



Wasserstoff – Schlüssel zur Energiewende

Beispiele aus Nordrhein-Westfalen
von der Herstellung bis zur Nutzung

Inhalt

Vorwort	4	4 Nutzung von Wasserstoff	37
Einführung	5	Brennstoffzellen – ein Überblick	38
1 Wasserstoff im Wandel der Energieversorgung	6	PEM-Entwicklungen	39
Wasserstoff heute –		Stationäre Anwendungen.....	42
Grundstoff für die chemische Industrie	6	Brennstoffzellen (SOFC) –	
Wasserstoff in Zukunft – Nutzung als		Mikro-KWK-Produktion in NRW.....	43
Energieträger	7	Brennstoffzellensysteme –	
Wasserstoff – Baustein der Energiewende	8	Ein- und Zweifamilienhäuser.....	44
Wasserstoff – sauberer Kraftstoff für den Verkehr ..	9	Bündelung von Brennstoffzellen-Mikro-KWK	
Power-to-Gas-Strategie	9	zu einem intelligenten Netzwerk	45
Potenziale der Einspeisung		Mobile Anwendungen	46
von Wasserstoff ins Erdgasnetz	12	Clean Energy Partnership (CEP)	
Potenzialabschätzung einer Windstrom-		H ₂ Mobility	49
nutzung im Verkehr mit Brennstoffzellen-Pkw	13	Wasserstoffbusse in NRW.....	50
2 Wasserstoffherstellung	15	BREEZE! –	
Erdgasreformierung	15	Brennstoffzellen-Range-Extender	
Elektrolyse von Wasser.....	16	für batterieelektrische Fahrzeuge	51
Wasserstoff aus Windenergie		Spezielle Märkte.....	53
im Anwenderzentrum H ₂ -Herten	19	5 Wasserstoff- und Brennstoffzellenland	
ENERTRAG-Hybridkraftwerk	21	Nordrhein-Westfalen	55
Industriewasserstoff	22	NRW Hydrogen HyWay	55
Photobiologische Wasserstofferzeugung	24	Regionale Aktivitäten.....	56
HYDROSOL –		Internationale Aktivitäten	57
Solarbasierter thermochemischer Kreisprozess ...	25	Deutscher Wasserstoff Congress.....	58
Wasserstoff aus Klärgas	26	Netzwerk Brennstoffzelle	
3 Wasserstoffbereitstellung	27	und Wasserstoff NRW.....	58
Wasserstoffspeicherung	27	6 Anhänge	60
Speicherung von Wasserstoff		EnergieAgentur.NRW.....	60
im geologischen Untergrund	28	Cluster EnergieRegion.NRW	61
Hochdruckgasspeicher	30	Cluster EnergieForschung.NRW	63
Flüssiggasspeicher	31	Wasserstoffkosten.....	64
Feststoffspeicher	31	H ₂ -Eigenschaften auf einen Blick	65
Wasserstoff transportieren –		Literaturangaben	66
Abfüllzentrum und Wasserstoff-Pipeline.....	32		
Wasserstoff tanken – Tankstellentechnologie	33		
Erste öffentliche Tankstelle für Pkw in NRW	35		

Vorwort



Johannes Remmel

Minister für Klimaschutz, Umwelt,
Landwirtschaft, Natur- und
Verbraucherschutz des Landes
Nordrhein-Westfalen

Nordrhein-Westfalen ist mit etwa einem Drittel der Stromerzeugung das bedeutendste Energieland in Deutschland. Wegen der überwiegenden Nutzung fossiler Energie geht aber auch mehr als ein Drittel des deutschen Klimagasausstoßes auf unser Konto. Wir tragen daher eine besondere Verantwortung. Ziel der Landesregierung ist es, Nordrhein-Westfalen zum Vorreiter beim Klimaschutz zu machen. Im Juni 2011 hat die Landesregierung beschlossen, die Treibhausgasemissionen bis 2020 um mindestens 25 Prozent und bis 2050 um mindestens 80 Prozent gegenüber 1990 zu reduzieren. In unserem Klimaschutzgesetz wurden diese Ziele verbindlich festgelegt. Sie sollen vor allem durch Energiesparen, eine Steigerung der Energieeffizienz sowie durch den Ausbau von Kraft-Wärme-Kopplung und der erneuerbaren Energien erreicht werden. Im Klimaschutzplan werden konkrete Strategien und Maßnahmen festgelegt, mit denen landesweite Klimaschutzziele erreicht werden können.

Die in Deutschland und hier in Nordrhein-Westfalen ergriffenen Maßnahmen allein können den Klimawandel natürlich nicht verhindern, aber die ganze Welt schaut gebannt auf die deutsche „Energiewende“. Ein Erfolg wird eine hohe Strahlkraft haben, zur Nachahmung animieren und die weltweite Nachfrage nach unserer Kompetenz und Technologie noch verstärken. Die intensive breit angelegte Diskussion und landesweit einmalige Beteiligung von Bürgerinnen und Bürgern, Unternehmen, Verbänden etc. sowie die Erforschung und Erprobung neuer Technologien helfen uns dabei, auf unserem Weg behutsam vorzugehen. Denn wir wollen Industrieland bleiben, ein Industrieland mit Perspektive. Niemandem ist gedient, wenn Emissionen und Arbeitsplätze nur verlagert werden. Den Ausbau erneuerbarer Energien müssen wir aber beschleunigen, denn nur so lassen sich bei einer derzeit überwiegend kohlebasier-

ten Stromerzeugung unsere Ziele erreichen. Dieser Ausbau erfordert Netze und Speicher, weiten Zugang zu variablen Preisen, Lastmanagement sowie flexible Residuallastkraftwerke auf Basis emissionsarmer Brennstoffe.

Beim Thema Speicher kommt der Wasserstoff ins Spiel. Während Batterien und Pumpspeicher ihre Anwendung im Minuten- und Stundentakt haben, eignet sich der Wasserstoff wegen seiner hohen Energiedichte und Verfügbarkeit hervorragend für die mittel- bis längerfristige Speicherung großer Energiemengen. Die Regelbarkeit von Elektrolyseuren wurde in den letzten Jahren deutlich gesteigert. Wasserstoff lässt sich rückverstromen, ins Erdgasnetz einspeisen oder methanisieren. Das größte Potenzial zur Emissionsvermeidung bietet aber seine Anwendung im Straßenverkehr, wo Brennstoffzellen einen hohen Effizienzgewinn gegenüber herkömmlichen Antrieben sowie eine vollkommen klimaverträgliche und lärmreduzierte Mobilität ermöglichen. Die hohen Reichweiten und die kurzen Betankungszeiten erlauben eine breite Anwendung der Fahrzeuge. Wir arbeiten daran, dass Hemmnisse der Marktentwicklung abgebaut werden – unter anderem durch Initialprojekte zur Flottenversorgung. Der mögliche Beitrag des Wasserstoffs zur Emissionsvermeidung in NRW wird gegenwärtig genauer untersucht.

Ergänzend dazu bieten Brennstoffzellen ein enormes Potenzial für die dezentrale Kraft-Wärme-Kopplung. Entsprechende Geräte von zwei Herstellern aus NRW befinden sich in der Phase der Markteinführung.

Brennstoffzellen-, Elektrolyse- und Wasserstofftechnologien haben das Potenzial, zum „Klimaschutz made in NRW“ beizutragen und gleichzeitig zum „Exportschlager made in NRW“ zu werden. Von einzelnen Komponenten bis zu gesamten Anlagen wird diese Technik hier in Nordrhein-Westfalen entwickelt und produziert. Mit der Neuauflage des Leitprojekts „Hydrogen HyWay“ werden die Aktivitäten gebündelt und intensiviert. Koordiniert werden die Aktivitäten im Land durch das Netzwerk Brennstoffzelle und Wasserstoff NRW der EnergieAgentur.NRW. Mit der aktuellen Broschüre wollen wir Sie über die Entwicklung dieser Energiewende-Technologien und ihrer Anwendungen informieren.

Einführung



Dr. Thomas Kattenstein

Leiter des Netzwerks Brennstoffzelle
und Wasserstoff NRW

Neue Energietechnologien, die Fortschritte im Bereich Klimaschutz und Effizienz bieten, müssen fast immer gegen einen etablierten Stand der Technik antreten. Dabei erfordern sie häufig eine höhere Investition, zu Beginn einen erhöhten Aufwand für Installation und Wartung sowie zum Teil auch die Errichtung neuer Infrastrukturen. Wenn die Vorteile in der Gesamtschau mittel- bis langfristig die Nachteile überwiegen, dann ist es eine gesellschaftliche Aufgabe, solchen Technologien durch geeignete Förderung, Informationsaustausch und Beratung den Weg in den Markt zu ebnen.

Einen solchen Informationsaustausch fördert das Netzwerk Brennstoffzelle und Wasserstoff NRW. Es wurde im Jahr 2000 als Bestandteil der EnergieAgentur.NRW mit damals 50 Mitgliedern gegründet. Das Netzwerk bringt erfahrene und neue Akteure auf dem Gebiet der Brennstoffzellen- und Wasserstofftechnik zusammen, um gemeinsamen Entwicklung und Markteinführung voranzubringen. Ziele sind die Unterstützung des Emissions- und Klimaschutzes in Zeiten der Energiewende sowie die Etablierung eines entsprechenden Wirtschaftszweigs. Durch die Intensivierung des Wissenstransfers zwischen Forschung und Industrie werden bei den Unternehmen und Instituten neue Betätigungsfelder geschaffen und damit Produktions- und Forschungsstandorte in NRW auf dem Gebiet der Brennstoffzellentechnik gestärkt. Mit Hilfe der zunehmenden Einbindung von Anwendern wird der letzte Schritt zur Markteinführung angegangen. Die inzwischen über 440 Mitglieder stammen vorwiegend aus NRW, zunehmend aber auch aus der gesamten Bundesrepublik und dem Ausland.

Schwerpunkte der aktuellen Aktivitäten sind die Untersuchung eines möglichen Beitrags des Wasserstoff-Energie-

speichers zum Ausbau der erneuerbaren Energien in NRW: Wasserstoffproduktion über Elektrolyseprozesse, dezentrale und zentrale Speicherung des Wasserstoffs sowie anschließende Nutzungsoptionen. Hier stehen Rückverstromung beispielsweise in Hybridkraftwerken und Brennstoffzellen, stoffliche Nutzung in der chemischen Industrie, direkte Einspeisemöglichkeit in das Erdgasnetz sowie Umwandlung des Wasserstoffs in Methan zur Auswahl. Besonders interessant scheint aber die Nutzung von Wasserstoff als innovativer Kraftstoff im Verkehr in Verbindung mit Fahrzeugen auf Brennstoffzellenbasis bei adäquatem Infrastrukturaufbau zu sein. Hier könnten besonders hohe Beiträge zum Klima- und Umweltschutz erzielt werden.

Die Brennstoffzelle als hocheffizienter Energiewandler kann ihre Vorteile aber auch in der stationären Anwendung ausspielen. Ein Mikro-KWK auf Brennstoffzellenbasis erreicht zum Beispiel höchste elektrische Wirkungsgrade (bis zu 60 Prozent) und kommt damit dem Trend entgegen, dass der Wärmebedarf von Objekten stetig abnimmt.

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 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 und internationale Aspekte ergänzt. Wir danken an dieser Stelle den Autoren für ihre Beiträge und wünschen Ihnen als Leser eine spannende Lektüre.

1 Wasserstoff im Wandel der Energieversorgung

Die weltweite Energieversorgungs-, Umwelt- und Klimasituation erfordert Veränderungen bei Energieträgerauswahl und Energieumwandlungsverfahren. Fortschrittliche Lösungen sind gefragt: Brennstoffzellen und neue Energieträger wie Wasserstoff werden zunehmend dazu beitragen, Energie sicher, effizient und sauber umzuwandeln sowie wirtschaftlich zu nutzen. Dies gilt insbesondere für die neue Rolle des Wasserstoffs bei der Umstrukturierung der Energieversorgung im Zuge der Energiewende.

Die politisch vorgegebene Energiewende in Deutschland ist darauf ausgerichtet, eine treibhausgasarme Energieversorgung bei hohem Anteil erneuerbarer Energien bereitzustellen. Diese Zielsetzung ist eine erhebliche technologische und gesellschaftliche Herausforderung, wobei schon bis 2020 allein der Ökostromanteil auf 35 Prozent gesteigert und bis 2050 die Treibhausgasemissionen Deutschlands um 80 Prozent (gegenüber 1990) gesenkt werden sollen. Als grundlegende Voraussetzung ist es notwendig, nicht nur die Primärenergiestruktur (steigender Anteil erneuerbarer Energien) und Endenergienutzung (Gebäudeoptimierung, effiziente Energienutzung in Haushalten und Industrie sowie verstärkte Elektromobilität) zu verändern, sondern auch die Infrastrukturen einschließlich der Strom- und Gasnetze umzugestalten. Im Hinblick auf Zeitplan, Kosten, Bürgerakzeptanz und politische Vorgaben – auch für den künftig einmal mehr erforderlichen Europäischen Energieverbund – ist eine intensive gesellschaftliche Diskussion entstanden.

Wasserstoff heute – Grundstoff für die chemische Industrie

Wasserstoff ist heute ein wichtiger Rohstoff für die chemische und petrochemische Industrie: er wird überwiegend für die Herstellung von Ammoniak (mit den Folgeprodukten Düngemittel und Kunststoffe) sowie zur Verarbeitung von Erdöl zu Kraftstoffen und hochwertigen Chemieprodukten genutzt. Darüber hinaus wird Wasserstoff für Reduktionsprozesse in der Metallurgie, als Kühlmittel in elektrischen Generatoren, als Schutzgas in der Elektronik, zum Schweißen und Schneiden im Maschinenbau sowie zur Fetthärtung in der Lebensmittelindustrie benötigt.

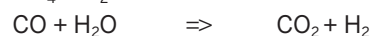
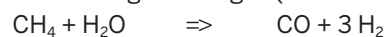
Die Verwendung von Wasserstoff zur „nicht-energetischen“ und „indirekt energetischen“ Nutzung hat die Entwicklung der Wasserstofftechnik und den sicheren

Umgang mit Wasserstoff in den letzten hundert Jahren entscheidend bestimmt (Abb. 1.1). Der heutige Weltbedarf an Wasserstoff beträgt etwa 540 Milliarden Kubikmeter jährlich (in Deutschland etwa 20 Milliarden Kubikmeter pro Jahr). Es ist zu erwarten, dass der Bedarf an Chemie-Wasserstoff weiter steigen wird. Zum einen wird es eine zunehmende Kunstdüngerproduktion bei wachsender Erdbevölkerung geben; zum anderen nehmen die leicht gewinnbaren und schwefelarmen Erdölvorräte rasch ab. Für die Herstellung zukünftiger „schwefelfreier“ Kraftstoffe („Hydrotreating“) ist Wasserstoff genauso unerlässlich wie für die Aufbereitung („Hydrocracking“) von schwerem Rohöl und Ölsanden.

Wasserstoff als Chemie-Basisprodukt wird heute weltweit zu 96 Prozent aus fossilen Energieträgern (vorrangig Erdgas) und zu 4 Prozent via Elektrolyse hergestellt. In der Raffinerie und in der Kohle-Stahl-Industrie werden ebenfalls erhebliche Mengen an Wasserstoff hergestellt, aber auch vor Ort wieder genutzt. Nur ein kleiner Anteil des weltweit erzeugten Wasserstoffs wird als sogenannter „Merchant Hydrogen“ in gasförmiger oder flüssiger Form gehandelt und über die Straße sowie per Pipeline zum Kunden transportiert.

Bedeutende Wasserstoffquellen in Deutschland:

Reformierung von Erdgas (6 Mrd. Nm³/a)

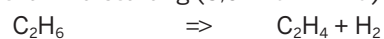


Benzinreformierung (2,5 Mrd. Nm³/a)

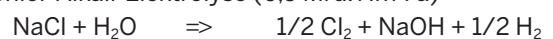


C₆H₆ (Aromat mit hoher Oktanzahl)

Ethen-Herstellung (3,6 Mrd. Nm³/a)

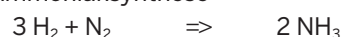


Chlor-Alkali-Elektrolyse (0,9 Mrd. Nm³/a)

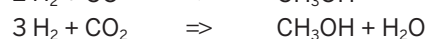
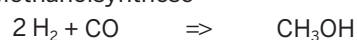


Bedeutende Wasserstoffsenken:

Ammoniaksynthese



Methanolsynthese



Schwerölaufbereitung (Hydrierung, Cracken)

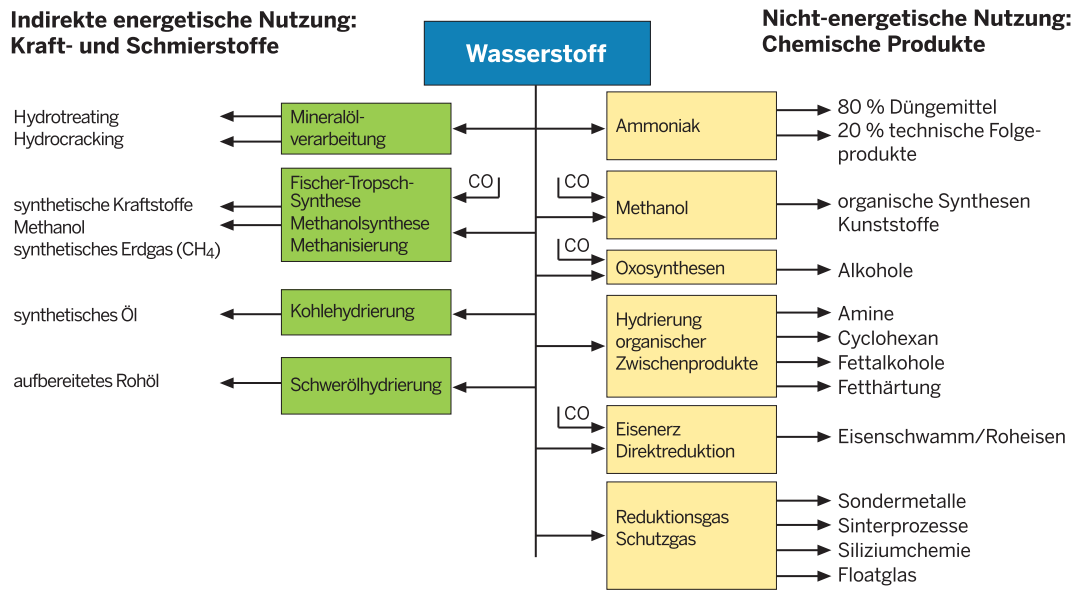


Abbildung 1.1: Wasserstoff in Industrie und Petrochemie heute (Quelle: DLR)

Wasserstoff in Zukunft – Nutzung als Energieträger

Wasserstoff als Energieträger ist ein Baustein unserer Technik seit einer Zeit, in der das „Wassergas“ – historische Bezeichnung für ein Gasgemisch mit etwa 50 Volumenprozent Wasserstoff – aus festen Brennstoffen erzeugt wurde. Auch im Stadtgas – beispielsweise auf der Basis von Kokereigas – diente Wasserstoff in einem Gasgemisch zu Leucht- und Heizzwecken. Die Einführung von Erdgas beendete die Ära der Gasgemische auf dem Energiemarkt.

Bereits Jules Verne (1874) prophezeite die Wasserstoff-erzeugung aus Wasser durch Elektrolyse unter Nutzung von Elektrizität. Eduard Justi und John O'M Bockris griffen diese Idee 1956 und 1962 wieder auf. 1986 wurde das HYSOLAR Projekt (HYdrogen SOLAR, solarer Wasserstoff) gestartet; die Herstellung von solarem Wasserstoff wurde im Deutsch-Saudiarabischen Projekt erstmals in technischem Maßstab demonstriert.

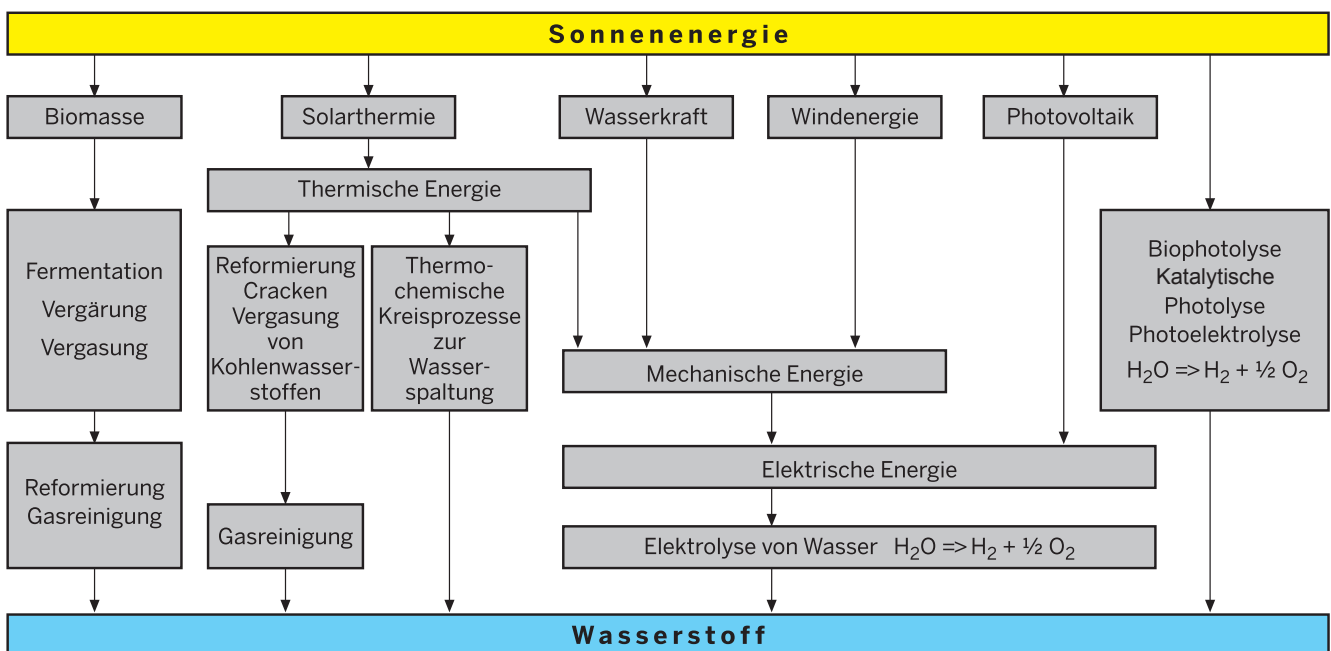


Abbildung 1.2: Energiewandlungsschritte der nicht-fossilen Wasserstoffherstellung (Quelle: nach DLR)

Die Herstellung von Wasserstoff aus Wind- und Wasserkraft sowie Sonnenenergie ist heute schon technisch möglich und wird langfristig als Schlüssel zu einer weltweit nachhaltigen Energiewirtschaft steigende Bedeutung erlangen (Abb. 1.2). Da beispielsweise Windstrom intermittierend anfällt und somit je nach Nachfrage nur zum Teil direkt genutzt werden kann, ist ein speicherfähiger, transportierbarer und umweltfreundlicher Energieträger gefragt: Wasserstoff erfüllt alle diese Anforderungen an einen chemischen Energieträger.

Wasserstoff – Baustein der Energiewende

Wasserstoff wird bei dem politisch beschlossenen Ausbau der erneuerbaren Energien im Zuge der Energiewende und den damit verbundenen Konsequenzen für die Netze und die Speicherung von Energie eine bedeutende Rolle in der neu orientierten Energiewirtschaft spielen. Wasserstoff ist ein Energieträger, der es ermöglicht, überschüssigen Strom, zum Beispiel aus Windkraftanlagen, über den Weg der Elektrolyse in großen Mengen chemisch (beispielsweise zentral in Salzkavernen oder dezentral an Tankstellen) zu speichern. Mit einer Rückverstromung des Wasserstoffs in Brennstoffzellen oder Gasturbinen lässt sich die zeitlich schwankende Stromerzeugung mit erneuerbaren Energien teilweise ausgleichen. Erzeugung und Verbrauch elektrischer Energie können auf diese Weise in begrenztem Maß voneinander entkoppelt werden. Die direkten Nutzungsmöglichkeiten von Strom und Wasser-

stoff im Verkehr unter Nutzung von Batterie- und Brennstoffzellenbetriebenen Elektrofahrzeugen bieten beste Lösungswege für einen effizienten, treibhausgasarmen Verkehr.

Schon Anfang 2000 wurde deutlich, dass langfristig bei den Energieträgern – Wasserstoff und Elektrizität – als Versorgungseinheit herausragende Bedeutung zukommen wird: Einerseits kann Strom direkt ins Versorgungsnetz eingespeist und auch im Verkehr in Batterieantrieben genutzt werden; andererseits ist Wasserstoff durch seine bessere Speicherfähigkeit (Klein- und Großraumspeicher) der Elektrizität insofern überlegen, als er via Elektrolyse insbesondere für die Übertragung fluktuierender Solar- oder Windenergie attraktive Lösungsmöglichkeiten bietet und direkt für Elektromobilität mit Brennstoffzellen zur Verfügung steht. Wasserstoff und Elektrizität sind in einem komplementären Energieversorgungssystem wechselseitig konvertibel.

Für den Übergang der nächsten zehn oder zwanzig Jahre bleibt zu prüfen, inwieweit der als Regellast erzeugte Wasserstoff entweder direkt in das Erdgasnetz eingespeist oder auch zusammen mit Kohlendioxid zu Methan umgewandelt werden kann, um vorübergehend vorhandene Erdgasinfrastrukturen zu nutzen. Eine solche Umwandlung würde einen erheblichen Effizienzverlust bei der Bewertung der Gesamtenergiekette im Vergleich zur direkten Nutzung von Strom und Wasserstoff bedeuten (Abb. 1.3).

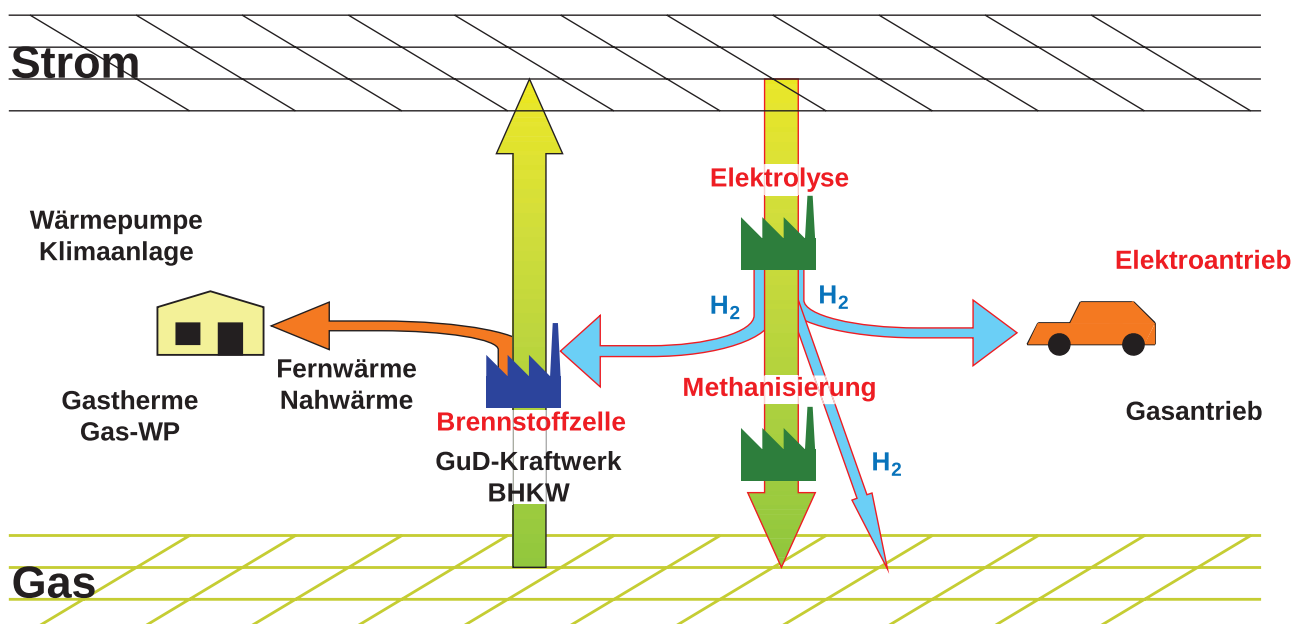


Abbildung 1.3: Regenerativ basierter Wasserstoff im Energieverbundsystem und Vernetzung der Infrastrukturen (Quelle: nach DLR)

Die besondere Ausgangssituation im Land Nordrhein-Westfalen ist durch eine europaweit einmalige Dichte an kommerziellen Wasserstoffherstellungsanlagen, einen mengenmäßig signifikanten Anfall von Wasserstoff als Nebenprodukt der chemischen Industrie sowie das Vorhandensein von Infrastrukturelementen (Pipeline) geprägt, die als Rückgrat einer schrittweisen Verdichtung von Tankstellennetzen dienen können. Das politische Ziel für den Ausbau des windbasierten Stromanteils in NRW von heute 5,1 Prozent (2928 MW installierte Leistung bei 1742 h/a) auf 15 Prozent in 2020 erfordert ohne Repowering 4730 neue Windanlagen (3,5 MW Anlagen) bei einer angenommenen durchschnittlichen Volllaststundenzahl von 2300 h/a (Quelle: Deutsch WinGuard (2011)). Die Umsetzung dieser Vorgaben ist eine wichtige Voraussetzung für die „Energiewende“ in NRW.

Im Rahmen der Energiewende in Deutschland werden staatliche Vorgaben mit Bezug auf den Kraftwerkspark und staatliche Maßnahmen wie das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) oder der CO₂-Zertifikat-Handel wesentlichen Einfluss auf den Erfolg einer zukünftigen Wasserstofftechnik haben. Für die technologische Umstellung des Energiemarktes sind neue Verfahren in der Entwicklung.

Wasserstoff – sauberer Kraftstoff für den Verkehr

Beide Energieträger – Wasserstoff und Elektrizität – stehen heute überwiegend fossil erzeugt zur Verfügung und wurden bisher kaum im Verkehr genutzt, wo derzeit Benzin und Diesel auf fossiler Basis dominieren. Die Entwicklung des elektrochemischen Energiewandlers Brennstoffzelle zeigt allerdings, dass der Verkehr unter Nutzung von Wasserstoff und Brennstoffzellen mit deutlich verbesser-

ter Energieeffizienz und sehr niedrigen Emissionen von Treibhausgasen (THG) zu bilanzieren ist, sobald Wasserstoff THG-neutral produziert wird. Dies gilt im übertragenen Sinn auch für die batteriebetriebenen Antriebe im Straßenverkehr.

Am Beispiel der E-Mobilität kann gezeigt werden, dass die energetische Bewertung für eine windstrombasierte Wasserstoffherzeugung (einschließlich ihrer Nutzung im Pkw-Brennstoffzellenantrieb) im Vergleich zur Methanherzeugung (einschließlich ihrer Nutzung in Pkw-Otto-Antrieben als Compressed Natural Gas oder CNG) sehr unterschiedlich ausfallen kann. Dabei ist herauszustellen, dass der Primärenergiebedarf (Well-To-Wheel (WTW)), nämlich regenerativer Windstrom, für die Energiekette mit Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antrieb nur 35 Prozent des Primärenergiebedarfs für die Energiekette mit Methan-Otto/CNG-Antrieb (H₂ via Windstrom und CO₂ aus der Luft) beträgt (Quelle: nach Höhle et al (2013)).

