

## **Wasserstoff – Schlüssel zu weltweit nachhaltiger Energiewirtschaft**

Beispiele aus Nordrhein-Westfalen von der Produktion zur Anwendung

Titelbild:  
Brennstoffzelle  
Quelle: Fraunhofer ISE

## Inhalt

	<b>Vorwort der Landesregierung Nordrhein-Westfalen .....</b>	<b>4</b>
	<b>Vorwort des Netzwerks Brennstoffzelle und Wasserstoff NRW .....</b>	<b>5</b>
	<b>Grußwort der International Association for Hydrogen Energy (IAHE).....</b>	<b>6</b>
<b>1</b>	<b>Warum, wann und in welchem Umfang Wasserstoff?.....</b>	<b>7</b>
	■ Allgemeine Voraussetzungen .....	7
	■ Wasserstoff für die chemische Industrie .....	8
	■ Wasserstoff als Energieträger .....	9
<b>2</b>	<b>Wasserstoffherstellung .....</b>	<b>10</b>
	■ Erdgasreformierung .....	10
	■ Elektrolyse von Wasser .....	13
	■ Synthesegas aus Kohle .....	16
	■ Industrie-Wasserstoff .....	18
	■ Photobiologische Erzeugung .....	20
	■ Biomassenutzung .....	23
	■ Nukleare Wasserstoffherstellung .....	26
	■ Kreisprozesse: Thermochemische Wasserstoffherstellung .....	27
	■ Kosten-, Energie- und Ökobilanzen .....	30
<b>3</b>	<b>Wasserstoff-Logistik .....</b>	<b>31</b>
	■ Bereitstellung von Wasserstoff .....	31
	■ Wasserstoffspeicherung .....	34
<b>4</b>	<b>Nutzung von Wasserstoff .....</b>	<b>38</b>
	■ Brennstoffzellen-Übersicht .....	38
	■ Stationäre Anwendungen .....	45
	■ Mobile Anwendungen .....	50
	■ Spezielle frühe Märkte .....	55
<b>5</b>	<b>Künftige Wasserstoff-Aktivitäten in Nordrhein-Westfalen.....</b>	<b>58</b>
	■ Internationale Aktivitäten.....	59
	■ Regionale Aktivitäten .....	60
	<b>Anhänge.....</b>	<b>61</b>
	Netzwerk Brennstoffzelle und Wasserstoff NRW .....	61
	EnergieRegion.NRW .....	62
	Cluster EnergieForschung.NRW .....	64
	EnergieAgentur.NRW .....	66
	18. Weltwasserstoffkonferenz 2010 in Essen, NRW .....	67
	H <sub>2</sub> -Eigenschaften auf einen Blick .....	68
	Literaturangaben .....	70
	Impressum.....	71

## Vorwort der Landesregierung Nordrhein-Westfalen



Eine langfristig sichere, wirtschaftliche sowie ressourcen- und umweltschonende Energieversorgung basiert auf einem ausgewogenen Energiemix ebenso wie auf der kontinuierlichen Erforschung und Markteinführung neuer zukunftsfähiger Technologien. Wasserstoff und Brennstoffzellen werden bei der Energieversorgung im 21. Jahrhundert eine bedeutende Rolle spielen. Diese Techniken können einen wichtigen Beitrag zur Klimaschutzstrategie des Landes Nordrhein-Westfalen leisten, deren Ziel es ist, ab 2020 den CO<sub>2</sub>-Ausstoß gegenüber 2005 um 81 Millionen Tonnen zu reduzieren.

Nordrhein-Westfalen hat eine führende Rolle in der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnik. Die Landesregierung unterstützt und fördert Forschungs-, Entwicklungs- und Demonstrationsprojekte von Industrie und Wissenschaft. Die Brennstoffzelle ist sowohl im stationären Bereich wie bei der Hausenergieversorgung als auch im Bereich der Elektromobilität einsetzbar. Elektromobilität spielt in der ganzheitlichen Kraftstoff- und Antriebsstrategie des Landes eine wichtige Rolle. Wir sehen Brennstoffzelle und Batterietechnik als zwei sich hervorragend ergänzende technische Optionen an, die dazu beitragen, Nordrhein-Westfalen als Modellregion für Elektromobilität in Deutschland und Europa zu positionieren.

Markteinführung und Kommerzialisierung von Wasserstoff und Brennstoffzellen machen eine umfassende Wasserstoff-Infrastruktur notwendig. Auch hier sind wir in Nordrhein-Westfalen gut aufgestellt. Es stehen beachtliche Mengen von Nebenproduktwasserstoff aus Industrieprozessen zur Verfügung und die bereits vorhandene Wasserstoff-Pipeline bietet einzigartige Möglichkeiten. Mit dem Leitprojekt "Nordrhein-Westfalen Hydrogen HyWay" werden die Aktivitäten in den Bereichen Wasserstoff und Brennstoffzelle intensiviert.

Die Brennstoffzelle hat das Potenzial, ein Exportschlager "made in NRW" zu werden. Von einzelnen Komponenten bis zu gesamten Anlagen wird diese Technik im Energieland Nordrhein-Westfalen entwickelt und produziert. Dass die 18. Weltwasserstoffkonferenz vom 16. bis 21. Mai 2010 in Essen stattfindet, ist Ausdruck für die starke Position Nordrhein-Westfalens in der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnik. Die Konferenz bietet eine hervorragende Chance, die Forschungs-, Innovations- und Leistungsfähigkeit Nordrhein-Westfalens international zu präsentieren.

Mit der Neuauflage der Broschüre wollen wir Sie schon heute über die Weiterentwicklungen dieser für die Energielandschaft der Zukunft wichtigen Technologie und ihrer Anwendungen informieren.

**Christa Thoben**

Ministerin für Wirtschaft,  
Mittelstand und Energie  
des Landes Nordrhein-Westfalen

**Dr. Andreas Pinkwart**

Minister für Innovation, Wissenschaft,  
Forschung und Technologie  
des Landes Nordrhein-Westfalen

## Vorwort des Netzwerks Brennstoffzelle und Wasserstoff NRW



Im Jahr 2010 feiert das Netzwerk Brennstoffzelle und Wasserstoff Nordrhein-Westfalen (NBW NRW) seinen 10. Geburtstag. Gegründet im April 2000 aus einer Arbeitsgruppe innerhalb der damaligen Landesinitiative Zukunftsenergien NRW mit rund 50 Mitgliedern, ist es mit über 350 Akteuren das größte Netzwerk zu diesem Themenkreis in Europa geworden. Die Mitglieder stammen vornehmlich aus Nordrhein-Westfalen und den anderen Bundesländern, zunehmend aber auch aus dem europäischen und außereuropäischen Ausland.

Ziel des Netzwerks ist die Etablierung eines neuen Wirtschaftszweiges durch die gezielte Unterstützung der technischen Entwicklung und Marktvorbereitung der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnik einschließlich der dazu notwendigen Systemkomponenten über geeignete Pilotmärkte.

Mit diesem Ziel vor Augen haben sich die Inhalte in der Netzwerkarbeit in den vergangenen Jahren immer wieder den aktuellen Fragestellungen in der Brennstoffzellentechnologie angepasst. Ging es anfangs vor allem darum, die Akteure in Nordrhein-Westfalen zusammenzuführen und den Know-how-Transfer von der Forschung in die Industrie zu intensivieren, bekam mit zunehmendem Wissen und wachsendem Engagement der relevanten Akteure in Nordrhein-Westfalen die Projektinitiierung mehr Gewicht.

Auch in den Projektthemen spiegelt sich die Entwicklung der Brennstoffzellentechnik des letzten Jahrzehnts wider. Zunächst wurden erste Applikationen wie stationäre Energieversorgungssysteme in kleineren Feldtests erprobt.

Daraus folgte die Entwicklung adaptierter Systemkomponenten wie Gebläse, Wechselrichter usw. Durch diese Aktivitäten hat Nordrhein-Westfalen eine besondere Rolle als Standort für herausragende Brennstoffzellenkomponenten bekommen, die von in- und ausländischen Systemherstellern immer mehr nachgefragt werden.

Aktueller Themenschwerpunkt ist die Entwicklung und Feldtesterprobung von möglichen Anwendungen (Brennstoffzellen-Gabelstapler, Midi-Busse, Cargobikes, unterbrechungsfreie Stromversorgung). Hier arbeiten wir eng mit dem Bund im Nationalen Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP) zusammen. Viele dieser Anwendungen haben den Markteintritt bereits geschafft oder stehen kurz davor, wie die Beispiele in dieser Broschüre belegen. Gleichzeitig arbeiten wir gemeinsam mit unseren internationalen Partnern intensiv an der Vorbereitung der so genannten Massenmärkte im Automotive-Bereich und in der stationären Energieversorgung. So stehen Projekte zum schrittweisen Aufbau der notwendigen Infrastruktur ebenso an wie Aufgaben zur Schaffung des gesellschaftlichen und ordnungspolitischen Rahmens zur Verbreitung der Brennstoffzellen- und Wasserstofftechnik.

Die Entwicklung ist noch lange nicht abgeschlossen. Fortschritte in der Wasserstoffspeicherung, beim Brennstoffzellen-Stack und bei den Komponenten werden das Einsatzspektrum für diese Technologie weiter vergrößern und zu einer signifikanten Reduktion der Kosten führen.

Das Netzwerk Brennstoffzelle und Wasserstoff NRW wird seine Partner auf diesem Weg auch in Zukunft weiterhin umfassend unterstützen.

### **Dr. Andreas Ziolek**

Leiter des Netzwerks Brennstoffzelle  
und Wasserstoff NRW

## Grußwort der International Association for Hydrogen Energy (IAHE)

Die International Association for Hydrogen Energy gratuliert Nordrhein-Westfalen, Deutschlands Energieland Nr. 1, zu dem bisher Erreichten und wünscht, konsequent den Weg in die Wasserstoffenergiewirtschaft weiterzugehen.

Nach Kohle, Öl, Erdgas, Uran, erneuerbaren Energien und Strom bildet Wasserstoff den einstweiligen Schlussstein im Mix. Wasserstoff ist, wie Elektrizität, eine Sekundärenergie, bei deren Herstellung Energie aufzuwenden ist. Trotz aller Unterschiede gibt es bemerkenswerte Gemeinsamkeiten zwischen Elektrizität und Wasserstoff: Nahezu jede Primärenergie dient beider Herstellung; einmal hergestellt, sind beide über die gesamte, dann folgende Energiewandlungskette umwelt- und klimaökologisch sauber; beide helfen, mehr technische Arbeitsfähigkeit (Exergie) aus Energie zu machen und weniger Anergie zu verursachen: Energie = Exergie + Anergie; Elektrizität und Wasserstoff sind leitungsgebunden (mit Ausnahmen) und rücken den Schwerpunkt in den nationalen Energiewandlungsketten gegen ihr Ende – dorthin, wo Sekundärenergien in Endenergie, diese in Nutzenergie und schließlich in Energiedienstleistungen umgewandelt werden. Die Sekundärenergiewirtschaft gewinnt an Bedeutung, Dezentralität nimmt zu.

Energie ändert sich: Bis weit in das 18. Jahrhundert waren es ausschließlich die erneuerbaren Energien der ersten solaren Zivilisation; das 19. Jahrhundert war das Jahrhundert der Kohle, gegen sein Ende und dann im 20. Jahrhundert ergänzt durch Mineralöl, Erdgas und Kernspaltungsenergie. Das 21. Jahrhundert wird Energie- und vor allem Exergieeffizienz, rationelle Energiewandlung und Energieanwendung in den Vordergrund rücken sowie die modernen Nutzungstechniken der erneuerbaren Energien – jetzt der zweiten solaren Zivilisation – und Wasserstoff als Energieträger thematisieren, bevor das 22. Jahrhundert das erste Jahrhundert energetischer Nachhaltigkeit werden kann. Ohne Wasserstoff bleibt energetische Nachhaltigkeit Stückwerk.

Nie hat die Menschheit nur eine Energie genutzt, nie hat eine jeweils neue Energie ihre Vorgängerinnen ganz verdrängt, die ständig wachsende Energienachfrage brauchte sie alle. Der Energiemix aber veränderte sich dramatisch. Innovationen waren und sind die Regel: Mit nahezu 50 Prozent exergetischem Wirkungsgrad sind unsere thermischen Kraftwerke brilliant; gleichwohl verursachen sie irreversibel nach wie vor viel zu viel Wärme der falschen Temperatur am falschen Ort, wo kein Nutzer sie nachfragt. Exergetisch höher effiziente Kombianlagen stehen bevor. Dabei hilft Wasserstoff, fossile Energien zu entkarbonisieren, zu hydrogenisieren und damit zu entmaterialisieren. Das ist die Zukunft!

Wasserstoff kann der saubere Kraftstoff an Bord der Automobile, der Lokomotiven, Schiffe und Flugzeuge sein; er speichert und transportiert erneuerbare Energien und verschafft ihnen so den Zugang zum globalen Energiehandel; Wasserstoff sorgt über Brennstoffzellen in Automobilen und Hausheizungen für die dringende Mehrung des Anteils technischer Arbeitsfähigkeit am Ende der Energiewandlungsketten, wo zwei Drittel des Endenergiebedarfs nachgefragt werden (Deutschland)! Neue Arbeitsplätze im Energiedienstleistungsmarkt entstehen. Was am Ende effizienter Energieketten nicht nachgefragt wird, muss am Kettenanfang nicht eingeführt werden!

Was verhilft der Wasserstoff-Energiewirtschaft zum Durchbruch? Die Technologien sind da oder in der Entwicklung. Die ökologische Relevanz des Wasserstoffs ist zweifelsfrei. Das Bewusstsein der Öffentlichkeit aber, vor allem der politischen Klasse, muss wachsen. Daran ist zu arbeiten:

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

[www.iahe.org](http://www.iahe.org)

**Prof. Dr. Carl-Jochen Winter**

Vice-President for Europe,

The International Association for Hydrogen Energy (IAHE)

## 1. Warum, wann und in welchem Umfang Wasserstoff?

Die weltweite Energieversorgungs-, Umwelt- und Klimasituation erfordert Veränderungen bei den Energiewandlungsverfahren und der Energieträgerauswahl. Fortschrittliche Lösungen sind gefragt: Brennstoffzellen und neue Energieträger wie Wasserstoff werden zunehmend dazu beitragen müssen, Energie sicher, effizient und sauber umzuwandeln sowie wirtschaftlich zu nutzen.

### Allgemeine Voraussetzungen

Fortschrittliche Energieversorgungssysteme sind immer auch mit der Frage nach dem richtigen Umgang mit Energieträgern verknüpft. Dies bedeutet:

- langfristige, sichere, wirtschaftliche und umweltfreundliche Bereitstellung von Primärenergien,
- Herstellung von Endenergieträgern aus verschiedenen Primärenergien mit hoher Effizienz,
- zunehmender Einsatz regenerativer Primärenergien und
- verstärkte Aufwendungen für neue Energieträger und Infrastrukturen.

Dabei wird zukünftigen Endenergieträgern wie dem Wasserstoff besondere Bedeutung in der Energiewirtschaft zukommen, wenn sie gleichzeitig für konventionelle und für zukünftige Energieumwandlungssysteme zu nutzen sowie langfristig unter Einsatz regenerativer Primärenergieträger herzustellen sind (Abb. 1.1).

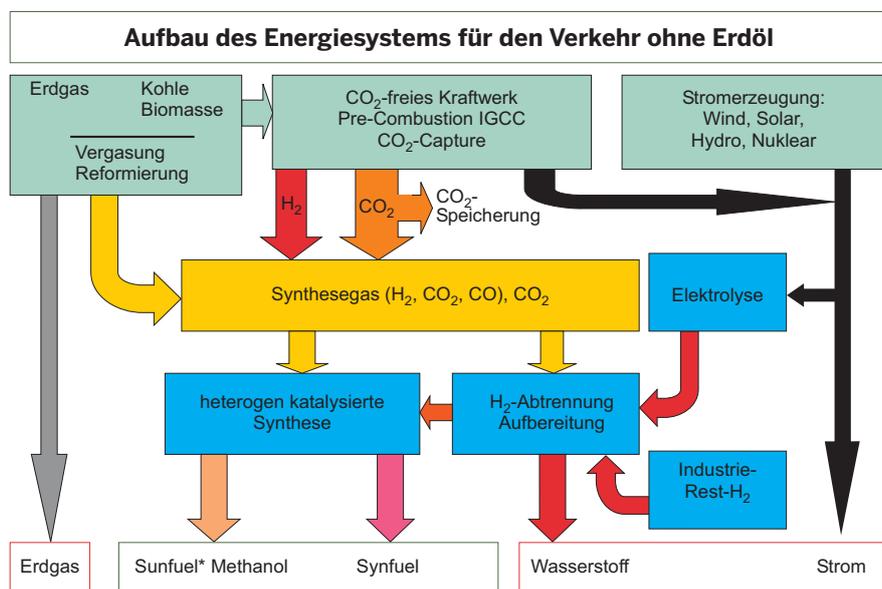
Für eine künftig stärkere Einbindung sind drei Voraussetzungen zu erfüllen:

- hinreichend große Potenziale,
- ausreichende Verfügbarkeit bei konkurrenzfähiger Kostensituation sowie
- Schaffung neuer Infrastrukturen.

Langfristig wird Wasserstoff und Elektrizität – überwiegend auf der Basis einer CO<sub>2</sub>-freien Erzeugung – als Versorgungseinheit herausragende Bedeutung zukommen. Einerseits kann Strom direkt ins Versorgungsnetz eingespeist werden; andererseits ist Wasserstoff durch seine bessere Speichereffizienz der Elektrizität insofern überlegen, als er insbesondere für mobile Anwendungen und die Übertragung fluktuierender Solar- oder Windenergie attraktive Lösungsmöglichkeiten bietet. Wasserstoff und Elektrizität sind wechselseitig konvertibel. Beide Energieträger lassen sich auf fossiler, nicht-fossiler und langfristig regenerativer Basis herstellen.

Die Wasserstoffnutzung auf dem Energiemarkt kann im Rahmen eines weiten Spektrums stationärer, mobiler sowie portabler energietechnischer Anwendungen erfolgen. Hierfür werden Motoren und Turbinen sowie vorrangig Brennstoffzellen für hocheffiziente elektrochemische Energiewandler entwickelt. Im Bereich der mobilen Anwendung lässt sich Wasserstoff auch direkt als Brenngas in Niedertemperatur-Brennstoffzellen für Elektroantriebe nutzen.

Der Umfang der Nutzung von Wasserstoff als Sekundärenergieträger und dessen Erzeugung aus regenerativen Quellen wird in dem Maß zunehmen, wie sich die heute dominierende Stellung fossiler Energieträger am Markt verringert und effiziente sowie umweltgerechte Energieumwandlungssysteme unter Nutzung von Brennstoffzellensystemen noch stärker an Bedeutung gewinnen.



\* auch via Fermentierung

**Abbildung 1.1:** Wasserstoff im Energiesystem der Zukunft

Quelle: Grube/Höhlein (2008)

**Wasserstoff für die chemische Industrie**

Wasserstoff ist ein wichtiger Rohstoff für die chemische und petrochemische Industrie: überwiegend für die Herstellung von Ammoniak (mit den Folgeprodukten Düngemittel und Kunststoffe) sowie zur Verarbeitung von Erdöl zu Kraftstoffen und hochwertigen Chemieprodukten. 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 100 Jahren entscheidend bestimmt (Abb. 1.2). Der heutige Weltbedarf an Wasserstoff beträgt etwa 540 Milliarden Kubikmeter pro Jahr (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 hergestellt und zu 4 Prozent via Elektrolyse. Daran hat Erdgas insgesamt den größten Anteil. 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 so genannter "Merchant Hydrogen" in gasförmiger oder flüssiger Form gehandelt und über die Straße ebenso wie via Pipeline zum Kunden transportiert.

**Bedeutende Wasserstoffquellen in Deutschland:**

**Reformierung von Erdgas (6 Mrd. Nm<sup>3</sup>/a)**



**Benzinreformierung (2,5 Mrd. Nm<sup>3</sup>/a)**



C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> (Aromat mit hoher Oktanzahl)

**Ethen-Herstellung (3,6 Mrd. Nm<sup>3</sup>/a)**



**Chlor-Alkali-Elektrolyse (0,9 Mrd. Nm<sup>3</sup>/a)**



**Bedeutende Wasserstoffsenken:**

**Ammoniaksynthese**



**Methanolsynthese**



**Schwerölaufbereitung (Hydrierung, Cracken)**

**Indirekte energetische Nutzung: Kraft- und Schmierstoffe**

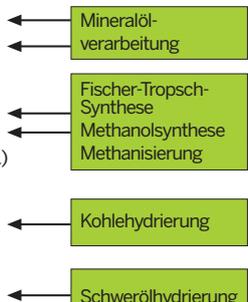
Hydrotreating  
Hydrocracking

synthetische Kraftstoffe  
Methanol  
synthetisches Erdgas (CH<sub>4</sub>)

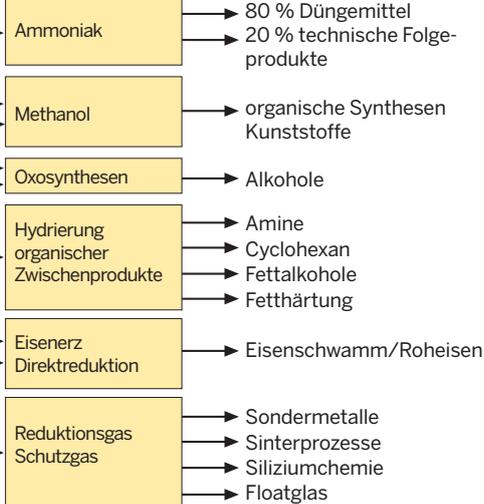
synthetisches Öl

aufbereitetes Rohöl

**Wasserstoff**



**Nicht-energetische Nutzung: Chemische Produkte**



**Abbildung 1.2:** Wasserstoff in der Industrie und Petrochemie  
Quelle: DLR (2006)

## Wasserstoff 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 Kokerigas – diente Wasserstoff in einem Gasgemisch zu Leucht- und Heizzwecken. Bereits Jules Verne (1874) prophezeite die Wasserstoffherzeugung 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 in dem Deutsch-Saudiarabischen Projekt erstmals im technischen Maßstab demonstriert.

Die Einführung von Erdgas mit 80 bis 90 Volumenprozent Methan beendete die Ära der wasserstoffreichen Gasgemische auf dem Energiemarkt, wobei Erdgasreformierung sowie Kohlevergasung bei Erzeugung eines wasserstoffreichen Synthesegases für viele Syntheseanwendungen bis hin zum Kombi-Kraftwerk mit CO<sub>2</sub>-Abtrennung und Wasserstoffnutzung erhebliche Potenziale für den Energiemarkt darstellen (Abb. 1.1).

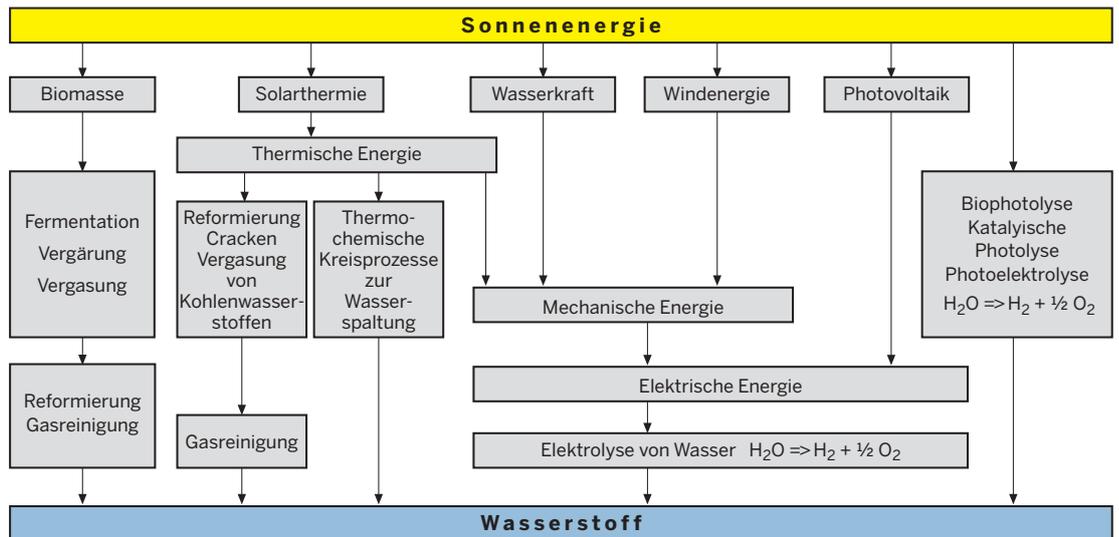
Erneuerbare Energiequellen können nur zum Teil direkt in Form von Wärme und Strom genutzt werden, da sie intermittierend anfallen. Für die umfassende Nutzung dieser unerschöpflichen Energiequellen ist deshalb ein speicherfähiger, transportierbarer und umweltfreundlicher Energieträger notwendig: Wasserstoff erfüllt alle diese Anforderungen an einen chemischen Energieträger, der mittelfristig Erdgas, Erdöl und Kohle ergänzen und längerfristig sogar ersetzen kann. Wasserstoff aus Wasser hergestellt, ist mit dem bestehenden Energieversorgungssystem kompatibel. Wasserstoff lässt sich umweltfreundlich und sicher zur Erzeugung von Wärme und Strom sowie als sauberer Kraftstoff an Bord verwenden – das Reaktionsprodukt ist immer reines Wasser. Auch die Herstellung von Wasserstoff aus Sonnenenergie sowie Wind- und Wasserkraft ist technisch möglich und langfristig wirtschaftlich. Wasserstoff ist somit der Schlüssel zu einer weltweit nachhaltigen Energiewirtschaft.

Für eine nachhaltige Energieversorgung unter Einbindung von Wasserstoff muss der Anteil des regenerativ erzeugten Wasserstoffs und damit auch die regenerative Stromerzeugung deutlich gesteigert werden. Neue Verfahren sind in der Entwicklung:

- Hochdruckelektrolyse,
- Biogasreformierung, Biomassevergasung,
- Kohlevergasung mit CCS (Carbon Capture Sequestration),
- photobiologische Erzeugung,
- solarthermische Verfahren zur Veredlung fossiler Energieträger und
- solarthermische Verfahren zur Wasserspaltung.

Staatliche Maßnahmen wie das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) in Deutschland oder ein CO<sub>2</sub>-Zertifikat-Handel dürften wesentlichen Einfluss auf den Erfolg einer zukünftigen Wasserstofftechnik haben.

Die besondere Ausgangssituation im Land Nordrhein-Westfalen ist durch eine europaweit einmalige Dichte an kommerziellen Wasserstoffherzeugungsanlagen, 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. Im Gegensatz zu anderen Regionen muss daher mit dem Aufbau einer Wasserstoff-Infrastruktur in Nordrhein-Westfalen nicht auf der grünen Wiese begonnen werden.



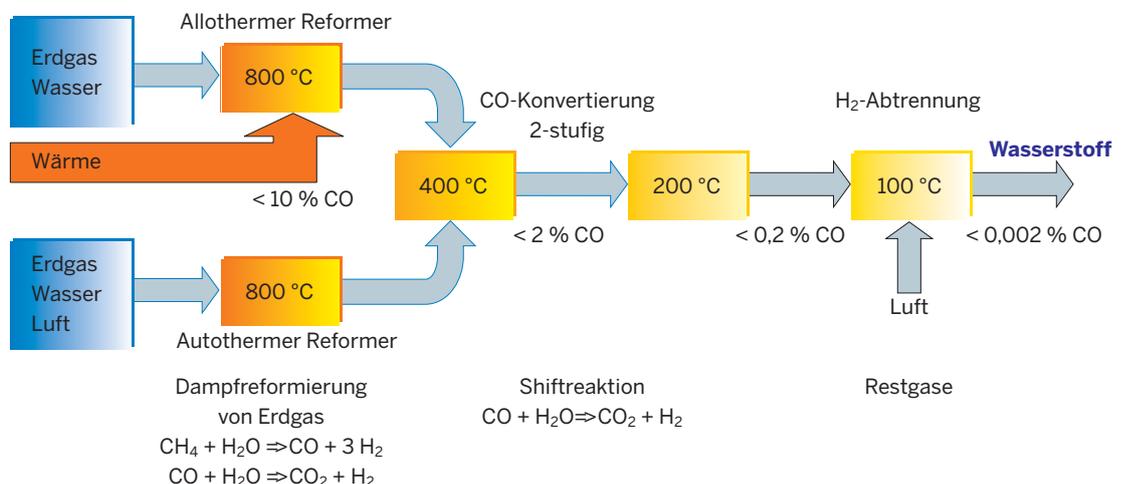
**Abbildung 2.1:** Energieumwandschritte der nicht-fossilen Wasserstoffherstellung  
Quelle: nach DLR (2006)

## 2. Wasserstoffherstellung

Die heute für die chemische Industrie hergestellten Wasserstoffmengen basieren im Wesentlichen auf Verfahren der Reformierung von Erdgas, der Wasserelektrolyse und der Herstellung von Synthesegas aus Kohle. Auf der Basis dieser Verfahren könnte schon heute Industrie-Wasserstoff für erste Anwendungen von Brennstoffzellen zur Verfügung stehen. In Zukunft dürften zur Bereitstellung von Wasserstoff für den Energiemarkt aber auch neue Verfahrensentwicklungen benötigt werden. Dazu gehören Lösungsansätze unter Einsatz von Biomasse, Wind- und Solarenergie sowie Nuklearenergie. 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. Auch Biomasse – durch Photosynthese gespeicherte Sonnenenergie – und in Kläranlagen entstehende Faulgase sowie zugeführte organische Reststoffe können in Wasserstoff umgewandelt werden (Abb. 2.1).

### Erdgasreformierung

Wasserstoff wird heute vorrangig durch Reformierung von Erdgas (Abb. 2.2), 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 (Wasserstoff, Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Wasserdampf und Restkohlenwasserstoffe) produziert. Kohlenmonoxid kann über eine Konvertierungsreaktion mit Wasser weiter zu Wasserstoff und Kohlendioxid umgewandelt werden. Wasserstoff wird aus dem Gasgemisch durch Absorption, Adsorption oder mittels Membranen abgetrennt.



