

Erzeugung von Wasserstoff

HINTERGRUND

In einem auf der Nutzung der regenerativen Primärenergiequellen Wind, Sonne und Wasserkraft basierenden Energiesystems ist nach heutiger Einschätzung davon auszugehen, dass die Endenergieform Elektrizität eine zentrale Rolle spielen wird. Dies ist darin begründet, dass die heute und in der absehbaren Zukunft verfügbaren und eingesetzten Technologien (im Wesentlichen Windturbinen, Photovoltaikanlagen und Wasserturbinen) diese netzgebundene Energieform direkt bereitstellen. Eine Folge davon ist die zentrale Rolle elektrischer Netze in einem derartigen System.

Die von Anwendern benötigte Nutzenergieformen Wärme, Kälte, Bewegung und Licht können zwar in vielen Fällen durch die Umwandlung von Elektrizität bereitgestellt werden, es gibt aber auch technologische Grenzen. Beispielsweise ist Mobilität durchaus häufig (Züge, U-Bahnen, Straßenbahnen, Oberleitungsbusse) aber bei weitem nicht immer (PKW, LKW, Schiffe, Flugzeuge) leitungs-basiert realisierbar. Als direkte Stromspeicher kommen Batterien (aktuell Lithium-Ionen-Batterien) zum Einsatz. Dies führt zu sehr effizienten aber nicht immer notwendigerweise effektiven Lösungen. Die Batterie hat ihre Vorteile auf Straßen, im Kurzstreckenbereich und bei leichten Fahrzeugen. Trotz enormen Fortschritten in den letzten Jahren ist die spezifische Energiedichte einer Batterie im Vergleich zu stofflichen Speichern niedriger und die spezifischen Preise sind höher.

Obwohl das technologische Potential der Batterietechnik (Stichwort Festkörperbatterie) bei weitem noch nicht ausgeschöpft ist, ist davon auszugehen, dass es in der Mobilität breite Anwendungsfelder im Bereich von Flugzeugen, Schiffen, Zügen, LKW und Nutzfahrzeugen gibt, bei denen auch langfristig stoffliche Energieträger zum Einsatz kommen werden. Weitere Einsatzgebiete dieser Energieträger sind in der Industrie zu finden, wo nicht alle thermischen Prozesse (z.B. in der Stahlherstellung) auf Strom umgestellt werden können. Schließlich ist es erforderlich, dass das elektrische System auch die sogenannte Dunkelflaute, also eine mehrwöchige Periode ohne nennenswertes Windaufkommen und bewölktem Himmel, beherrscht. Es gibt in diesem Zusammenhang zwar interessante Entwicklungen im Bereich der Redox-Flow-Batterien (Elektrolyte auf organischer Basis), dennoch dürfen auch hier auf stoffliche Energieträger mit ihrer hohen spezifischen Energiedichte zurückgegriffen werden.

Der einfachste chemische Energieträger ist Wasserstoff (H). Es ist davon auszugehen, dass dieses Element in Zukunft das stromzentrierte Energiesystem in nennenswertem Umfang ergänzt. Insbesondere kann Wasserstoff einen wichtigen Beitrag zur Sektorenkopplung leisten, er kann Methan beigemischt werden und er kann in Reinform nach der Durchführung von Anpassungsmaßnahmen mit der heutigen Erdgasinfrastruktur transportiert und verteilt werden.

Chemisch gesehen handelt es sich bei Wasserstoff immer um ein Molekül aus zwei Wasserstoffatomen (H₂). Je nachdem wie Wasserstoff erzeugt wird, werden ihm in der Praxis zur Kennzeichnung Farben* zugeordnet. Die chemischen und physikalischen Eigenschaften bleiben davon unberührt.

Grüner Wasserstoff wird aus regenerativen Energieträgern hergestellt. Er kann damit als nachhaltig angesehen werden. Als Ausgangsenergie stehen sowohl grüner Strom als auch aus Biogas hergestelltes Methan (CH₄) zur Verfügung. Aktuell wird der zur Wasserstoffherzeugung herangezogene Strom zwar (im Vergleich zu sonstigen Stromanwendungen) mit reduzierten Abgaben, Umlagen und Steuern beaufschlagt, dennoch stellt dies einen gravierenden wirtschaftlichen Nachteil für die Kosten des grünen Wasserstoffs dar. Beim Einsatz von Biogas tritt dieser Nachteil nicht auf.