Nach Vorstellungen der Politik könnten 2020 Batterie- und Brennstoffzellen-Fahrzeuge einen Marktanteil von etwa einer Million ausmachen. Trotz bedeutender Fortschritte in der Batterietechnik geht man auch künftig von einer maximalen Reichweite der Batterieautos von rund 150 Kilometern aus. Größere Batteriekapazität an Bord bedeutet gleichzeitig ein deutlich höheres Fahrzeuggewicht. Zudem werden die Ladezeiten immer länger, so dass ein schnelles „Nachtanken“ unmöglich wird. Ein Wasserstofftank ist hingegen in wenigen Minuten aufgefüllt, und schon heute liegt die Reichweite zwischen 400 und 500 Kilometern. Beide Fahrzeugkonzepte werden daher ihren Platz in der Mobilität finden: das Batterieauto im eher städtischen und stadtnahen Bereich, das Brennstoffzellenauto auch für die Langstrecke.

Power-to-Gas-Strategie

Die bedarfsgerechte Integration der fluktuierenden erneuerbaren Energien in eine kosteneffiziente Balance zwischen Erzeugung und Verbrauch ist eine wesentliche Herausforderung für den zukünftigen Energiemarkt. Dabei sind die Umwandlung von erneuerbarem Strom in ein speicherbares Gas und der Ausbau von Energiespeichern und Netzen notwendige Voraussetzungen. Dem Energiesystem wird zukünftig mehr Flexibilität abverlangt werden.

Abbildung 1.4 stellt das Power-to-Gas-Konzept als Bindeglied zwischen der Strom- und Gasinfrastruktur dar und zeigt folgende Verwendungsmöglichkeiten für den Wasserstoff auf:

- direkte Einspeisung ins Erdgasnetz,
- Reaktion mit Kohlenstoffdioxid zu Methan und Einspeisung ins Erdgasnetz und
- direkte Nutzung für Verkehr (Brennstoffzellenfahrzeuge), Industrie (z. B. Chemie) und Energie (Rückverstromung in BZ-KWK).

Power-to-Gas ermöglicht durch die Umwandlung von Strom aus erneuerbaren Energien (EE) in Gas eine planbare Abrufbarkeit der Stromerzeugung, die dem Windaufkommen und den Sonnenstunden folgt. In der Vergangenheit wurden für Strom nur geringe Speicherkapazitäten benötigt, um die Versorgung über bestehende konventionelle Kraftwerke bedarfsgerecht und wirtschaftlich bereit-

zustellen. Der in den kommenden Jahren steigende Anteil fluktuierender Stromeinspeisung erfolgt größtenteils im Norden oder Nordosten Deutschlands. Strom muss somit über weite Strecken transportiert werden. Der weitere Ausbau der EE kann jedoch nur dann volkswirtschaftlichen Nutzen bringen, wenn deren Integration in vorhandene Energie- und Infrastrukturen gelingt. Zum Transport von beigemischtem Wasserstoff oder Methan können zunächst bestehende erdverlegte – und damit in der Landschaft „unsichtbare“ – Gasleitungssysteme zum Einsatz kommen. Später wird dann für den in der Elektrolyse erzeugten Wasserstoff direkt oder via Speicherkavernen verstärkt die vorhandene Wasserstoffinfrastruktur in NRW oder eine zusätzlich aufzubauende Infrastruktur genutzt. Existierende oder neu anzulegende Gasspeicher erlauben auch eine längerfristige Speicherung der gewonnenen Energie.

Klimavorteile

Power-to-Gas macht erneuerbare Energien grundlastfähig, da eine zeitlich und örtlich bedarfsgerechte Rückverstromung der gewonnenen Energie über Gaskraftwerke oder eine dezentrale Erzeugungsinfrastruktur erfolgen kann. Der erzeugte Wasserstoff oder das erneuerbare Methan als SNG (Substitute Natural Gas) ist zudem sehr emissionsarm, da beim Einsatz von erneuerbarem Strom keine direkten CO_2 -Emissionen anfallen. Anteilig dem Erdgas beigemischt verbessert der Wasserstoff die gute Ökobilanz des Energieträgers Erdgas, der in den Bereichen Strom, Wärme oder Verkehr bei geringen Treibhausgasemissionen zum Einsatz kommen kann. Als Beispiel dafür sind in Tabelle 1.1 einige Ergebnisse des Wasserstoffesatzes im Verkehr angegeben.

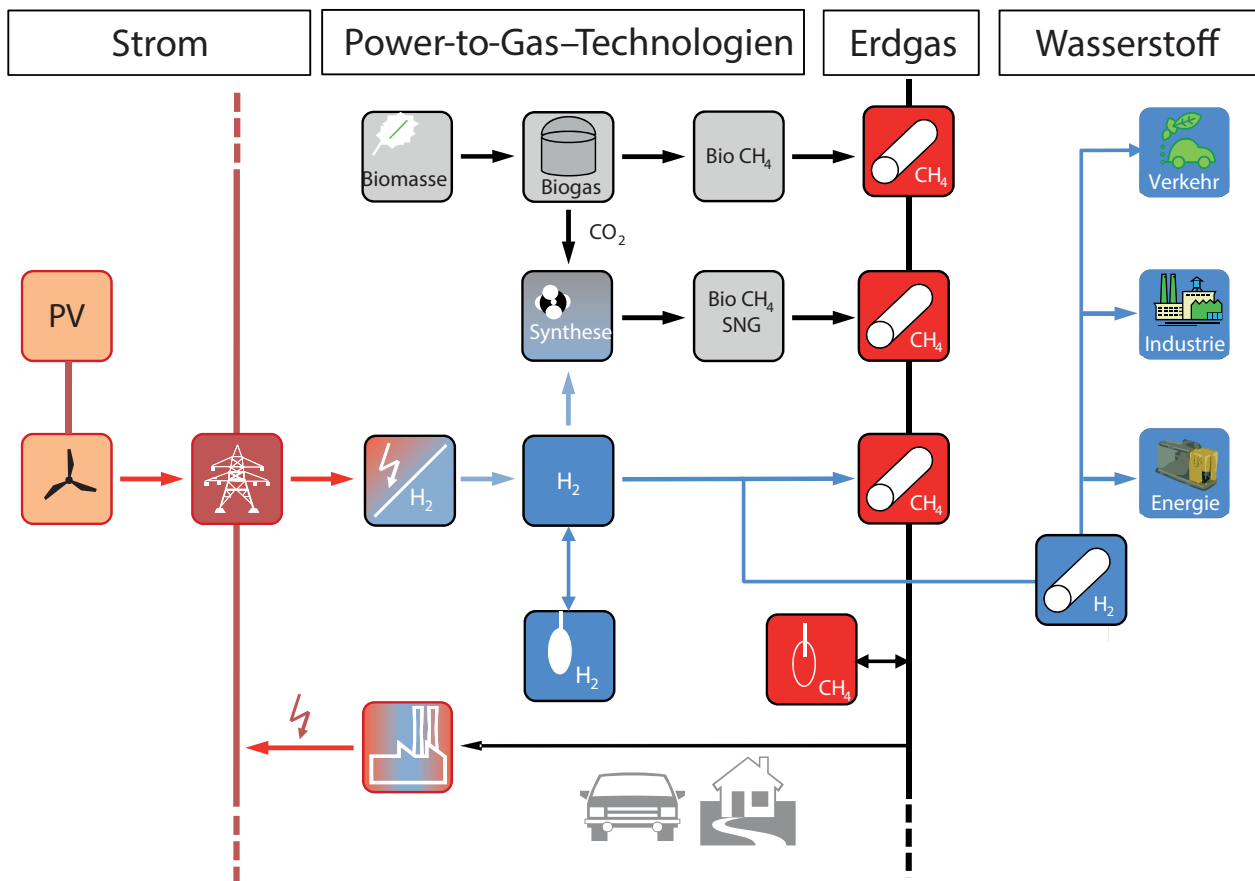


Abbildung 1.4: Energiespeicherung und Entwicklung des zukünftigen Wasserstoffmarktes durch Power-to-Gas-Technologien (Quelle: Marius Adelt)

Antriebsart, Kraftstoff	Spez. CO ₂ -Emissionen g CO _{2eq} /km
Verbrennungsmotor	
Erdgas, EU-Mix	125
Erdgas mit 10 % H ₂ aus Windkraft	114
Methan aus Windkraft	10
Brennstoffzellen-Hybrid	
H ₂ aus Erdgasreformierung	88
H ₂ aus Windkraft	8

Tabelle 1.1: Einfluss des Wasserstoffeinsatzes auf die CO₂-Emissionen im Verkehr (Quelle: EU)

Technische Grenzen für die Nutzung des Erdgasnetzes

Das Erdgasnetz, das in Deutschland ein jährliches Leistungsvermögen für Energietransport und -speicherung von fast 1000 Terawattstunden (Stand 2010) besitzt, kann für Power-to-Gas eine signifikante Speicher- und Transportkapazität darstellen. Bei einer Beimischung von Wasserstoff zum Erdgas sind allerdings technische Toleranzen der Infrastruktur und Anwendungstechnik zu berücksichtigen (Quelle: DVGW (2011)). So haben bisherige Untersuchungen gezeigt, dass ein Wasserstoffgehalt im einstelligen Prozentbereich im Erdgas in vielen Fällen unkritisch ist, wenn die brenntechnischen Kenndaten des DVGW-Arbeitsblattes G 260 eingehalten werden. Allerdings sind derzeit Restriktionen zu beachten für

- Tanks von Erdgasfahrzeugen und Erdgastankstellen (DIN 51624),
- Gasturbinen mit schadstoffarmen Vormischbrennern,
- Prozessgaschromatographen und
- Untertageporenspeicher.

In Bezug auf die Wasserstoffverträglichkeit müssen daher vor allem Untersuchungen zur Festlegung der Beimischungsgrenzen von Untertagespeichern, Maschineneinheiten und CNG-Autotanks kontinuierlich vorangetrieben werden. Im Fall der Methanisierung kann hingegen eine beliebig hohe Beimischung von Methan (SNG) ins Erdgasnetz erfolgen – sofern die für die Einspeisung von Biogas gültigen Grenzwerte aus den entsprechenden Regelwerken eingehalten werden. Die Methanisierung wird damit unter der Voraussetzung einer geeigneten CO₂-Quelle ihr Potenzial finden, sobald die lokale Grenze der Wasserstoffanteile im Erdgasnetz überschritten wird.

Power-to-Gas und der Wasserstoffmarkt in NRW

In NRW existieren bereits leitungsgebundene Infrastruktur-Cluster für Industrierwasserstoff. Zukünftig sollen kleinere und größere dezentrale Elektrolyseanlagen (beispielsweise für Wasserstofftankstellen oder Industriebetriebe) sowie zusätzliche Wasserstoffpipelines erbaut werden. Daher bieten sich für den im Rahmen von Power-to-Gas erzeugten Wasserstoff – zusätzlich zur Einspeisung ins Erdgasnetz und Nutzung aller Optionen der Erdgasinfrastruktur – gute Voraussetzungen für die Entwicklung einer eigenständigen Infrastruktur und Erschließung direkter Märkte (Verkehr, Industrie, Energie; siehe Abb. 1.4) an. Ihre Entwicklung wird einerseits vom Fortschritt der Erzeugungstechnologien und andererseits der Einführung von wasserstoffbasierten Produkten wie Brennstoffzellenfahrzeuge und Brennstoffzellen-KWK und deren Kosten maßgeblich beeinflusst werden.

Kontakt:

Marius Adelt
Vorm. E.ON Ruhrgas AG
Tel.: 02369 5204
mariaus_adelt@web.de

Power-to-Gas (PtG)

Systemischer Ansatz zur Umwandlung des Überschussstroms aus erneuerbaren Quellen mittels Elektrolyse in Wasserstoff. Dieser kann in Brennstoffzellen rückverstromt oder als Kraftstoff dem Verkehrssektor für Brennstoffzellen-Fahrzeuge zur Verfügung gestellt werden. Infrastrukturen für Transport und Speicher müssen gegeben sein. Weiterhin besteht die Möglichkeit der Einspeisung in das Erdgasnetz – direkt oder nach einer Methanisierung von Wasserstoff mit nichtfossil-basierendem Kohlendioxid – und damit die Nutzung der Erdgasinfrastrukturen für Transport, Speicherung und Nutzung. Durch die Konvergenz der Strom- und Gasinfrastruktur entstehen erhebliche Synergieeffekte, bessere Auslastungen der erneuerbaren Stromerzeugung sowie große Transport- und Speicherkapazitäten für Wasserstoff bei gleichzeitigem Aufbau eigenständiger Infrastrukturen für seine Nutzung in Fahrzeugen und Kraft-Wärme-Kopplungs- (KWK) Anlagen.

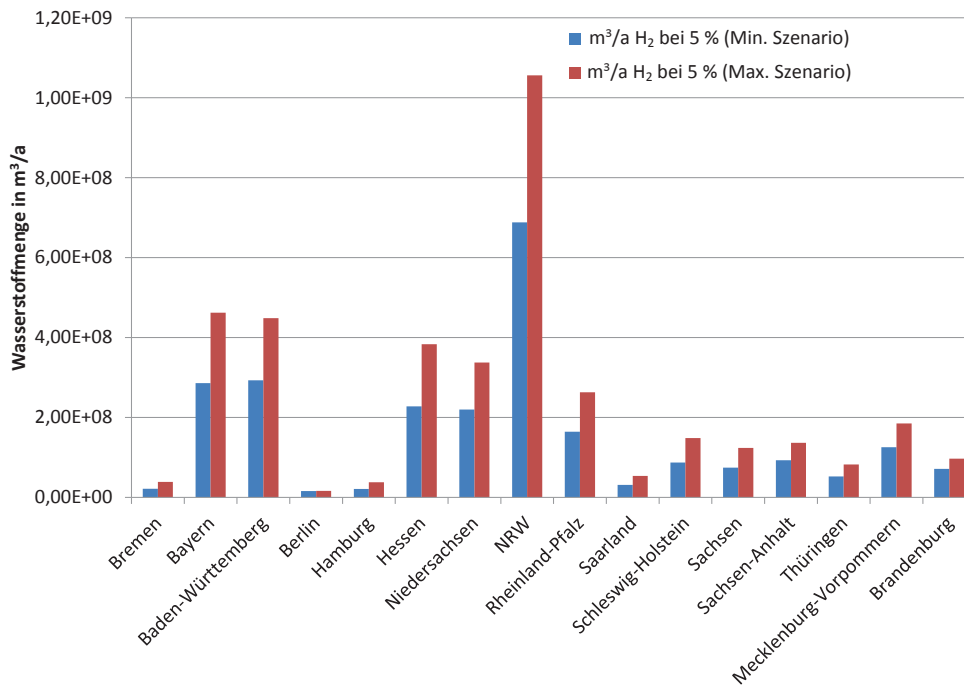


Abbildung 1.5: Einspeisbare Jahres-Wasserstoffmenge nach Bundesländern differenziert (Quelle: GWI)

Potenziale der Einspeisung von Wasserstoff ins Erdgasnetz

Sowohl die Verfügbarkeit erneuerbarer Energien als auch der Erdgasverbrauch unterliegen saisonalen Schwankungen. Auf Basis von Berechnungen des Gas- und Wärme-Instituts zur Ermittlung des minimalen Erdgasabsatzes auf der Verteilebene wird die Menge an Wasserstoff als Zusatzgas bestimmt, die eingespeist und direkt verwendet werden kann. Das Szenario geht aufgrund aktueller Regelwerke (Verweis in der Gasnetzzugangsverordnung auf DVGW Regelwerke Stand 2007) von einer Zusatzgasmenge von maximal 5 Prozent Wasserstoff aus. In Summe folgen für die jährliche Betrachtung im Min./Max-Szenario 2,47 Mrd. m³ / 3,87 Mrd. m³ Wasserstoff als Zusatzgas auf der Verteilebene, was in etwa einer „Einspeisung“ von Strom aus EE in Höhe von 16,6 Mrd. kWh / 23,1 Mrd. kWh entspricht. Aufgrund der Datenbasis ist es möglich, eine regionale Differenzierung zwischen den einzelnen Bundesländern darzustellen. Abbildung 1.5 zeigt die jährlich in das Erdgasnetz einspeisbare Menge an Wasserstoff. Aufgrund der guten Infrastruktur und hoher Erdgasabsatzmengen ist es in NRW 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 Menge an elektrischem Strom, die 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 Monaten April bis Juni vorteilhaft. Da bei der Modellbildung von einem etwa gleichen Gasaufkommen für die Zukunft ausgegangen wurde, welches nach dem Szenario „Innovationsoffensive Gase“ bereits Anteile an Wasserstoff und SNG enthält, ist eine Methanisierung neben einem langfristigen saisonalen Speichermanagement und weiteren Wasserstoffnutzungspfaden eine Lösungsstrategie zur Integration von EE.

Weitere Informationen zur Veröffentlichung „Potenziale der Einspeisung von Wasserstoff ins Erdgasnetz – eine saisonale Betrachtung“ bietet www.gwi-essen.de.

Kontakt:

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

Potenzialabschätzung einer Windstromnutzung im Verkehr mit Brennstoffzellen-Pkw

Eine deutlich verstärkte Integration erneuerbarer Energien erfordert aufgrund deren un stetigen Aufkommens neue Lösungen der Energiespeicherung. Da eine direkte Speicherung elektrischer Energie im dazu erforderlichen Ausmaß aus heutiger Sicht nicht möglich ist, bietet sich die Nutzung überschüssigen Stroms zur Erzeugung von Wasserstoff mithilfe der Wasserelektrolyse an.

Aktuell werden im Rahmen der Energiewende folgende Nutzungsalternativen für den so erzeugten Wasserstoff diskutiert:

- Rückverstromung zum Ausgleich fluktuierender Einspeisung aus erneuerbaren Energien,
- Nutzung als Kraftstoff für Fahrzeuge mit hocheffizienten Brennstoffzellenantrieben (FCV),
- direkte Wasserstoffeinspeisung ins vorhandene Erdgasnetz und
- Methanisierung zur nachfolgenden Einspeisung ins vorhandene Erdgasnetz.

Kennzeichnend für die zweite 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.

Energieversorgungskonzept

Auf Basis der vorangegangenen Überlegungen wird ein Energieversorgungskonzept zur starken Einbeziehung regenerativer Stromerzeugung definiert:

- Die Stromerzeugung stützt sich ausschließlich auf erneuerbare Energien sowie auf Erdgas zur Residuallastabdeckung.
- Überschüssige Stromerzeugung wird zur Produktion von Wasserstoff mittels Elektrolyse genutzt. Erdgaskraftwerke dienen nur zum Ausgleich fluktuierender Einspeisung.
- Im Bereich der Hauswärmeversorgung wird die Hälfte des 2010 verbrauchten Erdgases eingespart. Im Bedarfsfall kann dieses zur Stromerzeugung verwendet werden.
- Mithilfe eines Wasserstoffpipeline-Netzes wird der erzeugte Wasserstoff zu den Tankstellen verteilt und in Brennstoffzellen-Pkw eingesetzt. Die Wasserstoffspeicherung erfolgt in Salzkavernen

Als Berechnungsbasis dienen zeitabhängige Verläufe der vertikalen Netzlast und der Einspeisung aus erneuerbaren Energien für Deutschland. Die installierten Leistungen betragen 169 GW für Onshore-Windkraft, 70 GW für Offshore-Windkraft sowie 25 GW für Photovoltaikanlagen. Für Elektrolyseure wird ein heizwertbezogener Wirkungsgrad von 70 Prozent angenommen. Als Mindestauslastung des letzten zugebauten Elektrolyseurs werden im Sinne einer Kappungsgrenze 1000 Volllaststunden angesetzt. Für Erdgaskraftwerke wird wegen des dynamischen Betriebs ein Abschlag in Höhe von 15 Prozent auf heutige, über verschiedene Hersteller gemittelte Nennlastwirkungsgrade angesetzt. Die Nennlastwirkungsgrade liegen bei 58,5 Prozent für erdgasbetriebene GUD-Kraftwerke beziehungsweise 36,5 Prozent für offene Gasturbinen. Für Pkw mit Brennstoffzellen wurde ein spezifischer Kraftstoffverbrauch gemäß dem heutigen Stand mit 3,3 Litern Diesel-Äquivalent oder 1 kg Wasserstoff je 100 km angenommen. Die Jahresfahrleistung für Pkw wird mit 11.400 km angesetzt. Leichte Nutzfahrzeuge und Busse werden gemäß einer Aufteilung in der GermanHy Studie berücksichtigt.

Energie- und CO₂-Bilanzen

Mit dem vorgestellten Energiekonzept kann sowohl die vertikale Netzlast von in Summe 488 TWh zeitabhängig gedeckt als auch der Verkehr mit 5,4 Mio. t Wasserstoff, entsprechend 257 TWh Windstrom, versorgt werden. Stromnetzseitig reicht die heute verstromte Erdgasmenge zur Deckung der Residuallast aus. Mit dem erzeugten Wasserstoff können unter anderem 28 Mio. Pkw betrieben werden.

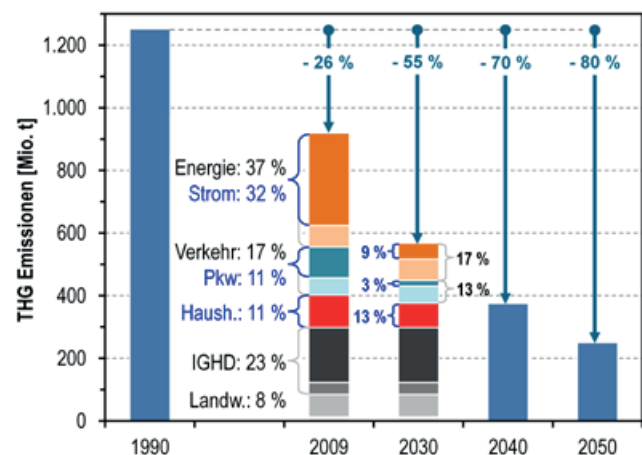


Abbildung 1.6: Beiträge zur Reduktion der CO₂-Emissionen (IGHD: Industrie, Gewerbe, Handel und Dienstleistungen)

Unter Berücksichtigung der zwischen 1990 und 2009 bereits erfolgten Gesamtreduktion um 26,5 Prozent können damit gegenüber 1990 insgesamt 697 Mio. t CO₂ beziehungsweise 55 Prozent eingespart werden (Abb. 1.6). Es verbleiben Emissionen in Höhe von 567 Mio. t CO₂-Äquivalent. Die Emissionsvorgabe für 2030 kann damit bereits mit den vorgeschlagenen Maßnahmen umgesetzt werden. Weitere Reduktionen sind technisch möglich, müssen aber auf ihre Umsetzbarkeit und ihren ökonomischen Einfluss hin untersucht werden.

Kostenabschätzung

Eine 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 Abbildung 1.7 heutige Kosten für Benzin an der Tankstelle in Höhe von 8 ct/kWh (70 ct/l) ohne Steuern als Bench-

mark angegeben. Bei Annahme des oben genannten Verbrauchsvorteils betragen die „erlaubten“ Kosten für Wasserstoff an der Tankstelle dementsprechend 16 ct/kWh. Über den Weg der zentralen Erdgasreformierung sind heute Wasserstoffkosten an der Tankstelle von 11 ct/kWh darstellbar. Bei Einsatz der Elektrolyse entsprechend dem hier vorgestellten Energiekonzept liegen die abgeschätzten Kosten etwa 25 Prozent über dem Benchmark.

Der Kostenvergleich für das Szenario „Einspeisung ins Erdgasnetz“ macht deutlich, dass bereits bei der direkten Einspeisung von Wasserstoff die spezifischen Kosten um den Faktor 3,8 höher sind als die Erdgaskosten. Bei vorheriger Methanisierung beträgt dieser Faktor sogar 4,7. 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.

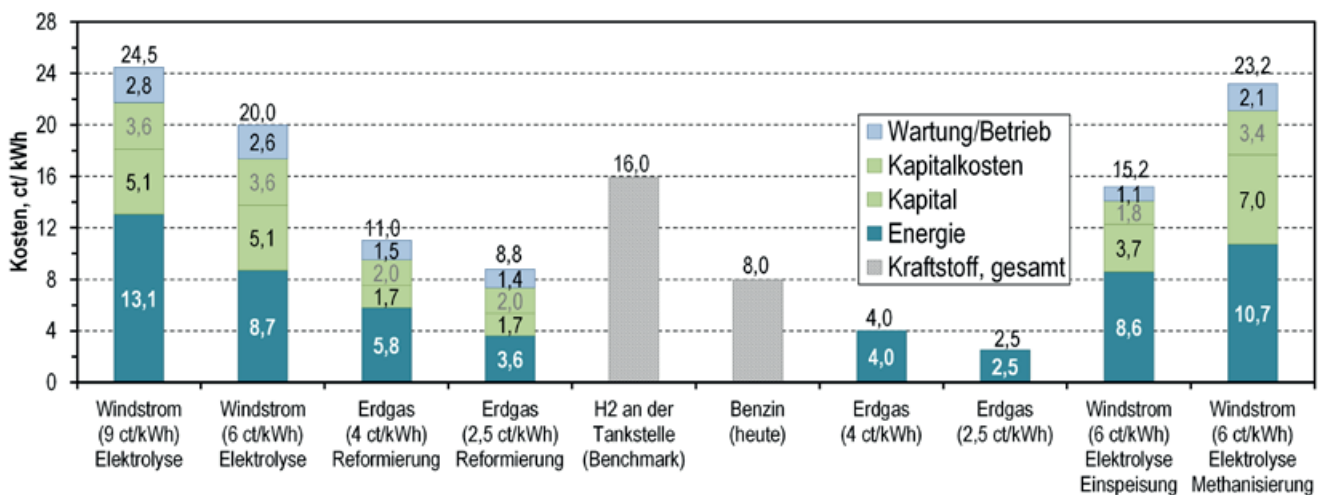


Abbildung 1.7: Kostenvergleich von Wasserstoffnutzungsoptionen

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 (Quelle: Stolten et al. (2012)).

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

2 Wasserstoffherstellung

Die heute für die chemische Industrie hergestellten Wasserstoffmengen stammen im Wesentlichen aus der Reformierung von Erdgas (Abb. 2.1) und der Wasserelektrolyse. Auf der Basis dieser Verfahren steht schon heute Wasserstoff für die Industrie und auch für erste Anwendungen von Brennstoffzellen zur Verfügung. In Zukunft werden zur Bereitstellung von Wasserstoff für den Energiemarkt aber neue Verfahrensentwicklungen benötigt. Dazu gehören Lösungsansätze unter Einsatz von Wind- und Solarenergie. Die daraus erzeugte Elektrizität dient der Wasserstoffherstellung in Elektrolyseuren, die heute weitgehend

zur Erzeugung von Chlor eingesetzt und mit überwiegend fossil-basiertem Strom betrieben werden. Neue Elektrolyseur-entwicklungen werden dazu beitragen, den im Rahmen der Energiewende anfallenden regenerativ erzeugten intermittierenden Überschussstrom zur Wasserstoffherzeugung und damit zur direkten Anwendung oder zur Energiespeicherung zu nutzen. Auch Biomasse – durch Photosynthese gespeicherte Sonnenenergie – und in Kläranlagen entstehende Faulgase sowie zugeführte organische Reststoffe können in Wasserstoff umgewandelt werden.

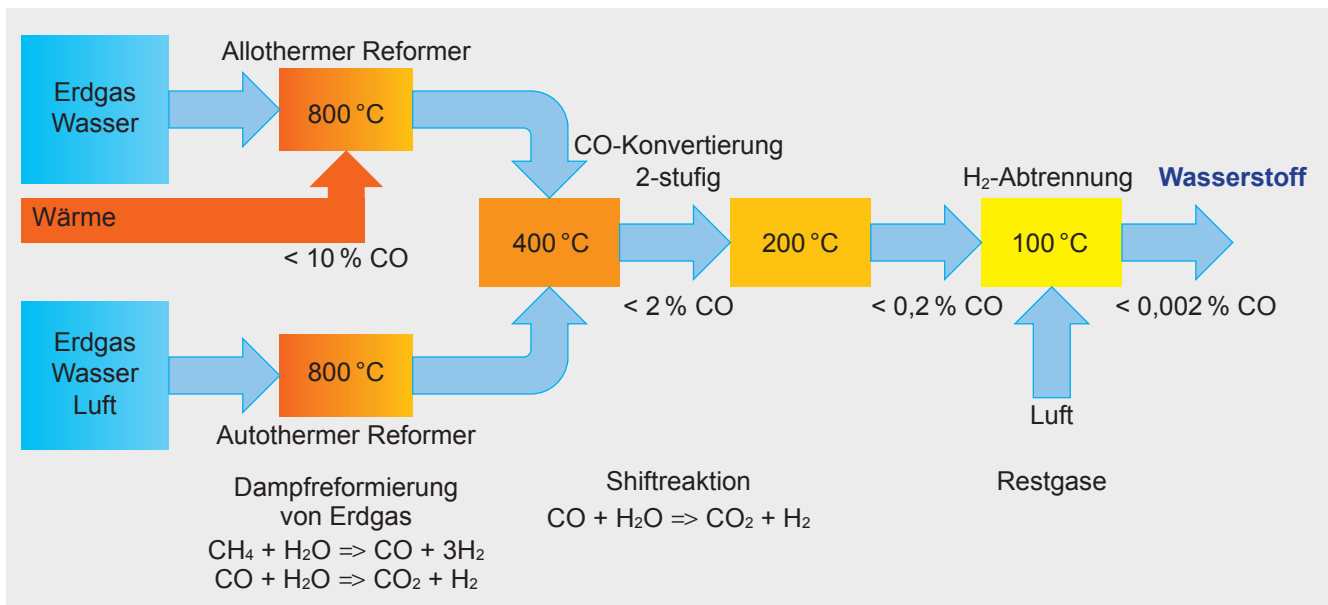


Abbildung 2.1: Wasserstoff aus Erdgas: Verfahrensschritte der Dampfreformierung und CO-Konvertierung (Quelle: nach DLR)

Erdgasreformierung

Wasserstoff wird heute vorrangig durch Reformierung von Erdgas (heterogen katalysierte Dampfreformierung von Methan (Abb. 2.1)), aber auch durch Vergasung von Kohle oder Biomasse unter Einsatz der Reaktionsmittel Wasser und gegebenenfalls Sauerstoff (Luft) hergestellt. Bei der Erdgasreformierung wird zunächst ein Synthesegas (Was-

serstoff, 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.

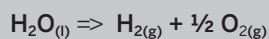


Abbildung 2.2: Wasserstoffherzeugungsanlage der Air Liquide (Quelle: AIR LIQUIDE Deutschland GmbH)

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 (z. B. Erdgas und Kohle) hergestellten Wasserstoff werden momentan weltweit nur etwa 4 Prozent 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.

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 thermoneutralen Spannung, dem Higher Heating Value (HHV), von $U_{th}^0 = 1,48 \text{ V}$ beziehungsweise einem Energieinhalt von $3,54 \text{ kWh/Nm}^3$ entspricht. Bei dieser Spannung ist die elektrische Energie gleich der Reaktionsenthalpie ΔH^0 der Wasserzersetzung. Die reversible Spannung U^0 beträgt $U^0 = 1,23 \text{ V}$ entsprechend dem Lower Heating Value (LHV) von $3,0 \text{ kWh/Nm}^3$.