**Abbildung 2.2:** Wasserstoff aus Erdgas: Verfahrensschritte der Dampfreformierung und CO-Konvertierung  
Quelle: nach DLR (2006)

### Wasserstoffherstellung auf der Basis von Erdgas mit drei Verfahrensschritten

(1) **Erdgas-Dampfreformierung mit Wasserdampf** gemäß der u.g. stöchiometrischen Beziehungen bei 500-850 °C und 15 bis 25 bar in Anwesenheit eines Katalysators



(2) **Konvertierung von CO zu H<sub>2</sub>**

bei 210 bis 270 °C (Tieftemp.-Konvertierung) oder

360 bis 530 °C (Hochtemp.-Konvertierung)



(3) **H<sub>2</sub>-Abtrennung aus dem Produktgas H<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub>**

Verfahren der Absorption von CO<sub>2</sub> oder der Druckwechseladsorption.

Die aufgezeigten Reaktionsgleichungen (1) laufen simultan für ein insgesamt endothermes Reaktionssystem ab. Das Simultangleichgewicht zeigt auf, dass bei Temperaturen von etwa 900 °C bei 15 bis 20 bar sehr geringe Restmethangehalte, mehr als 50 Volumenprozent Wasserstoff und CO-Gehalte zwischen 10 und 15 Volumenprozent im trockenen Produktgas erzielt werden können. Dabei werden die mit Katalysatoren (Nickel auf Aluminiumoxid) gefüllten Reaktionsrohre von außen mit Rauchgas aus der Erdgasverbrennung beheizt. Das heiße Abgas wird zur Erwärmung von Erdgas und Verbrennungsluft beziehungsweise zur Erwärmung und Verdampfung des Prozesswassers benutzt.

Das bei der Reformierung zwangsläufig entstehende Kohlenmonoxid muss gezielt mit Wasserdampf zu Kohlendioxid unter Herstellung von zusätzlichem Wasserstoff konvertiert werden (2). Dafür bietet sich die Hochtemperatur-Konvertierung unter Benutzung von Eisenoxid-Katalysatoren oder die Tieftemperatur-Konvertierung unter Benutzung von Kupfer-Katalysatoren an.

Um den CO-Gehalt im Synthesegas für nachfolgende Prozesse zu reduzieren (3), kann CO zu CO<sub>2</sub> aufoxidiert werden. Bei Bedarf an hochreinem Wasserstoff wird dieser durch eine Druckwechseladsorption (DWA, engl. PSA: Pressure Swing Adsorption) abgetrennt (nicht in Abb. 2.2 dargestellt). Dabei wird ein Gasgemisch mit Wasserstoff unter Druck und bei Umgebungstemperatur über eine Schüttung von Molekularsieben geleitet.

#### Zentrale Reformierung

Air Liquide Deutschland betreibt in Marl das größte Wasserstoff-Abfüllzentrum Europas. Der Wasserstoff wird im Chemiepark Marl im Wesentlichen mittels Dampfreformer (Abb. 2.3) erzeugt und auf bis zu 300 bar verdichtet.



**Abbildung 2.3:** Wasserstoffherzeugungsanlage der Air Liquide  
Quelle: Air Liquide (2009)

#### Kontakt:

Andrea Feige

Air Liquide Deutschland GmbH

Tel. 0211 / 6699-264

andrea.feige@air.liquide.com

### Dezentrale Reformierung

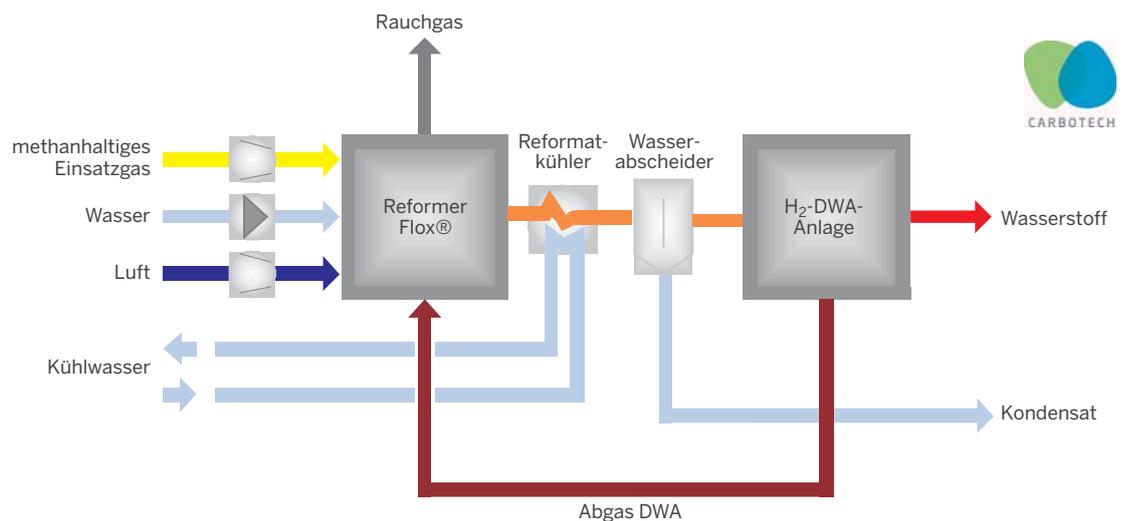
Ein Großteil der Wasserstoffkosten wird durch die Wasserstoffverteilung verursacht. Carbotech Engineering aus Essen bietet mit der HCG-Baureihe (Hydrogen Compact Generator) die Möglichkeit, kleine bis mittlere Mengen Wasserstoff vor Ort zu erzeugen. Durch Lieferung eines betriebsfertigen Containermoduls ist die Aufstellung einfach.

Die Erzeugung von Wasserstoff erfolgt mit Hilfe der FLOX®-Dampfreformierung. Methanhaltiges Einsatzgas (z. B. Erdgas oder Propan) wird in einem katalytischen Prozess unter Druck und Einspeisung von Dampf zu Synthesegas (Wasserstoff, Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Wasserdampf und Methan) umgesetzt.

Anschließend wird Wasserstoff mittels Druckwechseladsorption von dem verdichteten Synthesegas in der geforderten Reinheit abgetrennt (Abb. 2.4).

Die HCG-Baureihe ist für einen vollautomatischen Betrieb mit minimalem Wartungsaufwand konzipiert. Die betriebsfertige Containerausführung (Abb. 2.5) sorgt für niedrige Aufstellkosten und einfache Schnittstellen: lediglich Erdgas, Strom und Frischwasser (aus der Leitung) werden benötigt, um Wasserstoff in hoher Reinheit (> 99,99 Prozent) zu erzeugen.

Folgende Energieträger wurden mit der Technologie von Carbotech zu Wasserstoff umgesetzt: Biogas (2 Nm<sup>3</sup>/h Wasserstoff), Erdgas (50 - 400 Nm<sup>3</sup>/h Wasserstoff), Propan (100 Nm<sup>3</sup>/h Wasserstoff) und Biomethan (100 Nm<sup>3</sup>/h Wasserstoff).



**Abbildung 2.4:** Verfahrensschema Hydrogen Compact Generator - HCG  
Quelle: Carbotech (2009)



**Abbildung 2.5:** Hydrogen Compact Generator - HCG  
Quelle: Carbotech (2009)

#### Kontakt:

Judith Meier-Berheide  
Carbotech Engineering GmbH  
Tel.: 0201 / 1 72-19 15  
judith.berheide@carbotech.info  
www.carbotech.info

### Elektrolyse von Wasser

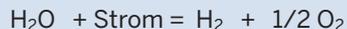
Im Rahmen der Bereitstellung von nachhaltig erzeugtem Strom für den Wasserstoffenergiemarkt wird die elektrochemische Gewinnung von Wasserstoff und Sauerstoff aus Wasser durch Elektrolyse zunehmend an Bedeutung gewinnen (Abb. 2.6). Die alkalische Wasserelektrolyse stellt die älteste und deswegen bereits heute sehr verbreitete Technologie mit einer Anlagenkapazität bis 30.000 Normkubikmetern Wasserstoff pro Stunde dar. Weiterhin sind Hochtemperatur-Dampfelektrolyse-Verfahren mit einem Sauerstoffionen-leitenden Feststoffelektrolyten bei einer Betriebstemperatur von 800 bis 1000 °C ebenso in der Entwicklung wie Membranzellen-Elektrolysen mit Protonen-leitenden Feststoffelektrolyten bei 80 °C.

Die alkalische Hochdruckelektrolyse (~ 30 bar) ist die am weitesten verbreitete Technik der Elektrolyseverfahren. Eine solche elektrolytische Zelle, in der eine 20- bis 40-prozentige Kalilauge (KOH) als Elektrolyt dient, besteht aus einem Gehäuse mit zwei angeschlossenen Gasabscheidern, zwei Elektroden und einer Membran, welche undurchlässig für Gas, aber permeabel für Ionen ist. Mehrere in Reihe geschaltete Zellen ergeben schließlich große Elektrolyseure. Die in der Bilanzierung berücksichtigte Peripherie besteht aus einem Stromrichter, Komponenten für Wasser-, Elektrolyt- und Produktgasaufbereitung, Prozess- und Leittechnik, Kühlwasserversorgung sowie Gasspeicher und Kühler.

Industrielle Hochdruckelektrolyseure haben eine Kapazität bis zu 150 MW<sub>el</sub>. Da die Hochdruckelektrolyse schnelle Lastwechsel (20 bis 100 % der Nennleistung) ermöglicht, können stark fluktuierende, regenerative Energiequellen wie die Windenergie verwendet werden. In Verbindung mit Windstrom stellt die alkalische Hochdruckelektrolyse somit einen regenerativen Ansatz zur Wasserstoffherstellung dar. Wird ein Wirkungsgrad von 100 Prozent (nach der Wirkungsgradmethode für Energieträger ohne Heizwertangaben wie Wind, Photovoltaik und Wasserkraft) für die Energieerzeugung durch Windenergie angenommen, liegt der Wirkungsgrad zur Herstellung von Wasserstoff durch Windenergie mittels Hochdruckelektrolyse bei etwa 80 Prozent (brennwertbezogen) ohne Netzverluste (nach Wagner/Trudewind (2007)).

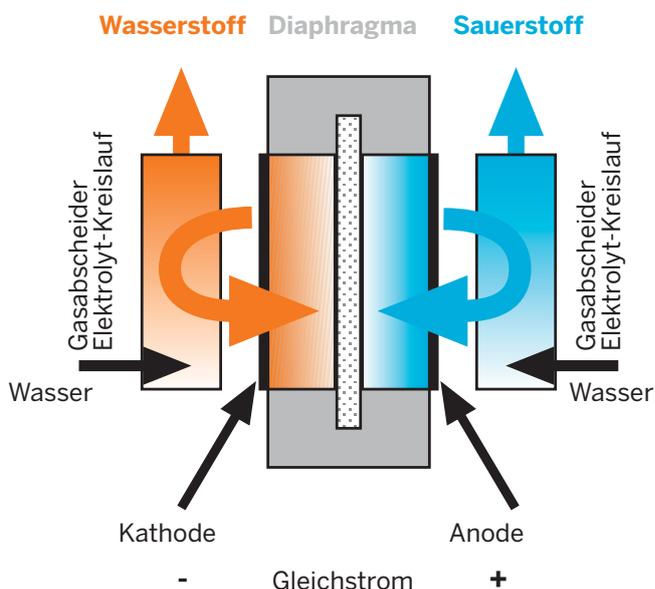
### Wasserspaltung durch alkalische Druckelektrolyse

In der Elektrolyse läuft die Reaktion unter Stromzufuhr ab:



Die minimale Energie, die für die Wasserzerersetzung bei isobarer und adiabater Prozessführung notwendig ist, beträgt 3,54 kWh/m<sup>3</sup> Wasserstoff bei 25 °C und 1 bar. Das entspricht dem oberen Heizwert oder Brennwert von Wasserstoff für Wasser in flüssiger Form. Der prinzipielle Aufbau in Abb. 2.6 einer Zelle zeigt einen Anoden- und einen Kathodenraum, wobei die Räume durch ein Ionendurchlässiges, aber Gasundurchlässiges Diaphragma getrennt sind. Die Zelle wird mit einem Elektrolyten gefüllt; Sauerstoff entsteht bei der Anode, Wasserstoff bei der Kathode.

Investiert man diesen Betrag im kondensierten Zustand ausschließlich als elektrische Arbeit, so ist dazu eine Zellspannung von 1,48 V notwendig. Die anzulegende Spannung ist aber wegen der inneren Widerstände eines technischen Systems stets größer als die theoretische Zersetzungsspannung. In der Praxis bedeutet dies einen Verbrauch an elektrischer Energie von zum Beispiel 4,5 kWh/m<sup>3</sup> Wasserstoff bei 30 bar, 90 °C und einem 25-prozentigen Kalilauge-Elektrolyten.



**Abbildung 2.6:** Schema der alkalischen Wasserelektrolyse  
Quelle: DLR (2006)



**Abbildung 2.7:** Chlor-Alkali-Elektrolyse in Hürth-Knapsack (310.000 t Chlor pro Jahr, 203.000 Nm<sup>3</sup> Wasserstoff pro Tag;  $2 \text{ NaCl} + 2 \text{ H}_2\text{O} \Rightarrow 2 \text{ NaOH} + \text{Cl}_2 + \text{H}_2$ )  
Quelle: HyCologne (2009)

### Wasserstoff Region Rheinland

In der Region Köln fällt Wasserstoff in großen Mengen als Nebenprodukt in der lokalen Chemieindustrie (überwiegend Chlor-Produktion (Abb. 2.7) und Raffinerien) an. Eine Studie unter [www.Roads2Hy.com](http://www.Roads2Hy.com) und die aktuelle, detaillierte Studie des Landes Nordrhein-Westfalen (Pastowski/ Grube (2009)) zeigen, dass in der Region Köln etwa 6,7 Milliarden Normkubikmeter Wasserstoff pro Jahr produziert werden. Der überwiegende Teil des produzierten Wasserstoffs wird direkt genutzt. Die verfügbare Menge entspricht 203.000 Normkubikmetern pro Tag beziehungsweise der Energiemenge, die für den Betrieb von etwa 56.000 Pkw (12.000 km/a, 3,5 l Benzin-Äquivalent pro 100 km oder 120 MJ H<sub>2</sub> pro 100 km) notwendig wäre.

Das Netzwerk HyCologne-Wasserstoff Region Rheinland e.V. beabsichtigt, mit öffentlichen und industriellen Partnern große Teile dieses Industrierwasserstoffs als Energieträger für den Verkehr und weitere Projekte bereitzustellen. Die mittlerweile vierjährigen Vorbereitungen für diese Projekte dokumentieren die technische und organisatorische Machbarkeit sowie den starken Willen und das finanzielle Engagement der beteiligten Partner.

Das Projekt "Chemergy – Bereitstellen von Nebenprodukt-Wasserstoff für Verkehrsprojekte" verfolgt im Rahmen des Nationalen Innovationsprogramms (NIP) über einen Zeitraum von zwei Jahren das Ziel, öffentlichen Zugang zu der bislang geschlossenen Chemieinfrastruktur zu schaffen, damit Wasserstoff als Energieträger für den Verkehr nutzbar gemacht werden kann. Dies ist eine notwendige Bedingung und optimale Ausgangsposition für einen zukünftig wirtschaftlichen Betrieb von Wasserstoffanwendungen. Als erste Anwendung werden ab 2010 zwei Brennstoffzellen-Hybridbusse des Typs "Phileas" des niederländischen Herstellers APTS zum Einsatz kommen. Die Busse sollen in Hürth, im Rhein-Erft-Kreis und in der Region Köln betrieben werden.

#### Kontakt:

Boris Jermer  
HyCologne - Wasserstoffregion  
Rheinland e.V.  
Tel.: 02233 / 406 123  
[jermer@hycologne.de](mailto:jermer@hycologne.de)  
[www.hycologne.de](http://www.hycologne.de)

### Dezentrale Wasserstoffbereitstellung

Die Versorgung entlegener Gebiete und dezentraler Verbraucher mit Elektrizität stellt eine weltweite Herausforderung dar. Dies betrifft insbesondere Schwellen- und Entwicklungsländer, in denen etwa zwei Milliarden Menschen leben, die keinen Zugang zu elektrischer Stromversorgung besitzen. Vor allem die Elektrifizierung entlegener ländlicher Gebiete ist eine grundsätzliche Voraussetzung für die Verbesserung der Lebensumstände und kann somit auch der Landflucht mit ihren bekannten Problemen entgegenwirken.

Für die Versorgung entlegener Gebiete werden vorwiegend Dieselgeneratoren eingesetzt, wobei der devisenzehrende Dieselimport schon heute viele Entwicklungs- und Schwellenländer vor kaum lösbare volkswirtschaftliche Probleme stellt. Auf der anderen Seite verfügen diese Länder häufig über ein großes Wind- oder Solarenergiepotenzial, das vorzüglich das energetische Rückgrat einer dezentralen, weitestgehend von erneuerbaren Energien getragenen Stromversorgungsinfrastruktur darstellen könnte.

Bei Wind- und Solarkraftanlagen gilt es allerdings ein Grundproblem zu lösen: die Periodizität und Diskontinuität, mit welcher der darin erzeugte elektrische Strom anfällt. Leistungsnachfrage und Leistungsangebot passen zeitlich nur selten zusammen und widersprechen somit der grundsätzlichen Forderung, dass in einem elektrischen Netz zu jedem Zeitpunkt Stromverbrauch und Stromerzeugung übereinstimmen müssen. In großen Verbundnetzen wird die für den Ausgleich erforderliche positive und negative Regel- und Reserveleistung durch ein entsprechend ausbalanciertes Angebot verschiedener Kraftwerke abgedeckt. Eine Lösung

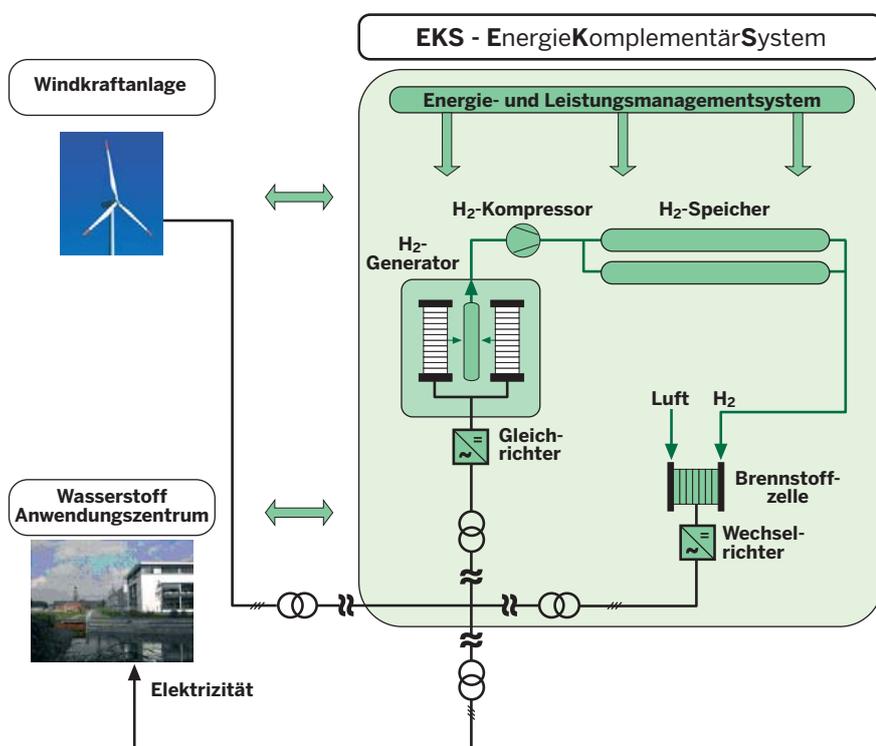
könnten Energiesysteme darstellen, die einen Teil des regenerativ erzeugten Stroms in Form von elektrolytisch erzeugtem Wasserstoff speichern und diesen bei unzureichender regenerativer Direktstromversorgung, aber auch zur Deckung kurzzeitigen Spitzenbedarfs, mittels einer Brennstoffzelle oder eines Verbrennungsmotors wieder verstromen und ins Netz einspeisen.

Aufbauend auf den großen Fortschritten, die in den letzten Jahren bei Elektrolyseuren, Wasserstoff-Verbrennungsmotoren und Brennstoffzellen erzielt wurden, soll am Standort Herten der Prototyp eines marktfähigen Energiekomplementärsystems demonstriert werden.

Die geplante Anlage (Abb. 2.8) soll in der Lage sein, in Kombination mit einer entsprechenden Windkraftanlage den jährlichen Strombedarf des dortigen Wasserstoff-Anwenderzentrums von insgesamt 200.000 kWh<sub>el</sub> CO<sub>2</sub>-frei im Inselbetrieb abzudecken. Dieselbe Menge würde ausreichen, um 500 Haushalte in einem Entwicklungsland ein Jahr lang mit Strom zu versorgen und damit einen wesentlichen Beitrag zur – im besten Sinne des Wortes – nachhaltigen Verbesserung der Lebensumstände zu leisten.

#### Kontakt:

Prof. Dr.-Ing. Karl H. Klug  
 Fachhochschule Gelsenkirchen -  
 Energielabor  
 Energieverfahrenstechnik und  
 Wasserstoff-Energiesysteme  
 Tel.: 0209 / 9596-166/234  
 karl.klug@fh-gelsenkirchen.de



**Abbildung 2.8:** Prinzipschaltbild Wasserstoff-Energiekomplementärsystem am Standort Herten

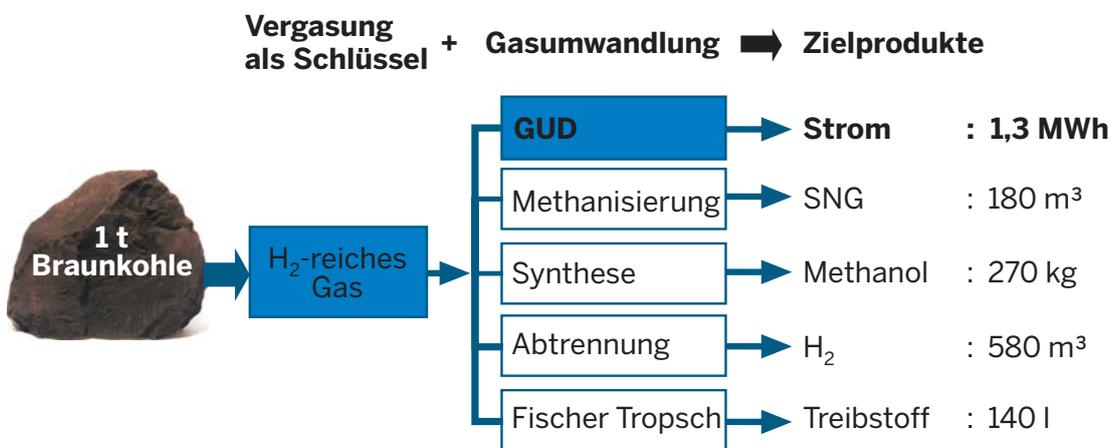
Anmerkung: Das regenerative Stromerzeugungssystem besteht aus Windkraftanlage, Elektrolyseur und Mitteldruck-Wasserstoff-Speichersystem mit Kompressor und Speicher. Das Wasserstoff-Energiesystem umfasst Rückverstromungssystem mit Brennstoffzelle, Verbrennungsmotor, Energiekonditionierungssystem und Energiemanagementsystem. Die Wasserstoff-Tankstelle benötigt Hochdruckkompressor, Hochdruckspeicher und Zapfsäule. Quelle: FH Gelsenkirchen (2009)

### Synthesegas aus Kohle

Gegenwärtig wird der weiterhin signifikant ansteigende Primärenergieverbrauch (1,7 Prozent pro Jahr von 2000 – 2030) weltweit hauptsächlich durch fossile Energieträger gedeckt. Der Verbrauch von Kohle wird steigen, wenngleich langsamer als der von Öl und Gas. China und Indien werden zusammen für zwei Drittel des Anstiegs des weltweiten Kohlebedarfs bis 2030 verantwortlich sein, mit zunehmender Konzentration auf die Stromerzeugung.

Zukünftige Kohlekraftwerkstechnologien werden sich dahingehend entwickeln, dass im Kraftwerksprozess weitgehend Kohlendioxid abgetrennt wird. Verschiedene Techniken befinden sich in der Entwicklung: Precombustion-Techniken (integrierte Vergasung, CO<sub>2</sub>-Abtrennung und Wasserstoff-Darstellung vor der Verbrennung), Oxyfuel-Techniken (Verbrennung mit Sauerstoff ohne Stickstoff, Trennung von CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O im Rauchgas) und Postcombustion-Techniken (CO<sub>2</sub>-/N<sub>2</sub>-Trennung im Rauchgas). Durch die Abtrennung von Kohlendioxid verringert sich der Nettowirkungsgrad der Kraftwerke bei zusätzlichem Investitionsaufwand.

Die Herstellung von Wasserstoff auf Basis einer in ein Kohle-Kombi-Kraftwerk integrierten Kohlevergasung (Precombustion) ist eine fortgeschrittene Technologie. In einem ersten Prozessschritt wird Kohle in ein Synthesegas umgewandelt, das im Wesentlichen aus Kohlenmonoxid (CO) und bereits einem größeren Anteil an Wasserstoff besteht:  $C + H_2O = CO + H_2$ . Dieses Gasgemisch wird gereinigt und kann Ausgangspunkt für die Herstellung verschiedenster chemischer Grundstoffe (Abb. 2.9) sein. Bei all diesen Synthesen muss das CO in dem Gasgemisch prozessbedingt mittels CO-Konvertierung ( $CO + H_2O = CO_2 + H_2$ ) teilweise oder vollständig in Wasserstoff umgewandelt werden. Bei vollständiger CO-Umwandlung und nachfolgender Abtrennung von CO<sub>2</sub> erhält man schließlich reinen Wasserstoff (Abb. 2.11). Neben Strom und Wärme können mit der in ein Braunkohle-Kraftwerk integrierten Kohlevergasung mit CO<sub>2</sub>-Abtrennung aus 1 Tonne Braunkohle die in Abbildung 2.9 dargestellten Mengenströme an synthetischem Erdgas (SNG), Methanol und Diesel als Treibstoffe und Wasserstoff erzeugt werden.



**Abbildung 2.9:** Braunkohle-Kohlekraftwerk mit integrierter Kohlevergasung  
Anmerkung: Die Zielprodukte wurden als alternative Nutzungsverfahren ermittelt.  
Quelle: Heithoff (2008)

### Abbildung 2.10: Geplantes Braunkohlenkraftwerk von RWE

Anmerkung: Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) mit Kohlevergasung und Wasserstoffherzeugung einschließlich CO<sub>2</sub>-Abtrennung und -Speicherung (CCS) mit einer Strom-Bruttoleistung von 450 MW (Netto 320 MW).

Bruttowirkungsgrad: 48,5 % (heizwertbezogen), Nettowirkungsgrad 34 % (heizwertbezogen)

Quelle: RWE Power AG (2009)



### Kohlekraftwerk in Hürth mit CO<sub>2</sub>-Abtrennung

Im Rahmen einer RWE-Projektentwicklung zum Kohlekraftwerk mit CO<sub>2</sub>-Abtrennung und -Speicherung in Hürth werden die vorab genannten Prozessschritte betrachtet (Abb. 2.10 und 2.11). Aus Kohle wird zunächst – wie oben beschrieben – reiner Wasserstoff erzeugt. Der Wasserstoff wird in diesem Fall direkt als Energieträger zur Stromerzeugung in einer Gasturbine genutzt. Im Rahmen der RWE-Projektentwicklung wird das CO<sub>2</sub>, das bei der Wasserstoffherzeugung abgetrennt wird (90 Prozent Abscheidegrad)

unterirdisch gespeichert, so dass es nicht in die Atmosphäre gelangt. Diese als CCS (Carbon Capture and Storage) bezeichnete Technologie wird es in Zukunft ermöglichen, Wasserstoff aus Kohle nahezu ohne CO<sub>2</sub>-Emissionen herzustellen.

#### Kontakt:

Frank Schwendig  
RWE Power AG  
Abteilung PCR-N /  
CCS und Neue Technologien  
Tel.: 0201 / 12-41376  
Frank.Schwendig@rwe.com

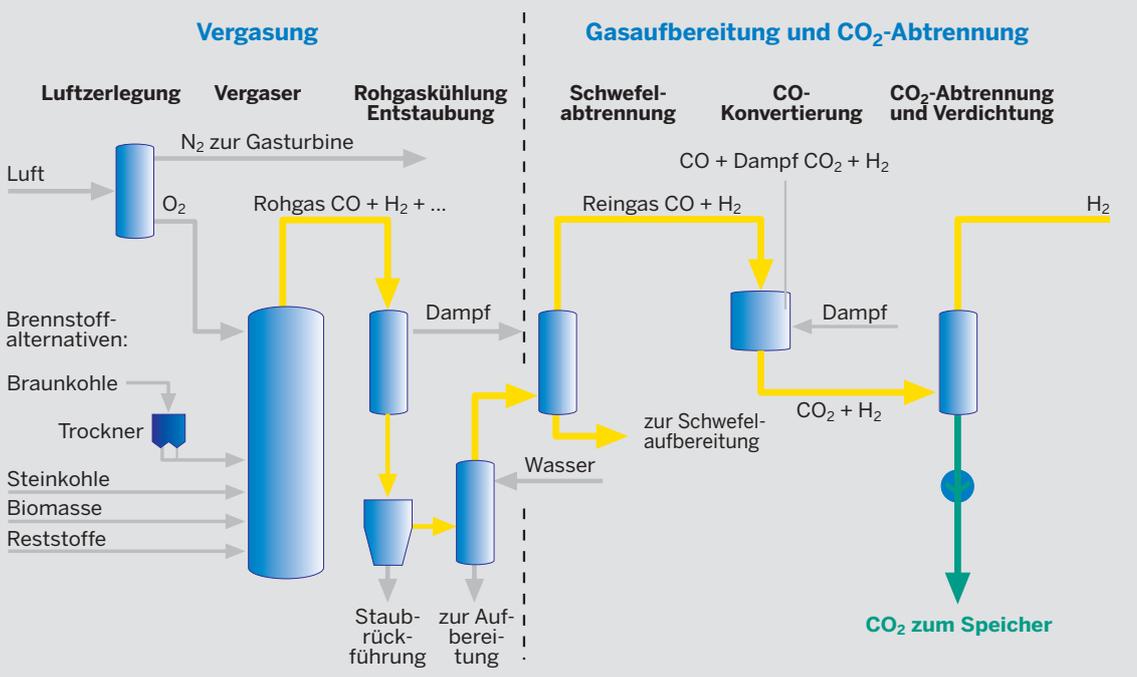


Abbildung 2.11: Wasserstoffherzeugung auf Basis von Kohlevergasung einschließlich CO<sub>2</sub>-Abtrennung und Speicherung im Rahmen des RWE-Projekts

Quelle: RWE Power AG (2009)

### Industrie-Wasserstoff

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 Industrie-prozessen 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.

