

Thomas Hamacher

1.1 Die Rahmenbedingungen

Technischer Wandel wird gerne mit der Evolution verglichen. Innovationen stellen die Mutationen dar, die sich dann auf einem Markt durch eine Selektion durchsetzen oder in den meisten Fällen wieder verschwinden [1]. Im Gegensatz zur Mutation sind die Innovationen in der Technik nicht das Ergebnis eines Zufallsprozesses, sondern gesteuert durch ein Problem oder eine besondere Herausforderung. Trotzdem muss eine neue Technologie sich auf dem Markt und in der Gesellschaft durchsetzen. Neuheit allein reicht dafür als Grund sicher nicht aus. Die Technikgeschichte kennt deswegen bedeutend mehr Innovationen, die nur kurz aufgeflammt sind und dann wieder vergessen wurden. Die Nutzung von Wasserstoff als Energieträger wäre sicher eine herausragende Innovation mit erheblichen Auswirkungen auf Wirtschaft und Gesellschaft. Die Rahmenbedingungen der Energiewirtschaft haben sich in der Vergangenheit immer wieder geändert und damit den Aufstieg neuer Techniken begünstigt bzw. das Überleben alter Technologien gefährdet. An dieser Stelle sollen einige Trends diskutiert werden, die in den nächsten Jahrzehnten zu erwarten sind und damit für das Schicksal des Wasserstoffs als Energieträger entscheidend sind.

Die folgenden Diskussionen beschränken sich auf einführende Überlegungen zu den allgemeinen Randbedingungen, die für das Energiesystem insgesamt in Zukunft von großer Bedeutung sein werden. Die erste Entwicklung betrifft den Anstieg der Energienachfrage, die zweite die Verfügbarkeit und die Kosten der fossilen Energieträger. Der dritte Bereich handelt vom Zusammenhang zwischen Energie und Umwelt und hier insbesondere

T. Hamacher (✉)

Lehrstuhl für Erneuerbare und Nachhaltige Energiesysteme (ENS), Technische Universität München, Lichtenbergstrasse 4a, 85478 Garching, Deutschland
E-Mail: thomas.hamacher@tum.de

die weltweite Politik zur Reduktion der Treibhausgasemissionen. Der letzte Bereich dreht sich um den Ausbau der erneuerbaren Energien, die ganz neue Anforderungen insbesondere an die Infrastruktur eines nachhaltigen Energiesystems stellen.

Die weitere Entwicklung der Energie- und insbesondere auch Stromnachfrage kann natürlich nicht einfach prognostiziert werden. Bis heute wird ein starker Zusammenhang zwischen Wirtschaftsleistung und Energie- und insbesondere Stromnachfrage beobachtet [2]. Der starke Anstieg der Energienachfrage zu Beginn des 21. Jahrhunderts wurde insbesondere durch die aufstrebenden Länder in Asien verursacht. Hier sollen nur ein paar ganz einfache Überlegungen angeführt werden, um zu verdeutlichen, was hier in den nächsten Jahren noch zu erwarten ist. In Deutschland wurde im Jahr 2012 13500 PJ Primärenergie verbraucht [3]. Wenn im Jahr 2050 oder einige Jahre später 9 Mrd. Menschen einen ähnlichen Verbrauch hätten, dann würde sich die weltweite Nachfrage von 541 EJ im Jahr 2014 laut BP auf etwa 1500 EJ verdreifachen. Ein solcher Anstieg wird natürlich einen erheblichen Druck auf den gesamten Energiemarkt ausüben. Inwieweit langfristige Steigerungen in der Effizienz diesen Anstieg dämpfen können, ist sicher sehr schwer abzuschätzen. Die gleiche Abschätzung für den Strombereich lässt auch eine Verdreifachung der Stromerzeugung erwarten. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass eine weltweite Versorgung mit kommerziellen Energiedienstleistungen selbst bei stark wachsender Energieeffizienz nur mit einem starken Anstieg des Energieangebotes möglich ist.

Die Kosten und die Verfügbarkeit fossiler Energieträger sind Gegenstand vieler Studien und auch erheblicher Spekulationen [4]. Die kurzfristigen Schwankungen der Preise unterliegen vielfältigen Einflüssen, die kaum zu prognostizieren sind. Engpässe entlang der ganzen Erzeugungskette von der Förderung über den Transport bis zur Verfeinerung in Raffinerien können zu erheblichen Preisschwankungen führen. Die Investitionen in Kapazitäten entlang der gesamten Kette sind aber wieder von der alten Struktur der Preise abhängig und unterliegen daher einer Zeitverzögerung. Der starke Anstieg der Ölnachfrage in den ersten Jahren des 21. Jahrhunderts führte deswegen zu erheblichen Preisanstiegen. Diese hohen Preise haben dann dazu geführt, dass auch nicht konventionelle Ölvorkommen, wie Schweröl und Ölsande, für Investoren von Interesse sind. Wenn, wie in einer Studie von der Citygroup [5] prognostiziert und von der IEA [6] bestätigt, in den nächsten Jahrzehnten die USA zum größten Ölproduzenten in der Welt aufsteigt, hätte dies sicher erhebliche Auswirkungen auf die Preise und Verfügbarkeit von Erdöl im Rest der Welt. In welchem Umfang nicht konventionelle fossile Energieträger zu den konventionellen Lagerstätten genutzt werden können und werden, ist sicher eine der Schlüsselfragen für die kommenden Jahre, die insbesondere über den Erfolg alternativer Technologien mitentscheiden werden. Eine massive Nutzung nicht konventioneller fossiler Ressourcen wird die Erreichung des 2°-Klimaziels auf alle Fälle verhindern.

Die weitere Entwicklung der Klimaverhandlungen und mögliche nationale oder internationale Ziele und Werkzeuge zur Reduktion der Treibhausgasemissionen werden entscheidende Rahmenbedingungen für den technologischen Wandel im Energiebereich darstellen. Dabei wurden in den letzten Jahren sehr verschiedene politische Werkzeuge entwickelt und angewandt. Wichtige Beispiele sind Ökosteuern, Einspeisetarife oder

auch der Emissionshandel. Die Vielfalt der Werkzeuge und auch der politischen Einflussnahme macht wiederum eine Prognose sehr schwierig. Trotzdem sprechen die wissenschaftlichen Untersuchungen alle dafür, dass die unbegrenzten Emissionen von CO_2 mittel- und langfristig zu erheblichen negativen Auswirkungen für Mensch, Umwelt und Klima führen werden (Abb. 1.1). Das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) sammelt seit Anfang der neunziger Jahre des letzten Jahrhunderts in vielen Berichten die wissenschaftlichen Grundlagen zur Klimaveränderung.

Damit ist davon auszugehen, dass sich früher oder später eine breite Allianz in der Welt finden wird, die durch internationale Regelungen die Emissionen beschränken wird. Insofern darf man damit rechnen, dass irgendwann in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts die Nutzung von Kohlenstoff bzw. Kohlewasserstoffen begrenzt wird. Die dann angewandten politischen Werkzeuge werden darüber entscheiden, wie schnell und welche neuen Technologien in den Markt kommen.

Die erneuerbaren Energien führen zu einer erheblichen Veränderung des gesamten Energiesystems. Die besten Standorte der Erzeugung sind oft weit von den Zentren des Verbrauchs entfernt, ebenso fallen Erzeugung und Verbrauch zeitlich nicht zusammen. Hier muss eine neue Balance geschaffen werden, die Erzeugung und Verbrauch wieder zusammenbringt. Dies kann auf sehr verschiedene Weise erfolgen. Insgesamt werden mehrere Optionen intensiv diskutiert. Dabei spielen die Schaffung neuer Energieverbände und die Etablierung neuer Speichertechnologien eine entscheidende Rolle. Wasserstoff ist sowohl für den weltweiten Transport als auch für die Speicherung von Energie eine wichtige Option.

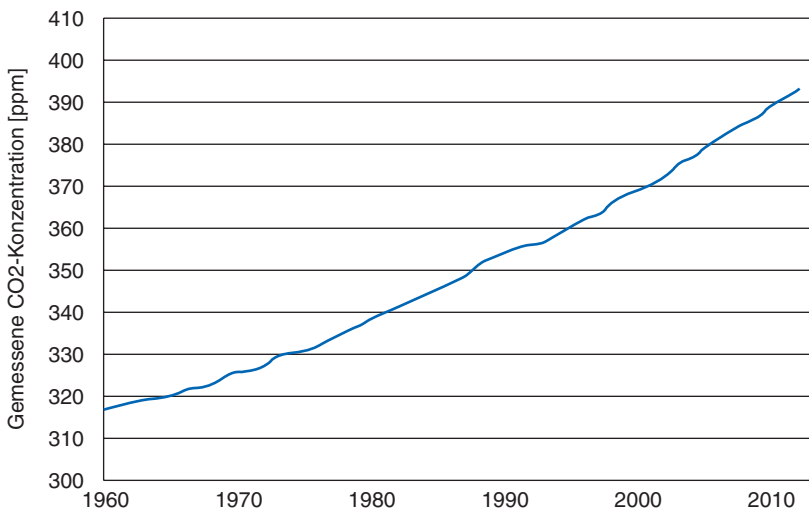


Abb. 1.1 Entwicklung der CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre. Die Daten wurden seit 1959 auf dem Mauna Loa gemessen [7]. Dabei ist ein stetiger Anstieg zu beobachten

1.2 Wasserstoff und Energiewirtschaft

Wasserstoff ist das leichteste und häufigste Element im Universum. Auf der Erde kommt Wasserstoff nur in gebundener Form, also in Wasser, in Kohlenwasserstoffen oder in Mineralien vor. Wasserstoff ist ein wichtiger Grundstoff in der chemischen und petrochemischen Industrie.