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

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

Zentrale Reformierung

Die AIR LIQUIDE Deutschland GmbH betreibt in Marl das größte Wasserstoff-Abfüllzentrum Europas. Der Wasserstoff wird im Chemiepark Marl im Wesentlichen mittels Dampfreformer (Abb. 2.1 und 2.2) erzeugt und auf bis zu 300 bar verdichtet.

Kontakt:

Andrea Feige
AIR LIQUIDE Deutschland GmbH
Tel.: 0211 6699-264
andrea.feige@airliquide.com

relevante Verfahren der Wasserelektrolyse, die in Abbildung 2.3 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 der Industrie noch nicht verfolgt – es gibt daher keine kommerziellen Produkte.

Alkalische Elektrolyseure

Zurzeit gibt es kommerzielle Produkte nur in den Bereichen alkalische Elektrolyse (schon seit mehreren Jahrzehnten in unterschiedlichen Baureihen bis ca. $750 \text{ Nm}^3/\text{h}$ Wasserstoff verfügbar) und PEM-Elektrolyse (Produktentwicklung erst seit 20 Jahren und daher nur wenige kommerzielle Anlagen $< 65 \text{ Nm}^3/\text{h}$ auf dem Markt). Alkalische Elektrolyseure arbeiten in der Regel mit einer wässrigen KOH-Lauge mit einer typischen Konzentration von 20 bis 40 Prozent. Die Betriebstemperatur liegt üblicherweise bei ca. $80 \text{ }^\circ\text{C}$ und die Stromdichten variieren im Bereich von $0,2$ bis $0,4 \text{ A/cm}^2$. Der Spannungswirkungsgrad für den Stack von kommerziellen Anlagen liegt

bei etwa 62 bis 82 Prozent bezogen auf die thermoneutrale Spannung von 1,48 V (HHV: Higher Heating Value oder Brennwert). 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 Lurgi stellte Druckelektrolyseure 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 (Abb. 2.3 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 6 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 bis 82 Prozent, jedoch gegenüber der alkalischen Wasserelektrolyse bei wesentlich höheren Stromdichten (0,6 bis 2,0 A/cm²). Für die Zellenstapel oder Stacks wird eine Lebensdauer von bis zu 60.000 h in realen Systemen angegeben.

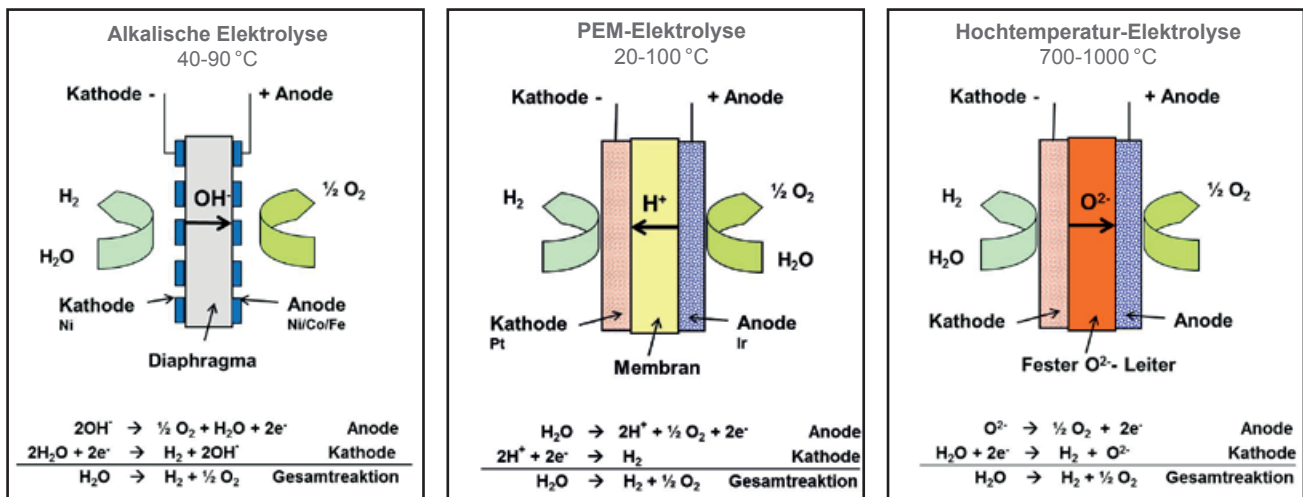


Abbildung 2.3: Funktionsprinzip der unterschiedlichen Arten der Wasserelektrolyse

Wasserstoff 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 bis 40 Prozent der Nennlast, da die Fremdgaskonzentration insbesondere von H₂ in O₂ sehr schnell einen kritischen Bereich von beispielsweise 2 Prozent erreicht, bei der die Anlage aus Sicherheitsgründen abgeschaltet werden muss. Die PEM-Elektrolyse besitzt gegenüber der alkalischen Elektrolyse einen größeren Teillastbereich. Auf Zell- und Zellstapelebe-

ne kann im Gegensatz zur alkalischen Elektrolyse bis auf 5 bis 10 Prozent Teillast abgeregelt werden. Beide auf dem Markt verfügbaren Elektrolýsetechniken haben somit ihre Vor- und Nachteile (siehe Tabelle 2.1).

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. 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 vor allem die Kostensenkung durch Reduktion und Substitution der Edelmetallkatalysatoren bei gleichbleibenden Leistungswerten im Vordergrund. Ebenso müssen die Langzeitstabilität erhöht und die Anlagen in den MW-Bereich vergrößert werden.

Tabelle 2.1: Vergleich von alkalischer Elektrolyse und PEM-Elektrolyse

Alkalische Wasserelektrolyse	PEM-Elektrolyse
<p>Vorteile</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ etablierte Technologie ■ keine Edelmetallkatalysatoren ■ hohe Langzeitstabilität ■ relativ niedrige Kosten ■ Module bis 760 Nm³/h (3,4 MW) 	<p>Vorteile</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ höhere Leistungsdichte und höherer Wirkungsgrad ■ gute Teillastfähigkeit ■ Fähigkeit zur Aufnahme extremer Überlast (systemgrößenbestimmend) ■ extrem schnelle Systemantwort für Netzstabilisierungsaufgaben ■ kompaktes Stackdesign für Hochdruckbetrieb
	
<p>Quelle: HYDROGENICS</p>	<p>Quelle: Proton OnSite</p>
<p>Herausforderungen</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Erhöhung der Stromdichten ■ Ausweitung des Teillastbereichs ■ Systemgröße und Komplexität („Footprint“) ■ Reduktion des Aufwands der Gasreinigung ■ Gesamt Materialeinsatz (Stacks derzeit im Tonnenmaßstab) 	<p>Herausforderungen</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Erhöhung der Langzeitstabilität ■ Scale-up von Stack und Peripherie für den MW-Bereich ■ Kostensenkung durch Reduktion bzw. Substitution von Edelmetallkatalysatoren und kostenintensiven Komponenten (Stromkollektoren/Separatorplatten)

Kontakt:

Jürgen Mergel
 Forschungszentrum Jülich GmbH
 Tel.: 02461 61-5996
 j.mergel@fz-juelich.de

Wasserstoff aus Windenergie im Anwenderzentrum H₂-Herten

Das Anwenderzentrum H₂-Herten wurde 2009 auf dem Gelände des ehemaligen Kohlebergwerks Ewald eröffnet und bietet im ersten Bauabschnitt mit ca. 3000 m² Büro- und Technikumsfläche insbesondere Unternehmen, die im Bereich Zukunftsenergien aktiv sind, ein ideales und zukunftsweisendes Arbeitsumfeld.

Wesentliches Element der gebäudetechnischen Ausstattung ist die Umsetzung des Energie- und Wasserstoff-

versorgungskonzepts, das auf der Nutzung erneuerbarer Energien, insbesondere lokal verfügbarer Windkraft, beruht.

Die Anwenderzentrum H₂-Herten GmbH (AHG) hat gemeinsam mit dem Energieinstitut der Westfälischen Hochschule Gelsenkirchen die Technik konzipiert und im Rahmen einer EU-weiten Ausschreibung die Evonik GmbH mit der Projektsteuerung beauftragt.

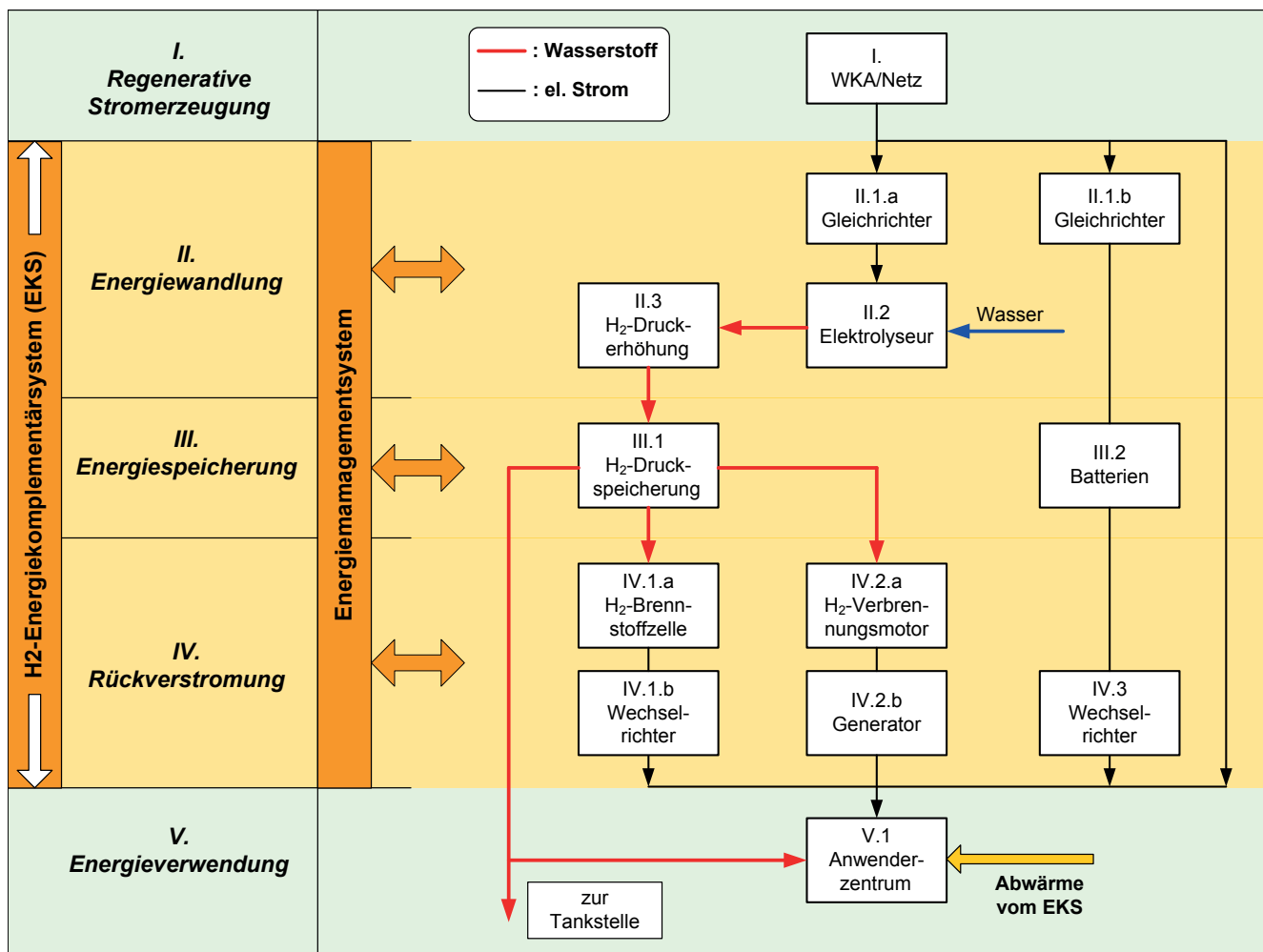


Abbildung 2.4: Wasserstoffbasiertes Energiekomplementärsystem und Peripherie

Das wasserstoffbasierte Energiekomplementärsystem (EKS) wird die folgenden Aufgaben erfüllen:

- Elektrolytische Erzeugung und Speicherung von Wasserstoff
 - für den Betrieb des Zentrums,
 - für die Versorgung einer geplanten H₂-Tankstelle und
 - für die Bereitstellung von Regel- und Reserveleistung.
- Rückverstromung zwischengespeicherter Wasserstoffs
 - für die Konditionierung des von der Windkraftanlage eingespeisten Stroms (Regelleistung) und
 - für die ergänzende Stromversorgung des Zentrums im Fall unzureichender regenerativer Direktstromversorgung oder zur Deckung kurzzeitigen Spitzenbedarfs (Reserveleistung).

Durch die Kombination von Windkraftanlage und Wasserstoffenergiesystem werden Wasserstoffbedarf und jährlicher Strombedarf des Zentrums von insgesamt 200.000 kWh_{el} CO₂-frei und mit hoher Qualität weitgehend abgedeckt.

Der grundsätzliche Aufbau des geplanten Wasserstoffversorgungs- und Energiekomplementärsystems (EKS) nebst Peripherie ist dem Blockbild (Abb. 2.4) zu entnehmen. Dabei umfasst das EKS die folgenden drei Funktionsebenen:

- **Energiewandlung (II.):**
Wechselstrom mittels Gleichrichter in Gleichstrom und mittels Elektrolyseur in Wasserstoff.
- **Energiespeicherung (III.):**
 - Kurzzeitspeicherung von Gleichstrom in Batterien und
 - Mittel- und Langzeitspeicherung von Wasserstoff in Druckbehältern.
- **Rückverstromung (IV.):**
 - Batterie-Gleichstrom mittels Wechselrichter in Wechselstrom und
 - Wasserstoff entweder über Brennstoffzelle und Wechselrichter oder über H₂-Verbrennungsmotor und Generator, ebenfalls in Wechselstrom.

Verfahrenstechnischer Startpunkt ist die Einspeisung elektrischen Stroms, entsprechend der Produktion der in der Nähe des Zentrums gelegenen Windkraftanlage „Hoppenbruch“, in das EKS. Allerdings ist die Windkraftanlage (WKA) nicht direkt mit dem Anwenderzentrum gekoppelt. Stattdessen wird die maximale mögliche Einspeisung, entsprechend dem aktuellen Kapazitätsfaktor der WKA, über elektronische Leistungssteller angepasst und dem Zentrum (V.1) direkt zugeführt. Für den Fall, dass die Stromproduktion der WKA den Bedarf des Zentrums übersteigt, wird der Überschussstrom über die Gleichrichter (II.1.a + b) entweder direkt in der Batteriebank (III.2) gespeichert oder – wenn diese vollgeladen ist – über den Elektrolyseur (II.2) in Wasserstoff umgewandelt. Der Wasserstoff wird in einem Kompressor (II.3) auf den erforderlichen Speicherdruck gebracht und schließlich in Druckbehältern (III.1) gespeichert. Es schließt sich die Rückverstromungsebene an, die die folgenden Funktionen zu erfüllen hat:

- Bereitstellung von Regelleistung für die Konditionierung (Spannungs- und Frequenzregelung) des Windstroms. Dies entspricht dem Normalbetrieb und wird vornehmlich aus dem Batteriesystem (III.2 und III.3) gespeist.
- Bereitstellung von Reserveleistung für den Fall unzureichender regenerativer Direktstromversorgung oder zur Deckung kurzzeitigen Spitzenbedarfs. Hierfür wird der zwischengespeicherte Wasserstoff mittels einer Brennstoffzelle (IV.1) oder alternativ hierzu mit einem Verbrennungsmotor (IV.2) und Generator wieder in Strom umgewandelt.

Neben der Nutzung des Wasserstoffs zur Bereitstellung von Regel- und Reserveleistung ist auch dessen Nutzung für den Betrieb von Wasserstofffahrzeugen geplant. Die Leistung des Elektrolyseurs wurde daher so dimensioniert, dass mit dem erwarteten Windstromüberschuss auch eine zukünftig in der Nähe des Zentrums befindliche Tankstelle mit „grünem“ Wasserstoff versorgt werden kann.

Projektpartner:

Hydrogenics GmbH, Gladbeck	Elektrolyse, Brennstoffzelle
Linde AG, Düsseldorf, Wien	Verdichter
Gustav-Klein GmbH, Schongau	Leistungselektronik
Saft Industries, Nürnberg	Li-Ion Batterie
Vako GmbH, Kreuztal	H ₂ -Speicher
Theissen GmbH, Ochtrup	Verrohrung
Janssen GmbH, Aurich	Elektrotechnik, NSP
ProPuls GmbH, Gelsenkirchen	MSR
Westfälische Hochschule, Gelsenkirchen	Wissenschaftliche Begleitung
K-HyCon, Herten	Technische Projektsteuerung
EVONIK, Essen	Detailed Engineering und Projektabwicklung

Zeithorizont:

Projektstart:	Oktober 2010
Inbetriebnahme:	April 2013

Kontakt:

Dieter Kwapis
ZukunftsZentrum Herten
Tel.: 02366 305-286
d.kwapis@herten.de

ENERTRAG-Hybridkraftwerk

Das ENERTRAG-Hybridkraftwerk (Abb. 2.5) belegt beispielhaft, dass eine sichere und nachhaltige Energieversorgung auf Basis erneuerbarer Energien – speziell der Windenergie – möglich ist. Es speist erneuerbare Energie bedarfsgerecht ein und vermeidet Überlastungen des Stromnetzes. Lastprognosen – eine wichtige Größe für das Netzmanagement – können mithilfe des Kraftwerks so weit verfeinert werden, dass die Abweichungen der getätigten Day-Ahead-Prognosen auf ein Minimum sinken.

Das Hybridkraftwerk erzeugt klimaneutral Wasserstoff mithilfe von Windenergie und setzt ihn bei Bedarf wieder zur Stromerzeugung ein. Diese Technologie ermöglicht die langfristige und an der Nachfrage orientierte Vermarktung erneuerbarer Energie sowie ihren Einsatz als Regelenergie.



Abbildung 2.5: Hybridkraftwerk ENERTRAG

Wasserstoff kann zudem als CO₂-freier Kraftstoff im Verkehrssektor und auch in der Industrie eingesetzt werden. Mit seinem Direktabsatz eröffnet sich ein weiterer wirtschaftlich und technologisch sehr attraktiver Zukunftsmarkt mit großem Potenzial. ENERTRAG und die TOTAL Deutschland GmbH kooperieren bei der Erforschung der Einsatzmöglichkeiten und der Gestehungskosten von Wind-Wasserstoff.

Herzstück des ersten Hybridkraftwerkes ist ein 500-kW-Druck-Elektrolyseur, der von ENERTRAG entwickelt und gebaut wurde. Er erzeugt aus Windstrom Sauerstoff und Wasserstoff durch Elektrolyse von Wasser. Sein entscheidender Vorteil ist: der Elektrolyseur kann unmittelbar an regenerative Energiequellen wie Windkraft, Photovoltaik oder Wasserkraft angebunden werden. Beim ENERTRAG-

Hybridkraftwerk ist der Elektrolyseur über ein Mittelspannungskabel direkt mit drei 2-MW-Windenergieanlagen verbunden. Das Mittelspannungskabel ist Teil des ENERTRAG-Mittelspannungsnetzes, welches über das Umspannwerk Bertikow in das 220-kV-Höchstspannungsnetz der Vattenfall Europe Transmission GmbH einspeist.

Der Elektrolyseur dient als Energieregler. Kann das Netz nicht die gesamte produzierte Energie aufnehmen, wird aus dem aktuell nicht benötigten Strom Wasserstoff erzeugt und die Einspeiseleistung sinkt. Der Wasserstoff wird in drei Druckbehältern mit einem Gesamtfassungsvermögen von 1350 kg gespeichert. Bei großem Strombedarf wird der Wasserstoff mit Biogas gemischt, in zwei 350-kW-Blockheizkraftwerken mit hohem Wirkungsgrad CO₂-neutral in Strom umgewandelt und in das Netz eingespeist. Die regenerative Energieerzeugung wird somit planbar und damit ihre Netzintegration verbessert.

Die Blockheizkraftwerke erzeugen aus dem Wasserstoff-Biogas-Gemisch neben Strom auch Wärme, die ENERTRAG in Zukunft in das Nahwärmenetz der Stadt Prenzlau einspeisen wird. Jedes BHKW erzeugt ca. 2800 MWh elektrische und etwa 2300 MWh thermische Energie pro Jahr. Diese Wärmemenge ist dann ausreichend, um 80 Einfamilienhäuser zu beheizen. Für die Anlagensteuerung hat ENERTRAG eine innovative Software entwickelt, die das gesamte System unter Berücksichtigung aller relevanten Parameter laufend analysiert und die verfügbare Leistung auf der Basis stündlicher Winddaten berechnet.

Eine regenerative Energiewirtschaft benötigt neben klimafreundlich erzeugtem Strom auch Treibstoffe. Vor diesem Hintergrund baut das ENERTRAG-Hybridkraftwerk eine Brücke zwischen der Windenergie und der CO₂-freien Mobilität. Der gespeicherte Wasserstoff wird im Rahmen der Kooperation mit TOTAL Deutschland an Wasserstofftankstellen in Berlin geliefert und versorgt dort über 50 Brennstoffzellenfahrzeuge, die im Rahmen der Clean Energy Partnership (CEP) in Betrieb sind.

Kontakt:

Robert Döring
ENERTRAG AG
Tel.: 039854 6459-0
robert.doering@enertrag.com

Industriewasserstoff

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.

Eine Studie des Landes Nordrhein-Westfalen – „Optionen für den kostenoptimierten Aufbau einer H₂-Infrastruktur in Nordrhein-Westfalen“ (Quelle: Pastowski et al. (2009)) – verknüpft die Erhebung verfügbarer Wasserstoffmengen in Nordrhein-Westfalen mit der Modellierung des Aufbaus einer Wasserstoffinfrastruktur und betont dabei die besondere Ausgangslage von Nordrhein-Westfalen.

Nennenswerte Quellen und Nutzungen von Industriewasserstoff in NRW lassen sich vor allem im Bereich der Chlorproduktion sowie der Raffinerien und Kokereien ausmachen. Daneben wird Wasserstoff teilweise mittels Erdgasreformierung gewonnen, um als chemischer Grundstoff in anderen Produktionen eingesetzt zu werden. Bei der Herstellung von Chlor fällt Wasserstoff bei der Elektro-

lyse als Nebenprodukt von hoher Reinheit an (von Quecksilberbeimischungen beim veralteten Amalgamverfahren abgesehen). Aktuelle Entwicklungen in der Verfahrenstechnik zeigen aber Möglichkeiten auf, die Chlorproduktion zukünftig bei deutlicher Energieeinsparung ohne den Anfall von Wasserstoff betreiben zu können.

In den vielfältigen Stoffströmen der Raffinerien spielt Wasserstoff nicht nur als Nebenprodukt, sondern auch als Einsatzstoff eine Rolle. Die Erdölqualität ist dahingehend rückläufig, dass weniger leichtflüchtige Kohlenwasserstoffverbindungen vorhanden sind und somit langkettige Verbindungen mit Wasserstoff aufgebrochen werden müssen. Dafür und für Entschwefelungsprozesse in der Raffinerie entsteht ein erheblicher Wasserstoffbedarf, der durch eigene Erzeugungsprozesse innerhalb der Raffinerie zur Verfügung gestellt wird. Ein Wasserstoffüberschuss für externe Nutzung entsteht vorläufig nicht. Bei der Kokproduktion entsteht Kokereigas mit rund 60 Prozent H₂-Gehalt, das teilweise zum Beheizen der Koksöfen Verwendung findet. Die Zahl der Kokereien in Deutschland ist in den letzten Jahrzehnten jedoch durch das Elektrostahlverfahren und den Rückgang der Kokkohleförderung gesunken. Zudem wird das Kokereigas bei den in Hüttenwerke integrierten Kokereien bereits in vielfältiger Weise genutzt.

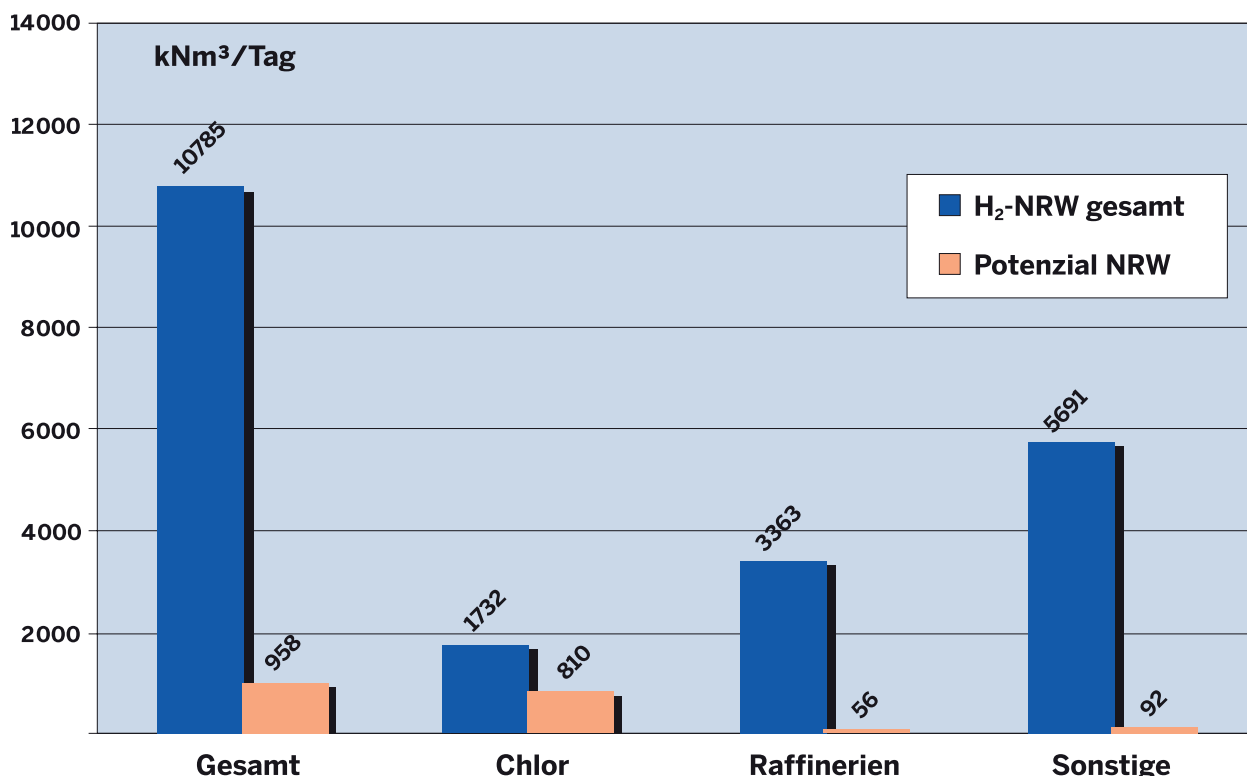


Abbildung 2.6: Industriewasserstoff in Nordrhein-Westfalen insgesamt und Wasserstoffpotenzial für neue Nutzungen (Quelle: Pastowski et al. (2009))

Abbildung 2.6 zeigt eine Zusammenstellung der Ergebnisse einer Erhebung für Nordrhein-Westfalen. Danach entfallen auf Anlagen zur Chlor-Alkali-Elektrolyse lediglich 16 Prozent der Wasserstoff-Gesamtproduktion, während der Anteil dieser Anlagen am Wasserstoffpotenzial für neue Nutzungen 85 Prozent ausmacht. Demgegenüber entfallen über 80 Prozent der gesamten Produktion auf Raffinerien und sonstige Anlagen, die aber zusammen lediglich 20 Prozent zum Potenzial beitragen.

Neben der Verfügbarkeit von industriell erzeugtem Wasserstoff (Abb. 2.7) 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 Flächerschließung beitragen könnte.

Kurzfristig könnten mit dem für Nordrhein-Westfalen abgeschätzten industriellen Potenzial von 958.000 Normkubikmetern pro Tag oder 350 Millionen Kubikmetern 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 zur Verfügung gestellt werden.

Neben der Möglichkeit eines emissionsfreien Verkehrs bietet Wasserstoff als Energieträger auch große Potenziale bei der regionalen Wertschöpfung. Bislang entstehen zum Beispiel im Raum Köln für den Betrieb der ca. 1000 Liniensebusse Kosten von 25 bis 30 Mio. EUR pro Jahr für Dieseltreibstoff (1,15 EUR pro Liter x 1000 Busse x 55.000 km pro Jahr Laufleistung x 43 Liter Dieserverbrauch 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

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

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



Abbildung 2.7: Chlor-Alkali-Elektrolyse in Hürth-Knapsack: 310.000 t Chlor pro Jahr, 203.000 Nm³ Wasserstoff pro Tag;
 $2 \text{ NaCl} + 2 \text{ H}_2\text{O} \Rightarrow 2 \text{ NaOH} + \text{Cl}_2 + \text{H}_2$ (Quelle: HyCologne)

Photobiologische Wasserstoffherzeugung

Eine Möglichkeit, Wasserstoff regenerativ zu erzeugen, ist die Nutzung biologischer Prozesse. Bestimmte Organismen können die Energie der Sonne nutzen, um Wasserstoff mithilfe der Photosynthese zu generieren. Dieser Vorgang wird photobiologische Wasserstoffherzeugung genannt. Grünalgen und Cyanobakterien sind Organismen, deren Fähigkeit, Wasserstoff unter speziellen Bedingungen zu erzeugen, im Labor nachgewiesen ist.

Unter Einfluss des Sonnenlichts wird innerhalb der Zelle Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff aufgespalten. Entscheidend ist das Enzym Hydrogenase (H_2ase), das die durch das Photosystem transportierten Elektronen aus der Wasserspaltung mit den freien Protonen zu Wasserstoff katalysiert. Dieses Enzym wird in der Grünalge unter Schwefelmangelbedingungen aktiviert. Darauf wechselt der Metabolismus der Alge von der normalen CO_2 -Fixierung zur Wasserstoffproduktion (Abb. 2.8). Das Problem bei der Grünalge ist, dass die Hydrogenase durch Sauerstoff inaktiviert wird, welcher als Beiprodukt gebildet wird. Deshalb kann die Wasserstoffproduktion nur unter anaeroben Bedingungen und für sehr kurze Zeiträume stattfinden. Berücksichtigt man diese Einschränkungen, ist die Grünalge derzeit imstande, bis zu 2 ml Wasserstoff pro Liter Algensuspension und Stunde zu generieren.

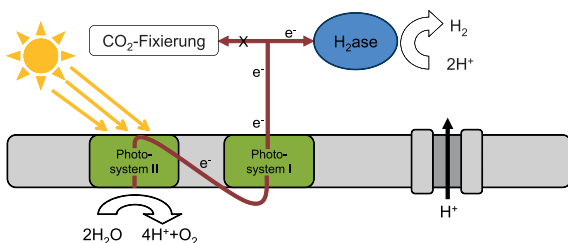


Abbildung 2.8: Zelle (Quelle: RUB)

Um den Prozess zu bewerten und zu verbessern, arbeiten Ingenieure und Naturwissenschaftler der Universitäten Bochum, Köln und Berlin sowie des Max-Planck-Instituts Mülheim in dem vom Bundesministerium für Forschung geförderten Verbundprojekt „ H_2 -Designcells“ zusammen. Ziel der Biologen ist es, in kleinen Schritten einen Design-Organismus zu entwickeln, der die genannten Nachteile der Grünalge kompensiert und die Vorteile aus unterschiedlichen Organismen vereint, um einen robusten und hocheffektiven Organismus zu erzeugen. Grundlage dieses neuen Organismus stellt ein Cyanobakterium dar, welches genetisch sehr gut charakterisiert und veränderbar ist und sich zudem durch Robustheit auszeichnet. Die Weiterentwicklung des derzeitigen Laborreaktors (Abb. 2.9) und Ferti-gung eines skalierten, effektiven und ökonomischen Photobioreaktors zur Kultivierung der Organismen, der auch in

technischen Anlagen eingesetzt werden kann, ist ein weiteres Ziel des Verbundes. Zudem untersucht der Lehrstuhl Energiesysteme und Energiewirtschaft der Ruhr-Universität Bochum den derzeitigen sowie den skalierten Prozess und bewertet diesen hinsichtlich energetischer, ökologischer und ökonomischer Kriterien, um Entwicklungspotenziale aufzuzeigen und Schwächen zu identifizieren.