#### Aufbau einer H<sub>2</sub>-Infrastruktur in Nordrhein-Westfalen

Eine Studie des Landes Nordrhein-Westfalen – "Optionen für den kostenoptimierten Aufbau einer H<sub>2</sub>-Infrastruktur in Nordrhein-Westfalen" (Pastowski et al. (2009)) – verknüpft die Erhebung verfügbarer Wasserstoffmengen in Nordrhein-Westfalen mit der Modellierung des Aufbaus einer Wasserstoff-Infrastruktur und betont dabei die besondere Ausgangslage von Nordrhein-Westfalen.

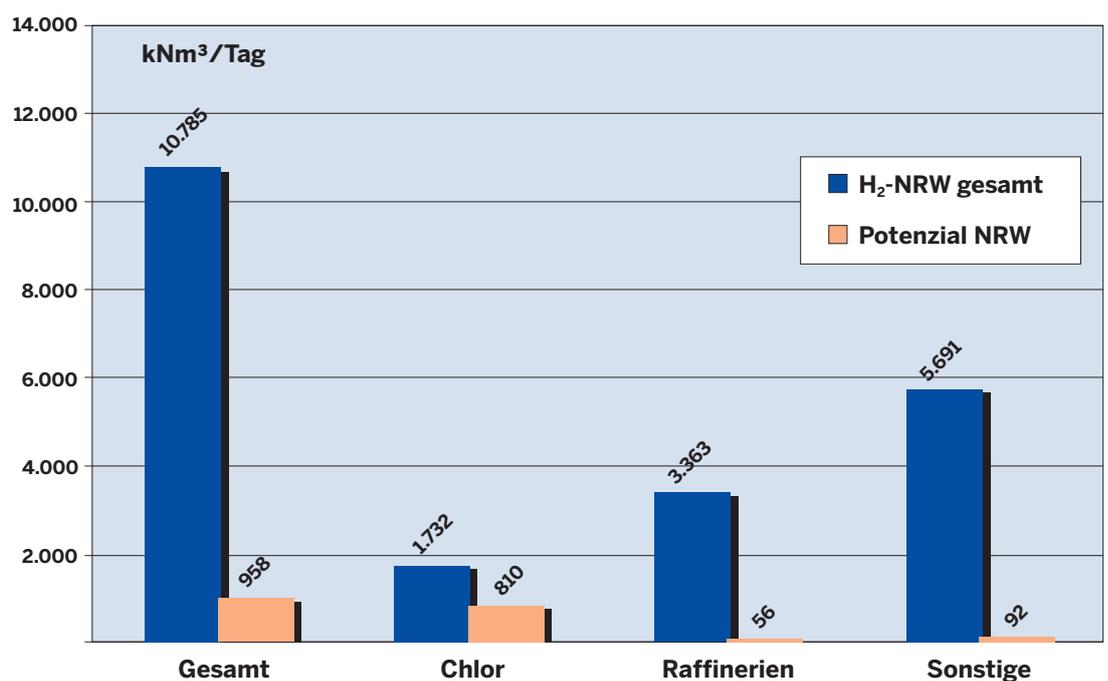
Nennenswerte Quellen und Nutzungen von Industrie-Wasserstoff in NRW lassen sich vor allem im Bereich der Chlorproduktion sowie der Raffinerien und Kokereien ausmachen. Daneben wird Wasserstoff teilweise mittels Erdgasreformierung gewonnen, um als chemischer Grundstoff in anderen Produktionen eingesetzt zu werden. Bei der Herstellung von Chlor fällt Wasserstoff bei der Elektrolyse 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. Wegen der rückläufigen Qualität des zu verarbeitenden Rohöls mit weniger leichtflüchtigen Bestandteilen und des Bedarfs an Wasserstoff für die Entschwefelung von Kraftstoffen entwickelt sich bei den Raffinerien mittel- bis langfristig eher ein Wasserstoffbedarf als das Potenzial, größere Mengen an externe Abnehmer weiterzugeben.

Bei der Koksproduktion entsteht Kokereigas mit rund 60 Prozent H<sub>2</sub>-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 Kokskohleförderung gesunken. Zudem wird das Kokereigas bei den in Hüttenwerke integrierten Kokereien bereits in vielfältiger Weise genutzt.

Abbildung 2.12 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 und Standorte am Wasserstoff-Potenzial für neue Nutzungen 80 Prozent ausmacht. Demgegenüber entfallen über 80 Prozent der gesamten Produktion auf Raffinerien und sonstige Anlagen, die aber zusammen lediglich 20 Prozent zum Potenzial beitragen.



**Abbildung 2.12:** Industrie-Wasserstoff in Nordrhein-Westfalen insgesamt und Wasserstoff-Potenzial für neue Nutzungen  
Quelle: Pastowski et al. (2009)

Neben der Verfügbarkeit von industriell erzeugtem Wasserstoff spielen auch die räumliche Lage (Abb. 2.13) 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 Flächenerschließung beitragen könnte.

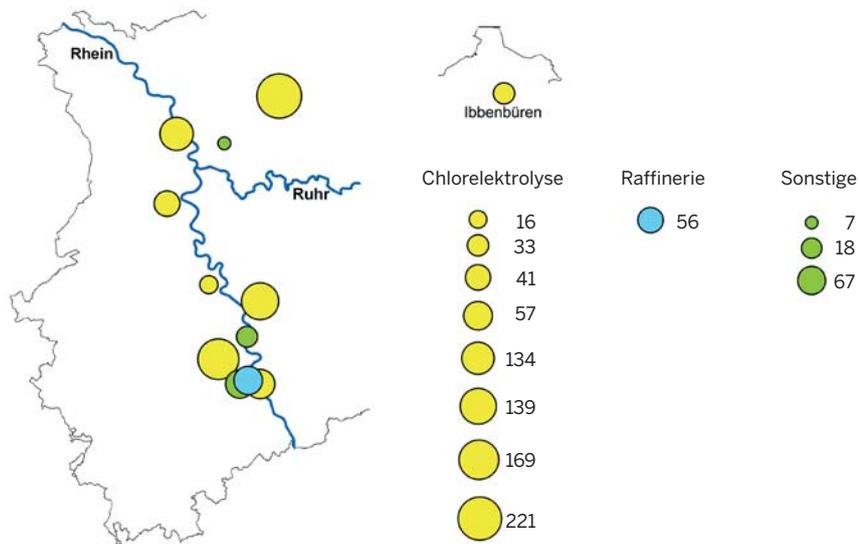
Kurzfristig könnten mit dem für Nordrhein-Westfalen abgeschätzten industriellen Potenzial von 958.000 Normkubikmetern pro Tag oder 350 Millionen Kubikmetern pro Jahr etwa 260.000 Brennstoffzellen-Pkw (12.000 km pro Jahr bei einem Verbrauch von 3,5 l Benzin-Äquivalent je 100 km oder etwa 1 kg Wasserstoff je 100 km) für erste Projekte der Markteinführungsphase zur Verfügung gestellt werden.

#### Kontakt:

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

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

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



**Abbildung 2.13:** Verteilung der erhobenen Standorte mit Angaben des verfügbaren Industrie-Wasserstoffs in Nordrhein-Westfalen in Tausend Kubikmetern pro Tag  
Quelle: Pastowski et al. (2009)

### Photobiologische Erzeugung

Die Wasserspaltung ist ein in der Natur vielfach optimiertes Prinzip, das bei der Photosynthese in Pflanzen täglich Anwendung findet. Sonnenlicht ist hierbei die primäre Energiequelle, welche die notwendige Energie zum Spalten von Wasser in Wasserstoff-Ionen, Sauerstoff und Elektronen bereitstellt. Pflanzen verwenden die Elektronen und Wasserstoff-Ionen zur Umsetzung von Kohlendioxid zu Biomasse in der Photosynthese.

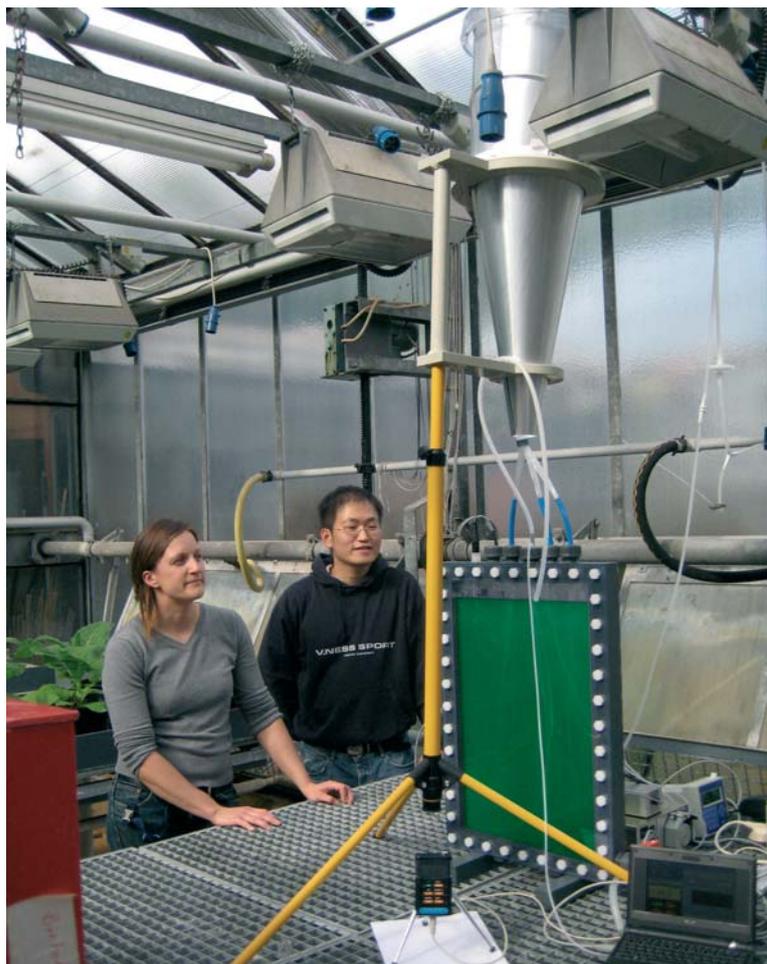
### Mikroorganismen: Grünalgen und Cyanobakterien

Mikroorganismen wie Grünalgen oder Cyanobakterien sind in der Lage, Wasserstoff-Ionen und Elektronen durch ein Enzym zu molekularem Wasserstoff zu verbinden (Hydrogenase). Allerdings wird das Enzym durch Sauerstoff inaktiviert – ein Problem, das dazu führt, dass die Mikroorganismen unter "normalen" Bedingungen, also unter Anwesenheit von Luft und dem damit verbundenen Sauerstoff, keinen Wasserstoff produzieren. Würde die Hydrogenase nicht mehr durch Sauerstoff blockiert, könnten höhere  $H_2$ -Ausbeuten erzielt werden – eine Grundvoraussetzung für die großtechnisch konkurrenzfähige Weiterentwicklung dieser Erzeugungstechnik.

Im Labor konnte nachgewiesen werden, dass mit Mikroorganismen unter anaeroben (sauerstofffreien) Bedingungen Wasserstoff produziert werden kann. Dabei lässt sich die Photosynthese durch den Entzug von Schwefel so weit herabregulieren, dass die Sauerstoff verbrauchende Zellatmung die Sauerstoff produzierende Photosynthese übersteigt. Unter diesen Voraussetzungen kann eine Wasserstoffherzeugung in Photobioreaktoren bereits heute über mehrere Tage aufrechterhalten werden (Abb. 2.14).

### Photobioreaktoren unter anaeroben Bedingungen

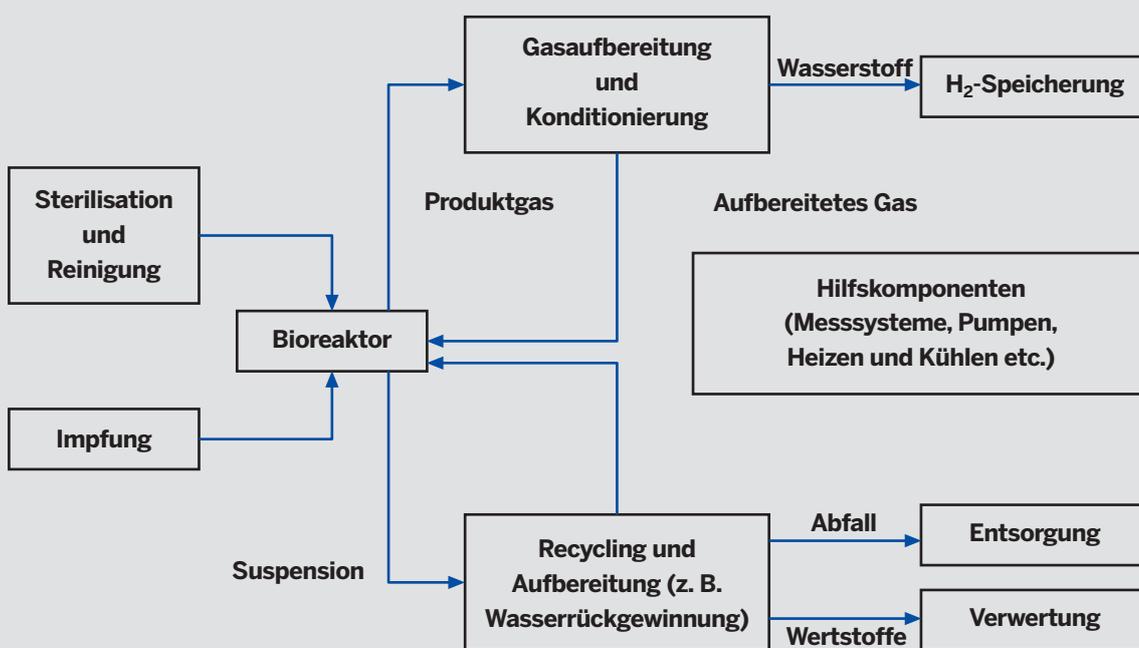
Ziel für die Reaktorauslegung ist ein hohes Oberflächen/Volumen-Verhältnis. Dieses Verhältnis beschreibt die mit Licht bestrahlte Oberfläche des Reaktors und damit zugleich die in den Reaktor einfallende Lichtmenge in Relation zum Volumen. Je größer dieses Verhältnis ist, desto größer kann die Zahl der Organismen und damit die  $H_2$ -Ausbeute sein. Die Tiefe des Reaktors bleibt jedoch aufgrund des geringen Lichtwegs durch die Suspension auf wenige Zentimeter begrenzt, während die Höhe des Reaktors durch die Nährstoffversorgung mit Kohlendioxid eingeschränkt ist. Durch zu hohe Suspensionssäulen ist die ausreichende Versorgung der Zellen mit  $CO_2$  im oberen Bereich des Reaktors nicht mehr gewährleistet. Aus diesem Grund wird auch untersucht, ob Licht zum Beispiel über Lichtleitsysteme aus Glasfasern in den Reaktor geleitet werden kann. Dadurch sollen hohe Reaktorvolumina bei geringeren Oberflächen realisiert und zugleich das im Sommer mit hoher Intensität vorhandene Sonnenlicht effizient ausgenutzt werden.



**Abbildung 2.14:** Photobioreaktor mit Lichtleitsystem zur photobiologischen Wasserstoffherzeugung  
Anmerkung: 7 Liter Suspension (z. B. Mikroalgen in Wasser), Ausbeute 2 ml  $H_2$ /Liter Suspension pro Stunde, Forschungsziel 100fache Ausbeute  
Quelle: BPF, Ruhr-Universität Bochum (2009)

Weitere Aspekte einer technischen Anlage (Abb. 2.15) sind die Trennung des Wasserstoffs vom Restgasgemisch durch Druckwechseladsorption, die Trennung, Verwertung und Deponierung der Biomasse (beispielsweise durch anaerobe Vergärung oder Vergasung) sowie die Reinigung und Sterilisation der Photobioreaktoren. Die kosten- und energieeffiziente Gestaltung dieser Systemperipherie ist ein weiteres Ziel der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten am Lehrstuhl für Energiesysteme und Energiewirtschaft (LEE) der Ruhr-Universität Bochum (RUB). Dabei müssen Massenfermentationssysteme für Mikroalgen (Photobiofermenter) entwickelt werden, deren Kosten unter 10 Prozent der Kosten bisher verfügbarer Systeme liegen.

In einem vom BMBF geförderten Projekt zur Entwicklung einer biologischen "H<sub>2</sub>-Designzelle" als Energielieferant werden die Universitäten Bochum, Bielefeld, Köln, Berlin und Mülheim von 2009 bis 2012 unter der Federführung der RUB auf der Basis der oben beschriebenen Grundlagen zusammenarbeiten.



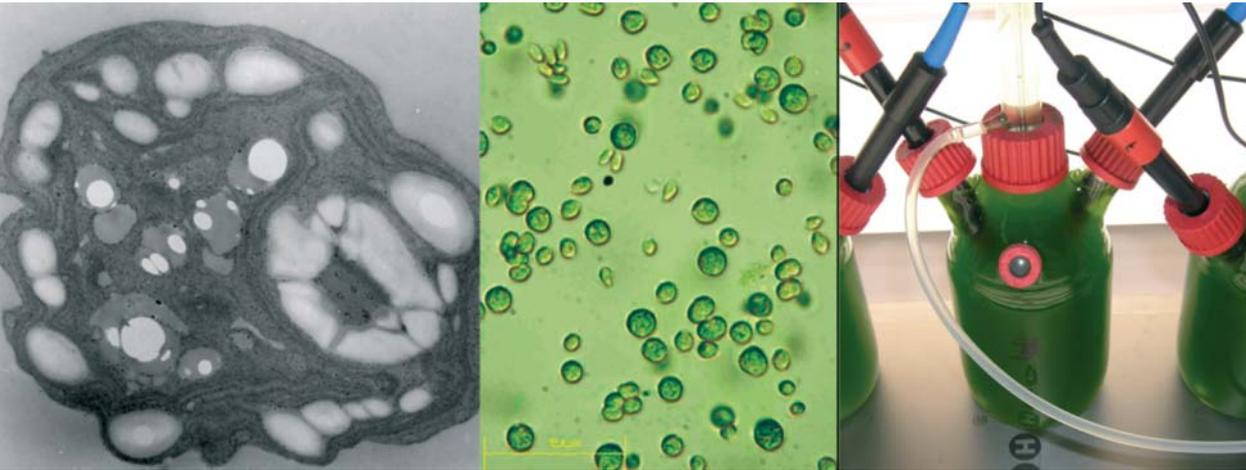
**Abbildung 2.15:** Verfahrensschema einer photobiologischen Anlage

Quelle: LEE, Ruhr-Universität Bochum (2009)

**Kontakt:**

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

Prof. Dr. M. Rögner  
 Ruhr-Universität Bochum - BPF  
 Tel.: 0234 / 32-23634  
 matthias.roegner@rub.de



**Abbildung 2.16:** Bild links: Elektronenmikroskopische Aufnahme einer Wasserstoffproduzierenden Mutante des Stammes *Chlamydomonas reinhardtii*; Bild Mitte: Lichtmikroskopische Aufnahme von *reinhardtii*-Zellen; Bild rechts: Wasserstoff-Erzeugungsanlage im Labormaßstab  
Quelle: Universität Bielefeld (2009)

### Mikroalgen der Gattung *Chlamydomonas*

Mikroalgen zählen zu den attraktivsten Alternativen, da sie auf relativ geringem Raum einen hohen Biomasseertrag versprechen, wenig Wasser verbrauchen und keinen Dünger benötigen. Zudem können sie auf Böden kultiviert werden, die nicht für den Ackerbau geeignet sind. Als Energieprodukt aus Algen wird derzeit neben Biodiesel auch Bio-Wasserstoff favorisiert. Einige Mikroalgen-Arten sind in der Lage, ohne wesentlichen Verbrauch der Biomasse über die Photosynthese direkt Photonen des Lichts zu nutzen, um über einen katalytischen Prozess Wasserstoff zu produzieren.

Am Zentrum für Biotechnologie (CeBiTec) der Universität Bielefeld werden in der Abteilung für Algenbiotechnologie mit Unterstützung des BMBF, der EU und der DFG neue Formen von molekular-biologischen Stämmen entwickelt, die im Vergleich zu den Wildformen höhere Mengen an Wasserstoff erzeugen und gleichzeitig die Sonnenenergie über ein optimiertes Lichteinfangsystem wesentlich effizienter in Biomasse umwandeln können (Abb. 2.16).

In Zusammenarbeit mit Ingenieuren von der TH Karlsruhe und der University of Queensland werden geschlossene Photobioreaktorsysteme entworfen, denen die neuen Algenstämme entsprechend angepasst werden. Der Solare Bio-Wasserstoff-Prozess soll durch diese Forschungsprojekte mit gentechnologisch veränderten Mikroalgen und neuen Bioreaktorsystemen entscheidende Fortschritte für die katalytische solar angetriebene Wasserstoffherzeugung aus Wasser ermöglichen. Da die Umwandlung von Wasserstoff in Strom nur Wasser als Endprodukt hat, wird der Nettoverbrauch von Wasser stark reduziert und die Produktion von Treibhausgasen vermieden. Mit der Entwicklung neuer Stämme ist bereits ein deutlicher Entwicklungsschub in Bezug auf die Nutzung von Mikroalgen für Bioenergiezwecke einhergegangen. Mittelfristiges Ziel ist die gekoppelte Produktion von Bio-Wasserstoff mit weiteren Wertstoffen aus Mikroalgen in einem geschlossenen Bioraffineriekonzept bei gleichzeitiger Sequestrierung von Kohlendioxid.

#### Kontakt:

Prof. Dr. Olaf Kruse  
Universität Bielefeld  
Zentrum für Biotechnologie (CeBiTec)  
Tel.: 0521 / 106-12258  
olaf.kruse@uni-bielefeld.de  
www.solarbiofuels.org

### Biomassenutzung

Biomasse ist in den unterschiedlichsten Formen und Zusammensetzungen als Energieträger nutzbar. Neben der Umwandlung in Wärme durch direkte Verbrennung oder Verflüssigung zu Brennstoffen (Pflanzenöl) können Methan oder Wasserstoff durch anaerobe Vergärung oder Vergasung mit Wasserdampf erzeugt werden. Zwar bleibt die Länge der Rohstoff-Transportwege infolge der vergleichsweise geringen Energiedichte der Biomasse aus Effizienzgründen beschränkt, doch der Vorteil von Biomasse besteht in der guten Verfügbarkeit im Vergleich zu den natürlich bedingten Schwankungen in solartechnischen Anlagen und in Wind- oder Wasserkraftwerken. Wasserstoff ist dabei auch direkt, also ohne die Zwischenstufen der Stromerzeugung und Elektrolyse, herstellbar.

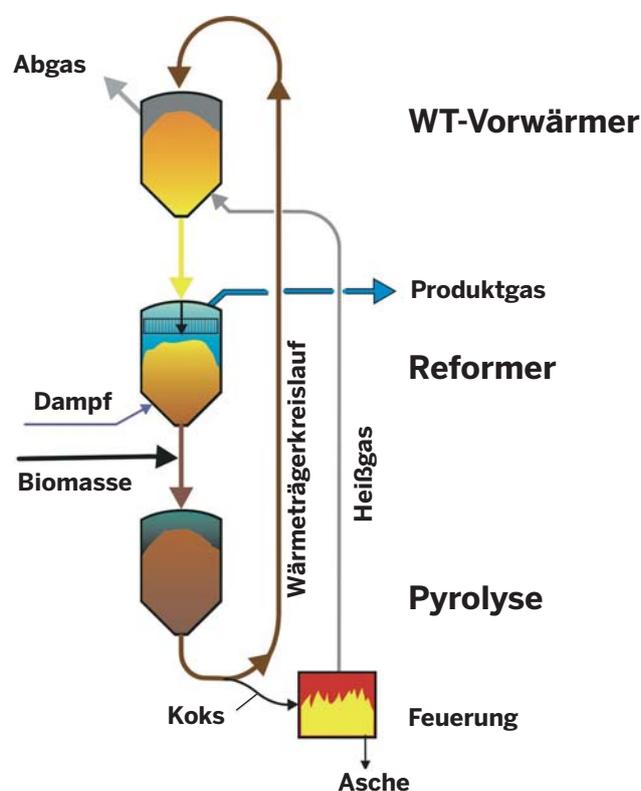
Zur Erzeugung von Gas aus Biomasse werden verschiedene Verfahren angewendet. Gängige Anlagen verwenden Luft als Vergasungsmittel und erzeugen Rohgase mit vergleichsweise niedriger Energiedichte. Bei der Erzeugung eines wasserstoff- und energiereicheren Gases kommen als Vergasungsmittel auch Sauerstoff oder – unter Zuführung von Wärmeenergie – auch Wasserdampf zum Einsatz.

### Der "Blaue Turm"

Auf dem ehemaligen Zechengelände Ewald in Herten wird im Wasserstoff-Kompetenz-Zentrum H2Herten der "Blaue Turm" als Demonstrationsprojekt gebaut. Mit dieser Anlage kann Biomasse aus Grünschnitt in wasserstoffhaltiges Produktgas (blaues Gas) und Strom umgewandelt werden.

Die Besonderheit des Verfahrens im Blauen Turm im Vergleich zu Vergärungsprozessen besteht darin, dass die Zersetzung der Eingangsstoffe (Pyrolyse bei ~ 600 °C) und die Veredlung des entstehenden Gases (Wasserdampf-Reformierung bei ~ 950 °C) räumlich voneinander getrennt und damit verfahrenstechnisch besser regelbar sind, was dann auch der Effizienzsteigerung der gesamten Anlage dient.

Die Masse der Einsatzstoffe (neben Grünschnitten beispielsweise Olivenkerne und Hühnermist) wird zu 80 Prozent (20 Prozent Koks) umgesetzt zu einem wasserstoffreichen Synthesegas (50 Prozent H<sub>2</sub> sowie CO, CO<sub>2</sub>), während bei der anaeroben Vergärung oder Fermentierung bei Temperaturen unterhalb 100 °C schlechtere Stoffumsätze und kein Wasserstoff im Biogas (im Wesentlichen CO<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub>) erzielt werden. Die für die Pyrolyse und Reformierung erforderliche Wärme wird über erhitzte Keramik-Kugeln zugeführt, die im Kreislauf den Prozess durchlaufen. Die Energie für die beiden wärmeverbrauchenden Teilprozesse wird durch Verbrennung des Biokoks aus der Pyrolyse bereitgestellt (Abb. 2.17).



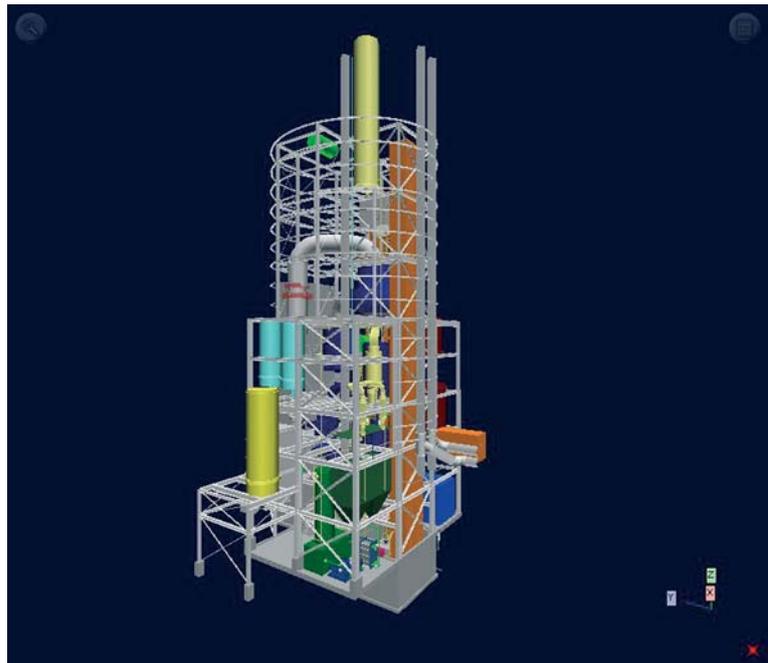
**Abbildung 2.17:** Verfahrensschema für den "Blauen Turm" (Blue Tower)

Quelle: H2Herten (2009)

Eine Pilotanlage des ersten "Blauen Turms" wurde von 2001 bis 2006 in Herten betrieben. Aufbauend auf diesen Erfahrungen soll der zweite und größere "Blaue Turm" (Abb. 2.18) zeigen, dass seine Marktreife bevorsteht: zum einen werden regenerative und sehr variable Einsatzstoffe entsorgt; zum anderen werden wertvolle Energieträger wie regenerativer Strom, Wasserstoff für Fahrzeugantriebe bereitgestellt (bis zu 1.300 Normkubikmetern pro Stunde Wasserstoff oder 120 kg/h für einen Betrieb von etwa 8.500 Brennstoffzellen-Pkw bei 12.000 km pro Jahr und 1 kg Wasserstoff pro 100 km). Der erzeugte Strom soll nach Angaben des Investors Solar Millennium AG der Versorgung von rund 12.000 Haushalten in Herten dienen.

