



**ASUE**

Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V.

# Energieträger Wasserstoff

Grundlagen, Anwendung, Speicherung, Infrastruktur



<b>1   Kenndaten von Wasserstoff</b>	<b>2</b>
<b>2   Warum Wasserstoff?</b>	
<b>Vergleich mit Erdgas und anderen Energieträgern</b>	<b>4</b>
<b>3   Herkunft von Wasserstoff</b>	<b>5</b>
Natürliche Vorkommen	5
Erdgas-Dampfreformierung	5
Methan-Pyrolyse	6
Glycerin-Pyrolyse	6
Elektrolyse	6
Elektrolyse in der Energiewende / Power-to-Gas	8
Gasgemische	8
Projektkarte: Grüner Wasserstoff in Deutschland	9
<b>4   Wasserstoff Anwendung</b>	<b>10</b>
Brennstoffzellen	10
Wasserstoff in Gasbrennern aller Art	12
KWK-Anlagen	13
Methanisierung von Wasserstoff	13
<b>5   Wasserstoffspeicherung</b>	<b>14</b>
Unterirdische Wasserstoffspeicherung	14
Druck- und Kryospeicherung	15
Flüssigspeicher	16
Metallhydrid Speicher	17
Adsorption	19
<b>6   Wasserstoffinfrastruktur</b>	<b>20</b>
Wasserstofftransport	20
Beimischungsgrenzen und Leitungsanforderungen	20
Wasserstoff im Erdgasnetz: Ausblick	21
Tankstellen	22
<b>7   Zusammenfassung</b>	<b>23</b>

Wasserstoff wurde 1766 von Henry Cavendish beim Experimentieren mit Quecksilber und Salzsäure entdeckt und von ihm als brennbare Luft bezeichnet. Unter Umgebungsbedingungen tritt Wasserstoff in der Regel als aus zwei Wasserstoffatomen zusammengesetztes Molekül – H<sub>2</sub> auf. Die Bezeichnung Wasserstoff existiert seit 1787. Der Franzose Lavoisier „taufte“ den Wasserstoff als „hydrogène“ (Altgriechisch: hydor = Wasser und genes = erzeugend) = Wasser-Bildner. Obwohl Wasserstoff im Weltall mit über 90 % aller Atome, das sind rund drei Viertel der gesamten Masse, vorkommt, macht freier Wasserstoff nur etwa 1 % der Erdkruste aus und kommt in der Erdatmosphäre sogar nur in Spuren vor.

In chemischer Verbindung mit anderen Elementen ist Wasserstoff auf der Erde jedoch weit verbreitet. Er ist das kleinste der Elemente und gleichzeitig das leichteste Gas. 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.



## Eigenschaften, Stoffdaten und Sicherheit

Wasserstoff ist:

- ungiftig und nicht ätzend oder reizend
- umweltneutral, nicht wassergefährdend
- geruchlos
- geschmacksneutral
- unsichtbar, verbrennt mit unsichtbarer Flamme
- flüchtig, leichter als Luft
- wirkt auf einige Materialien verspröhdend
- nicht korrosiv
- nicht radioaktiv
- nicht krebserregend

Das Wort „Wasserstoff“ ist bei vielen Menschen wegen der Explosion der „Hindenburg“ in Lakehurst, USA, und der Wasserstoffbombe negativ belegt. Allerdings werden bereits heute viele Mio. Tonnen Wasserstoff jedes Jahr sicher und ohne Probleme z. B. in Raffinerieprozessen genutzt und die Wasserstofftechnik ist vom Forschungsbis in den Industrie-Maßstab am Markt verfügbar. Kostengünstige, wasserstoffdichte Materialien existieren und im Falle einer Leckage ist Wasserstoff so flüchtig, dass sich in nicht hermetisch verschlossenen Räumen kein explosionsfähiges Gemisch bilden kann.



Stoffdaten Wasserstoff	
Siedetemperatur ( $T_S$ )	-252,77 °C = 20,39 K
Schmelztemperatur ( $T_{Sch}$ )	-258,60 °C = 14,40 K
Flüssigdicke (20,3 K; 1 bar)	70,79 g/l
Gasdicke (20,3 K; 1 bar)	1,34 g/l
Gasdicke (273,15 K; 1 bar)	0,0899 g/l
Molekular-Gewicht ( $M$ )	2,016 g/mol
Heizwert ( $H_i$ )	3 kWh/m <sup>3</sup> bzw. 10,8 MJ/m <sup>3</sup>
Brennwert ( $H_b$ )	3,54 kWh/m <sup>3</sup> bzw. 12,57 MJ/m <sup>3</sup>
Unterer Wobbe-Index	11,361 kWh/m <sup>3</sup> bzw. 40,898 MJ/m <sup>3</sup>
Oberer Wobbe-Index	13,428 kWh/m <sup>3</sup> bzw. 48,340 MJ/m <sup>3</sup>
Verdampfungswärme	445,4 kJ/kg
Spezifische Wärmekapazität	$c_p = 14,199$ J/kg/K bzw. $c_v = 10,074$ J/kg/K
Zündgrenzen in Luft	untere 4,0 Vol.-% obere 75,0 Vol.-%
Detonationsgrenzen in Luft	untere 18,3 Vol.-% obere 59,0 Vol.-%
Selbstentzündungs-Temperatur	585 °C
Minimale Zündenergie in Luft	0,02 mJ
Max. Verbrennungstemperatur in Luft bei 29 % H <sub>2</sub>	2.318 °C
Max. Verbrennungstemperatur mit reinem Sauerstoff bei 29 % H <sub>2</sub>	> 3.000 °C
Max. Flammgeschwindigkeit	346 cm/s
Atomarer Wasserstoffgehalt in Wasser	11,2 Gew.-%

Tabelle 1

## 2 Warum Wasserstoff? Vergleich mit Erdgas und anderen Energieträgern

Wasserstoff ist als elementarer Bestandteil von Wasser in großer Menge auf der Erde verfügbar. Für die elektrolytische Erzeugung reinen Wasserstoffs ist es mittlerweile unerheblich, ob als Quellwasser, Süßwasser oder salzhaltiges, demineralisiertes Meerwasser verwendet wird.

Auf dem Energiemarkt stehen der Nutzung von Wasserstoff verschiedene gasförmige und flüssige Stoffe gegenüber. Ihnen allen ist gemein, dass bei der abschließenden, thermischen Verwertung CO<sub>2</sub> ausgeschieden wird. Dies gilt auch, wenn erneuerbare Energieträger genutzt werden und die Verbrennung daher klimaneutral erfolgt. Im Vergleich dazu stellt die Verbrennung von reinem Wasserstoff einen Vorteil dar. Denn es entstehen nur Wasser (H<sub>2</sub>O) und Stickoxide (NO<sub>x</sub>), aber weder Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) noch Feinstaub oder andere aus der klassischen Motor- und Brenntechnik bekannte Schadstoffe.

Der volumetrische Heizwert von Wasserstoff beträgt nur knapp ein Viertel des Heizwertes von Erdgas. Aber massebezogen enthält eine Menge von 10 % Wasserstoff dieselbe Energie wie 100 % Erdgas.



Viessmann Brennstoffzellen-Heizgerät Vitocalor PT2

Relevante Stoffdaten der am weitesten verbreiteten Brenngase

	Methangehalt Vol.-%	Heizwert H <sub>i</sub> kWh/[Bezug]	Brennwert H <sub>s</sub> kWh/[Bezug]	Dichte bei 0 °C   1 bar kg/m <sup>3</sup>	Zündgrenze in Luft Vol.-%	Wobb- index MJ/m <sup>3</sup>
Erdgas	80...99	8,6...11,4 [m <sup>3</sup> ]	9,7...12,8 [m <sup>3</sup> ]	0,72...1,00	4,0...17,0	48,17...53,45
Biogas	50...75	5,0...5,8 [m <sup>3</sup> ]	5,6...6,7 [m <sup>3</sup> ]	0,92...0,98	6,0...12,0	28,44
Wasserstoff	---	3,0 [m <sup>3</sup> ]	3,6 [m <sup>3</sup> ]	0,09	4...7,5	40,90...48,34
Propan	---	25,9 [kg]	28,1 [kg]	2,04	2...9,5	74,74...81,81
n-Butan	---	8,6...11,4 [kg]	9,7...12,8 [kg]	0,72...1,00	4,0...17,0	N/A
Benzin	---	7,8...9,1 [l]	8,3...9,6 [l]	0,70...0,78	0,6...8,0	N/A
Diesel	---	9,9...10,4 [l]	10,6...11,1 [l]	0,84...0,88	0,6...7,5	N/A
Methanol	---	3,9 [l]	4,4 [l]	0,79	6,7...36,0	N/A

Tabelle 2, Daten: Grundlagen der Gastechnik (ISBN: 978-3-446-44965-7), Tycza Energy GmbH, Gammel Engineering GmbH



# 3 Herkunft von Wasserstoff

## Natürliche Vorkommen

Die natürlichen Vorkommen von reinem Wasserstoff sind zu vernachlässigen. Nur in höheren Schichten der Erdatmosphäre sind wegen fehlender Reaktionspartner geringe Spuren davon vorhanden. In den unteren atmosphärischen Schichten sowie der gesamten Lithosphäre kommt Wasserstoff wegen seiner hohen Reaktivität nur in chemisch gebundener Form vor.

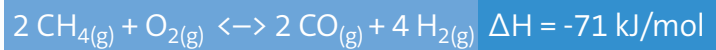
## Erdgas-Dampfreformierung

Die Dampfreformierung wurde von Carl Bosch im Zuge der Ammoniakherstellung entwickelt, bei der Wasserstoff als Grundstoff benötigt wird. Der Durchbruch gelang in den 1920er-Jahren durch die Verwendung von Nickelkatalysatoren. Heute ist Erdgas der wichtigste Rohstoff zur Dampfreformierung. Prinzipiell lässt sich jedoch eine Vielzahl von Kohlenwasserstoffen wie z. B. Leichtbenzin, Schweröl, Methanol, Biogas und andere Biomasse zur Wasserstoffherstellung einsetzen.