Blauer Wasserstoff basiert auf fossilem Erdgas (Methan CH₄). Das Herstellungsverfahren ist mit einem CO₂-Abscheidungs- und -Speicherverfahren gekoppelt. Das CO₂ wird dabei nicht an die Atmosphäre abgegeben, sondern in Kavernen, alten Erdgas- oder Erdöllagerstätten verpresst. Vor allem Norwegen verfügt hier über große Erfahrungen. Aufgrund seiner fossilen Basis kann blauer Wasserstoff nur eine Übergangslösung darstellen.

Grauer Wasserstoff wird wie blauer Wasserstoff aus fossilen Energieträgern hergestellt. Allerdings wird das bei der Herstellung entstehende CO₂ emittiert und trägt so zum Klimawandel bei. Auch Wasserstoff, der aus konventionellem, fossil erzeugtem Strom hergestellt wird, gehört in diese Kategorie. Diese Art von Wasserstoff hat heute einen großen Anteil am verfügbaren Wasserstoff. Sie kann nicht als nachhaltig angesehen werden und ist daher kurzfristig zu substituieren.



„Türkisfarbener“ Wasserstoff entsteht bei der Methanpyrolyse. Dabei wird fossiles Methan katalytisch in Wasserstoff und festen Kohlenstoff C gespalten. Türkisfarbener Wasserstoff ist bei ganzheitlicher Betrachtung blauem Wasserstoff vorzuziehen. Allerdings ist die entsprechende Technologie noch nicht etabliert und führt daher aktuell zu höheren (betriebswirtschaftlichen) Kosten. Wiederum kann diese Form von Wasserstoff nur eine Übergangslösung darstellen.

Alle Umwandschritte benötigen Energie. Damit wird nur ein Teil der eingesetzten Energie in Wasserstoff umgewandelt.

ASPEKTE

Weltweit werden etwa 50 Millionen Tonnen Wasserstoff pro Jahr erzeugt und verbraucht. Davon werden ca. 60 % durch eigens errichtete Anlagen hergestellt. Nur 5 % dieser Menge wird durch Elektrolyse aus Strom und Wasser erzeugt. 95 % basieren auf dem Einsatz von fossilen Kohlenwasserstoffen (inkl. Erdgas).

Etwa 40 % des benötigten Wasserstoffs stammen aus Industrieprozessen, bei denen Wasserstoff als Nebenprodukt anfällt.

Beim Einsatz von Methan – dem Hauptbestandteil von Erdgas – ist zu beachten, dass dieses Gas ein sehr stark wirksames Treibhausgas ist. Es trägt 21 bis 25 mal stärker zum Klimawandel bei als CO₂. Bei der Förderung und dem Transport von Methan entweicht ein Teil davon schon vorab in die Atmosphäre (Vorkettenemission). Dies betrifft alle Verfahren, die Erdgas einsetzen und folglich auch die Erzeugung von Wasserstoff aus Erdgas. Je nach Quelle und Verfahren zur Wasserstoffgewinnung fallen hierbei mindestens Treibhausgasemissionen von umgerechnet 143 g CO₂ / kWh (bzw. 4,76 kg CO₂ / kg H₂) an.

Im Folgenden werden gängige Verfahren zur Wasserstoff-Erzeugung beschrieben und dem gewonnenen Wasserstoff die jeweilige Farbe zugeordnet. Dabei ist festzustellen, dass die Farbe des Wasserstoffs nicht zwingend an ein Verfahren gekoppelt ist, sondern es ebenfalls eine Rolle spielt, welche Ausgangsenergieform verwendet wird und im Zuge der Umwandlung CO₂ anfällt.