**Kontakt:**

Dr. H.-J. Mühlen  
H2-Herten GmbH  
Tel.: 02366 / 58380 130  
muehlen@blue-tower.de  
www.blue-tower.de



**Abbildung 2.18:** Bildliche Darstellung der neuen Anlage in Herten

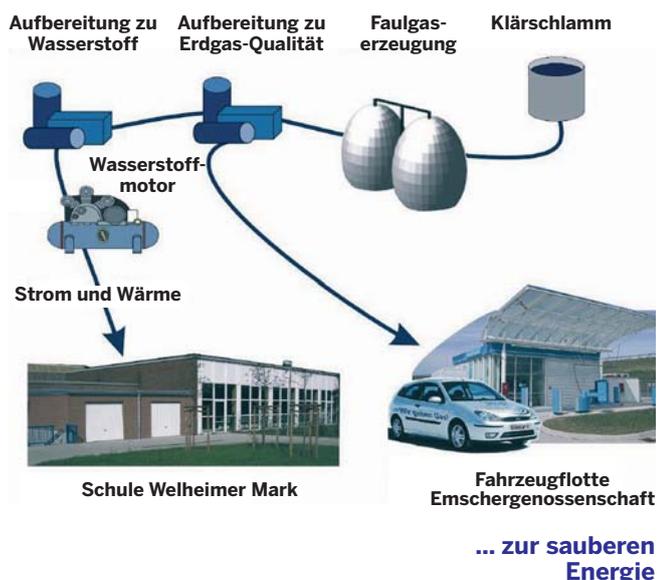
Quelle: H2Herten (2009)

## Kläranlagen

Die Wasserwirtschaft bietet wesentliche Potenziale zur Einführung einer nachhaltigen Wasserstoff-basierten Energieinfrastruktur. Geeignet sind insbesondere Kläranlagen, die sich aufgrund ihrer günstigen Standortmerkmale als Energieversorger für den stationären und mobilen Bedarf anbieten. Solche Kläranlagen (ca. 10.500 in Deutschland) sind in jeder Stadt vorhanden; sie liegen außerhalb der Wohnbebauung und sind infrastrukturell gut angeschlossen. Das Faulgas, das im Zuge der Schlammbehandlung 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) kann die Faulgasproduktion und damit das Wasserstoff-Potenzial deutlich gesteigert werden (Abb. 2.19).

Die Emschergenossenschaft als größter Kläranlagenbetreiber Deutschlands hat frühzeitig entschieden, die Aufbereitung von Faulgas zu Bioerdgas und Wasserstoff im Demonstrationsvorhaben "EuWaK – Erdgas und Wasserstoff aus Kläranlagen" auf der Kläranlage Bottrop zu testen und weiterzuentwickeln. Das Projekt wurde mit Förderung des Landes Nordrhein-Westfalen und der Europäischen Union realisiert.

### Vom Klärschlamm ...



**Abbildung 2.19:** Anlagenkomponenten: "EuWaK – Erdgas und Wasserstoff aus Kläranlagen" auf der Kläranlage Bottrop  
Quelle: EuWaK (2009)



**Abbildung 2.20:** Tankstelle für Bioerdgas und Wasserstoff – Demonstrationsvorhaben "EuWaK – Erdgas und Wasserstoff aus Kläranlagen" auf der Kläranlage Bottrop  
Quelle: EuWaK (2009)

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 betriebseigene Erdgasfahrzeuge abgegeben (Abb. 2.20). Im zweiten Schritt wird das übrige Bioerdgas in einem Dampfreformer zu Wasserstoff umgewandelt. Der maximale Faulgas-Input liegt bei 120 Nm<sup>3</sup>/h, die Aufbereitungskapazität für Bioerdgas beträgt maximal 72 Nm<sup>3</sup>/h, die für Wasserstoff 100 Nm<sup>3</sup>/h. Im Mittel besteht das Faulgas aus 62 Prozent CH<sub>4</sub>, 36 Prozent CO<sub>2</sub> sowie 2 Prozent N<sub>2</sub> und O<sub>2</sub>. 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. Somit konnte das Projekt zum ersten Mal die komplette dezentrale Wasserstoff-Infrastruktur – vom nachhaltigen Primärenergieträger Klärschlamm bis zum Wasserstoff-Endverbraucher – demonstrieren.

### Kontakt:

Daniel Rossol  
Emschergenossenschaft / Lippeverband  
Tel.: 0201 / 104-2480  
rossol.daniel@elgv.de  
www.elgv.de

### Nukleare Wasserstoffherstellung

Mit Ausnahme der photolytischen und Biomasse-basierten Wasserstoffherzeugung können alle Methoden zur Herstellung von Wasserstoff mit einem Nuklearreaktor als Lieferanten für Elektrizität und Prozesswärme gekoppelt werden. Allerdings ist nicht jeder Kernkraftwerkstyp gleichermaßen für die Kopplung mit einem Wasserstoff-erzeugenden Prozess geeignet. Konventionelle Leichtwasserreaktoren haben eine zu niedrige Kühlmittelaustrittstemperatur, könnten jedoch zur Herstellung von Wasserstoff mittels Elektrolyse verwendet werden. Wesentlich besser geeignet für die direkte Nutzung von Prozesswärme sind Hochtemperaturreaktoren (HTR) mit einer Austrittstemperatur des Kühlgases Helium bis zu 950 °C, deren Erreichen in der deutschen AVR-Anlage in Jülich unter Langzeitbedingungen sowie im japanischen HTTR eindrucksvoll bestätigt wurde.

### HTR für nukleare Prozesswärme

Die Verbindung zwischen Nuklear- und Prozesswärmanlage ist prinzipiell von der Methode der Wasserstoffherstellung unabhängig. Das aufgeheizte Primärkühlmittel gibt seine Wärme über einen Zwischenkreislauf an den chemischen Prozess ab. Der Zwischenkreislauf dient einem sicherheitstechnischen Zweck: Es soll verhindert werden, dass Primärkühlmittel unmittelbar in die chemische Anlage und umgekehrt Produktgas in das Reaktorgebäude gelangen können.

Die Dampfreformierung von Erdgas war in Deutschland schon früh im Visier der Forschung – mit dem Ziel, die für die Methan-Dampfreformierung benötigte Prozesswärme aus einem nuklearen Hochtemperaturreaktor auszukoppeln. Das Forschungszentrum Jülich hat in Zusammenarbeit mit der Industrie die hierzu notwendigen Wärmetauscherkomponenten entwickelt, die von ihrer Dimension her zur 125-MW-

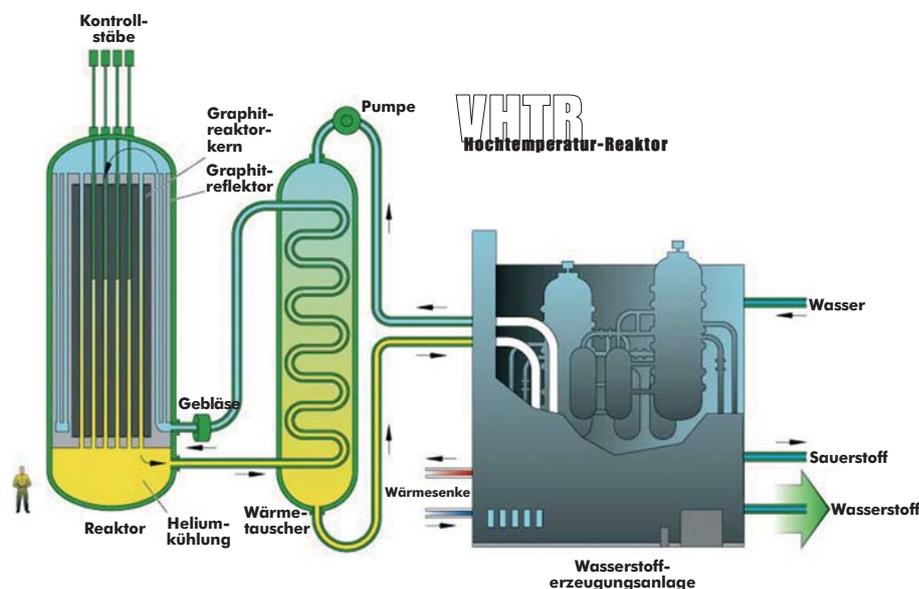
Leistungsklasse gehören. Sie sind in einem eigens konzipierten Versuchskreislauf im 10 -MW-Leistungsbereich über insgesamt 18.400 Stunden, davon 38 Prozent oberhalb von 900 °C, auf ihre Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit hin erfolgreich getestet worden.

Die Dampfreformierung von Methan ist unter nuklearen Bedingungen (mit Helium von 900 °C beheizten Reformerrohren) experimentell untersucht worden – zunächst in einem Einzelspaltrohr (EVA) mit für Industrieanlagen typischen Abmessungen (15 m Länge, Innendurchmesser 130 mm), später in Spaltrohrbündeln (EVA-II). Auch die Vergasung von Kohle durch Einsatz eines HTR wurde im Rahmen des Projekts "Prototyp Nukleare Prozesswärme" (PNP) erforscht und hat zur Errichtung von Pilotanlagen in Nordrhein-Westfalen zur Vergasung von Braunkohle und Steinkohle unter nuklearen Bedingungen geführt.

Ein neues, vielleicht revolutionäres Reaktorkonzept der nächsten Generation (Abb. 2.21) würde die Möglichkeit bieten, neben der klassischen Elektrizitätserzeugung je nach Bedarf auch nicht-elektrische Produkte wie Wasserstoff oder andere Kraftstoffe herzustellen.

#### Kontakt:

Dr. K. Verfondern, Dr. W. von Lensa  
Forschungszentrum Jülich GmbH  
Tel. 02461-613438  
k.verfondern@fz-juelich.de  
www.fz-juelich.de



**Abbildung 2.21:** Schema des VHTR, Option für eine Nuklearanlage der vierten Generation zur Wasserstoffproduktion

Quelle: Forschungszentrum Jülich GmbH (2009)





**Abbildung 2.23:** Pilotanlage zur solar-thermochemischen Wasserstoffherstellung auf einem Solarturm  
Quelle: DLR (2009)

### Eisenmischoxid-Prozess

Wird in einem thermochemischen Kreisprozess die notwendige Prozesswärme durch konzentrierte Sonnenstrahlung zugeführt, läuft der Prozess CO<sub>2</sub>-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 1.200 °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. 2.22). Der Sauerstoff wird dabei im Metalloxid gebunden, während das Metalloxid oxidiert und Wasserstoff freigesetzt wird. Im Rahmen der beiden HYDROSOL-Projekte wurden zwei Solarreaktoren entwickelt und im Sonnenofen des DLR in Köln erfolgreich getestet. Eine 100-kW<sub>th</sub>-Pilotanlage (Abb. 2.23) zur Durchführung dieses Prozesses wurde auf der Plataforma Solar de Almería in Südspanien installiert. Kürzlich konnte mit dieser Anlage zum ersten Mal erfolgreich Wasserstoff hergestellt und somit die Skalierbarkeit der Technologie gezeigt werden.

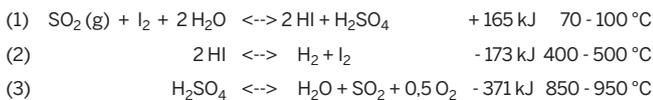
#### Kontakt:

Dr. Martin Roeb  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.  
Tel.: 02203 / 601-2673  
martin.roeb@dlr.de  
www.dlr.de

### Schwefel-Iod-Prozess

Der ursprünglich bei der Firma General Atomics in den USA entwickelte Schwefel-Iod-Kreisprozess wurde später von verschiedenen Forschergruppen wieder aufgegriffen und modifiziert. Die japanische Japan Atomic Energy Agency (JAEA) hat diesen Prozess bislang am weitesten vorange-trieben.

In seinem Verfahren setzt sich der Schwefel-Iod-Prozess (S-I-Prozess) (Abb. 2.24) aus drei Teilschritten zusammen:

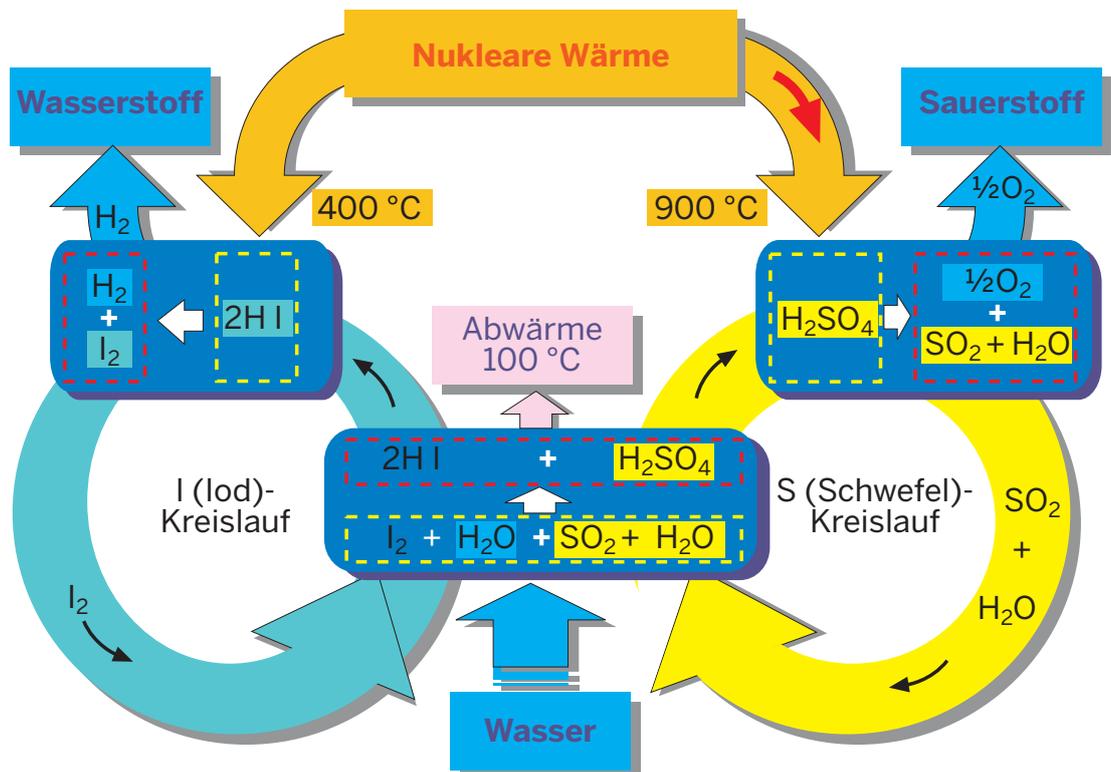


Gleichung (1) entspricht der so genannten Bunsen-Reaktion, in der bei Anwesenheit der Substanzen  $\text{SO}_2$  und  $\text{I}_2$  der Rohstoff Wasser eingespeist wird. Die Produkte dieser exothermen Reaktion sind zwei Säuren, die als HI-reiche bzw.  $\text{H}_2\text{SO}_4$ -reiche Phasen anfallen. Nach Trennung, Reinigung und Aufkonzentrierung werden die Säuren jeweils unter Zuführung von Wärme entsprechend der beiden anderen Reaktionsgleichungen zerlegt und damit Wasserstoff beziehungsweise Sauerstoff erzeugt.

Dieses Verfahren konnte bei JAEA inzwischen im kontinuierlichen Betrieb eine Woche lang im geschlossenen Kreislauf erfolgreich demonstriert werden. Die Anlage besteht aus mehr als 10 überwiegend aus Glas und Quarz gefertigten Prozesseinheiten und hat eine Produktionsrate von 30 Normlitern pro Stunde Wasserstoff erreicht. Der nächste Schritt beginnt in 2009: Auslegung und Aufbau einer Pilotanlage mit einer um den Faktor 1.000 erhöhten Ausbeute von 30 Normkubikmetern pro Stunde, die unter simulierten nuklearen Bedingungen (mit elektrisch beheiztem Helium von  $880 \text{ }^\circ\text{C}$  und einem Betriebsdruck von 3 MPa) betrieben werden soll. Ab 2010 könnte dann, so die Planung, durch den Anschluss an den japanischen nuklearen Hochtemperaturreaktor HTTR weltweit erstmalig "nuklearer" Wasserstoff mit einer Ausbeute in der Größenordnung von 1.000 Normkubikmetern pro Stunde hergestellt werden.

#### Kontakt:

Dr. K. Verfondern, Dr. W. von Lensa  
Forschungszentrum Jülich GmbH  
Tel.: 02461 / 613 438  
k.verfondern@fz-juelich.de  
www.fz-juelich.de



**Abbildung 2.24:** Prinzip des bei JAEA (Japan) untersuchten thermochemischen Schwefel-Iod-Prozesses

Quelle: Forschungszentrum Jülich GmbH (2009)

### Kosten-, Energie- und Ökobilanzen

Das Ergebnis einer am Lehrstuhl für Energiesysteme und Energiewirtschaft der Ruhr-Universität Bochum durchgeführten Studie (Wagner/Trudewind 2007) zeigt die niedrigsten Wasserstoff-Herstellungskosten für die Erdgasreformierung im großen technischen Maßstab auf (siehe Tabelle unten). Die Kosten beziffern sich auf 0,07 bis 0,08 €/Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>. Kleine Erdgasreformer mit Produktionskapazitäten bis 50.000 Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>/h liegen mit den Herstellungskosten von 0,17 bis 0,24 €/Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub> bereits signifikant höher. Unter den erneuerbaren Erzeugungsverfahren ist die Biomassevergasung der ökonomischste Prozess. Hier liegen die mittleren Erzeugungskosten zwischen 0,14 und 0,17 €/Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub> und sind damit fast mit der Erdgasreformierung im kleinen technischen Maßstab konkurrenzfähig. Die höchsten Herstellungskosten werden neben der noch nicht konkurrenzfähigen photobiologischen Erzeugung für die alkalische Hochdruckelektrolyse mit Windstrom ausgewiesen. Diese sind in erster Linie auf den Elektrizitätsbedarf und die Umwandlungsverluste zurückzuführen. Die Herstellungskosten für die Windstrom-Elektrolyse beziffern sich auf 0,44 €/Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>. Die angegebenen Werte für die photobiologische Erzeugung sind lediglich Kostenprojektionen und basieren auf Modellrechnungen, die bereits eine Steigerung der Umwandlungseffizienz und Kostendegradation bezüglich der Systemperipherie voraussetzen. Unter den getroffenen Annahmen erreicht die photobiologische Erzeugung nur bei sehr günstigen Randbedingungen konkurrenzfähige Herstellungskosten (0,05 €/Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>). Die Herstellungskosten bewegen sich in den Modellrechnungen zwischen 0,05 und 11,68 €/Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub> und weisen einen mittleren Wert von 0,54 €/Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub> auf. Diese Schwankungen sind weitgehend durch die Kostenannahmen für den Bioreaktor verursacht. Mit anderen Worten: Die Herstellungskosten für Wasserstoff werden maßgeblich durch die Investitionskosten bestimmt.

Wie eine Analyse der Herstellungskosten zeigt, ist die Kostenstruktur sowohl vom Herstellungsverfahren selbst als auch von der Anlagengröße abhängig. So nimmt der Anteil der Brennstoffkosten für die Erdgasreformierung von 50 bis 68 Prozent bei großen Anlagen auf 28 bis 40 Prozent bei kleinen Erdgasreformern ab. Die Kosten bei der Hochdruckelektrolyse werden maßgeblich von den Elektrizitätskosten bestimmt, die 75 bis 80 Prozent der Wasserstoff-Herstellungskosten ausmachen, während die Kosten bei der Biomassevergasung zu 40 Prozent vom Biomassebezug abhängig sind.

Die ökologischen Kennzahlen charakterisieren den Einfluss der H<sub>2</sub>-Herstellungsverfahren auf die Umwelt. Der kumulierte Energieaufwand an nicht regenerativen Primärenergien liegt für die Erdgasreformierung zwischen 1,56 und 1,57 MJ<sub>Prim</sub>/MJ H<sub>2</sub>, für die Biomassevergasung zwischen 0,37 und 0,96 MJ<sub>Prim</sub>/MJ H<sub>2</sub> und für die Elektrolyse auf Basis von Windstrom zwischen 0,12 und 0,14 MJ<sub>Prim</sub>/MJ H<sub>2</sub>. Die photobiologische Wasserstoffherzeugung weist zwar derzeit mit 210 MJ<sub>Prim</sub>/MJ H<sub>2</sub> die schlechteste Bilanz auf, doch zeigen Szenarienrechnungen, dass bereits mittelfristig erhebliche Einsparungen erzielt werden können. Langfristig scheint der kumulierte Energieaufwand auf 0,7 MJ<sub>Prim</sub>/MJ H<sub>2</sub> sinken zu können, womit eine positive Energiebilanz erzielt wird.

Das Treibhauspotenzial der Erdgasreformierung liegt im Bereich von 0,1, das der Biomasse bei 0,02 und das der Wind-Elektrolyse bei 0,006 kg CO<sub>2</sub>-Äqui./MJ H<sub>2</sub>. Die sich noch in der Grundlagenforschung befindliche photobiologische Wasserstoffherzeugung ist mit derzeit 10 kg CO<sub>2</sub>-Äqui./MJ H<sub>2</sub> das Verfahren mit dem größten Treibhauspotenzial. Szenarienrechnungen weisen allerdings eine Annäherung an die weiter fortgeschrittenen H<sub>2</sub>-Erzeugungsverfahren auf. So dürfte das Treibhauspotenzial mittelfristig auf 0,62 und langfristig auf 0,05 kg CO<sub>2</sub>-Äqui./MJ H<sub>2</sub> sinken.

Verfahren / Prozess	H <sub>2</sub> -Erzeugungskosten (€/Nm <sup>3</sup> H <sub>2</sub> )	Kostenanteile
<b>Erdgasreformierung:</b>		Brennstoffkosten (Erdgas):
<b>große Anlagen</b>	0,07 - 0,08	50 - 68 %
<b>kleine Anlagen</b>	0,17 - 0,24	28 - 40 %
<b>Alkalische Hochdruckelektrolyse (Windstrom)</b>	0,44	Elektrizitätskosten: 75 - 85 %
<b>Biomassereformierung (Battelle/FERCO)</b>	0,14 - 0,17	Brennstoffkosten: 40 % (Biomasse)
<b>Photobiologische H<sub>2</sub>-Erzeugung</b>	11,68 - 0,05 (Mittelwert 0,54)	Investitionskosten: bis zu 92 %

### 3. Wasserstoff-Logistik

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

- genutzte Primärenergie (Wind, Sonne, Biomasse, Erdgas),
- Technologie und Dimensionierung der Anlagen zur Wasserstoffherstellung,
- regionale und lokale Gegebenheiten (Tankstellendichte im Versorgungsgebiet).

Für einen Übergangszeitraum, in dem erneuerbare Energien nicht in ausreichendem Maß zur Verfügung stehen, kann der Zugriff auf Industrie-Wasserstoff 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.

#### Bereitstellung von Wasserstoff

Die technischen Voraussetzungen für die Nutzung des Energieträgers Wasserstoff im Verkehr sind verfügbar, doch fehlt es derzeit noch an einer flächendeckenden, nachhaltigen Wasserstoff-Infrastruktur. Mit Förderung des Landes Nordrhein-Westfalen hat Linde eine mobile Wasserstoffbetankungseinheit entwickelt, die Wasserstoff als Treibstoff für erste Testflotten zur Verfügung stellt. Der trailLH<sub>2</sub><sup>TM</sup> (Abb. 3.1 und 3.2) wurde als Allzweckfahrzeug entworfen und erlaubt maximale Funktionalität und Flexibilität bei minimalem Platzbedarf.



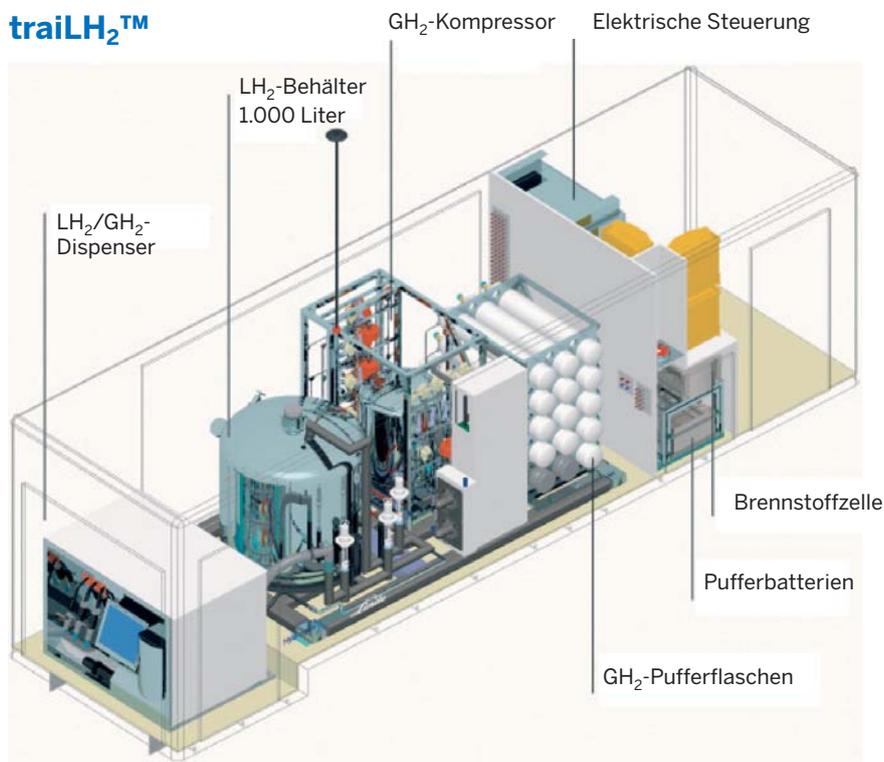
**Abbildung 3.1:** Der trailLH<sub>2</sub><sup>TM</sup>-Trailer – die mobile Wasserstoff-Tankstelle – auf dem Weg zum Kunden  
Quelle: Linde AG (2008)

**trailH<sub>2</sub><sup>TM</sup>**

Der trailH<sub>2</sub><sup>TM</sup> enthält einen 1.000-Liter-Dewar-Tank für flüssigen Wasserstoff, der bei -253 °C gespeichert wird. Über zwei verschiedene Einrichtungen, die beide schnelles Betanken erlauben, kann er nicht nur flüssigen, sondern auch gasförmigen Wasserstoff abgeben. Um jedoch gasförmigen Wasserstoff betanken zu können, reichen der Druck im Puffer-Speichertank und dessen Volumen nicht aus; daher wird der kryogene Wasserstoff in einem Kryo-Kompressor bis auf annähernd 450 bar komprimiert, was bei der Umwandlung von Flüssigwasserstoff (LH<sub>2</sub>) in Druckwasserstoff (GH<sub>2</sub>) für den Betankungsvorgang einen hohen Grad an Effizienz sichert. Durch die Verwendung einer integrierten Brennstoffzelle kann die Einheit autark betrieben werden – der gespeicherte Wasserstoff wird als Vor-Ort-Energieversorgung für die Brennstoffzelle genutzt. Auf diese Weise kann die gesamte Einheit unabhängig von einer externen Stromquelle betrieben werden. trailH<sub>2</sub><sup>TM</sup> ist eine Marke der Linde-Gruppe.

**Technische Einzelheiten der mobilen Betankungseinheit:**

Fahrzeug:	Mercedes Benz Atego, 17 t
LH <sub>2</sub> -Betankungseinheit:	1.000 Liter LH <sub>2</sub> entsprechend 270 Liter Benzin
GH <sub>2</sub> -Betankungseinheit:	350 bar, 13 x 50 Liter Volumen entsprechend 75 Liter Benzin
Brennstoffzelle:	13 kW <sub>el</sub>

**trailH<sub>2</sub><sup>TM</sup>****Kontakt:**

Henning Tomforde  
Linde AG  
Telefon 089 / 7446-2326  
henning.tomforde@linde-gas.com  
www.linde.com

**Abbildung 3.2:** trailH<sub>2</sub><sup>TM</sup> – Mobile Tankstelle

Quelle: Linde AG (2008)

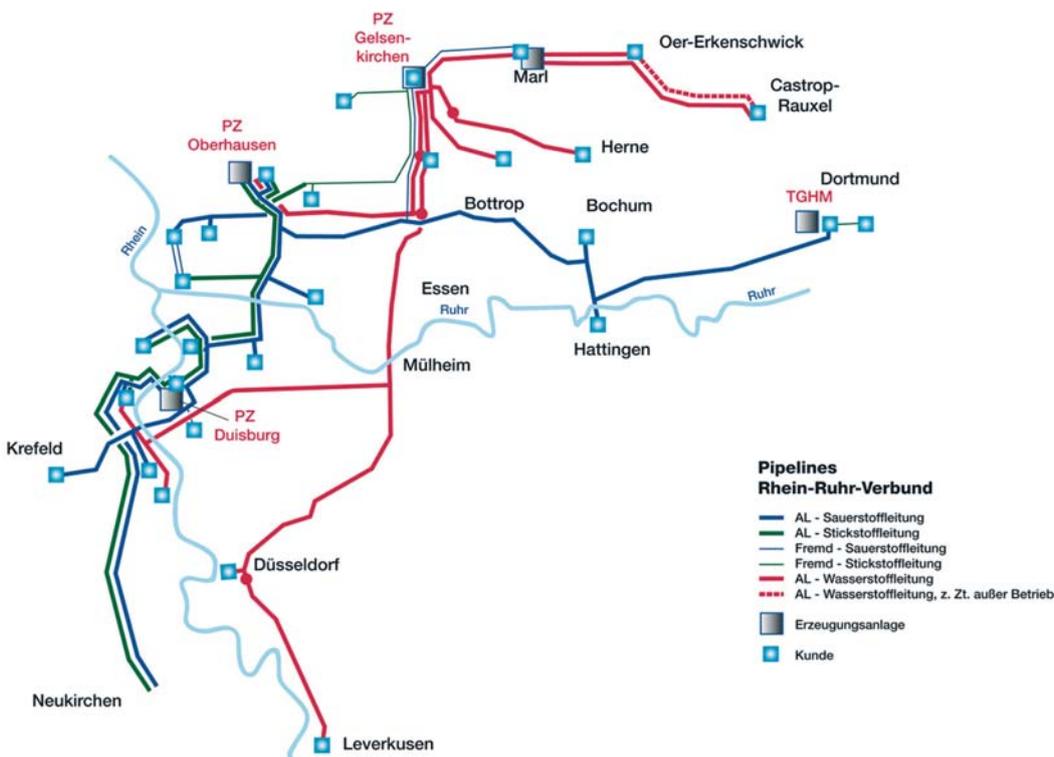
### Abfüllzentrum und Wasserstoff-Pipeline

Air Liquide Deutschland betreibt in Marl das größte Wasserstoffabfüllzentrum Europas. Der Wasserstoff wird im Chemiepark Marl im Wesentlichen mittels Dampfreaktor erzeugt und auf bis zu 300 bar verdichtet. Wasserstoff-Teilströme versorgen Produktionsanlagen im Chemiepark Marl, das Abfüllzentrum und die Pipeline. Im Abfüllzentrum erfolgt die Abfüllung von Wasserstoff-Trailern mit 200 bar Betriebsdruck und einem Inhalt von 3.500 bis 7.500 Kubikmetern (290 kg - 625 kg) sowie Stahlflaschen und Flaschenbündeln mit Betriebsdrücken von 200 und 300 bar. Mittels Nachreinigung werden Qualitäten bis 99,9999 Volumenprozent erreicht. Jährlich werden ca. 15.000 Trailer-Fahrzeuge sowie eine Vielzahl von Flaschen und Bündeln in Marl abgefüllt. Dieser Standort ist auch Ausgangspunkt für die größte 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. 3.3).

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 und Industrie-Wasserstoff eingespeist werden. Diese Pipeline wird zukünftig eine wesentliche Voraussetzung für eine kostengünstige Wasserstoff-Infrastruktur für mobile Brennstoffzellen-Anwendungen in Nordrhein-Westfalen sein. Mit einer Abfüllanlage, die im Rahmen des von Nordrhein-Westfalen geförderten Europäischen HyChain-Projekts ([www.hychain.de](http://www.hychain.de)) 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@air.liquide.com](mailto:andrea.feige@air.liquide.com)



**Abbildung 3.3:** Wasserstoff-Pipeline-Netz (240 km)  
Quelle: Air Liquide (2009)

**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 folgenden Technikooptionen (nach v. Wild et al. 2008) an (Abb. 3.4).

Bei einer umfassenden Bewertung der einzelnen Systeme (Wasserstoffbehälter, Speichermasse, Peripherie, Be- und Entladung) müssten Kriterien wie Speichereffizienz, Energiebedarf (Energieeffizienz), Lebensdauer, Be- und Entladungsgeschwindigkeit, Speicherform, Wasserstoffverluste sowie Kosten herangezogen werden. Von besonderer Bedeutung sind die nachfolgend erörterten Speicherformen: Hochdruck-gasspeicher, Flüssiggasspeicher und Feststoffspeicher.

### Speichertechnologieoptionen

**Physikalische Speicher**

**Hochdruckgasspeicher** (350 bis 700 bar, 23 bis 39 g H<sub>2</sub> pro Liter H<sub>2</sub>)  
 Tankspeicherdichte in Faserverbundbauweise bis 4,5 Gewichtsprozent H<sub>2</sub>

**Flüssiggasspeicher** (-253 °C, 1 bar, 71 g H<sub>2</sub> pro Liter H<sub>2</sub>)  
 Tankspeicherdichte mit Stahlhülle bis 6 Gewichtsprozent H<sub>2</sub>

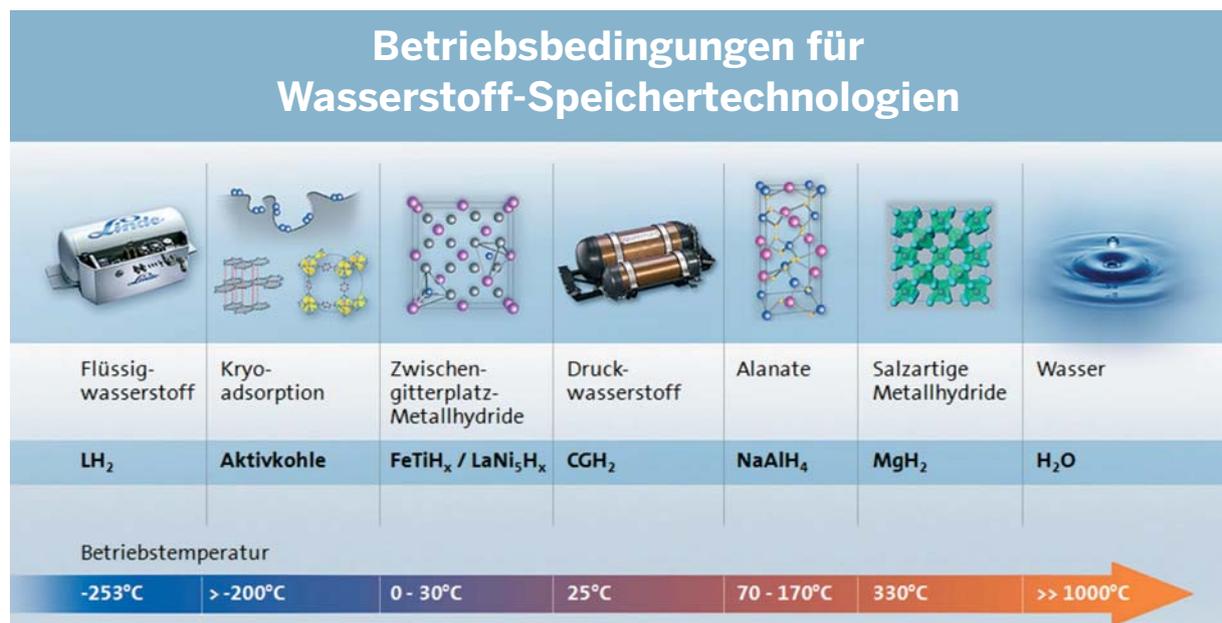
**Adsorptionsspeicher** (Van-der-Waals- oder andere Sorptionsbindungen)  
 z. B.: Zeolithe, C-Nanostrukturen, Metal-Organic-Frameworks (MOF)

**Chemische Speicher** (chemische Verbindungen des H<sub>2</sub> mit Metallen und Nichtmetallen)

**Metall-Hydridspeicher**  
 Klassische Metallhydride:  $\text{LaNi}_5\text{H}_6 \Rightarrow \text{LaNi}_5 + 3 \text{H}_2$   
 Komplexe Metallhydride:  $\text{NaAlH}_4 \Rightarrow \text{NaH} + \text{Al} + 3/2 \text{H}_2$

**Chemische Hydridspeicher**  
 $\text{NaBH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O} = 4 \text{H}_2 + \text{NaBO}_2$  (Beladung mit H<sub>2</sub> nicht im Pkw)

**Kovalente und flüssige organische Hydridspeicher**  
 Ammoniak, Borane, Kohlenwasserstoffe (Beladung mit H<sub>2</sub> nicht im Pkw)



**Abbildung 3.4:** Wasserstoff-Speichertechnologien  
 Quelle: GM Alternative Propulsion Center, Adam Opel GmbH (2009)

### 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.

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 Gewichtseinsparung 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. 3.5). Beide Varianten zeigen ähnliche Eigenschaften hinsichtlich des Gewichts. Im Vergleich zu "klassischen" Stahlbehältern ermöglichen diese Bauweisen eine Gewichtsreduzierung um rund 70 Prozent.



**Abbildung 3.5:** Typ-3-Behälter  
Quelle: Dynetek Industries Ltd (2009)

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-Behältlers 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 und Pkw (Abb. 3.6) 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.

#### Kontakt:

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

**Abbildung 3.6:** Ford C-MAX - Hydrogen ICE (700 bar, Typ-3-Behälter mit Edelstahl-Liner); siehe Abbildung 4.15  
Quelle: Ford Forschungszentrum Aachen (2009)



### Flüssiggasspeicher

Die Speicherung von Wasserstoff in flüssiger Form 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) wird aufgrund der höheren Energiedichte ein wirtschaftlicher Vorteil erreicht, 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. Flüssigwasserstofftanksysteme für Pkw lassen sich innerhalb weniger Minuten vollständig füllen (50 l/min).

Eine Herausforderung der Flüssigwasserstoffspeicherung ist das langsame Verdampfen des Inhalts durch Wärmeeinflüsse 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 3.8:** Flüssigwasserstoff-Tankkupplung  
Quelle: Linde AG (2009)



**Abbildung 3.7:** Schnitt durch einen Flüssigwasserstoffspeicher  
Quelle: Linde AG (2009)

Die heutigen Flüssigwasserstoffspeichersysteme für Pkw (Abb. 3.7) wiegen etwa 90 kg, wobei es sich hierbei um keine optimierten Tanksysteme handelt. Die gravimetrische Speicherdichte solcher Pkw-Systeme liegt etwa bei 7,5 Gewichtsprozent für die kleinsten Behälter mit Isolierung und bei 5 Gewichtsprozent für das gesamte Tanksystem. Die Speicherdichte steigt mit der Größe der Systeme. Dabei ist zu beachten, dass ein Tanksystem bereits sämtliche Komponenten bis hin zu Brennstoffzelle oder Motor beinhaltet. Erste Tankkupplungen für Flüssigwasserstoff wurden entwickelt und genormt (Abb. 3.8). Im Rahmen der StorHy-Initiative der EU ([www.storhy.net](http://www.storhy.net)) wurden alternative Materialien zum heute verwendeten Edelstahl (metallische Werkstoffe, faserverstärkte Kunststoffe) untersucht.

#### Kontakt:

Henning Tomforde  
Linde AG  
Telefon 089 / 7446-2326  
[henning.tomforde@linde-gas.com](mailto:henning.tomforde@linde-gas.com)  
[www.linde.com](http://www.linde.com)

### Feststoffspeicher

Neben Druck- und Flüssigwasserstoffspeicher 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  $H_2$ -Speicherkapazität untersucht: zum einen reversible Hydridverbindungen (Wiederbeladung unter Wasserstoffdruck möglich, z. B.  $NaAlH_4$ ) und zum anderen nicht-reversible Hydride (Wiederbeladung unter Wasserstoffdruck nicht möglich, zur Regenerierung sind chemische Umwandlungen notwendig, z. B. bei  $NaBH_4$ ). Für mobile Systeme werden reversible Hydridsysteme bevorzugt.

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

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

Für die Speicherung von Wasserstoff werden neue Materialien auf der Basis von komplexen Aluminiumhydriden erforscht und weiterentwickelt. Zwar erreichen komplexe Aluminiumhydride auf der Grundlage von  $NaAlH_4$  reversible Speicherkapazitäten von 5 Gewichtsprozent Wasserstoff (1 g Speichermaterial setzt rund 600 ml Wasserstoff frei), aber für Anwendungen im mobilen Bereich werden Materialien mit höherem Wasserstoffgehalt gesucht (Abb. 3.9).

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  $W_{el}$  erarbeitet.

#### Kontakt:

Dr. Michael Felderhoff  
Max-Planck-Institut für  
Kohlenforschung  
Tel.: 0208 / 306-2448  
felderhoff@mpi-muelheim.mpg.de



**Abbildung 3.9:** Beispiel für einen Speichertank

Quelle: GKSS (2009)

Anmerkung: Speichertank für 8 kg  $NaAlH_4$ , Bau und Entwicklung GKSS Forschungszentrum, Geesthacht, in Kooperation mit der TU Hamburg-Harburg (gefördert im Rahmen des EU-Projekts StorHY)

## 4. Nutzung von Wasserstoff

Die Wasserstoffnutzung auf dem Energiemarkt kann im Rahmen eines weiten Spektrums stationärer, mobiler sowie portabler energietechnischer Anwendungen erfolgen. Hierfür werden Motoren und Turbinen sowie vorrangig Brennstoffzellen als hocheffiziente, elektrochemische Energiewandler entwickelt. Die Brennstoffzelle erzeugt Strom und Wärme direkt aus Wasserstoff oder – nach entsprechender Aufbereitung – auch indirekt aus Methan, Methanol, Diesel, Kerosin und anderen Energieträgern.

Im Bereich der mobilen Anwendung lässt sich Wasserstoff direkt als Brenngas in Niedertemperatur-Brennstoffzellen (PEM, Polymer Electrolyte Membrane, oder auch PEFC, Polymer Electrolyte Fuel Cell) für Elektroantriebe nutzen. PEM-Brennstoffzellen werden auch für die Versorgung von Gebäuden mit Strom und Wärme entwickelt. Dabei können die Emissionen je nach Wasserstoffbereitstellung im Vergleich zu heutigen Umwandlungssystemen mit konventionellen Energieträgern sehr niedrig sein; allerdings erfordert die Wasserstoffbereitstellung eine entsprechende Infrastruktur.

Hochtemperatur-Brennstoffzellen auf der Basis von Karbonatschmelzen (MCFC, Molten Carbonate Fuel Cell) und oxidkeramischen Ionenleitern (SOFC, Solid Oxide Fuel Cell) werden vorzugsweise zur kombinierten Strom- und Wärmebereitstellung unter Nutzung von Synthesegasen ( $H_2$ -/CO-/CO<sub>2</sub>-Gemische aus Erdgas, Kohle oder Biomasse) eingesetzt.

### Brennstoffzellen-Übersicht

Es gibt eine Reihe von Gründen, warum heute intensiv an der Entwicklung von Brennstoffzellen gearbeitet wird: Klimawandel, Sicherung der Energieversorgung, Verstärkung der industriellen Wettbewerbsfähigkeit und Verbesserung der Luftqualität. Hierzu können Brennstoffzellen wesentlich beitragen, denn sie zeichnen sich aus durch:

- hohe elektrische (Teillast-) Wirkungsgrade,
- geringe Emissionen (Partikel, Gase, Geräusche),
- modulare Bauweise und wartungsarmer Betrieb sowie
- Einsatz verschiedener Energieträger.

Brennstoffzellen wandeln chemische Energie durch die elektrochemische Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser direkt in elektrische Energie und Wärme um.

#### Energieumsatz in der Brennstoffzelle

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



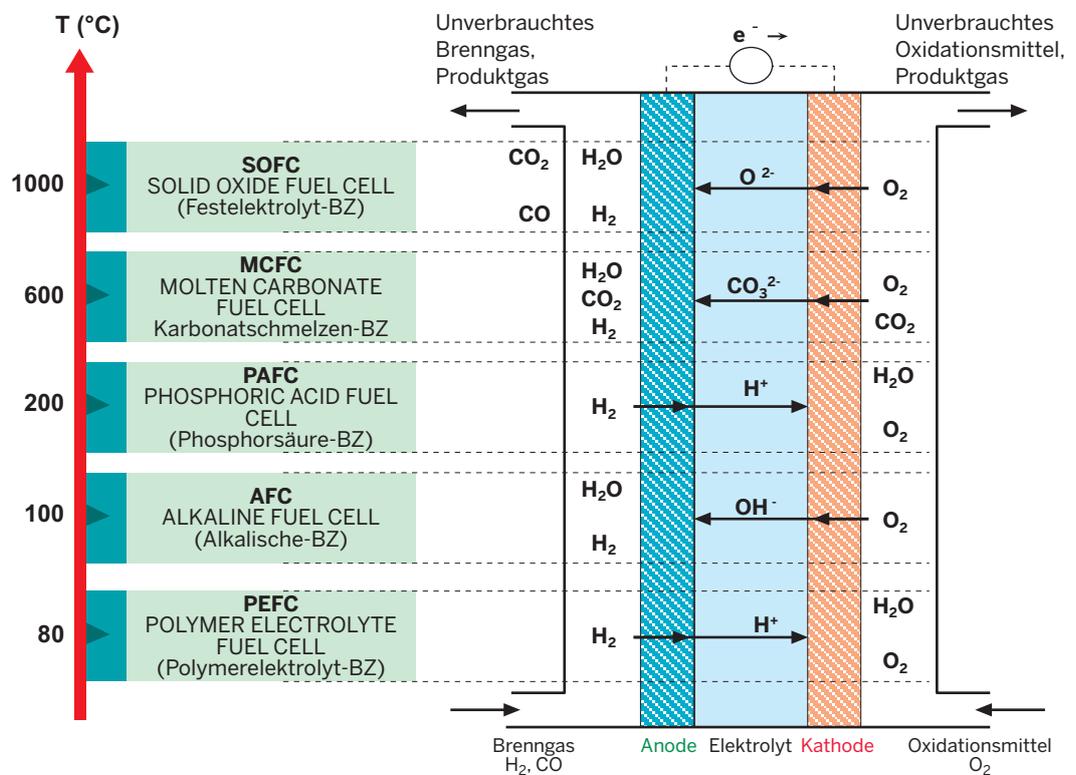
Theoretisch entstehen bei 25 °C und 1 bar:

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

Das bedeutet einen theoretischen Wirkungsgrad von 83 Prozent. Bei einem realen System müssen die gesamten Verluste innerhalb der Brennstoffzelle und in den peripheren Komponenten berücksichtigt werden, so dass der Gesamtwirkungsgrad niedriger, aber im Vergleich zu konventionellen Lösungswegen deutlich höher liegt.

Heute werden mehrere Brennstoffzellentypen entwickelt, die sich durch Elektrolyt, Betriebstemperatur und Reaktionsgase unterscheiden: Alkalische Brennstoffzelle (AFC), Membran-Brennstoffzelle (PEM), 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.

Am Beispiel einer Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle (PEM oder PEFC) sollen Funktion und Aufbau von Brennstoffzellen erklärt werden (Abb. 4.2). Eine PEM besteht aus einer katalytisch beschichteten Anode, einer Elektrolyt-Membran und einer katalytisch beschichteten Kathode. Wasserstoff ( $H_2$ ) strömt die Anode an und wird 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 ( $H^+$ ) bestehen somit aus Protonen. Die Elektrolyt-Membran ist ausschließlich für Protonen leitend, wodurch die Wasserstoffkerne von der Anodenseite auf die Kathodenseite gelangen können. Die Kathodenseite wird mit Luft angeströmt. Luftsauerstoff ( $O_2$ ) nimmt aus dem Stromkreislauf über einen Interkonnektor Elektronen auf, wodurch  $O^{2-}$  entsteht. Anschließend reagiert der Sauerstoff mit den Wasserstoffkernen zu Wasserdampf ( $H_2O$ ), der von der Zelle abgeleitet wird.

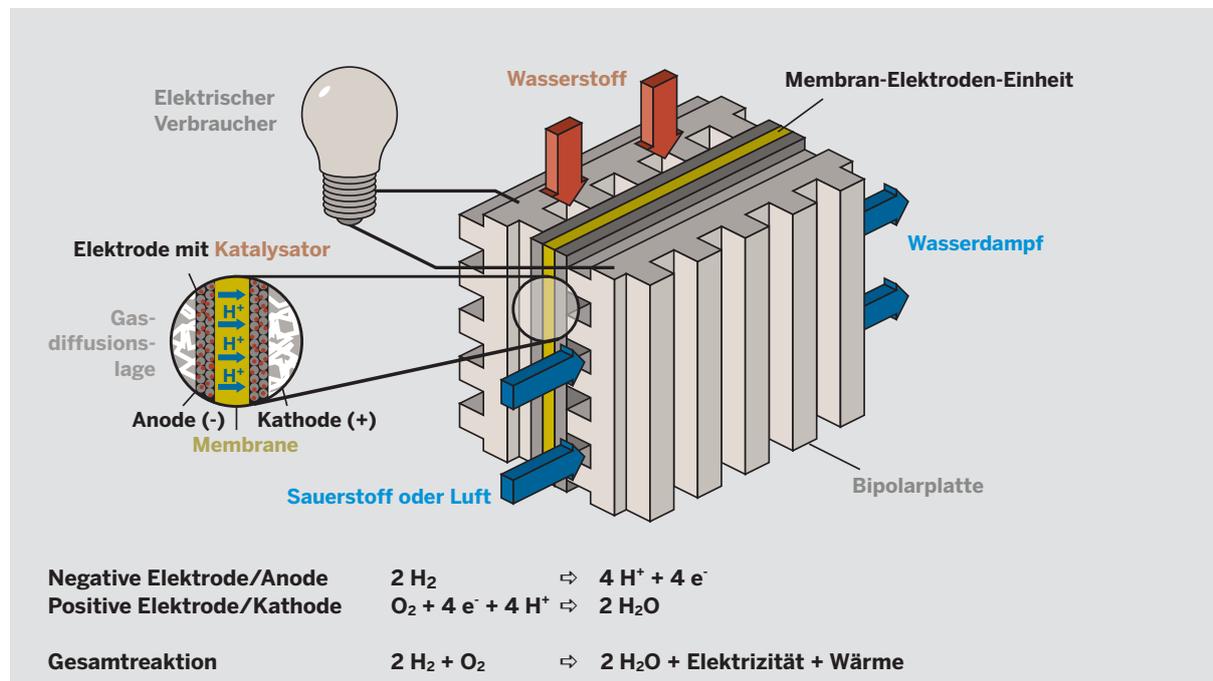


**Abbildung 4.1:** Klassifizierung von Brennstoffzellen (ohne DMFC für die direkte Nutzung von Methanol)

Quelle: Netzwerk Brennstoffzelle und Wasserstoff NRW

Durch den Elektronenfluss über den Stromkreislauf wird eine elektrische Leistung erzeugt. Die restliche Energie, die bei dem chemischen Prozess frei wird, geht in Wärme über. Die theoretische Zellspannung beträgt im Leerlauf 1,2 Volt. 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 so genannten Stapel (Stack) angeordnet. Die PEM 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 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, Hilfssysteme 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.



**Abbildung 4.2:** Aufbau einer Brennstoffzelle

Quelle: Netzwerk Brennstoffzelle und Wasserstoff NRW

### PEM-Entwicklungen

Für beide Energieträger – Wasserstoff und reformierte Kohlenwasserstoffe – hat das Zentrum für Brennstoffzellen-Technik (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.

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 cm<sup>2</sup> werden am ZBT zum Aufbau luft- oder wassergekühlter Brennstoffzellenstapel für einen Leistungsbereich von 100 bis 1.000 Watt (je nach Zellenanzahl) genutzt. Abbildung 4.3 zeigt eine typische Strom/Spannung-Kennlinie für einen 24-Zellen-Stapel.

Zusätzlich werden, aufbauend auf den Erfahrungen der NT-Technik, HT-Brennstoffzellenstapel entwickelt, die bei Betriebstemperaturen im Bereich 160 °C gegenüber Schadgaseinflüssen deutlich widerstandsfähiger sind und deren Temperaturniveau eine bessere Nutzung der Wärmeleistung ermöglicht. Diese Technologien (Abb. 4.4) werden am ZBT sowohl für die Entwicklung von reformatbasierten Systemen (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.

Kenndaten für den ZBT-Membran-Brennstoffzellen-Stapel mit 24 Zellen (Abb. 4.3)

- Platten: Compound-Spritzguß
- Baugröße: 18 cm / 14 cm / 16 cm (L/B/H)
- Gewicht: ca. 3 kg
- 50 cm<sup>2</sup> aktive Fläche pro Zelle
- aktive Querluftkühlung (Lüfter) oder Flüssigkühlung
- Strom: 40 A (0,6 V/Zelle) max.: 50 A
- Maximalleistung: 575 W / max.: 625 W

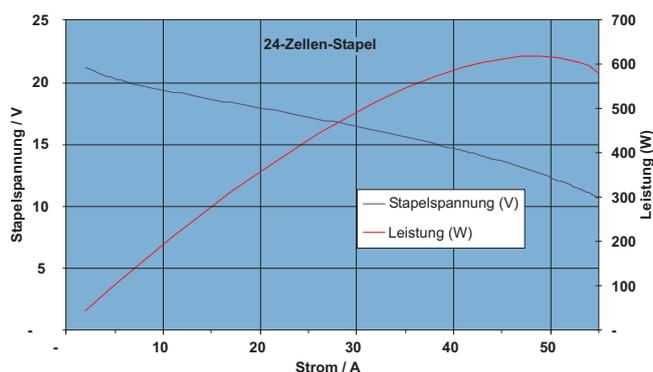


Abbildung 4.3: Strom/Spannung-Kennlinie

Quelle: ZBT (2009)

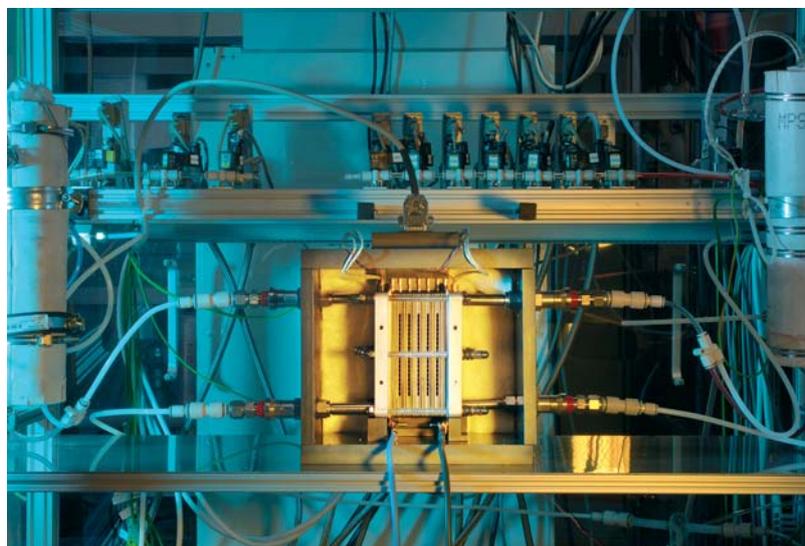


Abbildung 4.4: HT-Brennstoffzellen-Stapel mit 12 Zellen

Quelle: ZBT (2009)

#### Kontakt:

Dr. P. Beckhaus  
 ZBT Duisburg  
 Tel.: 0203 / 7598-3020  
 p.beckhaus@zbt-duisburg.de

### Hochtemperatur-Polymerelektrolyt-Brennstoffzellen

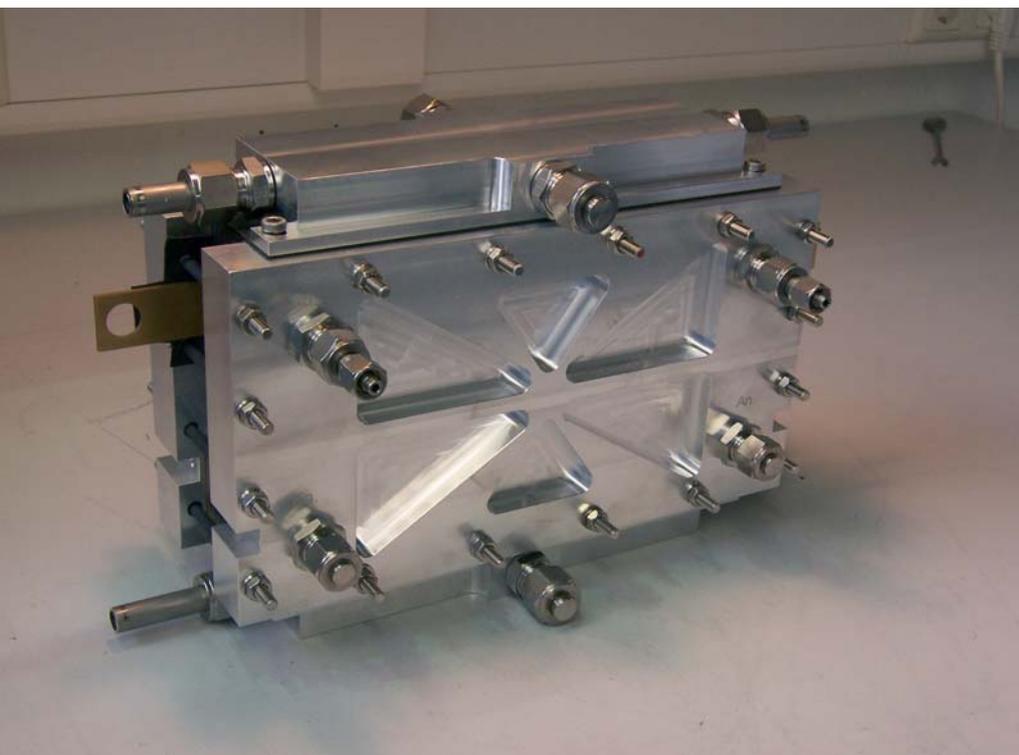
Wesentliche Energieeinsparungen lassen sich bei zunehmender Elektrifizierung von Kraftfahrzeugen, Schiffen und Flugzeugen durch eine besonders effiziente Stromerzeugung an Bord realisieren. Diese so genannten Bordstromversorgungen (Auxiliary Power Unit, APU) müssen aus Sicht der Endanwender in praktikabler Weise mit dem bereits an Bord befindlichen Kraftstoff betrieben werden, was die Reformierung von Diesel oder Kerosin (Mitteldestillate) erfordert. Hierbei bietet die Hochtemperatur-Polymerelektrolyt-Brennstoffzelle (HT-PEM) in Kombination mit einer entsprechenden Reformertechnologie an Bord die Möglichkeit, Strom effizient zu erzeugen, insbesondere auch in Stillstandszeiten des Antriebsaggregats.

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. Im Gegensatz zu Nafion-basierten Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzellen ist Wasser für die ionische Leitfähigkeit der Membran nicht notwendig, so dass eine Befeuchtung der Gase entfällt. Ein weiterer Vorteil der HT-PEM-Technologie ergibt sich aus dem hohen Temperaturunterschied zwischen dem Stapel und der Umgebungstemperatur; die Kühlung kann deutlich kompakter gestaltet werden als bei klassischen PEM-Systemen.

Bei allen Vorteilen muss jedoch verhindert werden, dass Säure aus der Membran ausgetragen wird. Der Säureaustrag wird durch flüssiges Wasser, das bei niedrigen Betriebstemperaturen in den Zellen vorliegen kann, begünstigt.

Seit 2005 werden im IEF-3 (Forschungszentrum Jülich) Arbeiten im Bereich der HT-PEM durchgeführt. Dies sind auf der einen Seite Arbeiten zur Elektrodenentwicklung und auf der anderen Seite Arbeiten zur Stack- oder Stapelentwicklung. Die derzeitigen Schwerpunkte umfassen drei Themen: Elektrodenentwicklung, Stapelentwicklung im 5-Kilowatt-Leistungsbereich sowie Modellierung und Simulation (Abb. 4.5).

Aufgrund der langjährigen Erfahrungen in Forschung und Entwicklung zur SOFC- und DMFC-Technologie sind Synergieeffekte vorhanden, welche die HT-PEM-Entwicklung beschleunigen. Bei den verfahrenstechnischen Simulationen zur Auslegung von Zellen und Stapel konnte auf Erfahrungen aus dem SOFC-Bereich zurückgegriffen werden. Darüber hinaus wurden zwei neue, speziell für die HT-PEM-Technologie ausgelegte Teststände aufgebaut und in Betrieb genommen. Mit diesen beiden Testständen wird nun der Stapel-Leistungsbereich bis 5 Kilowatt (elektrisch) abgedeckt.



**Abbildung 4.5:** Fünfezelliger HT-PEM-Stack  
Quelle: Forschungszentrum Jülich GmbH (2009)

#### Kontakt:

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

### Hochtemperatur-Brennstoffzellen (SOFC, MCFC)

Hochtemperatur-Brennstoffzellen erfordern aufgrund der Betriebstemperatur von 600 bis 900 °C andere Materialien als PEFC und DMFC. Sie werden durchgängig aus keramischen Materialien (Zelle und Dichtungen) sowie Spezialstählen aufgebaut. Die hohe Temperatur erlaubt es, nicht nur Wasserstoff als Brenngas zu nutzen, sondern auch Methan. Damit sind die Hochtemperatur-Brennstoffzellen prädestiniert für den Einsatz von Erdgas, das zu einem hohen Anteil aus Methan besteht, sowie von allen möglichen Mischungen aus Wasserstoff, Kohlenmonoxid und Methan (Synthesegase). Daher gehen die Entwicklungen in die Richtung stationärer Stromerzeugung – vom Einfamilienhaus über die industrielle Kraft-Wärme-Kopplung bis zur Stromerzeugung im Maßstab einiger MW<sub>el</sub> – mit Erdgas und biogenen Gasen aus Biogas-Fermentern oder Biomasse-Vergasung als Energieträger. Die Betriebstemperatur erlaubt nicht nur den Einsatz der Abwärme zur Dampferzeugung und Kraft-Kälte-Kopplung, sondern macht Brennstoffzellen weniger empfindlich für diverse Brenngasverunreinigungen wie Schwefel und Ammoniak. Grundsätzlich gibt es zwei verschiedene Typen, die sich durch den verwendeten Elektrolyten (Membranmaterial) und die Bauform unterscheiden (Abb. 4.1).

Die Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle (MCFC) verwendet ein Lithium-Salz, das in eine Aluminiumoxid-Kachel infiltriert ist. Bei Temperaturen von 500 bis 600 °C ist das Salz flüssig und ionenleitend, so dass Karbonat-Ionen als Ladungsträger fungieren können. Die MCFC benötigt daher in jedem Fall einen Anteil Kohlendioxid im Brenngas. Diese Anlagen werden in einer Größe von 250 bis 400 Kilowatt als stationäre Systeme in Industriebetrieben, Krankenhäusern und zur Fernwärmeversorgung eingesetzt. Als Brenngas dient Erdgas oder Biogas.

Die Festoxid-Brennstoffzelle (SOFC), wie sie im Forschungszentrum Jülich entwickelt wird, nutzt Zirkonoxid (Keramik) als Elektrolyten, der bei 600 bis 900 °C für Sauerstoff-Ionen genügend leitend wird. Diese Brennstoffzelle kann alle Brenngase und deren Mischungen verarbeiten. Sie weist einen hohen Wirkungsgrad von bis zu 60 Prozent für SOFC-Systeme auf. Werden SOFC mit Gasturbinen in der Art eines GuD-Kraftwerks gekoppelt, lässt sich ein Wirkungsgrad von 70 Prozent erreichen. SOFC können in einem weiten Leistungsspektrum von wenigen Watt bis zu hunderten Kilowatt realisiert werden (Abb. 4.6). Damit gehören sie zu den am flexibelsten einsetzbaren Brennstoffzellen, die geringe Anforderungen an die Zusammensetzung des Brenngases bei hoher Effizienz und breitem Leistungsspektrum stellen.



**Abbildung 4.6:** SOFC-Stapel (5 kW elektrische Leistung, mit Methan betrieben; 30 x 25 x 25 cm)  
Quelle: Forschungszentrum Jülich GmbH (2009)

SOFC eignen sich nicht nur für die stationäre Stromerzeugung im Einfamilienhaus und in der Industrie, sondern auch für die mobile Stromerzeugung an Bord von Fahrzeugen: aus Diesel oder Kerosin kann nach Verdampfung und Zersetzung in die Bestandteile Wasserstoff, Kohlenmonoxid und Methan direkt Strom erzeugt werden, völlig unabhängig vom Antrieb des Fahrzeugs. Diese Option ist für Lkw und Schiffe ebenso interessant wie für Flugzeuge und bestimmte Pkw.

#### Kontakt:

Dr. R. Steinberger-Wilckens  
Forschungszentrum Jülich GmbH  
Projekt Brennstoffzelle (PBZ)  
Tel.: 02461 / 61-2052  
r.steinberger@fz-juelich.de



**Abbildung 4.7:** Stack-Fertigung  
Quelle: Ceramic Fuel Cells GmbH (2009)

#### SOFC-Stack-Produktion in NRW

Der australische Brennstoffzellenhersteller Ceramic Fuel Cells Limited (CFCL) betreibt eine Fertigungsstätte für oxidkeramische Brennstoffzellen-Stacks im Industriepark Oberbruch in Heinsberg. Auf zunächst 900 Quadratmetern Fläche sollen in den nächsten Jahren rund um die Uhr bis zu 10.000 Stacks pro Jahr hergestellt werden. Weitere 3.000 Quadratmeter stehen zum zukünftigen Ausbau der Produktion zur Verfügung. CFCL zählt zu den führenden Entwicklern von Hochtemperatur-Brennstoffzellen (SOFC). Das Brennstoffzellensystem "BlueGen" mit 2 Kilowatt elektrischer Leistung hat nach Angaben von CFCL einen elektrischen Wirkungsgrad von 60 Prozent. Bei Auskopplung der Wärme soll der Gesamt-Wirkungsgrad auf 85 Prozent steigen. CFCL forscht, entwickelt und testet in den eigenen Betriebsanlagen in Melbourne und in Zusammenarbeit mit führenden Instituten für Forschung und Entwicklung.

In Heinsberg steht die erste vollautomatische Montageanlage für Hochtemperatur-Brennstoffzellen-Stacks; sie bringt Kompetenz in die Fertigungstechnologie nach Nordrhein-Westfalen.

Nach dem Auftragen einer Dichtungsmasse werden zunächst vier einzelne Zellen auf einer Trägerplatte angeordnet (Abb. 4.7). Anschließend werden mehrere Trägerplatten übereinandergelegt, dann in einem Brennofen rund 24 Stunden thermisch zusammengefügt und abschließend in einem Brennstoffzellenmodul getestet. CFCL baut zur Zeit eine globale Zulieferkette für Stack-Komponenten auf, die Geschäftschancen für Firmen in Nordrhein-Westfalen ergeben können. Die Brennstoffzellen-Stacks aus Heinsberg gehen an Systemhersteller weltweit, zum Beispiel an die Firma Bruns Heiztechnik in der Nähe von Oldenburg, wo die Stacks in verschiedene Brennstoffzellengeräte eingebaut werden.

#### Kontakt:

Frank Obernitz  
Ceramic Fuel Cells GmbH  
Tel.: 024 52 /153 763  
frank.obernitz@cfcl.com.au

### Stationäre Anwendungen

Mehr als ein Drittel der Endenergie wird in Deutschland im Haushalt für Raumheizung, Warmwasser und Strom verbraucht. Und weil Energieverluste dann am geringsten sind, wenn die Endenergie dort erzeugt wird, wo sie auch unmittelbar genutzt wird, ist die dezentrale Stromerzeugung und gleichzeitige Nutzung der Wärme besonders vorteilhaft. Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) ist die technische Herausforderung der Zukunft bei der Gestaltung einer effizienteren Energieversorgung. Die Brennstoffzellentechnik (PEFC, HT-PEM und SOFC) ermöglicht die simultane Produktion von Strom und Wärme in Hausheizungssystemen. Erdgas wird zu einem wasserstoffreichen Brenngas "reformiert" und in der Brennstoffzelle mit Luftsauerstoff direkt zu elektrischem Strom umgesetzt. Die Restwärme des gesamten Prozesses wird unmittelbar dem Heizungskreislauf und Brauchwasserspeicher zugeführt.

Hochtemperatur-Brennstoffzellen sind besonders gut geeignet für die gekoppelte stationäre Erzeugung von Strom und Wärme (100 bis 300 kW). Die Arbeitstemperatur der Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell) ist mit etwa 650 °C schon 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, Erdgas und flüssige Kohlenwasserstoffe mit der Abwärme der Brennstoffzelle zu Wasserstoff zu reformieren. Darüber hinaus kann die restliche Abwärme als Dampf in ein Fernwärmenetz eingespeist und genutzt werden. Auf diese Weise lassen sich hohe Gesamtwirkungsgrade erreichen.

Die Festoxid-Brennstoffzelle SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) kann in der Kraftwerkstechnik (mehrere MW Elektrizitätserzeugung) bei einer Arbeitstemperatur von ~1.000 °C aus Erdgas oder anderen fossilen Brennstoffen über die Reformierung zu Wasserstoff direkt elektrischen Strom erzeugen und zusätzlich hochwertige Prozesswärme zur Verfügung stellen. Die Abwärme der SOFC (Temperaturniveau 850 °C, Betriebsdruck 3 bar) kann in einer nachgeschalteten Mikro-Gasturbine direkt zur Stromerzeugung genutzt werden, so dass der elektrische Wirkungsgrad des Gesamtsystems auf knapp 60 Prozent steigt. Da die Restwärme bei dezentralen Anlagen auch noch genutzt werden kann, sind Brennstoffnutzungsgrade im Bereich von 90 Prozent erreichbar.

Kosten, Lebensdauer und Zuverlässigkeit der Brennstoffzellensysteme stehen im Fokus der Entwicklungs- und Demonstrationsvorhaben weltweit. In Japan können Endverbraucher kleine stationäre Brennstoffzellen für die Hausenergieversorgung bereits kaufen, wobei für 1 kW elektrische Leistung etwa 22.000 € investiert werden müssen; die japanische Regierung subventioniert davon 50 Prozent. In Deutschland sollen bis 2015 im Rahmen des vom Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP) geförderten "Callux"-Projekts 800 Brennstoffzellen-Heizgeräte in Gebäuden im Feldtest erprobt werden.

### Brennstoffzellensysteme für Ein- und Mehrfamilienhäuser

Energiesysteme mit Brennstoffzellen versorgen Ein- und Mehrfamilienhäuser 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.

Politik, Unternehmen und Forschung fördern seit 2008 mit dem Leuchtturmprojekt "Callux" eine umfangreiche Erprobung und Demonstration von etwa 800 Brennstoffzellen-Heizgeräten (Leistungsbereich 1 bis 5 kW<sub>el</sub>: Nieder- und Hochtemperatur-PEM und SOFC) auf ihre Alltagstauglichkeit in Ein- und Mehrfamilienhäusern. 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 Ruhrgas AG) beteiligt (Abb. 4.8).

Vaillant konzentriert sich bei der Entwicklung von Brennstoffzellen-Heizgeräten auf spezielle Marktsegmente: Mehrfamilienhäuser/Kleingewerbe und Einfamilienhäuser. Der Einsatz von Hochtemperatur-PEM-Membranen (HT-PEM) ist eine interessante Option, da diese Technologie gegenüber Niedertemperatur-PEM-Brennstoffzellensystemen (NT-PEM) zu robusteren, kostengünstigeren und einfacheren Systemen führen kann. Installation und Regelung der Systeme lassen sich aufgrund der höheren zulässigen Rücklaufemperaturen in der Heizungsanlage vereinfachen. Des Weiteren kann die HT-PEM-Brennstoffzelle höhere CO-Konzentrationen im Brenngas tolerieren, so dass keine Gasfeinreinigung mehr erforderlich ist. Die Herausforderungen bei der Entwicklung von HT-PEM-Brennstoffzellen-Heizgeräten sind Erhöhung der Zuverlässigkeit, Verlängerung der Lebensdauer und Reduktion der Kosten.

Eine andere Option sind für Vaillant oxidkeramische Brennstoffzellen (SOFC). SOFC-Brennstoffzellen-Heizgeräte lassen ein sehr robustes Systemdesign bei relativ niedrigen Kosten erwarten. Solche Systeme sind sehr gut für den Einsatz in Einfamilienhäusern geeignet. Die Vorteile für den Nutzer sind der hohe Heiz- und Warmwasserkomfort, die Reduzierung der Energiekosten sowie die Verwendung eines hocheffizienten, umweltfreundlichen Heizgeräts. Die Herausforderungen bei SOFC-Brennstoffzellen-Heizgeräten sind die Demonstration der technischen Machbarkeit in Bezug auf die Langlebigkeit des Systems, die Erreichung der Kostenziele und die Zyklusfestigkeit (Abb. 4.9).



**Abbildung 4.8:** Regionale Schwerpunkte des "Callux"-Projekts mit Standorten in Nordrhein-Westfalen  
Quelle: NIP-Callux (2008)



**Abbildung 4.9:** Laborsystemaufbau eines Vaillant-Brennstoffzellen-Heizgerätes (Zielwerte für SOFC-System: 1 kW<sub>el</sub>, 2,5 kW<sub>th</sub>)  
Quelle: Vaillant GmbH (2009)

#### Kontakt:

Vaillant GmbH  
Innovationshotline : 01805 / 999 210  
info@vaillant.de  
www.vaillant.de

### Strom aus Klärgas

Auf dem Klärwerk Köln-Rodenkirchen hat die GEW RheinEnergie AG im Jahr 2000 erstmalig in Europa eine Brennstoffzellenanlage errichtet, die Strom und Wärme aus Klärgas erzeugt. Klärgas entsteht im Rahmen der Abwasserreinigung in den Faulbehältern einer Kläranlage unter Luftabschluss als Abbauprodukt organischer Substanzen. Das bei der Schlammfäulung entstehende Gas enthält 60 bis 65 Prozent Methan; der Rest ist überwiegend Kohlendioxid. Im Gegensatz zu Erdgas sind im Klärgas Verunreinigungen enthalten, die auch in geringen Konzentrationen die katalytischen und elektrochemischen Prozesse in der Brennstoffzellenanlage behindern würden und daher entfernt werden müssen. Die Reinigungsstufe in Köln-Rodenkirchen besteht aus einer zweistufigen Grundreinigungseinheit sowie einer nachgeschalteten Adsorptionsstufe mit Partikelfilter.

Das gereinigte Klärgas wird in der Brennstoffzellenanlage mit Wasserdampf in einem Reformer/Konverter zu einem wasserstoffreichen Brenngas umgesetzt. Eine bei 200 °C betriebene phosphorsaure Brennstoffzelle (PAFC) wandelt die im Wasserstoff enthaltene chemische Energie in elektrische Energie um (Wirkungsgrad von > 40 Prozent). So lässt sich der Stromverbrauch der Kläranlage zu rund 50 Prozent durch Klärgasnutzung abdecken.

Auch die Abwärme wird genutzt: Frei werdende Wärme heizt das Bürogebäude, wird in einem Wärmetauscher an den Belebtschlamm übertragen und hält so die Temperatur des Faulbehälters auf 36 °C. Der Gesamtwirkungsgrad der Anlage (Abb. 4.10 und 4.11) liegt damit bei 85 Prozent. Im Mai 2007 wurden die Brennstoffzellen überarbeitet ("Refreshment") und wieder in Betrieb genommen.

Am 3.9.2009 wurde die Brennstoffzelle nach neun Jahren erfolgreichen Betriebs, bei dem in über 50.000 Betriebsstunden ca.  $6 + 10^6$  kWh Strom erzeugt wurde, außer Betrieb genommen.

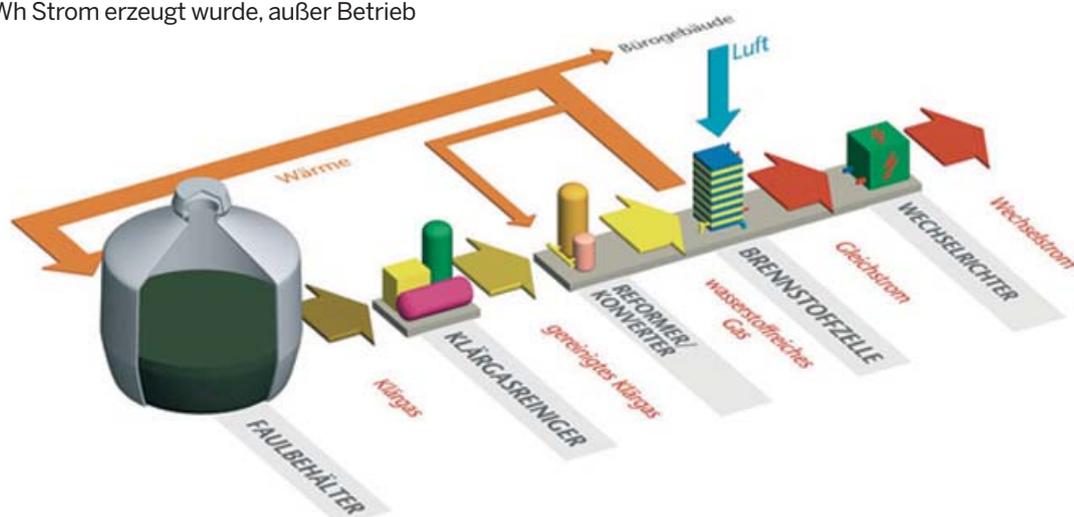


**Abbildung 4.10:** Brennstoffzellenanlage mit einer elektrischen Leistung von 200 Kilowatt

Quelle: GEW RheinEnergie AG (2006)

#### Kontakt:

Heinz Brandenburg  
 Stadtentwässerungsbetrieb Köln  
 Tel.: 0221 / 221-23024  
 info@steb-koeln.de



**Abbildung 4.11:** Anlagenkonzept zur gekoppelten Strom- und Wärmeenergieerzeugung aus Klärgas  
 Quelle: GEW RheinEnergie AG (2006)

### Brennstoffzellen in USV-Systemen

Ein besonderes Einsatzgebiet für Brennstoffzellen ist der Bereich der unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV). Die dafür entwickelten Brennstoffzellensysteme haben bereits die Marktreife erreicht und werden weltweit in größeren Stückzahlen aufgestellt. Der Markterfolg liegt darin begründet, dass trotz des Mehrpreises gegenüber Batterie- und Generatorlösungen eine Brennstoffzellen-USV deutliche Vorteile hat:

- deutlich längere Überbrückung von Netzausfallzeiten (in Abhängigkeit vom gespeicherten Energieträger),
- Entfall der Wartungs- und Austauschkosten für Batterien,
- Entfall der Wartungskosten für Motoren und der Kapitalbindung im Kraftstoff,
- emissionsfreie und geräuscharme Stromversorgung,
- Standort-spezifische Lösungen durch Einsatz von verschiedenen Energieträgern (Wasserstoff, Methanol, Propangas).

Im Fall eines Netzausfalls übernimmt zunächst eine kleine Pufferbatterie die Stromversorgung – so lange, bis das Brennstoffzellensystem hochgefahren ist. Während des Netzausfalls können die Speicher mit Energieträger (z. B. Wasserstoff oder Methanol) aufgefüllt oder getauscht werden, ohne dass das System abgeschaltet werden muss.

Zudem spielt die Lebensdauer eines Brennstoffzellen-Stapels bei der USV-Anwendung keine Rolle, da bereits die derzeit erreichte Lebensdauer für die zu erwartenden Netzausfallzeiten ausreicht. Lösungen für Gleich- wie auch Wechselstromanwendungen sind am Markt erhältlich.

### Unterbrechungsfreie Stromversorgung für die Telekommunikation

Die Power and Air Solution Management GmbH (PASM), eine Tochter der Deutschen Telekom AG, hat bereits 2005 die Einsatzmöglichkeiten von Brennstoffzellen-USV-Anlagen in einem NRW-Projekt untersucht. Nach einer Vortestphase im Testzentrum der Telekom, in der die einzelnen Komponenten getestet und die Parametrisierungen vorgenommen wurden, sind die Anlagen an den Feldteststandorten installiert worden.

Zur Fußballweltmeisterschaft 2006 in Deutschland wurden zwei Systeme aufgestellt: im RheinEnergie-Stadion in Köln sowie im Signal-Iduna-Park in Dortmund. Die Energiereserven konnten von 5 auf 38 Stunden beziehungsweise von 0,5 auf 23 Stunden erweitert werden. Weiterhin in Betrieb sind Anlagen an mehreren Netzvermittlungsknoten im Köln-Bonner Raum (Abb. 4.12). Neue Anlagen sollen kurzfristig in Betrieb gehen.



**Abbildung 4.12:** USV-Anlage der Deutschen Telekom AG in Bornheim  
Quelle: EnergieAgentur.NRW (2009)

#### Kontakt:

Norbert Kalhoff  
PASM Power and Air Condition Solution Management GmbH & Co. KG  
Tel.: 0251 / 13131-2423  
norbert.kalhoff@pasm.de

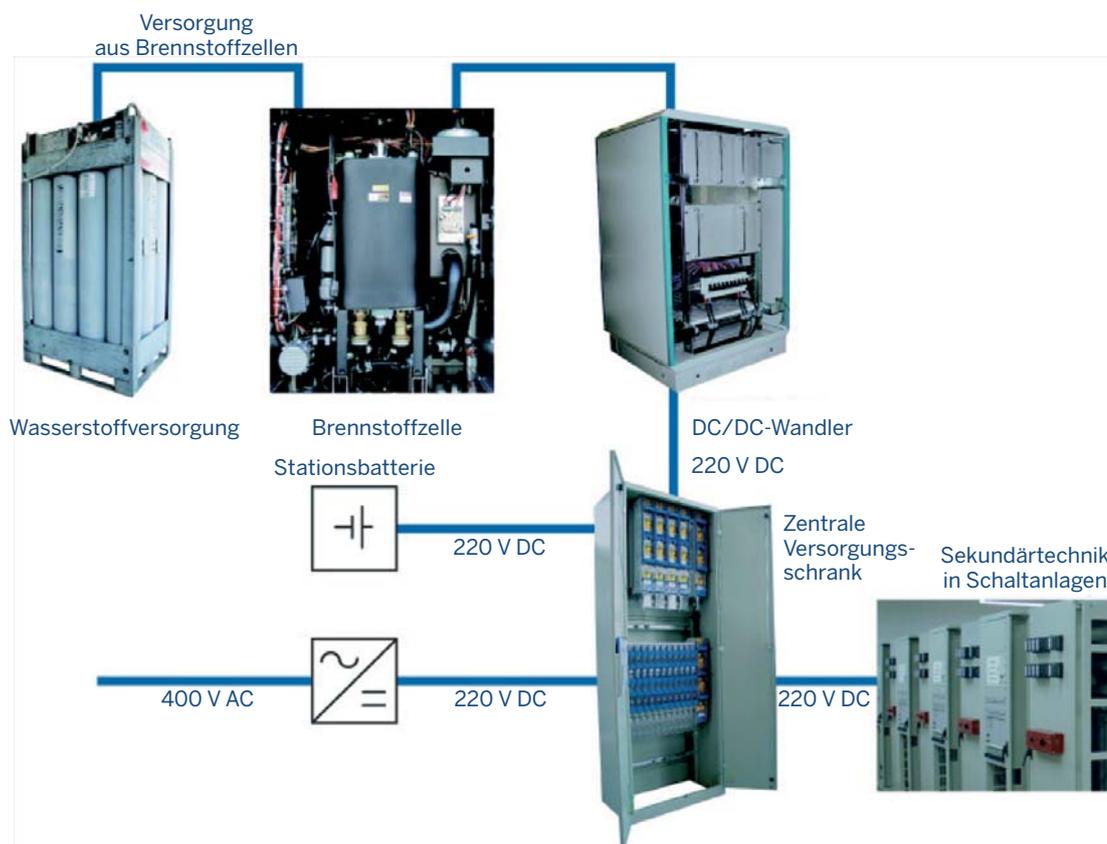
### Brennstoffzellen-USV für Netzschaltanlagen

Selbst bei Störungen in einem Hochspannungsnetz müssen die betroffenen Schaltanlagen weiterhin zuverlässig arbeiten können. Die hierzu notwendige Hilfsenergie liefern bislang ortsfeste Bleibatterien mit einer Betriebsspannung von 220 V DC und einer sehr großen Kapazität. Ein tragfähiges Redundanzkonzept, das auch bei einem längeren Ausfall des Netzes greift, ist insbesondere bei strategisch wichtigen Anlagen von großer Bedeutung (Abb. 4.13). Der Transportnetzbetreiber Amprion und das Dortmunder Systemhaus H&S Hard- und Software Technologie haben dieses Konzept in einem Pilotprojekt mit einer realen Hochspannungsschaltanlage praktisch umgesetzt. Das Backup-System besteht aus 5-kW-Brennstoffzellensystem, DC/DC-Wandler (48 V/220 V), Versorgungsschrank, H<sub>2</sub>-Flaschenbündel sowie Überwachungstechnik. Damit kann dieses System bei 220 V DC und einer Nenn-Verbraucherlast von 20 A über eine Zeit von rund 24 Stunden betrieben werden. Längere Ausfallzeiten lassen sich durch Vergrößerung der Wasserstoffbevorratung überbrücken.

Die Testphase des installierten Systems wird Aussagen zur Wirtschaftlichkeit und zu konkreten Zukunftsperspektiven dieser Lösung erlauben.

#### Kontakt:

Dipl.-Ing. Peter Abel  
H&S Hard- & Software  
Technologie GmbH & Co. KG  
Tel.: +49(0)231 5175-155  
Fax: +49(0)231 5175-195  
E-Mail: pabel@hstech.de  
www.hstech.de



**Abbildung 4.13:** Redundanzkonzept: Brennstoffzellen in der Gleichstromversorgung von Schaltanlagen  
Quelle: H&S Hard- & Software Technologie GmbH & Co. KG (2009)

### Mobile Anwendungen

Es gibt eine Reihe von Gründen, warum intensiv an neuen Energieträgern und Antrieben für den Straßenverkehr gearbeitet wird:

- Reduzierung des Treibhauseffekts ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ ),
- Verringerung der Abhängigkeit von fossilen Energieträgern (Erdöl, Erdgas) und
- Verbesserung der Luftqualität (limitierte Emissionen:  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ , Partikel,  $\text{C}_n\text{H}_m$ ).

Im Rahmen der Mobilitätsentwicklung sind die folgenden Voraussetzungen zu erfüllen:

- Verbesserung konventioneller Antriebe im Hinblick auf Effizienz und Emissionen,
- Entwicklung neuer Antriebe (Hybride, Batterie-Elektroantriebe oder Brennstoffzellen) und
- Einführung neuer Energieträger (Biokraftstoffe, regenerativer Strom, Wasserstoff).

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. 4.14):

- Hybrid-Antriebstechnik mit fossil-basiertem Verbrennungsmotor und einer größeren Batterie im Fahrzeug,
- rein elektrisch betriebene Fahrzeuge mit Batterie und gespeichertem Strom aus dem Netz sowie
- Brennstoffzellen-Hybridantriebe, in denen getankter Wasserstoff in Strom umgewandelt wird.

Beide letztgenannten Lösungswege werden gegenüber konventionellen Lösungen aber nur dann zu deutlich niedrigeren spezifischen Treibhausgasemissionen führen, wenn sie auf regenerativ erzeugten Wasserstoff oder Strom und nicht auf fossile Energieträger zurückgreifen – also nicht auf Wasserstoff aus Kohle und nicht auf Strom auf heutiger Strommix-Basis, solange die CCS-Technologie (Carbon Capture and Storage) weder Marktreife noch gesellschaftliche Akzeptanz erreicht hat. Ein Vergleich von Erdgas-Verbrennungsmotor und Wasserstoff-Brennstoffzellenantrieb (von der Erdgasquelle bis zum Pkw im Fahrzyklus) zeigt, dass eine deutliche Reduzierung der Treibhausgasemissionen (30 Prozent) bereits dann erreicht wird, wenn Wasserstoff aus Erdgas hergestellt wird.

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

Brennstoffzellensysteme als elektrochemische Energiewandler zur Stromerzeugung für die mobile Anwendung sind weltweit in der Entwicklung und Demonstration. Der Entwicklungsansatz für Brennstoffzellensysteme ist langfristig orientiert. Parallel und in Ergänzung dazu wird versucht, Batterie-betriebene Elektrofahrzeuge in speziellen Marktsegmenten zu platzieren, wenn Batterieprobleme, Ressourcen-Verfügbarkeit (Kupfer, Lithium, Kobalt, Mangan, Neodym) sowie die infrastrukturellen Voraussetzungen für "grünen" Strom so gelöst werden können, dass ein ausreichender Kundennutzen zu gewährleisten ist. So könnten im Jahr 2020 Batterie- und Brennstoffzellen-Fahrzeuge einen Marktanteil von etwa einer Million ausmachen.

Trotz bedeutender Fortschritte in der Batterietechnik (Lithium-Ionen-Technologie) 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 (Abb. 4.14).