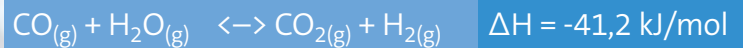
Die Dampfreformierung hat einen endothermen Reaktionsverlauf, das heißt, dass die benötigte Wärme der Reaktion zugeführt werden muss.



Eine gleichzeitige partielle Oxidation der Kohlenwasserstoffe führt zu einem autothermen Reaktionsverlauf mit einem Wirkungsgrad von 60 bis 70 %. Hier wird ein Teil der im Methan enthaltenen Energie genutzt und es muss keine Energie von außen zugeführt werden.



Die Wassergas-Shift-Reaktion erhöht die Ausbeute nochmals.



Die Dampfreformierung von Erdgas liefert weltweit derzeit etwa 70 % des jährlich benötigten Wasserstoffs.

Wird das Gas in der hier beschriebenen Dampfreformierung erzeugt, wird es wegen der großen CO<sub>2</sub>-Emissionen als „grauer Wasserstoff“ bezeichnet.

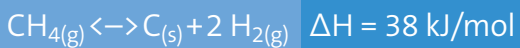
Gelingt es aber, das CO<sub>2</sub> aufzufangen und anschließend weiter zu nutzen oder zu speichern, wird von „blauem Wasserstoff“ gesprochen.

„Türkiser Wasserstoff“ entsteht, wenn Methan durch Pyrolyse oder Plasmalyse gespalten wird. Der Kohlenstoff fällt dann als nutz- oder lagerbarer Feststoff an.

Wird die Elektrolyse von Wasser genutzt oder Biogas zur Dampfreformierung eingesetzt, wäre „grüner Wasserstoff“ das Produkt.

#### Methan-Pyrolyse

Bei der Pyrolyse von Methan (Erdgas) wird der Wasserstoff chemisch bei hohen Temperaturen unter Katalyse vom Kohlenstoff, der zurückbleibt, abgetrennt.



Mit geeigneten Katalysatoren kann diese Reaktion bei 560 bis 850°C durchgeführt werden. Der zentrale Vorteil dabei ist die Vermeidung der Herstellung von CO<sub>2</sub>, das heute meist an die Umgebung abgegeben wird. Die stattdessen als reiner, fester Kohlenstoff anfallenden C-Atome können vielfältig industriell weiterverwendet, aber auch für eine spätere Verwendung absolut sicher eingelagert werden.

#### Glycerin-Pyrolyse

Ein weiterer Rohstoff für die pyrolytische Wasserstoffherstellung ist Glycerin. Glycerin (auch Glycerol genannt) fällt in großen Mengen bei der Biodieselherstellung an. In pflanzlichen Fetten und Ölen verknüpft es jeweils drei Fettsäuren, die später mit Methanol zu Biodiesel veredelt werden, miteinander. Nach dem Aufbrechen dieser Verbindungen wird das Glycerin, das durch Energiezufuhr in seine Bestandteile aufgebrochen werden kann, freigesetzt.



Als Katalysatoren kommen bestimmte Übergangsmetalle von Eisen über Nickel bis Cobalt in Betracht, aber auch elektrochemische Plasmaverfahren befinden sich in der Entwicklung.

Die Technologie ist derzeit im Pilotmaßstab erprobt und wird voraussichtlich in den nächsten Jahren auch großtechnisch verfügbar sein. An der Entwicklung dieses ebenfalls als blauen Wasserstoff bezeichneten Gases arbeiten neben Forschungseinrichtungen auch große Unternehmen wegen des klimaschonenden Effektes, darunter u. a. BASF, Linde, equinor und Gazprom.

Wegen der rein pflanzlichen Herkunft des Glycerins wird der so hergestellte Wasserstoff als grüner Wasserstoff bezeichnet und demonstriert damit seine klimaneutralen Eigenschaften. Das ebenfalls entstehende Kohlenstoffmonoxid kann sowohl energetischen als auch stofflichen Nutzungen zugeführt werden. Die Nutzung von Glycerin und auch anderen wasserstoffhaltigen Biomassen wie Holz für die Wasserstoffproduktion war Gegenstand einiger Forschungs- und Pilotprojekte, wird aber in industriellem Maßstab derzeit nicht weiter verfolgt.

#### Elektrolyse

Die auf erneuerbaren Energien basierende Elektrolyse hat in Deutschland bisher nur eine geringe Verbreitung. In den aktuellen Pilotanlagen wird die Technologie weitestgehend zur Untersuchung der Integration von erneuerbarem Wasserstoff ins Gasnetz genutzt. Dabei ist das Verfahren der Wasserelektrolyse ein altes technisches Verfahren und seit über 100 Jahren weltweit etabliert.

Die elektrochemische Wasserzersetzung erfolgt räumlich getrennt in zwei Teilreaktionen. Beide Reaktionsräume sind durch eine ionenleitende Schicht (Membran, Diaphragma, Keramik), die mit einer Elektrolytlösung getränkt ist, voneinander getrennt. Durch den Elektrolyten erfolgt der Ladungstransport. Es gibt im Wesentlichen drei Arten der Wasserelektrolyse mit jeweils unterschiedlichem technischem Aufbau (verschiedene Elektrolyten und Membranen) und Marktreife:

1. die alkalische Elektrolyse mit einem flüssigen, basischen Elektrolyt,
2. die saure PEM-Elektrolyse mit einem protonenleitenden, polymeren Festelektrolyt und
3. die Hochtemperatur-Elektrolyse mit einem Festoxid als Elektrolyt.

Das Wasser wird bei der alkalischen Elektrolyse normalerweise an der Kathodenseite, bei der PEM-Elektrolyse an der Anodenseite zugeführt. Bei der Hochtemperatur-Elektrolyse wird der benötigte Wasserdampf an der Kathode zugeführt.



Die älteste der Elektrolysetechniken ist die Chlor-Alkali-Elektrolyse. Sie ist bewährt, zeichnet sich durch relativ geringe Investitionskosten aus und eignet sich für den langfristigen Einsatz. Gerade in der chemischen Industrie wird sie im großtechnischen Maßstab eingesetzt. Hier werden meist im gleichen Schritt wie Wasserstoff auch Chlor und Natronlauge als weitere Wertprodukte gewonnen:



Die PEM-Elektrolyse wird seit etwa 20 Jahren beforscht und zeichnet sich durch eine höhere Flexibilität aber auch durch eine geringere Langzeitstabilität aus. Momentan gibt es noch wenige kommerzielle Anlagen, meist für spezielle Einsatzgebiete wie in der Halbleiterfertigung.

Die Hochtemperatur-Elektrolyse wird aktuell von Forschungseinrichtungen und der Industrie entwickelt, es existieren aber noch keine kommerziellen Anlagen.

Verschiedene Elektrolysearten, Wirkungsgrade bezogen auf den Heizwert, Investitionen bezogen auf Nennleistung der Anlagen

	Alkalische Elektrolyse	PEM-Elektrolyse	Hochtemperatur-Elektrolyse
<b>Fertigungsgrad Entwicklung</b>	> 90 %	80 %	60 %
<b>Vorteile</b>	Kostengünstig (große Anlagen), langjährige Erfahrung, keine Edelmetallkatalysatoren	Kompakte Bauweise, bessere Dynamik, gute Skalierbarkeit, keine Korrosion, Aufnahmefähigkeit extremer Überlast	Bei Abwärmenutzung (KWK) effizienter und kostengünstiger
<b>Herausforderungen</b>	Laugen, Kaltstart, Teillastverhalten	Teure Werkstoffe, Materialanforderungen	Prozess bei hoher Temperatur
<b>Wirkungsgrade aktuell</b>	62...82 %	65...82 %	65...85 %
<b>Investitionen</b>	880...1.500 €/kW	900...1.850 €/kW	2.200...6.500 €/kW
<b>Mögliche Wirkungsgrad-Optimierung</b>	78...84 %	75...84 %	87...95 %
<b>Mögliche Degression der Investitionen</b>	250...400 €/kW	300...700 €/kW	270...800 €/kW
<b>Funktionsprinzip</b>			
<b>Temperaturbereich</b>	40...90 °C	20...100 °C	700...1.000 °C
<b>Anode</b>	$2 \text{OH}^- \rightarrow \frac{1}{2} \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2 \text{e}^-$	$\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{H}^+ + \frac{1}{2} \text{O}_2 + 2 \text{e}^-$	$\text{O}^{2-} \rightarrow \frac{1}{2} \text{O}_2 + 2 \text{e}^-$
<b>Kathode</b>	$2 \text{H}_2\text{O} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2 \text{OH}^-$	$2 \text{H}^+ + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$	$\text{H}_2\text{O} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + \text{O}^{2-}$
<b>Gesamtreaktion</b>	$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$	$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$	$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$

Tabelle 3, Daten: Reiner Lemoine Institut; Energieagentur NRW: Wasserstoff - Schlüssel zur Energiewende

### Elektrolyse in der Energiewende / Power-to-Gas

Im Zuge der Energiewende wird elektrische Energie aus erneuerbaren Quellen (Wind, Sonne, Wasserkraft) im Power-to-Gas-Verfahren (PtG) genutzt, um elektrolytisch Wasserstoff zu erzeugen. Dieser „grüne Wasserstoff“ überführt die natürlichen Energieformen in eine gut speicher- und transportfähige Form. Begrifflich wird der so erzeugte „grüne Wasserstoff“ im Energiewirtschaftsgesetz als Biogas eingeordnet (EnWG §3, 10c.).

Der weitere Ausbau der PtG-Leistung erfolgt derzeit im Rahmen von Pilotanlagen an Orten mit guten Einspeisemöglichkeiten oder besonders viel abgegenerter Windleistung. Ende 2019 waren in Deutschland 62 PtG-Projekte mit einer gesamten Anschlussleistung von mindestens 308 MW<sub>el</sub> geplant. Deutschlands derzeit größte in Betrieb befindliche Elektrolyseanlage REFHYNE liefert bei 10 MW<sub>p</sub> jährlich etwa 1.300 t Wasserstoff. Sie steht im rheinländischen Werk Wessel, wird von Shell und ITM Power betrieben und soll die dort ansässigen Raffinerien mit CO<sub>2</sub>-neutralem Wasserstoff versorgen.