→ 1. Wasserstoff aus Chlor-Alkali-Elektrolyse im Zuge der Herstellung von Natronlauge und Chlor

Die weltweite Produktionskapazität von Chlor lag 2012 bei ca. 77 Mio. Tonnen pro Jahr. Das Verfahren wird seit Jahrzehnten großtechnisch angewendet. Es ist dort wirtschaftlich sinnvoll, wo ein Bedarf an Laugen (und gegebenenfalls Chlor) besteht, lohnt sich aber allein zum Zweck der Wasserstoffherstellung nicht. Basis des Prozesses ist die Umwandlung von Kochsalz NaCl und Wasser H₂O zu Chlor Cl₂, Natriumhydroxid (Natronlauge) NaOH sowie Wasserstoff H₂:



FARBE: Hier fällt der Wasserstoff in der chemischen Industrie als Nebenprodukt an und ist günstig verfügbar. Die Farbgebung ist hier nicht eindeutig: Oft wird diesem Wasserstoff keine Farbe zugeordnet, da es sich um ein Nebenprodukt handelt. Da es sich bei diesem Prozess um ein stromintensives Verfahren handelt, wird dieser Wasserstoff andererseits in der Literatur auch als **grauer** Wasserstoff bezeichnet. Die Energie wird in Form von elektrischem Strom zugeführt, so dass in neueren Studien der durch Chlor-Alkali-Elektrolyse gewonnene Wasserstoff entsprechend des Anteils erneuerbarer Energien am Strommix ebenfalls **anteilig als grün** angesetzt wird. Bei ausschließlicher Einsatz von regenerativ erzeugtem Strom kann somit auch **grüner** Wasserstoff gewonnen werden.

→ 2. Wasserstoff aus Dampfreformierung von Methan

Im Dampfreformer wird aus Methan (CH₄, Erdgas) und Wasserdampf (H₂O) in einem Reaktor bei hohen Temperaturen zunächst Wasserstoff H₂, Kohlenmonoxid CO erzeugt und in einem zweiten Prozessschritt der Kohlenmonoxid-Anteil mit Dampf zu Kohlendioxid CO₂ und Wasserstoff H₂ konvertiert:



Die Dampfreformierung von Erdgas ist aktuell die (betriebs-)wirtschaftlichste Methode, Wasserstoff zu erzeugen. Diese liefert weltweit den größten Anteil des jährlich benötigten Wasserstoffs.

FARBE: Standardmäßig wird bei der Dampfreformierung Erdgas eingesetzt. Der Wasserstoff wird dann als **grau** bezeichnet, wenn das CO₂ in die Atmosphäre abgegeben wird. Von **blauem** Wasserstoff spricht man, wenn das CO₂ abgeschieden und genutzt oder eingelagert wird.

Wird Biogas statt Erdgas als Energieträger eingesetzt, erhält man mit der Dampfreformierung **grünen Wasserstoff**.



→ 3. Wasserstoff aus Methanpyrolyse

Das Verfahren der Methanpyrolyse nutzt zur Wasserstoffherzeugung ebenfalls Erdgas als Quelle. Das enthaltene Methan wird thermisch in einem Hochtemperaturreaktor in gasförmigen Wasserstoff und festen Kohlenstoff gespalten. Aktuell gibt es hierfür nur Pilotanlagen. Der Vorteil ist, dass der Kohlenstoff hier in fester Form vorliegt und damit kein weiteres treibhauswirksames Gas entsteht.



FARBE: Für dieses Verfahren wurde eine eigene Wasserstofffarbe eingeführt. Da bei diesem Verfahren zwar Erdgas eingesetzt wird, dabei aber kein CO₂ entsteht bekommt der Wasserstoff die Farbe **türkis**.

→ 4. Wasserstoff aus Elektrolyse

Ein sehr bekanntes und in der jüngeren Zeit deutlich weiterentwickeltes Verfahren zur Gewinnung von Wasserstoff ist die Elektrolyse. Elektrischer Strom spaltet den Ausgangsstoff Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff. Hierbei wird von Power to Gas (PtG) gesprochen. Der elektrische Strom wird benötigt, um den gasförmigen Wasserstoff zu erzeugen. Mit letzterem hat man einen Energieträger, der besser speicherbar ist. PtG-Technologien sind technisch erprobt und verfügbar. Die Kosten für PtG-Technologien sind im Moment noch hoch, und werden durch Lern- und Skaleneffekte in der Zukunft noch deutlich sinken.