Schon lange wird Wasserstoff als neuer Endenergieträger diskutiert, der an der Seite oder auch anstelle von Strom den Durchbruch zu einer nachhaltigen Energiewirtschaft garantieren soll. Dabei wird immer wieder eine Reihe von ähnlichen Argumenten für die Einführung des Wasserstoffs genannt. Das erste Argument betrifft die Möglichkeit, den Strom aus intermittierenden erneuerbaren Energiewandlern wie Wind und Solarkraftwerken auf diese Weise zu speichern. Das zweite Argument betrifft die schadstofffreie oder zumindest -arme Umwandlung in Wärme, Kraft bzw. Strom. Das dritte Argument bezieht sich auf den Einsatz von Brennstoffzellen und Wasserstoff auch in kleinen Leistungseinheiten. Dabei wird durch die Einführung dieser beiden Technologien ein paradigmatischer Wechsel der Stromerzeugung hin zu kleinen dezentralen Erzeugungstechnologien erwartet.

Dabei hat es immer wieder Versuche gegeben, Wasserstoff in die Energiewirtschaft einzuführen. Hier sind insbesondere die Bemühungen der Autoindustrie zu nennen, wasserstoffgetriebene Brennstoffzellenautos auf den Markt zu bringen.

Trotzdem spielt Wasserstoff schon heute in der chemischen Industrie als Grundstoff eine bedeutende Rolle. Bis heute wird der Wasserstoff vornehmlich aus fossilen Energieträgern wie Erdgas gewonnen. Langfristig müssen hier neue Optionen erschlossen werden.

Ausgehend von einer einführenden Darstellung über die Erzeugung, Verteilung und tatsächliche sowie mögliche Nutzung des Wasserstoffes soll in einem abschließenden Überblick die Breite der möglichen Bedeutung des Wasserstoffs als Grundstoff und als Endenergieträger diskutiert werden. Dabei sollen drei mögliche Entwicklungspfade diskutiert werden. Wasserstoff kommt über seine Bedeutung als chemischer Grundstoff nicht hinaus; Wasserstoff dringt in einzelne Sektoren wie z. B. die Stahlerzeugung oder den Flugverkehr ein oder Wasserstoff wird als Endenergieträger allgemein verfügbar wie heute Erdgas. Die drei Bilder können als Alternativen oder auch als zeitliche Entwicklung gesehen werden. Abschließend sollen die drei alternativen Entwicklungen für den Wasserstoff in eine allgemeine Entwicklung der Energiewirtschaft eingebunden werden.

1.2.1 Eigenschaften des Wasserstoffes

Wasserstoff wurde im Jahre 1766 von dem englischen Naturforscher Henry Cavendish entdeckt.

Nach gängigen kosmologischen Theorien war Wasserstoff das einzige Element nach dem Urknall. In Fusionsreaktionen sind dann die weiteren Elemente aus dem Wasserstoff entstanden [8]. In der festen Erdkruste ist der Anteil des Wasserstoffes 0,88

Tab. 1.1 Grundlegende Eigenschaften des Wasserstoffs aus [9]

Eigenschaft	Wert	Einheit
Dichte gasförmig	0,0899	kg/Nm ³
Dichte flüssig	70,79	kg/m ³
Schmelztemperatur	14,1	K
Siedetemperatur	21,15	K
Unterer Heizwert	3,00	kWh/Nm ³ (volumetrisch)
	33,33	kWh/kg (gravimetrisch)
	2,79 (verflüssigt)	kWh/l
Oberer Heizwert	3,5	kWh/Nm ³

Gew.-%. Wasserstoff kommt auf der Erde quasi nur in Form von Wasser, Kohlenwasserstoffen oder in Mineralien vor.

Wasserstoff ist farb- und geruchloses Gas. Im Normalzustand liegt Wasserstoff als zweiatomiges Molekül vor. Es gibt drei Isotope des Wasserstoffs. Einfacher Wasserstoff und der schwere Wasserstoff, auch Deuterium genannt, sind dabei stabil, während der superschwere Wasserstoff, sprich Tritium, radioaktiv zerfällt und damit quasi nicht in der Natur vorkommt.

Verglichen mit anderen Brennstoffen ist der gravimetrische Heizwert hoch, während der volumetrische Heizwert niedrig ist. Die physikalischen Eigenschaften werfen schon ein Bild auf die Probleme bei der Speicherung und dem Transport von Wasserstoff (Tab. 1.1).

1.2.2 Herstellung des Wasserstoffs

Wasserstoff wird aus Kohlenwasserstoffen oder direkt aus Wasser gewonnen. Kohlenwasserstoffe können in Form von fossilen Energieträgern oder als Biomasse vorliegen. Aus Wasser kann Wasserstoff durch Elektrolyse, thermochemisch oder durch photobiologische oder photokatalytische Verfahren gewonnen werden. Die Abtrennung aus den Kohlenwasserstoffen erfolgt hauptsächlich über Dampfreformierung. Daneben gibt es aber auch andere Verfahren wie partielle Oxidation. Auf alle Fälle wird neben dem Kohlenwasserstoff oder Wasser Energie benötigt, die in Form von Strom, Wärme oder Licht bereit gestellt werden muss. Dabei kann der Strom und auch die Wärme sehr unterschiedlich bereit gestellt werden. Das Herstellungsverfahren entscheidet über den Preis des Wasserstoffs. Emissionen und Umweltauswirkungen dieses Vorprozesses müssen dann dem Wasserstoff zugerechnet werden.

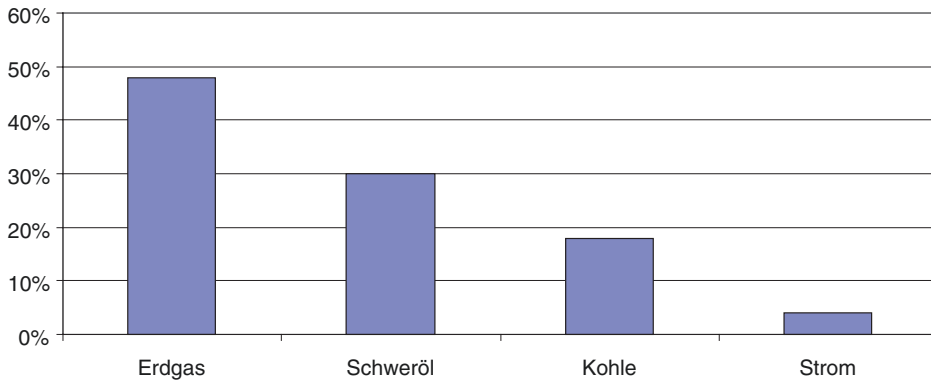


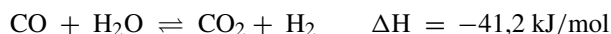
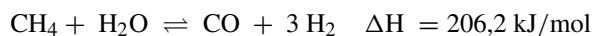
Abb. 1.2 Weit mehr als 90 % des Wasserstoffes werden aus fossilen Energieträgern hergestellt. Nur 4 % werden aus Strom über Elektrolyse gewonnen. [14]

Heute ist die Erzeugung aus fossilen Energieträgern die dominante Erzeugungstechnologie (Abb. 1.2). Elektrolyse spielt nur eine untergeordnete Rolle. Thermochemische Wasserspaltung, photokatalytische oder photobiologische Verfahren sind noch im Entwicklungsstadium. Langfristig scheidet die fossilen Energiequellen als Quelle für den Wasserstoff aus, weil sie langfristig in der Verfügbarkeit begrenzt sind und weil bei der Herstellung CO_2 als Kuppelprodukt erzeugt wird.

1.2.3 Produktion von Wasserstoff aus fossilen Energieträgern und Biomasse

Im Jahre 2010 wurden 96 % des Wasserstoffes aus fossilen Energieträgern gewonnen. Das heute mit Abstand gebräuchlichste Verfahren ist die Dampfreformierung.