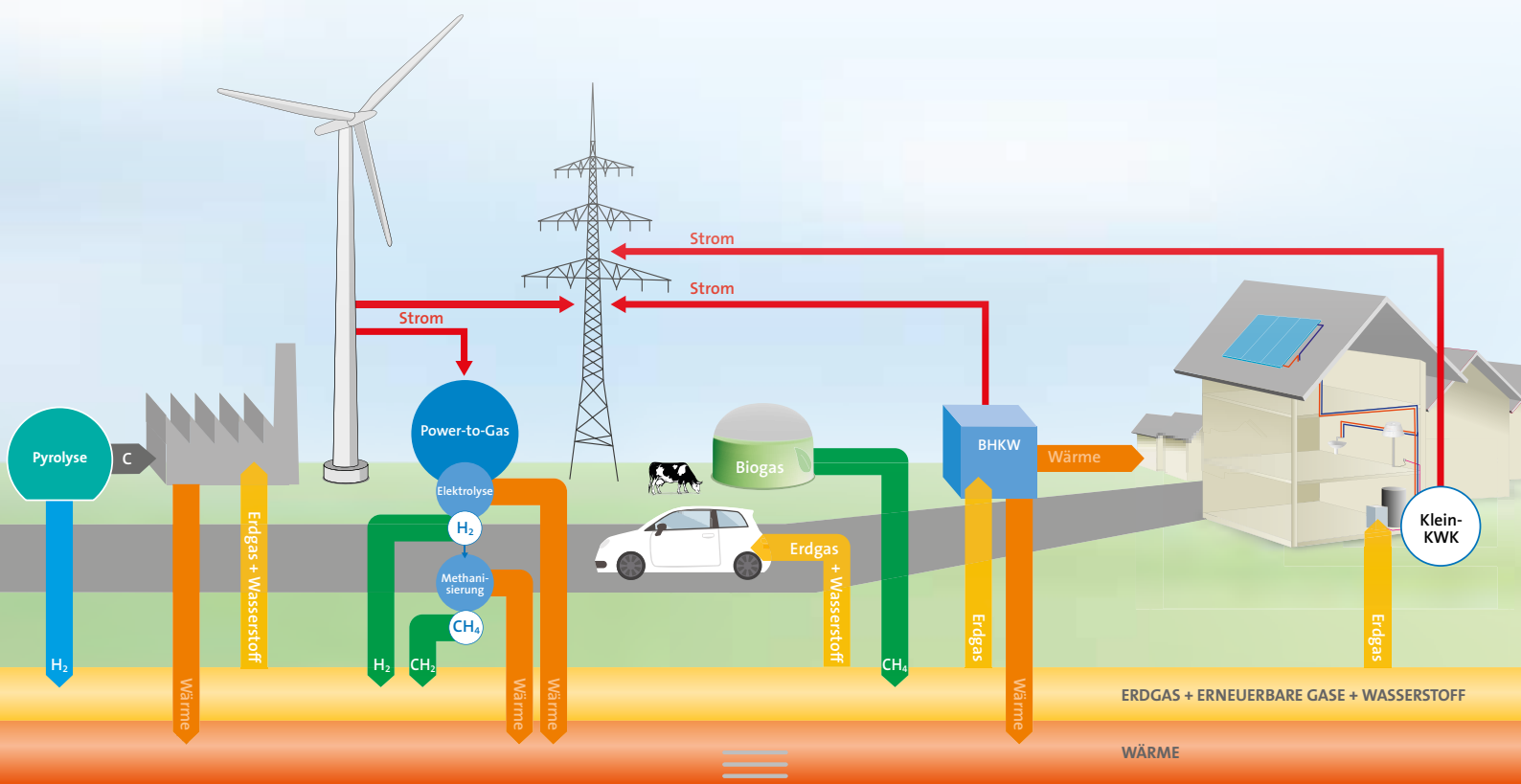
Für einen beschleunigten Ausbau fehlen noch die rechtlichen Rahmenbedingungen. So werden z. B. Elektrolyseure rechtlich noch als Letztverbraucher und damit EEG-umlagepflichtig definiert, wodurch die Wirtschaftlichkeit hinfällig ist.

Um dennoch den notwendigen Ausbau voranzubringen, hat der DVGW 2018 zusammen mit Partnern das Projekt PORTALGREEN gegründet, um einen Genehmigungsleitfaden für PtG-Anlagen zu erstellen. Nach aktueller Praxis werden PtG-Anlagen als chemische Industrieanlagen betrachtet, womit massive Forderungen seitens der Behörden verbunden sind. Dies soll durch den Leitfaden deutlich vereinfacht und damit die Umsetzung von PtG-Projekten erleichtert werden, da sich Anlagenbauer und genehmigende Behörden dann auf gemeinsame Richtlinien berufen können.

### Gasgemische

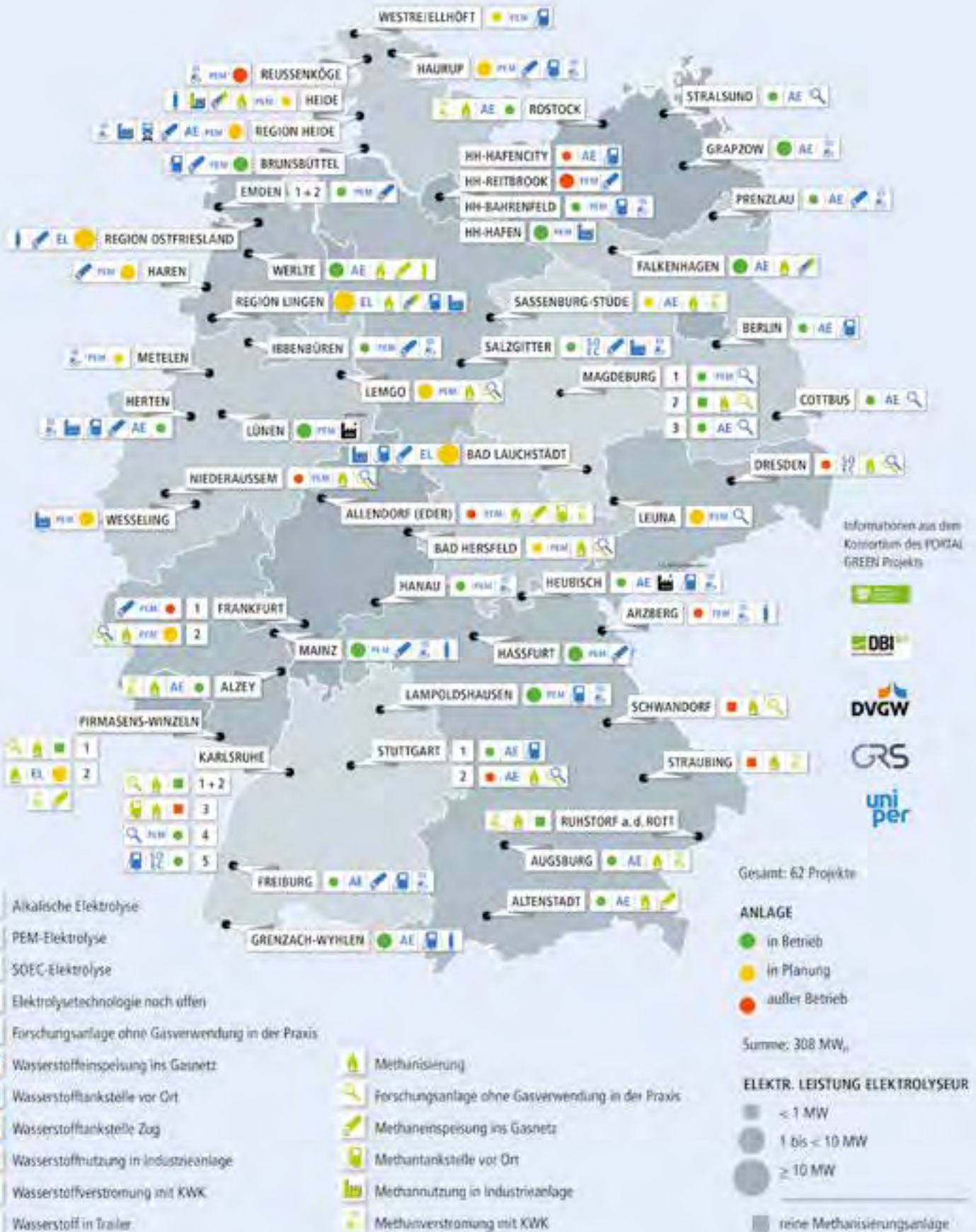
Die langfristige Nutzung der Gasnetze ist gegenwärtig Gegenstand umfangreicher Untersuchungen und Abwägungen. Schon heute ist das in den Leitungen gemäß den DVGW-Arbeitsblättern G260 und G262 transportierte Gas ein Gemisch aus Methan und kleineren Anteilen von Wasserstoff, Butan, Propan und anderen Gasen. Es wird diskutiert, den maximalen Anteil von Wasserstoff auf bis zu 20 % anzuheben und so die großflächige Nutzung erneuerbarer Gase zu aktivieren.

Neben erneuerbarem Wasserstoff wird auch mit Erdgas chemisch vergleichbares Biomethan eingespeist, so dass an der Entnahmestelle immer eine gewisse Bandbreite an Gasbestandteilen festgestellt werden wird. Sowohl die Hersteller von Anwendungstechnik als auch die Gasversorger entwickeln derzeit Lösungen dafür in Form von Abrechnungs- und Bilanzierungsmethoden sowie technischen Anpassungen.





# Projektkarte: Grüner Wasserstoff in Deutschland



# 4 Wasserstoff-Anwendung

In Raffinerien und anderen chemischen Prozessen werden große Mengen von Wasserstoff umgesetzt. In dieser Übersicht wird die Anwendung von Wasserstoff außerhalb dieses Sektors betrachtet.