Es gibt verschiedene Elektrolyseverfahren: Stand der Technik ist hier die alkalische Elektrolyse. Vereinfacht gesagt werden hier zwei Metallelektroden, die durch eine Membran getrennt sind, in eine alkalische, wässrige Lösung eingetaucht. Nach dem Anlegen einer elektrischen Spannung und mit einsetzendem Stromfluss wird das Wasser gespalten. Bei der PEM-Elektrolyse, die ein Protonenaustauschmembran (Proton Exchange Membrane) verwendet, wird dagegen eine saure Lösung verwendet und die Anforderungen an die Elektroden sind höher. Dafür ist hier ein Betrieb in Teillast möglich und so kann besser auf schwankende Strommengen reagiert werden. Ein drittes Elektrolyseverfahren ist die Hochtemperaturelektrolyse. Dieses Verfahren ist noch nicht kommerziell verfügbar, sondern befindet sich in der Entwicklung. Die chemische Reaktion lautet:



FARBE: Die Farbe des erzeugten Wasserstoffs hängt bei der Elektrolyse von der Herkunft des Stroms ab. Wenn dafür Strom aus erneuerbaren Energien (EE) eingesetzt wird, wie dies propagiert wird, erhält man **grünen** Wasserstoff. Die Elektrolyse soll die Hauptquelle für grünen Wasserstoff werden, da die Elektrolyseure stromnetzdienlich gefahren werden können und somit genau dann Wasserstoff erzeugen,

wenn der Strom aus EE sonst nicht benötigt wird oder das Stromnetz den Strom lokal nicht aufnehmen kann.

Prinzipiell ist hier für die Farbe entscheidend, ob bei der Erzeugung des eingesetzten Stroms CO₂ angefallen ist oder hierfür regenerative Energien verwendet wurden.

→ 5. Kohlevergasung

Die Kohlevergasung war früher für die Herstellung von Stadtgas wichtig, heute ist sie für den Einsatz in Kraftwerken, sowie für die chemische Industrie (Synthesegas) und für die Hüttenindustrie bedeutungsvoll. Hier wird Kohle als Rohstoff eingesetzt und zusammen mit Wasser entsteht neben Wasserstoff auch CO₂:



FARBE: Bei der Kohlevergasung entsteht CO₂. Daher erhält man hier **grauen** Wasserstoff. Mit großem Aufwand und Kosten könnte das CO₂ abgeschieden und gespeichert werden. Theoretisch ist es daher möglich **blauen** Wasserstoff zu erzeugen.

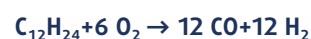
→ 6. Weitere Verfahren

Es gibt weitere industrielle Verfahren, wo Wasserstoff als Nebenprodukt anfällt und genutzt werden kann. Da die Wasserstoffherzeugung hier nicht im Vordergrund steht, sondern zusätzlich anfällt, ist es nicht üblich dem Wasserstoff eine Farbe zuzuordnen. Den Verfahren ist gemein, dass sie auf fossile Energieträger zurückgreifen. Die Verfahren und Reaktionsgleichungen werden im Folgenden aufgeführt:

a) Partielle Oxidation

Bei der partiellen Oxidation wird ein unterstöchiometrisches Brennstoff-Luft-Gemisch in einem Reformerteilweise verbrannt und es entsteht ein wasserstoffreiches Synthesegas. Die partielle Reduktion gilt als technisch ausgereift. Es werden sowohl flüssige Brennstoffe (wie z.B. Heizöl), als auch feste Brennstoffe eingesetzt (z.B. Kohle).