#### Optimales Mobilitätsszenario – Bedarf eines innovativen Antriebsportfolios



**Abbildung 4.14:** Mobilitätsstrategien  
Quelle: Daimler AG (2009)

### Wasserstoffnutzung im Pkw

Die Nutzung im Verbrennungsmotor hat BMW mit dem Hydrogen 7 demonstriert. Das Fahrzeug aus der 7er-Reihe ist mit einem bivalenten Zwölfzylinder-Verbrennungsmotor ausgestattet, der sowohl mit Wasserstoff als auch mit herkömmlichem Benzin arbeitet. Der Wasserstoff wird flüssig in einem Kryotank gespeichert. Ford hat mit dem monovalenten C-MAX H<sub>2</sub>ICE ebenfalls ein Fahrzeug mit Wasserstoff-Verbrennungsmotor (2,3 Liter Hubraum, 82 kW Leistung) präsentiert, bei dem der Wasserstoff gasförmig bei 700 bar gespeichert wird (Abb. 4.15). Dieser Speicher ist ein Typ-3-Behälter mit Edelstahl-Liner. Die Entwicklung des Speichersystems mit Tank, Tankventil, Sicherheitsventil, Betankungskupplung und Betankungsnippel wurde durch das Land Nordrhein-Westfalen gefördert.

Weltweit arbeiten Automobilhersteller an der Verstromung von Wasserstoff in einer PEM-Brennstoffzelle. Konzeptfahrzeuge für Pkw und Busse (in der zweiten und dritten Generation) gibt es heute weltweit. Entsprechende Optimierungsaufgaben beziehen sich auf die folgenden Bereiche:

- Dauerhaltbarkeit, Zuverlässigkeit, Alltagstauglichkeit (Umgebungstemperaturen zwischen -20 und +45 °C, Kaltstartfähigkeit, Vibrationsfestigkeit und Mindestreichweite 400 - 500 km),
- Erhöhung der Brennstoffzellen-Lebensdauer (mind. 5000 h),
- Erhöhung der gravimetrischen und volumetrischen Leistungsdichte,
- neue Brennstoffzellen-Betriebsstrategien (Betriebstemperaturen >100 °C),
- Wärmeabfuhr, Luftversorgung und Wassermanagement (< 0 °C),
- Brennstoffzellen-Optimierung (Membran/Elektrolyt),
- Katalysatoroptimierung und Minimierung des Edelmetallbedarfs,
- Material- und Herstellungskosten einzelner PEM-Bausteine,
- Fahrzeugintegration einschließlich Wasserstoffspeicherung und
- Kostenreduktion.

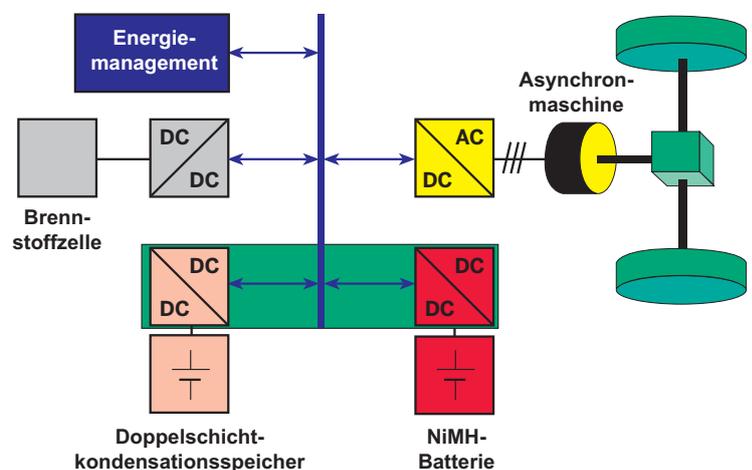
Für die oben genannten Problemstellungen gibt es schon weitgehend zufrieden stellende Lösungsansätze, so dass erste Kleinstserien in der Erprobung sind und auch Fahrzeuge an ausgewählte Kunden auf Leasingbasis ausgeliefert werden. Kürzlich haben einige Fahrzeughersteller in einer gemeinsamen Erklärung angekündigt, Brennstoffzellen-Fahrzeuge ab 2015 in Serie zu fertigen und auf den Markt zu bringen. Die größte verbleibende Herausforderung sind die immer noch deutlich höheren Kosten gegenüber verbrennungsmotorischen Antriebskonzepten.



**Abbildung 4.15:** Ford-Pkw C-MAX H<sub>2</sub>ICE mit Verbrennungsmotor und Druckwasserstoff-Speicher (700 bar)  
Quelle: Ford Forschungszentrum Aachen GmbH (2009)

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

Eine bedeutende Verbesserung des Energiemanagements und damit der Betriebsstrategie der Brennstoffzelle 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.



**Abbildung 4.16:** Triple-Hybrid-Konzept  
Quelle: FH Köln (2009)



**Abbildung 4.17:** Ford HySeries Edge: Plug-In-Pkw mit Batterie, Brennstoffzellen als "Range Extender" und Druckwasserstoff-Speicher (4,5 kg, 350 bar)

Quelle: Ford Forschungszentrum Aachen GmbH (2009)

Beim Triple-Hybrid-Konzept (Abb. 4.16) wird der Antriebsmotor im Wesentlichen durch die Batterie gespeist. Leistungsspitzen beim Beschleunigen werden beispielsweise durch Kondensatorspeicher abgedeckt, die auch als Zwischenspeicher für die beim Bremsen frei werdende elektrische Energie dienen. Das Brennstoffzellensystem lädt die Batterie permanent nach. Die Brennstoffzelle selbst wird dabei konstant an ihrem optimalen Arbeitspunkt gefahren und braucht nicht dem Leistungsbedarf entsprechend moduliert zu werden, was ihre Lebensdauer signifikant erhöht. Zudem kann sie deutlich kleiner dimensioniert werden, was die Kosten erheblich senkt.

Eine besondere Variante der Entwicklung von Brennstoffzellenantrieben wurde mit dem Ford HySeries Edge präsentiert (Abb. 4.17). Der Pkw (2.450 kg) für 5 Personen mit einer Reichweite von 360 Kilometern wird mit einem Allradantrieb (zwei Elektromotoren mit je 65 kW) angetrieben. Die Energiezufuhr erfolgt durch eine Li-Ion-Batterie (130 kW), die direkt über das Stromnetz (110/230 V) im Plug-In-Betrieb oder während der Fahrt über die PEM-Brennstoffzelle (40 kW) im "Range Extender"-Betrieb geladen werden kann.

Dabei arbeitet die Brennstoffzelle am optimalen Betriebspunkt, weil sie nur der Batterie-Aufladung dient und nicht von der Fahrleistung abhängig ist. Der Wasserstofftank (4,5 kg H<sub>2</sub> oder 540 MJ) gewährleistet eine Reichweite von 320 km oder 169 MJ pro 100 Kilometer (entsprechend 5,2 Liter Benzin pro 100 km), wenn der Ladezustand der Batterie vor und nach der Fahrt identisch ist.

Der Ford HySeries Edge ist – wie alle Brennstoffzellenfahrzeuge – nach dem kalifornischen Umweltgesetz ein Null-emissionsfahrzeug (Zero-Emission Vehicle, ZEV).

Andere Entwicklungen, beispielsweise von Daimler (Abb. 4.18), General Motors, Toyota und Honda, zeigen in ersten Demonstrationsflotten Fahrzeugantriebe mit Brennstoffzellen, bei denen das ebenfalls Wasserstoff-basierte Brennstoffzellensystem in einer Hybridschaltung leistungsabhängig betrieben wird. Neben Ford arbeiten auch viele andere Automobilfirmen an Plug-In-Lösungen für den Fahrzeugantrieb, um letztlich eine im Hybridantrieb vorhandene Batterie über Nacht in der Garage mit Netzstrom laden zu können.



**Abbildung 4.18:** Mercedes Benz B-Klasse F-Cell (80-kW-PEM-Brennstoffzelle, 100-kW-Elektroantrieb, Li-Ion-Batterie für 30- kW-Leistung, 400 km Reichweite, Druckwasserstoff-Speicher (700 bar), Verbrauch 103 MJ/100 km oder 2,9 l Diesel-Äquivalent pro 100 km)

Quelle: Daimler AG (2009)

Neuartige Antriebe für den Verkehr können nur dann ein großes Anwendungspotential 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 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. 4.19). Gewichtsreduzierung, Rückgewinnung von Bremsenergie oder Verkehrsleitsysteme können einen zusätzlichen Beitrag leisten.

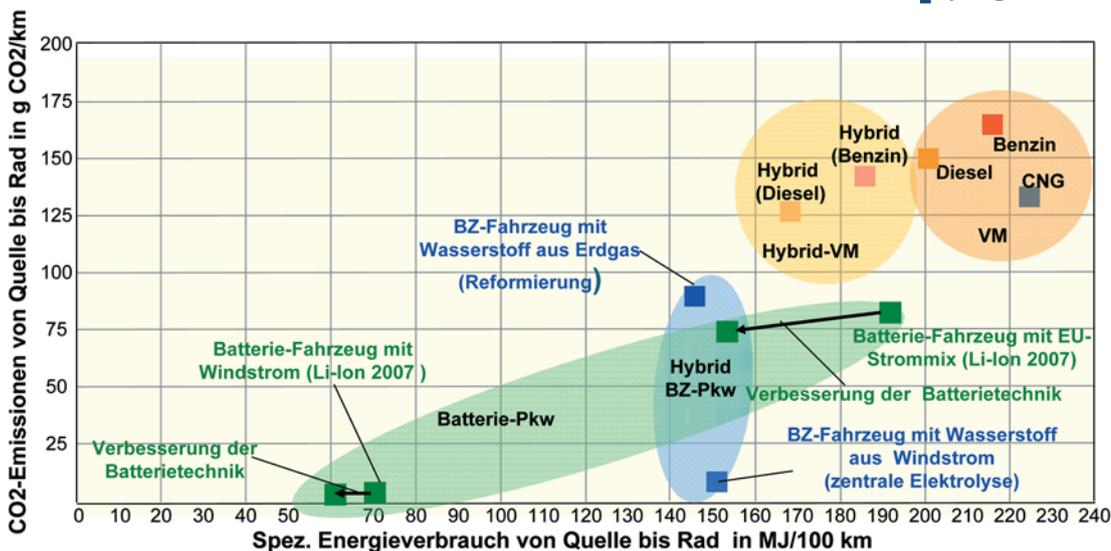
Abbildung 4.19 zeigt – entsprechend einer Analyse mit einem Kalkulationsprogramm für Energieumwandlungsketten nach [www.Optiresource.org](http://www.Optiresource.org) und auf der Basis von Daten der Europäischen Automobilindustrie ACEA/EUCAR und der L-B-Systemtechnik GmbH – die Zusammenhänge für die konventionellen Antriebe mit Verbrennungsmotoren (VM) und die entsprechenden Hybridantriebe ebenfalls mit Verbrennungsmotoren und einer zusätzlichen Batterie (Hybrid-VM) in den beiden Clustern oben rechts. Alle anderen Ergebnisse für die neuen Energieträger und Antriebe, wie sie mit Beispielen in Abbildung 4.19 dargestellt sind, lassen sich wie folgt charakterisieren:

- Die Elektrifizierung der Antriebe beginnt mit der Hybridisierung der Verbrennungsmotoren.
- Batterie-elektrisch betriebene Pkw auf der Basis erneuerbar erzeugter Elektrizität weisen die geringsten Treibhausgasemissionen und den niedrigsten spezifischen Primärenergieverbrauch in der Gesamtbilanz auf.
- Batterie-elektrisch betriebene Pkw lassen in Abhängigkeit von der Stromerzeugung (Windstrom und EU-Mix) eine große Bandbreite der Bilanzwerte für Treibhausgasemissionen und Primärenergieverbrauch zu.
- Brennstoffzellen-betriebene Elektrofahrzeuge zeichnen sich dadurch aus, dass sie alle Kundenansprüche erfüllen und dabei auch – gegenüber konventionellen Antrieben – eine erhebliche Senkung der Treibhausgasemissionen und des Primärenergieverbrauchs (Erdgas-basierter Wasserstoff) bewirken, einmal mehr, wenn regenerativ erzeugter Wasserstoff (Windstrom-Basis) zum Einsatz kommt.
- Die langfristig große Herausforderung wird darin bestehen, hinreichende Potenziale an regenerativ erzeugter Elektrizität bei hinreichender Infrastruktur und bezahlbaren Kosten bereitzustellen.

#### Kontakt:

Dr. Roland Krüger  
Ford Forschungszentrum  
Aachen GmbH  
Tel.: 0241 / 9421-454  
[rkruerge9@ford.com](mailto:rkruerge9@ford.com)

Dr. Jörg Wind  
Daimler AG  
Tel.: 07021 / 89-4614  
[joerg.wind@daimler.com](mailto:joerg.wind@daimler.com)



VM = Verbrennungsmotor;  
Hybrid-VM= Pkw-Elektroantrieb mit Brennstoffzellen als Energiewandler;  
Batterie-Pkw = Pkw mit Elektroantrieb und einer Li-Ion-Batterie

**Abbildung 4.19:** Spezifische Emissionen und Primärenergieaufwand für Fahrzeugantriebe unter [www.Optiresource.org](http://www.Optiresource.org) oder unter [www.daimler.com](http://www.daimler.com) (Nachhaltigkeit, Ökologie, Optiresource)  
Quelle: Daimler AG (2009)



**Abbildung 4.20:** Mini-Brennstoffzellenbus  
Quelle: Hydrogenics Europe GmbH (2009)

#### Wasserstoffnutzung in Bussen

Eines der ersten Brennstoffzellen-Batterie-Hybrid-Konzepte für den Antriebsstrang in Bussen wurde innerhalb des EU-Projekts HyChain-MINITRANS durch die Firma Hydrogenics in Gladbeck realisiert (Abb. 4.20). Als Basis dient ein Batteriebetriebener Bus der Firma Tecnobus aus Italien, in den 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).



**Abbildung 4.21:** Brennstoffzellen-Gelenkbus mit Triple-Hybrid-Antrieb (240 kW Antriebsleistung)  
Quelle: HyCologne (2009)

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 Pendelverkehr auf Messen geeignet: Die Busse werden auf der Messe Düsseldorf sowie seit Mai 2009 im Liniendienst der Vestischen Straßenbahnen GmbH in den Städten Herten, Gladbeck und Bottrop eingesetzt.

In einem gemeinsam durch das Land Nordrhein-Westfalen und die Niederlande geförderten Projekt wird ein 18 Meter langer Gelenkbus mit Brennstoffzellen-Triple-Hybrid-Antrieb entwickelt (Abb. 4.16 und 4.21). Ein 140 Kilowatt starkes Brennstoffzellensystem wird zusammen mit Batterien und Superkondensatoren eine Antriebsleistung von 240 Kilowatt generieren, so dass eine Höchstgeschwindigkeit von 70 km/h erreicht werden kann. Bei der Busplattform handelt es sich um ein Fahrzeug der Firma APTS aus Helmond. Das Brennstoffzellensystem stammt von NedStack aus Arnheim. Die Firma Vossloh-Kiepe mit Sitz in Düsseldorf zeichnet für das Energiemanagement verantwortlich, die Hoppecke Batterien GmbH aus Brilon entwickelt 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 arbeiten an der Entwicklung und der Simulation des Energiemanagements sowie des Speicherkonzepts mit. Der Wasserstoff wird gasförmig in Tanks mit 350 bar Druck gespeichert. Der Bus soll eine Reichweite von rund 300 km haben. Die ersten Busse werden bei der Regionalverkehr Köln GmbH sowie bei der GVB in Amsterdam zum Einsatz kommen.

#### Kontakt:

Dr. Frank M. Koch  
EnergieRegion.NRW  
Netzwerk Brennstoffzelle und  
Wasserstoff  
Tel.: 0211 / 866-42-16  
koch@energieregion.nrw.de  
www.brennstoffzelle-nrw.de

### Spezielle frühe Märkte

Derzeit werden erste Brennstoffzellensysteme für den Massenmarkt in frühen Märkten vorbereitet. Dabei stehen Ansätze zur Kostensenkung, Gewährleistung einer ausreichenden Lebensdauer sowie Bereitstellung der notwendigen Infrastruktur im Vordergrund der Entwicklungen. Diese frühen Märkte sind auf spezielle Anwendungen (Notstromversorgung, leichte Traktion, portable Geräte) und insbesondere auf den Batterieersatz im Watt- bis Kilowattbereich der entsprechenden konventionellen Anwendungen ausgerichtet. 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.

Es wird der Versuch unternommen, kleine Brennstoffzellenanwendungen in spezielle frühe Märkte einzubringen – dort, wo schon jetzt ein Vorteil für den Kunden sichtbar gemacht werden kann. Dazu gehören Lehr-, Lern- und Demonstrationsartikel genauso wie Anwendungen im portablen und militärischen Bereich, wo der Vorteil insbesondere im Batterieersatz liegt. Nach [www.fuelcelltoday.com](http://www.fuelcelltoday.com) nutzen die meisten Systeme zu drei Vierteln Wasserstoff und einem Viertel Methanol als Energieträger.

Ein Großteil der Lagertechnik-Fahrzeuge ist im europäischen Raum mit elektrischem Antrieb ausgestattet. Der Vorteil dieser elektrisch angetriebenen Fahrzeuge beruht auf einem leisen, abgasfreien Antriebskonzept, das für den Inneneinsatz an Produktionsstandorten notwendig ist. Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor bieten gegenüber Batterie-betriebenen Antrieben den Vorteil einer höheren und besseren Leistung sowie den Entfall langer Batterieladezeiten.

Unter derzeitigen Umweltaspekten werden jedoch Lösungen benötigt, die den Verbrennungsmotor durch umweltfreundliche Konzepte ohne Leistungs Nachteile ersetzen. Die Brennstoffzelle in Kombination mit verschiedenen Hochleistungsbatterien stellt eine sehr gute Möglichkeit dar, die in Wasserstoff gebundene chemische Energie für die Anwendung im Lagertechnik-Bereich nutzbar zu machen.



**Abbildung 4.22:** Lagertechnik-Stapler vom Typ FM20 Still  
Quelle: HOPPECKE Batterien GmbH & Co (2009)

Ein derartiges System gestattet erstmalig eine echte Trennung zwischen der Bereitstellung von Energie (Brennstoffzelle zur Versorgung der Grundlastanforderung) und der Leistung (Batterie zur Abdeckung hoher Lastspitzen und effiziente Nutzung von Rekuperationsenergie) – mit dem weiteren Vorteil, dass Mehrschichteinsätze gefahren werden können, ohne das Energieversorgungssystem wechseln zu müssen.

### Lagertechnik-Fahrzeuge

Die Antriebskonzepte lassen sich in derzeit elektrisch angetriebenen Lagertechnik-Fahrzeugen erproben, da aufgrund des vorgesehenen Bauvolumens für den Energiespeicher eine einfache Integration solcher Hybridsysteme erfolgen kann. Im Rahmen des von der Landesregierung Nordrhein-Westfalen geförderten Projekts BBH-MH "Brennstoffzellen-Batterie-Hybrid" wurden drei Prototypen für den Einsatz in einem Klasse-1- und zwei Klasse-2-Fahrzeugen durch Hoppecke konzipiert, entworfen und erfolgreich in Betrieb gesetzt. Hierbei handelt es sich um ein 80-V-System für einen Gegengewichtsgabelstapler vom Typ Still R60-25iL und zwei 48-V-Systeme für den Vertikalkommissionierer Still EK12i sowie den Schubmaststapler Still FM-X20 (Abb. 4.22).



**Abbildung 4.23:** Horizontal-Kommissionierer ECE 220 mit DMFC-Energiesystem DMFC V3.1

Quelle: Forschungszentrum Jülich GmbH (2009)

Im Forschungszentrum Jülich konnte ein Horizontal-Kommissionierer ECE 220 der Jungheinrich AG zusammen mit den Firmen Ritter Elektronik, ebmpapst und AKG im Rahmen einer Machbarkeitsstudie auf Brennstoffzellenbetrieb umgerüstet werden, wobei die Bleibatterie des konventionellen Lagertechnik-Fahrzeugs durch ein Direktmethanol-Brennstoffzellensystem ersetzt wurde (Abb. 4.23). Auf diese Weise konnte das komplette DMFC-Energiesystem technisch in der Größe des Batterietroges unter Beibehaltung der Funktionalität realisiert werden. DMFC-Systeme stellen eine interessante Alternative zu bisherigen Batterietechniken dar, zumal durch die hohe Energiedichte des Methanols längere Betriebszeiten ermöglicht werden, das zeitintensive Aufladen der Bleibatterien entfällt und im Mehrschichtbetrieb keine Zweitbatterien erforderlich sind.

Im Rahmen eines vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie geförderten Projekts werden zwei Systeme für erste Feldversuche aufgebaut. Dabei stehen Langzeitstabilität, Kostenreduktion, Wasserautarkie und Prototypenentwicklung im Vordergrund. Eine Steigerung des System-Wirkungsgrads der DMFC (30 Prozent bei einer Lebensdauer von mehr als 5.000 Stunden) bei höherer Methanol-Tankkapazität (> 20 Liter) und kurzen Tankzeiten ist eine Option, um elektrisch-betriebene Horizontal-Kommissionierer unter Einhaltung der Kostenziele für einen 24-Stunden-Einsatz zu ertüchtigen.

#### Kontakt:

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

#### Kontakt:

Dr. Bernhard Riegel  
HOPPECKE Batterien GmbH & Co. KG  
Tel.: 02963 / 61-778  
bernhard.riegel@hoppecke.com

#### Kontakt:

Stefan Schulte  
Masterflex  
Brennstoffzellentechnik GmbH  
Tel.: 02366 / 305191  
schulte@masterflex-bz.de

### Elektro-Kleinfahrzeuge

Bei der Firma Masterflex in Nordrhein-Westfalen wurde ein Cargobike als Elektro-Kleinfahrzeug entwickelt und für den Markt vorbereitet (Abb. 4.24) – als universelles Lastenfahrzeug für Postdienste, Lieferfirmen oder Werkverkehr. Neben der Antriebsenergie liefert die Brennstoffzelle zusätzlichen Strom für die Beleuchtung oder die Kühlung transportierter Ware. Die zusätzliche Traglast beträgt 150 Kilogramm, die durchschnittliche Reichweite 120 Kilometer. Eine schnelle Betankung wird durch einen Wasserstoff-Kartuschenwechsel innerhalb kürzester Zeit ermöglicht. Cargobikes sind in der Emscher-Lippe-Region im Rahmen des HYCHAIN-Projekts der Europäischen Union – [www.hychain.org](http://www.hychain.org) – im Einsatz.



**Abbildung 4.24:**

Elektro-Kleinfahrzeug (Cargobike) von Masterflex

Quelle: Masterflex GmbH

<b>Fahrzeugdaten:</b>	Hybridantrieb: E-Motor: 250 W Batterie: Li-Ion PEM: 250 W bei 24 V max. 25 km/ h
<b>Energieträger:</b>	Wasserstoff Kartuschen: 2 l Volumen bei 700 bar oder 15 MJ Wasserstoff
<b>Verbrauch:</b>	50 g/ 100 km (6 MJ/ 100 km)
<b>Reichweite:</b>	120 km (durchschnittlich)

### Antriebsunabhängige Elektrifizierung im Fahrzeug

Zahlreiche Anwendungen im Transportbereich erfordern zunehmend die Bereitstellung von antriebsunabhängiger elektrischer Leistung. Grund hierfür ist zum einen der stetig steigende Umfang an Komfort-, Sicherheits-, und Steuerungsfunktionen in Fahrzeugen. Zum anderen sollen Nebenverbraucher in steigendem Maß elektrifiziert werden, deren Versorgung traditionell mittels Abgriff mechanischer Leistung von der Antriebsmaschine erfolgte. Darüber hinaus besteht für Häfen und Flughäfen zunehmend die Forderung nach einer Verbesserung der lokalen Luftqualität, wozu der Einsatz von APUs (Auxiliary Power Units) in der Bordnetzversorgung von Schiffen beziehungsweise Flugzeugen substantiell beitragen kann.

Antriebsunabhängige elektrische Leistung kann in unterschiedlichen mobilen Anwendungen emissionsarm und mit guten Wirkungsgraden durch den Einsatz von APUs auf Basis von Brennstoffzellen bereitgestellt werden. Das zuvor beschriebene Anwendungsspektrum macht deutlich, dass insbesondere solche APUs aussichtsreich sind, die Strom auf der Basis vorhandener Kraftstoffe erzeugen. Mit Rücksicht auf weitere, durch die Anwendung definierte Randbedingungen ergeben sich Hinweise, die eine Auswahl der Kombination aus Brennstoffzellentyp, Kraftstoff und Verfahren der Brenngaserzeugung, bestehend aus Reformierung und Gasaufbereitung, ermöglichen. Die technische Realisierung bestimmter Kombinationen muss vielfach noch aufgezeigt werden.

Für die Bordstromerzeugung von Kraftfahrzeugen oder Flugzeugen kommen beispielsweise nur Brennstoffzellensysteme auf Basis von Kerosin, Diesel oder Benzin mit entsprechender Brenngaserzeugung in Frage, wie sie im Forschungszentrum Jülich entwickelt werden (Abb. 4.25). Für erste Nischenanwendungen stehen Kraftstoffe wie Wasserstoff und Methanol zur Verfügung. Beispiele sind die Notstromversorgung von Umsetzerstationen auf Basis von Wasserstoff und – für leichte Traktionsaufgaben bis zu 2 kW<sub>el</sub> – die Anwendung der Direct Methanol Fuel Cell (DMFC) zur Stromerzeugung für den Elektroantrieb.

Kraftstoffeigenschaften wie Siedeverhalten, chemische Zusammensetzung und Schwefelgehalt wirken sich stark auf die anzuwendenden Verfahren zur Umwandlung des Kraftstoffs in ein für die Brennstoffzelle nutzbares Brenngas aus. Besondere Beachtung verlangt das Siedeverhalten des Kraftstoffs bezüglich der Gemischbildung.



**Abbildung 4.25:** Autothermer Reformer für schwefelarme Mitteldestillate wie Kerosin und Diesel (links) und Wassergas-Shift-Reaktor für 10 kW<sub>th</sub>

Quelle: Forschungszentrum Jülich GmbH (2009)

Von den unterschiedlichen Brennstoffzellentypen sind Membran-Brennstoffzellen dank ihres einfachen Aufbaus und ihrer guten Handhabung besonders für die mobile Energieversorgung in APUs geeignet. Allerdings ist aufgrund der mangelnden Toleranz gegenüber Kohlenmonoxid eine recht aufwändige Gasaufbereitung erforderlich. Hochtemperatur-PEM kommen mit einer deutlich vereinfachten und SOFC ganz ohne Gasaufbereitung aus. Vielmehr werden Kohlenmonoxid oder auch Methan in der Brennstoffzelle umgesetzt.

Der Erfolg des Einsatzes der Brennstoffzellentechnologie wird maßgeblich davon abhängen, inwieweit die durch die Anwendung bestimmten Leistungsparameter erreicht werden und ein akzeptables Kostenniveau zu gewährleisten ist. Darüber hinaus gilt es, auch Kriterien wie Vibrationsbeständigkeit und – speziell bei SOFC – die Anzahl der erforderlichen An- und Abfahrzyklen über die Lebenszeit zu berücksichtigen.

#### Kontakt:

Prof. Dr. Ralf Peters  
Forschungszentrum Jülich GmbH  
Tel.: 02462 / 61-4260  
ra.peters@fz-juelich.de

## 5. Künftige Wasserstoff-Aktivitäten in Nordrhein-Westfalen

Mit der Einrichtung des Netzwerks Brennstoffzelle und Wasserstoff NRW hat die nordrhein-westfälische Landesregierung ein Instrument ins Leben gerufen mit dem Ziele, die Entwicklung der Brennstoffzellentechnologie in diesem Land voranzutreiben. Bislang wurden von der Landesregierung und von der Europäischen Union (Europäischer Fonds für Regionale Entwicklung, EFRE) rund 90 Millionen Euro für 90 Projekte zur Verfügung gestellt – bei einer Gesamtinvestition von 160 Millionen Euro. Das Themenspektrum der Projekte reicht von der Entwicklung einzelner Systemkomponenten (z. B. Verdichter und Sensoren) bis hin zur Entwicklung und Erprobung komplexer Brennstoffzellen-Applikationen im portablen, stationären und mobilen Bereich.

Mit dem im Jahr 2008 unter dem Dach der NRW Energie- und Klimaschutzstrategie beschlossenen Leitvorhaben "NRW Hydrogen HyWay" wurden die bisherigen Maßnahmen in NRW nochmals deutlich ausgeweitet. Die Landesregierung wird für Entwicklungs- und Demonstrationsprojekte sowie Infrastrukturmaßnahmen zusätzlich rund 60 Millionen Euro zur Verfügung stellen. Zwischen 2009 und 2011 sollen die bestehenden Aktivitäten nicht nur entlang der vorhandenen 230 Kilometer langen Wasserstoff-Pipeline, sondern auch an weiteren Standorten ausgebaut und intensiviert werden. Wasserstoff als Nebenprodukt aus vorhandenen Industrieprozessen bildet dabei den Startpunkt für erste Anwendungen und wird mittelfristig in ausreichender Menge und unter wirtschaftlich interessanten Randbedingungen verfügbar sein.

Erste Projektvorhaben wurden bereits gestartet:

- Entwicklung eines 18 Meter langen Brennstoffzellen-Batterie-Hybrid-Busses als deutsch-niederländisches Gemeinschaftsprojekt mit anschließendem Einsatz beim Regionalverkehr Köln (RVK);
- Betrieb zweier Brennstoffzellen-Midi-Busse bei den Vestischen Straßenbahnen in den Stadtgebieten von Herten, Bottrop und Gladbeck;
- Bau des Wasserstoff-Kompetenz-Zentrums H2Herten, wo verschiedenen Unternehmen eine umfassende Gebäude- und Wasserstoff-Infrastruktur für Forschungs- und Produktionsvorhaben zur Verfügung gestellt wird;
- Inbetriebnahme einer Wasserstoff-Tankstelle auf dem Gelände der Zeche Ewald in Herten;
- Inbetriebnahme einer weiteren Wasserstoff-Tankstelle an der Kläranlage Bottrop Welheimer Mark, deren Wasserstoff künftig aus Klärgas gewonnen wird.