Die Dampfreformierung von Erdgas erfolgt in zwei Schritten. Im ersten Schritt wird aus Methan und Wasser bei hohem Druck (15–25) bar und hoher Temperatur (750 °C–1000 °C) Kohlenmonoxid und Wasserstoff erzeugt. Die Reaktion wird durch einen Katalysator beschleunigt. Im zweiten Schritt wird dann wieder durch die Zufuhr von Wasser aus dem Kohlenmonoxid Kohlendioxyd und Wasserstoff hergestellt (Shift-Reaktion).



Der Gesamtwirkungsgrad liegt bei 70 % bezogen auf den Heizwert des Erdgases. Die Kosten sinken dabei deutlich mit der Größe der Anlage [10]. Dieses Verfahren wird heute in vielen großtechnischen Anlagen eingesetzt. Dabei werden heute Anlagen in

den verschiedensten Größen angeboten von 1000 Nm³/h bis hin zu 120 000 Nm³/h (Abb. 1.3).

Die partielle Oxidation stellt ein weiteres Verfahren dar. Dabei wird dem fossilen Ausgangsstoff, sei es Kohle, Erdöl oder Erdgas, Sauerstoff und Wärme zugeführt. Die Sauerstoffmenge ist dabei unterstöchiometrisch, damit es nicht zu einer vollständigen Verbrennung kommt. Die Reaktionsprodukte sind Kohlenmonoxid und Wasserstoff. Durch eine Shift-Reaktion wird dann aus dem Kohlenmonoxid wieder Wasserstoff und Kohlendioxid gewonnen.

Damit kann Wasserstoff im Prinzip aus allen Kohlewasserstoffen oder auch aus Kohle gewonnen werden. Die Kosten des Wasserstoffes hängen dabei entscheidend von den Kosten des Ausgangsstoffes ab. Eine Preisuntergrenze ergibt sich aus dem Quotienten aus Preis des Ausgangsstoffes und dem Nutzungsgrad des Herstellungsprozesses. Dazu kommen die Kapitalkosten und Betriebskosten der Anlage.

Da, wie schon erwähnt, die Betriebs- und Anlagenkosten mit der Größe der Anlage sinken, gibt es Bestrebungen große Anlagen zu bauen und mehrere Verbraucher über ein Pipelinesystem dadurch zu versorgen.

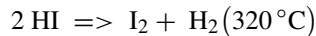
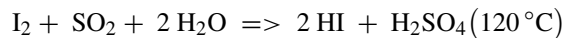
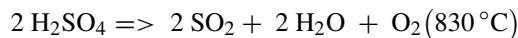


Abb. 1.3 Wasserstoff wird durch Dampfreformierung aus Erdgas gewonnen. Das Photo zeigt eine Anlage der Firma Linde. (Bild Linde AG)

1.2.4 Wasserspaltung durch Wärmeenergie

Die Spaltung von Wasser durch thermische Energie erfolgt erst bei sehr hohen Temperaturen um die 2000 °C. Da eine einfache Prozessführung bei diesen Temperaturen nicht möglich ist, scheidet dieses Verfahren als praktische Lösung aus. Erst durch die Einführung von geeigneten Katalysatoren kann die Prozesstemperatur soweit gesenkt werden, dass eine sinnvolle Prozessführung möglich wird.

Als Ausweg bieten sich thermochemische Kreisprozesse an, die unter Einsatz von besonderen Katalysatoren und Wärme Wasser spalten können. Als Beispiel soll das Schwefelsäure-Iod-Verfahren kurz besprochen werden. Unter Wärmezufuhr wird Schwefelsäure in Schwefeldioxid, Wasser und Sauerstoff getrennt. In einem zweiten Schritt wird dann aus Iod, Schwefeldioxid und Wasser wieder unter Wärmezufuhr Wasserstoffdiodid und Schwefelsäure erzeugt. Unter Zugabe von Wärme wird dann aus dem Wasserstoffdiodid wieder Iod und Wasserstoff erzeugt. Iod und Schwefelsäure können dann dem Prozess wieder zugeführt werden.



Diverse andere Kreisläufe wurden in der Vergangenheit entwickelt.

Die Etablierung dieser Verfahren wurde insbesondere im Zusammenhang mit der Entwicklung von Hochtemperaturreaktoren und solarthermischen Anlagen diskutiert. Die Wirkungsgrade der Prozesse liegen mit 50 % deutlich niedriger als Dampfreformierung und Elektrolyse. Die direkte Nutzung der Wärme führt aber dann im Gesamtsystem zu einem hohen Nutzungsgrad.

Trotz erheblicher Forschungsanstrengung hat sich bisher keines der Verfahren etabliert und es bleibt ein Gegenstand der Forschung.

1.2.5 Wasserspaltung durch elektrische Energie (Elektrolyse)

Die Elektrolyse steht ganz am Anfang der Elektrochemie. Praktische und theoretische Untersuchungen wurden schon zu Beginn des neunzehnten Jahrhunderts durchgeführt.

Die Thermodynamik chemischer Reaktionen ist durch die Gibbs-Helmholtz-Gleichung $\Delta G = \Delta H - T \Delta S$ gegeben. Ist bei einer Reaktion die freie Enthalpie ΔG negativ, dann kommt es zu einer spontanen Reaktion. Im Fall der Spaltung von Wasser ist ΔH positiv und auch ΔS positiv, es kommt also nur bei sehr großen Temperaturen T zur spontanen Zersetzung des Wassers. Wie oben schon erwähnt, ist dies erst bei Temperaturen um 2000 °C der Fall. Bei der Elektrolyse wird ein elektrisches Potential entsprechend zur

freien Enthalpie ΔG angelegt, um damit die Reaktion zu ermöglichen. Wie man der Gleichung entnehmen kann, sinkt die notwendige Spannung bei höheren Temperaturen.

Die Elektrolyse erlaubt durch den Einsatz elektrischer Energie die direkte Erzeugung von Wasserstoff und Sauerstoff aus Wasser. Elektrolytische Verfahren werden in der chemischen Industrie zur Synthetisierung verschiedenster Substanzen eingesetzt. Beispiele hierfür sind die Aluminium- und Natriumproduktion.

Elektrolyseure bestehen aus einer Kathode, einer Anode, einem Separator und einem Elektrolyten. Dabei kommt es je nach Type der Elektrolyse zu unterschiedlichen Reaktion an Anode und Kathode und zu unterschiedlichen Ladungsträgern, die den Ladungstransport durch den Elektrolyten besorgen.

Die Elektrolyseverfahren unterscheiden sich durch die eingesetzten Elektrolyten, den Betriebsdruck und die Betriebstemperatur. Als Elektrolyten kommen alkalische Lösungen bzw. Feststoffelektrolyten zum Einsatz. Im Folgenden wird kurz auf die folgenden vier Verfahren eingegangen:

- Alkalische Elektrolyse
- Alkalische Druckelektrolyse
- PEM-Elektrolyse
- Hochtemperaturelektrolyse auf Basis von keramischen Feststoffelektrolyten

Die alkalischen Elektrolyseverfahren sind heute die am weitesten verbreitete Technik. Bei der alkalischen Elektrolyse wird eine Kalilauge (KOH) als Elektrolyt eingesetzt. Die Elektroden sind durch ein Diaphragma getrennt, das nur einen Ionentransport erlaubt und damit den notwendigen Ladungsaustausch möglich macht.

Durch die Erhöhung des Systemdrucks lässt sich eine einfachere Anpassung an die Peripherie des Systems erreichen und auch eine kompaktere Baugröße herstellen. Heute sind Drücke in der Gegend von 120 bar im Labor erreicht und 30 bar bei kommerziellen Anlagen.

Die Polymer-Elektrolyt-Membran PEM-Elektrolyse arbeitet im Temperaturbereich (zwischen 30–100 °C). Der Elektrolyt ist ein Polymer. An den Elektroden kommt Platin als Katalysator zum Einsatz. Die PEM-Elektrolyse wird heute intensiv in einigen Industrieunternehmen entwickelt. Bis heute sind noch nicht die Wirkungsgrade der alkalischen Elektrolyseure erreicht worden. Dabei wird erwartet, dass diese Anlagen auch für kleine Leistungseinheiten geeignet sind.

Die Erzeugung von Wasserstoff durch Elektrolyseure ist eine erprobte Technik mit Wirkungsgrad von 70 %, wenn der Heizwert des Wasserstoffes auf die Leistung des Stromes bezogen wird. Die Technik findet in diversen Nischenanwendungen schon heute Anwendung.