Ein typischer Bestandteil von Heizöl ist C₁₂H₂₄. Dies kann folgendermaßen reagieren:



Ein typischer Bestandteil von Kohle ist C₂₄H₁₂. Die Reaktionsgleichung der partiellen Oxidation lautet:

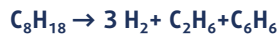


Das bei diesen beiden Reaktionen entstandene Synthesegas Kohlenmonoxid nutzt die chemische Industrie u.a. in der Methanolsynthese oder in der Fischer-Tropsch-Synthese.



b) Benzinreformierung

Beim Aufspalten von Oktan in Ethan und Benzol fällt Wasserstoff als Nebenprodukt ab. Dies ist eine Wasserstoffquelle in der chemischen Industrie:



c) Ethylenherstellung

Ethylen ist eine der am meisten produzierte Grundchemikalie. Bei der Synthese aus Ethan fällt ebenfalls Wasserstoff als Nebenprodukt an:



Die unter Punkt 1 bis 6 beschriebenen Verfahren tragen heute in unterschiedlichem Anteil zur Wasserstoffgewinnung in Deutschland bei. Einige Verfahren sind noch in der Erprobung und für die zukünftige Wasserstoffversorgung von Bedeutung. Wasserstoff wird heute im Wesentlichen durch die Dampfreformierung von fossilem Methan unter Emission von CO₂ in die Atmosphäre erzeugt.

FAZIT

Wasserstoff eignet sich sehr gut als Energieträger für die Energiewirtschaft. Dabei ist der erzeugte Wasserstoff immer nur so nachhaltig, wie die Energie oder der Energieträger, die zur Herstellung eingesetzt werden. Heute wird der Wasserstoff überwiegend aus fossilen Energieträgern gewonnen (grauer Wasserstoff) und trägt damit negativ zum Klimawandel bei. Das Ausmaß der Emissionen kann hier gemindert werden, indem CO₂ abgeschieden wird (blauer Wasserstoff), oder bei der Erzeugung von Wasserstoff die Methanpyrolyse eingesetzt wird (türkiser Wasserstoff).

Bei einer Wasserstoffgewinnung aus erneuerbaren Energien ist der Wasserstoff emissionsfrei (grüner Wasserstoff) und kann gleichzeitig einen großen Beitrag zur Sektorenkopplung von Strom, Wärme und Verkehr leisten, die für das Gelingen der Energiewende notwendig ist.

Nur grüner Wasserstoff kann als nachhaltig angesehen werden. Die Wasserstoffherstellung auf Erdgasbasis nutzt einen endlichen fossilen Energieträger und ist daher nur als Übergangslösung vorstellbar. Dabei ist zu beachten, dass Methan selbst ein hoch wirksames Klimagas ist.

Wasserstoffherstellungsverfahren, bei denen CO₂ in die Atmosphäre entlassen wird, sind sehr kritisch zu sehen und sollten in der aktuellen Form nicht weiter betrieben werden.

Die Etablierung einer Wasserstoffwirtschaft kann allgemein in eine Aufbau- und eine Betriebsphase unterteilt werden. Letztere muss den Kriterien der Nachhaltigkeit genügen. In der Aufbauphase ist grundsätzlich ein breiteres Portfolio vorstellbar. Vor- und Nachteile sind hier abzuwägen. Die Aufbauphase sollte zeitlich nicht zu ausgedehnt sein.

Grüner Wasserstoff kann in nennenswertem Umfang in Deutschland hergestellt werden. Die führt aber zu einem höheren Bedarf an elektrischer Energie und damit zu höheren Kapazitäten erneuerbarer Energien. Aus heutiger Sicht wäre hier insbesondere Wind (offshore und onshore) in Betracht zu ziehen. Damit ist auch der Import von grünem Wasserstoff aus Ländern mit höherem Sonnenscheindargebot in Betracht zu ziehen. Letzteres würde sich auch positiv in Bezug auf die ökologische, ökonomische und soziale Situation in diesen Ländern auswirken. Der Import kann mittels Pipelines oder Schiffen in gasförmiger oder flüssiger Form erfolgen.

*ANMERKUNG

Die Farbenlehre des Wasserstoffs ist nicht in allen Publikationen einheitlich und teilweise werden weitere Farben in die Diskussion gebracht. Die vier hier vorgestellten Farben werden aber in einem großen Konsens wie beschrieben verwendet.