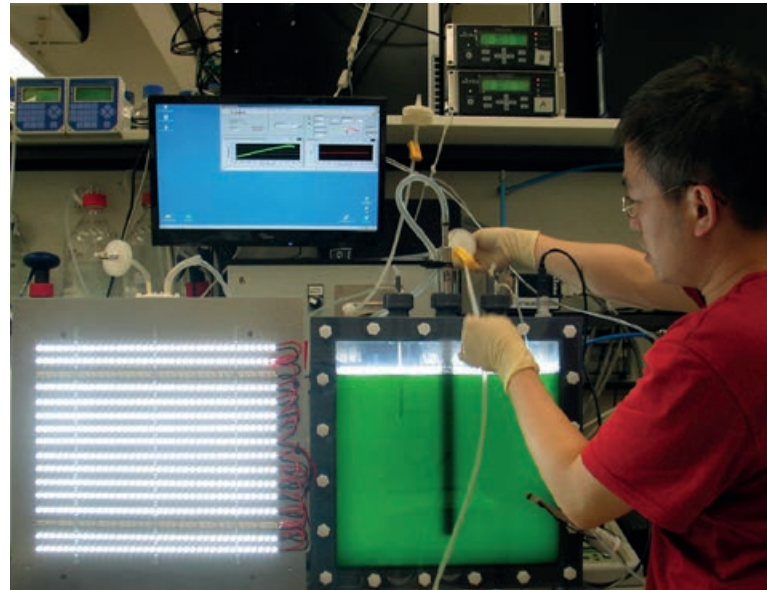


Abbildung 2.9: Laborreaktor (Quelle: RUB)

Erkenntnisse des Projekts zeigen, dass sich durch Skalierungseffekte und Energieeinsparung in der Prozesstechnik (solarer Lichteintrag, chemische Sterilisation und effektivere Prozesstechnik) die Energieaufwendungen für einen skalierten Reaktor auf ein niedrigeres Niveau reduzieren lassen, als derzeit für den Laborreaktor benötigt wird. Wichtigste Stellschraube stellt allerdings die Steigerung der Wasserstoffproduktionsrate um mindestens das Hundertfache der derzeitigen Rate dar, die durch die Entwicklung des Design-Organismus umgesetzt wird. In den letzten Jahren konnten entscheidende Fortschritte erarbeitet werden.

Zudem wurde im letzten Jahr ein Forschungs- und Interessenverbund mit dem Namen „Solar Biofuels Ruhr“ eingerichtet, der auf bereits bestehenden nationalen und internationalen Kooperationen aufbaut.

Kontakt:

Prof. Dr.-Ing. H.-J. Wagner
Ruhr-Universität Bochum – LEE
Tel.: 0234 32-28044
lee@lee.ruhr-uni-bochum.de

HYDROSOL – Solarbasierter thermochemischer Kreisprozess

Wird in einem thermochemischen Kreisprozess die notwendige Prozesswärme durch konzentrierte Sonnenstrahlung zugeführt, läuft der Prozess CO_2 -frei und ohne die Nutzung fossiler Ressourcen ab.

Im Rahmen der EU-Projekte HYDROSOL I und HYDROSOL II hat die Solarforschung des DLR in Zusammenarbeit mit weiteren europäischen Partnern einen zweistufigen thermochemischen Kreisprozess entwickelt und „solarisiert“, bei dem Eisenmischoxide als Redox-Material eingesetzt werden. Das Reaktorkonzept sieht die Verwendung keramischer Wabenstrukturen vor, die mit Eisenmischoxid beschichtet sind. Sie stellen einerseits die Reaktionsoberfläche für die Spaltung von Wasser zur Verfügung und dienen andererseits als Solarabsorber. Mittels konzentrierter Sonnenstrahlung werden die Wabenstrukturen auf die notwendigen Prozesstemperaturen von 800 bis 1200 °C erhitzt.

Im ersten der beiden Teilschritte wird Wasser gespalten und Wasserstoff produziert. Im zweiten Teilschritt wird das Metalloxid reduziert und damit wieder für die Wasserstoffherstellung „regeneriert“ (Abb. 2.10). Der Sauerstoff wird dabei im Metalloxid gebunden, während das Metalloxid oxidiert und Wasserstoff freigesetzt wird.

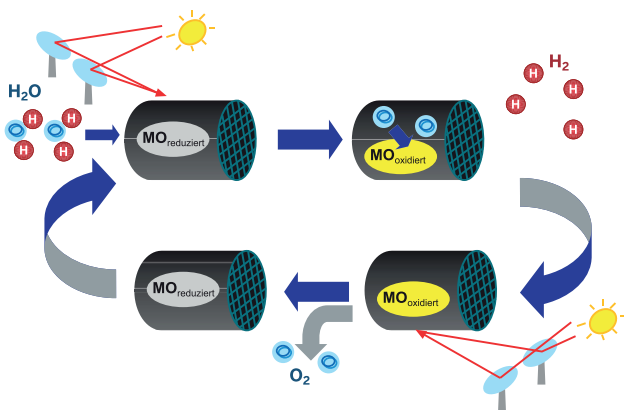


Abbildung 2.10: Prozessschema eines zweistufigen Kreisprozesses (Quelle: DLR)

Im Rahmen der genannten Projekte wurden Solarreaktoren entwickelt und durch Qualifizierung im Sonnenofen des DLR in Köln für das Scale-Up und den Einsatz auf einem Solarturm vorbereitet. Zurzeit wird eine 100-kW_{th}-Pilotanlage (Abb. 2.11) zur Durchführung dieses Prozesses im Feldtest auf der Plataforma Solar de Almería in

Südspanien betrieben. Mit dieser Anlage wurde in zahlreichen Testkampagnen erfolgreich Wasserstoff hergestellt. Das Betriebsverhalten wurde eingehend analysiert und schrittweise optimiert, so dass die Skalierbarkeit der Technologie dadurch gezeigt werden konnte.



Abbildung 2.11: Pilotanlage zur solar-thermochemischen Wasserstoffherstellung auf einem Solarturm (Quelle: DLR)

In dem zurzeit laufenden Projekt HYDROSOL 3D, das von der europäischen Joint Technology Initiative „Brennstoffzellen und Wasserstoff“ mitfinanziert wird, werden die Ergebnisse des Testbetriebs im Zusammenwirken mit numerischer Prozesssimulation genutzt, um in einer Designstudie eine vorkommerzielle Anlage zu planen und das Potenzial der Technologie zu prognostizieren.

Kontakt:

Dr. Martin Roeb
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.
Tel.: 02203 601-2673
martin.roeb@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. Durch die Mitbehandlung von Bioabfällen in den Faulbehältern der Kläranlagen (Co-Fermentation) können die Faulgasproduktion und damit das Wasserstoffpotenzial deutlich gesteigert werden (Abb. 2.12).

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.

Vom Klärschlamm ...

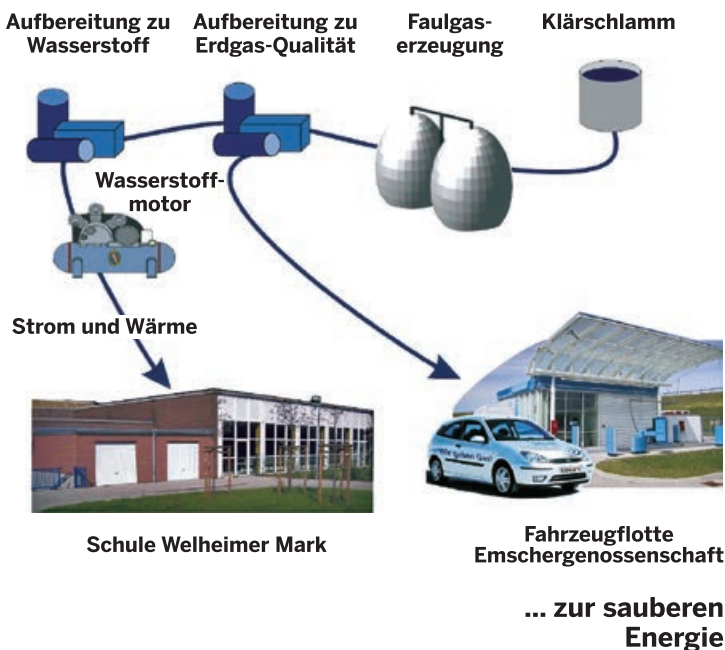


Abbildung 2.12: Anlagenkomponenten: „EuWaK – Erdgas und Wasserstoff aus Kläranlagen“ auf der Kläranlage Bottrop (Quelle: EuWaK)

Projektpartner der Emschergenossenschaft bei der Projektentwicklung und Projektrealisierung sind 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 wird Faulgas zunächst zu Bioerdgas und zu Wasserstoff aufbereitet. Ein Teilstrom des erzeugten Bioerdgases wird ausgeschleust und an einer Gastankstelle an 24 betriebseigene Erdgasfahrzeuge abgegeben (Abb. 2.13). Im zweiten Schritt wird das übrige Bioerdgas in einem Dampfreformer zu Wasserstoff umgewandelt. Der maximale Faulgas-Input liegt bei 120 Nm³/h, die Aufbereitungskapazität für Bioerdgas beträgt maximal 72 Nm³/h, die für Wasserstoff 100 Nm³/h. Der erzeugte Wasserstoff wird über eine Rohrleitung zu einem nahe gelegenen Schulzentrum geleitet, wo in einem Blockheizkraftwerk Strom und Wärme für die Energieversorgung der Schule erzeugt wird.



Abbildung 2.13: Tankstelle für Bioerdgas (Quelle: EuWaK)

Die Forschungsergebnisse zeigen einen stabilen und zuverlässigen Betrieb der Bioerdgasherstellung und Erdgastankstelle. Beim Betrieb der Wasserstoffherzeugung konnte 2012 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 – allerdings bei einer insgesamt noch deutlich verbesserungsbedürftigen Anlagenverfügbarkeit.

Das Projekt wurde mit Förderung des Landes Nordrhein-Westfalen und der Europäischen Union realisiert. Im September 2012 endete der Forschungsbetrieb.

Kontakt:

Patrick Schulte
Emschergenossenschaft / Lippeverband
Tel.: 0201 104-2480
schulte.patrick@eglv.de

3 Wasserstoffbereitstellung

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 und
- regionale und lokale Gegebenheiten (Tankstellendichte im Versorgungsgebiet, Nachfragesituation).

Für einen Übergangszeitraum, in dem erneuerbare Energien nicht in ausreichendem Maß zur Verfügung stehen, kann der Zugriff auf Industriewasserstoff oder konventionell erzeugten Wasserstoff sinnvoll sein. Bereitstellungswege für gezielte Anwendungen müssen unter den genannten Voraussetzungen vergleichend analysiert und bewertet werden. Zu den besonders herausragenden Bausteinen der erforderlichen Infrastruktur gehören mobile

Betankungseinheiten für frühe Anwendungen, die Wasserstoff-Pipeline in Nordrhein-Westfalen sowie Optionen der Wasserstoffspeicherung. 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 Abb. 3.1 gezeigten Teilloptionen (nach v. Wild et al. (2008)) 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 und Feststoffspeicher sowie eine großtechnische Speicherung in Salzkavernen, wie sie im Zusammenhang mit der Energiewende diskutiert wird.

Speichertechnologieoptionen

Physikalische Speicher

Hochdruckgasspeicher (350 bis 700 bar, 23 bis 39 g H₂ pro Liter)

Tankspeicherdichte 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: $\text{LaNi}_5\text{H}_6 \Leftrightarrow \text{LaNi}_5 + 3 \text{H}_2$

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

Chemische Hydridspeicher

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

Kovalente und flüssige organische Hydridspeicher

Ammoniak, Borane, Kohlenwasserstoffe (Beladung mit H₂ nicht im Pkw)

Kavernenspeicher

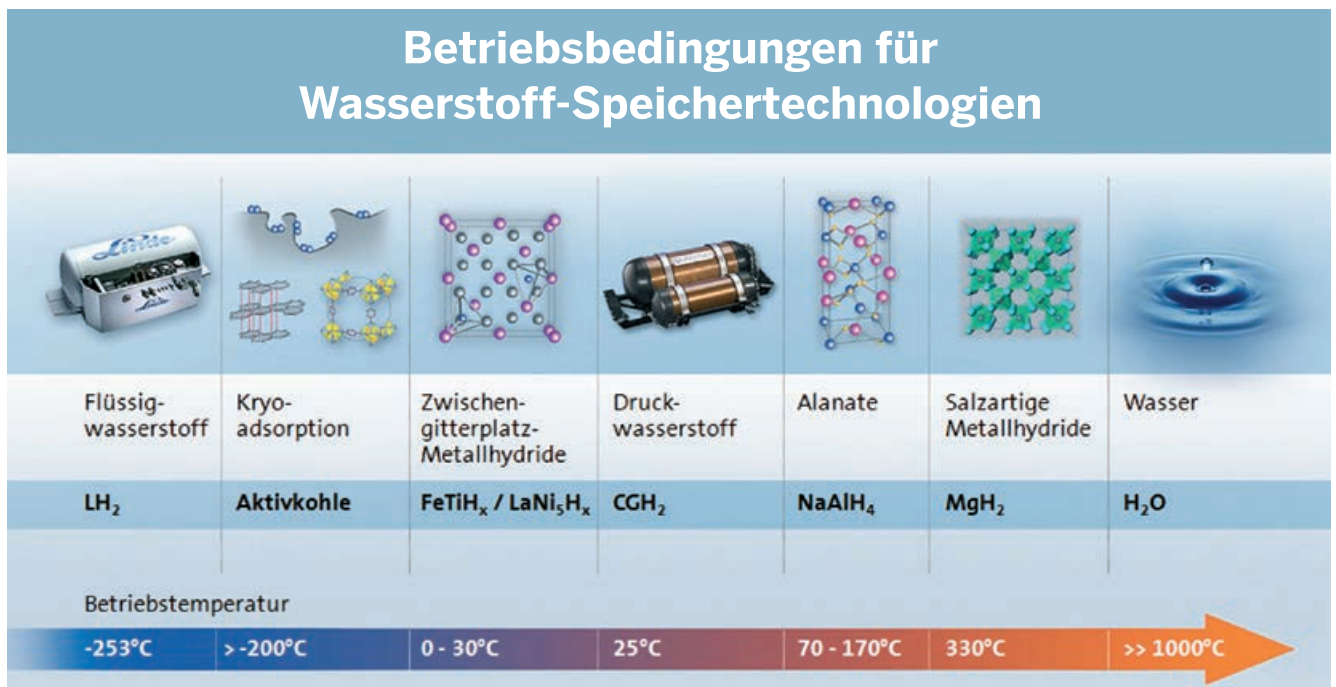


Abbildung 3.1: Wasserstoff-Speichertechnologien (Quelle: GM Alternative Propulsion Center, Adam Opel GmbH)

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 heute über einen Erdgasvorrat für etwa 42 Tage 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 wetterabhängige Wind- und Solarenergie, ergeben sich völlig neue Anforderungen an den Ausgleich zwischen Erzeugung und Bedarf. Auch hier 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 Speicherung von 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 Salzspei-

cherkavernen 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 bis 750.000 m³, Durchmesser von 50 bis 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, bezogen auf den unteren Heizwert von Wasserstoff, auf. Je nach Auslegung der Zugangsbohrung beträgt die Leistung des Speichers somit mehrere 100 MW in Bezug auf den unteren Heizwert (Abb. 3.2).

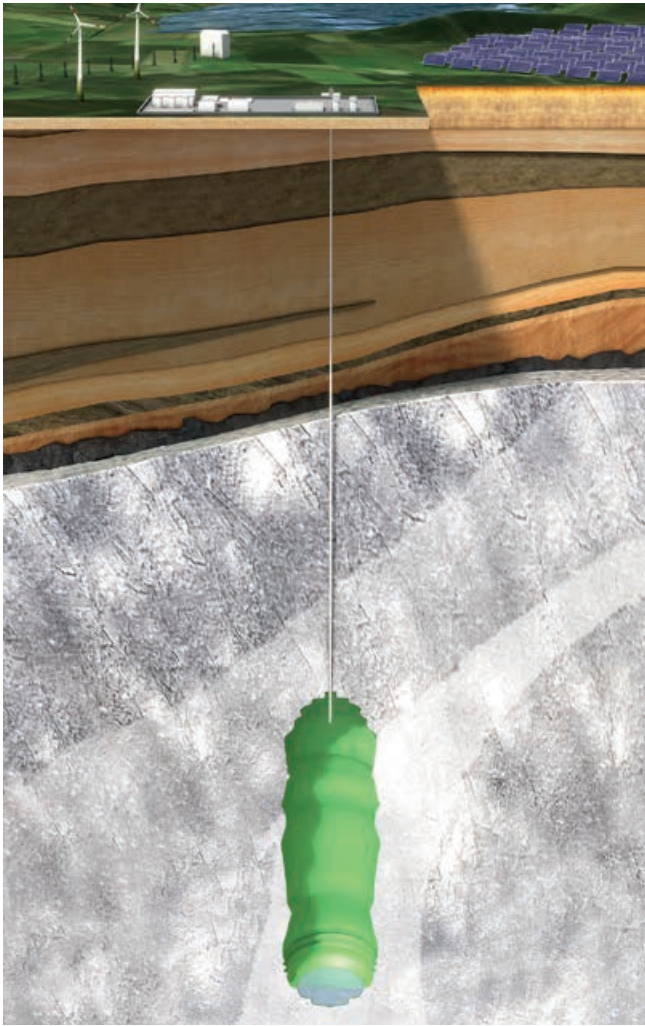


Abbildung 3.2: Speicherkaverne in Zechsteinsalz mit bis zu 200 GWh Kapazität für Wasserstoff (Quelle: KBB)

Die Standortwahl für die Errichtung eines Wasserstoffsystems mit Kavernenspeicher hängt im Wesentlichen von zwei Faktoren ab: Verfügbarkeit geeigneter Salzstrukturen 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. Hier 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 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 Wasserstoff-Pipeline zwischen Marl, Castrop-Rauxel, Oberhausen, Krefeld und Leverkusen haben.

Kontakt:

Sabine Donadei
KBB Underground Technologies
Tel.: 0511 542817-38
donadei@kbbnet.de

Hochdruckgasspeicher

Die grundsätzliche Herausforderung, die der Wasserstoff mit sich bringt, ist seine geringe Energiedichte. Die Komprimierung zur Erhöhung der Dichte und die Speicherung des Wasserstoffgases unter hohem Druck ist eine nahe liegende und von der Konstruktion her einfache Lösung zur Erhöhung der in einem System gespeicherten Energiemenge. Der gasförmige Wasserstoff wird durch einen Kompressor verdichtet und in einen Druckgasbehälter mit Ventil eingefüllt, der ausreichend dimensioniert ist, um die aus dem Innendruck resultierenden hohen Kräfte aufzunehmen. Der Kompressionsaufwand beträgt 7 (250 bar) bis 9 (700 bar) Prozent der zu verdichtenden Wasserstoffenergie in Form von Elektrizität.

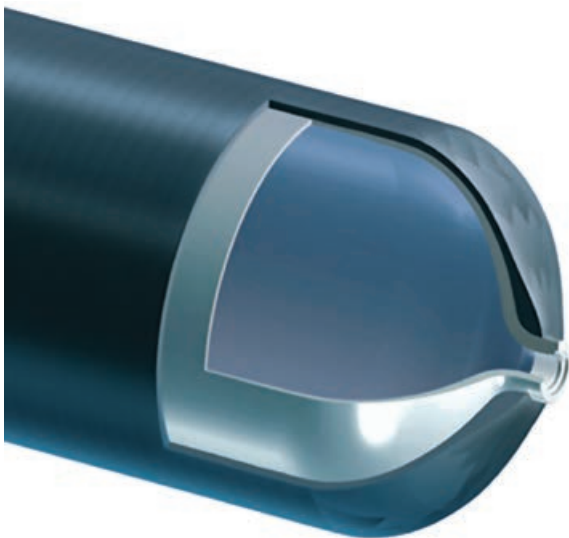


Abbildung 3.3: Typ-3-Behälter (Quelle: Dynetek Europe GmbH)

Prinzipiell lassen sich bei Druckgasspeichern vier verschiedene Bauweisen unterscheiden, die vom Regelwerk zugelassen sind: Klassische (Industrie-) Gasflaschen sind aus Stahl und damit sehr schwer (Typ-1-Behälter). Bei den umfangsbewickelten Typ-2-Behältern wird der zylindrische Teil mit einer Faserbewicklung verstärkt, die etwa 50 Prozent der Belastung trägt, womit bereits eine gewisse Gewichtsersparnis möglich ist. Für die Wasserstoffspeicherung in mobilen Anwendungen mit ihren Anforderungen hinsichtlich Gewicht und Platzbedarf kommen letztlich nur vollbewickelte Composite-Behälter in Leichtbauweise (Typ-3- oder Typ-4-Behälter) in Betracht.

Beide Behältertypen verwenden eine vollständige Umhüllung aus hochfestem Faserverbundwerkstoff. Während es sich bei Typ-4-Behältern um Voll-Kunststoff-Behälter mit Plastik-Liner handelt, basieren Typ-3-Behälter auf einem metallischen Liner (Abb. 3.3). Beide Varianten zeigen ähnliche Eigenschaften hinsichtlich des Gewichts. Im Vergleich

zu „klassischen“ Stahlbehältern ermöglichen diese Bauweisen eine Gewichtsreduzierung um rund 70 Prozent.

Gegenüber den Voll-Kunststoff-Behältern haben jedoch die Typ-3-Behälter einige Vorteile, die insbesondere bei der Speicherung von Wasserstoff unter hohem Druck deutlich werden. Der metallische Liner ist aus Gewichtsgründen sehr dünnwandig ausgeführt und verhindert die Permeation von Wasserstoff. Da der Liner einen Teil der Last trägt, ist mit Typ-3-Behältern eine besonders dünnwandige Auslegung möglich und somit die höchste Speichereffizienz bei vorgegebenem Bauvolumen erreichbar. Weitere Vorteile sind: Flexibilität der Abmessungen verfügbarer Behältergrößen sowie Eignung für schnelle Betankung. Der Vorteil des Typ-4-Behälters hingegen ist der geringere Preis, da der Innenbehälter aus Kunststoff in mittlerer bis großer Serie sehr kosteneffektiv hergestellt werden kann. Derartige Composite-Tanks werden heute bereits in großen Stückzahlen für Erdgasfahrzeuge (bei 200 bar) eingesetzt; für wasserstoffbetriebene Busse (Abb. 3.4) und Pkw werden sie insbesondere infolge der angestrebten Erhöhung des Betriebsdrucks von 350 auf 700 bar noch weiter an Attraktivität gewinnen. Dynetek fertigt am Standort Ratingen Composite-Behälter für Drücke von 200 bar bis 700 bar. Im weiteren Ablauf werden damit kundenspezifische Speichersysteme entwickelt, montiert und einbaufertig ausgeliefert.



Abbildung 3.4: Wasserstofftanks auf dem APTS-Phileas Brennstoffzellenbus der RVK (350 bar, Typ-3-Behälter mit Aluminium Liner, 8 x 205 Liter) (Quelle: Dynetek Europe GmbH)

Kontakt:

Dr. Steffen Rau
 Dynetek Europe GmbH
 Tel.: 02102 30963-30
steffen.rau@dynetek.de

Flüssiggasspeicher

Die Speicherung von Wasserstoff in flüssiger Form bei minus 253 °C ist keine neuartige Technologie – sie wird in der Gasindustrie bereits seit Anfang des 20. Jahrhunderts eingesetzt. Trotz des energieintensiven Verflüssigungsprozesses (Verflüssigungsenergie etwa 11 kWh/kg Flüssigwasserstoff für industrielle Anlagen in Form von Elektrizität) kann aufgrund der höheren Energiedichte ein wirtschaftlicher Vorteil erreicht werden, da die Lieferfrequenz in der Logistikkette gegenüber dem Hochdruckspeicher vergleichsweise gering ist.

Ein Flüssigwasserstofftank besteht im Wesentlichen aus zwei Behältern: der äußere Tank wird durch den atmosphärischen Druck belastet, der sich im Hochvakuum befindliche innere Tank durch Druckbelastung von innen. Die Tanks werden heute nahezu ausschließlich aus austenitischem Edelstahl gefertigt (Abb. 3.5).

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 der so genannte „Boil-off-Effekt“ (abgedampftes Gas) nicht verhindern. Durch ausgereifte Isolationssysteme, aktive Kühlung oder Kombination von Flüssig- und Druckspeicher kann der Zeitraum bis zum Eintreten einer Verdampfung jedoch entscheidend verlängert werden. Neuere

Entwicklungen zielen zusätzlich darauf ab, den „Boil-off-Effekt“ energetisch direkt mit einer Brennstoffzelle zu nutzen oder zur späteren Verwendung zu speichern.



Abbildung 3.5: Schnitt durch einen Flüssigwasserstoffspeicher (Quelle: Linde AG)

Kontakt:

Alexander Schadowski
Linde AG, Linde Gases Division
Tel.: 0211 7481-175
alexander.schadowski@de.linde-gas.com

Feststoffspeicher

Neben Druck- und Flüssigwasserstoffspeichern bieten Feststoffspeicher (metallische und nicht-metallische Hydridspeicher und Feststoffspeicher 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 H₂-Speicherkapazität untersucht: zum einen reversible Hydridverbindungen (Wiederbeladung unter Wasserstoffdruck möglich, z. B. NaAlH₄) und zum anderen nicht-reversible Hydride (Wiederbeladung unter Wasserstoffdruck nicht möglich, zur Regenerierung sind chemische Umwandlungen notwendig, z. B. bei NaBH₄). 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 Wieder-

beladung (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/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 NaAlH₄ reversible Speicherkapazitäten von 5 Gewichtsprozent Wasser-

stoff (1g 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. Mit dem Zentrum für Brennstoffzellentechnik GmbH (ZBT) und dem Institut für Energie- und Umwelttechnik (IUTA) werden Lösungen zur Integration von Feststoffspeichern und Brennstoffzellen in praxistaugliche Komplettsysteme für den Leistungsbereich 200 W_{eI} erarbeitet (Abb. 3.6).

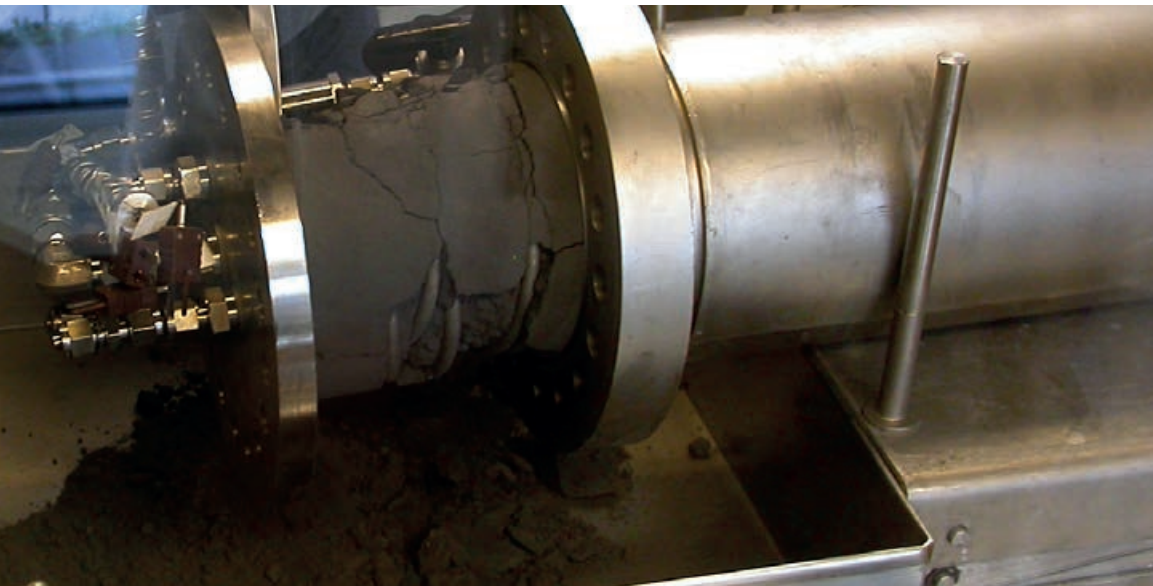


Abbildung 3.6: Beispiel für einen Speichertank als H₂-Quelle einer HT-PEM Brennstoffzelle (Anmerkung: geöffneter Speichertank für 3 kg NaAlH₄, Bau und Entwicklung im Rahmen des AiF Projektes 247ZN, Kooperationspartner: MPI Mülheim, ZBT Duisburg, IUTA Duisburg)

Metallhydride speichern nicht nur reversibel Wasserstoff, sondern auch große Mengen Wärme. Diese kann bei einem Wärmeüberschuss zugeführt (unter Abgabe des Wasserstoffs) und bei Wärmebedarf bei gleicher Temperatur und verlustfrei wieder abgerufen und genutzt werden. Basierend auf Mg-Verbindungen werden Materialien und Systeme für den Temperaturbereich 300 bis 600 °C entwickelt.

Kontakt:

Dr. Michael Felderhoff
Max-Planck-Institut für Kohlenforschung
Tel.: 0208 306-2368
felderhoff@mpi-muelheim.mpg.de

Wasserstoff transportieren – Abfüllzentrum und Wasserstoff-Pipeline

Die AIR LIQUIDE Deutschland GmbH betreibt in Marl das größte Wasserstoffabfüllzentrum Europas. 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 3500 bis 7500 Kubikmetern (290 bis 625 kg) sowie Stahlfla-

schen und Flaschenbündeln mit Betriebsdrücken von 200 und 300 bar. Durch eine 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. Der Standort Marl 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, Abb. 3.7).