Weitere Projekte sind in Vorbereitung. Bei allen Projekten stimmt sich das Netzwerk eng mit der Nationalen Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW) ab. So wird beispielsweise eine Wasserstoff-Tankstelle in Hürth zur Betankung des Busses des Betreibers Regionalverkehr Köln eine Förderung aus dem Nationalen Investitionsprogramm (NIP) der NOW bekommen.



## Internationale Aktivitäten

### HyRaMP

Nordrhein-Westfalen ist in der EU-Regionen-Partnerschaft HyRaMP (Hydrogen and Fuel Cell Regions and Municipalities Partnership) vertreten. HyRaMP hat sich zum Ziel gesetzt, den Einfluss der Regionen einschließlich Nordrhein-Westfalens in der Joint Technology Initiative (JTI) zu sichern. Die JTI ist eine Public-Private-Partnership zwischen der Industrie, der europäischen Forschungsgemeinschaften und der EU-Kommission zur Abwicklung von Brennstoffzellenprojekten. Zusammen wird über sechs Jahre verteilt fast 1 Milliarde Euro für Forschung, technologische Entwicklung und Demonstration investiert.

Über den Zusammenschluss mit der JTI können auch laufende Aktivitäten unter Beteiligung von Nordrhein-Westfalen fortgesetzt werden. Als Beispiel ist das europäische Projekt HyChain-MINITRANS zu nennen (Abb. 5.1).

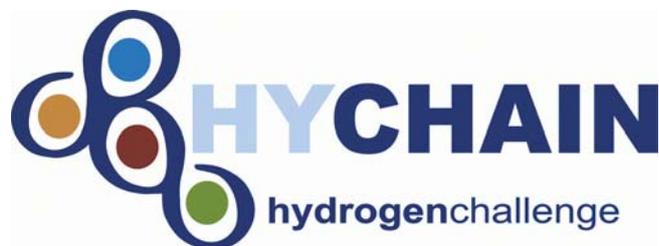
### Projekt HyChain-MINITRANS

Im Rahmen des zweistufigen Projekts HyChain-MINITRANS wurden zunächst über fünf Jahre in vier europäischen Regionen (Frankreich, Spanien, Deutschland und Italien) fünf verschiedene Brennstoffzellenfahrzeuge entwickelt, die zur Zeit in einem zweijährigen Feldtest erprobt werden. Dafür stellt die EU 17 Millionen Euro zur Verfügung. Durch eine ausreichend große Fahrzeuganzahl sollen Kostensenkungen erreicht werden.



**Abbildung 5.1:** Brennstoffzellenfahrzeuge des HyChain-Projekts

Quelle: [www.hychain.org](http://www.hychain.org)



In diesem Projekt sind die Städte Herten, Bottrop und der Kreis Recklinghausen Vorreiter beim Einsatz von innovativen und umweltfreundlichen Fahrzeugen. In den kommenden Jahren werden im nördlichen Teil der Metropole Ruhr Fahrräder, Kleinlaster und Busse getestet, die mit Wasserstoff und Brennstoffzelle angetrieben werden. Die Fahrzeuge sollen auf den Straßen ihre Praxistauglichkeit unter Beweis stellen.

- In Herten werden je zwei Kleinlaster für die örtlichen Stadtwerke und den städtischen Betriebshof eingesetzt. Zudem kommt ein Cargobike zum Einsatz.
- In Bottrop fahren je ein Lastenfahrrad und ein Kleinlaster für das Umweltamt.
- Abgerundet wird die Demonstrationsflotte durch zwei Midibusse der Vestischen Straßenbahnen GmbH, die im Linienverkehr auf Strecken in Bottrop, Gladbeck und Herten getestet werden. Ein späterer Einsatz in der Stadt Marl ist geplant.
- Aus der Metropole Ruhr kommen zwei Fahrzeugausrüster sowie der Wasserstofflieferant für das gesamte Projekt. Am Standort Bottrop sowie am Wasserstoff-Kompetenzzentrum in Herten wurde bereits die erforderliche Betankungsinfrastruktur aufgebaut.
- Eine weitere Institution ist die weltweit einzigartige Wasserstoff-Abfüllanlage für Hochdruckkartuschen im Chemiepark Marl. Von Marl aus werden alle 53 Fahrzeuge des europaweiten Feldtests mit dem Energieträger Wasserstoff versorgt.

#### Kontakt:

Dr. Andreas Ziolk  
 Cluster EnergieWirtschaft.NRW  
 Tel.: 0211 / 866-42-0  
[ziolk@energieregion.nrw.de](mailto:ziolk@energieregion.nrw.de)  
[www.brennstoffzelle-nrw.de](http://www.brennstoffzelle-nrw.de)

## Regionale Aktivitäten

### HyCologne - Wasserstoff Region Rheinland

In der Region Köln fällt Wasserstoff in großen Mengen in der lokalen Chemieindustrie (überwiegend Chlor-Produktion und Raffinerien) als Nebenprodukt an. Das Netzwerk "HyCologne-Wasserstoff Region Rheinland e.V." mit Sitz in Hürth bei Köln beabsichtigt, mit öffentlichen und industriellen Partnern große Teile dieses Nebenprodukt-Wasserstoffs als Energieträger für den Verkehr und weitere Projekte bereitzustellen. In diesem Zusammenhang werden verschiedene Projekte verfolgt – unter anderem der Bau einer Wasserstoff-Tankstelle sowie der Einsatz von Brennstoffzellenbussen in Zusammenarbeit mit dem Betreiber Regionalverkehr Köln.

#### Kontakt:

Boris Jermer  
Tel: 02233 / 406 123  
jermer@hycologne.de  
www.hycologne.de

### Wasserstoff-Kompetenz-Zentrum H2Herten

Im Rahmen der Initiative "Kommunale Entwicklungsschwerpunkte Ruhr" baut die Stadt Herten das Technologiefeld der Brennstoffzellen- und Wasserstofftechnik auf der Fläche des ehemaligen Bergwerks Ewald zu einem international führenden Kompetenzfeld aus (Projekt: Wasserstoff-Kompetenz-Zentrum H2Herten). Ziel des Projekts ist die Bündelung der Möglichkeiten im Technologieumfeld der Brennstoffzellen- und Wasserstofftechnik zur nachhaltigen Schaffung von zukunftsorientierten Arbeitsplätzen. Das im Herbst 2009 eröffnete Zentrum stellt verschiedenen Unternehmen der Brennstoffzellentechnik rund 1.800 Quadratmeter Bürofläche und 1.200 Quadratmeter Technikumsfläche zur Verfügung. Auf dem Areal "Ewald" wird außerdem der "Blaue Turm" errichtet (Abb. 5.2).

#### Kontakt:

Dieter Kwapis  
H2Herten GmbH  
45699 Herten  
Tel.: 02366 / 305-286  
dieter.kwapis@h2herten.de

### 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. Beteiligt sind die Städte Marl, Bottrop, Gladbeck und Herten. Der Verein verfolgt das Ziel, die Rahmenbedingungen in der Metropole Ruhr, insbesondere im nördlichen Ruhrgebiet, so zu gestalten, dass sich das Kompetenzfeld "Neue Energien" in dieser Region als europaweit bedeutender Standort für die Wasserstoff- und Brennstoffzellenindustrie etabliert. Im Vordergrund steht die Koordination der verschiedenen Projekte in der Region.

#### Kontakt:

Frank Noczyk  
h2-netzwerk-ruhr e. V.  
45699 Herten  
Tel.: 02366 / 305 284  
info@h2-netzwerk-ruhr.de



**Abbildung 5.2:** Wasserstoff-Kompetenz-Zentrum H2Herten  
Quelle: H2Herten (2009)

## Anhänge

### Netzwerk Brennstoffzelle und Wasserstoff NRW

Das Netzwerk Brennstoffzelle und Wasserstoff Nordrhein-Westfalen mit Sitz in Düsseldorf wurde im Jahr 2000 gegründet. Ziel des Netzwerks ist die Etablierung eines neuen Wirtschaftszweiges durch die gezielte Markteinführung von Brennstoffzellentechnik und entsprechenden Systemkomponenten in dazu geeigneten Pilotmärkten. Begleitet durch eine zielgerichtete Forschung und Entwicklung sowie den nachhaltigen Aufbau einer geeigneten Wasserstoff-Infrastruktur sollen schrittweise auch Massenmärkte im mobilen und stationären Bereich erschlossen werden.

Rund 350 Mitglieder aus Wirtschaft und Wissenschaft nutzen die Dienstleistungen des Netzwerks. Zu etwa 70 Prozent sind die Mitglieder Industriepartner (meist kleinere und mittlere Unternehmen) und zu 20 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 ist derzeit das größte seiner Art in Europa.

Das Netzwerk bietet eine Reihe von Leistungsbausteinen wie die Einrichtung von Arbeitskreisen oder die Durchführung von Fachveranstaltungen an. Im Bereich der Öffentlichkeitsarbeit organisiert das Netzwerk unter anderem Gemeinschaftsstände auf internationalen Messen.

Im Vordergrund der Netzwerktätigkeiten stehen Initiierung und Koordinierung von Kooperationsprojekten. Hier gibt das Netzwerk Hilfestellung bei der Partnerfindung sowie eine Erstberatung bei der Beantragung von Fördermitteln. Zahlreiche Projekte wurden so auf den Weg gebracht.

Zur Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses organisiert das Netzwerk zudem seit mehreren Jahren den Schülerwettbewerb "Fuel Cell Box NRW" (Abb. A.1): Im Jahr 2009 haben 200 Teams aus ganz Nordrhein-Westfalen teilgenommen.



**Abbildung A.1:**  
Preisträger im Fuel-Cell-Box-Schülerwettbewerb 2009  
Quelle: EnergieAgentur.NRW (2009)



#### Kontakt:

Netzwerk Brennstoffzelle und Wasserstoff  
c/o Ministerium für Wirtschaft, Mittelstand und Energie  
des Landes Nordrhein-Westfalen  
Haroldstr. 4  
40213 Düsseldorf  
Tel: 0211 / 86642-24  
info@brennstoffzelle-nrw.de  
www.brennstoffzelle-nrw.de

## EnergieRegion.NRW

Netzwerke knüpfen, Kräfte bündeln

### 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.

Die Aktivitäten des Clusters Energiewirtschaft – mit Namen EnergieRegion.NRW – konzentrieren sich daher auf die Beschleunigung von Innovationsprozessen und der optimierten Markteinführung innovativer Produkte.

**Abbildung A.2:** Wirbelschichttrocknung mit interner Abwärmenutzung im RWE-Kraftwerk Niederaußem  
Quelle: RWE AG (2009)



### Mitmachen, mitgestalten, mitprofitieren

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 Angebotspektrums sowie zur Regionalisierung ihrer eigenen Leistungskompetenz.

### 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.

### Erfolgreich durch Kooperationen

Das Cluster EnergieRegion.NRW steht für Innovationskraft, Tradition, Unabhängigkeit und Technologieoffenheit. Die EnergieRegion.NRW bündelt 3.300 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. 5.200 Fachkräfte arbeiten in den Arbeitsgruppen und Netzwerken des Clusters mit. Es versorgt 30.000 Multiplikatoren und Entscheidungsträger mit Informationen und Ergebnissen.

### 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.



**Abbildung A.3:** Windenergieanlage  
Quelle: EnergieAgentur.NRW (2009)

### Management aus einem Guss

Das Management der EnergieRegion.NRW liegt bei der EnergieAgentur.NRW. Der Clustermanager und ein Team aus acht Netzwerkmanagern sind kompetente und erfahrene Ansprechpartner für die Akteure der EnergieRegion.NRW mit weiteren Partnern im In- und Ausland. Die Partner der Netzwerke werden vom Clustermanagement bei unternehmensübergreifenden und gegebenenfalls von Forschungseinrichtungen begleiteten Projekten von der ersten Idee bis zur Markteinführung unterstützt.

#### Kontakt:

EnergieRegion.NRW  
c/o Ministerium für Wirtschaft, Mittelstand und Energie  
des Landes Nordrhein-Westfalen  
Haroldstraße 4  
40213 Düsseldorf  
Tel.: 0211 / 86642-0  
info@energieregion.nrw.de  
www.energieregion.nrw.de



**Abbildung A.4:** Laborarbeiten  
Quelle: Christoph Kniel



### Cluster EnergieForschung.NRW

Das Cluster EnergieForschung.NRW (CEF.NRW) versteht sich als Ansprechpartner zu allen Fragen der Energieforschung in Nordrhein-Westfalen. Es treibt die koordinierte Zusammenarbeit von Forschungs- und Wissenschaftseinrichtungen mit der Wirtschaft voran. Dadurch wird den Universitäten, Fachhochschulen und Forschungsinstituten die Möglichkeit geboten, Drittmittel zu akquirieren, sich als Know-how-Träger zu profilieren und ihre Reputation zu erweitern.

Dabei orientiert sich der Cluster EnergieForschung.NRW an den Schwerpunkten nordrhein-westfälischer Energieforschung und fasst sie in drei Säulen zusammen:

- zentrale Energieerzeugung,
- dezentrale Energieerzeugung,
- biologische Erzeugung von Energieträgern.

Sie werden verbunden durch zwei wichtige Querschnittstechnologien:

- Energienetze,
- Energieökonomie.

Cluster EnergieForschung.NRW								
zentrale Energieerzeugung			dezentrale Energieerzeugung			biologische Erzeugung von Energieträgern		
fossil	nuklear	solar	Wasserstoff und Brennstoffzelle	Photovoltaik und dezentrale Systemtechnik	elektrische und thermische Energiespeicher	innovative Pflanzenproduktion	Pflanzenverarbeitung	Bioökonomie
<b>Energienetze</b>								
<b>Energieökonomie</b>								

Die Säule der zentralen Energieerzeugung beinhaltet das für Nordrhein- Westfalen so wichtige Thema der Kraftwerkstechnik im fossilen, nuklearen und solaren Bereich. Hier gibt es in Wissenschaft und Wirtschaft zahlreiche Überlappungen der involvierten Partner, so dass es sinnvoll ist, diese in einer Säule des Clusters zusammenzufassen. Die dezentrale Energieerzeugung hat in Nordrhein-Westfalen mit "Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnik" sowie "Photovoltaik" zwei dominierende Themen, in denen das CEF.NRW auch die internationalen Kooperationen stärken will.

Die Problematik der Speicherung sowohl von Wärme als auch von Elektrizität stellt sich zunehmend als eine für die weitere Entwicklung unseres Energiesystems herausragende Fragestellung dar, die bisher zu wenig Beachtung gefunden hat. Die Forschung im Bereich der biologischen Erzeugung von Energieträgern entwickelt umfassende Ansätze, um auch bei der zukünftig intensivierten Einbindung der energetischen Nutzung von Biomasse in das Gesamtagarsystem Nachhaltigkeit zu gewährleisten. Mit den technologischen, strukturellen und wirtschaftlichen Veränderungen im gesamten Energiesystem stellen sich Wissenschaft und Wirtschaft auch im Bereich der Energienetze und der Energieökonomie neue, technologieübergreifende Fragen, die die Energieforschung heute dringend aufgreifen muss.

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

**Kontakt:**

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



**Abbildung A.5:**

Solarthermisches Kraftwerk Jülich  
Quelle: Stadtwerke Jülich (2009)



**Abbildung A.6:** Energieberatung durch Mitarbeiter der EnergieAgentur.NRW

Quelle: EnergieAgentur.NRW

## 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 Privatleute ökonomischer mit Energie umgehen oder erneuerbare Energien sinnvoll einsetzen können.

Die EnergieAgentur.NRW managt das Cluster Energiewirtschaft mit Namen EnergieRegion.NRW und das Cluster EnergieForschung mit Namen CEF.NRW. Darüber hinaus werden von der EnergieAgentur.NRW Energieberatungsleistungen in Form von Initial- und Contractingberatungen für Unternehmen und Verwaltungen sowie Informations- und Weiterbildungsangebote für Fach- und Privatleute angeboten. Auch die Schulungen des Nutzerverhaltens gehören zum Aufgabenbereich.

Die drei Schwerpunktbereiche der EnergieAgentur.NRW im Einzelnen:

**Clustermanagement:** Die EnergieAgentur.NRW ist verantwortlich für das Management des Clusters EnergieRegion.NRW mit den acht Netzwerken Biomasse, Brennstoffzelle und Wasserstoff, Energieeffizientes und solares Bauen, Geothermie, Kraftstoffe und Antriebe der Zukunft, Kraftwerkstechnik, Photovoltaik sowie Windenergie und auch für das Management des Clusters CEF.NRW. In beiden Clustern

# EnergieAgentur.NRW

werden Hochschulen, Unternehmen, Kommunen und Experten erfolgreiche Plattformen für die Zusammenarbeit angeboten. Beide Cluster konzentrieren sich darauf, Innovationsprozesse in NRW zu forcieren, Kooperationen und strategische Allianzen anzubahnen sowie Markteinführungen von innovativen Produkten national und international zu beschleunigen. Dazu gehört auch die Unterstützung von Unternehmen aus NRW im Bereich Außenwirtschaft.

**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, von der Leckage-suche bis zur Erstellung von Energiekonzepten. Die Ingenieure beraten zu Fördermöglichkeiten, verhelfen Unternehmen zur Minderung der Energiekosten und tragen somit zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit bei (Abb. A.6).

**Weiterbildung:** Die EnergieAgentur.NRW bietet eine Reihe von Weiterbildungsseminaren – auch für Endverbraucher – an. Die 50 Seminare können von Weiterbildungseinrichtungen, Energieversorgungsunternehmen, Verbänden, Vereinen, Hochschulen, Kommunen und Unternehmen in NRW genutzt werden. Im Rahmen dieses Programms werden zudem Aktionswochen "E-fit" 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.

**Landesweite Kampagnen und Gemeinschaftsaktionen** wie "NRW spart Energie", "Mein Haus spart", "50 Solarsiedlungen in NRW", "100 Klimaschutzsiedlungen in NRW", "Photovoltaik NRW", die "Aktion Holzpellets" oder der "Wärmepumpen-Marktplatz NRW" informieren die Bürger/innen in NRW über umweltfreundliche und innovative Heiztechniken und geben weitere Tipps zum Energiesparen.

### Kontakt:

EnergieAgentur.NRW  
c/o Ministerium für Wirtschaft, Mittelstand und Energie  
des Landes Nordrhein-Westfalen  
Haroldstraße 4  
40213 Düsseldorf  
Tel.: 01803 / 19 00 00\*  
info@energieagentur.nrw.de  
www.energieagentur.nrw.de

\* 9 Ct/Min. a.d. deutschen Festnetz, abweichende Preise f. Mobilfunknetze

## 18. Weltwasserstoffkonferenz 2010 in Essen

Die 18. Weltwasserstoffkonferenz (World Hydrogen Energy Conference/WHEC 2010) findet unter der Schirmherrschaft der International Association for Hydrogen Energy (IAHE) vom 16. bis 21. Mai in der Messe Essen statt. Sie wird mit Unterstützung des Landes Nordrhein-Westfalen von der EnergieAgentur.NRW organisiert.

Die WHEC 2010 hat zum Ziel, den Energieträger Wasserstoff auf dem Weg zu einer nachhaltigen klimafreundlichen Energiewirtschaft deutlich zu positionieren. Zu der internationalen Tagung mit begleitender Messe und verschiedenen Nebenveranstaltungen werden Teilnehmer aus dem In- und Ausland erwartet. Aktuelle Themenkomplexe - von Forschung, technischer Entwicklung und Markteinführung bis hin zu politischen Perspektiven und strategischen Analysen - werden Gegenstand der Diskussion sein.

Wasserstoff als Energieträger ist für eine saubere mobile Zukunft unverzichtbar. Daher gilt es, die Vorzüge des Wasserstoffs stärker an die Entscheidungsträger heranzutragen und das Bewusstsein für diese Technik zu schärfen.

Das bisherige hohe internationale Interesse an der WHEC2010 zeigt, dass die Konferenz eine große und in ihrer Bedeutung für die Branche konkurrenzlose Plattform für den internationalen Gedankenaustausch sein wird. Um auch den Nachwuchs an diese Zukunftstechnik heranzuführen, runden Informations- und Qualifizierungsangebote für Schüler, Lehrer und Studierende sowie für die Öffentlichkeit die Veranstaltung ab.

Die Stadt Essen einschließlich des benachbarten Ruhrgebiets tragen im Jahr 2010 den Titel "Europäische Kulturhauptstadt 2010". Für eine enge Verzahnung mit dem dazugehörigen Kultur- und Eventprogramm wird gesorgt. Der WHEC 2010 bieten sich also auch hier hervorragende Rahmenbedingungen zur Präsentation der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnik.

### Kontakt:

WHEC 2010-Office  
c/o EnergieAgentur.NRW  
Munscheidstraße 14  
45886 Gelsenkirchen  
Tel.: 0209 / 167-2814  
contact@whec2010.com  
www.whec2010.com

# 18<sup>th</sup>

## World Hydrogen Energy Conference 2010

May, 16 – 21, 2010  
Messe Essen, Germany

## Hydrogen Energy



Host and organizer

**EnergieAgentur.NRW**

Under the auspices of  
International Association for  
Hydrogen Energy (IAHE)



In cooperation with



Supported by

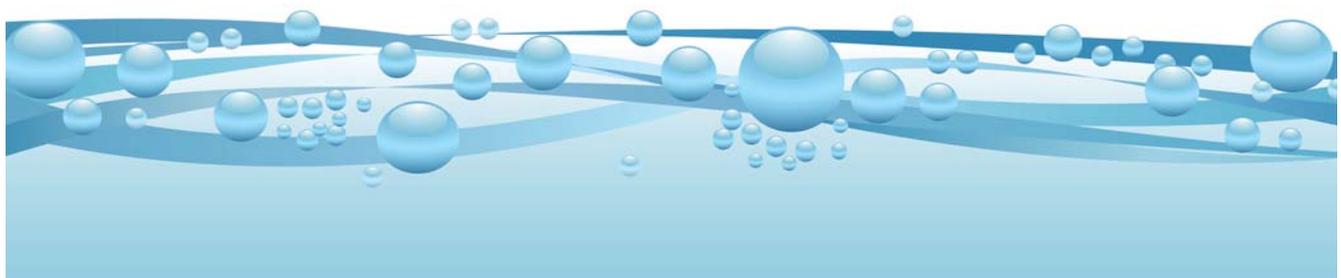


EUROPEAN UNION  
Investing in our Future  
European Regional  
Development Fund

First major sponsor

**VORWEG GEHEN**  
The energy to lead

Sponsors



## H<sub>2</sub>-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.

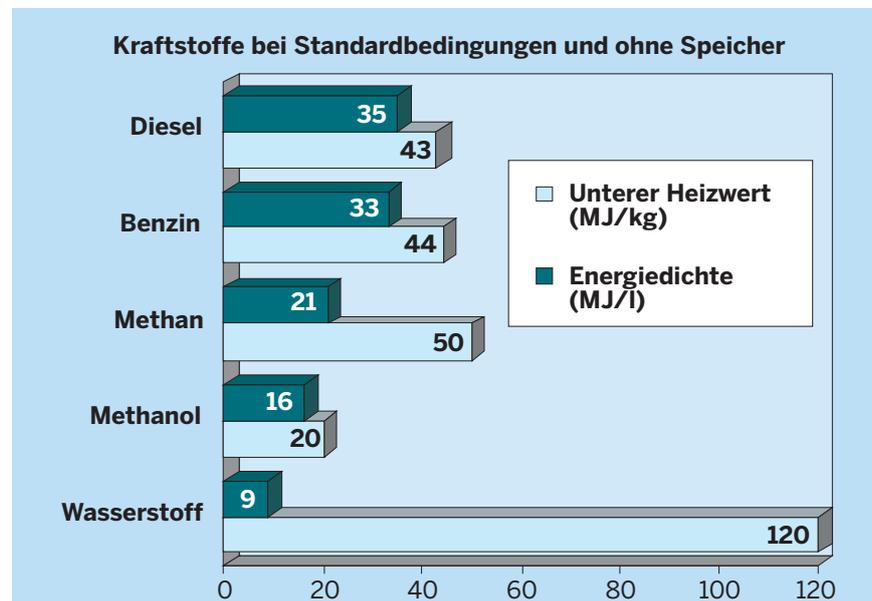
Wasserstoff hat im Vergleich zu anderen Energieträgern die höchste massenspezifische, aber gleichzeitig auch die geringste volumenspezifische Energiedichte, die – je nach Anwendungsfall – unterschiedliche Auswirkungen auf die Wahl der geeigneten Speicherart hat.

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.



Energiedichten für reine Kraftstoffe und Wasserstoff

Quelle: Grube/Höhlein (2008)

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

\* MAK = Maximale Arbeitsplatzkonzentration  
\*\* TRK = Technische Richtkonzentration

Dabei gilt:

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

Quelle: Biedermann et al. (2006); L-B-Systemtechnik (www.lbst.de)

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

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

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

## Literaturangaben

### Kapitel 1

Grube, Th./ Höhle, B. (2008)  
"Optionen einer zukünftigen Wasserstoff-Infrastruktur",  
Vortrag, gehalten auf dem TAE-Workshop zum Thema  
"Wasserstoff im mobilen Einsatz", Esslingen, 7.10.2008

### Kapitel 2

Heithoff, J. (2008)  
"CO<sub>2</sub>-Abtrennung: Pre-Combustion und IGCC – warum RWE CCS mit Kohlevergasung wählt",  
Vortrag, gehalten auf dem 2. Workshop im AP3 des Kompetenz-Netzwerks-  
Kraftwerkstechnik NRW, Gelsenkirchen, 25.11.2008

Pastowski, A. et al. (2009)  
"Optionen für den kostenoptimierten Aufbau einer H<sub>2</sub>-Infrastruktur in Nordrhein-Westfalen"  
[Autoren: Pastowski, A. / Fishedick, M. (Wuppertal Institut GmbH)  
Grube, Th. (Forschungszentrum Jülich GmbH)  
Jermer, M. (HyCologne - Wasserstoff Region Rheinland e.V.)],  
Endbericht, herausgegeben vom Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie,  
Wuppertal, Mai 2009

Trudewind, C.A./ Wagner, H.-J. (2007)  
"Vergleich von H<sub>2</sub>-Erzeugungsverfahren", Nakicenovic, N./ Haas, R./ Brauner, G.  
(Hg.) Energiesysteme der Zukunft: Technologien und Investitionen zwischen  
Markt und Regulierung (Tagungsband der 5. Internationalen Energiewirtschafts-  
tagung IEWT an der TU Wien), Wien, 14.-16. 2.2007

### Kapitel 3

Von Wild, J./ Freymann, R./ Zenner, M. (2008)  
"Potentiale von alternativen Wasserstoff-Speichertechnologien",  
Tagung: Innovative Fahrzeugantriebe 2008; VDI Wissensforum GmbH (Hg.), VDI-  
Berichte 2030, VDI Verlag GmbH Düsseldorf, 273-298

### H<sub>2</sub>-Eigenschaften auf einen Blick

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

## Impressum

### Herausgeber:

EnergieRegion.NRW  
Netzwerk Brennstoffzelle und Wasserstoff  
c/o Ministerium für Wirtschaft, Mittelstand und Energie  
des Landes Nordrhein-Westfalen  
Haroldstraße 4  
40213 Düsseldorf  
Telefon: +49 (0) 211 86642-0  
Telefax: +49 (0) 211 86642-22  
info@energieregion.nrw.de  
www.energieregion.nrw.de

© EnergieRegion.NRW 12/2009

### Redaktion/Lektorat:

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.

### EnergieRegion.NRW

Das Cluster EnergieRegion.NRW ist mit seiner Mischung aus multinationalen Konzernen, mittelständischen Unternehmen sowie Forschungseinrichtungen ein Standort mit einer einmaligen Konzentration energiewirtschaftlicher Expertise. In acht Netzwerken des Clusters EnergieRegion.NRW sind Unternehmen, Verbände, Universitäten und Institute entlang der gesamten Wertschöpfungsketten zusammengeschlossen. Die Aktivitäten des Clusters werden durch die Clusterpolitik der Landesregierung Nordrhein-Westfalens unterstützt und durch das NRW-Ziel-2-Programm der Europäischen Union gefördert. Das Management des Clusters EnergieRegion.NRW verantwortet die EnergieAgentur.NRW.

Weitere Informationen zum Cluster EnergieRegion.NRW finden Sie unter:  
[www.energieregion.nrw.de](http://www.energieregion.nrw.de)

### **EnergieRegion.NRW**

Netzwerk Brennstoffzelle und Wasserstoff  
c/o Ministerium für Wirtschaft,  
Mittelstand und Energie  
des Landes Nordrhein-Westfalen  
Haroldstraße 4  
40213 Düsseldorf  
Telefon: +49 (0) 21186642-0  
Telefax: +49 (0) 21186642-22  
info@energieregion.nrw.de  
www.energieregion.nrw.de

© EnergieRegion.NRW 12/2009

### **www.exzellenz.nrw.de**

Exzellenz NRW steht für die Clusterstrategie am Wirtschafts- und Innovationsstandort Nordrhein-Westfalen. Die Landesregierung will Stärken stärken und die Exzellenzen in Nordrhein-Westfalen systematisch ausbauen. Ziel der Clusterpolitik ist es, ein günstiges Umfeld für Innovationen zu schaffen, das die Wettbewerbsfähigkeit der Wirtschaft stärkt und Wachstum und Beschäftigung stimuliert. Mehr zur Clusterstrategie des Landes und zu den 16 Clustern in Nordrhein-Westfalen finden Sie unter [www.exzellenz.nrw.de](http://www.exzellenz.nrw.de)



Diese Broschüre wurde klimaneutral gedruckt.



EUROPÄISCHE UNION  
Investition in unsere Zukunft  
Europäischer Fonds  
für regionale Entwicklung