## Brennstoffzellen

Das Prinzip der Brennstoffzellen wurde 1838 vom deutschen Chemiker Christian Friedrich Schönbein entdeckt, als er zwei Platindrähte in Salzsäure mit Wasserstoff und Sauerstoff umströmen ließ und dabei eine elektrische Gleichspannung verzeichnete. Die seitdem u. a. mit alternativen Werkstoffen und Ladungsträgern hergestellten Brennstoffzellen lassen sich grob in die folgenden Typenklassen einteilen:

- Alkalische Brennstoffzelle (AFC)
- Direktmethanolbrennstoffzelle (DMFC)
- Polymerelektrolyt-brennstoffzelle (PEMFC)
- Phosphorsäurebrennstoffzelle (PAFC)
- Schmelzkarbonat-brennstoffzelle (MCFC)
- Festoxidbrennstoffzelle (SOFC)

Weitere, neuere Entwicklungen, an denen momentan geforscht wird, sind die Ammoniakbrennstoffzelle (NH<sub>3</sub>FC) und die Direkt-Flüssig-speicherbrennstoffzelle (LOHCFC).

Die wichtigsten Brennstoffzellenarten

Brennstoffzelle	Elektrolyt	Arbeits-temperatur in °C	Elektrischer Wirkungsgrad in %	Brenngas	Besonderheit	Anwendung
AFC	Kalilauge	20...90	60...70	H <sub>2</sub>	nur sehr reine H <sub>2</sub> und O <sub>2</sub> verwendbar	Raumfahrt, Verteidigungstechnik
PEMFC	Protonenleitende Membran	20...80	50...70	H <sub>2</sub>	Flexibles Betriebsverhalten, hohe Leistungsdichte	Fahrzeuge, KWK, dezentrale Stromerzeugung
DMFC	Protonenleitende Membran	20...130	20...30	Methanol		
PAFC	Phosphorsäure	180...220	55	Erdgas, Biogas, H <sub>2</sub>	Korrosionsprobleme	Dezentrale Stromerzeugung, KWK
MCFC	Alkalicarbonat-schmelze	620...660	65	Erdgas, Grubengas, Biogas, H <sub>2</sub>	Komplexe Prozessführung, Korrosionsprobleme	Zentrale und dezentrale Stromerzeugung, KWK
SOFC	Yttrium stabilisiertes Zinkoxid	800...1.000	60...65	Erdgas, Grubengas, Biogas, H <sub>2</sub>	Elektrische Energie direkt aus Erdgas, Keramiktechnologie	Zentrale und dezentrale Stromerzeugung, KWK

Tabelle 4

1 Die einzelne Brennstoffzelle besteht aus zwei Elektroden: der Anode und der Kathode.

2 Die Elektronen werden durch einen Elektrolyt getrennt, der aufgrund seiner Materialeigenschaften für bestimmte Ionen (in diesem Fall H<sup>+</sup>-Ionen) durchlässig ist.

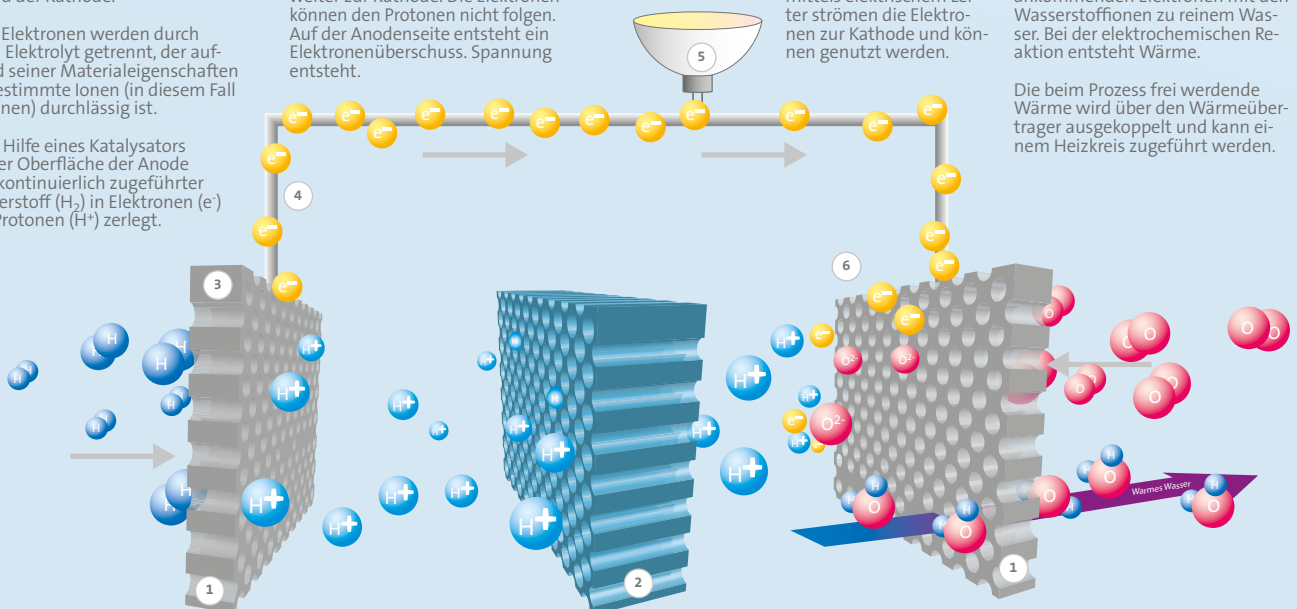
3 Mit Hilfe eines Katalysators auf der Oberfläche der Anode wird kontinuierlich zugeführter Wasserstoff (H<sub>2</sub>) in Elektronen (e<sup>-</sup>) und Protonen (H<sup>+</sup>) zerlegt.

4 Die Protonen durchdringen die Elektrolytmembran und wandern weiter zur Kathode. Die Elektronen können den Protonen nicht folgen. Auf der Anodenseite entsteht ein Elektronenüberschuss. Spannung entsteht.

5 Durch Verbinden der Anode und der Kathode mittels elektrischem Leiter strömen die Elektronen zur Kathode und können genutzt werden.

6 Unter Zuführung von Sauerstoff reagieren die an der Kathodenseite ankommenden Elektronen mit den Wasserstoffionen zu reinem Wasser. Bei der elektrochemischen Reaktion entsteht Wärme.

Die beim Prozess frei werdende Wärme wird über den Wärmeübertrager ausgekoppelt und kann einem Heizkreis zugeführt werden.



## Brennstoffzellen im Mobilitätssektor

Durch die Verwendung von Brennstoffzellen kann Wasserstoff zur lokal emissionsfreien Fortbewegung eingesetzt werden. Im Schienenverkehr sind seit September 2018 Pilotfahrzeuge im Personennahverkehr im Einsatz sowie auch einige Brennstoffzellen-Lkw. Im Bereich der Flurförderfahrzeuge, wie z. B. Gabelstapler, haben die führenden Hersteller Fahrzeuge mit Brennstoffzellen wegen der sauberen Emissionen und der langen Betriebsdauer erfolgreich im Angebot. Auch im Pkw-Bereich gibt es schon einige kommerziell verfügbare Fahrzeuge. Zwar ist die Modellpalette noch nicht annähernd so groß wie die für Benzin und Diesel, aber schon heute lässt sich etwa ein halbes Dutzend Fahrzeuge vom Kastenwagen bis zum Mittelklassefahrzeug erwerben. Eine aktuelle Typenliste kann bei H2 MOBILITY abgerufen werden.

[www.h2.live](http://www.h2.live)  
> wasserstoffautos

Die Vorteile der wasserstoffgetriebenen Brennstoffzellenfahrzeuge gegenüber den reinen Elektrofahrzeugen sind:

- Geringeres Gewicht der Antriebskomponente (Tank und Brennstoffzelle vs. Batterie)
- Kurze Tankzeiten von wenigen Minuten, ähnlich Benzin und Diesel
- Erheblich höhere Reichweiten und Einsatzzeiten
- Integration der Tankinfrastruktur in die bereits bestehende Tankstelleninfrastruktur
- Nutzung eigener Wasserstoffmengen in der Industrie

Durch die hohen möglichen Reichweiten und das im Vergleich zur Batterie geringere Gewicht werden mit Wasserstoff betriebene Brennstoffzellen langfristig wahrscheinlich zur Alternative im Schwerlastverkehr zu Land, Wasser und auch in der Luft werden.

Neben der Nutzung in mobilen Brennstoffzellen wird auch vorhandene Pkw-Motorentechnik für den Betrieb mit Wasserstoff weiterentwickelt. Dieser Ansatz hat den Vorteil, auf vorhandene Technik, verhältnismäßig günstige Rohstoffe und das Knowhow aus vielen Jahrzehnten der Motorenentwicklung zurückgreifen zu können. Die Entwicklung eines serienreifen Wasserstoffmotors wird mittelfristig erwartet.

## Brennstoffzellen als Gebäudeheizung

Brennstoffzellen zur Energieversorgung arbeiten leise und schadstofffrei mit bis zu 90 % Wirkungsgrad bei gleichzeitiger Erzeugung von Wärme und Strom (Kraft-Wärme-Kopplung – KWK). Heutzutage werden die am Markt verfügbaren Brennstoffzellen meist mit Erdgas bzw. mittelfristig mit klimaneutralen Gasen betrieben. PEM-Geräte enthalten dazu einen miniaturisierten Reformer, in dem der Wasserstoff für die Brennstoffzelle aus dem Gas hergestellt wird; SOFC-Geräte nutzen das Gas direkt.