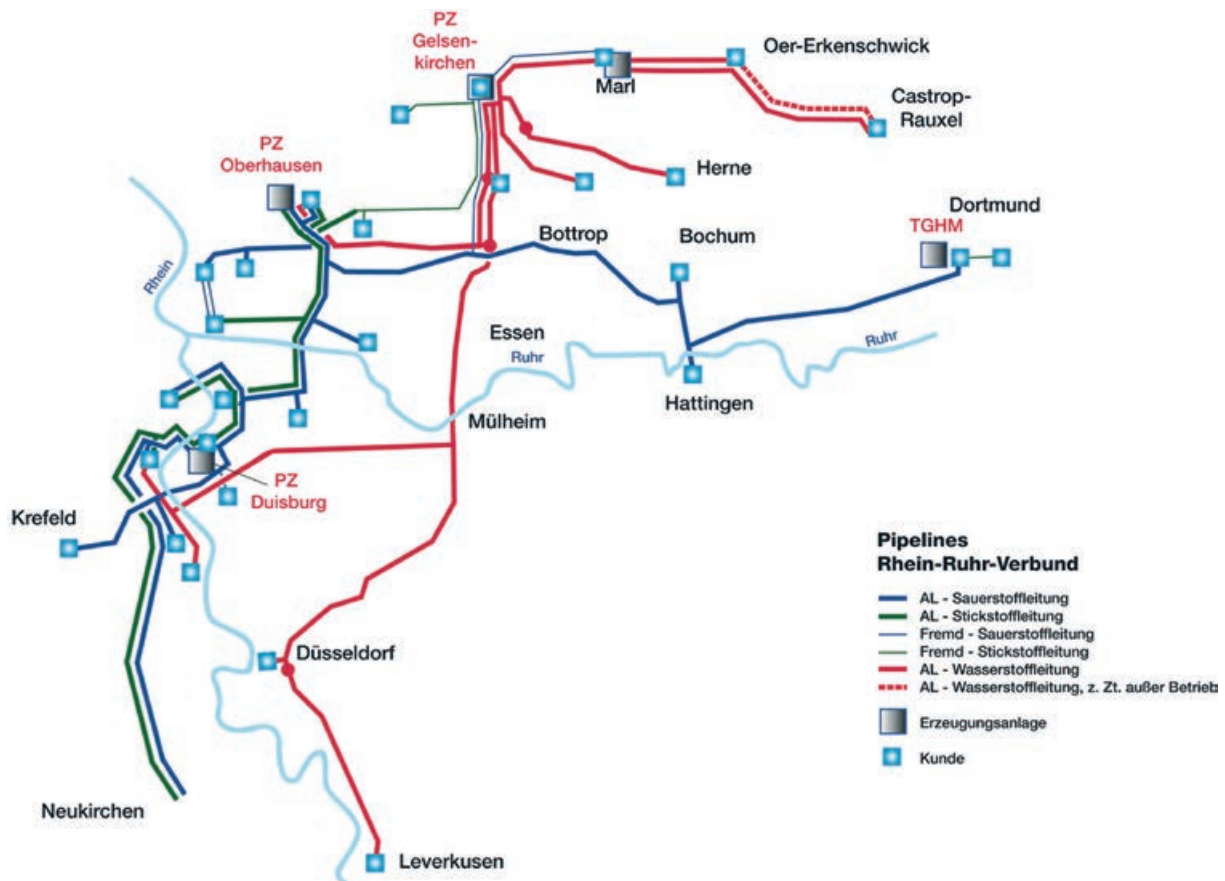


Abbildung 3.7: Wasserstoff-Pipeline-Netz (240 km) (Quelle: AIR LIQUIDE Deutschland GmbH)

Die Kapazität der Pipeline beträgt bis zu 40.000 Kubikmetern 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 werden; zudem lässt sich Industriewasserstoff einspeisen. Diese Pipeline kann zukünftig eine wesentliche Voraussetzung für eine kostengünstige Wasserstoffinfrastruktur für mobile Brennstoffzellen-Anwendungen in Nordrhein-Westfalen sein. Mit einer Abfüllanlage, die im Rahmen des

von Nordrhein-Westfalen geförderten Europäischen Hy-Chain-Projekts (www.hychain.org) entwickelt wurde, können spezielle Composite-Flaschen (2 Liter Volumen bei 700 bar) gefüllt werden.

Kontakt:

Andrea Feige
AIR LIQUIDE Deutschland GmbH
Tel.: 0211 6699-264
andrea.feige@airliquide.com

Wasserstoff tanken – Tankstellentechnologie

Neben den ökologischen Vorteilen von Null-CO₂-Emissionen ist Wasserstoff auch aus technischer Sicht ein viel versprechender Energieträger. Damit Wasserstoff jedoch als kommerzieller Kraftstoff zum Einsatz kommen kann, müssen seine Eigenschaften als leichtestes Element mit der geringsten Dichte im Universum bei der Speicherung und Betankung berücksichtigt werden.

Wasserstoff wird an die Tankstelle entweder tiefkalt flüssig bei -253 °C (Liquified Hydrogen – LH₂) oder gasförmig unter Druck bei 200 bis 500 bar (Compressed Gases 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 ein Fahrzeug für seinen Tank nur einen begrenzten Speicherraum zur Verfügung hat, muss

möglichst viel Energie auf kleinem Raum gespeichert werden. Dazu wird der Wasserstoff an der Tankstelle verdichtet. Anschließend kann das Brennstoffzellenfahrzeug mit gasförmigem Wasserstoff betankt werden.

Die Verdichtertechnologie ist das Herzstück einer Wasserstoff-Tankstelle. Grundsätzlich gibt es zwei verschiedene Methoden. Zum einen kann gasförmiger Wasserstoff auf bis zu 900 bar mithilfe verschiedener Kompressoren wie Trockenläufer, Membranverdichter oder ionischen

Kompressor, den die Linde AG speziell für diesen Einsatz entwickelt hat, komprimiert werden. Zum anderen kann verflüssigter Wasserstoff mittels der Kryopumpentechnologie auf bis zu 900 bar weiter komprimiert, anschließend auf minus 40 °C angewärmt und daraufhin gasförmig getankt werden. Diese Technologie bietet sich insbesondere bei einer hohen Nachfrage an. Auch die Kryopumpentechnologie ist im Portfolio der Linde AG. Sie ist auf kleinstem Bauraum die effizienteste Technologie und weist einen sehr geringen Energieverbrauch auf (Abb. 3.8).



Abbildung 3.8: Kryopumpenanlage (Quelle: Linde AG)

In Brennstoffzellen-Pkws wird Wasserstoff bei 700 bar gasförmig gespeichert, wohingegen bei Brennstoffzellenbussen 350 bar gängig sind. Die Betankung des Gases an der Zapfsäule geschieht bei 900 bar, um durch die notwendige Druckdifferenz den Fahrzeugtank vollständig füllen zu können. Derzeit umfassen die Pkw-Tanks bis zu sieben Kilogramm Wasserstoff. Dies entspricht einer Reichweite von bis zu 700 Kilometern.

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 Standard 2601). Standardisierte Lösungen gibt es bereits für den Betankungsvorgang bei Brennstoffzellen-

fahrzeugen sowie für die Handhabung der Zapfpistole, die der Erdgasbetankung weitgehend ähnlich ist. Außerdem beträgt die Betankungsdauer wie bei konventionellen Kraftstoffen auch nur etwa drei Minuten. Der einzige Unterschied besteht darin, dass der Verbraucher in Zukunft nicht mehr in Litern tankt, sondern dass die Abgabemenge in Kilogramm verrechnet wird.

Kontakt:

Alexander Schadowski
Linde AG, Linde Gases Division
Tel.: 0211 7481-175
alexander.schadowski@de.linde-gas.com

Erste öffentliche Tankstelle für Pkw in NRW

Um die Markteinführung von Wasserstofffahrzeugen in Deutschland zu ermöglichen, muss der Ausbau der Tankstelleninfrastruktur weiter forciert werden. Die Anfang September 2012 von Air Liquide am Höherweg in Düsseldorf eröffnete erste öffentliche Wasserstofftankstel-

le für Pkw in Nordrhein-Westfalen ist ein weiterer Meilenstein zur Verwirklichung dieses Vorhabens (Abb. 3.9). Der Tankstelle angeschlossen ist ein Wasserstoff-Infocenter – eine Dauerausstellung mit vielfältigen Informationen zum Thema „Wasserstoff und unsere Mobilität der Zukunft“.



Abbildung 3.9: Gesamtansicht der H₂-Tankstelle in Düsseldorf (Quelle: AIR LIQUIDE Deutschland GmbH)

Gefördert durch das NRW-Umweltministerium ist die Tankstelle Höherweg Teil des Leuchtturmprojekts „Clean Energy Partnership“ (CEP), das seinerseits durch das Nationale Innovationsprogramm für Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP) unterstützt wird. Das Tankstellenprojekt bildet den Auftakt für die weiteren Aktivitäten der CEP im bevölkerungsreichsten deutschen Bundesland NRW.

Air Liquide und weitere führende Industrieunternehmen, die in der Clean Energy Partnership zusammengeschlossen sind, haben sich gemeinsam mit dem Bundesverkehrsministerium in einer verbindlichen Absichtserklärung dazu verpflichtet, bis 2015 ein Netz von 50 Wasserstofftankstellen aufzubauen. Air Liquide wird hiervon allein zehn Stationen errichten: voraussichtlich drei weitere in NRW, je zwei in Hessen, Sachsen und Süddeutschland sowie eine in Niedersachsen.

NRW bildet einen Schwerpunkt der Wasserstoff-Aktivitäten von Air Liquide, da das Unternehmen im Ballungsraum Rhein-Ruhr eine 240 km lange Wasserstoff-Pipeline

sowie in Marl die größte Wasserstoffabfüllung Europas betreibt. Im Ballungsraum Rhein-Ruhr wurden auch bereits drei, allerdings nicht-öffentliche, Wasserstofftankstellen gebaut.

Täglich bis zu 50 Pkw und leichte Nutzfahrzeuge können in Düsseldorf mit 700 und 350 bar betankt werden. In einer zweiten Ausbaustufe ist mit einem separaten 350-bar-Dispenser auch die Betankung von Bussen möglich. Die Tankstelle wird grundsätzlich unbemannt, aber fernüberwacht betrieben. Für Fragen steht den Kunden eine rund um die Uhr besetzte Telefon-Hotline zur Verfügung. Die Tankstelle ist mit einem Kartenleser für die Fahreridentifikation und die kundenfreundliche Abrechnung der getankten Wasserstoffmenge ausgestattet.

Beim Tankvorgang an sich muss sich der Fahrer – verglichen mit einer „herkömmlichen“ Betankung – kaum umstellen: Die Zapfpistole wird mit dem Tankstutzen am Auto verbunden und der Tankvorgang per Knopfdruck am Touchscreen des Bedienpanels gestartet. Das Betankungsequipment wurde als geschlossenes System kon-

zipiert, so dass ein Austritt von Wasserstoff beim Tanken nicht möglich ist. Danach läuft alles vollautomatisch – etwa der Dichtigkeitstest der Verbindung oder die Druckmessung. Über eine Infrarotschnittstelle überträgt das Fahrzeug am Anfang und aktiv auch während der Betan-

kung wichtige Daten des Tanksystems an die Zapfsäule, um den Tankvorgang zu optimieren. Auf diese Weise wird das Fahrzeug zuverlässig vollständig gefüllt und so die maximale Reichweite erreicht, die heute je nach Fahrzeugtyp zwischen 300 und 700 km liegt (siehe Abb. 3.10).



Abbildung 3.10: Fahrzeugbetankung

Um eine mit konventionellen Fahrzeugen vergleichbare Betankungszeit von etwa 3 bis 5 Minuten bei 700 bar zu ermöglichen, wird der Wasserstoff mithilfe von flüssigem Stickstoff, der in einem Speicherbehälter auf dem Tankstellengelände bevorratet wird, bis auf $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ vorgekühlt.

Die Speicherung des Wasserstoffs an der Tankstelle erfolgt in vier Großraumbündeln mit je 68 Standard-50-Liter-Stahlflaschen bei einem Speicherdruck von 200 bar und einer Gesamtkapazität von ca. 200 kg. Die Bündel sind fest installiert und werden regelmäßig per Trailer befüllt. Das Gas wird mithilfe eines doppelstufigen Membranverdichters komprimiert und dann in zwei speziellen Hochdruckspeichern mit 420 beziehungsweise 850 bar zwischengespeichert.

Die Tankstelle Höherweg bezieht den Wasserstoff derzeit aus Marl. Hier wird er mithilfe einer Erdgasreformierungs-

anlage von Evonik Oxeno produziert und dann per Trailer nach Düsseldorf transportiert. Der Einsatz von Erdgas zur Wasserstoffproduktion kann den CO_2 -Ausstoß im Vergleich zu modernen Dieselfahrzeugen schon heute um bis zu 30 Prozent reduzieren. Im Rahmen der Clean Energy Partnership hat sich Air Liquide aber verpflichtet, 50 Prozent des Wasserstoffs aus CO_2 -neutralen Quellen (Stichwort „Blue Hydrogen“) zu beziehen. Als Quellen hierfür werden die Wasserelektrolyse auf Basis regenerativen Stroms und das Biogas-Reforming dienen.

Kontakt:

Andrés Fernández-Durán
AIR LIQUIDE Deutschland GmbH
Tel.: 0211 6699-4779
andres.fernandez-duran@airliquide.com

4 Nutzung von Wasserstoff

Wasserstoff kann – neben seiner klassischen Verwendung in der chemischen Industrie – 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, wasserstoffhaltigen Synthesegasen oder auch Methanol. Die entsprechenden Synthesegase können aus Erdgas, Propan, Diesel, Kerosin, Methanol, Biomasse oder auch Kohle hergestellt werden. Die dezentrale Wasserstoffnutzung steht oft im Zusammenhang mit dem Vorhandensein eines kohlenwasserstoffhaltigen Energie-

trägers wie Erdgas, Propan oder Diesel und dem damit verbundenen Aufbereitungsverfahren zur Erzeugung eines wasserstoffhaltigen Synthesegases vor Ort oder in einem Fahrzeug.

Durch hohe elektrische Wirkungsgrade bei der Stromerzeugung in der Brennstoffzelle sind geringere Emissionen (THG- sowie CO-, C_nH_m-, NO_x- und Partikel-Emissionen) auch in kleinen Leistungsgrößen im Vergleich zu konventionellen Energiewandlern erreichbar. Brennstoffzellensysteme sind bestens geeignet für die Versorgung von Gebäuden mit Strom und Wärme (Kraft-Wärme-Kopplung) sowie einer An-Bord-Energieversorgung in Fahrzeugen. Damit weist die Nutzung der Brennstoffzellentechnik gegenüber der heutigen Energieversorgungsstruktur viele Vorteile auf.

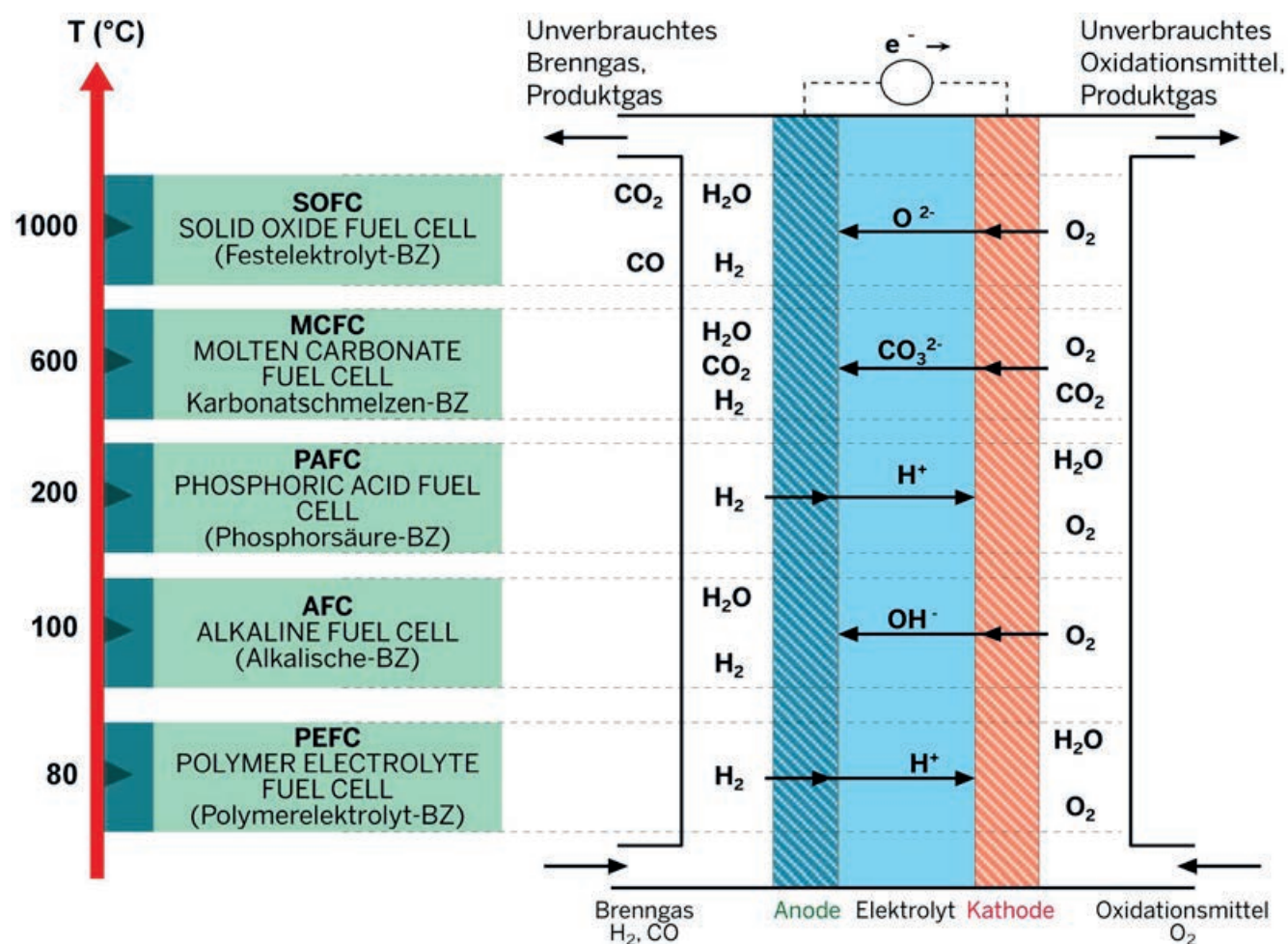


Abbildung 4.1: Klassifizierung von Brennstoffzellen (ohne DMFC für die direkte Nutzung von Methanol)
(Quelle: Netzwerk Brennstoffzelle und Wasserstoff NRW)

Brennstoffzellen – ein Überblick

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) und Oxidkeramische Brennstoffzelle (SOFC). Aus ihren spezifischen Eigenschaften resultieren verschiedene Anwendungsgebiete. Unterschiedliche Brennstoffzellentypen (Abb. 4.1) 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.

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 Energieumwandlung 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 \Rightarrow 1 Mol Wasser

Theoretisch entstehen bei 25 °C und 1 bar:

$$48 \text{ kJ Wärme} + 237 \text{ kJ } (\Delta G) \Rightarrow 285 \text{ kJ pro Mol Wasserstoff } (\Delta H)$$

Das bedeutet, dass ein theoretischer Wirkungsgrad von 83 Prozent 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.

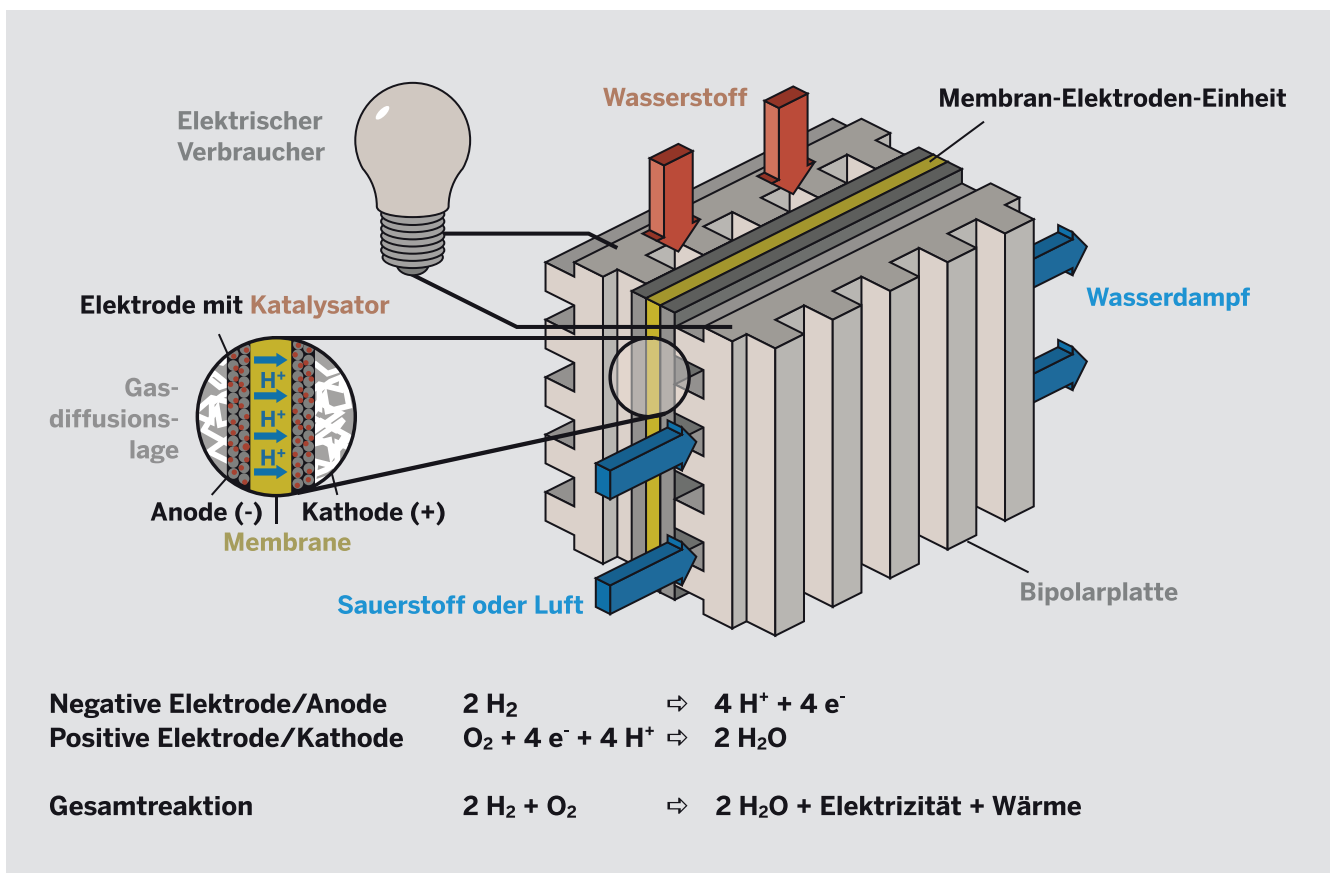


Abbildung 4.2: Aufbau einer Brennstoffzelle (Quelle: Netzwerk Brennstoffzelle und Wasserstoff NRW)

Am Beispiel einer PEMFC sollen Funktion und Aufbau von Brennstoffzellen erklärt werden (Abb. 4.2). Eine PEMFC besteht aus einer Anode und einer Kathode, die den Elektrokatalysator enthalten und direkt mit der Elektrolyt-Membran verpresst sind. Wasserstoff (H_2) strömt die Anode an und wird über eine Gaskanalstruktur (Bipolarplatte und Diffusionsschicht) über die gesamte Membranfläche verteilt. Am Katalysator wird der molekulare Wasserstoff in atomaren Wasserstoff (H) aufgespalten. Die Wasserstoffatome geben ihre Elektronen (e^-) über einen Interkonnektor an einen Stromkreislauf ab. Die verbleibenden Wasserstoffkerne (Protonen, H^+) wandern durch die Elektrolyt-Membran zur Kathodenseite, die mit Luft angeströmt wird. Luftsauerstoff (O_2) nimmt über einen Interkonnektor Elektronen aus dem Stromkreislauf auf, wodurch O^{2-} entsteht. Anschließend reagieren die Sauerstoffionen mit den Protonen zu Wasser (H_2O), das aus der Zelle abgeleitet wird.

Durch den Elektronenfluss über den Stromkreislauf wird eine elektrische Leistung erzeugt. Die restliche Energie, die bei dem chemischen Prozess frei wird, ist Wärme. 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

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-Brennstoffzelle umgewandelt werden können.

Für beide Energieträger – Wasserstoff und reformierte Kohlenwasserstoffe – hat das Zentrum für Brennstoffzellentechnik (ZBT) in Duisburg eine Technologie für den Bau kompakter Membran-Brennstoffzellenstapel entwickelt, sowohl in der klassischen Niedertemperatur-Variante (NT) als auch für den Betrieb bei 160 °C (HT). Automatisierte Fertigungsprozesse für Komponenten und Brennstoffzellenstapel sind in der Entwicklung.

so genannten Stapel (Stack) angeordnet. Die PEMFC arbeitet bei 60 bis 80 °C als so genannte Niedertemperatur-Membran-Brennstoffzelle (NT-PEM). Hochtemperatur-Membran-Brennstoffzellen (HT-PEM) können im Vergleich zur NT-PEM im Temperaturbereich zwischen 130 und 200 °C betrieben werden. Vorteile der HT-PEM sind eine höhere CO-Toleranz, keine Befeuchtung der Reaktionsgase und damit vereinfachtes Wassermanagement ebenso wie vereinfachtes 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 Heinzl
Zentrum für Brennstoffzellentechnik
Tel.: 0203 7598-4225
a.heinzl@zbt-duisburg.de

Spezifikation für den ZBT/Gräbener Maschinentechnik BREEZE NT-PEM Stack:

- 7-Lagen MEA
- Metallische Bipolarplatten, integrierte Dichtungen
- Druckbetrieb bis 2 bar (a)
- Flüssigkühlung

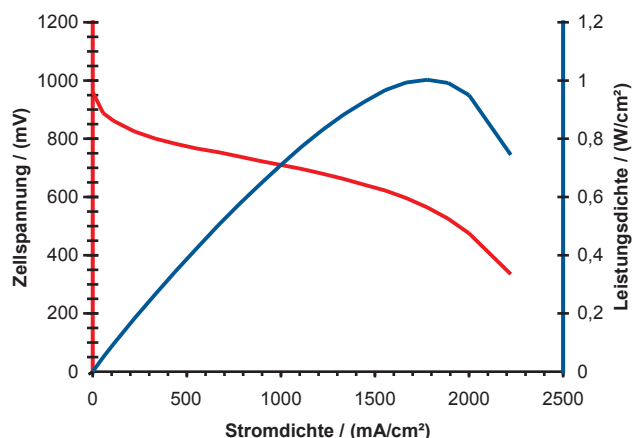


Abbildung 4.3: Kennlinie BREEZE Stack, druckloser Betrieb, befeuchtet

Am ZBT wird seit mehreren Jahren ein wichtiges Element der Brennstoffzelle, die so genannte Bipolarplatte, mittels Spritzgießprozess im Kleinserienmaßstab für den Eigenbedarf zur Manufaktur der Niedertemperatur-Stapel hergestellt. Bipolarplatten erfüllen in einer PEM-Brennstoffzelle neben der Protonen-leitenden 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. Die spritzgießtechnisch

hergestellten Bipolarplatten mit einer aktiven Fläche von 50 cm² werden am ZBT zum Aufbau luft- oder wassergekühlter Brennstoffzellenstapel für einen Leistungsbereich von 100 bis 1000 Watt (je nach Zellenanzahl) genutzt. Größere Zellkonzepte für eine höhere elektrische Leistung sind in der Erprobung. Als kompakte Variante für die Anwendung als „Range Extender“ im Automobil sind Stacks mit extrem flachen metallischen Bipolarplatten der Firma Gräbener Maschinentechnik in der Entwicklung. Eine typische Strom-Spannungs-Kurve zeigt Abbildung 4.3, den Brennstoffzellenstapel Abbildung 4.4.

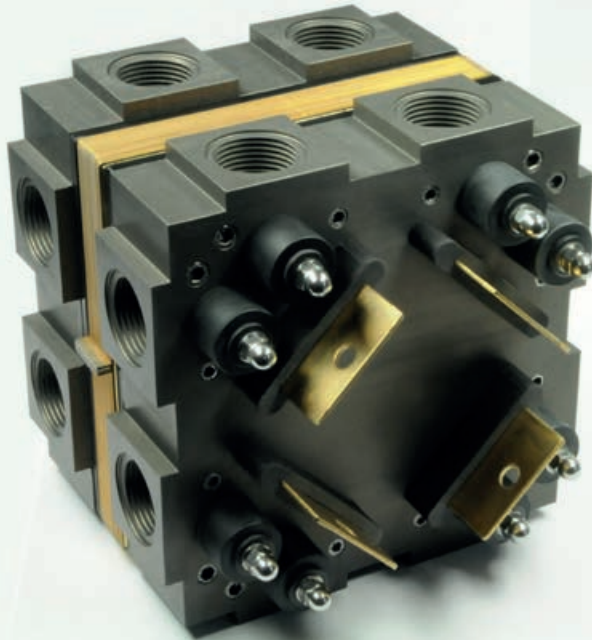


Abbildung 4.4: BREEZE NT-PEM Brennstoffzellenstack, 20 Zellen, ZBT in Kooperation mit Gräbener Maschinentechnik

Die HT-PEM, basierend auf phosphorsäuredotierten Polybenzimidazol-Membranen, hat eine typische Arbeitstemperatur von 160 °C. Aufgrund des hohen Temperaturniveaus hat sie eine hohe CO-Toleranz – ein Vorteil, der die HT-PEM für den Betrieb in Kombination mit Reformern prädestiniert. Günstig ist ebenfalls der höhere Temperaturunterschied zwischen dem Stapel und der Umgebungstemperatur, wodurch die Kühlung deutlich kompakter gestaltet werden kann als bei klassischen PEM-Systemen. Eine technische Herausforderung besteht andererseits darin, zu verhindern, dass Säure aus der Membran ausgetragen wird, was zum Beispiel bei Bildung von flüssigem Wasser bei niedrigen Betriebstemperaturen der Fall sein kann. Dies würde zu einem deutlichen Absinken der Lebensdauer führen. Auch die Entwicklung und das Design von HT-Brennstoffzellen-

stapeln stehen beim ZBT im Fokus. Die entsprechenden Technologien werden am ZBT sowohl für reformatbasierte Systeme (Methanol, Flüssiggas, Biogas) als auch für Systeme auf Basis von Wasserstoff genutzt.

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 Wasserstoff, LPG oder Methanol,
- unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) für dezentrale Anwendungen und
- Leichttransportsysteme.

Das Forschungszentrum Jülich fokussiert seine Arbeiten im Bereich der HT-PEM auf die Anwendung als Bordstromversorgung im Leistungsbereich von 5 kW. Wesentliche Energieeinsparungen lassen sich bei zunehmender Elektrifizierung von Kraftfahrzeugen, Schiffen und Flugzeugen durch eine besonders effiziente Stromerzeugung an Bord realisieren. Diese Bordstromversorgungen müssen aus Sicht der Endanwender mit dem bereits an Bord

befindlichen Kraftstoff betrieben werden, was die Reformierung von Flüssiggas, Diesel oder Kerosin (Mitteldestillate) erfordert. Hierbei bietet die Hochtemperatur-Polymerelektrolyt-Brennstoffzelle in Kombination mit einer entsprechenden Reformertechnologie an Bord die Möglichkeit, Strom effizient zu erzeugen, insbesondere auch bei Stillstand des Hauptantriebs.