Es gibt regelmäßig Versuche dem Wasserstoff weitere Farben zuzuordnen, wenn ein definiertes Herstellungsverfahren beschrieben wird. Eine Auswahl davon wird hier dargestellt:

- **Weiß:** In dieser Ausgabe der HoE-Aspekte haben wir dem Wasserstoff keine Farbe zugeordnet, wenn er als Nebenprodukt in der chemischen Industrie entsteht. In einigen Studien wird dieser Wasserstoff als weißer Wasserstoff bezeichnet. Ebenfalls wird Wasserstoff aus natürlichen geologischen Wasserstoffvorkommen als weißer Wasserstoff bezeichnet. Bei letzterem ist die grundsätzliche wirtschaftliche Nutzbarkeit und das vorhandene Potenzial Gegenstand von Forschungsprojekten. Eine weitere Quelle von weißem Wasserstoff ist die biotechnologische Gewinnung von Wasserstoff aus Bioabfällen mittels Bakterien.
- **Gelb:** Wird Wasserstoff aus Elektrolyse hergestellt, ist die Farbe des Wasserstoffs abhängig von der Herkunft des eingesetzten Stroms. Wenn von gelbem Wasserstoff die Rede ist, wird der allgemeine Strommix verwendet.
- **Rot, Pink:** Es gibt gelegentlich Vorstöße Strom aus Kernkraftwerken zur Elektrolyse einzusetzen. Die Farbgebung des so entstehenden Wasserstoffs ist bisher nicht eindeutig, sondern wird manchmal als rot, in anderen Quellen mit pink oder auch mit gelb angegeben.



- **Schwarz:** Wasserstoff aus der Elektrolyse mit Strom aus Kohlekraftwerken wird in Einzelfällen als schwarzer Wasserstoff bezeichnet. Ebenfalls wird manchmal von schwarzem Wasserstoff gesprochen, wenn dieser aus der Vergasung von Kohle oder Öl gewonnen wird.
- **Braun:** Der Wasserstoff, der heute grau bezeichnet wird, wurde früher braun genannt.
- **Orange:** Hierunter ist Wasserstoff zu verstehen, der aus Strom, der bei der thermischen Abfallverwertung gewonnen wird, mittels Elektrolyse entsteht. Alternativ kann er chemisch direkt aus Biomasse erzeugt werden.

Diese Liste erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit und einige dieser Farben werden so nicht in eine allgemein anerkannte Wasserstofffarbgebung eingehen, u.a. weil es keine nennenswerten Anteile von Wasserstoff mit dem jeweiligen Herstellungsverfahren gibt oder weil die Farbe mehrfach verwendet wird. Das hier als weißer Wasserstoff bezeichnete Nebenprodukt spielt in der heutigen Wasserstoffwirtschaft eine wichtige Rolle und hat aus unserer Sicht gute Chancen in der Diskussion um die Farbe des jeweils verwendeten Wasserstoffs verstärkt Einzug zu halten. Wenn zukünftig Elektrolyseure zur Stabilisierung des Stromnetzes eingesetzt werden und diese nicht direkt an einen Wind- oder Solarpark angegliedert sind, sondern mit dem allgemeinen Strommix betrieben werden, kann auch dafür eine Farbe (z.B. Gelb) sinnvoll sein, um den Wasserstoff zu klassifizieren.

Wichtig ist, dass die jeweilige Farbe, die dem Wasserstoff zugeordnet ist, keine Auswirkung auf die physikalischen und chemischen Eigenschaften hat, sondern ausschließlich ein Herkunftsnachweis ist.

QUELLEN

<https://www.bmbf.de/de/eine-kleine-wasserstoff-farbenlehre-10879.html>

<https://zukunft.erdgas.info/studien/erdgas-in-der-energie-wende/vorketten-emission>

<https://www.springerprofessional.de/betriebsstoffe/verfahrenstechnik/woher-kommt-der-wasserstoff-17201618>

https://www.greenpeace-energy.de/fileadmin/user_upload/broschuere-wasserstoff.pdf

https://www.asue.de/brennstoffzellen/broschueren/310929_asue-broschuere_energietraeger-wasserstoff

Ansprechpartner

Prof. Dr.-Ing. Peter Birkner
Geschäftsführer House of Energy e.V.
p.birkner@house-of-energy.org

Gefördert durch



EUROPÄISCHE UNION
Investition in Ihre Zukunft
Europäischer Fonds für regionale Entwicklung