Der auch bei kleiner Leistung hohe Wirkungsgrad prädestiniert Brennstoffzellenheizungen für dezentrale Versorgungsaufgaben. Kleinste Einheiten versorgen portable Kommunikations- und Messgeräte. Eigenheime und Kleinbetriebe werden mit Mikro-KWK-Anlagen auf Gasbasis (Erdgas / erneuerbare Gase) im kW-Maßstab betrieben. Etwas größere Einheiten werden für Funk- und Netzumspannstationen eingesetzt, noch größere bis in den MW-Bereich dienen wieder der KWK für Großgebäude und Industrie oder gewährleisten wartungsarm eine unterbrechungsfreie Stromversorgung. Die sauerstoffarme Abluft aus Brennstoffzellen kann zusätzlich für den Brandschutz in Lagern und Datenzentren genutzt werden.

In Deutschland wird der Einbau von Brennstoffzellen als Heizungsanlage stark durch das KfW Programm 433 „Energieeffizient Bauen und Sanieren – Zuschuss Brennstoffzelle“ gefördert. Die Höhe des sich auf bis zu 28.200 € belauenden Zuschusses ist abhängig von der elektrischen Leistung der Anlage. So wurden 2018 nach 343 (2016) und 1.558 (2017) insgesamt 3.625 Brennstoffzellenheizungen installiert. Für 2019 wurde mit einem weiteren Anstieg auf ca. 4.500 Geräte gerechnet. Durch die steigende Anzahl an Installationen kann mittelfristig eine preisliche Degression erwartet werden.

Besonders für die Installation in Hotels empfehlen sich Brennstoffzellen durch ihren sehr leisen Betrieb. So hat das Radisson Blu in Frankfurt (Main) 2018 eine Brennstoffzelle mit einer Leistung von 400 kW<sub>e</sub> erhalten, wodurch das Hotel die Ruhe im Haus erhält und gleichzeitig pro Jahr 600 t CO<sub>2</sub>-Emissionen einspart.

Seit 2018 betreibt Microsoft ein dezentral strukturiertes Rechenzentrum in Seattle mit zehn Brennstoffzellen-Generatoren von SOLIDpower aus Deutschland als Server-Energiequelle. Die Brennstoffzellen werden jeweils direkt über einem Serverrack installiert und erzeugen unmittelbar vor Ort den benötigten Strom. Damit werden sowohl die Betriebskosten als auch der CO<sub>2</sub>-Ausstoß im Vergleich zu einer zentralisierten Architektur reduziert.

[www.kfw.de](http://www.kfw.de)  
> Privatpersonen  
> Bestandsimmobilie  
> Förderprodukte  
> Energieeffizient-Bauen-  
und-Sanieren-Zuschuss-  
Brennstoffzelle-(433)

Bei der Einführung höherer Wasserstoffgehalte muss dem geänderten Brennverhalten Rechnung getragen werden. Wasserstoff verbrennt mit hoher Flammgeschwindigkeit und höheren Temperaturen als Methan, weswegen beispielsweise die Werkstoffe im Einflussbereich unter Umständen geändert werden müssen.

### Wasserstoff in Gasbrennern aller Art

Die Hersteller von Hausgeräten, wie Gasbrennwertheizungen, Gasherden aber auch KWK-Anlagen, bereiten ihre Produktpalette auf die langfristige Entwicklung der Energieversorgung vor und haben teilweise bereits Lösungen für den Betrieb mit reinem Wasserstoff im Portfolio. Da die permanente und ausfallsichere Versorgung mit Wasserstoff in Deutschland bisher die Ausnahme ist, werden viele Geräte und Anlagen zunächst für einen Mischbetrieb mit Brenngas aus wechselnden Anteilen von Methan und Wasserstoff vorbereitet oder freigegeben.

Bestandsanlagen können nicht grundsätzlich für Wasserstoffanteile größer 5 % freigegeben werden. Eine Erhöhung auf 20 % wird langfristig angestrebt. Derzeit werden die für die Erhöhung gültigen technischen Regeln sowie die entsprechenden Prüfmethoden entwickelt. Im Anschluss daran werden die vom DVGW erstellten Regelwerke mit den Ergebnissen überarbeitet.

Vergleichbar zur noch bis 2022 im Westen Deutschlands stattfindenden Umstellung von L- auf H-Gas wird es bei einer Erhöhung der Wasserstoffbeimischung umfangreiche Informationskampagnen geben, während derer sich Eigentümer von betroffenen Geräten sowohl bei den Herstellern als auch bei den Netzbetreibern über die Eignung ihrer Heizungen informieren können. Sollte die Eignung nicht gegeben sein, reicht im Optimalfall der Tausch der Brennereinheit aus, um die Nutzung von Wasserstoff-Mischungen zu erlauben. Manche aktuelle Geräte erhalten bereits heute funktionelle Garantien auf bis zu 20 % Wasserstoffanteil im Erdgas.

Neben der Eignung der Gasheizungen muss auch deren Anschluss an die Gasversorgung auf Wasserstofftauglichkeit hin untersucht werden. Grundsätzlich sind Rohrleitungen aus Kupfer und Armaturen aus Messing sowie Stahlleitungen und -fittings für den Wasserstofftransport geeignet.

Sollte bei ungeeigneten Anschlüssen oder Geräten keine einfache Möglichkeit zur Anpassung an höhere Wasserstoffgehalte möglich sein, ist ein Neubau des Hausanschlusses bzw. der Heizungsanlage in Betracht zu ziehen. Dafür wird es umfangreiche Förderprogramme und technische Weiterentwicklungen, die z. B. die Nutzung kostengünstiger Kunststoffrohre ermöglichen, geben. Einige Grundlagen werden dazu in einem Pilotprojekt innerhalb des HYPOS-Netzwerkes in Leuna ermittelt.

[www.hypos-eastgermany.de](http://www.hypos-eastgermany.de)



## Wasserstoff in KWK-Anlagen

### Motor-BHKWs

Stationäre Gasmotor-Blockheizkraftwerke wurden historisch schon an viele verschiedene Brennstoffe, wie Biogas, Holzgas, Propan, Klärgas etc., angepasst. Dies erfolgte häufig durch Änderungen in der Mischung von Brenngas und Verbrennungsluft und durch Anpassungen im Zündregime.

Wegen des abweichenden Brennverhaltens von Wasserstoff müssen gegebenenfalls die Werkstoffe im Brennraum der Motoren geändert werden. Gleiches betrifft die Ventile und die Zündeinrichtung. Betrachtet man diese Änderungen in Bezug auf das gesamte BHKW, so sind die Mehrkosten für die sogenannte H<sub>2</sub>-Readiness gering. Entsprechende Aggregate sind seit 2018 auf dem Markt.

### Gasturbinen

Für Gasturbinen gelten die gleichen Aussagen in der Modifikation des Brennraumes wie für Motor-BHKWs. Allerdings beschränken sich die bei den bis 400 kW<sub>e</sub> als Mikrogasturbinen bezeichneten KWK-Anlagen notwendigen Anpassungen meist auf den Brenner. Denn in Gasturbinen strömt das heiße Gas erst nach der Verbrennung in die sich drehenden Turbinenschaufeln und kann in seiner Temperatur leicht so eingestellt werden, dass es dort auch ohne Werkstoffanpassung keine Schäden verursacht.

Für den Brenner haben Hersteller von Gasturbinen bereits technische Lösungen gefunden, mit denen vollmodulierend zwischen 100 % Methan und 100 % Wasserstoff gefahren werden kann. Wegen der Vielzahl an miniaturisierten Flammen hat z. B. KAWASAKI seinen entsprechenden Brenner „Micro-Mix“ getauft.

## Methanisierung von Wasserstoff

Ist eine direkte Nutzung von Wasserstoff nicht möglich und der Transport nicht wirtschaftlich, kann er zu Methan oder anderen Basischemikalien umgewandelt werden.

So kann Wasserstoff chemisch im sogenannten Sabatier-Prozess zusammen mit CO<sub>2</sub> unter Abgabe von Wärme zu Methan umgesetzt werden. Des Weiteren gibt es mit dem Fischer-Tropsch-Prozess ein Verfahren, in dem Synthesegas (H<sub>2</sub> und Kohlenstoffmonoxid – CO) zur Kohlenwasserstoffsynthese eingesetzt wird und dort Grundlage grüner Erdölersatzstoffe sein kann. Zudem gibt es in der Pilotphase befindliche biologische Verfahren, in denen Archae-Bakterien unter Sauerstoffabschluss den Wasserstoff zusammen mit CO<sub>2</sub> zu Methan umsetzen.



# 5 Wasserstoffspeicherung

Eines der bisher noch nicht gelösten Probleme eines in Zukunft auf elektrischen Strom ausgerichteten Energiesystems ist die Synchronisierung der teilweise stark schwankenden Produktion und einer verlässlichen Versorgung der Verbraucher mit Energie. Hierzu wird speicherbare und schnell abrufbare Energie notwendig. Gegenüber elektrischer Energie hat die in grünem und blauem Wasserstoff und allen anderen erneuerbaren Gasen chemisch gebundene Energie den Vorteil, in großen Mengen, wiederholbar und saisonal weitgehend verlustfrei speicherbar zu sein. Die Art des genutzten Speichers orientiert sich im Einzelfall an Sinn und Zweck des jeweiligen Speicherstandortes.

## Unterirdische Wasserstoffspeicherung

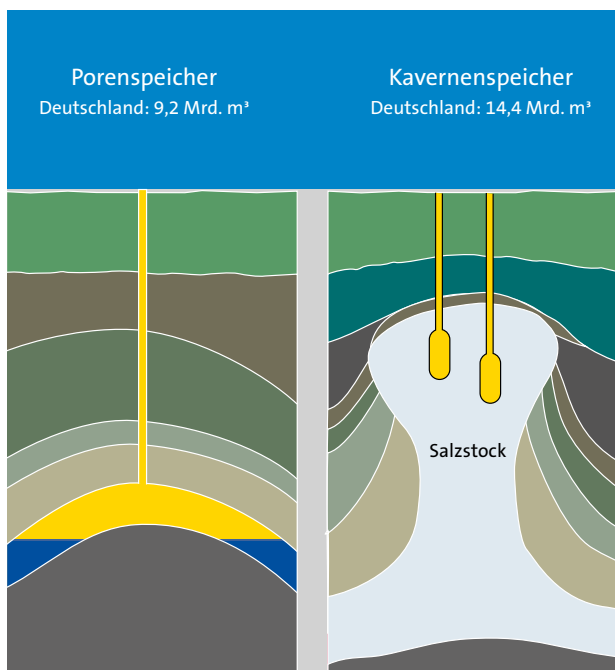
Sollen große Mengen Wasserstoff gespeichert werden, eignen sich insbesondere Salzkavernen aber auch Poren- oder Aquiferspeicher.