Um aber die Probleme der Elektrolyse darzustellen, soll eine einfache Wirtschaftlichkeitsrechnung durchgeführt werden. Dabei werden vier Szenarien unterstellt:

Eigenschaft	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4
Stromkosten	0,05 €/kWh	0,05 €/kWh	0,15 €/kWh	0,15 €/kWh
Investitionskosten des Elektrolyseurs	300 €/kW	1000 €/kW	300 €/kW	1000 €/kW
Annuität	30 €/kW/a	100 €/kW/a	30 €/kW/a	100 €/kW/a
Betriebsstunden	5000	2000	5000	2000
Nutzungsgrad	75 %	75 %	70 %	70 %
Kosten des Wasserstoffs	0,072 €/kWh(H ₂)	0,11 €/kWh(H ₂)	0,22 €/kWh(H ₂)	0,26 €/kWh(H ₂)

Der Einfluss der Stromkosten auf die Wasserstoffkosten ist dabei unverkennbar. Investitionskosten und Betriebsstunden sind natürlich ebenso von Bedeutung. Insbesondere bei niedrigen Betriebsstunden werden die Investitionskosten bedeutend. Auf alle Fälle wird deutlich, dass Wasserstoff teurer wird als Strom. Damit ist der Einsatz des Wasserstoffes nur dann sinnvoll, wenn der Strom nicht direkt genutzt werden kann. Auch kehrt sich die Reihenfolge bei den Energiekosten dadurch um. Heute liegen die Stromgestehungskosten irgendwo in der Gegend von 0,05 €/kWh. Die Kosten des chemischen Energieträgers Kohle liegen bei 0,01 €/kWh und die von Gas bei 0,02 €/kWh. Strom wird dann für die Energiewirtschaft zum „Grundstoff“, Wasserstoff oder andere synthetische chemische Energieträger kommen nur dann zum Einsatz, wenn kein Strom bereit steht oder die Energiewandlungsaufgabe nicht sinnvoll erfüllen kann. Dies ist anders, wenn der Wasserstoff in Gegenden erzeugt wird, die einen sehr niedrigen Strompreis garantieren, aber nicht über eine entsprechende Nachfrage verfügen.

1.2.6 Wasserspaltung durch Sonnenlicht (Photokatalyse)

In der Photosynthese wird durch Photolyse aus Licht und Wasser, Wasserstoff und Sauerstoff erzeugt. Die Nutzung dieses oder ähnlicher Prozesse ist heute Gegenstand intensiver Forschung. Dabei werden zwei gänzlich unterschiedliche Richtungen verfolgt:

- 1) Die erste Richtung versucht die biologischen Prozesse in den Algen so abzuändern, dass die Energie des Sonnenlichtes nur in die Produktion von Wasserstoff fließt.
- 2) Die zweite Richtung versucht durch die Schaffung eines „künstlichen Blattes“ die Wasserstoffproduktion durch Photokatalyse voranzutreiben.

Einige Algen produzieren bei einem Entzug von Schwefel Wasserstoff anstelle von Sauerstoff. Dieses Phänomen wurde schon in den dreißiger Jahren beobachtet. Der Prozess wird aber durch die Anwesenheit von Sauerstoff wieder gestoppt [11]. Erhebliche Anstrengungen wurden in den letzten Jahren durchgeführt, um Algen so zu konditionieren, dass die Wasserstoffproduktion aufrecht erhalten bleibt.

Wasserstoff kann auch an Katalysatoren durch die Bestrahlung mit Licht erzeugt werden. Erste Reaktionen dieser Art wurden in Japan mit Titandioxyd erreicht. Dabei wurde aber nur sehr kurzwelliges Licht eingesetzt. In den letzten Jahren gab es eine Vielzahl von vielversprechenden Ansätzen. Das Ziel diese Arbeiten wird oft als „Künstliches Blatt“ bezeichnet [12].

Diese beiden Schlaglichter machen deutlich, dass in Zukunft durchaus alternative Pfade zur Erzeugung von Wasserstoff gefunden werden können, die eventuell eine deutlich bessere Wettbewerbsfähigkeit des Wasserstoffs versprechen.

1.3 Transport und Speicherung des Wasserstoffs

Wasserstoff kann in flüssigem oder gasförmigem Zustand gespeichert, transportiert und verteilt werden. Die Art und Weise des Transportes hängt entscheidend von den transportierten Mengen und den Strecken ab. Bis heute gibt es nur regionale Wasserstoffmärkte. Dabei werden einige industrielle Zentren über Pipelines versorgt. Ansonsten wird der Wasserstoff in Chargen entweder in Druckflaschen oder verflüssigt in Tanklastwagen transportiert.

Neben der Möglichkeit den Wasserstoff zum Transport zu speichern, bieten Salzkaavernen, die heute zur Speicherung von Erdgas genutzt werden, die Möglichkeit, erhebliche Mengen von Wasserstoff langfristig zu speichern. Diese Möglichkeit erlaubt eine saisonale Speicherung des Wasserstoffes. (s. Kap. 2)

Auf alle Fälle stellen die chemischen Eigenschaften des Wasserstoffs besondere Anforderungen an die verwandten Materialien.

1.3.1 Transport des gasförmigen oder flüssigen Wasserstoffes

Wasserstoff kann wie Erdgas als Gas oder Flüssigkeit transportiert werden. Im Unterschied zu Erdgas ist beim Wasserstoff für beide Wege ein größerer Energieaufwand notwendig, was zum einen an der niedrigeren volumetrischen Energiedichte und zum anderen an der niedrigeren Verflüssigungstemperatur liegt.

Erdgas wird heute zum größten Teil über Pipelines von den Förderorten zu den Verbrauchsschwerpunkten transportiert. Dabei werden in den Leitungen typische Verluste von 0,1 bar/km erreicht, die in Kompressorstationen kompensiert werden müssen. Der Druck in den Leitungen soll dabei 100 bar nicht übersteigen. Die zur Kompression benötigte Leistung ergibt sich aus dem Volumenstrom \dot{V}_1 und dem Verhältnis des Druckes Ψ nach und vor der Kompression.

Das Produkt aus dem Volumenstrom und dem Energieinhalt des Wasserstoffes gemessen durch den unteren bzw. oberen Heizwert ergibt dann einen Leistungsfluss des transportierten Mediums. Das Verhältnis aus Kompressionsleistung für eine Transportstrecke zum Leistungsfluss des transportierten Mediums ist dann ein gutes Maß für die energetischen

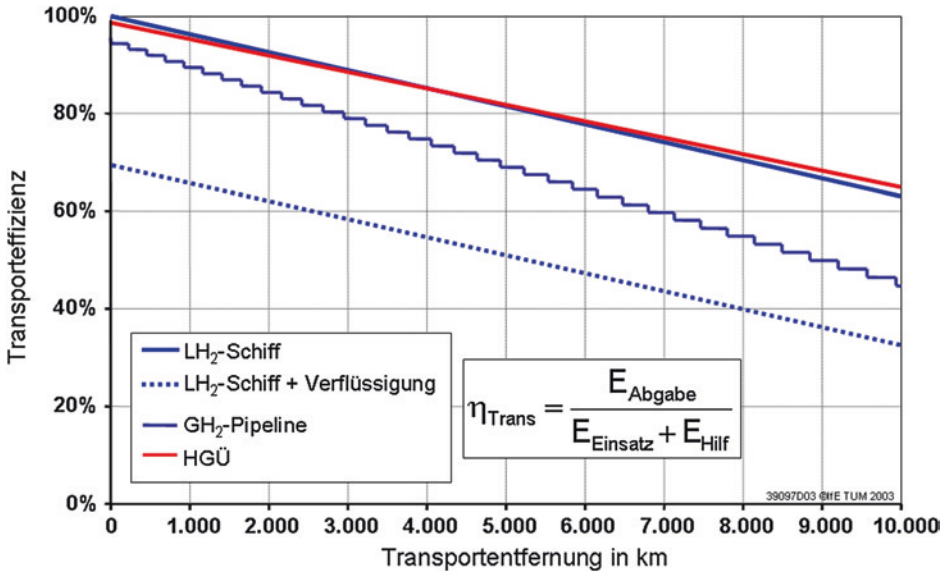


Abb. 1.4 Der Stromtransport ist selbst bei weiten Strecken effizienter als der Wasserstofftransport. (nach [13])

Transportverluste. Unterstellt man, dass die Druckverluste für Wasserstoff und Erdgas in etwa gleich sind, dann kommt es insbesondere durch die deutlich niedrigere volumetrische Energiedichte des Wasserstoffs spezifisch zu deutlich höheren Verlusten beim Wasserstoff.

Bei dem Verflüssigen des Wasserstoffs wird die volumetrische Energiedichte etwa um den Faktor 100 erhöht. Dadurch ergeben sich ganz andere Transportmöglichkeiten. Der Transport verflüssigten Erdgases (Liquified Natural Gas, LNG) ist schon heute eine viel eingesetzte Form des Erdgastransportes. Japan und Südkorea werden fast ausschließlich in dieser Weise mit Erdgas versorgt. Sollte es je zu einem transkontinentalen Wasserstofftransport über viele tausend Kilometer Entfernung kommen, dann würde sich diese Form des Transportes anbieten. Wasserstoff verflüssigt erst bei $-252,9\text{ °C}$. Die Verflüssigung erfolgt dabei meistens in mehreren Stufen. Im Euro-Hydro-Quebec Wasserstoff-Projekt wurde die Möglichkeit betrachtet, Wasserstoff in Kanada durch sehr günstigen Strom aus Wasserkraft zu erzeugen und dann verflüssigt mit Schiffen nach Europa zu transportieren (Abb. 1.4).

