größere Mengen von Wasserstoff pro Volumen gelagert werden können. Die Kryopumpentechnologie ist auf kleinstem Bauraum die effizienteste Technologie und zeichnet sich durch einen sehr geringen Energieverbrauch aus. Auch diese ist im Portfolio der Linde AG und erfolgreich in mehreren Anlagen deutschlandweit im Betrieb.

Die Betankung des Gases an der Zapfsäule erfolgt bei 900 bar, um durch die notwendige Druckdifferenz den Fahrzeugtank auf rund 700 bar vollständig füllen zu können. Derzeit umfassen die Pkw-Tanks 5 bis 7 kg Wasserstoff. Damit sind Reichweiten von bis zu 800 km möglich. Auch die Dauer der Betankung selbst ist auf dem Niveau konventionell betriebener Pkw. So ist der Tank nach rund drei Minuten vollständig gefüllt.

Die Technologie als solche sowie die Speicherungs-, Verdichtungs- und Betankungsvorgänge sind mittlerweile so ausgereift, dass weltweit einheitliche Betankungsnormen für den kommerziellen Gebrauch entwickelt wurden (SAE J2601TM (TIR)). Standardisierte Lösungen gibt es bereits für den Betankungsvorgang bei Brennstoffzellenfahrzeugen sowie für die Handhabung der Zapfpistole, die der Erdgasbetankung weitgehend ähnlich ist. Der einzige sichtbare Unterschied zu konventionellen Kraftstoff-Betankungen besteht darin, dass der Verbraucher nicht mehr in Litern tankt, sondern dass die Abgabemenge in Kilogramm verrechnet wird. Als Faustformel für den Verbrauch von Pkw kann man sich merken: 1 kg/100 km.

In Deutschland ist Mobilität auf Basis von Flüssigwasserstoff vor allem im Großraum München erlebbar: Anfang 2018 werden sechs öffentliche H₂-Tankstellen mit Flüssigwasserstoff beliefert. Die kompakte, modulare Bauweise der Betankungs-Technologie erlaubt dabei die Integration in unterschiedlichste Tankstellen-Konzepte: einerseits als Erweiterung konventioneller Tankstellen, mit ober- oder unterirdischer Lagerung der Tanks. Andererseits als dedizierte H₂-Tankstelle oder integriert in neuartige, energieoptimierte Tankstellen-Konzepte. In Kombination mit einem PEM-Elektrolyseur zur Erzeugung von Wasserstoff vor Ort und einem brennstoffzellenbasierten Blockheizkraftwerk zur Rückverstromung des vor Ort erzeugten, gespeicherten Wasserstoffs, wurde dies beispielsweise an der zwischen München und Ingolstadt gelegenen Autobahn-Raststätte Fürholzen-West umgesetzt.

Kontakt:

Alexander Schadowski
Linde AG, Linde Gases Division
Tel. 0211/7481175
alexander.schadowski@linde.com
www.linde.com



Wasserstofftankstellennetz in NRW, Planungsstand September 2018



Wasserstoff-Tankstelleninfrastruktur: Clean Energy Partnership und H₂ MOBILITY

Auch wenn Wasserstoff längst als ein Baustein der deutschen Verkehrswende gilt, stellt die noch lückenhafte und teure Wasserstoff-Infrastruktur das Haupthindernis für die Einführung dar.

Mit der Gründung der H₂ MOBILITY Deutschland GmbH & Co. KG wurde der weitere Ausbau beschleunigt und optimiert. Den Anfang hatte bereits 2002 die Clean Energy Partnership (CEP) als gemeinsame Initiative von Politik und Industrie unter Federführung des Bundesverkehrsministeriums gemacht. Bis 2016 war die Partnerschaft das größte Demonstrationsprojekt für Wasserstoffmobilität in Europa und ein Leuchtturmprojekt des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP) im Verkehrsbereich. Erreichtes Ziel war die Erprobung der Alltagstauglichkeit von Wasserstoff als Kraftstoff.

Bis Ende 2019 plant, baut und betreibt die 2015 gegründete H₂ MOBILITY mit den Gesellschaftern Air Liquide, Daimler, Linde, OMV, Shell und TOTAL rund 100 Wasserstoff-Tankstellen als Basisversorgung in Deutschland. Alleine im Rhein-Ruhr-Gebiet, als bevölkerungsreichster Landstrich mit entsprechendem Verkehrsaufkommen, sind bis Mitte 2018 sechs Stationen eröffnet worden und weitere acht in Bau. Auch in anderen Ballungsräumen wie Hamburg, Frankfurt, München, Nürnberg

und Stuttgart werden jeweils bis zu 10 Wasserstoff-Tankstellen errichtet. Dazu kommen zahlreiche Zapfsäulen entlang von Fernstraßen und Autobahnen. In einer zweiten Phase könnten es bis zu 400 Wasserstoff-Stationen werden, jedoch abhängig vom Fahrzeughochlauf. Um den Fortschritt möglichst eng auch mit der Automobilindustrie abzustimmen, stehen der H₂ MOBILITY die Unternehmen BMW, Honda, Hyundai, Toyota und Volkswagen als assoziierte Partner zur Seite. Die Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW) GmbH berät in politischen Fragen.

Die Wasserstoff-Stationen werden vorzugsweise in bestehende Tankstellen integriert. Die Konstruktion ist kompakt und setzt überwiegend auf standardisierte Komponenten für die Zapfsäulen, die Lagerung des Wasserstoffs und die Kompression.

Die Abbildung oben zeigt den Stand der Ausbauplanungen im April 2018 für das Wasserstoff-Tankstellennetz in NRW..

Kontakt:

www.h2-mobility.de

www.h2.live

www.cleanenergypartnership.de

www.now-gmbh.de

Infrastrukturkosten von batterie- und brennstoffzellenelektrischer Mobilität

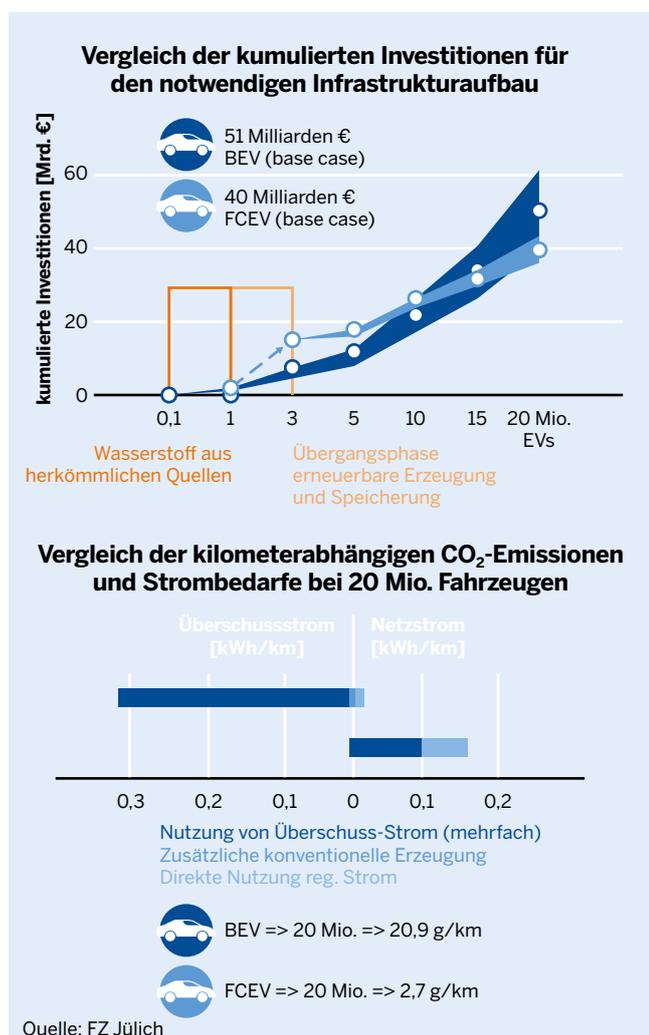
Oft werden die Infrastrukturkosten zum Aufbau der Elektromobilität (Brennstoffzellenfahrzeuge und batterieelektrische Fahrzeuge) als wesentliche Hürde für deren Durchbruch bezeichnet. Eine Studie des IEK-3 analysierte den Aufbau beider Infrastrukturen auch bei hohen Marktanteilen der Elektromobilität an der Pkw-Fahrzeugflotte ⁽¹⁾.

Die Analyse der Szenarien zeigt, dass die Investitionen in den Infrastrukturausbau für beide Technologiepfade bei geringen Fahrzeugbeständen bis hin zu einigen Hunderttausend nahezu gleich sind. In der Übergangsphase erfolgt die Umstellung der Wasserstoffherzeugung auf die ausschließliche Nutzung von regenerativem Überschuss-Strom, die durch den Bau von saisonalen Wasserstoffspeichern zur Überbrückung von 60 Tagen flankiert wird. Das Konzept ermöglicht die Versorgung mit grünem Wasserstoff. In der Anfangsphase sind dafür höhere In-

vestitionen erforderlich als bei der Ladeinfrastruktur. Für das Laden der Batterie-Fahrzeuge ist in der Studie keine saisonale Stromspeicherung in der Stromversorgung berücksichtigt, die für eine sichere Versorgung mit 100 % erneuerbarem Strom notwendig wäre. Vergleicht man die kumulierten Investitionen beider Konzepte für eine hohe Marktdurchdringung von 20 Mio. Fahrzeugen, liegen die Investitionen für eine Ladeinfrastruktur mit rund 51 Mrd. Euro deutlich höher im Vergleich zur Wasserstoff-Infrastruktur mit rund 40 Mrd. Euro.

Für das Szenario mit 20 Mio. Brennstoffzellen-Fahrzeugen werden 87 TWh Überschuss-Strom für die Elektrolyse und zusätzlich sechs TWh Strom aus dem Netz (Transport und Verteilung des Wasserstoffs) benötigt. Das Laden von 20 Mio. Batterie-Fahrzeugen erfordert 46 TWh Strombezug aus dem Verteilnetz. Die Effizienz der Ladeinfrastruktur und der Fahrzeuge ist höher, aber die Flexibilität der Stromnachfrage ist auf kürzere Zeiträume begrenzt. Die Überschuss-Strommenge im unterstellten Energieversorgungsszenario mit hohen erneuerbaren Anteilen übersteigt den Bedarf zur Versorgung von 20 Mio. Fahrzeugen in beiden Infrastrukturfäden um den Faktor drei bis sechs.

Durch die Nutzung von erneuerbaren Stromüberschüssen und Netzstrom mit hohen Anteilen an erneuerbaren Energien sind die kilometerspezifischen CO₂-Emissionen für beide Versorgungsoptionen gering im Vergleich zur Nutzung von fossilen Kraftstoffen. Die Wasserstoff-Infrastruktur mit inhärenter saisonaler Speicherung kann höhere Anteile überschüssiger, erneuerbarer Energien integrieren und ist daher bei der CO₂-Reduktion im Vorteil. Jedoch kann eine auf die Verfügbarkeit von erneuerbarem Strom ausgegerichtete Ladestrategie der Batterie-Fahrzeuge deren CO₂-Emissionen weiter mindern.



Kontakt:

Prof. Dr.-Ing. Detlef Stolten
 Institutsleitung
 Forschungszentrum Jülich GmbH
 Tel. 02461/615147
 d.stolten@fz-juelich.de

Dr.-Ing. Martin Robinius
 Leitung Abteilung Verfahrens- und Systemanalyse
 Forschungszentrum Jülich GmbH
 Tel. 02461/613077
 m.robinius@fz-juelich.de

Wasserstoffkosten an der Tankstelle

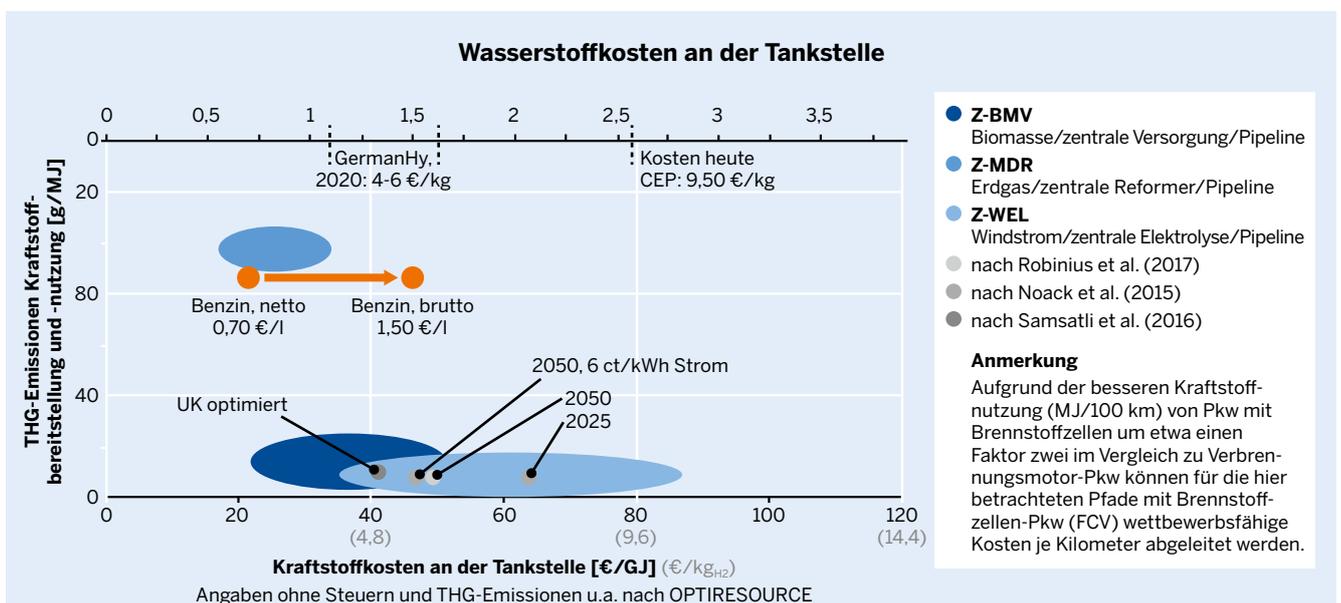
Die folgenden Ausführungen zu den Wasserstoffkosten basieren auf der Analyse und Bewertung aktuell verfügbarer Studienergebnisse, wie sie ausführlich von Thomas Grube und anderen Autoren in einer Studie, dargestellt werden ⁽¹²⁾. In der vorliegenden Auswertung geht es vor allem um Wasserstoffbereitstellungskosten an der Tankstelle ohne Steuern auf Basis von Studiendaten (2007 - 2016) und im Vergleich zu aktuellen Superbenzinkosten an der Tankstelle mit („brutto“) und ohne („netto“) Steuern. Im Vordergrund der Aktualisierung der Studiauswertung steht die Einbeziehung von Wind-Wasserstoffsystemen unter anderem nach Noack ⁽¹³⁾, Samsatli ⁽¹⁴⁾ und Robinius et al. ⁽¹⁵⁾. Eine Zuordnung zu den entsprechenden Treibhausgasniveaus erfolgte auf der Grundlage von OPTIRESOURCE ⁽¹⁶⁾, soweit Angaben zu diesen Emissionen nicht vorlagen.

Die ausgewerteten Studien zum Thema Wasserstoffbereitstellung auf der Basis von Strom aus erneuerbaren Energien, vor allem aus Windkraft, weisen auf eine Vielzahl von Kriterien hin, die im Zusammenhang mit der Ermittlung der Bereitstellungskosten zu beachten sind. Es stellt sich insbesondere die Frage nach der Bewertung der Kosten des für die Elektrolyse verfügbaren Stroms. Wichtige Einflussparameter dafür sind:

- Ausbaustufe der REG-Stromerzeugung,
- Übertragungskapazität des Netzes,
- zeitabhängige REG-Stromproduktion und Stromnachfrage der Endverbraucher und Industrie.

Als Fazit kann festgehalten werden, dass in Abhängigkeit der untersuchten Szenarien und gewählten Randbedingungen wettbewerbsfähige Wasserstoffkosten bei Annahme eines deutlichen Verbrauchsvorteils von Pkw mit Brennstoffzellen (FCEV) gegenüber Pkw mit Verbrennungsmotor möglich sind. Voraussetzungen dafür sind unter anderem niedrige Stromkosten, das Erreichen von Kostenzielen für Elektrolyseure, Netze und Energiespeicher sowie Betriebsweisen, die zu einer hohen Jahresbetriebsdauer führen.

Kritisch ist anzumerken, dass nicht alle Quellen nähere Definitionen mit Bezug auf Substitutionsszenarien, Primärenergie- sowie Anlagenkosten mit Skaleneffekten, Transportpfade und Tankstellenkosten bieten. Die Darstellung ermöglicht dem Leser dennoch eine Orientierung für Zeiträume bis 2020, wie sich die Wasserstoffkosten bei unterschiedlichen THG-Niveaus und noch unbekanntem fiskalischen Vorgaben entwickeln könnten – in Relation zu den Benzinkosten, die zurzeit und erst recht in Zukunft stark in Bewegung sind und sein werden.





Eichfähige Mengemessung von Druckwasserstoff

Eine der Herausforderungen beim Betanken von Fahrzeugen ist die eichfähige Messung der gelieferten Wasserstoffmenge. Im Rahmen weiterer Projektentwicklungen rund um das Thema H₂-Speicherung entwickelt das Energieinstitut der Westfälischen Hochschule, gemeinsam mit einem mittelständischen Unternehmen, einen Wasserstoff-Durchflussmesser für den Einsatz bei der Hochdruckbetankung von H₂-Fahrzeugen. Dabei hat das Energieinstitut die Entwicklung und den Aufbau eines Teststands, der sogenannten Wasserstoffwaage, für die experimentelle Untersuchung der Prototypen übernommen. Ein besonderes Merkmal des Teststands ist das eingesetzte Massenstrom-Kalibriersystem. Dieses basiert auf einer gravimetrischen Messung – also Wägung – und ist damit weitgehend unabhängig von den Parametern Druck und Temperatur, die eine Massenstrombestimmung stark beeinflussen. Durch diese Eigenschaften eignet sich der Teststand insbesondere für die Untersuchung dynamischer Hochdruck-Betankungsprozesse sowie deren Optimierung. Die Mengemessung kann bei Drücken bis zu 1.000 bar erfolgen.

Kontakt:

Prof. Dr. Karl H. Klug
Westfälische Hochschule, Standort Gelsenkirchen
Tel. 0209/9596808
energieinstitut@w-hs.de
www.energie.w-hs.de

Stationäre Anwendungen

Mehr als ein Drittel der Endenergie wird in Deutschland im Haushalt für Raumheizung, Warmwasser und Strom verbraucht. Und weil Energieverluste dann am geringsten sind, wenn die Endenergie dort erzeugt wird, wo sie auch unmittelbar genutzt wird, ist die dezentrale Stromerzeugung und gleichzeitige Nutzung der Wärme besonders vorteilhaft. Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) mit hohen elektrischen Wirkungsgraden und geringen Emissionen ist die technische Herausforderung der Zukunft bei der Gestaltung einer effizienteren Energieversorgung. Die Brennstoffzellentechnik ermöglicht die simultane Produktion von Strom und Wärme in Hausheizungssystemen mit besonders niedrigen Emissionen. Aus Erdgas wird in einem Prozess ein wasserstoffreiches Brenngas erzeugt und in der Brennstoffzelle mit Luftsauerstoff direkt zu elektrischem Strom umgesetzt. Die Restwärme des gesamten Prozesses wird unmittelbar dem Heizungskreislauf und Brauchwasserspeicher zugeführt. Der Leistungsbereich liegt zwischen 300 W_{el} bis etwa 5 kW_{el}.

In Japan sind aufgrund der 50-prozentigen Subvention der Investitionskosten bereits über 200.000 Systeme bei Endverbrauchern installiert. In Deutschland wurden im Rahmen von Marktaktivierungsmaßnahmen der Bundesregierung einige tausend Systeme deutschlandweit installiert. In NRW wird die Förderung der KWK-Technologien auch der Markteinführung der Brennstoffzellen zugutekommen.

HT-PEM sind besonders gut geeignet für die gekoppelte stationäre Erzeugung von Strom und Wärme (KWK). Da es sich um Wärme auf einem hohen Temperaturniveau handelt, kann daraus bei Bedarf auch Prozesswärme oder mittels Absorptionskälteanlagen Kälte erzeugt werden.

Die Arbeitstemperatur der Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle MCFC ist mit etwa 650 °C hoch genug, um die elektrochemischen Reaktionen in der Brennstoffzelle auch ohne Edelmetallkatalysatoren ablaufen zu lassen. Ein wichtiger Vorteil bei der Verwendung von Hochtemperatur-Brennstoffzellen liegt in der Möglichkeit, gasförmige und flüssige Kohlenwasserstoffe (Erdgas, Flüssiggas, Heizöl) mit der Abwärme der Brennstoffzelle zu Wasserstoff zu reformieren. Darüber hinaus kann die restliche Abwärme als Dampf direkt genutzt oder in ein Fernwärmenetz eingespeist werden. Auf diese Weise lassen sich hohe Gesamtwirkungsgrade erreichen. 300 kW bis 1 MW sind derzeit die realisierbaren Leistungsklassen.

Dies gilt prinzipiell auch für die Festoxid-Brennstoffzelle SOFC. Während bei kleineren Systemen für die Hausenergieversorgung bereits eine deutliche Tendenz von der PEM zur SOFC zu beobachten ist, wird die Entwicklung größerer SOFC-Systeme wegen der hohen Kosten für die Fertigungstechnologie der großen Zellen noch einige Zeit in Anspruch nehmen.

Die Phosphorsäure-Brennstoffzelle PAFC ist bestens geeignet für den mittleren Leistungsbereich von 50 bis einigen hundert kW. Für diese Brennstoffzelle liegen die meisten Betriebserfahrungen vor, viele Anlagen haben 60.000 und mehr Betriebsstunden absolviert. Diese Brennstoffzelle hat einen neuen Markt erobert, der auf einem vierfachen Nutzen beruht: die Versorgung geeigneter Verbraucher mit Strom, Wärme, Kälte und sauerstoffabgereicherter Luft. Damit kann aktiver Brandschutz betrieben werden.

PEM-Brennstoffzellen für stationäre Anwendungen größerer Leistung werden ebenfalls Chancen eingeräumt. Sie sind vor allem dann interessant, wenn Wasserstoff in großen Mengen zur Verfügung steht, wie es beispielsweise bei Überproduktion in chemischen Werken der Fall ist. So wurde zum Beispiel eine 1 MW-PEM-Brennstoffzelle im Solvay-Werk Antwerpen in Betrieb genommen. Es bleibt jedoch abzuwarten, ob Zellen großer Leistung kostengünstig von den Entwicklungen für den Antriebssektor (Busse) profitieren können.

Nachdem die Vorteile hinsichtlich Umweltverträglichkeit und Wirkungsgrad nachgewiesen werden konnten, stehen die Kosten, die Lebensdauer und die Zuverlässigkeit der Brennstoffzellensysteme weltweit weiterhin im Fokus der Entwicklungs- und Demonstrationsvorhaben.

Kontakt:

Prof. Dr. Angelika Heinzel
Zentrum für Brennstoffzellentechnik ZBT GmbH
Tel. 0203/7598-4225
a.heinzel@zbt-duisburg.de

Stationäre Stromerzeugung mit Brennstoffzellen

Brennstoffzellen zählen zu den effizientesten Energieumwandlungssystemen, die derzeit am Markt verfügbar sind. Für den stationären Einsatz bieten sich neben PEM-Brennstoffzellen festoxid-keramische Brennstoffzellen (SOFC) an, da diese neben einer hohen Flexibilität bzgl. des eingesetzten Treibstoffes auch sehr hohe elektrische Wirkungsgrade bei gleichzeitig langen Laufzeiten ermöglichen. Mittlerweile bieten verschiedene Hersteller Brennstoffzellen-Systeme für den stationären Einsatz in Wohn- und Gewerbegebäuden an, die entweder wärmegeführt als Ersatz für die Heizung oder stromgeführt zur Erzeugung von Elektrizität zum Einsatz kommen.

Das Unternehmen SOLIDpower GmbH aus dem nordrhein-westfälischen Heinsberg bietet mit dem BlueGEN ein stationäres Mikrokraftwerk auf Basis von Brennstoffzellen an. Das stromgeführte Gerät liefert eine kontinuierliche elektrische Ausgangsleistung von 1,5 kW bei einem elektrischen Wirkungsgrad von mehr als 60 %. Damit kann das Mikrokraftwerk das ganze Jahr durchgängig unabhängig von Wetter und Wärmebedarf betrieben werden und erzeugt so ca. 13.000 kWh emissionsarmen und kostengünstigen Strom direkt am Ort des Verbrauchs. Durch den hohen elektrischen Wirkungsgrad werden die CO₂-Emissionen für die Stromerzeugung um mehr als 50 % im Vergleich zum deutschen Kraftwerksmix reduziert, während der Anwender seine Stromkosten in etwa halbieren kann. Inzwischen wurden bereits mehr als 1.000 Systeme installiert.

Als erdgasbetriebenes und hocheffizientes Mikrokraftwerk sind solche Systeme vor allem für Verbraucher geeignet, die einen hohen Bedarf an Grundlaststrom haben. Dies können sowohl Gewerbetreibende als auch Besitzer von größeren Wohnimmobilien sein. Dabei läuft der Grundlaststrom vollkommen unabhängig von der Heizungsanlage, denn die Geräte dienen der Stromerzeugung. Die beim Stromerzeugungsprozess entstehende thermische Energie lässt sich zusätzlich zur Unterstützung der Warmwasserbereitung bzw. der Heizungsanlage nutzen. Über einen Warmwasserspeicher kann das als Beistelllösung konzipierte Gerät in nahezu jedes Heizsystem integriert werden. Dabei verzichtet SOLIDpower auf einen vorgeschalteten Reformier und setzt stattdessen das Verfahren der internen Dampfreformierung ein, um den im Erdgas enthaltenen Wasserstoff nutzbar zu machen und die sehr hohen elektrischen Wirkungsgrade zu erreichen.

Kontakt:

Andreas Ballhausen
SOLIDpower GmbH
Tel. 02452/153-763
Andreas.ballhausen@solidpower.com

www.solidpower.com



Produktion des BlueGEN Mikro-KWK Systems von SOLIDpower in Heinsberg, NRW



Brennstoffzellen-Heizgeräte in Ein- und Zweifamilienhäusern

Brennstoffzellen-Heizgeräte entlasten die Netze durch dezentrale Strom- und Wärmeerzeugung und erhöhen deutlich den Autarkiegrad der Betreiber und haben deshalb ein großes Zukunftspotenzial. In entsprechender Anzahl installiert, können diese Geräte einen wichtigen Beitrag dazu leisten, die Volatilität des Stromangebots aus Windkraft- und Photovoltaikanlagen auszugleichen. Anders ausgedrückt: Brennstoffzellen-Heizgeräte auf Erdgasbasis können künftig auch dann einspringen, wenn der Wind nicht weht und die Sonne nicht scheint.

Die Viessmann Group treibt deshalb die Entwicklung dieser Technologie weiter voran. Nachdem bereits im Frühjahr 2014 mit Vitovalor 300-P das erste serienmäßig produzierte Brennstoffzellen-Heizgerät erfolgreich in den Markt eingeführt wurde, arbeitet das Unternehmen an der nächsten Generation. Es kommt eine NT-PEM-Brennstoffzelle zum Einsatz, die von der japanischen Panasonic Corporation entwickelt wurde. Ihr Elektrolyt besteht aus einer gasdichten, protonendurchlässigen Kunststoffmembrane. Als Energieträger wird Wasserstoff kontinuierlich zugeführt, der in einem vorgelagerten Prozess aus Erdgas gewonnen wird. Dazu wird das Erdgas innerhalb des Gerätes zunächst entschwefelt und im anschließenden Reforming-Prozess in ein wasserstoffreiches Prozessgas (H_2 und CO_2) umgewandelt. Die Brennstoffzelle ist für eine Lebensdauer von mindestens 15 Jahren ausgelegt und hat sich in Japan in mehr als 200.000 Installationen bereits bestens bewährt.

Das kompakte Gesamtsystem besteht außerdem aus einem Spitzenlastmodul mit einem Gas-Brennwertkessel, Heizwasser-Pufferspeicher, einem Trinkwasserspeicher und der Systemregelung. Das Gerät eignet sich vor allem für neu gebaute Ein- und Zweifamilienhäuser sowie energetisch sanierte Bestandsgebäude mit geringem Wärmebedarf.

Kontakt:

Rene Eickhoff
 Viessmann Werke GmbH & Co. KG
 Tel. 0151/15168722
 EicR@viessmann.com
www.viessmann.com



Aktiver Brandschutz mittels Brennstoffzellen

Brennstoffzellen erzeugen analog zu konventionellen KWK(K)-Anlagen Strom, Wärme und optional Kälte. Während der Energiewandlung entsteht in der Brennstoffzelle abhängig vom Typ prozessbedingt sauerstoffarme Luft, die zur Inertisierung und zum Brandschutz genutzt werden kann. Diese Abluft fällt beim Betrieb der Anlage kontinuierlich und ohne Zusatzkosten an. Über Rohrleitungssysteme kann diese in zu schützende Räume eingeleitet werden. Dadurch wird dauerhaft eine Atmosphäre geschaffen, in der Brände gar nicht erst entstehen, Personen aber darin arbeiten können.

Konventionelle Systeme zur präventiven Brandvermeidung für Lagerräume oder Datacenter nutzen dafür stromintensive Luftzerlegungsanlagen und Kompressoren, verbunden mit umfangreichen Investitionen und insbesondere hohen Betriebskosten.

Bei der QuattroGeneration der Fuji N2telligence GmbH handelt es sich um eine 100 kW PAFC-Brennstoffzelle. Diese KWK(K)-Anlage produziert als Zusatzprodukt Brandschutz zum Nulltarif. Somit steht mit dieser Anlage erstmals ein System zur Brandprävention zur Verfügung, das über die zeitgleiche Energiebereitstellung Erlöse und somit einen

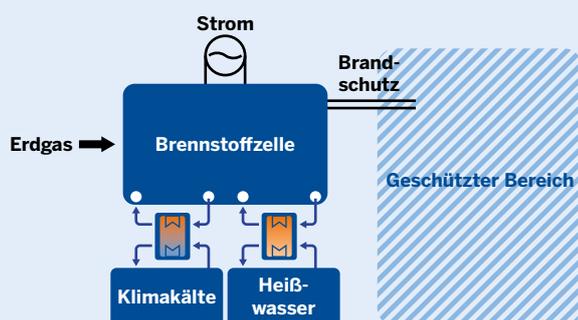
Return-on-Invest erwirtschaftet. Aus diesem Grund hat sich die Minimax GmbH & Co. KG als eines der weltweit führenden Marken im Brandschutz zu einer Zusammenarbeit mit der Fuji N2telligence GmbH entschlossen.

Im Mai 2015 wurde am Zentrum für Brennstoffzellentechnik (ZBT) GmbH in Duisburg eine Anlage dieses Typs in Betrieb genommen (Abbildung oben). Dabei werden der Strom und die Wärme zur Gebäudeenergieversorgung eingebunden, während auf die optionale Nutzung von Kälte aufgrund des nur sporadischen Bedarfs verzichtet wurde. Die sauerstoffarme Luft hingegen wird zu Versuchs- und Demonstrationszwecken genutzt. Bis heute läuft die Anlage weitestgehend störungsfrei, eine Degradation der Brennstoffzellen ist während dieser Betriebszeit nicht zu erkennen.

Kontakt:

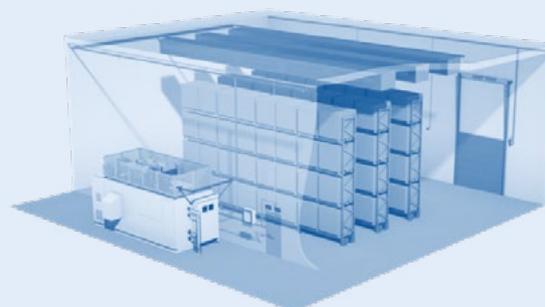
Lars Frahm
 Fuji N2telligence GmbH
 Tel. 03841/7584500
 Lars.Frahm@n2telligence.com
www.n2telligence.com

Brandschutz mit Brennstoffzellen



Quelle: Fuji-N2-telligence GmbH

Anwendungsbeispiel zum Brandschutz



Quelle: Fuji N2telligence GmbH

Stützung kritischer Versorgungsinfrastruktur mittels Brennstoffzellen

Auch in der kritischen Stromversorgung bieten Brennstoffzellen zahlreiche technische Vorteile im Vergleich zu konventionellen Lösungen: höhere Lebensdauer, längere Überbrückungszeiten, geringerer Energieverbrauch – also ein Weg in eine effiziente, intelligente und ressourcenschonende Zukunft.

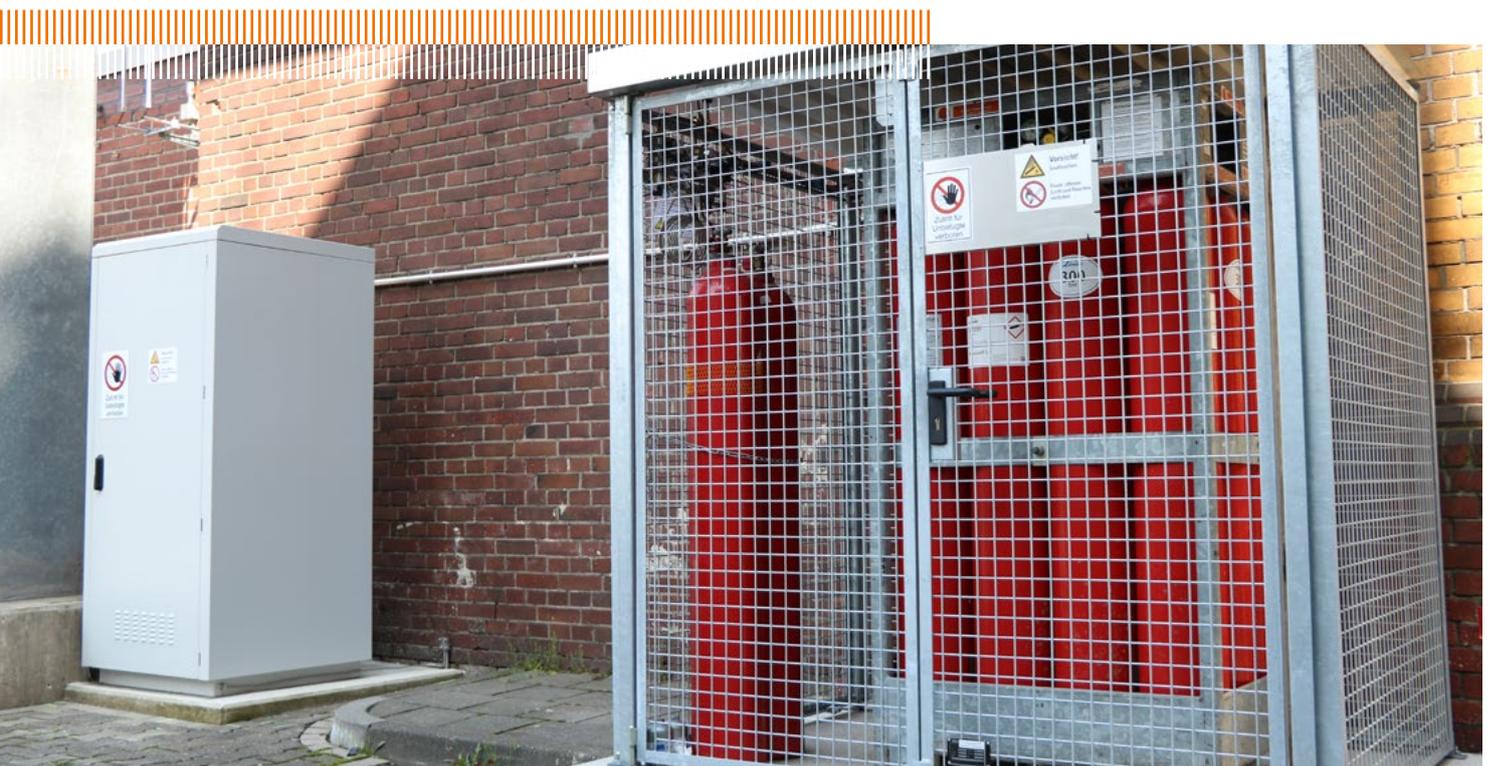
Die Netzgesellschaft Düsseldorf mbH (NGD) ist eine 100-prozentige Tochtergesellschaft der Stadtwerke Düsseldorf AG und ist für den Betrieb der Strom-, Gas-, Wasser- und Fernwärmenetze der Stadt zuständig. Um der Versorgungsaufgabe nach dem EnWG nachzukommen, ist die NGD stets bestrebt, moderne Technologien zum Einsatz zu bringen. Die gewonnenen Informationen aus der Netz-Sensorik sowie aus den zukünftigen intelligenten Messsystemen bieten in Verbindung mit Netzautomatisierungstechnologien Potenziale für eine effiziente und zukunftsfähige Nutzung der Ressourcen. Des Weiteren ist die zukünftige Integration von zahlreichen E-Ladeeinrichtungen für die Netzbetreiber eine Herausforderung. Um diese Daten sicher und kosteneffizient zu übertragen, hat die NGD frühzeitig ein CDMA 450 MHz Netz aufgebaut.

Dies bedeutet aber auch, dass diese Daten durchgehend zur Verfügung stehen müssen. Mit dem Aufbau dieses neuen Kommunikationssystems wurden auch die Notversorgungen umfassend beleuchtet. Insbesondere in der Betrachtung der Kosten über den gesamten Lebenszyklus hat sich eine PEM-Brennstoffzelle durchgesetzt. In 2017 wurde der Aufbau von fünf Brennstoffzellen mit Leistungen von 2 bzw. 8 kW ausgeschrieben, um Sekundäranlagen in Stationen sowie Antennenstandorte des CDMA-Netzes gegen Netzausfall zu härten. Dabei lag der Fokus auch auf einer Erweiterbarkeit bei leichten Leistungssteigerungen. Ende des Jahres 2017 konnten an allen fünf Standorten die modernen luftgekühlten PEM-Brennstoffzellen vom Typ Jupiter durch die adKor GmbH erfolgreich in Betrieb genommen werden.

Kontakt:

Fabian Fischer
Netzgesellschaft Düsseldorf mbH
Tel. 0211/8212508
ffischer@netz-duesseldorf.de

www.netz-duesseldorf.de



Netzersatzanlage der Netzgesellschaft Düsseldorf am Standort Flingern



Copyright: Manuel Gloger

Wasserstoff- und Brennstoffzellenland Nordrhein-Westfalen

Bislang wurden von der Landesregierung Nordrhein-Westfalen und von der Europäischen Union (Europäischer Fonds für regionale Entwicklung – EFRE) knapp 150 Mio. Euro für mehr als 130 Projekte in der Brennstoffzellen- und Wasserstofftechnik zur Verfügung gestellt. Das Themenspektrum der Projekte reicht von der Entwicklung einzelner Systemkomponenten wie Verdichter und Sensoren bis hin zu Entwicklungen und Erprobungen komplexer Brennstoffzellenapplikationen wie z. B. Bussen oder mobile Tankstellen. Im Bereich der batterieelektrischen Mobilität wurden basierend auf den bundeseitigen Förderprogrammen „Modellregionen Elektromobilität“ und „Förderrichtlinie Elektromobilität“ seit 2009 rund 80 Projekte mit einem Fördervolumen von 56 Mio. Euro gestartet und begleitet. Weitere Projekte kommen kontinuierlich hinzu.

Netzwerk Brennstoffzelle und Wasserstoff, Elektromobilität

Das Netzwerk arbeitet als eines von zwölf Netzwerken der EnergieAgentur.NRW im Auftrag der Landesregierung von Nordrhein-Westfalen. Es setzt seit März 2017 die seit dem Jahr 2000 bestehende Arbeit des Netzwerks Brennstoffzelle und Wasserstoff NRW und die seit 2009 laufenden Aktivitäten der Projektleitstelle der Modellregion Elektromobilität NRW fort.

Mit Blick auf die Herausforderungen der Energiewende, des Klimaschutzes, der Steigerung der Energieeffizienz und des Ausbaus der regenerativen Energien gelten die Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnik sowie die batterieelektrische Mobilität als wichtige Schlüsseltechnik in allen Bereichen des Energie- und Verkehrssystems.

Mehr als 470 Mitglieder und über 120 Projektpartner aus der Modellregion Elektromobilität NRW aus Wirtschaft und Wissenschaft arbeiten heute bereits aktiv mit und nutzen die zahlreichen Dienstleistungen des Netzwerks.

Das Hauptaugenmerk der Netzwerktätigkeiten liegt dabei auf der Initiierung und fachlichen Begleitung von Kooperationsprojekten. Als Folge des Ausbaus der regenerativen Stromerzeugung im Zuge der Energiewende wird Wasserstoff eine zunehmend wichtige Rolle als Speichermedium in der künftigen Energieversorgung spielen. Überschüssiger Windstrom kann mittels Wasserelektrolyse zentral, insbesondere aber auch dezentral in Wasserstoff umgewandelt werden (Stichwort Power-to-Gas). Dieser Wasserstoff kann anschließend über verschiedene technische Wege gespeichert und bei Bedarf, etwa mittels Brennstoffzellen, hocheffizient rückverstromt oder als „heimischer Kraftstoff“ in Brennstoffzellenfahrzeugen für eine emissionsfreie Mobilität genutzt werden. Projekte zur Erprobung dieses Ansatzes – darunter die Windstromelektrolyse, der Aufbau der Tankstelleninfrastruktur und die Alltagserprobung von Brennstoffzellenfahrzeugen – bilden aktuell einen Schwerpunkt der Netzwerktätigkeit.

Das Netzwerk testet seit mehreren Jahren Brennstoffzellenfahrzeuge. Die Fahrzeuge wurden im Rahmen der CEP zur Verfügung gestellt, um ihre Alltagstauglichkeit unter Beweis zu stellen. Die verschiedenen Fabrikate haben elektrische Antriebe um die 100 kW und verbrauchen rund 1 kg/100 km, was ungefähr 5 l/100 km Diesel entspricht. Bis Mitte 2018 wurden über 100.000 km mit knapp einer Tonne Wasserstoff bei rund 500 Betankungen an H₂-Tankstellen zurückgelegt.

Darüber hinaus arbeitet das Netzwerk auch intensiv im Bereich der stationären Brennstoffzellenanwendungen. So werden Brennstoffzellen in Heizungskellern zur Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) oder zur unterbrechungsfreien oder netzfernen autarken Stromversorgung, beispielsweise von Mobilfunkmasten, eingesetzt. Investitionen in ein KWK-System mit Brennstoffzellen können attraktiv gefördert werden.

Um den fachlichen Austausch zwischen seinen Mitgliedern zu unterstützen, hat das Netzwerk verschiedene Expertengruppen zu Themen wie „H₂-System“, „Power-to-Gas“, „Markteinführung“, „H₂ für den ÖPNV“ und „Elektromobilität“ eingerichtet. Dort treffen sich regelmäßig verschiedene Experten, um detailliert konkrete Fragestellungen zu erörtern.



Teilnehmer beim Schülerwettbewerb FUELCELLBOX



Das sind die Preisträger des Forschungspreises Wasserstoff.NRW 2017

Zur Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses organisiert das Netzwerk seit mehreren Jahren den Schülerwettbewerb FUELCELLBOX, an dem regelmäßig rund 200 Teams aus ganz Nordrhein-Westfalen teilnehmen sowie den Forschungspreis Wasserstoff.NRW zusammen mit dem Cluster EnergieForschung.NRW, der junge Akademiker ermuntern soll, die Kernthemen der Forschungsstrategie Fortschritt NRW in ihre Abschlussarbeiten zu integrieren und so den Forschungsstandort NRW weiter zu festigen.

Das Netzwerk hat dazu beigetragen, dass NRW heute – auch international – als einer der führenden Brennstoffzellenstandorte in Europa angesehen wird. Neben der Mitgliedschaft in der europäischen Partnerschaft Hydrogen, Fuel Cells and Electro-Mobility in European Regions (HyER) wird dies durch die Ansiedlungen bedeutender Brennstoffzellenunternehmen wie Hydrogenics (Kanada) sowie Ceramic Fuel Cells (Australien, heute SOLIDpower) belegt. Ausländische Hersteller von Brennstoffzellen- und Wasserstofftechnologien wie die japanische Fa. Asahi Kasei lassen bei nordrhein-westfälischen Unternehmen und Instituten ihre Technologien auf Kompatibilität mit europäischen Anforderungen testen. Mit Fahrzeugherstellern wie StreetScooter und der e.GO AG sowie dem Ladeinfrastrukturhersteller Mennekes haben auch führende Akteure in der batterieelektrischen Mobilität ihren Sitz in NRW.

Unternehmen und Institute, die bereits auf dem Gebiet der Brennstoffzellen-, Batterie- und Wasserstofftechnik tätig sind, aber auch solche, die aufgrund ihres Know-hows künftig in der Entwicklung der Technologien tätig sein wollen, sind ausdrücklich eingeladen, sich im Netzwerk zu engagieren. Auch Anwender der Technologien sind willkommen. Die Mitgliedschaft im Netzwerk ist kostenlos.

Kontakt:

Stefan Garche
 Netzwerk Brennstoffzelle und Wasserstoff, Elektromobilität
 der EnergieAgentur.NRW
 Tel. 0211/866 4223
 garche@energieagentur.nrw

www.energieagentur.nrw
www.fuelcellbox-nrw.de

Cluster EnergieForschung.NRW (CEF.NRW)

Der Cluster EnergieForschung.NRW arbeitet ebenfalls als Teil der EnergieAgentur.NRW im Auftrag der Landesregierung Nordrhein-Westfalen und versteht sich als der Ansprechpartner zu allen Fragen der Energieforschung im Lande. Zudem fungiert der Cluster als Transferstelle zwischen den energierelevanten Aktivitäten auf Seiten der EU und des Bundes sowie gesellschaftlicher Initiativen. Ein besonderer Fokus des Clusters liegt auf folgenden Forschungsfeldern:

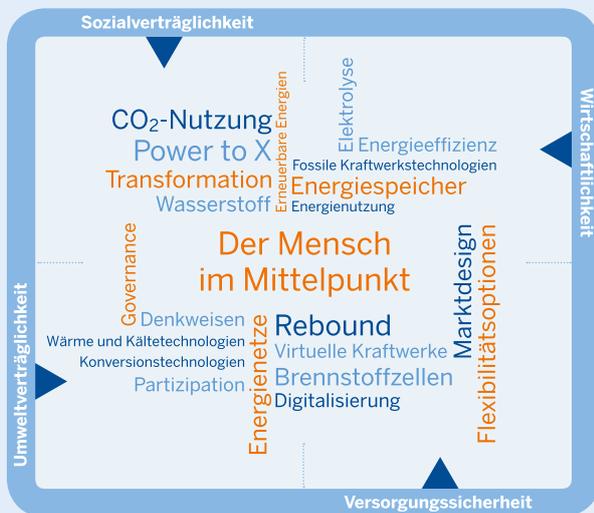
- Erneuerbare Energien
- Fossile Energieerzeugung
- Netze und Speicher
- Digitalisierung
- Energieökonomie und gesellschaftspolitische Aspekte
- Brennstoffzelle und KWK

Die Arbeit des Clusters EnergieForschung.NRW zielt auf die Initiierung und Förderung von Forschung und Entwicklung nachhaltiger Energietechnologien ab. Somit leistet der Cluster einen Beitrag zur Erfüllung der energie-wirtschaftlichen und klimapolitischen Zielvorgaben der Landesregierung sowie zur Verbesserung der nationalen und internationalen Wettbewerbsfähigkeit. Der Cluster treibt die koordinierte Zusammenarbeit von Forschungs- und Wissenschaftseinrichtungen mit der Wirtschaft voran und trägt dazu bei, dass technologische und sozioökonomische Erkenntnisfortschritte rasch ihren Weg in die Anwendung finden und leistet damit einen wesentlichen Beitrag zur Energiewende.

Ziel der Arbeit des Clusters EnergieForschung.NRW ist die Sicherung einer umweltschonenden, zuverlässigen und bezahlbaren nachhaltigen Energieversorgung der Zukunft. Dazu gilt es, das komplexe Energieversorgungssystem als Ganzes in den Fokus der interdisziplinären und transdisziplinären Aktivitäten zu stellen.

Das Management des CEF.NRW liegt bei der Energie-Agentur.NRW, so dass ihre Netzwerke und Partner auch in Zukunft die Grundlage der Clusterarbeit bilden. Somit ist auch die enge Verzahnung mit dem Cluster Energie-Region.NRW gegeben. Auch dieser wird von der Energie-Agentur.NRW gemanagt.

Energieforschung in Nordrhein-Westfalen: Der Schlüssel zur Energiewende



Kontakt:

Dr. Benedikt Rösen
Cluster EnergieForschung.NRW
Tel. 0211/21094410
info@cef.nrw.de

www.cef.nrw.de

EnergieAgentur.NRW

Die EnergieAgentur.NRW arbeitet im Auftrag der Landesregierung von Nordrhein-Westfalen seit 1990 als operative Plattform mit breiter Kompetenz im Energiebereich: von der Energieforschung, technischen Entwicklung, Demonstration und Markteinführung über die Energieberatung bis hin zur beruflichen Weiterbildung. Energieeffizienz und Klimaschutz stehen dabei im Mittelpunkt vieler Aktivitäten. In Zeiten von Energiewende, ökonomischerer Energieverwendung und Klimaschutz gilt es mehr denn je, die Entwicklung von innovativen Energietechnologien in NRW zu forcieren und von neutraler Seite in einem ganzheitlichen Ansatz Wege aufzuzeigen, wie Unternehmen, Kommunen und Privatleute effizienter mit Energie umgehen oder erneuerbare Energien sinnvoll einsetzen können.

Die EnergieAgentur.NRW ist an den Standorten Düsseldorf, Gelsenkirchen und Wuppertal aktiv und wird zu jeweils 50 Prozent vom Land NRW und aus Mitteln der Europäischen Union EFRE (Europäischer Fonds für regionale Entwicklung) finanziert.

Cluster- und Netzwerkmanagement

Im Auftrag des NRW-Wirtschaftsministeriums managt die EnergieAgentur.NRW das Cluster EnergieRegion.NRW und verantwortet leistungsstarke Netzwerke für den Klimaschutz. Dazu gehören etwa die Themen Mobilität, Netze und Speicher, erneuerbare Energien oder Energieeffizienz und erneuerbare Wärme in Gebäuden und Quartieren. Die EnergieAgentur.NRW organisiert auch das Netzwerk „Brennstoffzelle und Wasserstoff, Elektromobilität“, das sich mit der gesamten Kette des Wasserstoffs von der Produktion über die Speicherung bis zu dessen Nutzung in stationären und mobilen Anwendungen, aber auch mit der batterie-elektrischen Mobilität befasst (siehe dazu auch Seite 70 ff.). Im Fokus der Netzwerkarbeit stehen wettbewerbsstarke Kooperationen, um innovative Projekte und Produkte zu initiieren, ihre Marktreife zu beschleunigen und alle wirtschaftlichen Potenziale auszuschöpfen.

Initialberatung

Die Ingenieurinnen und Ingenieure der EnergieAgentur.NRW informieren ihre Zielgruppen über energetische Schwachstellen – von der Gebäudetechnik bis zu Produktionsabläufen. Die Expertinnen und Experten der EnergieAgentur.NRW bieten mit Erstberatungen einen Einstieg in Sachen Energieeffizienz und verhelfen Unternehmen zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit und Kommunen zu geringeren Energiekosten. Das Spektrum reicht von der Heizungsanlage über die Wärmerückgewinnung bis zur Dämmung als Schutz vor Wärme und Kälte in großen Werkshallen, von der Leckage-Suche bis zur Erstellung von Energiekonzepten.

Wissensmanagement

Im Rahmen des Wissensmanagements werden Workshops sowie unterschiedliche Formate des Wissenstransfers für Kommunen, Unternehmen, Bürgerinnen und Bürger sowie Schulen und Kindertagesstätten erarbeitet und angewendet. Diese Angebote dienen der Überwindung von Informationsdefiziten in den Bereichen Klimaschutz und Energiewende. Einen besonderen thematischen Schwerpunkt bilden die Sensibilisierung und Motivation der Beschäftigten für das energiebewusste Verhalten.

Aktionen und Projekte

Darüber hinaus koordiniert die EnergieAgentur.NRW landesweite Marktinitiativen oder Gemeinschaftsaktionen. Die Aktion „AltBauNeu“, „100 Klimaschutzsiedlungen in NRW“, die „Aktion Holzpellets“ oder der „Wärmepumpen-Marktplatz NRW“ und „KWK.NRW – Strom trifft Wärme“ sind hier beispielhaft zu nennen.

Kontakt:

EnergieAgentur.NRW
 Roßstraße 92, 40476 Düsseldorf
 Tel. 0211/866420
 info@energieagentur.nrw

www.energieagentur.nrw



Der Deutsche Wasserstoff Congress

Seit dem Jahr 2000 organisiert die EnergieAgentur.NRW gemeinsam mit dem Deutschen Wasserstoff- und Brennstoffzellenverband und der NOW Nationalen Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie den Deutschen Wasserstoff Congress „H2CONGRESS“. Diese alle zwei Jahre stattfindende Konferenz liefert bezogen auf die Bereiche Energie, Technik und Wirtschaft qualifizierte Expertenbeiträge über den Weg und die Rolle des Wasserstoffs in der Energiewirtschaft sowie über den Entwicklungsstand und die Perspektiven der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien. Der Kongress richtet sich mit intensiver Auseinandersetzung um die Potenziale des Energieträgers Wasserstoff im Hinblick auf die Herausforderungen einer zukünftigen Energiewirtschaft insbesondere an Entscheidungsträger in Politik, Industrie, Forschung und im Finanzsektor. In Fachvorträgen wird über aktuelle Ergebnisse in Forschung, Entwicklung und Demonstration bei der Herstellung, Verteilung und Speicherung von Wasserstoff sowie beim Einsatz von Brennstoffzellen in den verschiedenen Anwendungssektoren berichtet. Der Fokus des Kongresses liegt neben deutschen vor allem auf internationalen Aktivitäten in dem Themenfeld.

Veranstaltungsort ist regelmäßig die Vertretung des Landes Nordrhein-Westfalen in Berlin. Im Juni 2018 fand die Veranstaltung bereits zum 8. Mal statt.

Kontakt:

www.h2congress.de



Impressionen vom Deutschen Wasserstoff Congress in Berlin

Regionale Aktivitäten

HyCologne – Wasserstoff Region Rheinland e.V.

Das Netzwerk HyCologne-Wasserstoff Region Rheinland e.V. organisiert mit öffentlichen und industriellen Partnern die Bereitstellung von Industrierwasserstoff als Energieträger für den Verkehr und weitere Projekte. In der Region Köln fällt Wasserstoff in großen Mengen als Nebenprodukt in der lokalen Chemieindustrie (überwiegend bei Chlor-Produktion, ohne zusätzlichen Energieaufwand) und in Raffinerien an. Seit 2010 ist eine erste Wasserstoff-Tankstelle (350 bar) in Hürth im Betrieb und ermöglichte den Betrieb von zunächst 4 Brennstoffzellen-Bussen (seit 2011). Dieser Betrieb dokumentiert eindrucksvoll die technische und organisatorische Machbarkeit von Null-Emissionstechnologie im ÖPNV mit voller Reichweite (über 250 km pro Fahrzeug pro Tag) sowie den starken Willen und das finanzielle Engagement der beteiligten Partner.

Als erste Anwendung wurden ab 2010 zwei Brennstoffzellen-Hybridbusse des Typs „Phileas“ in den Alltagsbetrieb genommen. Seit 2014 wurden zwei weitere Wasserstoff-Brennstoffzellen Busse des Typs A330 FC von Van Hool im Linienbetrieb in den Städten Brühl und Hürth eingesetzt – mit einer Zuverlässigkeit vergleichbar mit Dieseln. Die Busse werden in Hürth, im Rhein-Erft-Kreis und in der Region Köln betrieben und haben bis Mitte 2018 mehr als 200.000 km im Linienbetrieb geleistet.

Das Projekt „Chemergy – Bereitstellen von Nebenprodukt-Wasserstoff für Verkehrsprojekte“ (2009 - 2012) verfolgte im Rahmen des Nationalen Innovationsprogramms (NIP) über einen Zeitraum von drei Jahren das Ziel, öffentlichen Zugang zu der bislang geschlossenen Chemieinfrastruktur zu schaffen, damit Wasserstoff als Energieträger für den Verkehr nutzbar gemacht werden kann. Seit dem Ende des Förderzeitraums wird diese von Air Products erbaute Tankstelle erfolgreich von den Stadtwerken Hürth und Brühl weitergeführt und zeichnet sich durch eine sehr hohe Verfügbarkeit (> 98 %) aus.

Im Jahr 2018 wird die Kapazität dieser Tankstelle erweitert, denn ab 2019 werden in Hürth und Brühl weitere Brennstoffzellen-Busse im Linienbetrieb eingesetzt, im Umkreis von Köln werden bis 2021 noch 45 weitere Wasserstoff-Brennstoffzellenbusse in den Betrieb gehen. Neben dem bereits erfolgten Aufbau der Tankstelle am Flughafen Köln/Bonn wird die Wasserstoff-Infrastruktur in der Region um zwei weitere Tankstellen in Meckenheim und Wermelskirchen erweitert.

Kontakt:

Boris Jermer
HyCologne Wasserstoffregion Rheinland e.V.
Tel. 02233/406123
jermer@hycologne.de

www.hycologne.de



h2-netzwerk-ruhr e.V.

In der Metropole Ruhr hat der Umgang mit Wasserstoff Tradition. Ein Netz von Wasserstoffpipelines verbindet industrielle Anwender und Produzenten, eine Hochdruck-Trailer-Abfüllung erweitert effizient die Versorgung, und exzellente Forschungsstätten befassen sich mit Fragen der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnik. Damit hat die Metropole das Potenzial, eine führende Rolle im Feld der emissionsfreien Wasserstofftechnologien zu spielen. 2003 wurde das Zentrum für Brennstoffzellentechnik (ZBT) GmbH in Duisburg gegründet. Die Emschergenossenschaft gewann im Projekt EuWaK - Erdgas und Wasserstoff aus Kläranlagen. Wasserstoff aus Klärgas. In „HyChain“ wurden Kleinfahrzeuge demonstriert – mit Mängeln in der Fahrzeugtechnik aber zuverlässigen Brennstoffzellen. In Gladbeck siedelte sich die Hydrogenics GmbH an, in Herten wurde das Wasserstoffanwenderzentrum mit der als Forschungsinfrastruktur mietbaren Windstromelektrolyse errichtet (siehe unten), und die Westfälische Hochschule nahm die Systementwicklung auf.

Als Zusammenschluss von Kommunen, Unternehmen und Forschungsstätten begleitet der h2-netzwerk-ruhr e.V. die Entwicklung von Brennstoffzellen- und Wasserstofftechnik mit dem Ziel, Arbeitsplätze zu schaffen. Der 2008 gegründete Verein hat aktuell 35 Mitglieder – zuletzt erweitert um Unternehmen des leitungsbasierten Gastransports. Schwerpunkte der Arbeit sind Fachveranstaltungen, Öffentlichkeits- und Bildungsarbeit, die Anbahnung von Partnerschaften und Lobbyarbeit, die aktuell gemeinsam mit HyCologne betrieben wird. Der gemeinsame Rhein-Ruhr-Wasserstoff-Workshop unterstützt durch die EnergieAgentur.NRW versammelt regelmäßig hochkarätige Fachleute unter dem Motto „Think Big!“

Kontakt:

Dr. Michael Weber
h2-netzwerk-ruhr e.V.
Tel. 0211/86642245
m.weber@h2-netzwerk-ruhr.de

www.h2-netzwerk-ruhr.de

Anwenderzentrum h2herten

Im Anwenderzentrum h2herten wurde mit Mitteln des Landes NRW und der EU (EFRE) eine mindestens europaweit einzigartige Pilotanlage aufgebaut, auf der Anlagenkonfigurationen in beliebigen realen und fiktiven regenerativen Erzeugungsprofilen und realen Lastgängen in Echtzeit gefahren und über ausgeklügelte Messwert-Erfassungen beobachtet werden können. Nachdem in Herten das erste Ziel des Projekts – der Nachweis einer dauerhaften autarken Energieversorgung einer Gewerbeimmobilie mit Wind und Strom auf Basis eines Wasserstoffspeichers – erreicht wurde, ist die Forschungs- und Entwicklungsplattform nun für Industrie und Wissenschaft geöffnet.

So können in dieser Zwischenstufe zwischen Labor und Netz nun erstmalig mit vergleichsweise geringem Aufwand reale Betriebserfahrungen mit Komponenten, Anlagen oder Systemen für die regenerative Energieversorgung gesammelt werden. Das Angebot richtet sich nun neben der Wissenschaft, Energieversorgung und Betreibern von Gewerbegebieten vor allem an Hersteller von Komponenten sowie Anlagenbauer und Systemhersteller.

Da alle Versuche auf der Anlage als Simulation laufen, kann sie für die verschiedensten Anwendungsszenarien flexibel konfiguriert werden. Während bei netzbildendem Inselbetrieb Betriebs- und Regelungskonzepte sowie Fragen der Zuverlässigkeit und des Fehlermanagements im Fokus stehen, eignet sich der robuste netzparallele Betrieb vor allem für die Optimierung von Belastbarkeit, Effizienz und Wirtschaftlichkeit einzelner Anlagenkomponenten. Neben dem Betrieb als Gesamtsystem ist auch ein Einzelbetrieb von Komponenten möglich, die so beispielsweise für spätere Simulationen charakterisiert werden können. Die wahlweise manuelle oder automatische Steuerung und Überwachung erfolgt durch ein gängiges Prozess-Leitsystem.

Aktuelle Entwicklungen:

- Zertifizierung und Markteinführung einer alkalischen Wasserelektrolyse, Untersuchungen zur dynamischen Betriebsweise, Kooperationspartner: Asahi Kasei Europe GmbH
- Entwicklung eines gravimetrischen Kalibriersystems für die Eichung von H₂-Dispensern zur Hochdruckbetankung von Fahrzeugen, Kooperationspartner: Energieinstitut der Westfälischen Hochschule, Fa. Esters Aschaffenburg
- Errichtung und Betrieb einer öffentlichen 700 bar H₂-Abfüllanlage für Pkw und Müllsammelfahrzeuge, Projektträger: H₂ MOBILITY Deutschland GmbH & Co. KG

Kontakt:

Dieter Kwapis
Anwenderzentrum h2herten GmbH
Tel. 02366/305286
info@h2herten.de

www.h2herten.de



Wasserstoff-Anwenderzentrum h2herten



Virtuelles Institut „Strom zu Gas und Wärme“

Eine der großen gesellschaftlichen Herausforderungen ist die Transformation des bestehenden fossil dominierten Energieversorgungssystems hin zu einer klimafreundlichen, zugleich sicheren und bezahlbaren Energieversorgung. Dieser Umbau unserer Energieversorgung und der daraus folgende Ausbau der fluktuierenden erneuerbaren Energien gemäß den Zielen von Bund und Land NRW werden mittelfristig dazu führen, dass das zeitliche und örtliche Stromangebot nicht zur Nachfrage passt. Dementsprechend muss das zukünftige Energieversorgungssystem deutlich flexibler ausgestaltet werden.

„Strom zu Gas und Wärme“ ist dafür eine mögliche Antwort auf die Anforderungen der Flexibilisierung. Strom kann entweder direkt zur Wärmeerzeugung verwendet werden oder über verschiedene Prozesse in gasförmige Energieträger (z. B. Wasserstoff, synthetisches Erdgas) oder flüssige Treibstoffe (z. B. Methanol) umgewandelt werden.

In unserem komplexen Energiesystem existiert eine Vielzahl von möglichen Strom-Nutzungspfaden und damit auch an Flexibilitätsoptionen. Das 2014 gegründete Virtuelle Institut „Strom zu Gas und Wärme“ hat die Aufgabe, mögliche Nutzungspfade zu analysieren und sowohl technisch als auch ökonomisch zu bewerten. Dazu identifiziert und bündelt das Virtuelle Institut die in NRW vorhandenen Kompetenzen. Mit dem Begriff „virtuell“ ist verbunden, dass keine Strukturen – personeller oder materieller Natur – aufgebaut werden, sondern dass die in NRW vorhan-

denen themenspezifisch effizient zusammenarbeiten. Die Koordination übernehmen dabei das Gas- und Wärme-Institut Essen e.V. (GWI) und das Energiewirtschaftliche Institut an der Universität zu Köln (ewi). Weitere Partner sind das Forschungszentrum Jülich (FZJ) mit den Arbeitsgruppen IEK-3 und IEK-STE, das Wuppertal Institut (WI), das Zentrum für Brennstoffzellentechnik (ZBT), Fraunhofer UMSICHT und der Lehrstuhl „Technische Chemie“ der Ruhr-Universität Bochum (RUB).

Neben der Analyse der Flexibilitätsoptionen entsteht darüber hinaus am GWI in Essen eine Forschungsinfrastruktur für Power-to-X, die es erlaubt, technische Prozesse (z. B. Power-to-Gas) experimentell zu studieren. Die erhaltenen Daten fließen in die Pfadanalysen ein.

Das Virtuelle Institut „Strom zu Gas und Wärme“ versteht sich als offene Plattform für alle Akteure, die sich mit der Sektorenkopplung beschäftigen, und stellt seine Kompetenzen auch für externe Projektpartner zur Verfügung.

Kontakt:

Janina Senner
Gas- und Wärme-Institut Essen e.V.
Tel. 0201/3618-238
senner@gwi-essen.de

www.strom-zu-gas-und-waerme.de

Internationale Aktivitäten

HyER

HyER steht für „Hydrogen, Fuel Cells and Electro-Mobility in European Regions“ und wurde 2008 auf Initiative der Europäischen Kommission gegründet. Diese Partnerschaft koordiniert die europäischen Aktivitäten von derzeit 20 europäischen Regionen und Städten aus zehn Ländern in Zusammenhang mit europäischen Initiativen und Programmen. Sie fördert die Verbreitung und Kommerzialisierung der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (stationäre und mobile Anwendungen) und der Elektromobilität (batterie- wie brennstoffzellenbasiert) sowie die Entwicklung der dazu notwendigen Infrastrukturen. Gleichzeitig fungiert sie als Ansprechpartner bei EU-Vorhaben und unterstützt bei der Einreichung von Projektanträgen. Die drei Tätigkeitsschwerpunkte von HyER sind:

- Entwicklung und Verbreitung von Handlungsempfehlungen für Entscheidungsträger in den Mitgliedskommunen und -regionen auf der Grundlage aktueller technischer Informationen (HyER ist in zahlreichen EU-Vorhaben engagiert),

- Analyse, Bewertung und – wo nötig– auch Beitrag zur Ausgestaltung eines europäischen Förder- und Finanzrahmens für Kommunen und Regionen zur Entwicklung, Erprobung und Markteinführung innovativer Technologien sowie
- Zusammenstellung und Erarbeitung von robusten Entwicklungsszenarien für innovative Technologien in den Mitgliedsregionen und -kommunen sowie Analyse und Bewertung der jeweiligen Treiber und Motivationen.

Nordrhein-Westfalen ist Gründungsmitglied von HyER und hatte von 2008 bis 2014 den Vorsitz inne.

Kontakt:

www.hyer.eu

Internationale Mitglieder



Mitglieder in HyER:

- Aberdeen City Council UK
- Akershus NO
- Aragon ES
- Arnhem – Nijmegen NL
- Baden-Württemberg DE
- Berlin DE
- Bolzano IT
- Hamburg DE
- La Manche FR
- Lazio IT
- Lombardy IT
- Midi – Pyrenees FR
- NRW DE
- Piemonte IT
- Province of Groningen NL
- Riga LV
- Rogaland County Council NOR
- Skane SW
- Torres Vedras PT
- Transport Scotland UK
- Trento IT



Zusammenarbeit mit außereuropäischen Regionen

Außerhalb Europas kooperiert das Netzwerk Brennstoffzelle und Wasserstoff, Elektromobilität schon seit vielen Jahren insbesondere mit den japanischen Präfekturen Fukushima, Fukuoka, Osaka und Yamanashi sowie mit der kanadischen Provinz British Columbia. All diese Regionen stehen wie NRW für ein außergewöhnliches Engagement im Bereich der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnik in ihren jeweiligen Ländern.

Bereits in 2014 unterzeichnete das Land NRW mit der Präfektur Fukushima ein Memorandum of Understanding zur Zusammenarbeit im Energiebereich einschließlich Wasserstoffwirtschaft/-technologien. Die Präfektur Fukushima möchte bis 2040 ihren kompletten Verbrauch an Primärenergie aus erneuerbaren Energien bestreiten. Laut Premierminister Abe soll Fukushima Hauptproduktionsort von grünem Wasserstoff in Japan werden. Dieser soll u. a. bei den Olympischen Sommerspielen 2020 im öffentlichen Verkehr zum Einsatz kommen.

Mit allen Regionen werden einerseits ein grundsätzlicher Austausch über Infrastrukturkonzepte, politische Rahmenbedingungen und technische Standards betrieben sowie andererseits Kooperationen zwischen den Regionen mit Unternehmen und Forschungsinstituten vorbereitet. Zahlreiche Delegationen vor allem aus Japan besuchten zudem Wasserstoff- und Brennstoffzellenprojekte in NRW.

Kontakt:

www.energy-agency-fukushima.com/en

www.hysut.or.jp/en

www.chfca.ca

Abkürzungsverzeichnis

AFC	Alkalische Brennstoffzelle
APU	Auxiliary Power Units (Hilfsstrom, z. B. Bordstromversorgung)
bar	Einheit für Druck (1 bar ist der Luftdruck an der Erdoberfläche)
BEV	Battery Electric Vehicle (Batterieelektrisches Fahrzeug)
CNG	Compressed Natural Gas (Druckerdgas)
DMFC	Direkt-Methanol-Brennstoffzelle
EE	Erneuerbare Energien
FCEV/FCV	Brennstoffzellenelektrisches Fahrzeug (mit Wasserstoff)
GW/GWh	Gigawatt/Gigawattstunde
HT-PEM	Hochtemperatur-PEMFC (120 - 200 °C)
kW/kWh	Kilowatt/Kilowattstunde
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LOHC	Liquid Organic Hydrogen Carriers (Flüssiges Wasserstoffspeichermaterial)
LPG	Liquified Petrol Gas (Flüssiggas)
MCFC	Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle
MEA	Membran-Elektroden-Anordnung
MJ	Megajoule
mol	Basiseinheit der Stoffmenge
MW/MWh	Megawatt/Megawattstunde
NiMH	Nickel-Metallhydrid
Nm³	Normkubikmeter (bei Normaldruck und 0 °C)
NOX	Stickoxide
NT-PEM	Niedrigtemperatur-PEMFC (60 - 80 °C)
PAFC	Phosphorsäure-Brennstoffzelle
PEMFC	Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle
Power-to-X	Strom zu einem anderen Energiemedium transferieren (wie Gas, Wärme, Flüssigkeiten)
REG	regenerativ
REX	Range Extender (Reichweitenverlängerer)
SOFC	Oxidkeramische Brennstoffzelle
TTW	Tank-to-Wheel (Effizienzberechnungen vom Tank bis zum Rad)
TW/TWh	Terrawatt/Terrawattstunde
WTW	Well-to-Wheel (Effizienzberechnungen von der Energiequelle bis zum Rad)

Literaturverzeichnis

- (1) Robinius, M., A. Otto, P. Heuser, L. Welder, K. Syranidis, D. Ryberg, T. Grube, P. Markewitz, R. Peters, and D. Stolten, Linking the Power and Transport Sectors - Part 1: The Principle of Sector Coupling. *Energies*, 2017. 10⁽⁷⁾: Seite 956
- (2) Markewitz, P., T. Grube, M. Robinius, T. Kannengießer, and D. Stolten, Energie-transport- und Verteilung. *Brennstoff-Waerme-Kraft*, 2017. 69⁽⁵⁾: Seiten: 45-53
- (3) Markewitz, P., T. Grube, M. Robinius, T. Kannengießer, and D. Stolten, Energietransport- und Verteilung. *Brennstoff-Waerme-Kraft*, 2017. 69⁽⁵⁾: Seiten: 45-53/BMWi, Zahlen und Fakten Energiedaten - Nationale und internationale Entwicklung, 2016
- (4) Otto, A., M. Robinius, T. Grube, S. Schiebahn, A. Praktiknjo, and D. Stolten, Power-to-Steel: Reducing CO₂ through the Integration of Renewable Energy and Hydrogen into the German Steel Industry. *Energies*, 2017. 10⁽⁴⁾: Seite: 451
- (5) Kotzur, L., P. Markewitz, M. Robinius, and D. Stolten, Kostenoptimale Versorgungssysteme für ein vollautarkes Einfamilienhaus, In: Internationale Energiewirtschaftstagung „Klimaziele 2050: Chance für einen Paradigmenwechsel? Wien 2017
- (6) www.wupperinst.org
- (7) vdi nachrichten „Künstliches Grün für den Wasserstoff“ (Kommentar von Thomas Happe), www.vdi-nachrichten.com
- (8) Power-to-Gas in Deutschland und NRW, www.energieagentur.nrw
- (9) Fuel Cell Electric Buses – Potential for Sustainable Public Transport in Europe, www.fch.europa.eu
- (10) www.fch.europa.eu
- (11) Robinius, M., J. Linßen, T. Grube, M. Reuß, P. Stenzel, K. Syranidis, P. Kuckertz, and D. Stolten. Comparative Analysis of Infrastructures: Hydrogen Fueling and Electric Charging of Vehicles, 2018; www.juser.fz-juelich.de
- (12) Grube, T., et al., Kosten der Wasserstoffbereitstellung in Versorgungssystemen auf Basis erneuerbarer Energien. In: Töpler, J., Lehmann, J. (Eds.), *Wasserstoff und Brennstoffzelle*, Springer Verlag GmbH Deutschland, 2017, Seiten: 245-161
- (13) Noack, C., et al.: Studie über die Planung einer Demonstrationsanlage zur Wasserstoff-Kraftstoffgewinnung durch Elektrolyse mit Zwischenspeicherung in Salzkavernen unter Druck. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Stuttgart 2015
- (14) Samsatli, S., et al.: Optimal design and operation of integrated wind-hydrogen-electricity networks for decarbonising the domestic transport sector in Great Britain. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 41 (2016), Seiten: 447-475
- (15) ROBINIUS, M., et al.: Linking the Power and Transport Sectors – Part 1: The Principle of Sector Coupling. In: *Energies* 10 (2017), Seite: 956, und Linking the Power and Transport Sectors – Part 2: Modelling a Sector Coupling Scenario for Germany. In: *Energies* 10 (2017), Seite: 957
- (16) www.2.daimler.com/sustainability/optiresource/index.html
- (17) Biedermann, Th. Grube, and B. Höhle, Methanol as an Energy Carrier, *Forschungszentrum Jülich GmbH, Energietechnik*, Band 55

Impressum

EnergieAgentur.NRW GmbH
Roßstraße 92
40476 Düsseldorf

Telefon: 0211/8 3719 30
hotline@energieagentur.nrw
www.energieagentur.nrw

© EnergieAgentur.NRW GmbH/EA544

Stand

9/2018

Ansprechpartner

EnergieAgentur.NRW
Netzwerk Brennstoffzelle und Wasserstoff,
Elektromobilität, Dr. Thomas Kattenstein
kattenstein@energieagentur.nrw

Bildnachweis

Titel: RVK
Innenteil: S. 5: MWIDE NRW/E. Lichtenscheidt;
S. 20: Air Liquide; S. 26: Wuppertal Institut; S. 27:
Ruhr-Uni Bochum; S. 28: DLR; S. 30: Anwender-
zentrum h2herten; S. 33: malp - Fotolia.com; S. 35:
EMS; S. 41: Zoz GmbH; S. 44: Gräbener Maschinen-
technik; S. 47: ZBT; S. 51: malp - Fotolia.com; S. 50/53:
Daimler; S. 53: RVK; S. 56: Innogy; S. 57: Alstom;
S. 59: malp - Fotolia.com; S. 63: Westfälische Hoch-
schule; S. 65: SOLIDpower; S. 66: Viessmann; S. 67:
N2telligence; S. 68: Netzgesellschaft Düsseldorf;
S. 71: Foto Klaus Voith; S. 72: CEF.NRW; S. 74: Foto
franzjosef.photography; S. 76: CEF; S. 78: GWI Essen

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. Eine Nutzung von Inhalten – auch in Teilen – bedarf der schriftlichen Zustimmung.



EUROPÄISCHE UNION
Investition in unsere Zukunft
Europäischer Fonds
für regionale Entwicklung

Ministerium für Wirtschaft, Innovation,
Digitalisierung und Energie
des Landes Nordrhein-Westfalen