Salzkavernen werden neben Porenspeichern in großem Stil zur Erdgasspeicherung eingesetzt. Deutschland verfügt über unterirdische Gasspeicher mit einem Gesamt-Arbeitsgasvolumen von 23,6 Mrd. m<sup>3</sup>. In Teeside (Großbritannien) sowie in Texas (USA) werden seit langem Salzkavernen auch zur Speicherung von Wasserstoff eingesetzt. Derzeit laufen in Deutschland erste Projekte zur Wasserstoffspeicherung in Salzkavernen (z. B. HyPOS in Mitteldeutschland) und Porenspeichern (z. B. Forschungsspeicher Ketzin) an.

Der Forschungsporenspeicher Ketzin wurde für den möglichen Einsatz als Wasserstoffgroßspeicher mit Blick auf oftmals befürchtete Gasverluste hin untersucht. Wasserstoffemissionen wurden dabei nicht festgestellt. Allerdings wird zu Beginn einer Speicherinbetriebnahme etwas mehr Wasserstoff benötigt, da die H<sub>2</sub>-Löslichkeit in Stein und in Wasser wesentlich größer ist als bisher angenommen wurde. Daraus folgt, dass das umgebende Gestein beim Befüllen des Speichers zunächst Wasserstoff aufnimmt und das volle Speichervolumen erst nach dem Erreichen einer Sättigungskonzentration genutzt werden kann.

Mit abnehmendem Mengenbedarf eignen sich auch Röhrenspeicher oder stehende Druckgasbehälter, die dezentral eingesetzt werden können, zur Wasserstoffspeicherung. Röhrenspeicher bestehen aus Pipelinerohren mit großem Durchmesser, die in geringen Tiefen in ebenem Gelände eingegraben werden. Sie erlauben eine Begrünung oder eine landwirtschaftliche Nutzung an ihrer Oberfläche und werden zumeist von lokalen Versorgern angelegt, um Nachfrageschwankungen beim Erdgas auszugleichen. Jedoch sind sie gegenüber Untertage-Großspeichern weniger wirtschaftlich betreibbar.

Schematische Darstellung von Poren- bzw. Aquiferspeichern und Kavernenspeichern, die sich zur H<sub>2</sub>-Speicherung in großen Dimensionen eignen. ©lbgr Brandenburg



## Druck- und Kryospeicherung

Etabliert sind heutzutage die Druckspeicherung bei 350 oder 700 bar sowie die Speicherung von flüssigem  $H_2$  bei sehr tiefen Temperaturen unter  $-253\text{ °C}$ .

Bei der Druckspeicherung sind die Tanks heute noch teurer als z. B. Erdgastanks. Beispielsweise wird für das Brennstoffzellenauto Hyundai Nexo, das nach Werksangaben eine Reichweite von bis zu 756 km haben soll, bei 350 bar ein Volumen von 157 Liter Wasserstoff benötigt. Die Speicherung findet im Nexo auf drei Karbontanks verteilt statt.

Bei Flüssigspeichern, die vor allem im Schwerlastverkehr diskutiert werden, ist noch keine vollständige Wärmeisolierung möglich. Dadurch verdampft permanent ein Teil des Wasserstoffs und erhöht den Druck im Tank, bis ein bestimmter Druck erreicht ist. Dann entweicht  $H_2$  über ein Überdruckventil und muss genutzt werden. Bei einem z. B. im Speditionsverkehr stark genutzten Lkw dürfte dies wegen der kontinuierlichen Abnahme kein Problem sein.

Wegen der Verdampfung ist die Lagerfähigkeit in Flüssigspeichern zeitlich begrenzt. Die Nutzung von Flüssigwasserstoff an Tankstellen erlaubt es aber, einen Teil der für die Verflüssigung aufgewendeten Energie an der Tankstelle wieder einzusparen.

Die Wasserstoffverflüssigung bietet eine sehr hohe Energiedichte. Ein entsprechend ausgerüsteter Trailer kann etwa vier Tonnen Wasserstoff transportieren, was einem Energiegehalt von etwa elf Tonnen Dieseldieselkraftstoff entspricht.

Sowohl Druck- als auch Kryospeicherung führen zu Energieverlusten, da für die Kompression bzw. die Verflüssigung 10 – 30 % des Energieinhalts des zu speichernden Wasserstoffs aufgebracht werden müssen. Die Suche nach alternativen Verfahren ist demnach ein hochrelevantes Forschungsgebiet. Für akzeptable Tankgrößen und Gewichte sind volumetrische Speicherdichten über 5 Liter  $H_2$  pro 100 Liter Material nötig.



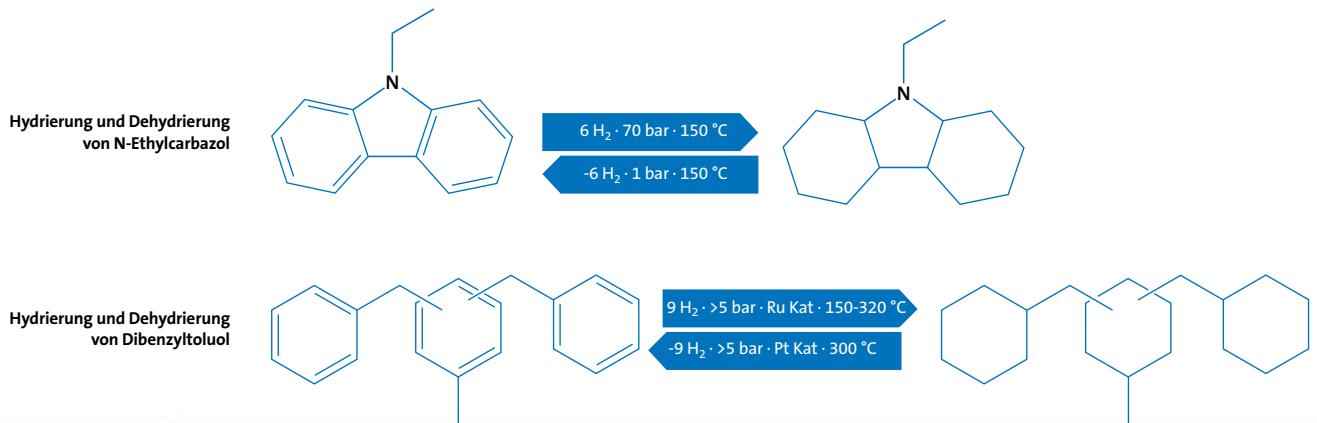
## Flüssigspeicher

Die sogenannten Liquid organic hydrogen carrier (LOHCs) oder einfacher Flüssigspeicher wurden in den letzten Jahren an verschiedenen Einrichtungen aktiv beforscht. Derzeit werden verschiedene Konzepte zur Markteinführung entwickelt.

Wasserstoff wird in diesem Verfahren chemisch in organischen Molekülen eingelagert und kann zur Nutzung wieder von der Trägerflüssigkeit entfernt werden.

Als Speicherflüssigkeiten werden hauptsächlich N-Ethylcarbazol und Dibenzyltoluol, seltener auch Aminoborane verwendet. Bei Dibenzyltoluol handelt es sich um eine gelbliche, im Temperaturbereich zwischen  $-39\text{ }^{\circ}\text{C}$  und  $390\text{ }^{\circ}\text{C}$  stabile Flüssigkeit. In der hydrierten Form wird die Flüssigkeit farblos und etwa 10 % schwerer. Pro Kubikmeter lassen sich etwa 57 kg Wasserstoff in Dibenzyltoluol speichern.

Die Reaktionszyklen lassen sich aktuell noch nicht beliebig oft wiederholen, so dass die Speicherflüssigkeit nach einer gewissen Zeit ausgetauscht werden muss.