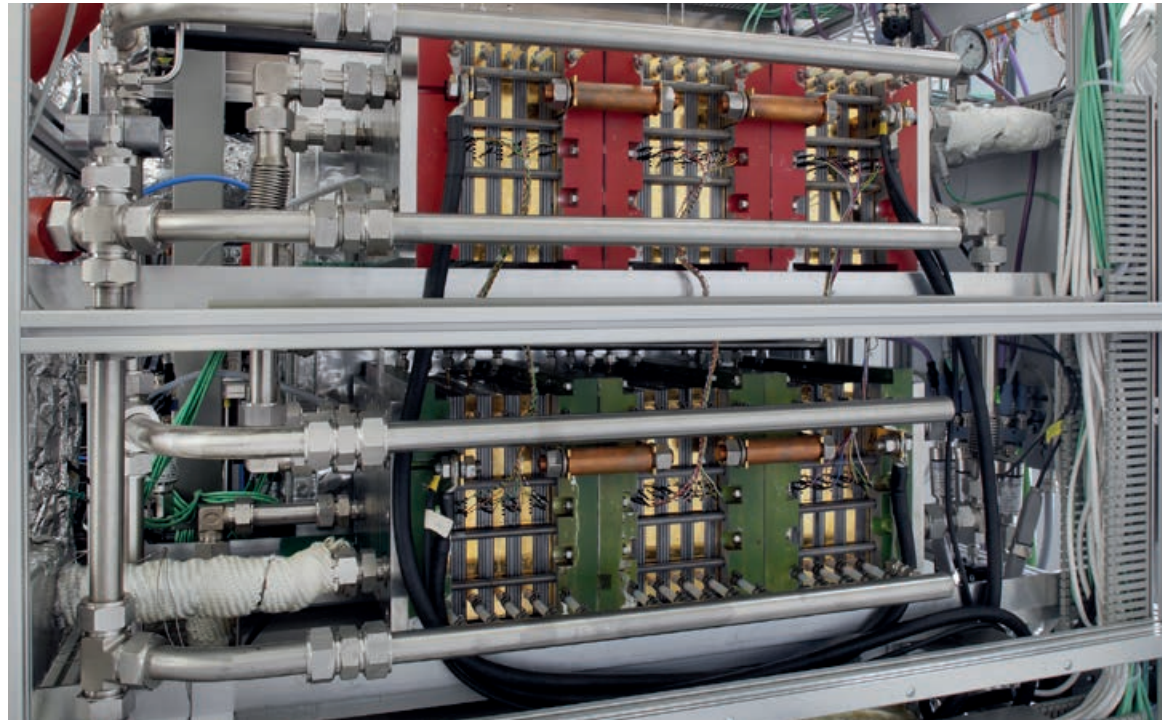


Abbildung 4.5: Zwei HT-PEM-Stacks (bis zu 5,6 kW elektrischer Leistung im Reformatbetrieb) (Quelle: Forschungszentrum Jülich GmbH)

Das aktuelle Stack-Design des Forschungszentrums Jülich ist für diese Anwendungen ausgelegt. Wesentliche Charakteristika sind eine aktive Zellfläche von 320 cm², ein modularer Stack-Aufbau und die Integration von gekapselten, öldurchströmten Temperierzellen. Zwei Stacks mit insgesamt 70 Zellen wurden nach dem beschriebenen Konzept aufgebaut. Eine Leistung von 5 kW wird bereits bei einer mittleren Stromdichte von 0,4 A/cm² bei Betrieb mit Wasserstoff überschritten. Die mittlere Zellspannung liegt bei 580 mV. Beim Betrieb mit Reformat wird bei 0,5 A/cm² eine elektrische Leistung von 5,2 kW erreicht. Die mittlere Zellspannung beträgt hierbei 460 mV. Abbildung 4.5 zeigt die Stacks in einer Systemumgebung, in der sie mit Diesel-Reformat betrieben werden.

Kontakt:

Prof. Dr. Angelika Heinzl
Zentrum für Brennstoffzellentechnik
Tel.: 0203 7598-4225
a.heinzl@zbt-duisburg.de

Prof. Dr. Werner Lehnert
Forschungszentrum Jülich GmbH
Tel.: 02461 61-3915
w.lehnert@fz-juelich.de

Stationäre Anwendungen

Mehr als ein Drittel der Endenergie wird in Deutschland im Haushalt für Raumheizung, Warmwasser und Strom verbraucht. 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 (PEFC und SOFC, siehe auch Abb. 4.1) 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 40.000 Systeme bei Endverbrauchern installiert. In Deutschland wurden im Rahmen des vom Nationalen Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP) geförderten Callux-Projekts einige hundert Systeme in einen umfangreichen Feldtest gebracht. In NRW wird die Förderung der KWK-Technologien auch der Markteinführung der Brennstoffzellen zugute kommen.

Hochtemperatur-Brennstoffzellen sind besonders gut geeignet für die gekoppelte stationäre Erzeugung von Strom und Wärme. 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 (Molten Carbonate Fuel Cell) 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 ge-

nutzt 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 (Solid Oxide Fuel Cell). 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 Sauerstoff-abgereicherter Luft. Damit kann aktiver Brandschutz beispielsweise in Lagern 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 Heinzl
Zentrum für Brennstoffzellentechnik
Tel.: 0203 7598-4225
a.heinzl@zbt- Duisburg.de

Brennstoffzellen (SOFC) – Mikro-KWK-Produktion in NRW

Der deutsch-australische Brennstoffzellenhersteller Ceramic Fuel Cells (CFC) zählt zu den führenden Entwicklern von Hochtemperatur-Brennstoffzellen (SOFC) und betreibt im Industriepark Oberbruch bei Heinsberg eine Fertigungsstätte für Mikro-KWK-Geräte auf Basis oxidkeramischer Brennstoffzellen. Mit einer Investition von etwa 10 Millionen Euro wurde 2009 in einem sanierten Bestandsgebäude von insgesamt 4500 m² Fläche auf 900 m² die Infrastruktur für eine Fertigung von bis zu 10.000 Brennstoffzellenstapeln (Stacks) pro Jahr aufgebaut. Daneben wurde Anfang 2011 eine Montageanlage für das „BlueGen“ Mikro-KWK-Gerät in Betrieb genommen mit einer Kapazität von derzeit etwa 2500 „BlueGen“ pro Jahr.

Eine einzelne der hocheffizienten Zellen – bestehend aus Mehrschicht-Hochtechnologiekeramik – erzeugt ca. 12 W bei 0,85 V. Um diese Energie in der Praxis nutzbar zu machen, müssen die Zellen zu Brennstoffzellen-Stacks gestapelt werden. Dies ist die Kernkompetenz der Anlage in Heinsberg, die gleichzeitig die erste semi-automatische Montageanlage für Hochtemperatur-Brennstoffzellen-Stacks dieser Art ist. Nach dem Auftragen der glaskeramischen Dichtungsmasse werden zunächst vier einzelne Zellen auf einer Trägerplatte angeordnet (Abb. 4.6). Anschließend werden etwa 50 dieser Trägerplatten übereinander gelegt. Dieser Prozess wird auf mehrere Robotinseln verteilt durchgeführt. Im Anschluss wird der Stack in einem Brennofen thermisch zusammengefügt und schließlich in einem Brennstoffzellenmodul getestet. CFC baut zurzeit eine globale Zulieferkette für Stack-Komponenten auf, die auch Geschäftschancen für Firmen in Nordrhein-Westfalen mit sich bringen wird.

Die Brennstoffzellenstapel werden nach erfolgreicher Qualitätsprüfung in einem kompakten Brennstoffzellenmodul integriert. Dieses hocheffiziente Brennstoffzellenmodul wird als „Gennex“ bezeichnet und bildet das Herzstück von „BlueGen“. Darüber hinaus wird das Modul auch an Partner ausgeliefert, die dieses in eigenen Mikro-KWK-Produkten verbauen.

Das von CFC entwickelte Brennstoffzellensystem „BlueGen“ mit bis zu 2 kW elektrischer Leistung hat in mehreren hundert Installationen einen elektrischen Wirkungsgrad von 60 Prozent (netto) bewiesen. Bei idealer Auskopplung der Wärme wird ein Gesamtwirkungsgrad von bis zu 85 Prozent erreicht.

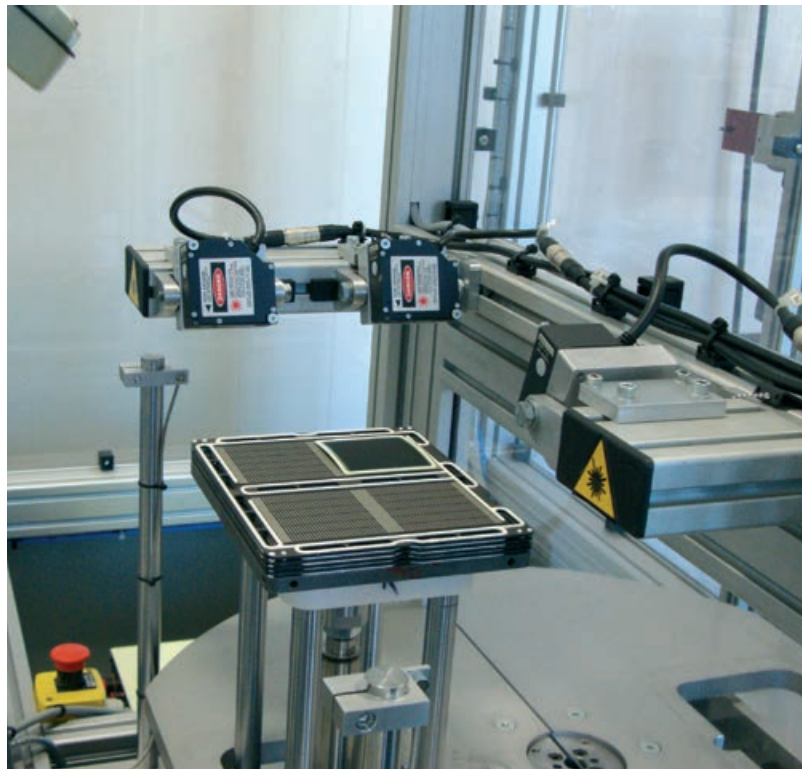


Abbildung 4.6: Stack-Fertigung (Quelle: Ceramic Fuel Cells GmbH)

CFC forscht, entwickelt und testet in den eigenen Betriebsanlagen in Melbourne, Australien, und in Zusammenarbeit mit führenden Instituten für Forschung und Entwicklung. In der Fertigungsanlage in Heinsberg stehen der robotische Aufbau der Stapel, die Herstellung kritischer Systemkomponenten, die Montage der BlueGen-Geräte sowie die Qualitätssicherung der Bestandteile und des Gesamtsystems im Vordergrund. Die Anlage in Heinsberg ist nach ISO 9000 zertifiziert. Darüber hinaus ist Heinsberg auch die europäische Zentrale für die Serviceleistungen von CFC. Hier wird das Installations- und Wartungspersonal der zahlreichen Partner geschult und auf die Einsätze bei den Kunden vor Ort vorbereitet.

Kontakt:

Frank Obernitz
Ceramic Fuel Cells GmbH
Tel.: 02452 153-763
frank.obernitz@cfcl.com.au

Brennstoffzellensysteme – Ein- und Zweifamilienhäuser

Energiesysteme mit Brennstoffzellen versorgen Ein- und Zweifamilienhäuser effizient mit Strom und Wärme aus Erdgas. Die Vorteile der Geräte liegen zum einen in der dezentralen Stromproduktion, die mit vergleichsweise hohen Wirkungsgraden einhergeht. Zum anderen liefern Brennstoffzellen-Heizgeräte gleichzeitig Wärme, die für die Beheizung der Wohnräume zur Verfügung steht (Abb. 4.7).



Abbildung 4.7: Vaillant-Feldtestanlage im bundesweiten Praxistest Callux. (Quelle: Vaillant GmbH)

Politik, Unternehmen und Forschung fördern seit 2008 mit dem Leuchtturmprojekt Callux eine umfangreiche Erprobung und Demonstration von etwa 550 Brennstoffzellen-Heizgeräten (Leistungsbereich 1 kW, Niedertemperatur-PEFC und SOFC) auf ihre Alltagstauglichkeit vorwiegend in Ein- und Zweifamilienhäusern. Für das Projekt stehen 86 Millionen Euro für eine Laufzeit von 7 Jahren zur Verfügung. Im Rahmen der Nationalen Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW) sind daran vier Bundesministerien (Verkehr, Wirtschaft, Bildung und Umwelt) zusammen mit Industrie und Wissenschaft auch aus Nordrhein-Westfalen (Vaillant GmbH und E.ON New Built and Technologies) beteiligt.

Die Vaillant Group gehört zu den Pionieren bei der Entwicklung von Brennstoffzellen-Heizgeräten und betreibt

seit mehr als zehn Jahren erfolgreiche Entwicklung auf diesem Gebiet. Bereits 1998 nahm die Vaillant Group die Aktivitäten in Forschung & Entwicklung auf. Drei Jahre später präsentierte das Unternehmen den ersten Prototypen eines Brennstoffzellen-Heizgerätes. Die im Jahr 2002 gestarteten Feldtests wurden 2005 erweitert und europaweit mit insgesamt 60 Anlagen durchgeführt. Seit dem Jahr 2008 hat die Vaillant Group die Entwicklung intensiviert und sich auf Solid Oxide Fuel Cells (SOFC) als vielversprechendste Technologie konzentriert. Fünf Generationen von Prototypen wurden seit Projektstart entwickelt. Vaillant testet mehrere Prototypengenerationen im deutschlandweiten Praxistest Callux mit einfachem, robustem Systemaufbau und Start-Stopp-Funktion, die gleichzeitig 2 kW Wärme und 1 kW Strom produzieren. Hier sind insgesamt deutlich mehr als 100 Anlagen geplant, die einen wichtigen Meilenstein auf dem Weg zur Produktentwicklung darstellen. Die bisherigen Ergebnisse bestätigen den Ansatz eines robusten Systemdesigns, das konsequent auf die Kundenanforderungen im Segment der Einfamilienhäuser insbesondere für den Austausch veralteter Heizungsanlagen im Bestandsbereich entwickelt wurde.

Seit September 2012 hat Vaillant seine Feldtest- und Demonstrationsaktivitäten auch auf weitere Länder ausgeweitet. Im Rahmen des von der EU-Kommission geförderten Projekts ene.field werden weitere rund 130 Brennstoffzellen-Heizgeräte im europäischen Ausland in Ein- und Zweifamilienhäusern installiert und über mehrere Jahre intensiv getestet. Zudem sind nach Implementierung der attraktiven Richtlinie zur Förderung von hocheffizienten dezentralen Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen mit Brennstoffzellen weitere Demonstrationsvorhaben in NRW geplant. Dabei sollen zunehmend auch lokale Energieversorger – insbesondere Stadtwerke – in die Praxistests einbezogen werden, damit diese im Rahmen gemeinsamer Projekte eigene Erfahrungen mit dieser hocheffizienten KWK-Technologie machen und maßgeschneiderte Geschäftsmodelle für die Zukunft entwickeln können.

Kontakt:

Alexander Dauensteiner

Vaillant GmbH & Co. KG

Tel.: 02191 182506

alexander.dauensteiner@vaillant.de

Bündelung von Brennstoffzellen-Mikro-KWK zu einem intelligenten Netzwerk

Ziel der Bundesregierung ist es, bis 2020 aus Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) 25 Prozent des deutschen Strombedarfs zu decken und somit einen Beitrag zur Energiewende zu leisten. Standorte mit geringem Wärmebedarf stellen einen großen Teil des verfügbaren Potenzials für den Einsatz von KWK-Anlagen dar. Gerade für die Versorgung von Gebäuden mit geringem Wärmebedarf ist ein hoher elektrischer Wirkungsgrad der Anlagen besonders wünschenswert, um einen hohen Nutzungsgrad zu erzielen und über das ganze Jahr einen verlässlichen Beitrag zum Erzeugungsnetzwerk zu leisten.

Mit dem Projekt des virtuellen Brennstoffzellenkraftwerks zeigen Ceramic Fuel Cells (CFC) und Trianel, wie diese in der Vergangenheit kaum genutzten potenziellen Einsatzorte mit dem typischen Wärmebedarf eines Einfamilienhauses für den KWK-Einsatz erschlossen werden können. In dem Gemeinschaftsprojekt werden die dezentralen Anlagen mit jeweils geringer elektrischer Einzelleistung zu einem virtuellen Kraftwerk zusammengeschaltet, wobei diese größere Einheit über ein Internet-Portal fernsteuerbar ist. Die Idee, dezentrale Erzeugungsanlagen zu einem intelligenten Netzwerk zu bündeln, um schwankende Energieeinspeisung aus Windkraft- und Photovoltaikanlagen zu kompensieren, ist nicht neu. Neu ist die Vernetzung von hochinnovativen Brennstoffzellen zu einem virtuellen Kraftwerksverbund. In einem ersten Schritt werden 25 „BlueGen“-Systeme von CFC (siehe CFC-Beitrag) zusammengeschaltet, die in Kundenzentren und bei ausgewählten Stadtwerke-Kunden Strom und Wärme liefern (Abb. 4.8).



Abbildung 4.8: Projekt-Partner (Quelle: Trianel)

Die im Betrieb anfallende Abwärme jedes einzelnen „BlueGen“ Aggregats deckt dabei ganzjährig den Warmwasserbedarf am jeweiligen Standort. Durch die geringe Wärmeleistung von $0,6 \text{ kW}_{\text{th}}$ wird die Warmwasserversorgung

über den Dauerbetrieb der Brennstoffzelle sichergestellt, so dass auch in der wärmeren Jahreszeit eine kontinuierliche Stromerzeugung möglich ist.

Das virtuelle Kraftwerk aus Brennstoffzellen zeigt damit auch einen Ausweg aus dem Dilemma auf, dass der Wärmebedarf aufgrund steigender Wärmedämmstandards in Neubauten und sanierten Bestandsgebäuden stetig geringer wird. KWK-Anlagen, die auf Verbrennungskraftmaschinen basieren, sind außerdem an die Wärmenachfrage für Heizenergie in den Wintermonaten gebunden und somit nur während der kalten Jahreszeit mit voller Last nutzbar.

Insgesamt reduziert der Einsatz eines „BlueGen“-Mikro-BHKW in einem bisher konventionell versorgten Haushalt den CO_2 -Ausstoß um bis zu 50 Prozent. Es wird also ein erheblicher Beitrag zum Klimaschutz geleistet. Wird die Brennstoffzelle mit klimaneutralem Erdgas oder mit Wasserstoff aus „Power-to-Gas“ Anlagen betrieben, kann die Energie sogar CO_2 -neutral bereitgestellt werden. Auch die Emission anderer Luftschadstoffe (NO_x , SO_2) fällt bei der Stromerzeugung in der Brennstoffzelle erheblich geringer aus ($\ll 1 \text{ ppm}$).

Virtuelle Kraftwerke

Durch das Zusammenschalten der kleinen dezentralen Anlagen können insgesamt große, regelbare Erzeugungsstrukturen entstehen. Dabei lässt sich die bereitgestellte elektrische Leistung modulieren, ohne dass der hohe Wirkungsgrad (60 % bei $1,5 \text{ kW}_{\text{el}}$, 50 % bei 1 kW_{el} , $< 40 \%$ bei $0,5 \text{ kW}_{\text{el}}$) signifikant sinkt. Außerdem kann die Leistungsmodulation sehr schnell erfolgen (25 bis 100 % in 12 Minuten). Das virtuelle Kraftwerk ist aufgrund dieser Anpassungsfähigkeit und der ganzjährigen Verfügbarkeit die ideale Ergänzung zur fluktuierenden Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen.

Kontakt:

Michel Nicolai
Trianel GmbH
Tel.: 0241 41 320-220
m.nicolai@trianel.com

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 , NO_x , 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, 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 (Abb. 4.9):

- 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, in denen getankter Wasserstoff in Strom umgewandelt wird.

Die beiden letztgenannten Lösungswege werden gegenüber konventionellen Lösungen aber nur dann zu deutlich niedrigeren spezifischen Treibhausgasemissionen führen, wenn sie auf regenerativ erzeugtem Wasserstoff oder Strom und nicht auf fossilen Energieträgern basieren – also nicht auf Wasserstoff aus Kohle und nicht auf Strom auf heutiger 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 dennoch bereits dann erreicht wird, wenn Wasserstoff aus Erdgas hergestellt wird (Abb 4.11).

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 Brennstoffzellenfahrzeug 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 haben die Markteinführung für den Zeitraum ab 2015 angegeben. Dazu ist es allerdings notwendig, die erforderliche Wasserstoffinfrastruktur aufzubauen.

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. Trotz bedeutender Fortschritte in der Batterietechnik (Li-Ionen-Technologie) ist mit großen Reichweitesprüngen bei batterieelektrischen Fahrzeugen auch künftig nicht zu rechnen. Größere Batteriekapazität an Bord bedeutet gleichzeitig ein deutlich höheres Fahrzeuggewicht. Zudem verlängern sich die Ladezeiten und ein schnelles „Nachtanken“ wird unmöglich. Ein Wasserstofftank ist hingegen in wenigen Minuten aufgefüllt, und schon heute können Reichweiten zwischen 400 und 500 Kilometern dargestellt werden.

Beide Fahrzeugkonzepte werden ihren Platz in der Mobilität finden: das Batterieauto im eher städtischen und stadtnahen Bereich, das Brennstoffzellenauto auch für die Langstrecke (Abb. 4.9).



Abbildung 4.9: Antriebsportfolio für die Mobilität der Zukunft (Quelle: Daimler AG)

Wasserstoffnutzung im Pkw

Weltweit arbeiten Automobilhersteller an der Entwicklung von Elektrofahrzeugen mit Brennstoffzellen. Erste Kleinserien von BZ-Pkws und BZ-Bussen wurden produziert und weltweit in Kundenhand erprobt, beispielsweise von Daimler (Abb. 4.10), General Motors, Toyota, Honda und Hyundai. Für eine breite Markteinführung sind noch einige Optimierungsaufgaben zu bewältigen:

- Erhöhung der Brennstoffzellen-Lebensdauer (mind. 5000 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 Wasserstoffinfrastruktur.

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 Kilometer) 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 (Abb. 4.11). Gewichtsreduzierung, Rückgewinnung von Bremsenergie oder Verkehrsleitsysteme können einen zusätzlichen Beitrag leisten.



Abbildung 4.10: Mercedes-Benz B-Klasse F-CELL (80-kW-PEM-Brennstoffzelle, 100-kW-Elektroantrieb, Li-Ion-Batterie für 30-kW-Leistung, ca. 400 km Reichweite, Druckwasserstoff-Speicher (700 bar), Verbrauch 103 MJ/100 km oder 2,9 l Diesel-Äquivalent pro 100 km) (Quelle: Daimler AG)

Abbildung 4.11 zeigt – entsprechend einer Analyse nach www.optiresource.org – 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 Mitte. Alle anderen Ergebnisse für die neuen Energieträger und Antriebe, wie sie mit Beispielen in Abbildung 4.11 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 Strombeziehungsweise Wasserstofferzeugung eine große Bandbreite der Bilanzwerte für Treibhausgasemissionen und Primärenergieverbrauch zu.

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

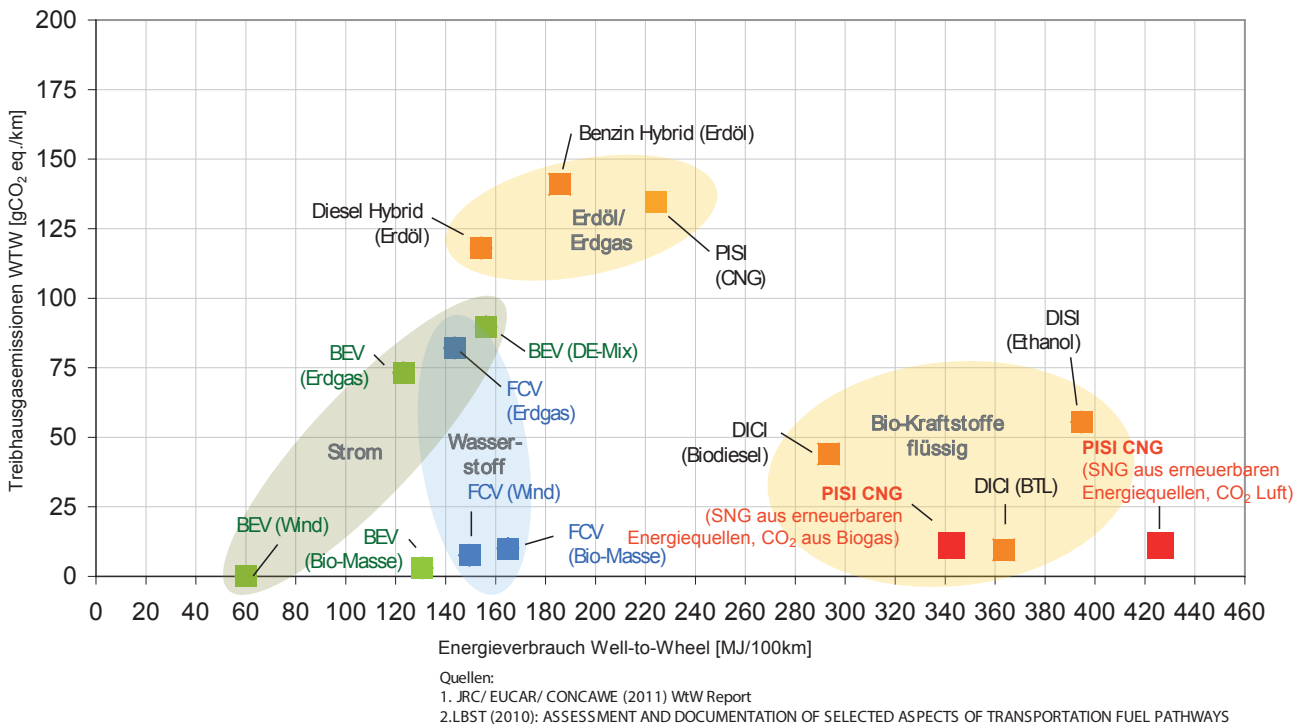


Abbildung 4.11: Spezifische Emissionen und Primärenergieaufwand für Pkw-Fahrzeugantriebe unter www.optiresource.org oder unter www2.daimler.com/sustainability/optiresource/ (Quelle: Daimler AG)

- Erläuterungen:
- DISI – Direct Injection Spark Ignition
 - DICI – Direct Injection Compression Ignition
 - PISI – Port Injection Spark Ignition
 - FCV – Fuel Cell Vehicle
 - BEV – Battery Electric Vehicle

Kontakt:
 Dr. Jörg Wind
 Daimler AG
 Tel.: 07021 89-4614
joerg.wind@daimler.com

Clean Energy Partnership (CEP) H₂ Mobility

Im Dezember 2002 wurde die Clean Energy Partnership (CEP) als gemeinsame Initiative von Politik und Industrie unter Federführung des Bundesverkehrsministeriums etabliert. Die CEP ist das größte Demonstrationsprojekt für Wasserstoffmobilität in Europa und ein Leuchtturmprojekt des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP) im Verkehrsbe-

reich. Partner der CEP sind Technologie-, Mineralöl- und Energiekonzerne sowie die Mehrzahl der größten Autohersteller (Abb. 4.12) und drei führende Betriebe des Öffentlichen Nahverkehrs. Als assoziierte Partner wirken zudem die Bundesländer Nordrhein-Westfalen, Baden-Württemberg und Hessen in der CEP mit.



Abbildung 4.12: Demonstrationsfahrzeuge der CEP (Quelle: CEP)

Die EnergieAgentur.NRW testete über mehrere Monate zwei Brennstoffzellenfahrzeuge des Typs Opel HydroGen4. Die Fahrzeuge wurden im Rahmen der CEP von der Adam Opel AG zur Verfügung gestellt, um ihre Alltagstauglichkeit unter Beweis zu stellen. Das 2 t schwere und 93 kW starke Fahrzeug hat einen Wasserstoffverbrauch, der 5 Litern Diesel auf 100 km entspricht. Die HydroGen4 der EnergieAgentur.NRW sowie fünf weitere an Unternehmen in Düsseldorf übergebene Brennstoffzellenfahrzeuge wurden an der neuen Wasserstofftankstelle am Höherweg betankt.

Bis 2015 sollen im Rahmen der CEP deutschlandweit fünfzig Tankstellen aufgebaut werden. Dies haben das Bundesverkehrsministerium und Industriepartner (Air Liquide, Air Products, Daimler, Linde und Total Deutschland) im Jahr 2012 beschlossen. Damit soll eine marktrelevante Erprobung innovativer Tankstellentechnologie und eine bedarfsgerechte Versorgung der bis dahin in Deutschland fahrenden Brennstoffzellenfahrzeuge erfolgen.

Im Fokus des Aufbauplans stehen Metropolregionen und die Schaffung von Korridoren zur Verbindung der Metro-

polregionen. Damit werden erstmals alle Orte in Deutschland mit einem Brennstoffzellenfahrzeug erreichbar sein.

Auf den Ergebnissen der CEP aufbauen soll eine weitere Initiative mit dem Namen H₂ Mobility. Ihr Ziel ist der Aufbau eines flächendeckenden Netzes von Wasserstofftankstellen in Deutschland, um die Kommerzialisierung von Elektrofahrzeugen mit Brennstoffzelle zu ermöglichen. Unter dem Dach von H₂ Mobility haben sich die Unternehmen Air Liquide, Linde, Daimler, EnBW, OMV, Shell, Total, Vattenfall und die Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW GmbH) zusammengeschlossen.

Kontakt:

www.cleanenergypartnership.de
www.now-gmbh.de
 und
 Dr. Frank Koch
 EnergieAgentur.NRW
 Tel.: 0211 86642-16
koch@energieagentur.nrw.de

Wasserstoffbusse in NRW

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 (Quelle: EU Coalition Study (2010)) 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, Wasserstofftankstellen) 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 (was gleichzeitig deren Lebensdauer verlängert) gehalten wird, übernehmen die elektrischen Speicher die Abdeckung der Spitzenlasten beim Beschleunigen. Beim Bremsen hingegen wird der entstehende Strom aus den Antriebsmotoren in den Batterien gespeichert (Rekuperation). Dieses Konzept führt zu einer deutlichen Kostenabsenkung bei den Brennstoffzellenbussen.

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 (Abb. 4.13). Als Basis diente ein batteriebetriebener Bus der Firma Tecnobus aus Italien, in dem eine 10-kW-PEM-Brennstoffzelle zusammen mit einer NiCd-Batterie eingebaut wurde. Der wesentliche Vorteil eines solchen Midibusses besteht darin, dass die kleine Brennstoffzelle kostengünstig ist, aber ebenso gute Praxisergebnisse wie eine große, teurere Zelle liefert. Mit einer Tankfüllung von sechs Kilogramm Wasserstoff kann das Fahrzeug rund 200 Kilometer weit fahren (der entsprechende Batteriebus erreicht nur 80 km Reichweite). Der 5,3 Meter lange und 2,1 Meter breite Bus bietet Platz für 22 Fahrgäste und erreicht bei

einer Gesamtleistung von 27 Kilowatt eine Spitzengeschwindigkeit von 33 Kilometern pro Stunde. Er ist damit ideal für den Verkehr in verkehrsberuhigten Innenstadtzonen geeignet. Die Busse werden seit Mai 2009 im Liniendienst der Vestischen Straßenbahnen GmbH in den Städten Herten, Gladbeck und Bottrop eingesetzt.



Abbildung 4.13: Mini-Brennstoffzellenbus
(Quelle: Hydrogenics GmbH)

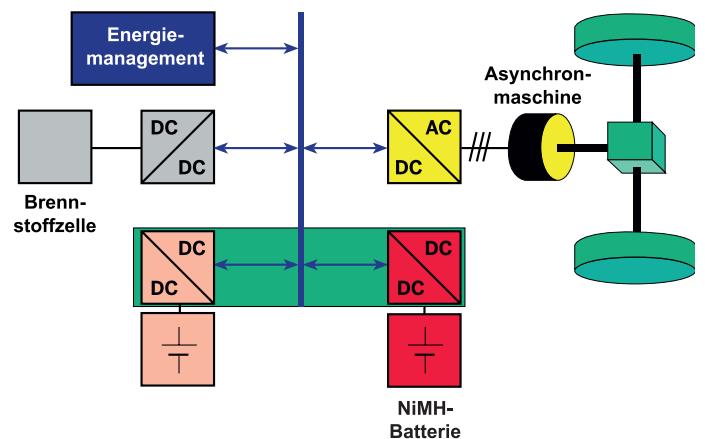


Abbildung 4.14: Dreifach-Hybrid-Konzept
(Quelle: FH Köln)

In einem gemeinsam durch das Land Nordrhein-Westfalen und die Niederlande geförderten Projekt wurde weltweit erstmalig ein 18 Meter langer Gelenkbus mit Brennstoffzellen-Dreifach-Hybrid-Antrieb (Abb. 4.14) entwickelt. Das Brennstoffzellensystem generiert zusammen mit Batterien und Superkondensatoren eine Antriebsleistung von 240 Kilowatt, so dass eine Höchstgeschwindigkeit von

80 km/h erreicht werden kann. Bei der Busplattform handelt es sich um den „Phileas“ der Firma APTS aus Helmond (Abb. 4.15). Das 150-kW-Brennstoffzellensystem stammt 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. Das Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA) an der RWTH Aachen sowie das Institut für Automatisierungstechnik an der FH Köln arbeiteten an der Entwicklung und der Simulation des Energiemanagements sowie des Speicherkonzepts mit. 40 kg Wasserstoff werden gasförmig in Tanks bei 350 bar Druck gespeichert. Der Bus hat eine Reichweite von rund 250 km.

Die Busse werden bei der Regionalverkehr Köln GmbH (RVK) in Hürth, im Rhein-Erft-Kreis und in der Region Köln betrieben und haben bis Ende 2012 bereits über 35.000 km im Linienbetrieb geleistet. Zwei weitere Busse fahren bei der GVB in Amsterdam. Der Verbrauch liegt bei rund 15 kg Wasserstoff auf 100 km, was einem Diesel-Verbrauch von 50 Liter/100 km entspricht. Bei einer jährlichen Laufleistung von 50.000 km entspricht dies einer Reduktion der Treibhausgasemissionen von rund 69 Tonnen/Jahr.

BREEZE! – Brennstoffzellen-Range-Extender für batterieelektrische Fahrzeuge

Die wesentliche Herausforderung bei der Elektrotraktion ist die wirtschaftliche Darstellung hoher Reichweiten sowie die Reduzierung der Ladezeiten von Elektrofahrzeugen, um Elektromobilität erfolgreich als eine für den Endkunden attraktive Alternative zu konventionellen Antriebsstrangkonzepten im Markt etablieren zu können. So kommen Studien zum Mobilitätsverhalten der Fahrzeugnutzer – wie in Abbildung 4.16 exemplarisch für Deutschland dargestellt – zu dem Ergebnis, dass Langstreckenfahrten über 100 km nur einen geringen Teil der Fahrzeugnutzung ausmachen. Die Verkaufszahlen der ersten batterieelektrischen Serienfahrzeuge mit Reichweiten um 150 km (Fahrzyklus) und Ladezeiten zwischen 30 Minuten (Schnellladung) und 8 h zeigen jedoch, dass viele Kunden nicht bereit sind, Flexibilitäts- und Reichweitenbeschränkungen zu akzeptieren.

Brennstoffzellen in Fahrzeugantrieben ermöglichen in Kombination mit Batteriesystemen die Realisierung emissionsfreier Langstreckenelektromobilität und kurzer Nachtankzeiten. Im Fokus von Brennstoffzellen-Range-Extender-Konzepten (REX) stehen niedrige System- und Betriebskosten. Die Brennstoffzelle kann so dimensioniert



Abbildung 4.15: Brennstoffzellen-Gelenkbus „Phileas“ der Regionalverkehr Köln GmbH

Kontakt:

Dr. Frank Koch
EnergieAgentur.NRW
Tel.: 0211 86642-16
koch@energieagentur.nrw.de

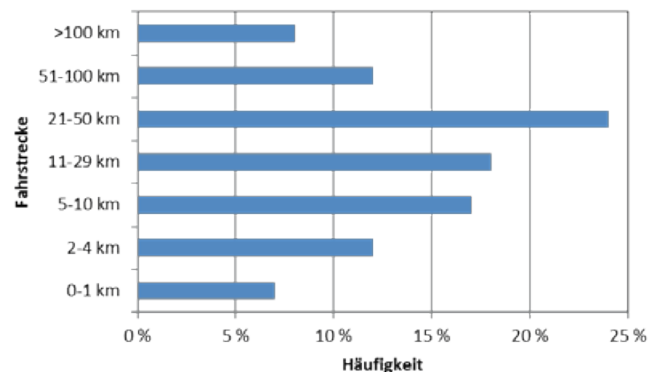


Abbildung 4.16: Häufigkeitsverteilung der täglichen Fahrstrecke deutscher Autofahrer (Quelle: Mobilität in Deutschland)

werden, dass der mittlere Leistungsbedarf des Fahrzeugs – auch bei Autobahnfahrt – allein durch die Brennstoffzelle bereitgestellt wird und somit ein zeitaufwändiges Nachladen des Batteriesystems im Langstreckenbetrieb entfällt. Dabei zeichnen sich die REX-Systeme gegenüber verbrennungsmotorischen Alternativen insbeson-

dere durch hohe Wirkungsgrade, niedrige Geräuscentwicklung und Emissionsfreiheit aus. Entwicklungsbedarf besteht insbesondere hinsichtlich Packaging- und Gewichtsoptimierung sowie Kostenreduktion (Abb. 4.17).

Im Rahmen des vom Land Nordrhein-Westfalen geförderten Projekts BREEZE! wird von Partnern aus Industrie und Forschung ein 30-kW-Brennstoffzellen-Range-Extender-Modul entwickelt, das insbesondere die Packaging-Optimierung und Kostenreduktion zum Ziel hat.

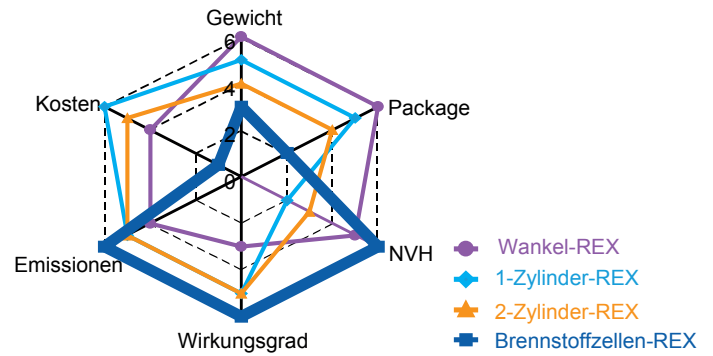


Abbildung 4.17: Vergleich verschiedener Range-Extender-Konzepte (Quelle: FEV GmbH)

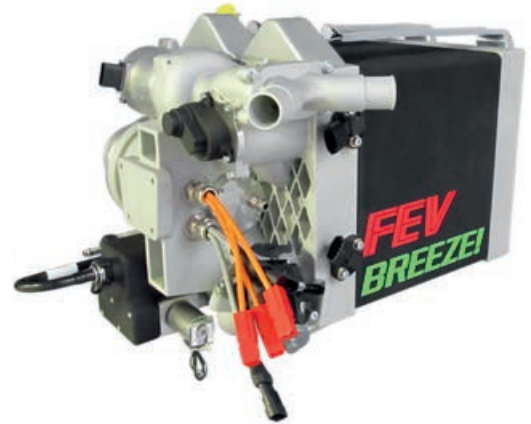


Abbildung 4.18: Versuchsträger aus der FEV Liiona-Flotte (Projekt SmartWheels) und Packaging-Entwurf des BREEZE! Range-Extender-Moduls (Quelle: VKA RWTH Aachen)

Der Fokus der FEV und des Lehrstuhls für Verbrennungskraftmaschinen der RWTH Aachen liegt auf einem neuartigen Endplattenkonzept mit hochintegrierten Nebenaggregaten und Sensorik, das eine packagingoptimale Fahrzeugintegration ohne Einschränkungen des Fahrgast- und Gepäckraums in ein batterieelektrisches Fahrzeug der Subkompaktklasse ermöglicht. Das System wird – analog zu der Fahrzeugintegration eines verbrennungsmotorischen Range-Extender-Systems, das die FEV in Kooperation mit KSPG entwickelt hat – in die Reserveradmulde des Fahrzeugs integriert (Abb. 4.18).

Die Systemarchitektur wird auf die Anforderungen der Range-Extender-Anwendung optimiert, um Systemkosten und -komplexität zu reduzieren. Weiterhin werden bei der Entwicklung großtechnische Umsetzbarkeit sowie Kostenreduzierungen durch Skaleneffekte bei weitreichendem Einsatz von Standardkomponenten aus dem Automotive-Bereich berücksichtigt. Für den sicheren Betrieb des Range-Extenders in Verbindung mit der FEV-Li-Ionen-Traktionsbatterie wird ein umfassendes Sicherheitskonzept erstellt.

Gräbener Maschinenteknik aus Netphen und das Zentrum für Brennstoffzellentechnik Duisburg entwickeln und testen den kompakten Stack auf Basis von metallischen Bipolarplatten mit einer aktiven Fläche von über 300 cm². Eine Flüssigkühlung in Kombination mit Druckbetrieb ermöglicht ein sehr kompaktes Stackdesign und die Darstellung hoher Leistungsdichten. Zur Reduktion der Systemkomplexität und des erforderlichen Bauraums wird auf eine Befeuchtung der Kathode verzichtet.

Die Laufzeit des Projekts beträgt 3 Jahre (2011 bis 2014). In 2013 erfolgt die Prüfstanduntersuchung des Brennstoffzellensystems und in 2014 die Fahrzeugintegration des Brennstoffzellen-Range-Extender-Systems.

Kontakt:

Marius Walters
 Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen
 RWTH Aachen
 Tel.: 0241 5689-9724
 walters@vka.rwth-aachen.de

Spezielle Märkte

Ein weiterer Fokus bei den Brennstoffzellenanwendungen sind die so genannten „speziellen Märkte“. Gemeint sind Anwendungen wie Notstromversorgung, leichte Traktion oder portable Geräte, bei denen es insbesondere auf den Batterieersatz im Watt- bis Kilowattbereich der entsprechenden konventionellen Anwendungen ankommt. Dabei stehen Ansätze zur Kostensenkung, Gewährleistung einer ausreichenden Lebensdauer sowie Bereitstellung der notwendigen Infrastruktur im Vordergrund der Entwicklungen. Der Kunde verspricht sich von diesen kleinen Brennstoffzellenanwendungen in frühen Märkten die folgenden Vorteile: lange Stromversorgung im Vergleich zum Akku, hohe Leistungsdichte, hoher Wirkungsgrad, kleine Abmessungen, wenig Gewicht, einfache Handhabung, umweltfreundliche Technik, kostengünstige Alternative, Back-up-Versorgung und Entfall von Ladezeiten.

Die letzten Jahre haben gezeigt, dass der Erfolg dieser Brennstoffzellenanwendungen weniger von den technischen Eigenschaften abhängt als vielmehr von eher übergeordneten Randbedingungen (z. B. geldliche Anreizsysteme, unzuverlässige elektrische Infrastrukturen, betriebliche Einsatzszenarien). Als Beispiel seien Brennstoffzellen-Gabelstapler genannt. Während in den USA als Folge steuerlicher Anreize bereits Hunderte von diesen Fahrzeugen eingesetzt werden, verläuft deren Markteinführung in Deutschland eher schleppend. Im asiatischen und amerikanischen Raum werden Tausende von Einheiten zur unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV) als Netzabsicherung von Telekom- und EDV-Anlagen aufgestellt. In beiden Fällen sind die Brennstoffzellen trotz der anfänglich höheren Kosten wirtschaftlich, da sie eine deutlich erhöhte Nutzbarkeit der jeweiligen Anwendung gestatten.

Trotz der recht hohen Netzstabilität hat sich auch in Deutschland die Brennstoffzellen-USV als eine der vielversprechendsten frühen Anwendungen herauskristallisiert. Brennstoffzellen überzeugen hier durch längere Laufzeiten und decken einen größeren Temperaturbereich ab als Batterien. Diese sind daher auch ein Schwerpunktthema im Leuchtturmprojekt Clean Power Net (CPN) des Nationalen Innovationsprogramms NIP. Im CPN arbeiten Hersteller und Anwender entlang der gesamten Wertschöpfungskette zusammen, um eine effizientere und somit intelligentere, klimaschonende Energieversorgung für Industrieanwender zu realisieren. (www.cleanpowernet.de).

Als Einstiegssektoren für die kommerzielle Anwendung der Brennstoffzellen-Technologie werden die Anlagensteuerungs- und Verkehrsleittechnik sowie die Informationstechnik in Rechenzentren gesehen. Darüber hinaus stellt die stark wachsende Telekommunikationsbranche mit den

Schwerpunkten DSL- und Mobilfunkstationen, digitaler Behördenfunk oder Mobilfunksysteme TETRA (Terrestrial Trunked Radio) einen relevanten Anwendungssektor dar.

USV in der Industrie

Die Firma Alu Norf ist das größte Aluminiumwalz- und Schmelzwerk der Welt und setzt seit 2010 eine einschubmodulare Brennstoffzelle der Firma Rittal (System FutureE) im Industrieumfeld ein. In einem ersten Schritt wurden die Werksfeuerwehr mit Krisenleitstand und angeschlossener Sanitätsstation des größten Neusser Arbeitgebers abgesichert. Der Kraftstoffvorrat besteht aus vier 50-Liter-Flaschen Wasserstoff, die im laufenden Betrieb gewechselt werden können.



Abbildung 4.19: USV-Brennstoffzellenanlage (Quelle: Aluminium Norf GmbH)

Zwei Wechselrichter DC/AC stellen hier unterbrechungsfrei 230 V für zwei Verbraucherstränge zur Verfügung, die von einem gemeinsamen 48-V-Bus gespeist werden. Durch das modulare Brennstoffzellenkonzept hat das System Vorteile bei Betrieb und Wartung, da der Ausfall eines einzelnen BZ-Moduls nicht einen Komplettausfall der Anlage nach sich zieht (Abb. 4.19).

Entscheidend für die Auswahl dieses Systems waren der einfache Aufbau und die dadurch erreichte hohe Zuverlässigkeit, einhergehend mit einer Reduzierung der Wartungs- und Betriebskosten.

Kontakt:

Manfred Jeude
Aluminium Norf GmbH
Tel.: 02131 937-8590
manfred.jeude@alunorf.de

Energieautarke Mobilfunkstandorte

Die E-Plus Mobilfunk GmbH & Co. KG betreibt ein mit Bundesmitteln gefördertes Projekt zur Erprobung von energieautarken Mobilfunkstandorten im aktiven Funknetz. Diese Standorte werden versorgt durch den Einsatz von Photovoltaik, Windkraft, Brennstoffzellentechnik und Batterien. Hohe Stromwegkosten bei der Anbindung an das öffentliche Stromversorgungsnetz und die Verwendung von regenerativen Energieträgern sind die Motivation für das Konzept bei gegebenem Standort.

Die derzeit von E-Plus eingesetzte Funktechnik benötigt je nach Ausprägung des Standortes eine Dauerleistung zwischen 1,5 bis 2,5 kW. Alle Standorte verwenden eine Kombination aus Photovoltaik-Anlage (PV) auf einem zweiachsigen Tracker-System, vertikal gelagerter Windkraftanlage (WKA) auf dem Mobilfunkmast, Brennstoffzellentechnik mit dem Energieträger Wasserstoff und Puffer-Batterien (Abb. 4.20).

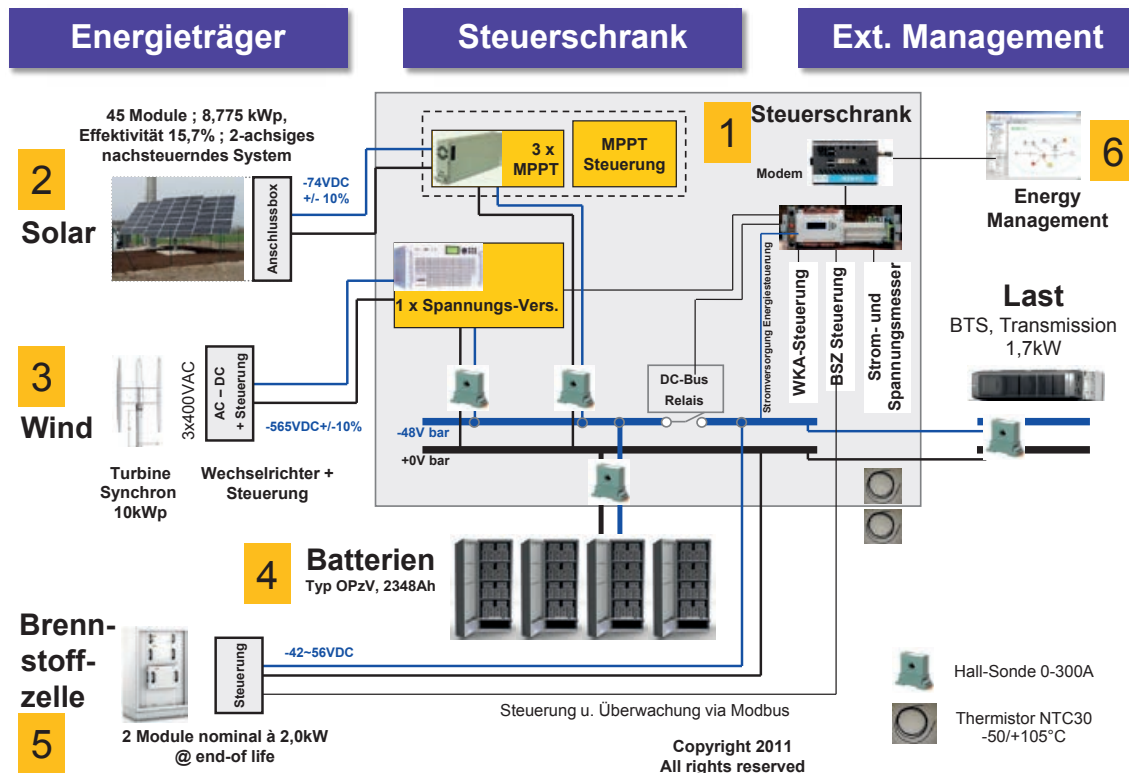


Abbildung 4.20: Kombination und Funktionsweise der Energieträger am Standort Vermold

Die PV-Anlage leistet 8,77 kW_p und stellt den Hauptenergielieferanten dar. Die WKA leistet 10 kW_p oder 6 kW_p je nach ausgewähltem Modell und trägt je nach Region bis maximal ein Drittel des Energiebedarfs bei. Die Brennstoffzellen sind redundant vorgesehen, leisten je 2,5 kW_p und können bei Ausfall der anderen Systeme die Mobilfunktechnik bei vollem Wasserstoff-Vorrat (2 Bündel bei 300 bar Fülldruck) bis zu zwölf Tagen mit ausreichend Energie versorgen. Die Batterien dienen als Puffer. So kann eine gleichmäßige Spannung (48V DC) abgegeben und gleichzeitig eine weitere zusätzliche Reserve von bis zu zwei Tagen Betrieb (bei 100 % SOC) geschaffen werden.

Die Funktechnik, die Steuerung der Energietechnik, die Brennstoffzellen und der Brennstoffvorrat sind in einem Container (10' oder 20') untergebracht. Der Platzbedarf für den gesamten Standort beträgt mit etwa 250 m² Fläche doppelt so viel wie für einen konventionellen Standort.

Derzeit sind zwei Standorte im aktiven Betrieb, in Vermold seit Mai 2011 und in Büren bei Brilon seit Dezember 2012. Ein weiterer Standort in Waldfeucht (Kreis Heinsberg) wurde genehmigt und wird im Sommer 2013 in das Netz integriert, ein vierter Standort befindet sich im Genehmigungsverfahren. Weitere Standorte sind in der Planung. Bis auf die bei der Komplexität zu erwartenden Startschwierigkeiten lief der Betrieb bisher ohne größere Störungen.

Kontakt:

Dag Hüdepohl
E-Plus Mobilfunk GmbH & Co. KG
Tel.: 0211 448-5046
dag.huedepohl@eplus-gruppe.de

5 Wasserstoff- und Brennstoffzellenland Nordrhein-Westfalen

Mit der Einrichtung des Netzwerks Brennstoffzelle und Wasserstoff NRW im Jahre 2000 hat die nordrhein-westfälische Landesregierung ein Instrument ins Leben gerufen mit dem Ziele, die Entwicklung der Brennstoffzellentechnologie in diesem Land voranzutreiben. Flankiert werden die Aktivitäten des Netzwerks durch eine zielgerichtete Projektförderung überwiegend unter dem Dach des Programms „progres.nrw – Innovation“. So wurden seitdem von der Landesregierung und von der Europäischen Union (Europäischer Fond für regionale Entwicklung – EFRE) rund 110 Millionen Euro für etwa 100 Wasserstoff- und Brennstoffzellenprojekte zur Verfügung gestellt. Das Gesamtinvestitionsvolumen liegt bei gut 185 Millionen Euro. Das Themenspektrum der Projekte (Abb. 5.1) reicht von der Entwicklung einzelner Systemkomponenten wie Verdichter und Sensoren bis hin zu Entwicklungen und Erprobung komplexer Brennstoffzellenappli-

kationen im portablen, stationären und mobilen Bereich. Als Beispiele für herausragende Projekte seien genannt:

- Entwicklung eines 18 m Gelenkbusses mit Brennstoffzellen-Hybrid-Antrieb,
- Bau der Wasserstofftankstelle Düsseldorf für Brennstoffzellen-Pkw,
- Bau des H₂-Anwenderzentrums Herten,
- Betrieb von Brennstoffzellen-Minibussen bei der Vestischen Straßenbahnen GmbH,
- Entwicklung von Wasserstoff-Schnellschaltventilen für 700 bar,
- Hydroforming-Verfahren zur Herstellung metallischer Bipolar-Platten
- Entwicklung eines brennstoffzellenbasierten Range-Extenders für Batteriefahrzeuge
- Windstrom-Elektrolyse in Herten

NRW Hydrogen HyWay

Das Leitvorhaben „NRW Hydrogen HyWay“ bildet den strategischen Rahmen für die verschiedenen Aktivitäten im Bereich der Brennstoffzellen- und Wasserstofftechnik. Das Programm umfasst 5 Themenschwerpunkte:

- Umwandlung und Speicherung regenerativen Überschussstroms in Form von Wasserstoff einschließlich anschließender Nutzung im Energiesystem
- Infrastrukturen zur Einführung von regenerativ gewonnenem Wasserstoff als innovativem Kraftstoff im Verkehr (Produktion, Speicherung, Befüllung für die Schwerpunktanwendungen ÖPNV und Pkw-Flotten)
- Erprobung von Fahrzeugen mit Brennstoffzellentechnik (Fokus ÖPNV, Nutzfahrzeuge und Sonderanwendungen in Ergänzung zu durch Bund/EU geförderten Pkw-Anwendungen)
- Forschung, Entwicklung und Erprobung dezentraler Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) auf Brennstoffzellenbasis, virtueller Kraftwerke mit Schwerpunkt Brennstoffzellen-KWK und Hybrid-Kraftwerke
- Forschungs- und Entwicklung zur technischen Optimierung und Kostensenkung, vorkommerzielle Erprobung neuer Entwicklungen in größeren Feldtests

Vor dem Hintergrund, dass zurzeit wichtige Weichen zur Markteinführung der Wasserstoff- (u. a. als Speichermedium) und Brennstoffzellentechnik (u. a. Mikro-KWK, Mobilität) gestellt werden, bekennt sich die neue Landesregierung mit dem „NRW Hydrogen HyWay“ sichtbar zur Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnik. Nordrhein-

Westfalen hat durch dieses einzigartige Strategieprogramm im Wasserstoff- und Brennstoffzellenbereich bundesweit eine Vorreiterrolle eingenommen und genießt entsprechend national wie international eine hohe Reputation.



Abbildung 5.1: Wasserstoff-Aktivitäten in Nordrhein-Westfalen

Regionale Aktivitäten

Wasserstoff Region Rheinland

In der Region Köln fällt Wasserstoff in großen Mengen als Nebenprodukt in der lokalen Chemieindustrie (überwiegend Chlor-Produktion und Raffinerien) an. Das Netzwerk HyCologne-Wasserstoff Region Rheinland e. V. organisiert mit öffentlichen und industriellen Partnern die Bereitstellung dieses Industriewasserstoffs als Energieträger für den Verkehr und weitere Projekte. Die nun über dreijährige Betriebsphase der Tankstelle und der Busse (seit 2011) dokumentieren eindrucksvoll die technische und organisatorische Machbarkeit 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. Die Busse werden in Hürth, im Rhein-Erft-Kreis und in der Region Köln betrieben und haben bis Mitte 2013 bereits über 40.000 km im Linienbetrieb geleistet.

Das Projekt „Chemergy – Bereitstellen von Nebenprodukt-Wasserstoff für Verkehrsprojekte“ (2009 bis 2012) verfolgte im Rahmen des Nationalen Innovationspro-

h2-netzwerk-ruhr e. V.

Bei dem Netzwerk handelt es sich um einen Zusammenschluss von Kommunen und anderen öffentlichen Einrichtungen, Unternehmen, Verbänden und natürlichen Personen. Die bisher beteiligten Städte sind Marl, Bottrop, Gladbeck und Herten. Der Verein verfolgt das Ziel, die Rahmenbedingungen in der Metropole Ruhr so zu gestalten, dass sich die Region als europaweit bedeutender Standort für die Wasserstoff- und Brennstoffzellenindustrie etabliert. Im Vordergrund steht die Koordination der verschiedenen Projekte in der Region, aber auch die Öffentlichkeits- und Bildungsarbeit.

Im Rahmen der Initiative „Kommunale Entwicklungsschwerpunkte Ruhr“ baut die Stadt Herten die Brennstoffzellen- und Wasserstofftechnik auf der Fläche des ehemaligen Bergwerks Ewald zu einem international führenden Kompetenzzentrum aus (Projekt: Wasserstoff-Kompetenz-Zentrum H₂Herten). Ziel des Projekts ist die nachhaltige Schaffung von zukunftsorientierten Arbeitsplätzen im Technologieumfeld der Brennstoffzellen- und Wasserstofftechnik.

Das im Herbst 2009 eröffnete Zentrum stellt verschiedenen Unternehmen der Brennstoffzellentechnik rund 1800 Quadratmeter Bürofläche und 1200 Quadratmeter Technikumsfläche zur Verfügung (Abb. 5.2)

gramms (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.



Kontakt:

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



Abbildung 5.2: Wasserstoff-Kompetenz-Zentrum H2Herten



Kontakt:

Dr. Michael Weber
h2-netzwerk-ruhr e. V.
Tel.: 02366 188970
m.weber@h2-netzwerk-ruhr.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 (Abb. 5.3). Diese Partnerschaft koordiniert die europäischen Aktivitäten von derzeit 37 europäischen Regionen und Städten 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 hierzu 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.

Ende 2012 wurde auf Initiative von HyER durch die Kommission das European Electro-mobility Observatory (EEO) ins Leben gerufen, in dem die Ergebnisse aus sämtlichen europäischen Projekten auf dem Gebiet der Elektromobilität gesammelt und ausgewertet werden (Abb. 5.3). Diese Datenbank hat unter anderem zum Ziel, eine Faktenbasis für die Gestaltung künftiger europäischer politischer Maßnahmen wie zum Beispiel Richtlinien und Förderprogramme zu schaffen.

Nordrhein-Westfalen ist Gründungsmitglied von HyER. Executive Director ist gegenwärtig Dr. Andreas Ziolk von der ee energy engineers GmbH, einer der Trägergesellschaften der EnergieAgentur.NRW.

Zusammenarbeit mit außereuropäischen Regionen

Außerhalb Europas kooperiert das Netzwerk Brennstoffzelle und Wasserstoff NRW schon seit vielen Jahren mit der kanadischen Provinz British Columbia sowie der japanischen Präfektur Fukuoka. Beide Regionen stehen für ein au-

Bergewöhnliches Engagement im Bereich der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnik in ihren jeweiligen Ländern.

Bereits 2004 unterzeichnete das Netzwerk mit seinem kanadischen Pendant Fuel Cells Canada ein Memorandum of Understanding zur „Collaboration on Fuel Cell Development and the Support of the Hydrogen Economy“. Fukuoka hat wie NRW eine umfassende Strategie zum Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur und zur Verbreitung der Brennstoffzellentechnologie und ist damit in Japan führend bei der Markteinführung. Mit der „Research Association of Hydrogen Supply /Utilization Technology (HySUT)“ existiert in Japan eine der CEP vergleichbare Institution, die sich um den Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur kümmert. In Fukuoka wurden dazu bereits zahlreiche Projekte auf den Weg gebracht.

Mit beiden Regionen wird ein intensiver Austausch und Benchmark über Infrastrukturkonzepte, politische Rahmenbedingungen oder technische Standards betrieben. Zahlreiche Delegationen besuchten zudem Brennstoffzellenprojekte in NRW.



Abbildung 5.3: Partnerregionen in HyER

Weitere Informationen und Kontakt:

www.hyer.eu

www.chfca.ca

www.hysut.or.jp/en/index.html

Deutscher Wasserstoff Congress

Die EnergieAgentur.NRW organisiert seit dem Jahre 2000 gemeinsam mit dem Deutschen Wasserstoff- und Brennstoffzellenverband den Deutschen Wasserstoff Congress „H2CONGRESS“. Diese alle zwei Jahre stattfindende Konferenz liefert bezogen auf die Bereiche Energie, Technik und Wirtschaft qualifizierte Expertenbeiträge über 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 Potentiale 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 Anwendungsbereichen berichtet. Der Fokus des Kongresses liegt neben deutschen vor allem auf internationale Aktivitäten in dem Themenfeld.

2012 fand die Veranstaltung bereits zum 5. Mal statt (Abb. 5.4 und 5.5). Rund 200 Vertreter nahmen an der zwei Tage dauernden Veranstaltung teil. Veranstaltungsort war die Vertretung des Landes Nordrhein-Westfalen in Berlin. Der 6. Deutsche Wasserstoff Congress ist für Mai 2014 wieder mit Berlin als Standort geplant.



Abbildung 5.4 und 5.5: Impressionen vom 5. Deutschen Wasserstoff Congress in Berlin (www.h2congress.de)

Netzwerk Brennstoffzelle und Wasserstoff NRW

Ziel des im Jahre 2000 gegründeten Netzwerks Brennstoffzelle und Wasserstoff Nordrhein-Westfalen ist die Etablierung der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnik als fester Bestandteil der künftigen Energieversorgung bei gleichzeitiger Ausschöpfung der wirtschaftlichen Chancen der Technik für den Wirtschaftsstandort NRW. Mit Blick auf die Herausforderungen der Energiewende, des Klimaschutzes und der Steigerung der Energieeffizienz sowie des Ausbaus der regenerativen Energien gilt die Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnik als wichtige Schlüsseltechnik in allen Bereichen des Energie- und Verkehrssystems.