1.3.2 Wasserstoff-Verteilung durch Pipelines

In industriellen Zentren kommt es zu einem erheblichen Wasserstoffverbrauch. Die Kosten der Wasserstoffproduktion sinken insbesondere bei der Dampfreformierung erheblich mit der Größe der Erzeugungsanlage. Deswegen ist es oft vorteilhaft, eine große Erzeugungsanlage über ein Pipelinenetz mit verschiedenen Verbrauchern zu verbinden.

Deswegen hat sich in vielen industriellen Zentren ein Wasserstoffverteilnetz etabliert, das eine Vielzahl von Kunden mit Wasserstoff versorgt.

Netze dieser Art finden sich im Ruhrgebiet in Deutschland mit einer Länge von etwa 240 km, in Isebergues in Frankreich mit etwa 30 km Länge. Dieses Netzwerk wurde später erst bis Zeebrugge in Belgien und dann bis nach Rotterdam ausgedehnt.

Das längste Pipelinenetz für Wasserstoff befindet sich in Texas und versorgt dort Raffinerien und Ammoniakproduzenten mit Wasserstoff.

Diese Beispiele belegen, dass auch eine Verteilung von Wasserstoff machbar ist.

1.3.3 Speicherung des Wasserstoffs in Salzkavernen

Die großtechnische Speicherung von Wasserstoff kann in Salzkavernen erfolgen (Abb. 1.5). Salzkavernen werden seit vielen Jahren erfolgreich zur Speicherung von Erdgas und Rohöl eingesetzt. Mit Speichervolumen von 500.000 m³ können bei Drücken

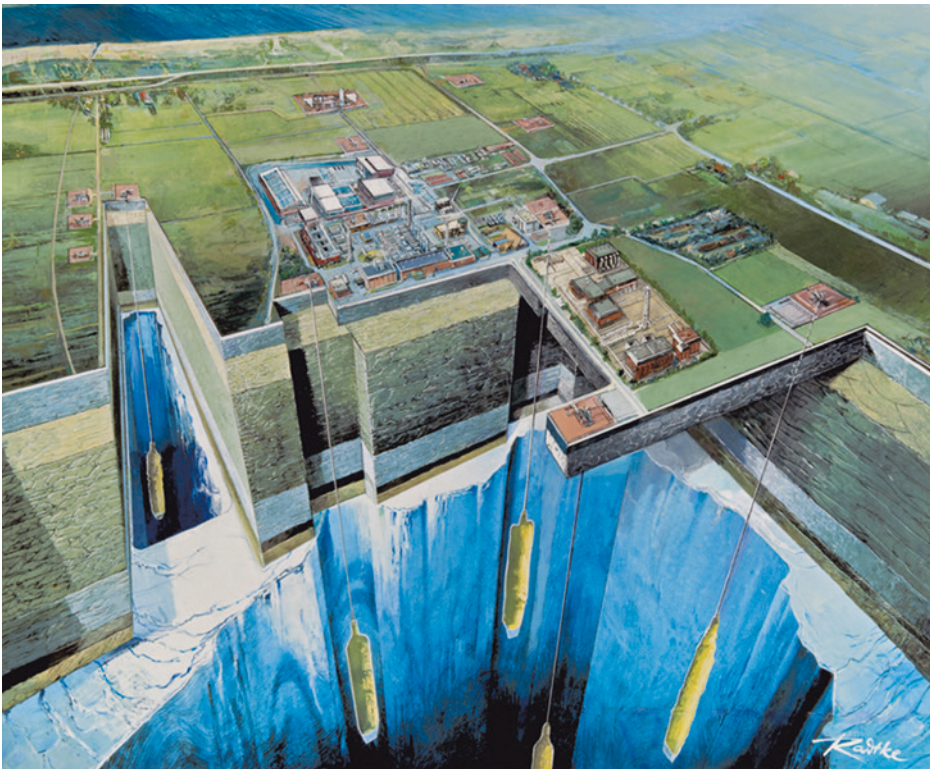


Abb. 1.5 Die Kavernen können in Salzformationen künstlich durch eine Ausspülung hergestellt werden. (Bild KBB Underground Technologies)

zwischen 60 und 180 bar an die 5 Mio. kg Wasserstoff gespeichert werden. Die spezifischen Investitionskosten für den Speicher liegen dabei bei 0,09 €/kWh und sind damit deutlich niedriger als die spezifischen Speicherkosten für andere Technologien, insbesondere anderer Stromspeicher. Wasserstoff kann durch Elektrolyse erzeugt werden und nach der Speicherung in Kombikraftwerken wieder verstromt werden. Die niedrigen Speicherkosten erlauben eine saisonale Speicherung. Damit kann diese Art des Speichers Kurzzeitspeicher wie Pumpspeicherkraftwerke, Druckluftspeicher oder auch Batterien sinnvoll ergänzen.

1.4 Einsatz des Wasserstoffes als chemischer Grundstoff und in Energiewandlungstechniken

Wasserstoff ist ein wichtiger Grundstoff in der chemischen und petrochemischen Industrie und hat eine Vielzahl von anderen Anwendungen in der Industrie. Im Jahr 2007 wurden etwa 600 Mrd. m³ Wasserstoff erzeugt. Abbildung 1.6 zeigt die Verteilung auf die einzelnen Bereiche.

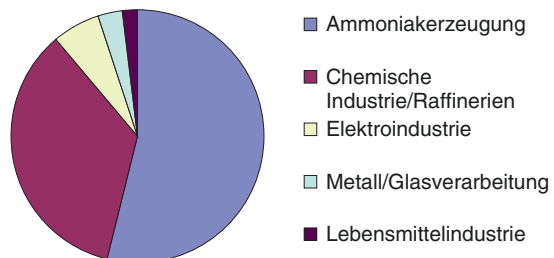
Die Herstellung von Ammoniak und die petrochemische Industrie sind die größten Wasserstoffverbraucher.

Als Energieträger wird Wasserstoff bis heute nicht eingesetzt. Trotzdem gibt es Ideen und Bemühungen in quasi allen Endenergiesektoren Wasserstoff einzusetzen. Hier sollen einige Beispiele genannt werden, die in Zukunft an Bedeutung gewinnen können.

1.4.1 Die Herstellung von Ammoniak

Ammoniak ist ein wichtiger Grundstoff in der chemischen Industrie, nicht zuletzt zur Herstellung von Düngemitteln. Die Nachfrage ist in den letzten Jahrzehnten drastisch gestiegen. Der zunehmende Wohlstand in Schwellenländern und die damit verbundenen Veränderungen des Lebensstils und der Ernährungsgewohnheiten führen mit großer Wahrscheinlichkeit auch langfristig zu einem weiteren Anstieg der Ammoniaknachfrage.

Abb. 1.6 Bis heute wird Wasserstoff hauptsächlich in der Ammoniakherzeugung und der Petrochemischen Industrie benötigt [14]



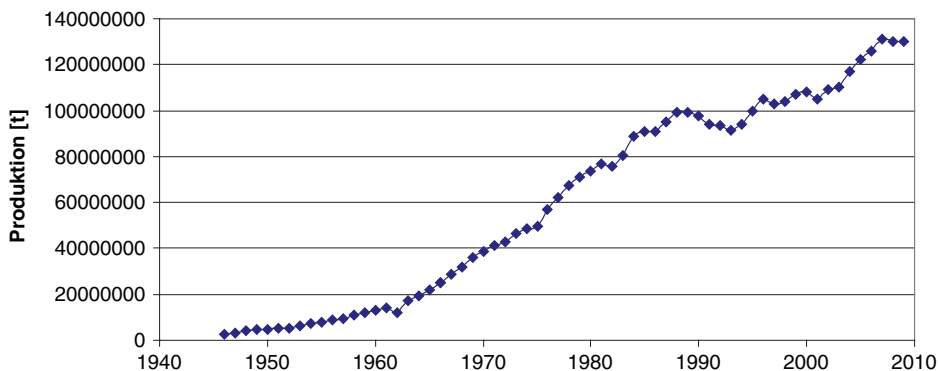


Abb. 1.7 Entwicklung der Produktion von Ammoniak in den letzten sechzig Jahren

Ammoniak wird nach dem sogenannten Haber-Bosch-Verfahren produziert. Die Reaktion erfolgt nach dem Schema $\text{N}_2 + 3\text{H}_2 \Rightarrow 2\text{NH}_3$. Die Ammoniakproduktion ist in den letzten sechzig Jahren dramatisch gestiegen und es werden noch erhebliche Steigerungsraten für die Zukunft erwartet (Abb. 1.7).

Wie der Reaktionsgleichung zur Erzeugung von Ammoniak entnommen werden kann, ist Wasserstoff ein wesentlicher Grundstoff bei der Erzeugung.

1.4.2 Wasserstoff in der petrochemischen Industrie

Raffinerien haben einen steigenden Bedarf an Wasserstoff. Dies ist bedingt durch strengere Umweltauflagen, hier insbesondere die Abtrennung von Schwefel und Stickstoff, und der verstärkte Einsatz von Schwerölen mit einem höheren Anteil an Kohlenstoff.

Wasserstoff wird in Raffinerien an mehreren Stellen eingesetzt. Zwei sollen hier explizit erwähnt werden. In modernen Hydrocrackern werden aus Schwerölen unter dem Einsatz von Wärme und Wasserstoff leichtere Ölsorten erzeugt. Langkettige Kohlenwasserstoffe mit einem niedrigen Anteil an Wasserstoff zu Kohlenstoff werden zu kurzkettigen Kohlenwasserstoffen mit einem höheren Anteil von Wasserstoff zu Kohlenstoff umgewandelt. Dem Prozess muss zusätzlicher Wasserstoff von außen zugeführt werden.

Die Anforderungen an den Schwefelgehalt in Treibstoffen steigen stetig und verlangen immer effizientere Methoden zur Schwefelabtrennung. In Raffinerien wird der Schwefel meist durch die Zuführung von Wasserstoff entfernt. Der Wasserstoff verbindet sich mit dem Schwefel zu Schwefelwasserstoff und kann dann dem Prozessstrom entnommen werden. Meistens wird dann in einem zweiten Schritt der Wasserstoff zum Teil wieder gewonnen.

Die Bereitstellung von Wasserstoff wird damit zu einem sehr wichtigen Schritt bei der Optimierung des Betriebes einer Raffinerie.

1.4.3 Wasserstoff und Brennstoffzellen

In Brennstoffzellen kann chemische Energie mit einem hohen Wirkungsgrad in elektrische Energie und Wärme umgewandelt werden. Wasserstoff bietet sich dabei in vielen Fällen als einziger Brennstoff an. Der entscheidende Vorteil der Brennstoffzelle gegenüber effizienten Großkraftwerken ist die Tatsache, dass der hohe Wirkungsgrad auch in kleinen Leistungseinheiten erreicht wird. Brennstoffzellen bieten sich damit als Versorgungsoptionen in vielen stationären und mobilen Anwendungen an.

Der theoretische erreichbare Wirkungsgrad der Brennstoffzellen ist der Quotient aus freier Gibbsscher Reaktionsenthalpie des Brennstoffes und der Enthalpie der Reaktion. Für die Reaktion von Wasserstoff zu Wasser ergibt sich damit ein Wirkungsgrad von 83 %. Verschiedene Verlustmechanismen reduzieren diesen Wert deutlich.

Brennstoffzellen bestehen aus einer Kathode und einer Anode, die durch einen Elektrolyten getrennt sind. Der Elektrolyt leitet die Ionen und blockiert die Elektronen. Die verschiedenen Brennstoffzellen unterscheiden sich hinsichtlich der Elektrolytmaterialien und als Folge davon in der Operationstemperatur der Zellen. Die am meisten diskutierten Brennstoffzellentypen sind die folgenden:

- AFC Alkaline Fuel Cell (Alkalische Brennstoffzelle)
- PAFC Phosphoric Acid Fuel Cell (Phosphorsaure Brennstoffzelle)
- PEMFC Proton Exchange Membrane Fuel Cell (Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle)
- MCFC Molten Carbonate Fuel Cell (Schmelzcarbonat-Brennstoffzelle)
- SOFC Solid Oxid Fuel Cell (Oxidkeramische Brennstoffzelle)

PEMFC und alkalische Brennstoffzellen arbeiten bei Temperaturen unterhalb von 100 °C. Die anderen Brennstoffzellen erreichen nur bei höheren Temperaturen eine für den Betrieb akzeptable Ionenleitfähigkeit im Elektrolyten. Die Betriebstemperaturen entscheiden nicht zuletzt auch über die Flexibilität der Anlagen.

Brennstoffzellen Typ	AFC	PEMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Elektrolyt	KOH	Festpolymer-Membrane	H ₃ PO ₄	Karbonat-Schmelze	Dotiertes Zirkonoxid
Transport-Ion	OH ⁻	H ⁺	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ₂ ⁺
el. Wirkungsgrad (H ₂) (%)	70 (O ₂) 55 (Luft)	70 (O ₂) 50 (Luft)	53 (Luft)	55–65 (Luft)	52–55 (Luft)
el. Wirkungsgrad (Erdgas) (%)	36	40	40–45	53–57	52–55
Betriebsweise	variabel	variabel	eher stationär	stationär	eher stationär

Insbesondere die PEMFC kann nur mit Wasserstoff betrieben werden. Dies führt dazu, dass in heutigen Anwendungen erst durch einen aufwendigen Reformationsprozess aus Erdgas Wasserstoff in einer hinreichenden Güte hergestellt werden muss.

1.4.4 Wasserstoff als Treibstoff für Autos

Der Einsatz von Wasserstoff in Autos wird schon sehr lange diskutiert. In vielen Testfahrzeugen ist die technische Machbarkeit dieser Lösung vielfach unter Beweis gestellt worden. Dabei sind zwei Ansätze zu unterscheiden. In einem evolutionären Ansatz wurde der Wasserstoff in Verbrennungsmotoren eingespeist. Damit trotz des beschränkten Nutzungsgrades trotzdem ansehnliche Reichweiten erreicht werden konnten, musste der Wasserstoff verflüssigt und in Kryotanks gespeichert werden. Dieser Ansatz wurde insbesondere von BMW verfolgt. Dabei wurden Autos der Siebener-Baureihe als Wasserstoffautos umgebaut. Die Entwicklung wurde aber beendet, da insbesondere in den USA Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor unabhängig vom Treibstoff nicht als Zero-Emission-Vehicles angesehen wurden.

Die alternative Entwicklung setzte auf einen alternativen Antriebsstrang beim Auto. Das Auto wird elektrisch angetrieben und der Strom wird über eine Brennstoffzelle bereit gestellt. Bei der Brennstoffzelle handelt es sich meist um eine PEM-Zelle. Der Wasserstoff kann dabei direkt aus Drucktanks bereitgestellt werden. In ersten Überlegungen sollte er an Bord durch Reformierung aus Methanol gewonnen werden. Diese Alternative wird aber heute nicht mehr intensiv weiterverfolgt.

Die Anwendung des Wasserstoffs in Fahrzeugen für den Straßenverkehr wird in Kap. 4 dieses Buches noch detailliert beschrieben.

1.4.5 Wasserstoff als Treibstoff für Flugzeuge

Im Luftverkehr gibt es nur wenige Alternativen zum Kerosin. Flüssige Treibstoffe aus Biomasse mögen nicht ausreichen, deswegen ist Wasserstoff eine wichtige Alternative.

Als besonderer Nachteil ergibt sich hier, dass insbesondere zur Speicherung von flüssigem Wasserstoff besondere Aufwendungen getroffen werden müssen, die zu einem höheren Platz- und Gewichtsaufwand führen. Daneben gelten im Flugverkehr ganz besondere Sicherheitsstandards. Der Brand des mit Wasserstoff gefüllten Luftschiffs Hindenburg hat gerade im Flugverkehr zu besonderen Empfindlichkeiten geführt.

Da im Luftverkehr ein sehr starker internationaler Wettbewerb herrscht, sind auch die Treibstoffkosten von erheblicher Bedeutung. Nur wenn Wasserstoff hier mit anderen Alternativen konkurrieren kann, ist ein Einsatz denkbar.

Neben diesen erheblichen Hürden bietet sich aber insbesondere im Flugverkehr ein großer Vorteil gegenüber vielen anderen Anwendungen. Die Infrastruktur zur Wasserstoffversorgung muss in einem ersten Schritt nur an wenigen großen internationalen

Flughäfen installiert werden. Im Prinzip würde es reichen, wenn zwei große Flughäfen sich zu diesem Schritt entschlossen.

Details zur Anwendung des Wasserstoffs in Flugzeugen finden sich in Kap. 5.

1.4.6 Wasserstoff als Zwischenprodukt in CCS-Kraftwerken

Eine Möglichkeit die CO_2 -Emissionen insbesondere bei der Verstromung von Kohle zu reduzieren besteht in der Abtrennung und nachfolgenden Speicherung des CO_2 . Bei der Abtrennung werden unterschiedliche Verfahren diskutiert. Eine Möglichkeit besteht darin, die Kohle erst zu vergasen und dann anschließend in einer Shift-Reaktion aus dem Synthesegas Wasserstoff und CO_2 zu erzeugen. Das CO_2 wird dann abgetrennt und einem unterirdischen Speicher zugeführt. Im Normalfall wird dann der Wasserstoff in einer umgebauten Gasturbine verbrannt. Der Gaskreislauf wird mit einem Dampfkreislauf gekoppelt, um einen hohen elektrischen Wirkungsgrad zu erreichen. Kraftwerke, sogenannte Internal Gasification Combined Cycle (IGCC)-Plants, wurden schon gebaut und betrieben. Im Prinzip sind alle Komponenten für ein solches Kraftwerk vorhanden, auch wenn der Betrieb existierender IGCC-Kraftwerke nicht ohne Probleme ist.