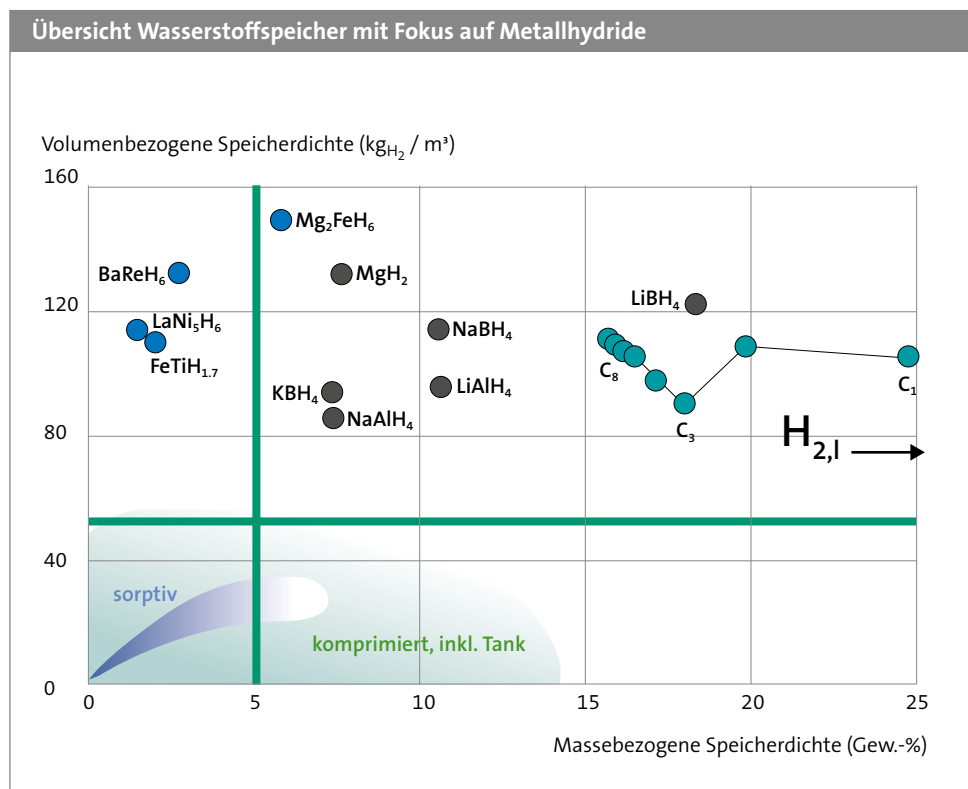




## Metallhydridspeicher

In Metallhydriden lassen sich Wasserstoffatome dichter anordnen als in reiner, verflüssigter Form. Hierbei wird der Wasserstoff über die Ausbildung einer chemischen Bindung in einem Metall oder einer Metalllegierung gespeichert. Dieser Prozess wird Chemisorption, einem der Adsorption ähnlicher, aber durch stärkere chemische Bindungen gekennzeichneten Prozess, genannt. In dem dadurch gebildeten Metallhydrid liegt der Wasserstoff nicht mehr als Molekül, sondern atomar bzw. als Anion vor. Das heißt, auch hier muss ein Teil der im Wasserstoff enthaltenen Energie zum Brechen einer Bindung und der Ausbildung einer neuen Bindung aufgewandt werden. Durch Druckminderung und leichte Wärmezufuhr lässt sich der Prozess umkehren und Wasserstoff wird wieder freigesetzt. Mögliche Metallhydride sind unter anderem Magnesiumhydrid ( $\text{MgH}_2$ ), Lithiumhydrid ( $\text{LiH}$ ) oder und Natriumaluminiumhydrid ( $\text{NaAlH}_4$ ).

Zu den Vorteilen der Wasserstoffspeicherung in Metallhydriden gehören der sichere Transport, die einfache Lagerung ohne hohe Drücke sowie die kompakte Bauweise der Tanks. Nachteile sind die hohe Masse durch die schwere Metallfüllung und eine momentan noch eher geringe Speicherkapazität von wenigen Gewichtsprozenten. Die Tendenz ist hier jedoch steigend. Des Weiteren wirkt sich die langsame Be- und Entladung negativ auf die wirtschaftliche Anwendbarkeit der Metallhydridspeicher aus. Trotzdem werden Metallhydridspeicher schon in U-Booten mit Brennstoffzellenbetrieb eingesetzt, da sich hier die hohe Masse der Speicher (für einen 5-kg- $\text{H}_2$ -Tank werden 250 kg Metallhydrid benötigt) nicht so stark limitierend auswirkt wie auf den restlichen Mobilitätssektor.



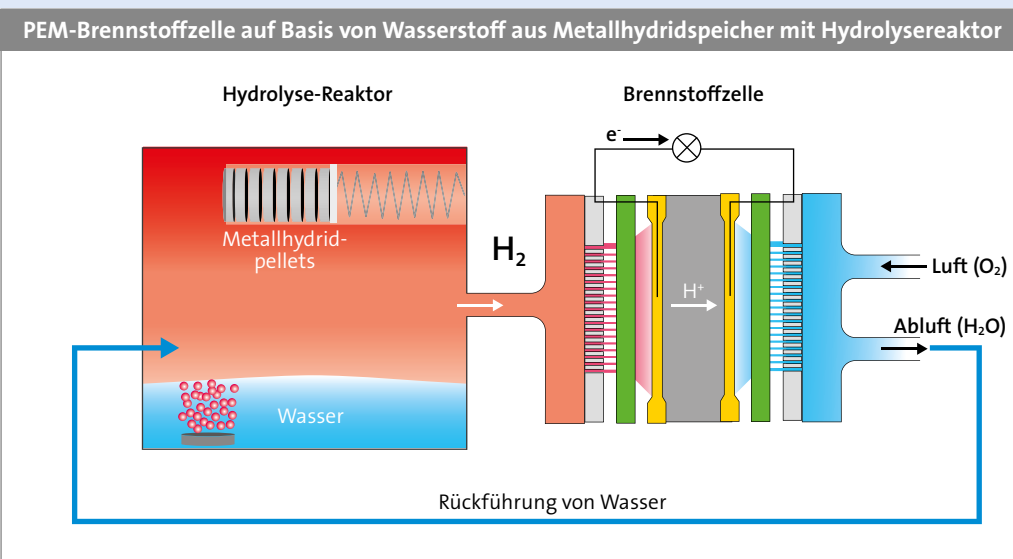
**Beispiel**

Die von Fraunhofer IFAM entwickelte „Power Paste“ ist ein Metallhydridspeicher für leichte elektronische Fahrzeuge oder Drohnen, zum Camping, für Kompaktradios, aber auch in der Medizin, auf Baustellen und als Backup bzw. Notstromreserve. Das Speichermaterial wird in einem Wasserstoffgenerator montiert und mit Wasser in Kontakt gebracht. Dabei lässt enthaltenes Magnesium Wasserstoff frei und wandelt sich in Magnesiumhydroxid um. Hierbei werden spezielle Additive in katalytischen Mengen eingesetzt, um eine Passivierung des Magnesiums zu verhindern.



Die Hälfte des so produzierten Wasserstoffs stammt vom eingesetzten Wasser, was der Grund für die hohe spezifische Energie ist. Die verwendeten Reaktionspartner sind ungiftig und der Wechsel der Powerpaste kann schnell und ohne Werkzeug erfolgen. Außer der Brennstoffzelle besteht der Generator aus einfachen mechanischen und elektronischen Komponenten.

Die Kosten liegen heute schon im Bereich von kommerziellen, nicht wieder aufladbaren Batterien. Das verwendete Material besitzt bei einem Wasserstoffgehalt von 10 % eine spezifische Energie von 1,6 kWh/kg bzw. eine Energiedichte von 1,9 kWh/l. Das ist mehr als die zehnfache Kapazität von Li-Ionenbatterien.



Datenvorlage: Fraunhofer IFAM, Dresden

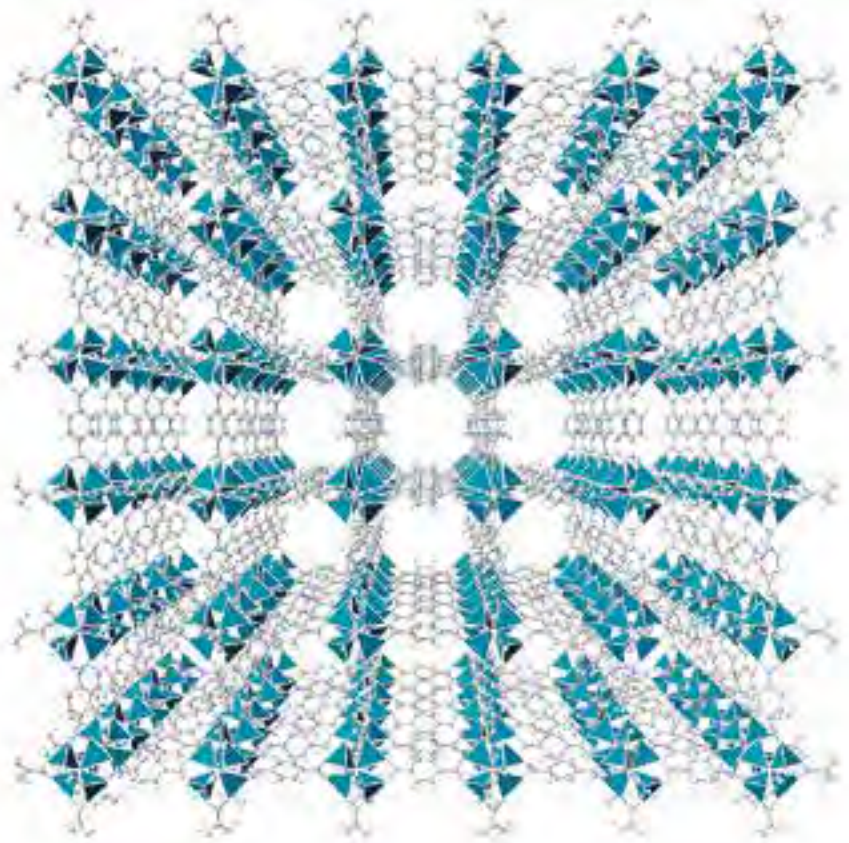


## Adsorption

Wasserstoff kann neben der Ausbildung chemischer Bindungen auch durch schwächere Bindungen an Festkörperoberflächen gebunden werden. Diese Adsorption besteht zumeist über Van-der-Waals-Anziehungskräfte und lässt sich wesentlich leichter wieder lösen als chemische Bindungen. Das wasserstoffspeichernde Medium muss sich durch möglichst hohe Oberflächen auszeichnen, um eine hohe  $H_2$ -Beladung zu gewährleisten.

Als Sorbens, d. h. als das adsorbierende Material, wurden zunächst Kohlenstoffnanoröhrchen untersucht. Nachdem sich die Beladung dieser Röhrchen um die Jahrtausendende als unzureichend herausstellte, wurden auch so genannte metallorganische Gerüststrukturen (MOFs – metal-organic frameworks) untersucht. Diese Kristallklasse verbindet die Eigenschaften von Kunststoffen mit denen von Metallen. MOFs sind sehr leicht und bieten Oberflächen von bis zu  $6.000 \text{ m}^2/\text{g}$ . Die Wasserstoffanlagerung erfolgt optimal bei  $-196 \text{ }^\circ\text{C}$  und einem Druck von 20 bar. Bei diesen Bedingungen ist die Bewegungsenergie des  $H_2$  ausreichend gering, um sich über Van-der-Waals-Anziehung an die Oberfläche des MOFs anzuheften. Es wurden Verfahren entwickelt, um im Kilogramm-Maßstab MOFs mit Speicherkapazitäten von bis zu 15 Gew-% herzustellen.