Über 400 Mitglieder aus Wirtschaft und Wissenschaft arbeiten heute bereits aktiv mit und nutzen die zahlreichen

Dienstleistungen des Netzwerks. Zu etwa siebzig Prozent sind die Mitglieder Industriepartner (meist kleinere und mittlere Unternehmen) und zu zwanzig Prozent Vertreter von Forschungsinstituten, während 10 Prozent aus anderen Bereichen stammen. Die Akteure haben ihren Sitz vornehmlich in Nordrhein-Westfalen, aber auch in anderen Bundesländern und im Ausland. Das Netzwerk hat seinen Sitz in Düsseldorf und ist das größte seiner Art in Europa.

Das Hauptaugenmerk der Netzwerktätigkeiten liegt auf der Initiierung von Kooperationsprojekten, wobei sich der Schwerpunkt der Projektarbeit zunehmend von der Forschung und Entwicklung in Richtung Erprobung und Marktvorbereitung verlagert. Das Netzwerk steht seinen Mitgliedern als Ansprechpartner zur Konkretisierung von

Projektideen, Identifikation geeigneter Förderprogramme sowie als Sprachrohr in Richtung oder auch aus der Politik zur Verfügung. Die Mitglieder des Netzwerkes sind ferner intensiv in nationale und europäische Förderaktivitäten eingebunden.

Um den fachlichen Austausch zwischen seinen Mitgliedern zu unterstützen, hat das Netzwerk die Plattformen „Wasserstoff“ und „Brennstoffzelle“ ins Leben gerufen. In speziellen Expertengruppen, wie zu den Themen „H₂-System“ oder „Power-to-Gas“, trifft man sich regelmäßig, um sehr detailliert konkrete Fragestellungen zu erörtern.



Abbildung 5.6 und 5.7: Preisträger im Schülerwettbewerb „Fuel Cell Box NRW“ (www.fuelcellbox-nrw.de)

Das Netzwerk hat dazu beigetragen, dass NRW heute – auch international – als einer der führenden Brennstoffzellenstandorte in Europa angesehen wird. Diese Tatsache wird unter anderem durch die Präsidentschaft in der europäischen Partnerschaft Hydrogen Fuel Cells and Electro-mobility in European Regions (HyER) und die Ansiedlungen bedeutender Unternehmen aus der Brennstoffzellen- und Wasserstofftechnik wie Ballard, Hydrogenics und Dynetek (Kanada) sowie Ceramic Fuel Cells (Australien) belegt. Des Weiteren kooperieren japanische Unternehmen bereits im Forschungs- und Entwicklungsbereich oder bei der Produktion einzelner Brennstoffzellenkomponenten mit Partnerfirmen und -instituten aus NRW.

Unternehmen und Institute, die bislang noch nicht unmittelbar auf dem Gebiet der Brennstoffzellen-, Batterie- und Wasserstofftechnik tätig sind, aber aufgrund ihres Know-how wertvolle Beiträge sowohl zu der Entwicklung von Brennstoffzellen- und Batteriesystemen sowie entsprechender Komponenten als auch zum Themenfeld der Produktion (z. B. Elektrolyse), der Speicherung und des Transports von Wasserstoff leisten können, sind ausdrücklich eingeladen, sich im Netzwerk zu engagieren. Auf dem Weg in den Markt, der nun immer stärker in den

Zur Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses organisiert das Netzwerk seit mehreren Jahren den Schülerwettbewerb „Fuel Cell Box NRW“ (Abb. 5.6 und 5.7), an dem regelmäßig rund 200 Teams aus ganz Nordrhein-Westfalen teilnehmen.

Im Bereich der Öffentlichkeitsarbeit bietet das Netzwerk seinen Mitgliedern unter anderem die Beteiligung an Gemeinschaftsständen auf internationalen Messen wie der FC Expo in Tokio sowie der Hannover Messe an.



Fokus kommt, ist es von zentraler Bedeutung, auch zunehmend neue Akteure außerhalb der „Wasserstoff und Brennstoffzellen-Szene“ einzubinden wie Energieversorger, Windparkbetreiber, Netzbetreiber, Verkehrsunternehmen, Flottenbetreiber und neue Industriepartner. Die Mitgliedschaft im Netzwerk ist kostenlos.

+H₂- Netzwerk
Brennstoffzelle und
Wasserstoff NRW

Kontakt:

Netzwerk Brennstoffzelle und Wasserstoff NRW
c/o EnergieAgentur.NRW
Roßstraße 92
40476 Düsseldorf
Tel.: 0211 86642-16
info@brennstoffzelle-nrw.de

6 Anhänge

EnergieAgentur.NRW

Die EnergieAgentur.NRW arbeitet im Auftrag der Landesregierung von Nordrhein-Westfalen als operative Plattform mit breiter Kompetenz im Energiebereich: von der Energieforschung, technischen Entwicklung, Demonstration und Markteinführung über die Energieberatung bis hin zur beruflichen Weiterbildung. In Zeiten hoher Energiepreise gilt es mehr denn je, die Entwicklung von innovativen Energietechnologien in NRW zu forcieren und von neutraler Seite Wege aufzuzeigen, wie Unternehmen, Kommunen und Privathaushalte ökonomisch mit Energie umgehen oder erneuerbare Energien sinnvoll einsetzen können.

Die Aktivitäten der EnergieAgentur.NRW umfassen im Einzelnen:

Clustermanagement

Im Auftrag des NRW-Umwelt- und Klimaschutzministeriums verantwortet die EnergieAgentur.NRW mit der EnergieRegion.NRW einen leistungsstarken Cluster für den Klimaschutz mit den acht Netzwerken Biomasse, Brennstoffzelle und Wasserstoff, energieeffizientes und solares Bauen, Geothermie, Kraftstoffe und Antriebe der Zukunft, Kraftwerkstechnik, Photovoltaik sowie Windenergie. Im Fokus: Wettbewerbsstarke Kooperationen, um so innovative Projekte und Produkte zu initiieren, ihre Marktreife zu beschleunigen und alle wirtschaftlichen Potentiale auszuschöpfen. Dazu gehört auch die Unterstützung von Unternehmen aus NRW im Bereich Außenwirtschaft.

Ebenfalls bei der EnergieAgentur.NRW angesiedelt ist der Cluster EnergieForschung.NRW (CEF.NRW) – hier im Auftrag des NRW-Wissenschaftsministeriums. CEF.NRW versteht sich als der Ansprechpartner zu allen Fragen der Energieforschung in NRW und treibt die koordinierte Zusammenarbeit von Forschung und Wissenschaft mit der Wirtschaft wirksam voran.

Energieberatung

Dabei informieren Ingenieure der EnergieAgentur.NRW über energetische Schwachstellen – von der Gebäudetechnik bis zu Produktionsabläufen in Unternehmen. Das Spektrum reicht von der Heizungsanlage über die Wärmerückgewinnung bis zur Dämmung als Schutz vor Wärme und Kälte in großen Werkshallen sowie von der Leckagesuche bis zur Erstellung von Energiekonzepten. Die Ingenieure beraten über Fördermöglichkeiten, verhelfen Unternehmen zur Minderung der Energiekosten und tragen somit zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit bei.

Weiterbildung

Die EnergieAgentur.NRW bietet eine Reihe von Weiterbildungsseminaren – auch für Endverbraucher – an. Die fünfzig Seminare können von Weiterbildungseinrichtungen, Energieversorgungsunternehmen, Verbänden, Vereinen, Hochschulen, Kommunen und Unternehmen in NRW genutzt werden. Im Rahmen dieses Programms werden zudem Projekte zur Nutzermotivation wie die „aktion.Efit“ und die „mission E“ für Belegschaften von Unternehmen angeboten. Mit dem Wissensportal Energie bietet die EnergieAgentur.NRW eine Online-Plattform für die berufliche Aus- und Weiterbildung im Internet an.

EnergieDialog.NRW

Der „EnergieDialog.NRW“ – Informations- und Beratungsplattform für erneuerbare Energien in NRW – ist ein aktives Vermittlungs- und Beratungsangebot für Bürger, Kommunen und Investoren, das von der EnergieAgentur.NRW im Auftrag des NRW-Klimaschutzministeriums gestaltet wird. Der EnergieDialog.NRW soll aktiv zur Lösung von Konflikten beizutragen. In Konfliktfällen – etwa im Rahmen von Planungs- und Genehmigungsverfahren – steht Akteuren in NRW das Angebot der professionell geführten Konfliktvermittlungen zur Verfügung.

Gemeinschaftsaktionen

Landesweite Kampagnen und Gemeinschaftsaktionen wie „NRW spart Energie“, „AltBauNeu“, „50 Solarsiedlungen in NRW“, „100 Klimaschutzsiedlungen in NRW“, „Photovoltaik NRW“, die „Aktion Holzpellets“ oder der „Wärmepumpen-Marktplatz NRW“ informieren in NRW über umweltfreundliche und innovative Heiztechniken und Tipps zum Energiesparen.

EnergieAgentur.NRW
klimaschutz made in nrw

Kontakt:

EnergieAgentur.NRW
 Roßstraße 92
 40476 Düsseldorf
 Tel.: 0211 86642-0
 Fax: 0211 86642-22
info@energieagentur.nrw.de

Cluster EnergieRegion.NRW

Energie und Wirtschaft in Nordrhein-Westfalen

Nordrhein-Westfalen ist eine Energieregion mit Tradition. Seit der Epoche der Industrialisierung haben hier Bereitstellung und Nutzung von Energie entscheidenden Einfluss auf die wirtschaftliche und gesellschaftliche Entwicklung.

Die Mischung aus Global Playern, mittelständischen Unternehmen sowie Forschungseinrichtungen der Region macht Nordrhein-Westfalen zu einem Standort mit einer einmaligen Konzentration von Kompetenzen für zukunftsfähige Lösungen im Bereich der Energiewirtschaft. Rund 1,5 Millionen Menschen arbeiten in Nordrhein-Westfalen in energieintensiven Betrieben.

In globalen, schnellen und mobilen Märkten reicht das klassische Nebeneinander von Wirtschaft, Wissenschaft und öffentlicher Hand oftmals nicht aus. Innovationspotenziale lassen sich vor allem durch die stärkere Vernetzung der Akteure in Clustern entlang von – teilweise branchenübergreifenden – Wertschöpfungsketten erzielen.

EnergieRegion.NRW steht für Innovationskraft, Tradition, Unabhängigkeit und Technologieoffenheit. Die EnergieRegion.NRW bündelt 3300 Firmen und Institutionen der Branche. Drei Viertel der Unternehmen sind kleine und mittelständische Betriebe. Zudem gehören dem Cluster EnergieRegion.NRW 64 Universitäten, 107 Institute und 94 Verbände an. 5200 Fachkräfte arbeiten in den Arbeitsgruppen und Netzwerken des Clusters mit. Es versorgt 30.000 Multiplikatoren und Entscheidungsträger mit Informationen und Ergebnissen.

Die Aktivitäten von EnergieRegion.NRW konzentrieren sich daher auf die Beschleunigung von Innovationsprozessen und der optimierten Markteinführung innovativer Produkte.

EnergieRegion.NRW bündelt acht Netzwerke mit den Themen:

- Kraftwerkstechnik,
- Brennstoffzelle und Wasserstoff,
- Biomasse,
- energieeffizientes und solares Bauen,
- Kraftstoffe und Antriebe der Zukunft,
- Photovoltaik,
- Geothermie und
- Windkraft.

Die Arbeit des Clusters EnergieRegion.NRW richtet sich an unterschiedliche Akteure:

Forschung und Entwicklung

Um praxisnahe und anwendungsorientierte Lösungen für die Energie- und Klimaschutzherausforderungen von Morgen zu entwickeln, müssen sich die F&E-Einrichtungen stärker mit den Unternehmen der Energiewirtschaft in Nordrhein-Westfalen vernetzen. Hierfür stellt die EnergieRegion.NRW eine Plattform zur Verfügung.

Kleine und mittlere Unternehmen

Im Cluster Energiewirtschaft können sich kleine und mittlere Unternehmen verlässlich, technologieoffen und ohne singuläre industrielle Interessen vernetzen. EnergieRegion.NRW bietet kleinen und mittleren Unternehmen in Nordrhein-Westfalen unter anderem unternehmensübergreifende Projekte, Zusammenführung von Partnern, neutrale Informationen aus erster Hand und Zugang zu politischen Institutionen.

Großunternehmen

Durch eine intensive Nutzung der Strukturen der EnergieRegion.NRW und die Vernetzung mit den Partnern der nordrhein-westfälischen Energiewirtschaft verschaffen sich die Großunternehmen einen wesentlichen Vorteil gegenüber ihren internationalen Wettbewerbern. Große Unternehmen profitieren in der EnergieRegion.NRW durch Kooperation mit Netzwerkpartnern zur Identifizierung kleiner innovativer Unternehmen, Erweiterung ihres Angebotsspektrums sowie zur Regionalisierung ihrer eigenen Leistungskompetenz.

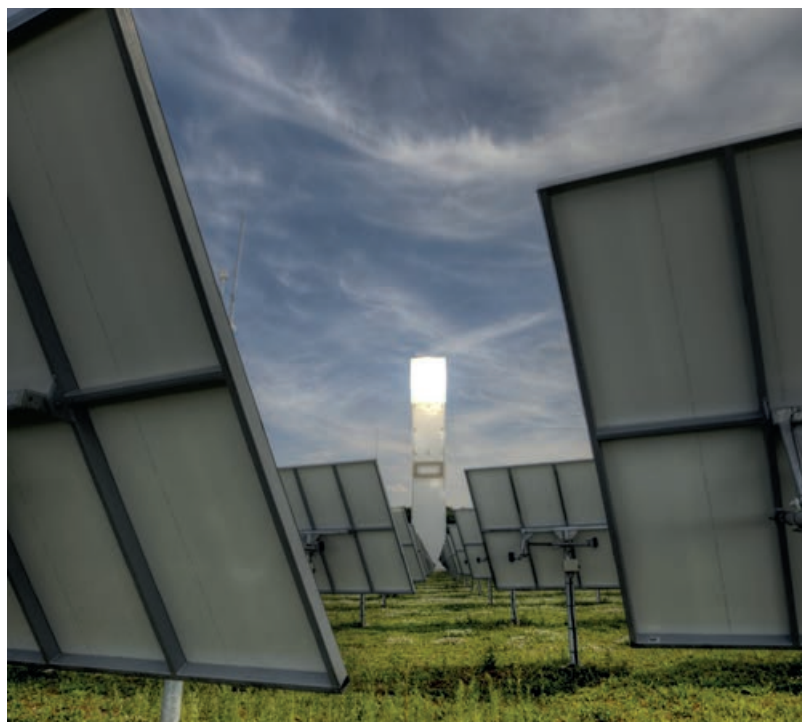


Abbildung A-1: Solarturm in Jülich (Quelle: DLR)

Politische Entscheidungsträger

Durch eine transparente und aktuelle Informationsweitergabe von Behörden und politischen Entscheidungsträgern an Wirtschaftsunternehmen profitiert der Standort Nordrhein-Westfalen im besonderen Maße. Das Clustermanagement und die Netzwerke der EnergieRegion.NRW stehen für einen offenen Austausch mit Behörden und politischen Entscheidungsträgern. Die EnergieRegion.NRW wird dadurch zur Schnittstelle zwischen Energiewirtschaft und den Menschen in Nordrhein-Westfalen. Die Kommunen profitieren von der EnergieRegion.NRW unter anderem durch eine strukturelle Stärkung der Region, die Bindung der wirtschaftlichen Leistungsträger und somit eine Aufwertung ihres Standorts.

Management aus einem Guss

Durch eine transparente und aktuelle Informationsweitergabe von Behörden und politischen Entscheidungsträgern an Wirtschaftsunternehmen profitiert der Standort Nordrhein-Westfalen im besonderen Maße. Das Clustermanagement und die Netzwerke der EnergieRegion.NRW stehen für einen offenen Austausch mit Behörden und politischen Entscheidungsträgern. Die EnergieRegion.NRW wird dadurch zur Schnittstelle zwischen Energiewirtschaft und den Menschen in Nordrhein-Westfalen. Die Kommunen profitieren von der EnergieRegion.NRW unter anderem durch eine strukturelle Stärkung der Region, die Bindung der wirtschaftlichen Leistungsträger und somit eine Aufwertung ihres Standorts.



Abbildung A-2: Windenergieanlage
(Quelle: EnergieAgentur.NRW)

 **EnergieRegion.NRW**
Cluster Nordrhein-Westfalen

Kontakt:

EnergieRegion.NRW
c/o EnergieAgentur.NRW
Roßstraße 92
40476 Düsseldorf
Tel.: 0211 86642-0
baumann@energieregion.nrw.de

Cluster EnergieForschung.NRW

Der Cluster EnergieForschung.NRW (CEF.NRW) arbeitet im Auftrag des Ministeriums für Innovation, Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen an der Umsetzung der energiewirtschaftlichen und klimapolitischen Zielvorgaben der Landesregierung im Bereich der Energieforschung.

CEF.NRW stellt das komplexe Energieversorgungssystem als Ganzes in den Fokus seiner inter- und transdisziplinären Aktivitäten. Aufbauend auf den für die Energiewende relevanten Prozessen der Primärenergiekonversion im erneuerbaren und fossilen Bereich werden die Netze von Strom, Wärme, Gas sowie die entsprechenden Speichertechnologien als Tätigkeitsfeld gesehen. Ein spezielles Augenmerk gilt den in allen Studien als zunehmend wichtig erachteten Umwandlungsprozessen zwischen den verschiedenen Sekundärenergieträgern wie zum Beispiel „Power to Gas“.

Neben der rein technologischen Transformation stellt die Energiewende eine neuartige Herausforderung für die Gestaltung des Partizipationsprozesses der Öffentlichkeit dar. Ihn gilt es wissenschaftlich zu begleiten und spezifische Lösungsstrategien zu entwickeln. Auch hier sieht der Cluster Handlungsbedarf.

CEF.NRW zielt darauf ab, dass technologische und sozio-ökonomische Erkenntnisfortschritte schneller als bisher ihren Weg in die Anwendung finden. Dazu initiiert der Cluster Forschungs- und Entwicklungsprojekte in der koordinierten Zusammenarbeit von Forschungseinrichtungen mit der Wirtschaft.

Zudem fungiert CEF.NRW als Transferstelle zu den energiebezogenen Aktivitäten auf Seiten der EU und des Bundes sowie zu gesellschaftlichen Initiativen. Gestaltet und organisiert wird CEF.NRW von der EnergieAgentur.NRW.



Kontakt:

Cluster EnergieForschung.NRW
Völklinger Straße 4 (rwi4)
40219 Düsseldorf
Tel.: 0211 2109441-0
info@cef.nrw.de



Abbildung A-3: Brennstoffzellenprüfstand am DLR (Quelle: DLR)

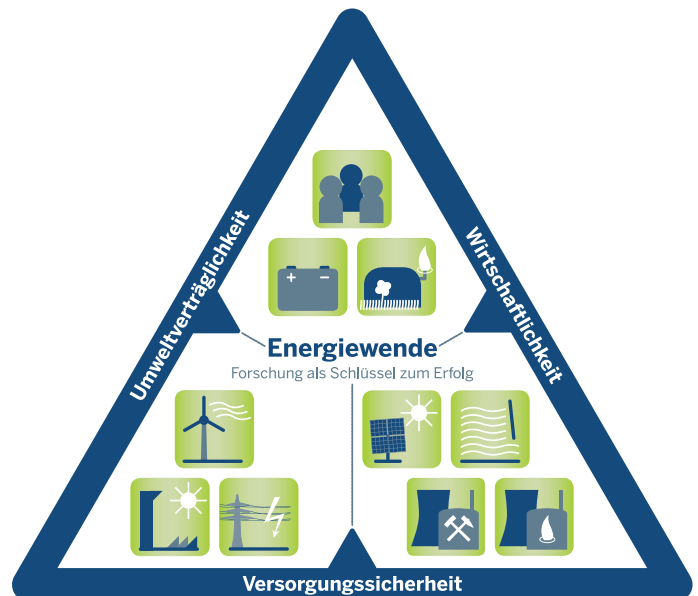


Abbildung A-4: Energieforschung in Nordrhein-Westfalen. Der Schlüssel zur Energiewende. (Quelle: Wiedemeier Kommunikation)

Wasserstoffkosten

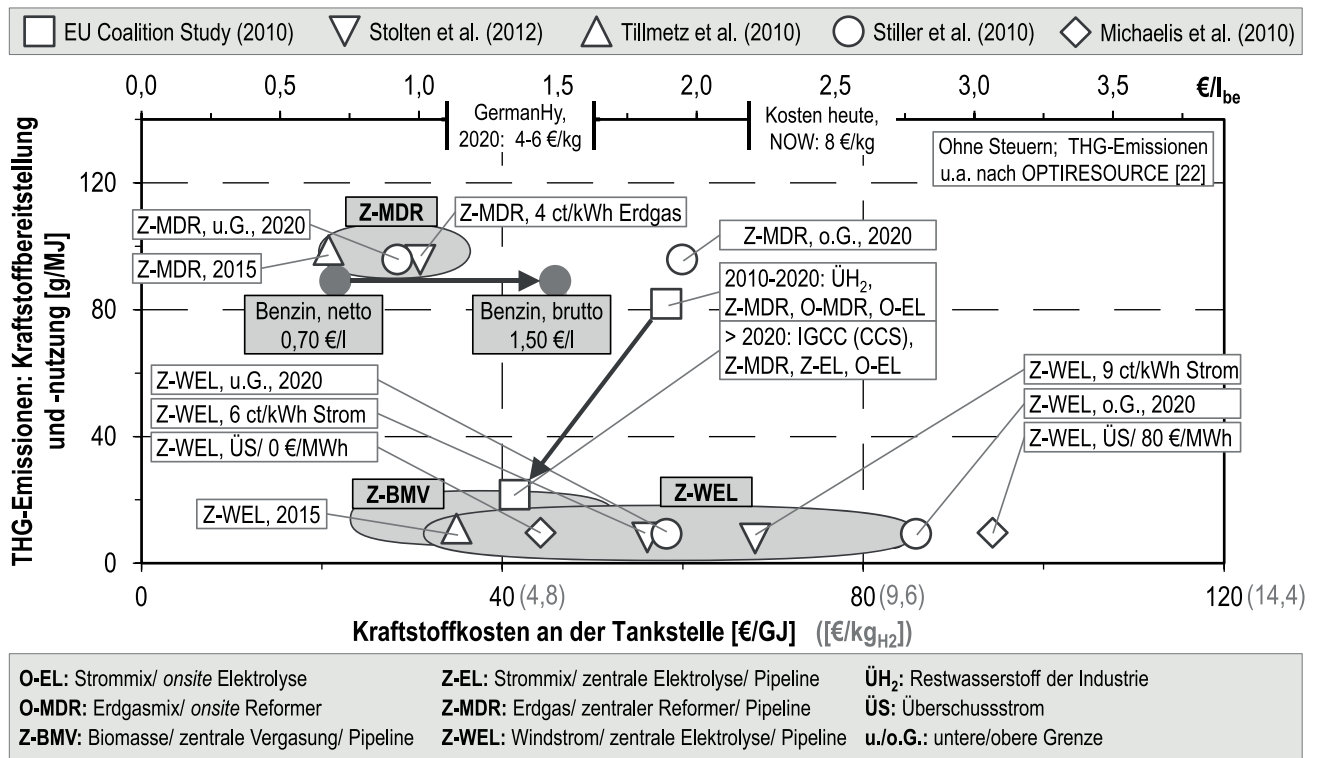
Die folgenden Ausführungen zu den Wasserstoffkosten basieren auf der Analyse und Bewertung aktuell verfügbarer Studienergebnisse, wie sie ausführlich von Grube/Höhlein (2013) dargestellt werden. In der vorliegenden Auswertung stehen Wasserstoffbereitstellungskosten an der Tankstelle ohne Steuern auf Basis von Studiendaten (2007-2010) nach Höhlein und Grube (2011) im Vergleich zu aktuellen Superbenzinkosten an der Tankstelle mit („brutto“) und ohne („netto“) Steuern im Vordergrund. Diese Auswertung wurde um Wasserstoffbereitstellungskosten nach Tillmetz et al. (2010), Michaelis et al. (2013), Stolten et al. (2012), Stiller et al. (2010) sowie GermanHy und NOW erweitert (siehe: Grube/Höhlein (2013)). Ebenfalls angegebene Werte aus der EU Coalition Study (2010) gelten für die dort angegebenen Jahreszahlen und Szenarien. Eine Zuordnung zu den dem jeweiligen Pfad entsprechenden Treibhausgasniveaus erfolgte auf der Grundlage von OPTIRESOURCE (<http://www2.daimler.com/sustainability/optiresource/index.html>), soweit Angaben zu diesen Emissionen nicht vorlagen.

Werte für Erdgasreformierung, Windstrom-Elektrolyse und Biomassevergasung unter Ergänzung der Infra-

strukturkosten (Quellen nach Höhlein/Grube (2011)); ergänzende Angaben nach Tillmetz et al. (2010), Michaelis et al. (2013), Stolten et al. (2012), Stiller et al. (2010) sowie GermanHy (siehe Symbole).

Anmerkung: aufgrund der besseren Kraftstoffnutzung (MJ/100 km) von Pkw mit Brennstoffzellen um etwa einen Faktor zwei im Vergleich zu Verbrennungsmotor-Pkw können für die hier betrachteten Pfade mit Brennstoffzellen-Pkw (FCV) wettbewerbsfähige Kosten je Kilometer abgeleitet werden. (Quelle: nach Grube/Höhlein (2013))

Die ausgewerteten Studien zum Thema der 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 Rand-

bedingungen wettbewerbsfähige Wasserstoffkosten bei Annahme eines deutlichen Verbrauchsvorteils von Pkw

mit Brennstoffzellen (FCV) gegenüber Pkw mit Verbrennungsmotor möglich sind. Voraussetzungen dafür sind unter anderem niedrige Stromkosten, das Erreichen von Kostenzielen für Elektrolyseure, Netze und Energiespeicher sowie zu 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

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 Prozent 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.

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.

Kontakt:

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

Stoffdaten von Energieträgern im Vergleich

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

* TRK = Technische Richtkonzentration

Quelle: nach Biedermann et al. (2006)

Tabelle A-1: Stoffdaten von Energieträgern im Vergleich

Literaturangaben

Kapitel 1

Höhlein, B. / Kattenstein, Th. / Töpler, J. (2013)
„Wasserstoff im Wandel der Energieversorgung“,
Energiewirtschaftliche Tagesfragen 63, Heft 1/2, 102-104

Stolten, D. / Grube, T. / Mergel, J. (2012)
„Beitrag elektrochemischer Energietechnik zur Energie-
wende“,
VDI Wissensforum GmbH (Hg.) (2012) 8. VDI-Tagung, In-
novative Fahrzeugantriebe, Perspektiven in Markt und
Technologien, Dresden, 6.-7.11. 2012, VDI-Berichte 2183,
199-215

Kapitel 2

Pastowski, A. et al. (2009)
Optionen für den kostenoptimierten Aufbau einer H₂-
Infrastruktur in Nordrhein-Westfalen,
[Autoren: Pastowski, A. / Fishedick, M. (Wuppertal
Institut GmbH), Grube, Th. (Forschungszentrum Jülich
GmbH), Jermer, B. (HyCologne – Wasserstoff Region
Rheinland e.V.)]
Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie,
Wuppertal

Kapitel 3

Von Wild, J. / Freymann, R. / Zenner, M. (2008)
„Potentiale von alternativen Wasserstoff-
Speichertechnologien“,
Tagungsbericht: Innovative Fahrzeugantriebe 2008, VDI-
Berichte 2030, 273-298

Kapitel 4

OPTIRESOURCE – Software zur Ermittlung einer Bewer-
tung von Pkw-Antrieben einschließlich Kraftstoffbereit-
stellung (Quelle bis Rad)
Daimler AG (2013: <http://www2.daimler.com/sustainability/optiresource/index.html>)

Anhänge

Biedermann, P. / Grube, Th. / Höhlelein, B. (2006)
Methanol as an Energy Carrier
Forschungszentrum Jülich GmbH, Energietechnik
Band 55

EU Coalition Study (2010)
A portfolio of powertrains for Europe: a fact-based
analysis – The role of Battery Electric Vehicles, Plug-in-
Hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles,
www.zeroemissionvehicles.eu

Grube, Th. / Höhlelein, B. (2013)
„Kosten der Wasserstoffbereitstellung in Versorgungs-
systemen auf Basis erneuerbarer Energien“,
Töpler, J. und Lehmann, J. (Hg.) (2013) Wasserstoff und
Brennstoffzelle – Technologien und Marktperspektiven
(Heidelberg: Springer) Erscheinungsdatum November
2013

Höhlein, B. / Grube, T. (2011)
„Kosten einer potentiellen Wasserstoffnutzung für E-
Mobilität mit Brennstoffzellenantrieben“,
Energiewirtschaftliche Tagesfragen 61, Heft 6, 62-66

Michaelis, J. et al. (2013)
„Systemanalyse zur Verwendung von Überschussstrom“,
NOW (Hg.) (2013) Ergebnisvorstellung: Integration von
Windwasserstoff-Systemen in das Energiesystem, Berlin,
28.01.2013

Stiller, C. et al. (2010)
Potenziale der Wind-Wasserstoff-Technologie in der Freien
und Hansestadt Hamburg und in Schleswig Holstein,
Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, Ottobrunn

Stolten, D. / Grube, T. / Mergel, J. (2012)
„Beitrag elektrochemischer Energietechnik zur Energie-
wende“,
VDI Wissensforum GmbH (Hg.) (2012) 8. VDI-Tagung:
Innovative Fahrzeugantriebe – Perspektiven in Markt und
Technologien, Dresden, 6.-7.11. 2012, VDI-Berichte 2183,
199-215

Tillmetz, W. / Bünger, U. (2010)
„Development Status of Hydrogen and Fuel Cells – Europe“,
Stolten, D. / Grube, Th. (Hg.) (2010) 18th World Hydro-
gen Energy Conference 2010 – WHEC 2010 Proceedings,
Parallel Sessions Book 5, Schriften des Forschungszent-
rums Jülich, Reihe Energy and Environment, 21-31

Impressum

EnergieAgentur.NRW
Netzwerk Brennstoffzelle und Wasserstoff NRW
Roßstraße 92
40476 Düsseldorf

E-Mail: info@energieagentur.nrw.de

Telefon: 0211/837 1930
www.energieagentur.nrw.de

© EnergieAgentur.NRW/EA249

Redaktion

Dr. Bernd Höhle
Dr. Frank M. Koch

Danksagung

Das Netzwerk Brennstoffzelle und Wasserstoff NRW bedankt sich bei den Autoren aus Unternehmen und Institutionen, die mit ihren Beiträgen und Abbildungen zum Gelingen dieser Broschüre beigetragen haben.

Ein besonderer Dank gilt Johan Baron, Busfahrer bei der RVK, für seine unendliche Geduld bei den Aufnahmen für das Titelbild.

Informationen zum Thema

Dr. Thomas Kattenstein
Netzwerkmanager
Roßstr. 92
D-40476 Düsseldorf
Telefon: 0211/86642 15
Telefax: 0211/86642 22
kattenstein@energieagentur.nrw.de
www.brennstoffzelle-nrw.de

Gestaltung/Layout

theHalo.de sign

Bildnachweis Titelbild

Regionalverkehr Köln GmbH (siehe auch Seite 51)

Stand

09/2013



Diese Broschüre wurde klimaneutral gedruckt.



EUROPÄISCHE UNION
Investition in unsere Zukunft
Europäischer Fonds
für regionale Entwicklung