1.4.7 Wasserstoff in der Industrie am Beispiel der Stahlerzeugung

Ein weiteres Beispiel, bei dem Wasserstoff in einer Art Zwischenkreis eine große Bedeutung gewinnen kann, ist die Eisenerzeugung in Hochöfen. In Hochöfen wird aus Eisenerz unter der Zugabe von Kohle und Koks Roheisen gewonnen. Dabei kommt dem Kohlenstoff eine doppelte Bedeutung zu: zum einen als Brennstoff zur Erreichung der notwendigen Prozesstemperaturen, zum anderen als Reduktionsmittel zur Bindung des Sauerstoffs im Eisenerz. Beide Aufgaben könnten im Prinzip auch durch Wasserstoff erfüllt werden. Dabei muss natürlich eine neue Prozessführung entwickelt werden.

Für die Einführung von Wasserstoff ist eine solche Möglichkeit aber trotzdem von großer Bedeutung. Die Hochöfen nehmen schon heute am Emissionshandel teil. Neben den Brennstoffkosten werden langfristig auch Emissionskosten anfallen, die die Wirtschaftlichkeit der Erzeugung in Frage stellen können. Die Nutzung von Wasserstoff kann hier eine Alternative bereit stellen und den Unternehmen eine Möglichkeit schaffen, die Emissionen deutlich zu reduzieren. Damit eine solche Möglichkeit realistisch wird, müssen erhebliche Elektrolysekapazitäten bereit stehen. Aber hier ergibt sich wieder wie im Flugverkehr der Vorteil, dass die Wasserstoffinfrastruktur nur in einem beschränkten Betriebsbereich aufgebaut werden muss.

1.4.8 Wasserstoff als Grundstoff zur Methan- und Methanolerzeugung

Die Probleme bei der Speicherung und dem Transport von Wasserstoff haben immer wieder zu Überlegungen geführt, den Wasserstoff weiter zu verarbeiten und entweder Methan oder Methanol zu erzeugen. Dazu ist neben dem Wasserstoff eine Kohlenstoffquelle notwendig. Bei dieser Quelle darf es sich natürlich nicht um konventionelle fossile Energieträger handeln, da dann zumindest für den Klimaschutz kein Mehrwert erzeugt würde. Deswegen muss Kohlenstoff aus einem geschlossenen System bereit gestellt werden. Dabei bieten sich zwei Möglichkeiten besonders an.

- 1) Der Kohlenstoff wird aus dem CO_2 in der Atmosphäre gewonnen. Dies ist im Prinzip möglich, aber sehr aufwendig und mit erheblichen Kosten verbunden.
- 2) Der Kohlenstoff wird aus der Verbrennung von Biomasse gewonnen. Dieser Kohlenstoff ist von der Pflanze vorher aus der Atmosphäre entzogen worden, damit ist hier auch ein geschlossener Kreislauf gewährleistet.

Die Erzeugung von Methan erfolgt dabei in zwei Schritten. In einem ersten Schritt wird Wasserstoff erzeugt. In einem zweiten Schritt wird dann aus dem Wasserstoff durch die Zugabe von CO_2 in einer katalytischen Reaktion Methan produziert. Die einzelnen Prozessschritte sind hinlänglich bekannt. Die Methanolerzeugung erfolgt analog.

Der Vorteil besteht nun darin, dass im Fall von Methan die existierende Erdgasinfrastruktur genutzt werden kann, um das Erdgas zu transportieren, zu speichern und bei verschiedenen Endverbrauchern zu nutzen. Methanol könnte im Prinzip wie Benzin verteilt und genutzt werden. Der erhebliche Nachteil dieser Verfahren ist der niedrige Nutzungsgrad bei der Erzeugung von Methan und Methanol und die Bereitstellung der CO_2 -Quelle.

1.5 Wasserstoffwirtschaft: Konkurrenten und mögliche Einbindung

Erdölprodukte sind noch immer die dominanten Endenergieträger, gefolgt von Strom und Erdgas. Wasserstoff wird als Konkurrent für alle drei Endenergieträger diskutiert.

Die Einführung der Wasserstoffwirtschaft wird oft als zentraler Schritt auf dem Weg zu einer nachhaltigen Energiewirtschaft gesehen. Statt hier eine Prognose abzuliefern, welche Bedeutung Wasserstoff in Zukunft spielen wird, sollen hier drei mögliche Entwicklungspfade diskutiert werden:

- Wasserstoff behält die Bedeutung als Grundstoff in der chemischen Industrie, weitere bedeutende Anwendungen kommen nicht dazu.
- Wasserstoff dringt in einzelne Bereiche wie die Stromspeicherung, die Stahlerzeugung oder den Flugverkehr ein.
- Wasserstoff wird ein Endenergieträger wie heute Erdgas und wird sowohl über Pipelines und mit Schiffen weiträumig transportiert als auch in der Fläche verteilt, damit viele private, gewerbliche und industrielle Kunden Zugang zu Wasserstoff bekommen.

Dabei können diese Entwicklungspfade auch nur drei verschiedene Zeitpunkte beschreiben, die nacheinander realisiert werden. Die drei Varianten sollen kurz diskutiert werden und dabei in einen größeren Zusammenhang gestellt werden. Um eine bessere Einordnung in mögliche Zukunftsentwicklungen darzustellen, sollen Alternativen zu einer Wasserstoffwirtschaft diskutiert werden. Dabei sollen vier wesentliche Alternativen betrachtet werden:

- Erhebliche Steigerungen in der Energieeffizienz verbunden mit Einschränkungen an Komfort und Lebensstil erlauben ein zweites Leben der fossilen Energien. Die Abtrennung von CO₂ in Kohlekraftwerken erlaubt eine langfristige Stromerzeugung aus Kohle.
- Strom wird der dominante Endenergieträger. Ein rasanter Ausbau der erneuerbaren Energien, insbesondere von Wind und Solarenergie, führt zu einer überwiegenden Produktion von Strom. Transkontinentale Stromverbünde und moderne Smart-Grid-Technologien mit einer erheblichen Ausweitung der Elektrothermie in der Industrie erlauben eine überwiegende Versorgung des Endenergiesektors mit Strom.
- Der Ausbau der erneuerbaren Energien erfolgt auf nationaler und regionaler Ebene. Eine erhebliche Nachfrage nach Speichern führt zur Einführung von Wasserstoff erst als Sekundärenergieträger in Speichern, dann auch als Endenergieträger z. B. im Verkehr.
- Wasserstoff wird zum bedeutenden Sekundärenergieträger, wird aber dann zu Methan oder Methanol verarbeitet. Damit muss keine weitere Infrastruktur aufgebaut werden.

Die Entwicklung dieser Alternativen wird natürlich darüber entscheiden, welche der drei Alternativen für die Wasserstoffwirtschaft sich durchsetzen wird. Im Folgenden soll insbesondere am Beispiel des Verkehrs beschrieben werden, wie eine solche Entwicklung aussehen kann.

1.5.1 Wasserstoff und Verkehr

Der Wettstreit zwischen den vier sehr plakativ formulierten Alternativen soll hier am Beispiel des Verkehrs erläutert werden. Dabei soll der Straßen-, der Schienen- und der Langstreckenflugverkehr betrachtet werden. Die Beschreibung ist sehr qualitativ und muss deswegen mit der nötigen Vorsicht betrachtet werden.

Auto Die Entwicklung im Straßenverkehr kann sich in den nächsten Jahren in sehr verschiedene Richtungen entwickeln. Es sollen drei mögliche prototypische Entwicklungen kurz angesprochen werden, die ganz verschiedene Auswirkungen auf die Wahl der Endenergie hätten.

- 1) Die Hybridtechnik setzte sich durch. Verbrennungs- und Elektromotor verbinden in dieser Technik ihre Vorteile. Nachteil sind höhere Anschaffungskosten und eine höhere Komplexität. Neben der neuen Antriebstechnik setzten sich neue Materialien und reduzierte Raum- und Leistungsangebote durch. Der Verbrauch dieser Fahrzeuge ist deutlich niedriger als heute. Im Grenzbereich sind (1–2) l/(100 km) Autos möglich. Die drastische Reduktion des Verbrauches macht weltweit einen deutlichen Anstieg der Fahrleistung möglich, ohne dass der Verkehrssektor eine stärkere Energienachfrage verursachen würde. Eine neue Infrastruktur muss dafür nicht geschaffen werden, bis auf eine Möglichkeit, die Batterien der Plug-In-Hybride auch zu Hause wieder aufzuladen.
- 2) Elektroautos setzen sich auf kurzen Strecken < 150 km durch. Hochgeschwindigkeitszüge decken einen erheblichen Anteil der längeren Strecken ab bzw. konventionelle Autos mit Verbrennungsmotor stehen bereit und können über moderne Vermietungssysteme schnell und effizient genutzt werden. In diesem Fall muss sukzessive eine Ladeinfrastruktur aufgebaut werden, wobei dies nur nach und nach geschehen muss, da die Autos zuerst immer zu Hause geladen werden. In großen Ballungszentren entwickeln sich Parkhäuser mit günstigen Lademöglichkeiten.
- 3) Die Brennstoffzelle setzt sich als Antriebstechnik durch. Die Kosten werden deutlich reduziert und die Lebensdauern verlängert. Der Aufbau der Wasserstoffinfrastruktur geschieht erst in wenigen Zentren und entlang viel befahrener Autobahnen. Der Aufbau der Wasserstoffwirtschaft geschieht dabei nicht aus dem Nichts. Wasserstoff wurde schon vorher genutzt, um saisonale Stromspeicherung zu ermöglichen. Die Infrastruktur wird zuerst aus diesen Speicherzentren beliefert.
- 4) Bei der letzten Alternative sind die Veränderungen weniger markant. Nur langsam setzen sich neue Treibstoffe durch, dabei spielt Erdgas eine zunehmende Rolle im Verkehr. Durch langfristig steigende Preise bei Treibstoffen und Erdgas wird es immer attraktiver, das Erdgas durch Methan aus Biomasse oder synthetisch über den Umweg der Wasserstoffherzeugung zu erzeugen. Die Infrastruktur ändert sich dabei nur langsam, bis auf die stärkere Durchdringung mit Erdgasautos.

Für alle vier Entwicklungen gibt es heute Beispiele in der deutschen Autoindustrie. VW setzt mit der Kleinserie XL 1 auf die Effizienzsteigerung, BMW mit dem i3 auf das rein elektrische betriebene Auto, Daimler mit dem Mercedes Benz F-Cell auf das Brennstoffzellenauto und Audi mit dem Windgas-Projekt auf die Erzeugung synthetischer Brennstoffe.

International sind auch schon Brennstoffzellenautos auf dem Markt. Toyota bietet mit dem Mirai und Hyundai mit dem ix35 Fuel Cell schon heute Brennstoffzellenfahrzeuge mit Wasserstoff als Treibstoff an.

Flugzeug Der Kurz- und Mittelstreckenflugverkehr dominiert in Europa den Flugverkehr. Doch das Beispiel Frankreichs zeigt, dass ein Ausbau der Hochgeschwindigkeitszüge die Nachfrage nach Flugverkehr wieder senkt. Daraus lassen sich zwei sehr unterschiedliche Entwicklungen ableiten. Langfristig wird der Kurz- und Mittelstreckenflugverkehr durch die Hochgeschwindigkeitszüge ersetzt. Flugverkehr beschränkt sich dann auf die transkontinentalen Flüge. Oder der Flugverkehr wird auf nachhaltige Treibstoffe umgestellt und kann auch in Zukunft die Kurz- und Mittelstrecken optimal bedienen. Bei Flugzeugen wird nur eine evolutionäre Entwicklung der Wirkungsgrade durch z. B. die konsequente Ausweitung des Leichtbaus und eine bessere Anpassung der Flugzeuggröße an die Bedürfnisse erwartet.

Wie könnten sich solche Entwicklungen auf die Nachfrage nach Wasserstoff auswirken? Die logistische Bereitstellung von Wasserstoff für den Flugverkehr stellt sich dabei deutlich einfacher dar, als z. B. im Straßenverkehr, da hier in einem ersten Schritt nur wenige große Flughäfen mit der Tankinfrastruktur ausgerüstet werden müssten. Es müssen aber erst die technischen Hürden der Speicherung überwunden werden, die Sicherheitsbedenken, die gerade im Flugverkehr besonders hoch sind, überwunden werden und Wasserstoffkosten erreicht werden, die wettbewerbsfähig sind.

Dann könnte man aber sehr wohl an eine Ausweitung der Wasserstoffnutzung auf Fahrzeuge auf dem Flughafen und eventuell Taxis denken.

1.5.2 Wasserstoff und Fusion: ein Seitenblick

Am Ende soll noch eine mögliche Bedeutung des Wasserstoffs in der Energiewirtschaft ganz kurz erwähnt werden, nämlich in der Kernfusion. Bei der Kernfusion wird durch die Verschmelzung von den beiden Wasserstoffisotopen Deuterium und Tritium Energie freigesetzt. Bei der Reaktion werden ein Heliumkern und ein Neutron erzeugt. Das Neutron wird unter anderem genutzt, um aus Lithium Tritium zu erbrüten. Die Kernfusion ist eine sehr langfristig angelegte Forschungsanstrengung. Mit dem Bau von ITER besteht die Möglichkeit, dass die prinzipielle Machbarkeit der Fusion bald bewiesen wird.

Die Kernfusion hat langfristig die Möglichkeit einen ganz besonderen Beitrag zur Energieversorgung zu leisten. Sollte dies gelingen, dann wäre Wasserstoff nicht nur eine Sekundärenergieträger, sondern auch ein Primärenergieträger.

1.6 Zusammenfassung und Ausblick

Wasserstoff war, ist und bleibt ein wichtiger Grundstoff für die chemische Industrie. Allein die Bereitstellung des Wasserstoffes für die Ammoniakherstellung wird langfristig außerordentliche Anstrengungen verlangen. Dabei müssen neue Herstellungsverfahren entwickelt werden bzw. die Elektrolyse muss deutlich mehr als 4 % des Wasserstoffes bereit stellen können.

Die fossilen Energieträger scheiden langfristig als Wasserstoffquelle aus. Deswegen müssen neue Quellen gefunden werden. Dabei kommt zuerst der Elektrolyse mit Strom aus erneuerbaren Energien eine Schlüsselrolle zu. Im Gegenzug kann die vermehrte Nutzung der Elektrolyse die Einführung fluktuierender erneuerbarer Energien deutlich erleichtern. Hier kann sich langfristig ein neues technisches Paradigma herausbilden.

Neben der Elektrolyse gibt es aber noch andere vielversprechende Ansätze zur Erzeugung von Wasserstoff, seien es thermochemische Verfahren, sei es das „künstliche Blatt“ oder die Herstellung mit Hilfe von Algen.

Die Nutzung von Wasserstoff kann in vielen Bereichen, sei es im Verkehr, in der Industrie oder im Haushalt die Nachhaltigkeit des Energiesystems steigern. Das Brennstoffzellenauto ist ein deutliches Beispiel dafür.

Literatur

1. Grübler, A.: *Technological Change*, International Institute of Applied System Analysis. Cambridge University Press, Laxenburg (1998)
2. Erdmann, G., Zweifel, P.: *Energieökonomik: Theorie und Anwendung*. Springer, Berlin (2008)
3. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi): *Zahlen und Fakten, Energiedaten* (2013)
4. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): *Reserven, Ressourcen, Verfügbarkeit*. Hannover (2009)
5. *Energy 2020: North America, the New Middle East*. Citi GPS: Global Perspectives & Solutions (2012)
6. FAZ: Die neuen Scheichs aus Amerika, FAZ, 24. Nov. 2012
7. Tans, P.: NOAA/ESRL. www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/
8. Blaum, K., Schatz, H.: Kernmassen und der Ursprung der Elemente. *Phys. J.* **5**(2) (2006)
9. Geitmann, S.: Wasserstoff und Brennstoffzellen, Die Technik von Morgen. Hydrogeit, Kremen (2004)
10. Stoll, R.E., von Linde, F.: Hydrogen – what are the costs? *Hydrocarbon processing* (December 2000)
11. Melis, A., Happe, T.: Hydrogen Production. Green algae as a source of energy. *Plant Physiol.* **127** (2001)
12. Robert, F.: Service. Turning over a new leaf. *Science* **334** (2011)
13. Angeloher, J., Dreier, Th., Langgassen, W., Saller, A.: Erzeugung und Anwendung von Wasserstoff aus Solarenergie. Interner Bericht der TU-München und der Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München (1999)
14. Wawrzinek, K., Keller, C.: *Industrial Hydrogen Production & Technology*. FunchHy-Workshop. Karlsruhe (2007)



<http://www.springer.com/978-3-662-53359-8>

Wasserstoff und Brennstoffzelle

Technologien und Marktperspektiven

Töpler, J.; Lehmann, J. (Hrsg.)

2017, XII, 368 S. 161 Abb., 113 Abb. in Farbe. Book +
eBook., Hardcover

ISBN: 978-3-662-53359-8