Für einen Praxiseinsatz spricht die relativ schnelle Beladung, die in weniger als vier Minuten erfolgen kann. Nachteile der molekulorganischen Verbindungen sind die Anforderungen an die Tanks, die mit Flüssigstickstoff gekühlt werden müssen und daher hohe Anforderungen an die Isolierung stellen. Es wird weiter an diesen Materialien geforscht.



Darstellung eines MOF mit metallischen Verbindungen als blaue Tetraeder, die durch organische Brücken (weiße Struktur) miteinander verbunden sind.  
Bild: MPI Metallforschung Stuttgart, Michael Hirscher

## 6 Wasserstoffinfrastruktur

### Wasserstofftransport

Neben dem Transport von Wasserstoff in geeigneten Tankfahrzeugen spielt der leitungsgebundene Transport eine zentrale Rolle. In Industriebetrieben wird der für viele Prozesse notwendige Wasserstoff in Rohrleitungen verteilt. Ein einzelnes, größeres, regionales Wasserstoffnetz mit 240 km Länge verbindet seit 1938 Industriestandorte von Marl im Nordosten des Ruhrgebietes bis hin zu Duisburg im Westen des Ruhrgebietes.

Bevor die Förderung von Erdgas mit bis zu 98 % Methangehalt weltweit ausgebaut wurde, enthielten städtische Gasleitungen ein Gemisch aus bis zu 50 % Wasserstoff und Kohlenstoffmonoxid. Mit Einführung des Erdgases, welches kaum nennenswerte Wasserstoffanteile besitzt, wurden diese meist aus Kohle hergestellten Gase jedoch verdrängt.

### Beimischungsgrenzen und Leitungsanforderungen

Heute beträgt der Anteil an Wasserstoff im Erdgas nur max. 2 Vol.-%. Laut den DVGW-Blättern G260 und G262 sind 10 % im Erdgasnetz in weiten Teilen unbedenklich, Untersuchungen zu einer Beimischung von 20 % finden derzeit statt.

Zusätzlich wird untersucht, wie sich eine weitere Erhöhung der Wasserstoffkonzentration auswirkt. Bevor eine Gastransportleitung mit Erdgas mit noch höheren Wasserstoffkonzentrationen beaufschlagt wird, muss aus Sicherheitsgründen auf schon vorhandene Korrosion oder Rissbildung geprüft und die grundsätzliche Materialverträglichkeit bestätigt werden. Problematisch kann sich hierbei die Tatsache darstellen, dass es sich beim Gasnetz um eine historisch gewachsene Struktur handelt, in der eine Vielzahl von Werkstoffen mit unterschiedlichen Eigenschaften vorhanden sind. Bestehen im Untersuchungsergebnis dann Risiken, müssen unter Umständen Leitungsabschnitte auf vorhandenen Trassen neu gebaut werden. In diesem Fall wird heute zumeist der Stahl 1.0582 (L360 NB) als Leitungswerkstoff gewählt, der für Wasserstoff uneingeschränkt geeignet ist.

Neben den materialtechnischen Einflüssen von Wasserstoff müssen auch im Gasnetz vorhandene Verdichter, Armaturen und Sensoren auf ihre Wasserstoffverträglichkeit hin untersucht werden. So sind beispielsweise viele zur Messung der Gaszusammensetzung verbaute Gaschromatographen nur bis 5 % Wasserstoff freigegeben.

Es wird als Ergebnis erwartet, dass die Erhöhung des Wasserstoffanteils im Gasnetz auf Werte über 20 % realisierbar sein wird. Die notwendigen Materialeigenschaften von Leitungen und allen Einbauten sind schon heute bekannt und entsprechend ausgerüstete technische Lösungen werden am Markt verfügbar sein. Der finanzielle und praktische Aufwand zur Umrüstung der Gasnetze muss aber von sicheren Bedingungen für die langfristigen Investitionen begleitet werden.



## Wasserstoff im Erdgasnetz: Ausblick

Die aktuelle Grenze von 2 % Wasserstoff im deutschen Gasnetz basiert im Wesentlichen darauf, dass insbesondere Tanks von älteren Erdgasfahrzeugen keine Zulassung für höhere Wasserstoffkonzentrationen besitzen. Eine Nachrüstung von Tanks aus wasserstoffdichter Kohlefaser ist aber technisch problemlos möglich.

Eine weitere Schwelle liegt bei 5 % Wasserstoffanteil, bei dem einige Hersteller von Gasturbinen ein Limit setzen, weil die größere Flammgeschwindigkeit und die höheren Temperaturen der Wasserstoff-Verbrennung die stark optimierten Anlagen negativ beeinflussen können. Gasturbinenbrenner, die im Erdgas enthaltenen Wasserstoff flexibel mitverbrennen können, sind in der Entwicklung oder werden gerade auf den Markt gebracht. Des Weiteren gibt es in der Glas- und Keramikindustrie vereinzelt Prozesse, die auf möglichst geringe Anteile von Wasserstoff angewiesen sind und die Umrüstung ihrer aufwändigen Brenntechnik scheuen.

Die Hersteller von Hausgeräten, wie Gasbrennwertheizungen, Gasherden aber auch KWK-Anlagen, sind schon weiter fortgeschritten und geben teilweise funktionelle Garantien auf bis zu 30 % Wasserstoffanteil im Erdgas. Einzelne Hersteller entwickeln bereits Gasbrenner, die mit reinem Wasserstoff betrieben werden können. Sollen diese Geräte im privaten Umfeld eingesetzt werden, müssen beim Anschluss an ein Wasserstoffnetz andere Regeln befolgt werden, als es beim Erdgas der Fall ist. Die vom DVGW erstellten technischen Regelwerke werden dahingehend aktualisiert. Einige Grundlagen werden dazu in einem Pilotprojekt innerhalb des HYPOS-Netzwerkes in Leuna ermittelt.

[www.hypos-eastgermany.de](http://www.hypos-eastgermany.de)



### Tankstellen

Für mobile Anwendungen wird vor allem die 700-bar-Technik bei Tanks und Tankstellen als Standard angewendet.

Zum Ende des Jahres 2019 waren in Deutschland 79 Wasserstofftankstellen in Betrieb, weitere 8 befanden sich in Inbetriebnahme und Probebetrieb und 18 Tankstellen waren geplant oder schon im Bau. In Österreich kamen 2018 auf 20 registrierte Wasserstofffahrzeuge 5 Tankstellen. Weltweit gab es Ende 2016 gerade einmal 210 Tankstellen.

Mit dem weiter fortschreitenden Ausbau und einer daraus folgenden Massenproduktion werden die Systemkosten jedoch sinken. Eine Wasserstofftankstelle ist heute noch als Sonderanlagenbau zu bezeichnen und führt daher auch zu hohen spezifischen Kosten. Kostentreibend ist dabei auch die fehlende Wasserstoffinfrastruktur (Pipelines), was dazu führt, dass diese Tankstellen entweder Wasserstofftanks vor Ort installieren oder aber in einen Reformer investieren müssen, der den Wasserstoff direkt aus Erdgas herstellt. Zukünftig soll der Ausbau jedoch stark gefördert werden. Bis 2023 soll die Anzahl auf 300 erhöht werden.

In der Schweiz wird zurzeit der Einsatz von Wasserstoff-LKWs gestartet. Noch in 2019 sollten die ersten von bis zu 1.600 Brennstoffzellen-Fahrzeugen von Hyundai geliefert und durch die H2 Energy AG an den Förderverein „H2 Mobilität Schweiz“ verleast werden. Japan hatte es sich für die wegen der Corona-Pandemie abgesagten Olympischen Sommerspiele 2020 selbst zum Ziel gesetzt, 40.000 wasserstoffbetriebene Pkw und 160 Wasserstofftankstellen einzusetzen. Darüber hinaus sollten die Gäste in 200 Wasserstoff-Bussen zu den Austragungsstätten befördert werden.



Wasserstoff bietet erhebliche Chancen, die Emissionen von klimaschädlichen Gasen in allen Sektoren deutlich zu reduzieren. Das Maß, in wie weit der Wasserstoff auf Basis erneuerbarer Energie erzeugt oder wie erfolgreich CO<sub>2</sub>-Emissionen bei seiner Herstellung vermieden wurden, entscheidet über seinen tatsächlichen Klimaschutzeffekt.

Der sogenannte Content Switch, d. h. die Erhöhung des Anteils blauer oder grüner Gase in den Gasinfrastrukturen, wird durch die direkte Wasserstoffnutzung unterstützt. Der technische Aufwand, die Gasinfrastruktur für überregionalen und internationalen Wasserstofftransport umzurüsten, ist überschaubar. Somit ist aus volkswirtschaftlicher Sicht der Weiterbetrieb der vorhandenen Infrastrukturen mit einem erneuerbaren Medium wünschenswert und einer rein elektrischen Versorgung in allen Sektoren (Stromversorgung, Mobilität, Wärmemarkt) vorzuziehen.

## Broschüren



Power to Gas  
Online-PDF



Brennstoffzellen für die  
Hausenergieversorgung  
Bestellnummer  
309619



Mikrogasturbinen  
Bestellnummer  
510601



Biogas/Biomethan -  
Erneuerbare Energie  
aus der Leitung  
Bestellnummer  
310118



Energiewende anders  
Bestellnummer  
309943

#### Herausgeber

ASUE Arbeitsgemeinschaft für  
sparsamen und umweltfreundlichen  
Energieverbrauch e. V.  
Robert-Koch-Platz 4  
10115 Berlin

Telefon 0 30 / 22 19 1349-0

info@asue.de  
www.asue.de

#### Bearbeitung

ASUE-Arbeitskreis Erneuerbare Gase  
Thomas Wencker  
Jürgen Kukuk

#### Grafik

Kristina Weddeling, Essen

#### Verlag

wvgw Wirtschafts- und  
Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH  
Josef-Wirmer-Straße 3  
53123 Bonn  
Telefon 0228/9191-40  
info@wvgw.de  
www.wvgw.de

Energieträger Wasserstoff

Bestellnummer: 310929

Stand: April 2020

Überreicht durch:

